

Seu Futuro é a

Eletrônica

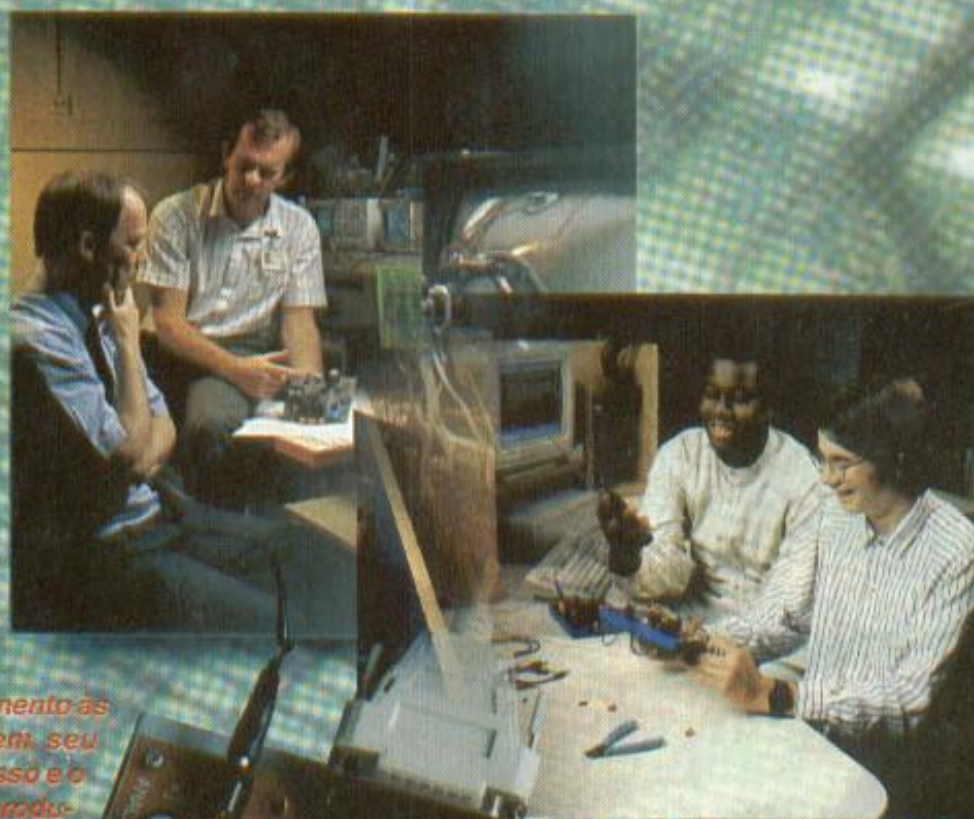
CURSO BÁSICO DE ELETRÔNICA APLICADA

VOLUME I

Eletrônica Básica 1

Introdução

A eletrônica invadiu, virtualmente, todos os campos da atividade humana e transformou para sempre nossa forma de viver, trabalhar e de nos comunicar com os demais. A eletrônica nos proporciona entretenimento, comodidade e informação e, em geral, faz com que nossa vida diária seja mais fácil, interessante e produtiva. A eletrônica é também uma área inesgotável de possibilidades, oportunidades e satisfações. Todas elas agora estão ao seu alcance. A decisão é sua.



A eletrônica oferece grandes oportunidades de trabalho e desenvolvimento as pessoas capacitadas em seu conhecimento. O progresso e o uso de novos sistemas, produtos e processos garantem uma demanda permanente por indivíduos capacitados.

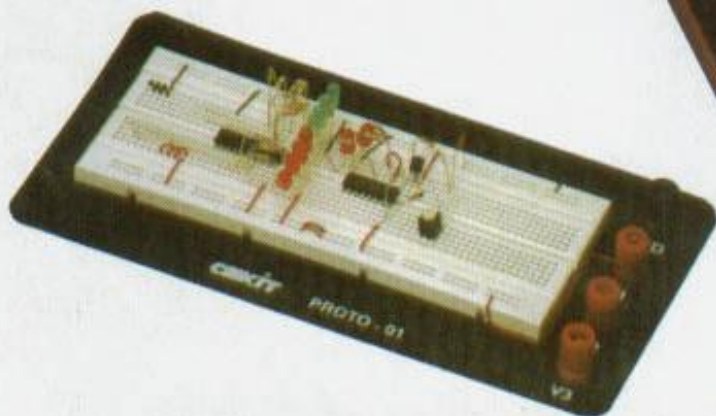
A eletrônica trata fundamentalmente do desenvolvimento e pesquisa de componentes e circuitos para manipular os elétrons livres presentes na matéria em diversas formas. O estudo dos componentes, assim como as análises, projeto e construção de circuitos, ocupam um lugar privilegiado neste curso.





Conscientes da importância da eletrônica no mundo atual e da necessidade de estarmos adequadamente preparados para enfrentar as questões apresentadas pelo desenvolvimento vertiginoso desta ciência, a **CEKIT S. A.**, empresa líder na educação e divulgação da tecnologia, lança seu **Curso Prático de Eletrônica Moderna**, uma obra absolutamente inédita em seu gênero e que lhe proporcionará grandes benefícios pessoais e econômicos, bem como a oportunidade de participar ativamente neste fascinante campo do conhecimento.

O Curso Prático de Eletrônica Moderna da CEKIT é um programa integral de 40 fascículos de circulação semanal. Os fascículos podem ser encadernados em cinco volumes. Cada fascículo possui três seções independentes: Eletrônica Básica, Eletrônica Prática e Projetos.



A quem se dirige

O Curso Prático de Eletrônica Moderna da CEKIT é dirigido a hobbistas, estudantes, professores, técnicos, tecnólogos, engenheiros e, de um modo geral, a todas as pessoas que desejam iniciar-se no conhecimento da eletrônica, fazer da mesma uma profissão para seu futuro, realizar seus próprios projetos ou contar com um texto de consulta atualizado e resumido.

Também será de grande ajuda para instituições educacionais conscientes da imperiosa necessidade de incluir a eletrônica dentro de seus programas acadêmicos, bem como para entidades industriais, comerciais ou de outra natureza interessadas em qualificar seu pessoal no conhecimento de componentes e técnicas, na interpretação de planos, no projeto de circuitos que resolvem necessidades específicas, no manuseio de ferramentas e instrumentos e em outros aspectos-chave tratados neste curso com profissionalismo, metodologia e senso prático.

Continuando com a metodologia de “aprender fazendo” própria da CEKIT, o **Curso Prático de Eletrônica Moderna** foi escrito e organizado de forma muito simples, agradável e didática, com parágrafos curtos e resumidos, e centenas de fotografias e ilustrações que esclarecem as idéias expostas e tornam mais fácil e agradável sua assimilação. Como complemento imprescindível, se incluem numerosos experimentos, projetos, exercícios resolvidos, circuitos de aplicação, exemplos de projetos, dicas práticas, etc.



**Faça seus próprios
consertos**

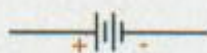
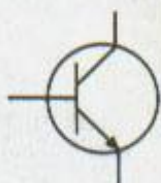
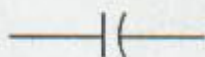
**Construa seus
próprios projetos**

**Prepare-se
para o futuro**

**Melhore suas
expectativas
profissionais**

**Atualize seus
conhecimentos**

O que você vai aprender



O Curso Prático de Eletrônica Moderna da CEKIT S. A. o habilitará, tanto em nível teórico quanto no prático, em todos os aspectos básicos da eletrônica necessários para que você se desenvolva como um profissional competente neste campo. A seguir, estão alguns dos conhecimentos e habilidades gerais que você aprenderá e adquirirá com este curso:

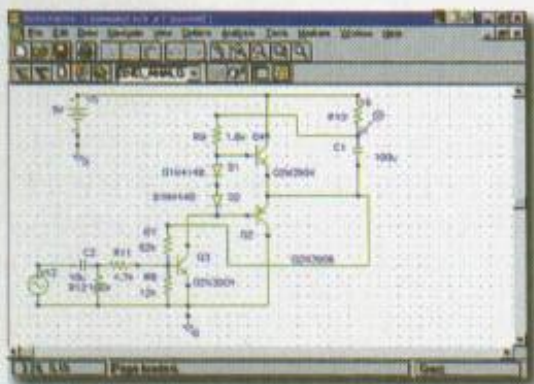
✓ Conhecerá os principais componentes utilizados na eletrônica, desde os mais simples como resistências, capacitores e bobinas, até os mais avançados como semicondutores, transdutores e circuitos integrados. Os componentes são os blocos construtivos básicos de todos os circuitos e sistemas eletrônicos. Você aprenderá a identificá-los pelos seus nomes, símbolos, características e parâmetros; a experimentar com eles, a selecioná-los tecnicamente para seus projetos ou reparos, a utilizar manuais de componentes, a manipulá-los de forma segura e racional e a combiná-los para formar circuitos que realizem funções específicas.

✓ Conhecerá os principais tipos de circuitos utilizados em eletrônica, desde os mais simples, tais como os retificadores, os amplificadores e os osciladores, até os mais avançados como os PLLs, as memórias e os conversores A/D. Os circuitos, formados por associações de componentes, constituem o núcleo da tecnologia eletrônica. De fato, a eletrônica trata fundamentalmente do estudo, pesquisa, desenvolvimento e construção de circuitos. Você aprenderá a interpretar esquemas, a reconhecer estruturas, a realizar análises e projetos, a adaptar circuitos existentes a necessidades específicas e a combinar circuitos para formar sistemas completos.

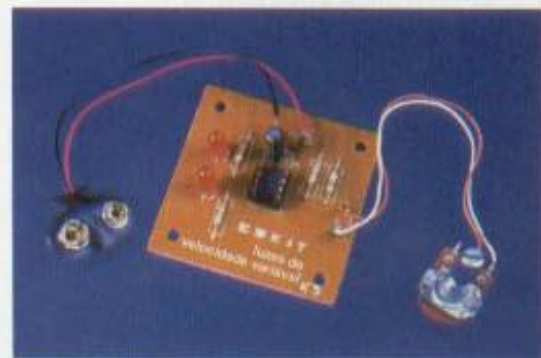
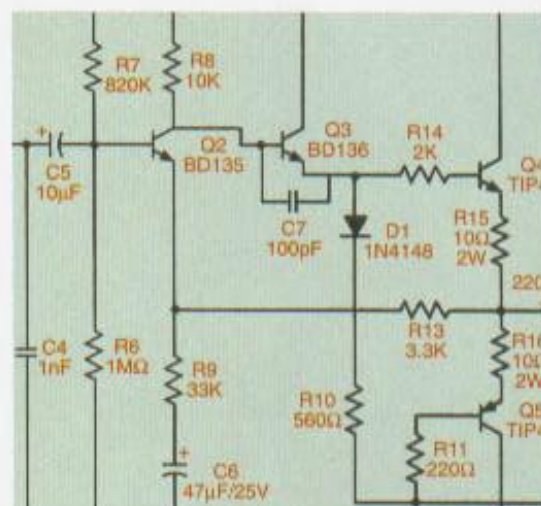
Os componentes são os elementos essenciais dos circuitos eletrônicos. Neste curso você aprenderá a identificá-los, a interpretar suas características e a utilizá-los de forma prática.

✓ Conhecerá os principais tipos de circuitos integrados analógicos e digitais utilizados nos sistemas eletrônicos, incluindo amplificadores operacionais, reguladores de voltagem, amplificadores de áudio, portas lógicas, contadores, registros, etc. Os circuitos integrados ou *chips* são a base da tecnologia eletrônica moderna e os principais responsáveis pelo alto grau de miniaturização alcançado pelos sistemas eletrônicos. Você aprenderá a utilizá-los de forma prática, a interpretar as folhas de dados dos fabricantes, a configurá-los para que realizem funções determinadas e a reconhecer quando devam ser substituídos.

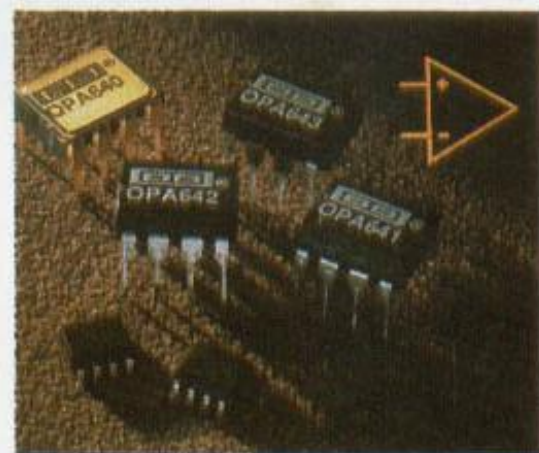
✓ Conhecerá os fundamentos de análises e projetos de circuitos eletrônicos por computador (CAD). O computador é uma ferramenta essencial em todas as atividades humanas e a eletrônica não é exceção. Através de exemplos simples, baseados em programas reais facilmente acessíveis, você se familiarizará com as principais técnicas utilizadas pelos engenheiros para simular em um computador pessoal todas as etapas envolvidas no projeto de um circuito eletrônico, desde sua concepção teórica até sua conversão em um produto final, passando pela seleção e interconexão de componentes, os testes de funcionamento, etc.



Os circuitos integrados estão presentes em todos os tipos de equipamentos eletrônicos. Neste curso você aprenderá a utilizá-los, selecioná-los e a interpretar suas características e especificações.



Os circuitos são o coração dos sistemas eletrônicos. Neste curso você aprenderá a analisá-los, desenhá-los e convertê-los em produtos funcionais



Como o curso está estruturado

O Curso Prático de Eletrônica Moderna da CEKIT é um programa teórico-prático integral de 33 lições teóricas, 21 atividades práticas e 32 projetos de construção distribuídos em 40 fascículos de circulação semanal e encadernáveis em cinco volumes. Cada fascículo está dividido em três seções independentes chamadas **Eletrônica Básica**, **Eletrônica Prática** e **Projetos**, cada qual com propósitos bem definidos.

Seção de Eletrônica Básica

Desenvolve os conteúdos teóricos do curso em forma de lições ou capítulos. Inclui, além das explicações correspondentes, experiências, exercícios, exemplos de projetos, aplicações práticas, notas complementares, glossários, fotografias, esboços e outras ajudas metodológicas. Está dividida em três áreas gerais chamadas **Componentes e Teoria de Circuitos**, **Circuitos Analógicos e Digitais**, e **Eletrônica Aplicada**, as quais formam, respectivamente, os volumes 1, 2 e 3 da obra.

Visto que a experimentação é um fator chave em qualquer disciplina científica ou tecnológica, ao longo deste curso se realizam numerosos **experimentos**, guiados passo a passo, com a finalidade de reforçar, de forma prática, os conhecimentos imediatamente aprendidos ou comprovar resultados gerais. Os experimentos são em geral muito simples e todos utilizam como ferramenta básica uma mesa de testes sem soldagem ou *protoboard*. Alguns requerem o uso de instrumentos sensíveis, como um multímetro ou um osciloscópio.

Explicações centrais didáticas e resumidas, redigidas numa linguagem fácil e clara, envolvendo um mínimo de matemática.

Notas complementares, destacadas sobre fundo amarelo, para esclarecer ou ampliar conceitos recém-introduzidos, apresentar dados históricos, sugerir leituras adicionais, etc.

Vários desenhos explicativos para mostrar detalhes construtivos, facilitar montagens e apoiar explicações teóricas.

Os temas desta seção são identificados em cada fascículo pela cor vermelha da barra superior e dos títulos.

Experimento 2.2

O capacitor como elemento armazenador de carga

Objetivos

- Verificar experimentalmente a capacitância de um capacitor.
- Verificar a influência da geometria e do dielétrico na capacitância.
- Verificar a influência da temperatura na capacitância.
- Verificar a influência da frequência na capacitância.
- Verificar a influência da tensão na capacitância.

2.4 Resistências fixas ou resistores

Os resistores são componentes que se opõem à passagem de corrente elétrica. A oposição que oferecem é denominada resistência elétrica e é medida em ohms (Ω).

Em geral, todos os materiais oferecem oposição à passagem de corrente elétrica. Os materiais que oferecem oposição à passagem de corrente elétrica são denominados materiais condutores e os materiais que oferecem oposição à passagem de corrente elétrica são denominados materiais isolantes.

Indicador de tensão

A unidade de medida da tensão é o volt (V).



Figura 2.2: Circuito elétrico

2.5 Capacitores

Os capacitores são componentes que armazenam carga elétrica. A capacidade de armazenar carga elétrica é denominada capacitância e é medida em farads (F).

Os capacitores são classificados em capacitores eletrolíticos, capacitores de filme e capacitores de cerâmica. Os capacitores eletrolíticos são os mais comuns e são utilizados em circuitos de baixa frequência. Os capacitores de filme são utilizados em circuitos de alta frequência. Os capacitores de cerâmica são utilizados em circuitos de alta frequência e em circuitos de baixa frequência.

Indicador de corrente

A unidade de medida da corrente é o ampère (A).



Figura 2.3: Circuito elétrico

2.6 Indutores

Os indutores são componentes que armazenam energia magnética. A indutância é medida em henries (H).

Os indutores são classificados em indutores de bobina e indutores de núcleo. Os indutores de bobina são os mais comuns e são utilizados em circuitos de baixa frequência. Os indutores de núcleo são utilizados em circuitos de alta frequência.

Indicador de potência

A unidade de medida da potência é o watt (W).

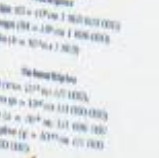


Figura 2.4: Circuito elétrico



Figura 2.1: Circuito elétrico

Experimentos interessantes destacados no fundo verde, com objetivos claramente especificados, instruções passo a passo, listas completas de materiais, desenhos explicativos, conclusões, etc.

Vasto material fotográfico para familiarizar o leitor com a aparência física das peças, o aspecto final dos circuitos e o verdadeiro meio da eletrônica e suas aplicações.

Notas metodológicas, ressaltadas em texto azul, para familiarizar o leitor com os sistemas de unidades, técnicas matemáticas e outros aspectos formais.

Grande variedade de exercícios e problemas resolvidos para explicar a aplicação prática de conceitos e fórmulas.

Seção de Eletrônica Prática

O objetivo desta seção é explicar e mostrar, da forma mais detalhada possível, as técnicas básicas necessárias para montagem, teste e execução de projetos eletrônicos. Dentro dos temas incluem-se as técnicas manuais de montagem e soldagem; incluem-se igualmente o projeto e fabricação de circuitos impressos e das caixas para projetos, chamadas normalmente de *chassis*. Também tem-se uma descrição do funcionamento e utilização correta das principais ferramentas utilizadas na prática da eletrônica, incluindo os instrumentos de medida mais comuns.

Em poucas palavras, esta seção contém todos os aspectos necessários para fazer deste curso o principal meio de capacitação para o desenvolvimento de produtos eletrônicos. A metodologia utilizada, na qual se combinam as explicações teóricas com os exercícios práticos, permite garantir um aprendizado fácil e rápido que, apoiado no material gráfico, nos conduz pelos caminhos da ciência eletrônica.



Pode-se identificar esta seção em cada fascículo pela cor roxo da barra superior e dos títulos.

Quando se quer chamar a atenção sobre um fato importante ou se quer esclarecer algum aspecto específico, utilizam-se cores diferentes das que se encontram normalmente ao longo do texto.



Cada fotografia ou desenho inclui algum dado de interesse, que faz referência à foto em particular ou ao tema a que pertence.

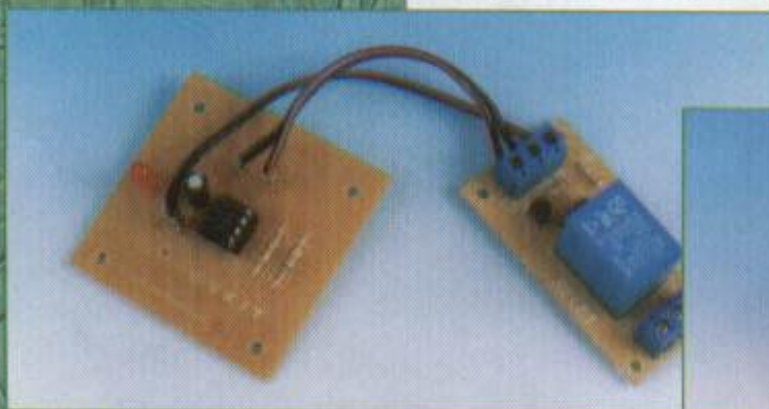
As explicações teóricas oferecem as bases necessárias para a melhor compreensão das técnicas utilizadas em eletrônica.

O material gráfico é um dos principais auxílios para a apresentação das diferentes técnicas. Com ele se pretende recriar um ambiente real de trabalho que permita obter esclarecimento sobre o tema de estudo.

Seção de Projetos

Um dos aspectos que mais chama a atenção dos hobbistas e dos estudantes de eletrônica é a possibilidade de realizar experimentos e projetos reais. Por isso, incluímos a seção de Projetos do Curso Prático de Eletrônica Moderna, na qual o leitor encontrará um grande número de projetos cujo funcionamento foi comprovado e dos quais se oferece toda a informação necessária, como o desenho ou diagrama esquemático, o guia de montagem dos componentes no circuito impresso e a explicação teórica. Além disso, contém uma grande quantidade de fotografias e desenhos que tornam mais simples a implementação dos projetos.

Dentro dos aparelhos que se constroem nesta seção encontram-se vários instrumentos para utilização em oficina ou laboratório, alguns que têm sua principal utilidade em casa ou no escritório, outros que servem para o entretenimento ou cumprem um papel didático, etc. Cada um deles oferece informações muito valiosas e facilita o processo para que o leitor possa obter uma formação integral.



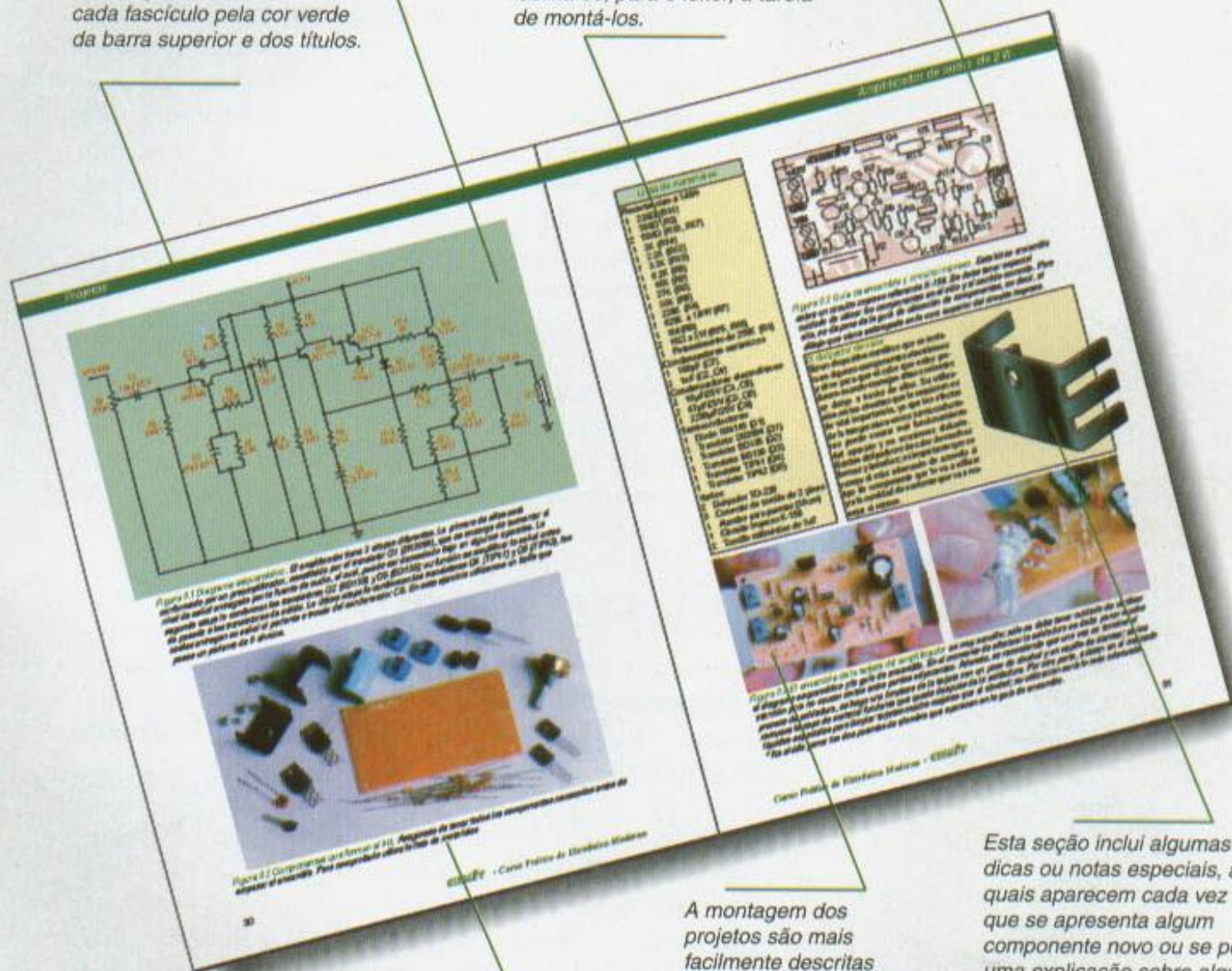
A CEKIT S.A e seus distribuidores possuem para a venda, todos os kits dos projetos publicados nesta obra.

O diagrama esquemático é um dos principais itens incluídos no projeto.

Todos os projetos apresentados nesta seção incluem o guia de montagem das peças sobre o circuito impresso.

Esta seção é identificada em cada fascículo pela cor verde da barra superior e dos títulos.

Cada projeto inclui a lista de materiais exigidos. Com isso facilita-se, para o leitor, a tarefa de montá-los.



As explicações que são encontradas no desenvolvimento do projeto fazem com que o leitor compreenda da maneira mais simples possível qual é a essência do mesmo.

A montagem dos projetos são mais facilmente descritas quando nos baseamos nas fotografias.

Esta seção inclui algumas dicas ou notas especiais, as quais aparecem cada vez que se apresenta algum componente novo ou se pede uma explicação sobre algum tema que não tenha sido visto antes.

Qual a utilidade deste curso?

O **Curso Prático de Eletrônica Moderna** da **CEKIT**, complementado com o apoio permanente de nossa respeitada companhia, lhe proporcionará os elementos conceituais e as habilidades práticas necessárias para que você possa ter êxito em seu desenvolvimento como um profissional competente em muitos campos de aplicação e ocupação da eletrônica. Você poderá, por exemplo, criar sua própria empresa de produtos eletrônicos ou desenvolver-se como técnico independente.

Este curso também irá prepará-lo adequadamente para iniciar cursos de especialização em Eletrônica Digital, Microprocessadores, Microcontroladores, Rádio AM e FM, Luzes e Som, Videocassetes, CD Players, Manutenção de Computadores e outros ramos de aplicação da eletrônica.

Que outros benefícios você terá?

Além dos conhecimentos, habilidades e da satisfação que você encontrará em cada um dos fascículos da obra, você, como aluno do **Curso Prático de Eletrônica Moderna** da **CEKIT**, obtém os seguintes benefícios adicionais:

Pode obter um **Certificado de Conhecimentos e Treinamento em Eletrônica Prática Moderna** expedido pela **CEKIT S. A.**

Basta responder ao questionário de avaliação que se encontra no final da obra e remeter a folha de respostas ao nosso escritório central. Se você exceder uma pontuação mínima estabelecida, receberá, pelo correio, seu certificado. Caso contrário, você terá outras oportunidades.

Receba com os fascículos **1, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 e 40** um circuito impresso completo, perfurado e com serigrafia, do projeto central correspondente. São **9** circuitos impressos totalmente grátis.



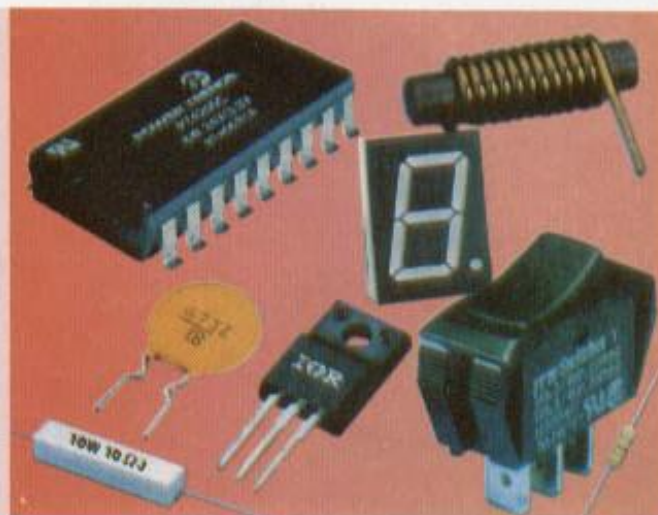
Conteúdo geral do curso

Volumes 1, 2 e 3 - Eletrônica Básica

Volume 1

Componentes e Teoria de Circuitos

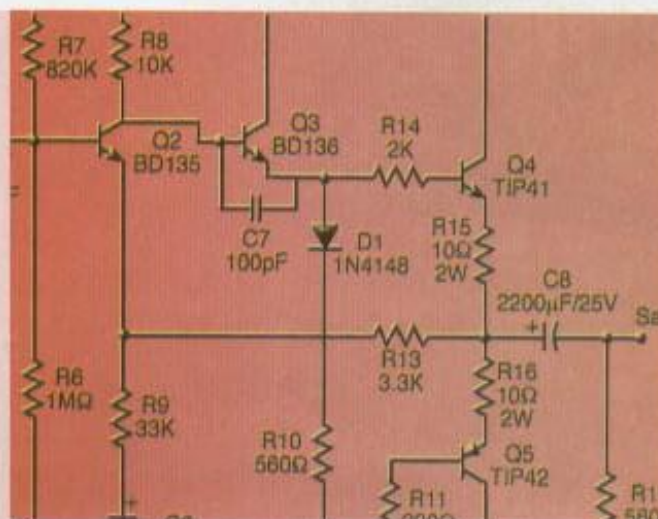
- Introdução geral
- Introdução à eletrônica
- Componentes passivos
- Componentes eletromecânicos
- Pilhas e baterias
- Conceitos básicos de circuitos
- Teoria básica de semicondutores. Diodos
- Transistores bipolares
- Transistores de efeito de campo
- Tiristores
- Transdutores
- Circuitos integrados
- Técnicas de análise de circuitos eletrônicos
- Índice Volume 1



Volume 2

Circuitos Analógicos e Digitais

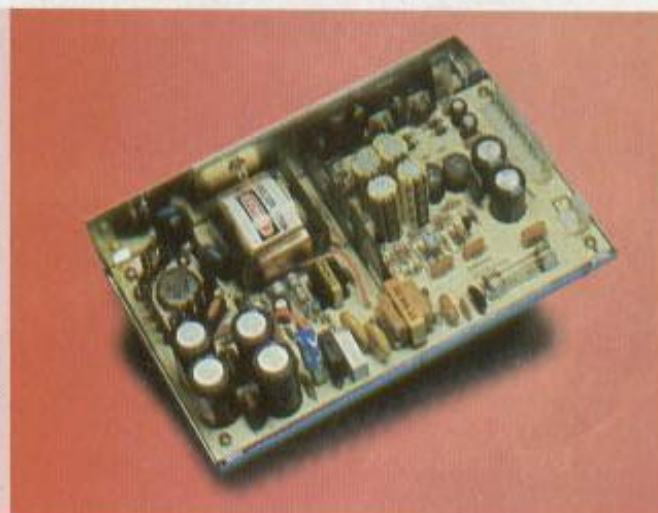
- Fontes de alimentação
- Amplificadores operacionais
- Amplificadores de áudio
- Amplificadores de RF
- Filtros passivos e ativos
- Osciladores de áudio e de RF
- PLLs e outros circuitos análogos
- Portas lógicas e flip-flops
- Circuitos digitais de lógica combinatória
- Circuitos digitais de lógica seqüencial
- Conversores A/D e D/A
- Memórias e outros circuitos digitais
- Índice Volume 2



Volume 3

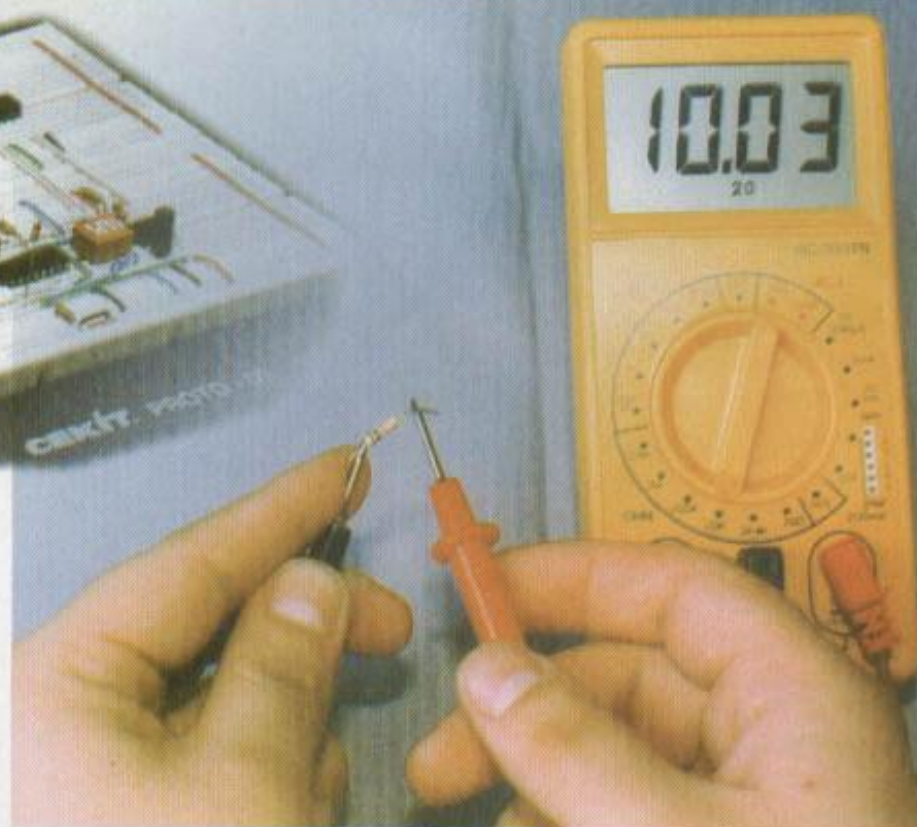
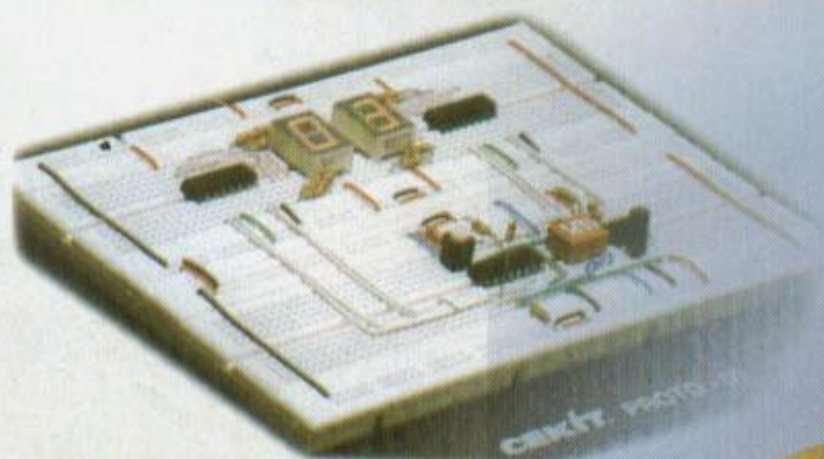
Eletrônica Aplicada

- Circuitos de áudio
- Circuitos de controle de potência
- Circuitos para o automóvel
- Circuitos de alarme e segurança
- Circuitos de medição e teste
- Circuitos telefônicos e de comunicação
- Circuitos de controle remoto
- Circuitos de vídeo e mistos
- Projeto eletrônico assistido por computador (CAD)
- Índice Volume 3
- Índice analítico de eletrônica básica

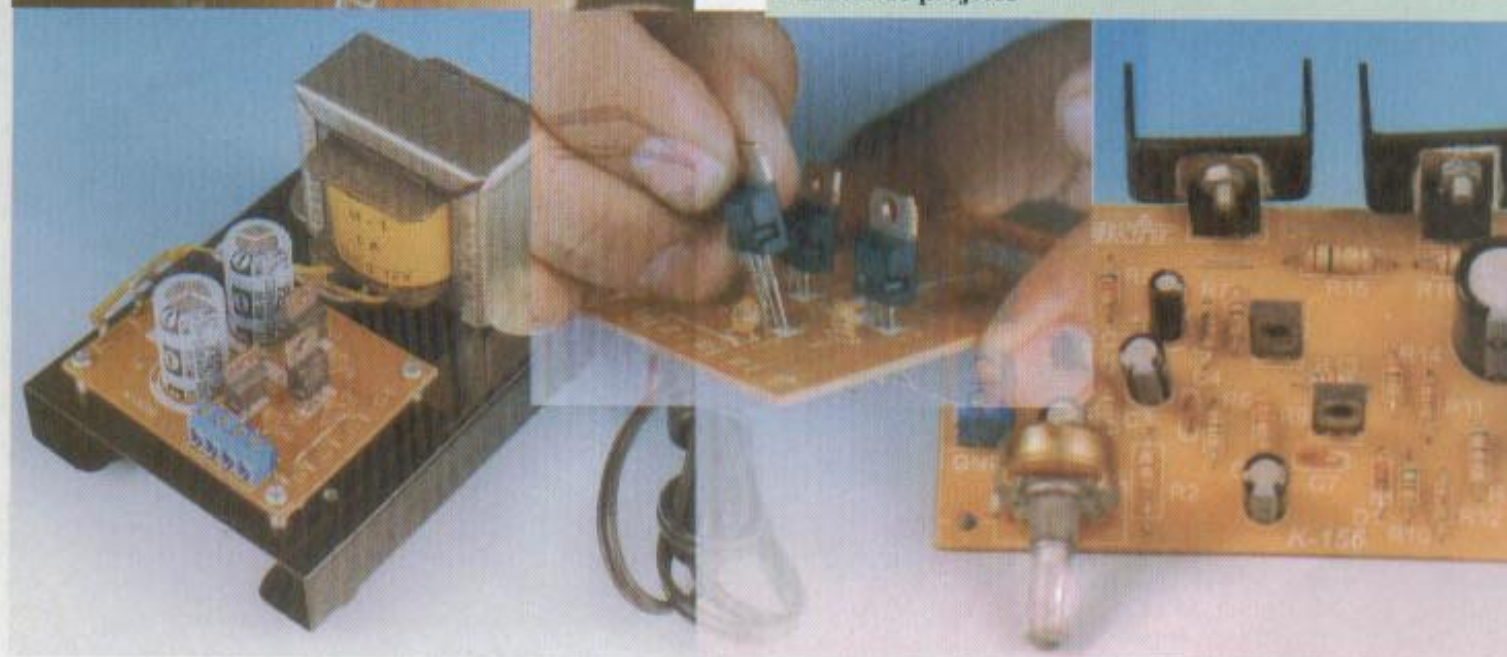
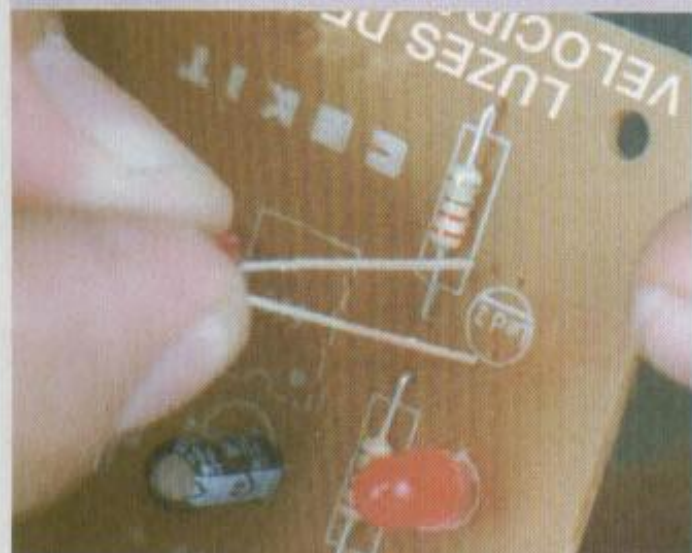
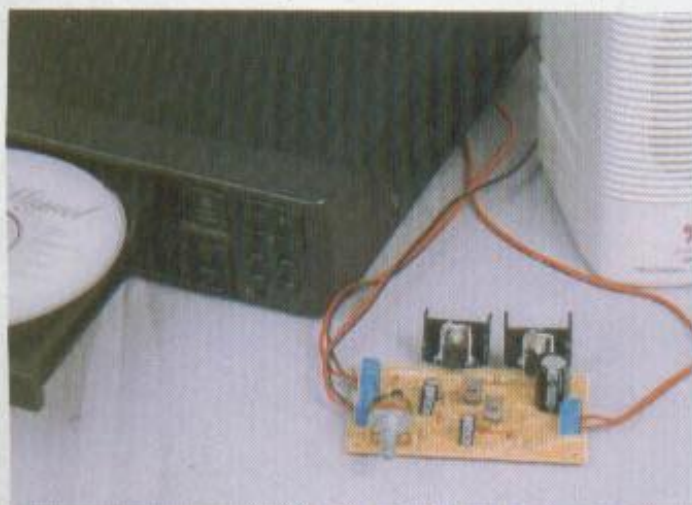


Volume 4 - Eletrônica Prática

- Ferramentas para o trabalho eletrônico
- Montagem de protótipo em protoboard
- Montagem e soldagem de componentes
- O multímetro analógico
- O multímetro digital
- Manuseio do módulo de ensaio básico EB-1
- Como organizar a área de trabalho
- Desenvolvimento e planejamento de projetos
- Projeto e fabricação de circuitos impressos
- Uso de circuitos impressos universais
- Carcaças para projetos eletrônicos
- Montagem e teste de projetos
- Manuseio de instrumentos
- Como testar componentes eletrônicos
- Os dissipadores de calor
- A blindagem
- Como projetar a placa de um aparelho
- Segurança para os pesquisadores
- Projetos SMT: Montagem superficial
- Projeto de circuitos impressos em computador (CAD)
- Internet: Locais de consulta
- Índice de Eletrônica Prática



Volume 5 - Projetos

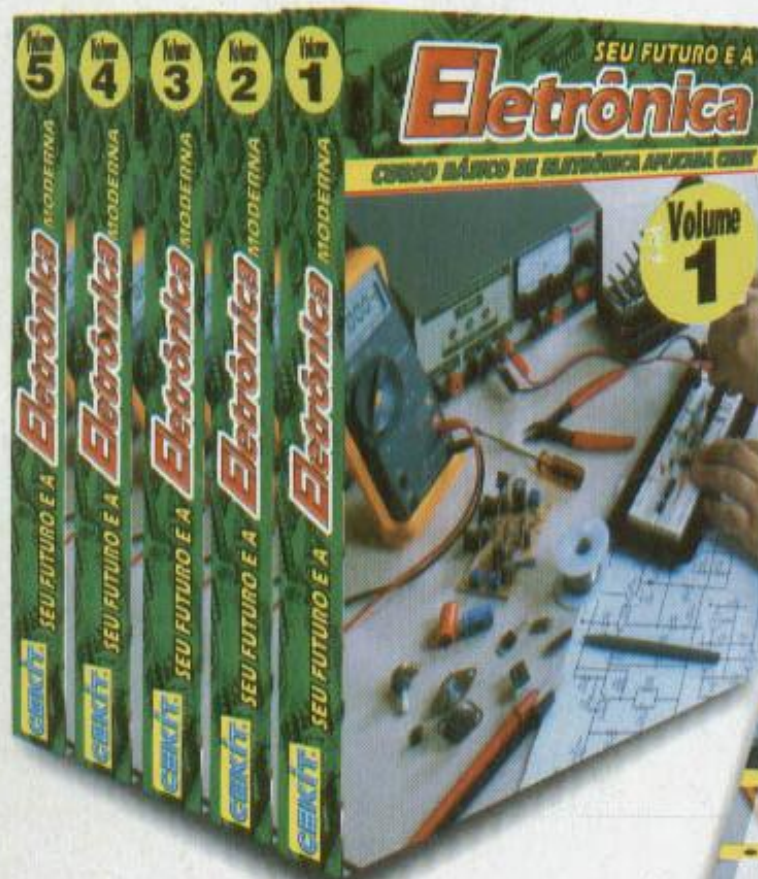


- Alarme básico contra ladrões
- Luzes de velocidade variável
- Fonte de energia fixa de 5V e $\pm 12V$
- Controle de iluminação
- Temporizador de eventos curtos com relé
- Amplificador de áudio com transistores
- Luz intermitente com relé
- Fonte de energia variável de 1 a 25V
- Pré-amplificador para microfone
- Relé de estado sólido com triac
- Indicador de linha telefônica em uso
- Testador audível de continuidade
- Sirene eletrônica
- Amplificador de áudio com circuito integrado
- Detector de nível de água
- Controle de velocidade de motores DC
- Amplificador de áudio de alta potência
- Luz noturna automática com relé
- Temporizador de eventos longos
- Gerador de áudio variável
- Medidor com barra de LED
- Interruptor ativado por som
- Interruptor infravermelho
- Monitor de bateria para carro
- Misturador/Mixer estéreo de 4 canais
- Controle de temperatura para ferro de soldar
- Luz de emergência
- Órgão eletrônico
- Detector de sismos
- Seqüenciador de luzes
- Lógica Transistor-Transistor (TTL)
- Contador fotoelétrico de objetos
- Índice de projetos

Como se coleciona esta obra

O CURSO PRÁTICO DE ELETRÔNICA MODERNA da CEKIT S. A. é publicado na forma de 40 fascículos de circulação semanal, encadernáveis em 5 volumes. Cada fascículo consta de 4 páginas de capas e 20 páginas de conteúdo em cores. Destas últimas, 12 são dedicadas à seção de **ELETRÔNICA BÁSICA**, 4 à seção de **ELETRÔNICA PRÁTICA** e 4 à seção de **PROJETOS**.

As páginas de cada seção são encadernáveis em separado. Por essa razão, ao formar os volumes, deve-se desprender antecipadamente, de todos os fascículos, as 4 páginas centrais de **PROJETOS**, as 4 páginas seguintes de **ELETRÔNICA PRÁTICA** e as 12 páginas restantes de **ELETRÔNICA BÁSICA**. Com o fascículo que completa cada um dos cinco volumes da obra, colocaremos à venda as capas para sua encadernação. Os volumes estão dispostos do seguinte modo:



VOLUME 1
• **COMPONENTES E TEORIA DE CIRCUITOS**
Páginas: 1 a 168 • Fascículos: 1 a 14

VOLUME 2
• **CIRCUITOS ANALÓGICOS E DIGITAIS**
Páginas: 169 a 324 • Fascículos: 15 a 27

VOLUME 3
• **ELETRÔNICA APLICADA**
Páginas: 325 a 480 • Fascículos: 28 a 40

VOLUME 4
• **ELETRÔNICA PRÁTICA**
Páginas: 1 a 160 • Fascículos: 1 a 40

VOLUME 5
• **PROJETOS**
Páginas: 1 a 160 • Fascículos: 1 a 40



A CEKIT S. A. garante a publicação da totalidade da obra, o fornecimento das capas necessárias para sua encadernação e dos números atrasados até um ano depois de terminada a circulação do último fascículo. Também garante a fidelidade da informação teórico-prática fornecida e o correto funcionamento dos circuitos e projetos apresentados.

Introdução geral

Prezado leitor

Bem-vindo ao extraordinário e fascinante mundo da **eletrônica**, a ciência que, mais do que nenhuma outra revolução tecnológica, transformou a humanidade, e sem a qual não poderíamos viver, trabalhar e interagir com outras pessoas. A eletrônica nos proporciona entretenimento, conforto e informação, permite a comunicação com nossos semelhantes, facilita o desenvolvimento de nossas habilidades e, de um modo geral, faz com que nossa vida diária seja não somente mais fácil, mas também mais interessante e produtiva. Então, por que não estudar eletrônica?

A **CEKIT S.A.**, empresa líder no ensino e divulgação de tecnologia eletrônica em todas as suas variantes, apresenta seu **Curso Prático de Eletrônica Moderna**, uma obra absolutamente inovadora que o conduzirá gradualmente através da eletrônica desde os princípios básicos até as aplicações mais importantes. Nela você conhecerá as leis com as quais se baseia esta ciência, as peças que servem de elos para a construção de circuitos e sistemas reais e as técnicas para que a passagem da teoria à prática seja uma experiência agradável.

Desenvolvido com a metodologia do “aprender fazendo” da própria **CEKIT**, o **Curso Prático de Eletrônica Moderna** foi escrito e organizado de forma muito simples, agradável e didática, com parágrafos curtos e concisos e centenas de ilustrações que reforçam e esclarecem as idéias expostas. Como complemento imprescindível incluíram-se numerosas experiências, projetos e procedimentos práticos, com instruções claras e precisas para que você possa comprovar por si mesmo a teoria e conhecer como trabalham as peças, circuitos e sistemas eletrônicos.

Se seu campo de interesse é a eletrônica, **este curso é para você!**. Ele é dirigido a estudantes, professores, técnicos, tecnólogos e, de uma forma geral, a todas aquelas pessoas que desejam iniciar-se no estudo da eletrônica, atualizar seus conhecimentos neste campo ou fazer da mesma uma profissão para o seu futuro. Também será de grande ajuda para os amantes do “faça você mesmo,” que adoram construir seus próprios equipamentos eletrônicos e fazer inovações ou reparos em equipamentos existentes.

Atualmente, a eletrônica é o setor tecnológico de mais rápida expansão e um dos que registra os maiores índices de vendas e de geração de emprego. Praticamente não existe um único lugar do planeta aonde não haja algum tipo de aparelho eletrônico, nem nenhum campo da atividade humana aonde não esteja presente a eletrônica de uma forma ou outra. Definitivamente, o mundo moderno não seria concebível, e nem possível, sem a existência da eletrônica.

Como futuro profissional da eletrônica, você adquirirá com este curso conhecimentos técnicos fundamentais para o seu desenvolvimento como cidadão do amanhã. Também obterá satisfação pessoal e econômica, economizará dinheiro e conseguirá reconhecimento profissional. Junte-se ao crescente número de pessoas que têm feito da eletrônica sua profissão ou hobby. O mundo precisa cada vez mais de pessoas como você e este pode ser seu primeiro passo nessa direção. **Parabéns!**

Como este curso está estruturado:

O **Curso Prático de Eletrônica Moderna** da CEKIT é um programa teórico-prático em 5 volumes dividido em três seções independentes chamadas **Eletrônica Básica**, **Eletrônica Prática** e **Projetos**. A seção **Eletrônica Básica** desenvolve os conteúdos teóricos do curso na forma de lições ou capítulos. Inclui experiências, circuitos de aplicação, exercícios de análise resolvidos ou propostos, notas históricas, observações complementares, glossários e outras ajudas. Está dividido em 5 áreas genéricas chamadas **Componentes Eletrônicos**, **Teoria Básica de Circuitos**, **Circuitos Analógicos**, **Circuitos Digitais** e **Eletrônica Aplicada**. Os capítulos das áreas **Componentes Eletrônicos** e **Teoria Básica de Circuitos** formam o **Volume 1** da obra, os dos **Circuitos Analógicos e Digitais** o **Volume 2** e os de **Eletrônica Aplicada** o **Volume 3**.

A seção sobre **Eletrônica Prática** desenvolve os conteúdos pragmáticos do curso na forma de atividades ou exercícios. Explica técnicas como o conhecimento e o manuseio de ferramentas e instrumentos, a utilização do *protoboard* ou mesa de testes, a preparação de circuitos impressos e caixas de montagem, montagem, teste e soldagem de componentes e outros procedimentos chave. As atividades desta seção formam o **Volume 4** da obra. A seção de **Projetos**, por sua vez, explica a construção, o funcionamento e as aplicações de uma grande variedade de circuitos úteis, alguns dos quais estão disponíveis na forma de *kits* (peças soltas para montar), projetados e garantidos pela CEKIT. Os projetos desta seção formam o **Volume 5**. A seguir alguns dos temas tratados em cada volume:

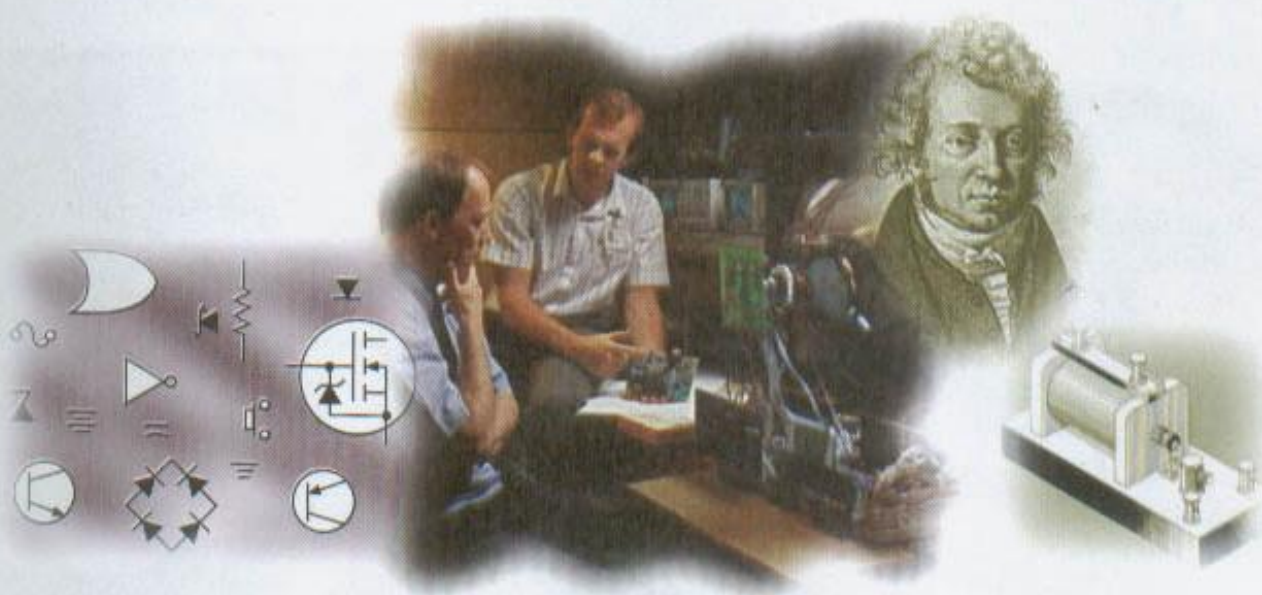
- **Volume 1. Componentes e Teoria de Circuitos.** Introdução à Eletrônica. Componentes Passivos. Componentes Eletromecânicos. Baterias. Semicondutores. Transdutores. Circuitos Integrados. Conceitos Básicos de Circuitos. Técnicas de Análise de Circuitos.
- **Volume 2. Circuitos Analógicos e Digitais.** Fontes de alimentação. Amplificadores Operacionais. Amplificadores de Áudio e de RF. Filtros. Osciladores. PLLs. Conversores V/F e F/V. Portas e Flip-Flops. Codificadores e Decodificadores. Multiplexores e Demultiplexores. Temporizadores e Relógios. Registros e Contadores. Conversores A/D e D/A. Memórias.
- **Volume 3. Eletrônica Aplicada.** Circuitos de Áudio e Vídeo. Circuitos de Controle de Potência. Circuitos de Medição e Teste. Circuitos de Segurança. Circuitos de Comunicações. Circuitos de Controle Remoto. Circuitos Telefônicos. CAD - Projeto Auxiliado por Computador.
- **Volume 4. Eletrônica Prática.** Como utilizar ferramentas, protoboards, multímetros, osciloscópios, etc. Como planejar, desenvolver, documentar e testar projetos. Como soldar, instalar e testar componentes. Como fabricar circuitos impressos e caixas de montagem (chassis) ...
- **Volume 5. Projetos.** Alarmes. Fontes de alimentação. Instrumentos de teste. Equipamentos de áudio. Jogos de luzes. Contadores. Temporizadores. Circuitos de controle ...

Finalmente, como complemento da obra, apresentamos um **questionário** que servirá para avaliar o seu grau de aprendizagem. Você pode ainda optar por receber um certificado de conhecimentos em **Eletrônica Moderna** expedido pela CEKIT S. A. Esse questionário também será útil como material de revisão e referência.

Jorge E. Hernández M.
Diretor Técnico

Capítulo 1

Introdução à eletrônica



- 1.1 O mundo da eletrônica**
- 1.2 Componentes eletrônicos**
- 1.3 Circuitos e sistemas eletrônicos**

A eletrônica é uma das tecnologias-chave do final do século XX e do começo do século XXI. Nós nos surpreendemos com seus feitos, mas dependemos diariamente dela para viver, trabalhar, nos divertir e interagir com outras pessoas. Este capítulo é uma introdução ao fascinante mundo da eletrônica moderna, seu impacto em nossa vida diária, suas aplicações e seus elementos conceituais.

1.1 O mundo da eletrônica

A eletrônica é, sem dúvida, a ciência de mais rápido crescimento das últimas décadas. Isto se deve ao fato de ter invadido praticamente todos os

campos da atividade humana. Graças à eletrônica desfrutamos de relógios digitais, televisores e rádios portáteis, sintetizadores de música, telefones celulares, computadores pessoais, videogames, equipa-

mentos de som, videocassetes e uma lista interminável de produtos que mudaram para sempre nossa maneira de viver, trabalhar e interagir com os outros, **figura 1.1**.



Figura 1.1 Aparelhos eletrônicos comuns. Muitos desses desenvolvimentos da tecnologia eletrônica mudaram para sempre nossa maneira de viver, trabalhar e interagir com os outros.

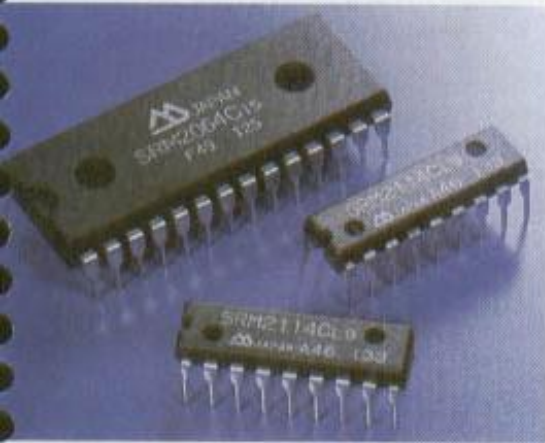


Figura 1.2 Os circuitos integrados são os produtos mais notáveis da revolução microeletrônica.

A eletrônica e os sistemas eletrônicos são aplicações práticas dos princípios gerais da eletricidade. A **eletricidade** é uma forma invisível de energia originada pelo movimen-

to de certas partículas diminutas chamadas **elétrons livres**. Estas partículas, ao circular massivamente através de determinados materiais, formam **correntes elétricas** e produzem efeitos físicos importantes como luz, calor, movimento, som, magnetismo, etc.

A eletrônica trata fundamentalmente do **controle** das correntes elétricas e, portanto, dos efeitos produzidos pelas mesmas. Em outras palavras, a eletrônica é a ciência da domesticação dos elétrons.

A eletrônica moderna tem sido impulsionada principalmente pelo desenvolvimento de **componentes** para manipular a corrente elétrica das mais diversas formas. Alguns desses componentes têm sido fundamentais nesse processo. O primeiro deles, que representou a passagem da era elétrica para a era eletrônica, foi o

tubo de vácuo, inventado em 1906. Posteriormente surgiram o **transistor** (1948), o **circuito integrado** (1962), o **microprocessador** (1974) e o **microcontrolador** (1982).

Sem dúvida, os grandes feitos da eletrônica moderna têm sido possíveis graças ao milagre da **microeletrônica**, a ciência de fabricar circuitos integrados, formados por milhares de componentes eletrônicos, sobre uma pastilha delgada ou *chip* de silício de no máximo 5 mm² de área e 0.5 mm de espessura.

Os chips eletrônicos, **figuras 1.2 e 1.3**, estão em todas as partes, desde as calculadoras de bolso até as naves espaciais que exploram outros planetas, dos computadores pessoais às próteses biônicas para deficientes.

1.2 Componentes eletrônicos

Se você observar, sob a ótica de um principiante, o interior de um sistema eletrônico tal como um rádio, um televisor, um equipamento de som ou um computador, é muito provável que se sinta intimidado e desmotivado a estudar eletrônica, **figura 1.4**. À primeira vista, tudo parece tão complicado que pode-se pensar que a eletrônica é somente para gênios, cientistas ou intelectos superiores. Ainda bem que em eletrônica as coisas são muito mais fáceis do

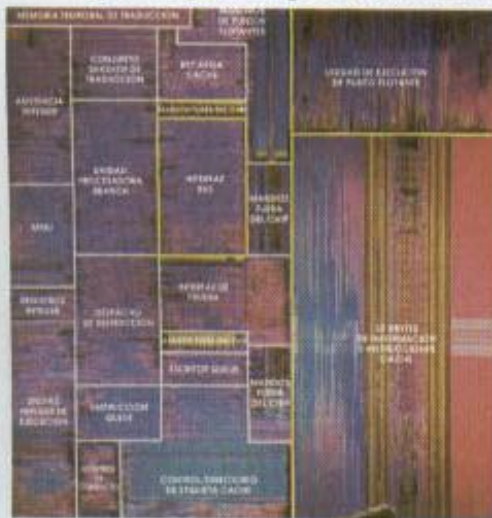


Figura 1.3 O microprocessador.

Um dos chips que mais tem transformado a história da humanidade é o microprocessador. Este pequeno artefato, um dos avanços-chave da tecnologia deste século, tem aberto novos horizontes e novas possibilidades em quase todos os campos da atividade humana. A lista de aplicações dos microprocessadores é extensa e impressionante. Se na primeira revolução industrial as máquinas substituíram a força dos músculos, em nossa era pós-industrial os microprocessadores estão substituindo a potência do cérebro.



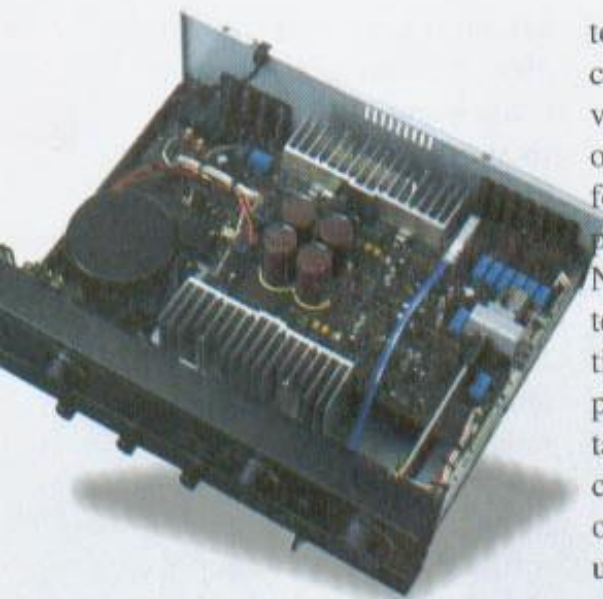


Figura 1.4 O interior de qualquer sistema eletrônico, como o amplificador de áudio mostrado na figura, pode ser intimidante de início, mas na realidade obedece a uma estrutura muito lógica e simples de componentes e circuitos básicos.

que aparentam ser. Isto acontece por duas razões fundamentais.

Em primeiro lugar, mesmo que os sistemas eletrônicos consistam de uma grande quantidade de **componentes** ou **peças**, estas últimas se agrupam em um número mui-

to limitado de tipos básicos, cada qual com suas próprias variantes. Em segundo lugar, os componentes se agrupam formando **circuitos** que cumprem funções determinadas. Novamente, ainda que um sistema eletrônico possa consistir de muitos circuitos, estes pertencem a um número limitado de categorias básicas. A combinação de circuitos dá origem a **sistemas**, que são utilizados em comunicações, controle de potência, áudio, vídeo, entretenimento e outras aplicações.

Os componentes, **figura 1.5**, são os blocos básicos de construção dos sistemas eletrônicos. A função de um componente é manipular, de alguma forma, a **corrente** elétrica que circula através de um circuito, por exemplo para limitá-la, armazená-la, interrompê-la, amplificá-la, dirigi-la e transferi-la. A seguir estão alguns dos principais tipos de componentes utilizados em eletrônica:

O que é a corrente?

Uma corrente elétrica é um fluxo ou movimento de elétrons. A corrente é representada pelo símbolo "I" ou "i". A unidade de medida da mesma é o **ampère (A)**, assim chamado em homenagem ao físico francês **André M. Ampère** (1775-1836), descobridor da lei que leva seu nome. A corrente é medida utilizando-se um instrumento chamado **amperímetro**.

- Resistências
- Capacitores
- Bobinas
- Transformadores
- Diodos
- Transistores
- Tiristores
- Circuitos integrados
- Microfones
- Alto-falantes
- Lâmpadas
- Fotocélulas
- Visualizadores
- Termistores
- Motores
- Baterias
- Fios e cabos
- Interruptores
- Relés
- Fusíveis
- Conectores
- Circuitos impressos
- Dissipadores de calor
- Caixas de montagem

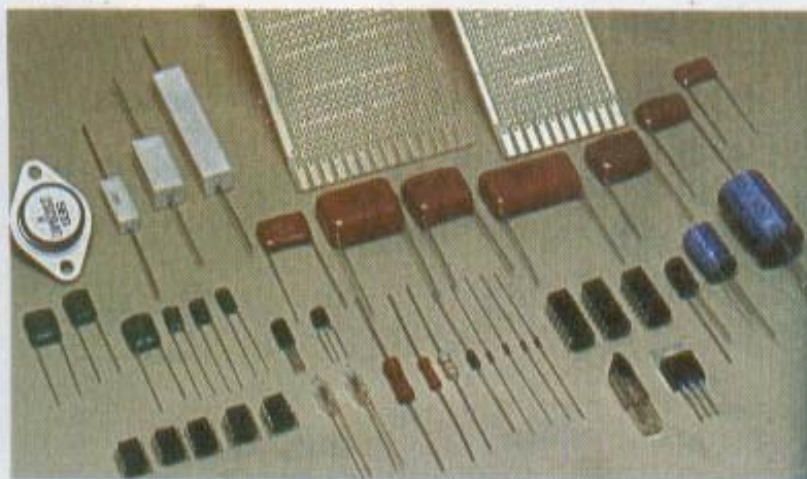


Figura 1.5 Componentes eletrônicos comuns

As resistências, os capacitores, as bobinas e os transformadores são conhecidos coletivamente como **componentes lineares passivos**. Os diodos, os transistores, os tiristores e os circuitos integrados formam parte de um grupo muito importante de componentes conhecidos como **semicondutores**.

Os semicondutores, construídos geralmente a base de silício, são os principais responsáveis pela revolução eletrônica moderna.

Os microfones, os alto-falantes, as lâmpadas, as fotocélulas, os visualizadores, os termistores, os motores e as baterias, por sua vez, são membros de uma família muito destacada de componentes eletrônicos conhecidos coletivamente como **transdutores**. Os transdutores convertem correntes elétricas em outras formas de energia e vice-versa, e permitem que os sistemas eletrônicos possam interagir com o mundo exterior.

Os fios, os cabos, as placas de circuito impresso, os interruptores, os relés, os conectores, os dissipadores de calor, as caixas de montagem, etc., são dispositivos que realizam funções elétricas simples partindo de ações mecânicas internas ou externas. Por esta razão se denominam **componentes eletromecânicos**. Esses tipos de elementos são importantes porque permitem que os sistemas eletrônicos possam se comunicar entre si ou com o homem.

Os componentes eletrônicos vêm em uma grande variedade de formas, tamanhos, apresentações, características, etc., conforme sua aplicação

específica. Mas, dentro de cada tipo, todos cumprem a mesma função básica. Esta função é representada mediante um **símbolo** gráfico.

O uso de símbolos para representar os componentes permite a construção de **diagramas** esquemáticos. Um **diagrama** é uma representação gráfica da forma como os componentes de um circuito estão conectados ou relacionados entre si, prescindindo de sua forma e características construtivas, **figura 1.6**.

Nas próximas seções, faz-se uma breve descrição dos principais tipos de componentes utilizados nos circuitos eletrônicos. Para cada tipo se indica sua função básica, seu símbolo representativo e suas formas de apresentação mais usuais. Estes temas serão tratados em detalhe em capítulos posteriores deste curso. Portanto, não se preocupe se não entender perfeitamente todo o material apresentado ou se se deparar com algum componente não incluído nesta relação.

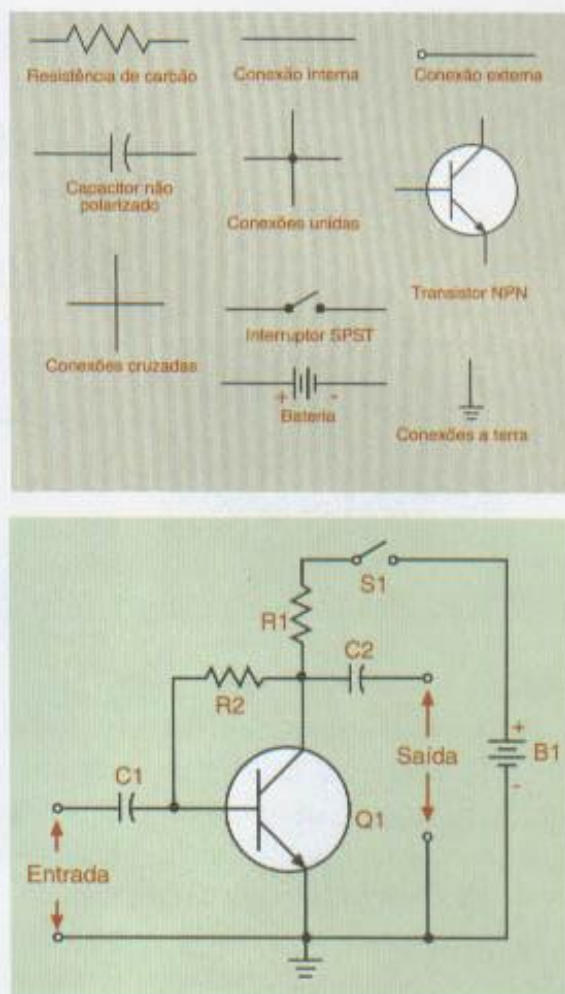
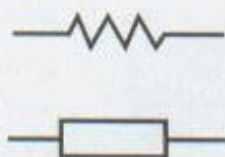


Figura 1.6 Os símbolos e os diagramas são as principais linguagens de comunicação em eletrônica. Em (a) mostram-se os símbolos de alguns componentes eletrônicos comuns e em (b) o diagrama esquemático de um circuito construído com os mesmos.

1.2.1 Resistências

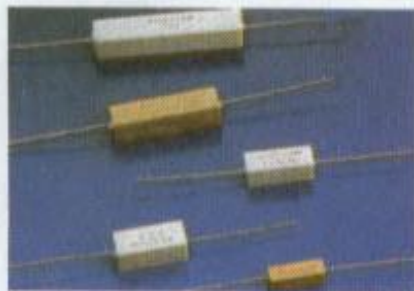
As resistências são componentes eletrônicos projetados para oferecer uma certa oposição ou resistência à passagem da corrente elétrica. Fisicamente são feitas de carvão ou de metal. São utilizadas principalmente para limitar ou controlar a quantidade de corrente que circula através de um circuito. São os componentes mais abundantes nos equipamentos eletrônicos e os mais baratos.



(a) Simbologia



(b) De carvão e de película



(c) De fio retorcido



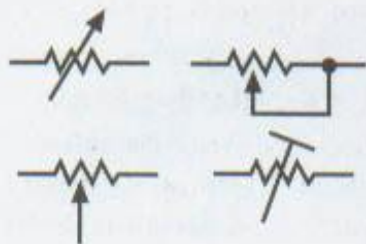
(d) De montagem superficial

Figura 1.7 Resistências fixas

As resistências podem ser **fixas** ou **variáveis**, dependendo da quantidade de oposição que apresentam à passagem da corrente, chamada de **resistência**. São **fixas** se essa resistência for constante e são **variáveis** se a resistência variar de alguma forma. As resistências fixas, **figura 1.7**, também de-

nominadas **resistores**, podem ser dos mais variados tipos, dependendo dos materiais utilizados na sua fabricação, do método de montagem, da capacidade de dissipação de potência e de outros critérios.

As resistências variáveis podem ser de tipos muito di-



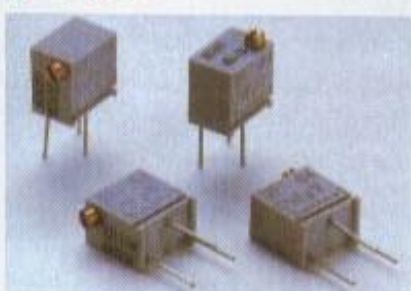
(a) Simbologia



(b) Giratórios



(c) Deslizantes



(d) Ajustáveis (trimpots)

Figura 1.8 Potenciômetros

versos, dependendo dos parâmetros físicos que controlam seu valor (luz, calor, movimento, etc.). As controláveis por meios mecânicos, por exemplo, que giram ou deslizam sobre um eixo, denominam-se **potenciômetros**, **figura 1.8**. Os potenciômetros são utilizados principalmente como divisores de **voltagem** para controlar o volume, a velocidade, a luminosidade, etc., e para ajustar certos circuitos em locais específicos.

1.2.2 Capacitores

Os capacitores são componentes projetados para armazenar temporariamente energia elétrica em forma de **voltagem** e se opõem às trocas de **voltagem**. Fisicamente são formados por duas superfícies metálicas chamadas **placas**, separadas por um material isolante chamado **dielétrico**. Eles são, depois das resistências, os elementos mais abundantes na maioria dos circuitos eletrônicos, mas são mais caros.

Os capacitores, tal como as resistências, podem ser **fixos** ou **variáveis**, dependendo de sua capacidade de armazenar **voltagem**, chamada **capacitância**. Os capacitores fixos também se denominam **capacitores**, **figura 1.9**, e podem ser dos mais diversos tipos, dependendo principalmente dos materiais utilizados em sua fabricação. Existem, por

O que é voltagem?

Para forçar os elétrons livres de um material a fluir ordenadamente em uma determinada direção, e assim produzir uma corrente útil, deve-se aplicar uma força externa denominada **voltagem**. A voltagem, também chamada **força eletromotriz** (fem) ou **diferença de potencial** (ddp), é representada pelo símbolo "e" ou "E". Sua unidade de medida é o **volt (V)**, assim chamado em homenagem ao físico italiano **Alessandro Volta** (1745-1827), inventor da bateria. A voltagem se mede utilizando um instrumento chamado **voltímetro**.



(a) Simbologia



(b) Capacitores variáveis de sintonia



(c) Capacitores ajustáveis de mica

Figura 1.10 Capacitores variáveis



(a) Simbologia



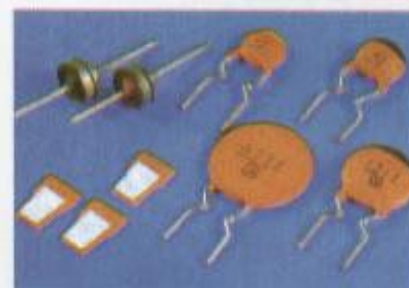
(c) De película

Figura 1.9 capacitores fixos

exemplo, capacitores de alumínio, de tântalo, cerâmicos, de mica, de papel, etc.

Os capacitores fixos, por sua vez, podem ser polarizados ou não polarizados, dependendo do seu tipo de conexão com uma determinada orientação ou polaridade em um circuito. Os capacitores cerâmicos, por exemplo, são sempre não polarizados, enquanto que os de alumínio podem ou não ser polarizados. A polaridade é indicada mediante um sinal "+" (positivo) ou "-" (negativo) marcado ao lado do terminal correspondente.

Os capacitores variáveis, figura 1.10, são formados por dois jogos de lâminas metálicas paralelas, uma fixa e outra móvel, separadas por um dielétrico, geralmente de ar ou mica. São utilizados principalmente



(b) Cerâmicos

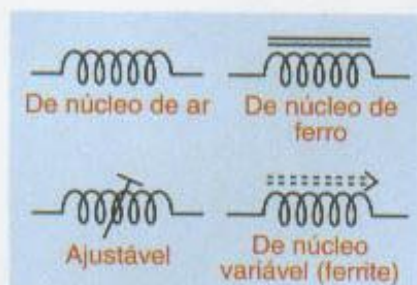


(d) Eletrolíticos de alumínio

como sintonizadores em rádios, televisores e outros equipamentos. Também existem capacitores variáveis chamados **trimmers** que são utilizados para realizar ajustes finos de capacitância.

1.2.3 Bobinas

As bobinas, denominadas também **indutores** ou **choques**, figura 1.11, são componentes projetados para armazenar temporariamente energia elétrica em forma de corrente e opor-se às trocas de corrente. Fisicamente são formadas por várias voltas de fio, chamadas **espirais**, enroladas em espiral sobre um material magnético chamado **núcleo**. As bobinas, por utilizarem materiais de fácil obtenção, são os únicos componentes eletrônicos que podem ser construídos pelos usuários à medida de suas necessidades.



(a) Simbologia

Figura 1.11 Bobinas

As bobinas podem ser fixas ou variáveis, dependendo da sua capacidade para armazenar corrente, também chamada **indutância**. Se essa indutância for constante, ela será fixa, e se variar por algum meio, geralmente pelo deslocamento do núcleo ou pela seleção do número de espirais, ela será variável. Tanto as bobinas fixas quanto as variáveis podem ser de diversos tipos, dependendo principalmente do material do núcleo e de sua forma geo-



(b) De núcleo de ar



(c) De núcleo de ferrite

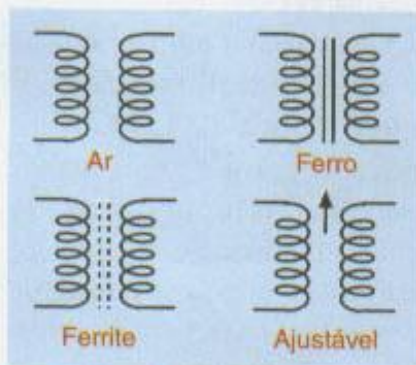
métrica. Existem, por exemplo, bobinas de núcleo de ar, de ferro ou de ferrite, e de forma reta, toroidal, retangular, etc.

1.2.4 Transformadores

Os transformadores, **figura 1.12**, são componentes eletrônicos projetados para trocar uma voltagem ou uma corrente variável, quer dizer, um **sinal**, de um valor a outro, ou simplesmente transferir de um ponto a outro por meios magnéticos, ou seja, sem contato elétrico.

Fisicamente são formados por duas ou mais bobinas enroladas sobre um mesmo núcleo. A bobina que recebe a voltagem ou a corrente de entrada é chamada de **primária** e as que distribuem as voltagens ou as correntes de saída, **secundárias**.

Os transformadores podem ser fixos ou variáveis. Se a relação entre a voltagem ou voltagens de saída, chamadas de **razão de transformação**, for constante, ele será fixo. Se essa razão de transformação variar de alguma forma, geral-



(a) Simbologia

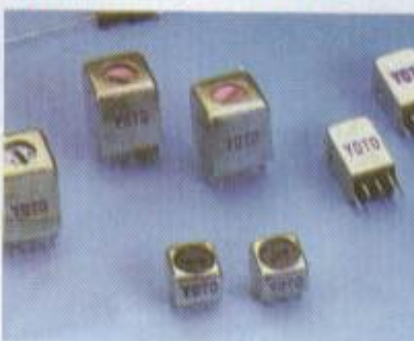


(b) De potência, núcleo de ferro



(c) De pulsos, núcleo de ferrite

Figura 1.12 Transformadores



(d) De radiofrequência, blindado

O que é um sinal?

O termo **sinal** ou **forma de onda** é utilizado em eletrônica para denotar uma corrente ou uma voltagem que muda com o tempo de uma maneira particular e está implícita em uma informação determinada. A maior parte dos sinais utilizados nos circuitos eletrônicos são representações elétricas de quantidades físicas, como a voz, o som, a luz, o movimento, etc. Para visualizar sinais utiliza-se um instrumento chamado **osciloscópio**.

Os sinais utilizados em eletrônica são basicamente de dois tipos: **analógicos** e **digitais**. Os sinais analógicos são aqueles que mudam uniformemente sobre uma fileira contínua de valores, enquanto que os digitais só podem adotar um dos valores ou estados possíveis. A transição de um estado a outro é muito rápida.

O que é frequência?

Em eletrônica se utilizam frequentemente sinais **periódicos**, ou seja, correntes e voltagens cujas formas de onda se repetem exatamente da mesma forma à medida que o tempo passa. O padrão da forma de onda que se repete é denominado **ciclo**. A **frequência** é o número de ciclos que ocorrem em um segundo. A frequência é representada pelo símbolo "f" ou "F". A unidade de medida da frequência é o **hertz (Hz)**, assim chamada em homenagem ao físico alemão **Heinrich Hertz** (1857-1894), descobridor das ondas de rádio.

mente pelo deslocamento o núcleo ou pela seleção do número de espirais da bobina secundária, ele será variável.

Tanto os transformadores fixos quanto os variáveis podem ser de tipos muito diversos, dependendo principalmente do material do núcleo e das faixas de **frequências** de operação. Existem, por exemplo, transformadores de potência, de áudio, de pulsos, de rádio-frequência, etc.



(a) Simbologia

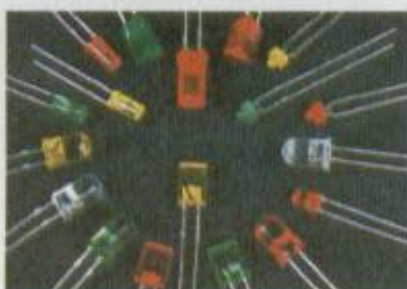
1.2.5 Diodos

Os diodos, **figura 1.13**, são componentes projetados para permitir a passagem da corrente elétrica em um sentido e bloqueá-lo no sentido oposto. Fisicamente são formados por duas camadas de material semicondutor **dopado**, ou seja, tratado com impurezas especiais chamadas **material P** e **material N**, e possuem externamente dois terminais de conexão, chamados **anodo** (positivo) e **catodo** (negativo). A posição do catodo é normalmente indicada através de uma faixa colorida impressa em uma ponta. São, portanto, componentes polarizados.

Existem vários tipos de diodos, varactores e varicap, dependendo de suas características construtivas particulares e da aplicação para a qual foram projetados. Existem,



(b) Retificadores



(c) Diodos emissores de luz (LEDs)



(d) Fotodiodos

Figura 1.13 Diodos

O que é potência?

Ao circular através da matéria, a corrente elétrica produz uma grande variedade de efeitos úteis interessantes, incluindo luz, calor, som, magnetismo, etc. Ao trabalho realizado por uma corrente elétrica denomina-se **potência**. A potência é representada pelo símbolo "p" ou "P". A unidade de medida da potência é o **watt (W)**, assim chamado para homenagear o engenheiro escocês **James Watt** (1736-1819), inventor da máquina a vapor.

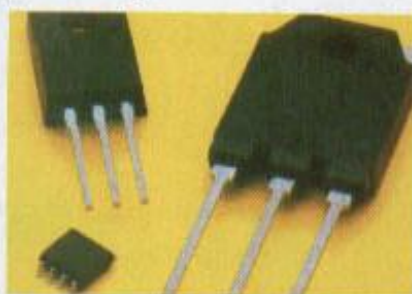
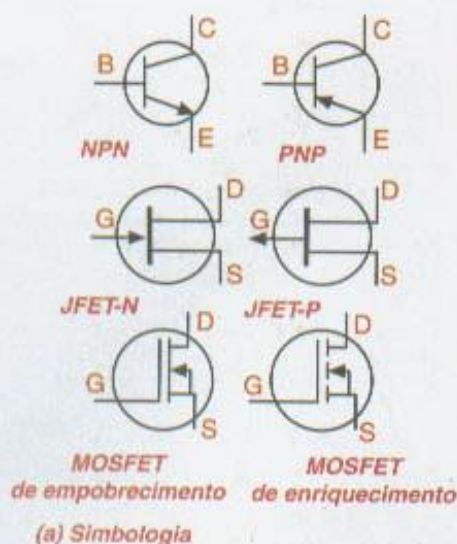
por exemplo, diodos retificadores de baixa, média e alta **potência**, diodos de Zener, diodos de emissão de luz (LEDs), diodos de capacitância variável (varactores), diodos detectores, diodos túnel, diodos a laser, fotodiodos, etc. Os diodos retificadores, por exemplo, são utilizados para converter corrente alternada (AC) em corrente contínua (DC). Esta operação é chamada de **retificação**.

1.2.6 Transistores

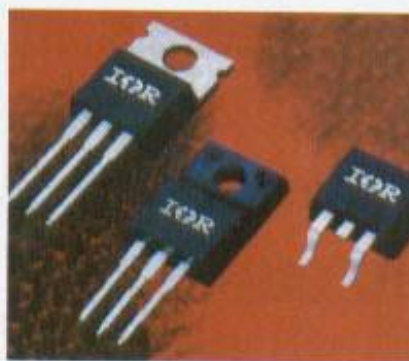
Os transistores, em geral, **figura 1.14**, são componentes primariamente projetados para serem utilizados como **amplificadores**, ou seja, para controlar correntes grandes a partir de correntes ou voltagens pequenas. Esta operação é

O que é amplificação?

A amplificação, também chamada **ganho**, é a habilidade que têm certos componentes e circuitos eletrônicos de aumentar o nível de potência, voltagem ou corrente dos **sinais** aplicados à sua entrada ou entradas. Os circuitos que executam a função de amplificar sinais elétricos são chamados **amplificadores**. A amplificação é representada pelo símbolo "A". A unidade de medida de amplificação é o decibel (dB), assim chamada em homenagem ao físico norte-americano **Alexander Graham Bell** (1847-1922), inventor do telefone.



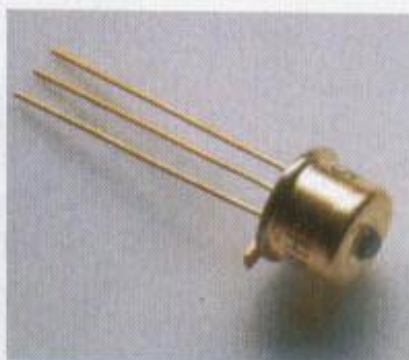
(d) MOSFETs de potência



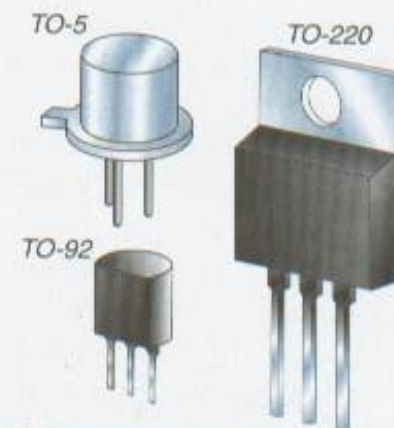
(b) De média potência



(c) De alta potência



(e) Fototransistor



(f) Encapsulados comuns

Figura 1.14 Transistores

denominada **amplificação**. Também são utilizados como **interruptores** eletrônicos para permitir ou bloquear a passagem de corrente sem ações mecânicas.

Ostransistores, inventados em 1948, são os dispositivos eletrônicos mais importantes da atualidade e os que realmente iniciaram a revolução eletrônica da qual somos testemunhas e, a partir de agora, participantes. Podem vir como peças soltas ou discretas, ou estar incorporados em **circuitos integrados**, os quais podem chegar a conter várias centenas de milhares de transistores em um espaço muito pequeno. Neste curso os utilizamos amplamen-

te em ambas as modalidades.

Os transistores podem ser basicamente de dois tipos: bipolares ou de união, e unipolares ou de efeito de campo. Os **transistores bipolares** são os transistores propriamente ditos e são dispositivos controlados por corrente. Os **transistores de efeito de campo** são conhecidos comumente como FETs, a partir de sua sigla em inglês (*Field Effect Transistors*), e são dispositivos controlados por voltagem.

Tanto os transistores como os FETs vêm em uma grande variedade de padrões de tamanhos e apresentações, chamados **encapsulados**, que determinam sua aplicação e

método de montagem. Existem, por exemplo, transistores de baixa, média e alta frequência, etc. Todos se identificam por uma **referência** que se remete ao manual do fabricante, aonde se descrevem suas características elétricas e construtivas.

Os transistores bipolares são fisicamente formados por três camadas alternadas de silício dos tipos P e N e possuem externamente três terminais de conexão chamados **emissor** (E), **base** (B) e **coletor** (C). A base atua como terminal de controle. Dependendo da forma como se alternam as camadas P e N, podem ser de dois tipos, chamados transistores NPN e transistores PNP.

Os **transistores de efeito de campo**, por sua vez, são fisicamente formados por uma pequena capa de silício do tipo N ou P, parcialmente embebida por uma fina camada de material semicondutor do tipo oposto chamada **canal**, e possuem externamente três terminais de conexão chamados **fonte (S)**, **porta (G)** e **drenador (D)**. A porta atua como terminal de controle. Dependendo do material do canal, podem ser de dois tipos: FET de canal N e FET de canal P.

Os FETs com as características construtivas acima descritas são denominados normalmente **JFETs** ou FETs de junção para distingui-los dos **MOSFETs** ou **FETs de porta isolada**, nos quais a porta encontra-se eletricamente isolada do canal por uma fina camada de óxido de silício que lhe confere características muito especiais. Os MOSFETs também podem ser de canal N ou P. São muito utilizados em aplicações de potência e de alta frequência.

Um tipo relativamente novo de transistor é o **IGBT** ou **transistor bipolar de porta isolada**, figura 1.15. Esses transistores, projetados para aplicações de potência, são muito similares em sua estrutura física aos MOSFETs de potência, porém assemelham-se mais aos transistores bipolares em sua operação elétrica e podem gerenciar correntes e tensões muito mais elevadas que

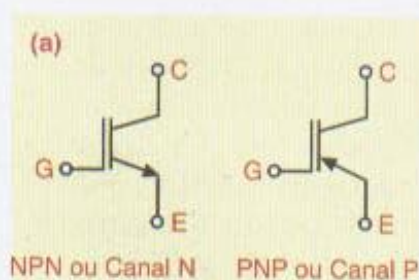
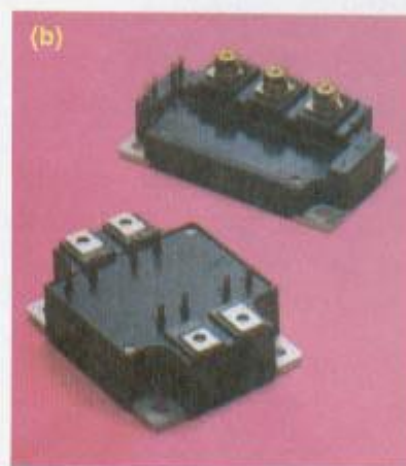


Figura 1.15 Transistores IGBT
(a) Simbologia
(b) Módulos IGBT



qualquer um deles. São muito utilizados em amplificadores de áudio de alta potência, controles de velocidade de grandes motores e outras aplicações similares.

1.2.8 Tiristores

Os tiristores, figura 1.16, são peças semi-condutoras, similares em alguns aspectos aos

diodos, projetadas para serem utilizadas como componentes semi-condutores, similares em alguns aspectos aos diodos, projetados para serem utilizados como **cadeados** eletrônicos, ou seja, são interruptores que, uma vez fechados por um sinal de controle, só podem ser abertos através de uma «chave» elétrica.

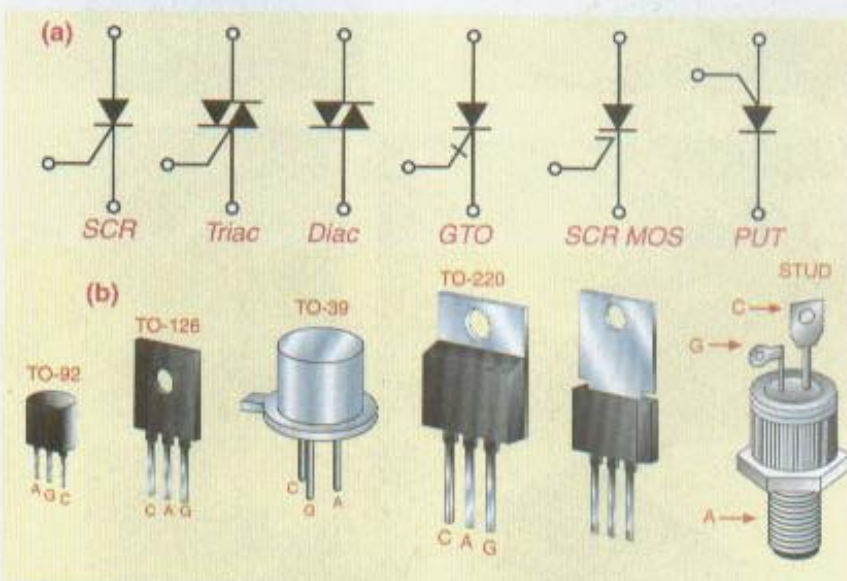


Figura 1.16 Tiristores
(a) Simbologia
(b) Apresentações usuais.
(c) Tiristores plásticos de média potência



Fisicamente são formados por quatro ou mais camadas alternadas de materiais N e P. São utilizados principalmente em aplicações de potência, por exemplo, para controlar a velocidade de um motor ou a quantidade de luz emitida por uma lâmpada.

Os tiristores podem ser de vários tipos, dependendo de suas características construtivas particulares e da forma como trabalham. Os mais utilizados são o **retificador de silício controlado** ou **SCR** e o **tiristor bidirecional** ou **triac**.

Outros exemplos de tiristores são o diodo bilateral de disparo ou diac, o diodo bidirecional ou sidac, o tiristor de desligado por porta ou GTO, etc.

O **SCR** é um tiristor unidirecional. Isto significa que, uma vez disparado, somente permite a passagem da corrente em um sentido, comportando-se como um diodo retificador. Por esta razão, é utilizado principalmente para gerenciar corrente contínua (DC) ou retificar corrente alternada (AC). O **triac**, por sua vez, é um tiristor bidirecional, ou seja, permite a passagem da corrente elétrica em ambos os sentidos. Por esta razão é utilizado principalmente para gerenciar corrente alternada (AC).

Tanto o SCR quanto o triac são dispositivos de três terminais e vêm basicamente nas mesmas apresentações ou encapsulados nos transistores. Os terminais de um SCR são chamados **anodo (A)**, **catodo (K)** e **porta (G)**, e os de um triac **terminal principal 1 (MT1)**, **terminal principal 2 (MT2)** e **porta (G)**. Em ambos os casos, a porta atua como terminal de controle.

1.2.9 Circuitos integrados

Os circuitos integrados, **figura 1.17**, como seu próprio nome indica, são peças projetadas para conter, em um espaço muito reduzido, um circuito completo o qual, montado utilizando-se os métodos tradicionais, exigiria muitas peças

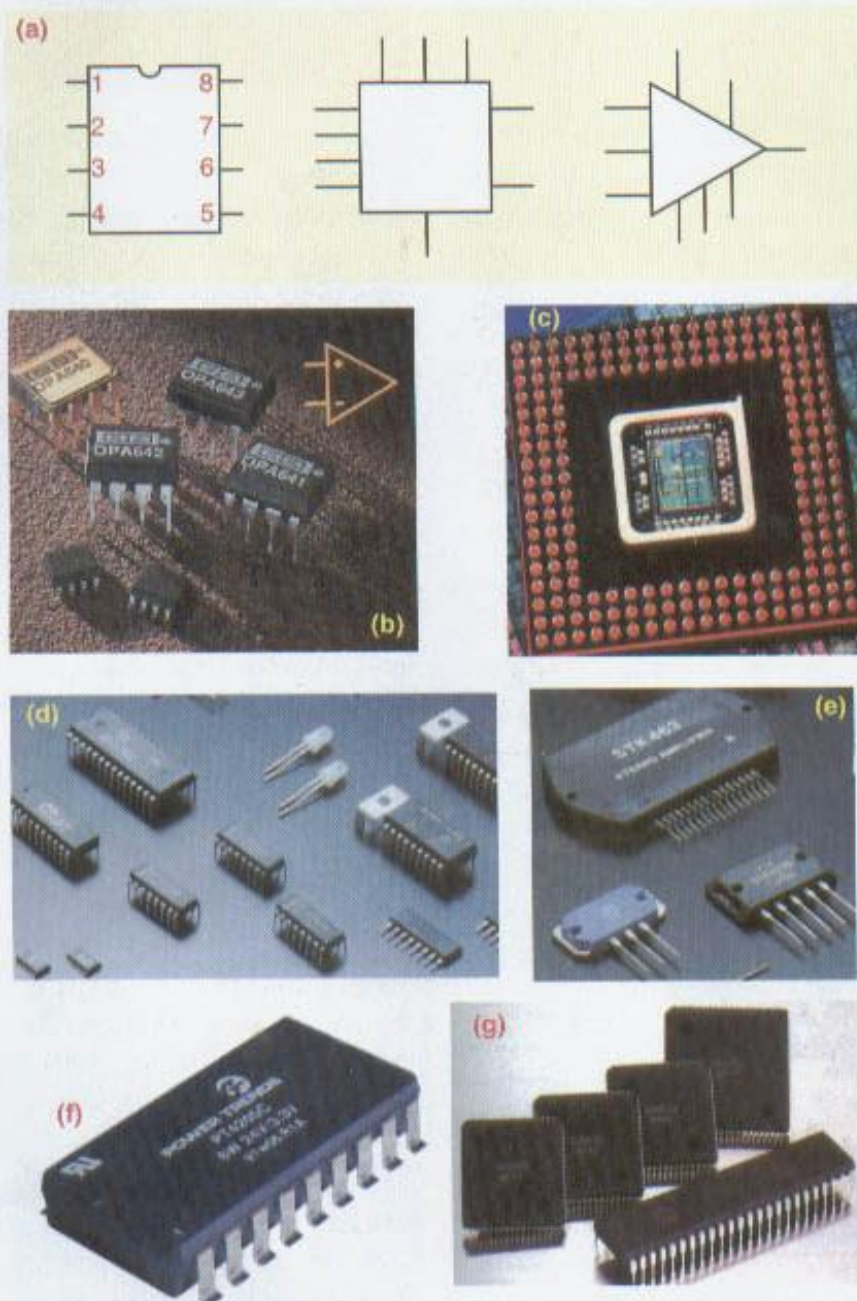


Figura 1.17 Circuitos integrados

(a) Simbologia (b) Amplificadores operacionais (c) Microprocessador moderno (d) Circuitos integrados DIP ou em dupla linha (e) Circuitos integrados SIP ou de linha única (f) Circuito integrado de montagem superficial (g) Memórias

individuais e ocuparia um espaço muito grande. Os circuitos integrados são as peças mais importantes e mais utilizadas na eletrônica moderna, além de serem os principais responsáveis pela miniaturização de todos os tipos de aparelhos.

Fisicamente, um circuito integrado é formado por uma pastilha ou **chip** de material semicondutor sobre o qual se produzem, através de técnicas relativamente sofisticadas, transistores, diodos, resistências e outras peças. O **chip** está alojado em uma cápsula plástica ou metálica a qual, além de protegê-lo, fornece os **pinos** ou terminais de conexão que possibilitam sua comunicação com o mundo externo. Alguns circuitos integrados são apenas de três pinos, enquanto outros podem chegar a ter centenas deles.

Os circuitos integrados vêm em várias formas ou encapsulamentos, sendo uma das mais comuns o encapsulamento de pacote em dupla linha ou DIP. Neste tipo de apresentação, os pinos são numerados em sentido antihorário começando pelo pino 1. A posição deste último geralmente é indicada através de um pequeno ponto impresso na cápsula. Outros tipos de circuitos encapsulamentos comuns são os designados como TO220, SIP, PLCC, SOIC, etc.

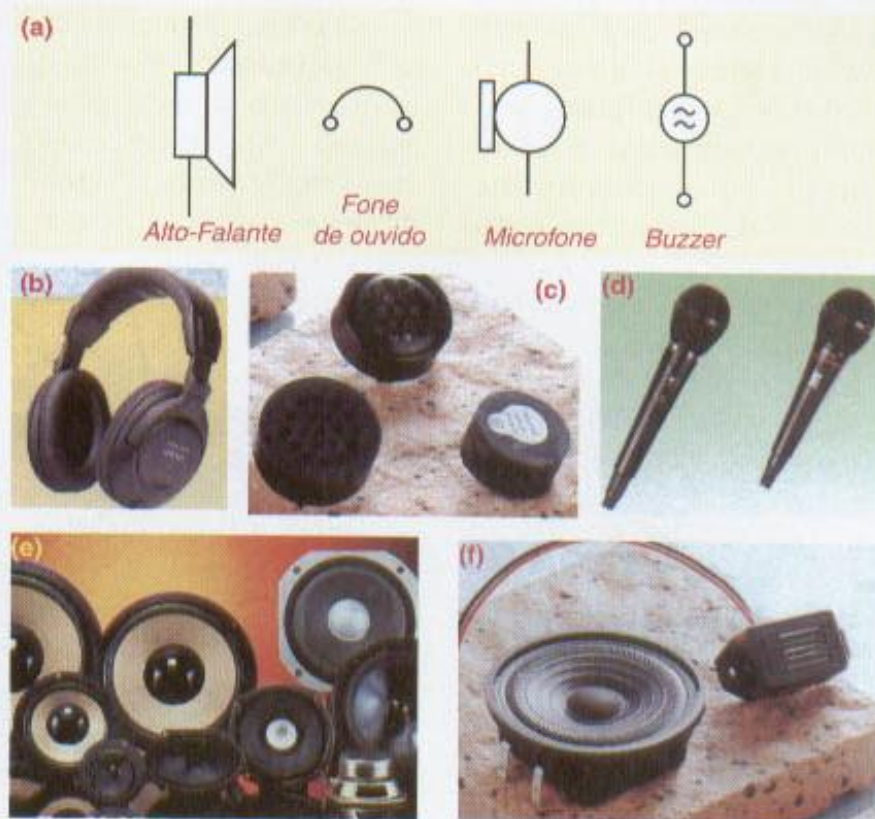


Figura 1.18 Transdutores de som

(a) Simbologia (b) Fone de ouvido (c) Microfones de cristal (d) Microfones dinâmicos (e) Alto-falantes dinâmicos (f) Alto-falante e buzzer piezoelétrico

Os circuitos integrados podem ser **analógicos** ou **digitais**, dependendo do tipo de sinais que gerenciam. Neste curso trataremos extensivamente dos circuitos integrados de ambos os tipos. Exemplos de circuitos integrados analógicos são os reguladores de voltagem, os amplificadores operacionais e os amplificadores de áudio. Exemplos de circuitos integrados digitais são as portas lógicas, os contadores, as memórias e os microprocessadores.

1.2.10 Transdutores de som

Os transdutores de som ou eletro-acústicos, como seu próprio nome indica, convertem sinais elétricos de corrente ou voltagem em ondas sonoras e

vice-versa, ou seja, também convertem ondas sonoras em sinais elétricos. Os principais tipos de transdutores de som utilizados na eletrônica são os microfones, os alto-falantes e os buzzers, **figura 1.18**.

Os **microfones** convertem ondas sonoras, ou seja, variações da pressão do ar, em sinais elétricos equivalentes. Estes sinais são posteriormente processados por circuitos eletrônicos a fim de amplificar, gravar ou modificar o som original. Existem vários tipos de microfones, dependendo do seu princípio de funcionamento. Os mais utilizados são os de bobina móvel ou dinâmica e os de capacitor. Outros tipos são o eletreto, o de cristal e o de carbono.

Os **altofalantes** convertem sinais elétricos em sons equivalentes. Os alto-falantes mais utilizados da atualidade são os de tipo dinâmico ou de bobina móvel, formados por uma bobina que vibra entre os pólos de um ímã e move um cone de papel segundo o ritmo imposto pelo sinal elétrico. Também existem alto-falantes piezoelétricos, eletrostáticos e de outras tecnologias. Uma variante dos alto-falantes convencionais são os **fonos de ouvido**, utilizados para transmitir diretamente ao ouvido informações audíveis.

Os **buzzers** emitem um som distinto quando sobre elas se aplica uma voltagem direta (DC) entre seus terminais. São semelhantes em sua construção interna aos altofalantes pi-

ezoelétricos. São utilizados principalmente como indicadores audíveis em sirenes, alarmes, brinquedos, telefones, computadores, eletrodomésticos, etc.

1.2.11 Transdutores de luz

Os **transdutores de luz** ou óticos, como seu próprio nome indica, são dispositivos que convertem ondas luminosas em sinais elétricos e viceversa. Os principais tipos de transdutores de luz utilizados atualmente em trabalhos eletrônicos são as lâmpadas, as células fotoelétricas, os semicondutores óticos e os visualizadores ou *displays*.

As **lâmpadas**, **figura 1.19**, convertem energia elétrica em luz utilizando-se de vá-

rios princípios. Elas podem ser basicamente de dois tipos: incandescentes e de descarga de gás. As lâmpadas incandescentes são baseadas na propriedade que possuem certos materiais, como o tungstênio, de emitir luz quando se eleva a sua temperatura interna. As lâmpadas de descarga, por sua vez, geram luz como resultado da passagem de uma corrente através de um gás. A este último grupo pertencem as lâmpadas fluorescentes, as lâmpadas de neon e as lâmpadas de xenônio ou estroboscópicas.

As lâmpadas incandescentes e de neon são utilizadas principalmente como luzes indicadoras, ainda que tenham sido substituídas amplamente nesta função pelos LEDs. As lâmpadas fluorescentes, por sua vez, são muito utilizadas como fontes de luz para scanners, máquinas de fax, copadoras, displays LCD, etc. As lâmpadas de xenônio, que emitem lampejos de luz muito fortes, são empregadas em jogos de luzes de discotecas, lâmpadas de emergência, flashes fotográficos, etc.

As **células fotoelétricas**, **figura 1.20**, convertem a luz em sinais elétricos. Elas podem ser basicamente de dois tipos: condutivas ou fotovoltaicas. As células fotocondutivas, feitas geralmente de sulfeto de cádmio, mudam sua resistência de acordo com a quantidade de luz incidente.

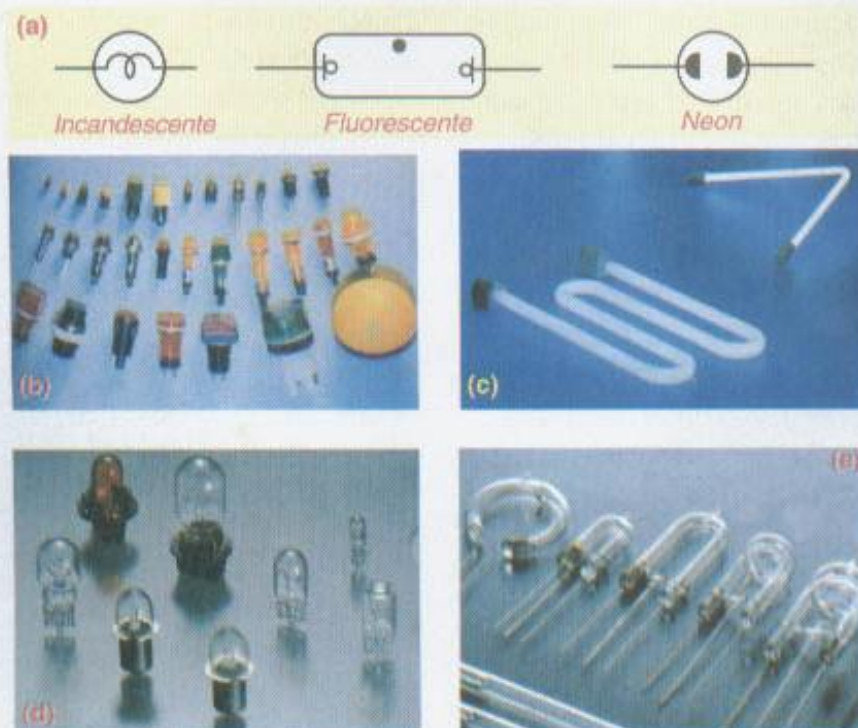


Figura 1.19 Lâmpadas

(a) Simbologia (b) Lâmpadas de neon (c) Lâmpadas fluorescentes de catodo frio (d) Lâmpadas incandescentes (e) Lâmpadas estroboscópicas de xenônio



Figura 1.20 Células fotoelétricas (a) Simbologia (b) Células fotocondutivas

Por esta razão também são denominadas fotorresistências ou LDRs. As células fotovoltaicas, feitas de junções de semicondutores, produzem uma voltagem quando são iluminadas. Um exemplo de aplicação prática são as células solares utilizadas como fonte de alimentação em satélites, veículos espaciais, etc.

Os **semicondutores óticos**, como seu próprio nome indica, são dispositivos feitos de junções PN que produzem luz ou baseiam sua operação na quantidade de luz incidente. Exemplos de semicondutores óticos são os diodos emissores de luz, ou LEDs, os fotodiodos e os fototransistores, **figura 1.21**. Também se incluem dentro desta categoria os acopladores óticos e os visualizadores.

Os **LEDs** são diodos que emitem luz quando a corrente que passa através deles circula em uma direção e não o fazem quando a corrente circula em direção contrária. O catodo é normalmente o terminal situado próximo do lado plano da cápsula. A luz emitida por um LED pode ser vermelha, verde, amarela ou azul. Também dispõem-se de LEDs que produzem luzes infravermelhas (invisíveis), laser (coerente), etc. Os LEDs de luz visível são utilizados principalmente como indicadores, os infravermelhos em controles remotos e os a laser em leitores de CDs.

Os **fotodiodos** e os **fototransistores** são, respectivamente, diodos ou transistores, cuja capacidade de condução

ou amplificação de corrente aumenta em relação à quantidade de luz que passa através de uma janela transparente. Os fotodiodos são dispositivos de dois terminais, enquanto que os transistores podem ter dois ou três terminais. Ambos os tipos são utilizados em contadores de objetos, medidores de luz, leitores de códigos de barras e outras aplicações.

Os **acopladores óticos**, **figura 1.22**, são dispositivos que transferem sinais de um circuito a outro por via ótica, ou seja, sem contato elétrico. Eles são formados por um emissor de luz em um lado e por um detector de luz no outro. O emissor de luz é geralmente um LED infravermelho. O detector pode ser um fotodiodo, um fototransistor ou um fototiristor. Os acopladores óticos são muito utilizados para isolar entre si as etapas de controle e de potência de muitos sistemas eletrônicos, bem como para medir velocidade, movimento e outras aplicações.

Os **visualizadores** ou **displays**, **figura 1.23**, são dispositivos que convertem sinais elétricos em informação visual, incluindo imagens, letras, números, etc. Os principais tipos de visualizadores utilizados em eletrônica são os tubos de raios catódicos ou TRCs, os displays LED e os displays de cristal líquido ou LCD. Também existem visualizadores de plasma, eletroluminiscentes,

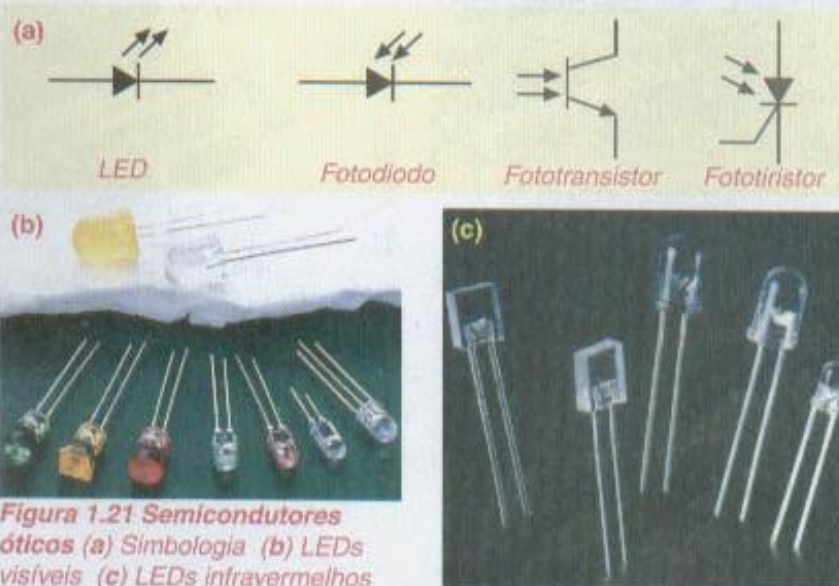


Figura 1.21 Semicondutores óticos (a) Simbologia (b) LEDs visíveis (c) LEDs infravermelhos

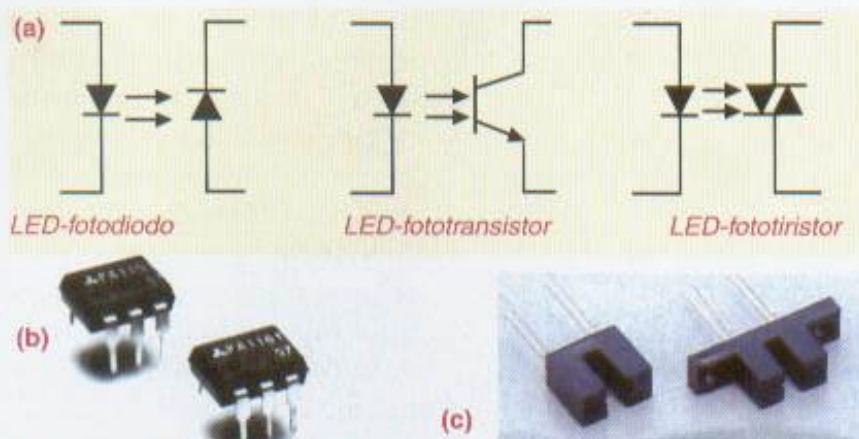


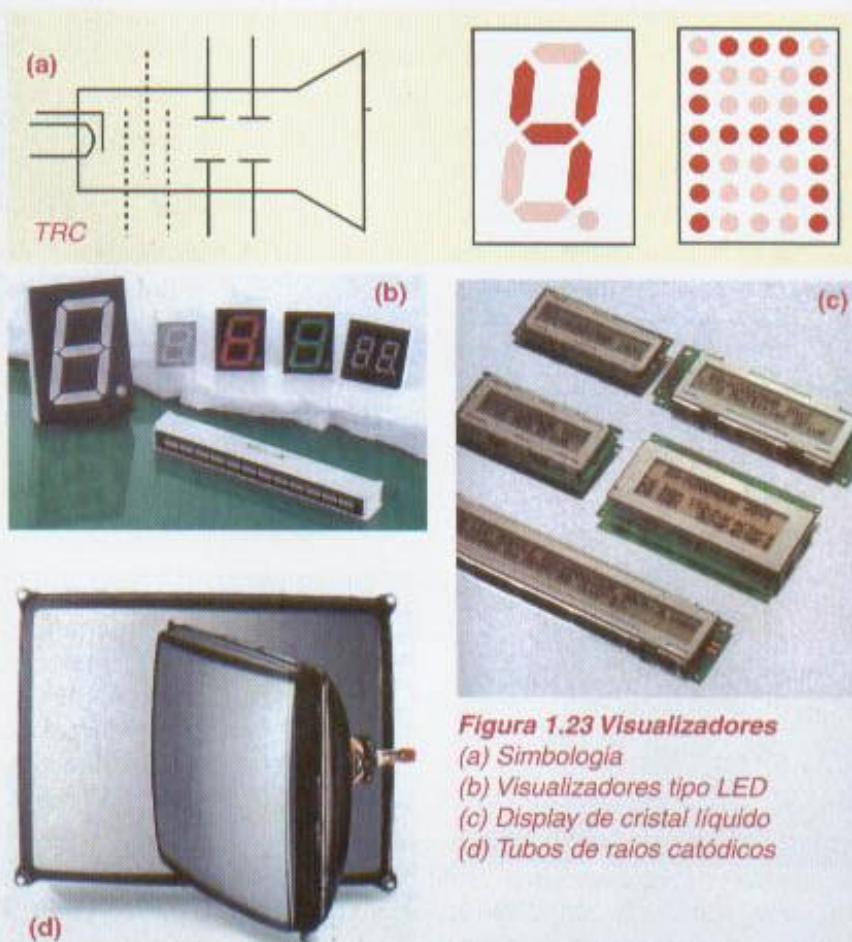
Figura 1.22 Acopladores óticos
(a) Simbologia (b) Acopladores óticos DIP (c) Acopladores óticos ranhurados

fluorescentes e de outras tecnologias.

Os **tubos de raios catódicos**, baseados na mesma tecnologia das válvulas de vácuo, antecessoras dos transistores modernos, produzem luz quando os elétrons, projetados a partir de um canhão eletrônico e controlados por um sinal elétrico, atingem sua superfície, coberta com um tipo especial de fósforo. Eles são utilizados como telas ou monitores em computadores, osciloscópios, receptores de televisão, eletrocardiogramas, radares e outros sistemas eletrônicos.

Os **visualizadores LED**, como seu próprio nome indica, foram desenvolvidos à base de diodos emissores de luz ou LEDs. Eles são utilizados principalmente para visualizar letras, números e caracteres especiais. Um tipo muito comum é o *display* decimal, constituído por sete segmen-

tos LED organizados em forma de 8 e com o qual é possível se apresentar os números de 0 a 9. Os LEDs também podem estar organizados formando uma matriz de pontos ou outro padrão de representação.



Os **displays de cristal líquido**, por sua vez, não emitem luz, apenas controlam a luz incidente. Baseiam-se nas propriedades de certos materiais, chamados *cristais líquidos*, de absorver ou refletir a luz dependendo da aplicação de sinais elétricos com determinadas características. São muito utilizados em relógios, calculadoras, computadores, multímetros, etc.

Também existem transdutores óticos que realizam a função inversa dos visualizadores, ou seja, convertem imagens em sinais elétricos. Entre eles podemos mencionar os tubos fotomultiplicadores, os dispositivos de carga aco-

plada ou CCDs, os intensificadores de imagem e os vídcons. Os CCDs, por exemplo, utilizados nas câmeras de vídeo, reúnem imagens, as quais são lidas eletronicamente mediante um feixe de elétrons e são convertidas em sinais elétricos equivalentes.

1.2.12 Transdutores de movimento

Os transdutores de movimento, como seu próprio nome indica, são dispositivos que convertem o movimento de rotação ou linear em sinais elétricos equivalentes e viceversa. Os principais tipos de transdutores mecânicos utilizados na eletrônica são os motores, os solenóides e os codificadores óticos, **figura 1.24**.

Os **motores** convertem energia elétrica em movimento de rotação. Eles são formados por duas bobinas, uma fixa chamada **estator** e uma móvel chamada **rotor**, as quais, ao serem energizadas, produzem campos magnéticos cuja interação causa o giro permanente do rotor. Podem ser de corrente alternada (AC) ou de corrente contínua (DC). Um exemplo muito comum de motor DC é o **motor passo a passo** (PAP), utilizado em robôs, unidades de disco e outras aplicações de precisão.

Os **solenóides**, também chamados **eletroímãs**, convertem energia elétrica em movimento linear. São formados por uma bobina oca den-

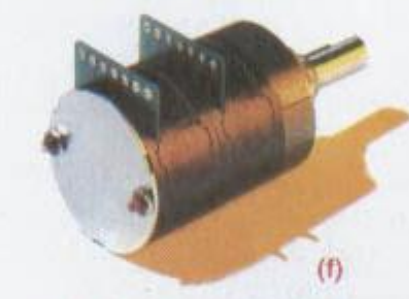
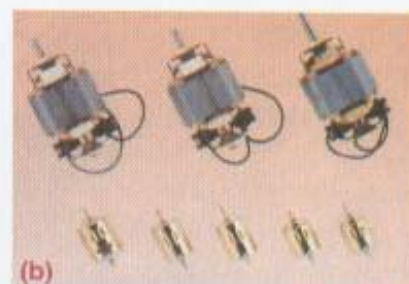


Figura 1.24 Transdutores de movimento (a) Simbologia (b) Motores AC (acima) e DC (abaixo) (c) Motor com caixa de redução (d) Motor passo a passo (e) Solenóides (f) Codificador ótico para controle de movimento

tro da qual se desloca um núcleo móvel. Quando se aplica uma corrente à bobina, cria-se um campo magnético muito forte que automaticamente atrai o núcleo até o furo. Eles são muito utilizados para acionar peças ou objetos mecânicos.

Os **codificadores óticos**, também conhecidos como **encoders**, são dispositivos, na realidade sistemas completos, que convertem movimento em sinais elétricos, os quais podem ser utilizados para determinar a velocidade de giro de um motor, a posição do eixo ou o número de rotações do

mesmo. São formados por um disco ranhurado que se move entre uma fonte de luz e um detector. Podem ser de dois tipos, incrementais ou absolutos.

1.2.13 Outros tipos de transdutores

Na eletrônica, dispõe-se de uma grande variedade de transdutores para detectar ou medir variáveis físicas como temperatura, pressão, velocidade, umidade, etc., e convertê-las em sinais elétricos equivalentes. Estes sinais são processados por circuitos eletrônicos especializados para determinar o valor da variável

que representam e/ou atuar sobre o processo ao qual pertencem. A estes tipos de transdutores se denominam genericamente **sensores**.

Existem sensores para virtualmente todo o tipo de variáveis encontradas no mundo físico. Em alguns casos, a variável a ser medida é por si só uma quantidade elétrica. Por exemplo, os impulsos nervosos são sinais de voltagem. Sem dúvida, na maioria dos casos, a variável a ser medida não é elétrica e deve ser convertida em um sinal elétrico para poder ser quantificada. É o caso da temperatura, da luz, do som, do magnetismo, da umidade relativa, do deslocamento, da força, etc. Para cada situação utilizam-se sensores especializados.

Para a medição de temperatura, por exemplo, se recorre a sensores como os pares térmicos, os termistores, as resistências de platina ou RTDs, os sensores de estado sólido e diversas versões de sensores infravermelhos, piezoelétricos, etc. Os **termistores**, em particular, detectam temperatura variando sua resistência interna, enquanto que os **pares térmicos** o fazem produzindo uma voltagem.

Para a medição de posição, deslocamento, alongamento, aceleração, força, velocidade, pressão e outras variáveis físicas relacionadas, utilizam-se sensores como os

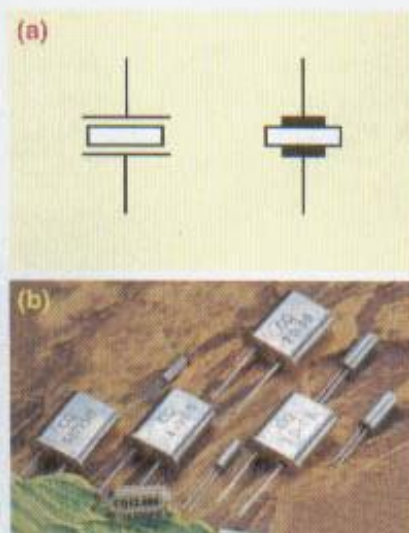


Figura 1.25 Cristais piezoelétricos

(a) Simbologia (b) Cristais de quartzo

transformadores diferenciais de variação linear ou LVDTs, os extensômetros, os interferômetros, os acelerômetros e diferentes versões de transdutores capacitivos, magnéticos, piezoelétricos, etc. Os **LVDTs**, em particular, detectam deslocamento produzindo uma voltagem induzida, enquanto que os extensômetros o fazem variando sua resistência.

Para a medição de campos magnéticos, produzidos por ímãs e condutores com corrente, utilizam-se transdutores como os sensores de efeito de Hall, as bobinas móveis, os dispositivos de interferência quântica e os magnetômetros de ressonância magnética. Os **sensores de efeito de Hall**, por exemplo, detectam campos magnéticos produzindo uma voltagem proporcional, enquanto que os **magnetômetros de ressonância** o fazem gerando um sinal de frequência determinada.



(c) Ressonadores cerâmicos

Para medir a pressão (força por unidade de área) utilizam-se os chamados **transdutores piezoelétricos**, formados por um cristal de quartzo ou material cerâmico emparedado entre duas lâminas metálicas. Quando se aplica uma força às placas, nos extremos do transdutor, produz-se uma voltagem proporcional à pressão exercida. Este fenômeno é denominado **efeito piezoelétrico** e é reversível, quer dizer, a aplicação de uma voltagem entre as placas faz com que o cristal vibre.

O efeito piezoelétrico é a base de operação de muitos dispositivos eletrônicos comuns como microfones, alto-falantes, cristais, fusíveis de cartucho, etc. Os **cristais**, figura 1.25, em particular, são dispositivos que produzem **oscilações** ou vibrações elétricas a partir das vibrações mecânicas originadas quando se aplica uma voltagem alternada entre as faces do cristal.

São utilizadas em relógios, computadores, equipamentos de comunicações e outras aplicações.

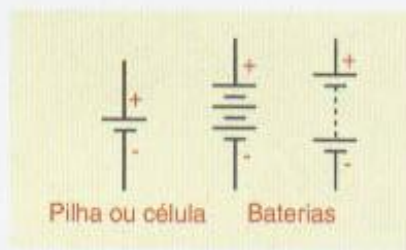
1.2.14 Baterias

As **baterias**, figura 1.26, são dispositivos que produzem energia elétrica a partir de reações químicas controladas. São utilizadas como fontes de alimentação de uma grande variedade de aparelhos eletrônicos. Elas são formadas por uma ou várias **células** conectadas entre si. Cada célula é formada por dois eletrodos, um positivo ou **catodo** e um negativo ou **anodo**, separados por uma solução aquosa sólida ou líquida, condutora de eletricidade, chamada **eletrólito**.

As baterias podem ser basicamente de dois tipos, **secundárias** ou **primárias**, dependendo, respectivamente, de serem recarregáveis ou não, e são fabricadas utilizando-se diversas tecnologias de células. As mais comuns são as secas ou de carvão e zinco, as alcalinas, as de níquel-cádmio, as de chumbo-ácido e as de lítio.

1.2.15 Componentes eletromecânicos

Os componentes eletromecânicos, conforme mencionado anteriormente, são dispositivos que realizam ações elétricas simples partindo de ações mecânicas internas ou externas. Os principais tipos de peças eletromecânicas utilizadas na eletrônica são os condutores, os interruptores, os relés,



(a) Simbologia



(c) Pilhas híbridas de níquel



(e) Baterias de níquel-cádmio
Figura 1.26 Pilhas e baterias

os conectores e as placas de circuito impresso.

Os **condutores**, figura 1.27, são peças de resistência muito baixa que são utilizadas em forma de fios, cabos ou linhas de circuito impresso, para transportar ou transferir sinais de corrente ou de voltagem de um ponto a outro. Os fios são formados por um condutor central cercado por um isolante e os cabos por vários fios individuais isolados.

As **placas de circuito impresso** ou PCBs (*Printed Cir-*



(b) Baterias de chumbo-ácido



(d) Baterias secas



(f) Pilhas de lítio

cuit Boards) são formadas por uma placa ou lâmina isolante de material epóxi ou fenólico que tem linhas condutoras muito finas de cobre ou prata aderidas sobre uma ou ambas as faces. Estas últimas são denominadas linhas ou pistas e servem para estabelecer as diferentes conexões entre os elementos que constituem o circuito. A placa também atua como suporte físico dos componentes.

Os **interruptores**, figura 1.28, são dispositivos que são utilizados para permitir ou

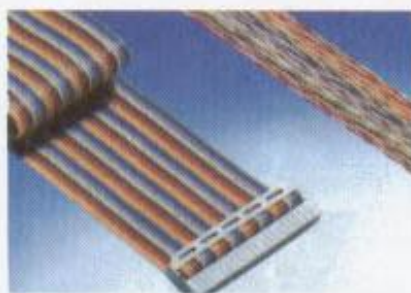
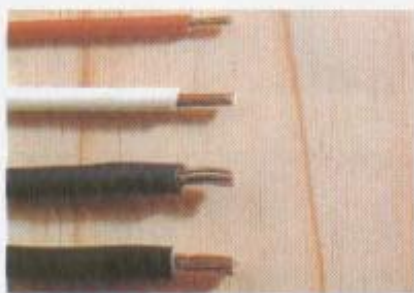


Figura 1.27 Condutores

(a) Fios sólidos e trançados (b) Cabos de fita ou planos (c) Placas de circuito impresso

interromper mecanicamente a passagem de corrente de um ponto a outro, bem como para dirigi-la ou roteá-la para vários pontos. Podem ser de vários tipos, dependendo de seu modo de acionamento e da configuração de contatos.

Os **teclados**, **figura 1.29**, são arranjos constituídos por vários interruptores que são utilizados para inserir dados em sistemas ou aparelhos eletrônicos relativamente complexos. Normalmente, os contatos acontecem sobre uma placa de circuito impresso e a vedação dos mesmos é feita por uma peça de

grafite, um composto plástico condutor, uma membrana elástica condutora ou uma peça fundida de silicone impulsionada por um botão de acionamento.

Os **relés**, **figura 1.30**, são interruptores operados por meios eletromagnéticos. São formados por uma bobina de núcleo de ferro e um arranjo de contatos. Quando se aplica uma corrente à bobina, o campo magnético produzido por esta última aciona os contatos, abrindo os que estavam fechados e fechando os que estavam abertos. Também existem relés de estado sólido, baseados em

semicondutores e de acionamento completamente eletrônico.

Os **conectores**, **figura 1.31**, são peças eletromecânicas que são utilizadas para ligar ou unir eletricamente duas ou mais partes de um sistema eletrônico de forma permanente. No entanto, esta união pode ser desfeita por métodos manuais, sem necessidade de recorrer a ferramentas especiais. Podem ser de dois tipos, **machos** ou **fêmeas**, e foram projetados para aceitar um ou vários condutores, bem como para serem instalados em painéis ou em placas de circuitos impressos.

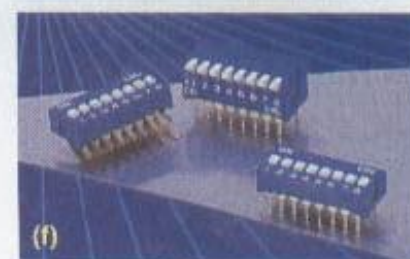
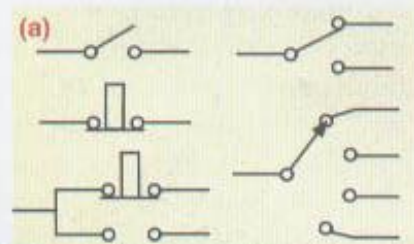


Figura 1.28 Interruptores

(a) Simbologia (b) Interruptores de chave (c) Interruptores rotativos

(d) Interruptores de balancim (e) Interruptores de botões de pressão (f) Interruptores DIP



Figura 1.29 Teclados
(a) Teclados de silicone.
(b) Teclados de membrana.

1.2.16 Dispositivos de proteção

Os dispositivos de proteção, como seu próprio nome indica, são peças que protegem os circuitos e sistemas eletrônicos contra condições de operação adversas tais como correntes, voltagens e níveis de aquecimento excessivos. Os principais tipos de dispositivos de proteção utilizados na eletrônica são os fusíveis, os *breakers*, os varistores e os dissipadores de calor, **figura 1.32**. Também pode-se incluir dentro dessa categoria os chassis ou caixas de montagem.

Os **fusíveis** são dispositivos que limitam a quantidade de corrente que pode passar através de um circuito, abrindo fisicamente quando essa corrente for superior a um limite máximo estabelecido. São constituídos por um filamento, fechado dentro de uma ampola de vidro, que se destrói quando uma corrente superior à especificada passa através dele. Uma vez que isto tenha acontecido, o fusível deve ser substituído por um novo.

Os **breakers (interruptores)** realizam a mesma função de proteção que os fusíveis, ou seja, abrem um circuito em caso de sobrecarga. A diferença deles em relação aos fusíveis é que não se destroem e podem ser reconectados, servindo como interruptores convencionais de ligado e desligado.

Os **varistores**, também denominados MOVs (*Metal Oxide Varistors*) ou supressores transitórios, são dispositivos que limitam a voltagem aplicada a um circuito ou peça, cortando o circuito fisicamente quando a mesma for superior a uma voltagem máxima especificada e absorvendo a energia resultante. São muito semelhantes em sua aparência externa com os capacitores cerâmicos, mas comportam-se eletricamente como diodos de Zener bidirecionais. São muito utilizados para proteger circuitos e componentes delicados contra picos de alta vol-

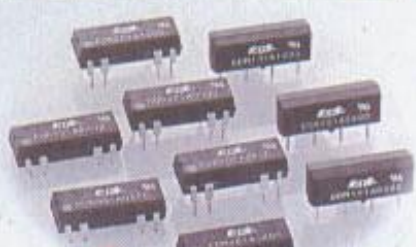
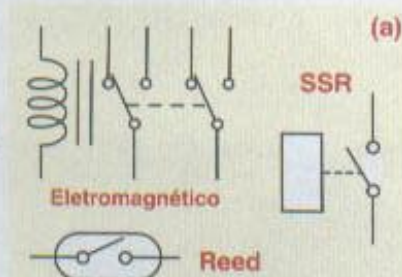


Figura 1.30 Relés (a) Simbologia (b) Relés para circuito impresso (c) Relés de potência (d) Relés miniatura (e) Relés de estado sólido (f) Relés de palheta



Figura 1.31 Conectores (a) Terminais para fios (b) Conectores para áudio e vídeo (c) Conectores para comunicações (d) Bases para circuitos integrados (e) Conectores para computadores

tagem produzidos nas linha de alimentação AC.

Os **dissipadores de calor** são peças metálicas especiais que se acoplam a semicondutores de potência e dispersam pelo meio ambiente o calor desenvolvido nos mesmos como resultado da circulação de corrente. Algumas vezes trazem incorporados um pequeno ventilador para agilizar a troca de calor.

As **caixas de montagem**, também chamadas gabinetes ou chassis, têm um papel funcional, estético e ergonômico muito importante em qualquer sistema eletrônico. Além de servir como meio físico de suporte dos diversos circuitos e elementos operativos que a constituem, o chassis oferece a qualquer projeto a aparência de um produto final, permitindo que se harmoni-

ze com o seu formato e possa ser utilizado confortavelmente. Também o protege contra o uso inadequado, a interferência eletromagnética, as condições ambientais e outros fatores. Podem ser de plástico ou metálicas e ter muitas e diversas formas, dependendo da aplicação específica do sistema que hospedam, da imaginação do projetista e das técnicas de construção disponíveis.



Figura 1.32 Dispositivos de proteção (a) Fusíveis (b) Caixas de controle (c) Varistores (d) Dissipador de calor

1.3 Circuitos e sistemas eletrônicos

Como se mencionou anteriormente, qualquer aparelho eletrônico, independentemente de sua complexidade, é construído a partir **peças** organizadas em **circuitos** que cumprem funções específicas. A eletrônica trata fundamentalmente do estudo, projeto e uso de circuitos. As peças por si mesmas carecem de utilidade; é a forma como se conectam o que constitui a riqueza da tecnologia eletrônica.

Em outras palavras, os circuitos são a essência dos sistemas eletrônicos. Exemplos de circuitos eletrônicos são os amplificadores, as fontes de alimentação, os filtros, os osciladores, os comparadores, as portas lógicas, os flip-flops, os decodificadores, os multiplexadores, os temporizadores, os contadores, os registros e as memó-

rias. Todos eles serão tratados em detalhe em capítulos posteriores deste curso. Na **figura 1.33** mostra-se um exemplo de circuito eletrônico, correspondente neste caso a uma fonte de alimentação.

Antes da revolução da microeletrônica, as peças eram fabricadas separadamente e eram conectadas para que se obtivesse o circuito desejado. Hoje, estes últimos também são produzidos na forma de circuitos integrados completos, com todas as interconexões realizadas em fábrica, **figura 1.34**. As peças utilizadas nos circuitos integrados (transistores, diodos, resistências e, principalmente, capacitores) cumprem as mesmas funções que seus equivalentes individuais. A diferença é unicamente de tamanho.

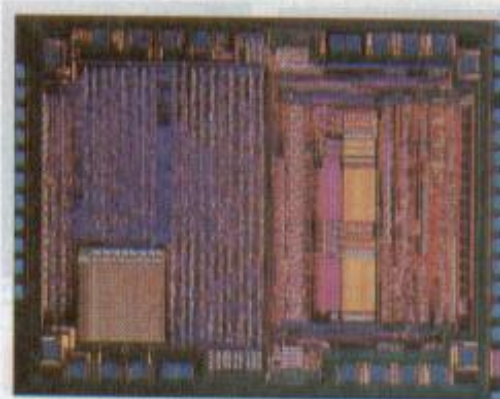


Figura 1.34 Interior de um circuito integrado

Os sistemas eletrônicos são construídos a partir de circuitos. Um sistema pode ser definido como sendo um conjunto de circuitos interconectados ou relacionados entre si para realizar uma função bem definida que nenhum deles poderia fazer por si mesmo. Exemplos de sistemas eletrônicos são os computadores digitais, os equipamentos de áudio e vídeo, os instrumentos de medição, os sistemas de alarme, etc.

Muitos destes sistemas serão tratados de forma geral em capítulos posteriores deste curso. Na **figura 1.35** mostra-se como exemplo, a estrutura de um sistema eletrônico, correspondente neste caso a um multímetro digital ou DMM profissional.

Os sistemas eletrônicos podem ser formados por peças individuais ou vir integrados em uma pastilha de silício. O alcance da integração é agora tão grande que a fronteira

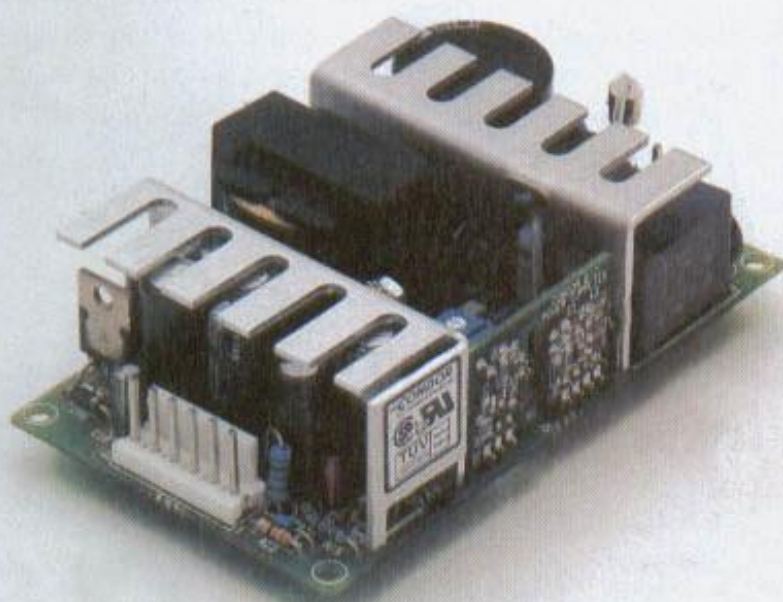


Figura 1.33 Exemplo de um circuito ou subsistema eletrônico



Figura 1.35 Exemplo de um sistema eletrônico

entre “circuito” e “sistema” é cada vez menos clara. De fato, alguns chips são em realidade sistemas ou subsistemas completos. Em muitos casos, os sistemas se constroem de uma mistura de peças individuais e circuitos integrados.

A maioria dos sistemas eletrônicos são projetados para receber um estímulo de entrada, processá-lo e produzir uma resposta de saída capaz de realizar a tarefa requerida, **figura 1.36**.

Em um toca discos, por exemplo, o sinal proveniente do cartucho alimenta a entrada de um amplificador, o qual se encarrega de

produzir um sinal equivalente capaz de fazer funcionar o alto-falante. Sem a ajuda de um sistema de amplificação, o cartucho não poderia impulsionar

diretamente o alto-falante.

Os circuitos utilizados para configurar sistemas eletrônicos são classificados em duas categorias básicas: analógicos ou lineares e digitais ou de comutação. Os circuitos analógicos gerenciam sinais de corrente e de tensão variáveis, as quais podem adotar uma gama contínua de valores.

Os circuitos digitais, por sua vez, trabalham com sinais que só podem adotar um de dois valores possíveis, chama-

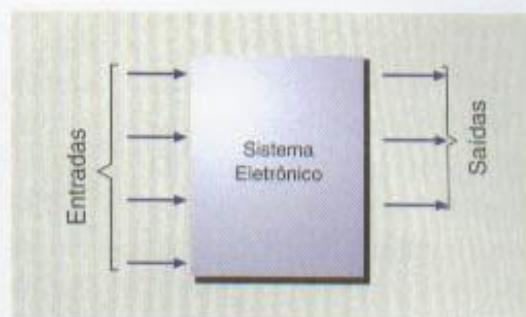


Figura 1.36 Entradas e saídas em um sistema

dos estados **alto** e **baixo**. Muitos sistemas eletrônicos contêm tanto circuitos analógicos como digitais. Neste curso trabalharemos extensivamente com circuitos de ambos os tipos.

Os sistemas geralmente são representados na forma de diagramas de blocos. Num diagrama de blocos os circuitos que constituem o sistema são representados como caixas. Na **figura 1.37** mostra-se um exemplo de diagrama de blocos correspondente a um receptor de rádio. Nesta forma de representação, não é necessário saber exatamente como cada circuito está constituído internamente. O importante é conhecer as funções dos circuitos e saber que eles estão sendo representados por caixas pretas. ➡

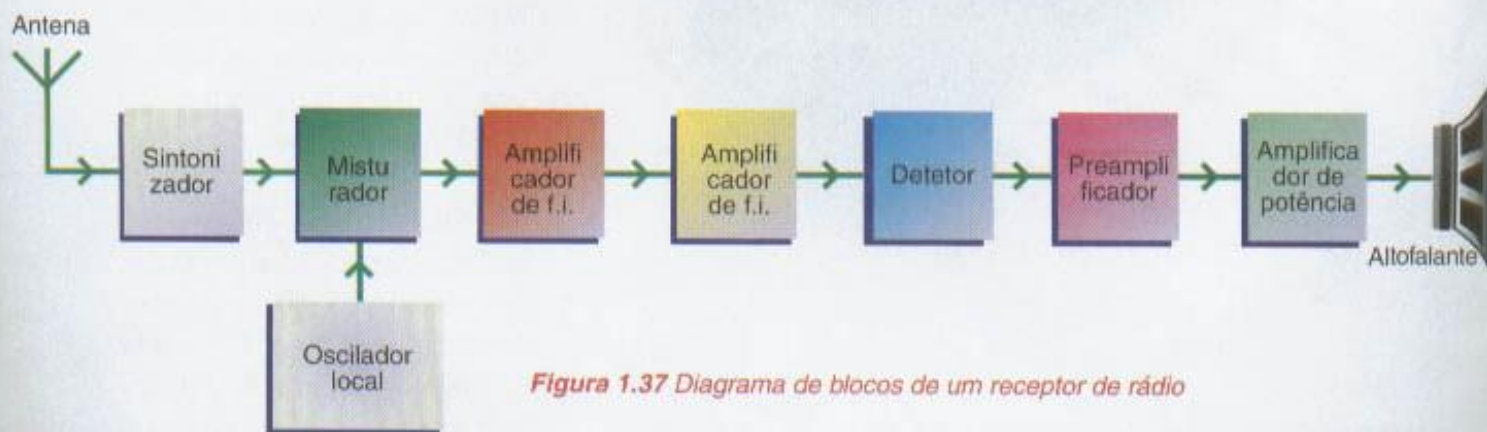


Figura 1.37 Diagrama de blocos de um receptor de rádio

Capítulo 2

Componentes Passivos



- 2.1 O que é um componente eletrônico?**
- 2.2 Tipos de componentes**
- 2.3 Os componentes passivos**
- 2.4 Resistências ou resistores**
- 2.5 Capacitores**
- 2.6 Bobinas ou indutores**
- 2.7 Transformadores**

Em Eletrônica são utilizados diversos tipos de peças para construir circuitos de todas as espécies e controlar e manipular a corrente elétrica de formas muito distintas. Neste capítulo, em específico, nos referiremos às resistências, aos capacitores e às bobinas, conhecidos coletivamente como **componentes lineares passivos**. Conheceremos o que são, como são simbolizados, classificados e identificados, e para o que servem. Também introduziremos e explicaremos vários aspectos metodológicos que serão uma regra ao longo do curso.

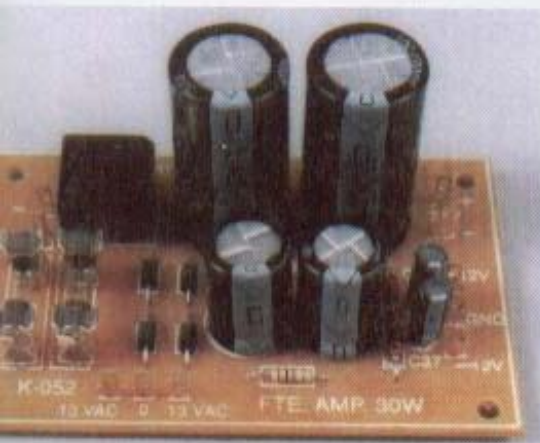
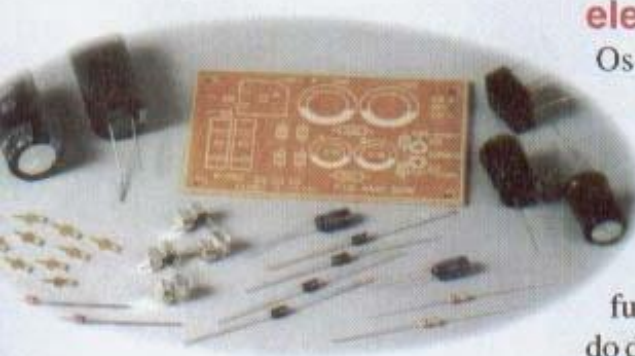


Figura 2.1 Os **componentes ou peças** (acima) são os elementos básicos construtivos dos circuitos (abaixo). O circuito da fotografia corresponde à fonte de um amplificador.

2.1 O que é um componente eletrônico?

Os componentes, ou peças, são os elementos básicos contrutivos dos circuitos, **figura 2.1**. Em um circuito, cada componente cumpre uma função específica dependendo de seu tipo e da forma como esteja conectado aos demais.

O número de peças utilizadas em um circuito ou sistema pode chegar a ser muito grande. Sem dúvida, só existe um número limitado de categorias ou **tipos**. Neste capítulo e nos que se seguem, os analisaremos sob esta perspectiva.

Os componentes são de grande importância dentro de qualquer sistema eletrônico. Se qualquer um deles falhar, faltar ou estiver mal instalado ou selecionado, isto afetará o sistema na função para a qual foi projetado.

2.2 Tipos de componentes

Em Eletrônica são utilizados diversos tipos de componentes para conduzir, controlar, selecionar, dirigir, interromper, armazenar e, em geral, manipular a **corrente** elétrica de formas muito variadas. Neste curso estudaremos em linhas gerais os seguintes componentes:

Passivos

- Resistências
- Capacitores
- Bobinas
- Transformadores

Eletromecânicos

- Fios
- Cabos
- Interruptores
- Conectores

Pilhas e baterias

Semicondutores

- Diodos
- Transistores bipolares
- Transistores FET
- Tiristores

Transdutores

Circuitos integrados

2.3 Os componentes passivos

Os componentes eletrônicos podem ser **ativos** ou **passivos**, dependendo de sua capacidade de amplificar **potência**. Exemplos de componentes passivos são as resistências, os capacitores, as bobinas, os diodos, os conectores, os interruptores, as células fotoelétricas, os termistores e os cristais. Exemplos de componentes ativos são os transistores, os tiristores, os circuitos integrados e as válvulas de vácuo.

Uma subcategoria muito importante de **componentes passivos** são os **componentes lineares passivos**, assim chamados porque se comportam linearmente com a corrente ou a **voltagem**, ou seja, se a voltagem aumenta ou diminui, a corrente também aumenta ou diminui na mesma proporção e vice-versa.

Os componentes lineares passivos básicos da eletrônica são as **resistências**, os **capacitores** e as **bobinas**, às quais nos referiremos neste capítulo, **figura 2.2**. Os componentes ativos e outros tipos de componentes passivos especiais serão analisados em capítulos posteriores.

Muitos componentes eletrônicos são na realidade variantes dos três tipos básicos de componentes lineares passivos, pode-se reduzi-los a

uma combinação dos mesmos para efeito de análise, ou trocam de comportamento de um tipo a outro sob determinadas circunstâncias.

Um transformador, por exemplo, é um tipo específico de indutor e um cristal que se comporta sob determinadas circunstâncias como uma resistência, um capacitor, uma bobina ou uma combinação destes três elementos. Assim mesmo, devido à forma como estão construídos, uma bobina pode chegar a comportar-se, a partir de determinada **frequência**, como um capacitor e vice-versa.

+ Os termos que aparecem sublinhados em azul (**potência**, **frequência**, etc.) são definidos brevemente nas caixas explicativas que aparecem em algumas das páginas deste capítulo ou do capítulo anterior. A leitura destas caixas é opcional, mas é recomendada para uma melhor compreensão do tema.

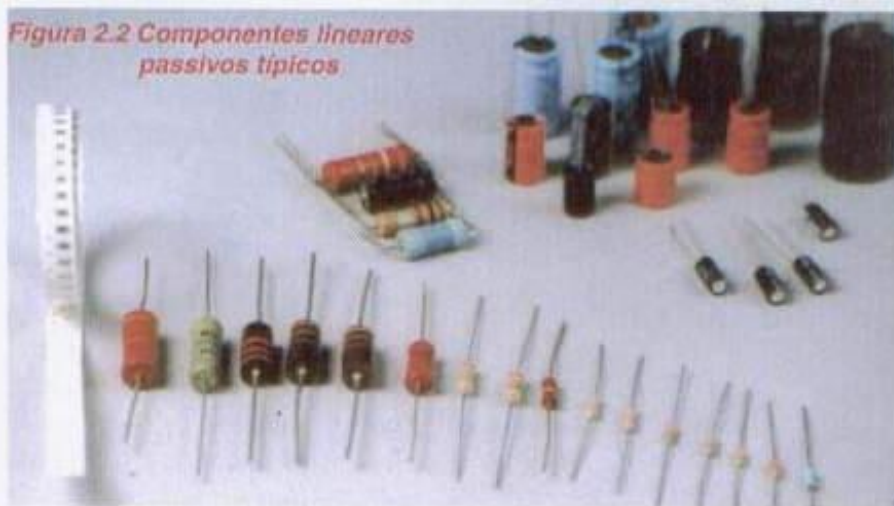
O sistema SI

Este curso utiliza as unidades do Sistema Internacional, SI, a versão moderna do sistema métrico tradicional MKSA. Neste sistema, as unidades básicas ou fundamentais são o metro (m), o quilograma (kg), o segundo (s), o ampère (A), o kelvin (K) e a candela (cd), utilizadas respectivamente para especificar a extensão, a massa, o tempo, a corrente elétrica, a temperatura e a intensidade luminosa. As unidades para outras dimensões (resistência, voltagem, força, etc.) são derivadas destas unidades fundamentais.

Ao longo deste curso se adotará a mesma metodologia para cada termo **novo** importante que se introduza e não seja suficientemente explicado no capítulo respectivo, por não ter relação direta com o tema tratado. A definição formal dos mesmos se dá nos capítulos pertinentes.

+ Neste curso adotaram-se as unidades do Sistema Internacional ou **SI** e a maior parte das recomendações do mesmo relacionadas com o uso de prefixos, a maneira como os números e unidades são escritas, o emprego da vírgula como marcador decimal e outros aspectos formais, os quais serão explicados gradualmente, à medida em que isto seja necessário.

Figura 2.2 Componentes lineares passivos típicos



2.4 Resistências fixas ou resistores

Os **resistores**, **figura 2.3**, são componentes que se opõem à passagem da corrente elétrica. À quantidade de oposição que um resistor apresenta à passagem da corrente se denomina **resistência (R)** e é uma característica intrínseca do dispositivo.

Em geral, todos os materiais dos condutores, até os isolados, oferecem alguma resistência à passagem da corrente. Os condutores, como o cobre e a prata, têm uma resistência muito baixa, enquanto que os isolantes, como o vidro e os plásticos, têm uma resistência muito alta. Os resistores são projetados para proporcionar valores conhecidos de resistência entre ambos os extremos.

Unidade de medida. A unidade de medida da resistên-

cia no Sistema SI é o **ohm**, representada pela letra grega “ômega” (Ω) e assim denominada em homenagem ao físico alemão Georg Simon Ohm (1789-1854), descobridor de uma famosa lei que leva seu nome (a **Lei de Ohm**).

Na prática também são utilizadas outras unidades derivadas como o **kiloohm (k Ω)** e o **megaohm (M Ω)**, equivalentes respectivamente a mil e a um milhão de ohms. Para especificar resistências muito pequenas são utilizadas o **miliohm (m Ω)**, equivalente à milésima parte de um ohm.

A resistência, na prática, é medida utilizando-se um instrumento chamado **ôhmímetro**. Um resistor de 10 k Ω (dez mil ohms), por exemplo, tem uma resistência 10 vezes maior que um de 1 k Ω (mil ohms) e oferece 10 vezes mais oposição à passagem da corrente.

Os fios, cabos, trilhas e conectores utilizados como condutores nos circuitos eletrônicos têm uma resistência muito baixa, da ordem dos miliohms. Os plásticos e outros materiais plásticos utilizados como **isolantes**, por sua vez, têm uma resistência muito alta, de vários milhares de megaohms inclusive.

A faixa de valores de resistência proporcionada pelos resistores práticos se estende tipicamente de menos de 0.1 Ω até mais de 100 M Ω .

A Lei de Ohm

Uma das leis fundamentais da eletrônica. Estabelece que a corrente através de um condutor (I) é inversamente proporcional à sua resistência (R) e diretamente proporcional à voltagem aplicada (E). Isto é:

$$I = E \div R \quad \text{ou} \quad E = I \times R$$

De acordo com este resultado, se aumenta a voltagem sobre uma resistência de um dado valor, a corrente também aumenta na mesma proporção e vice-versa. Os materiais que seguem a lei de Ohm são denominados **ôhmicos** ou lineares. Exemplos: o carvão, os metais e algumas ligas.

÷ De acordo com as recomendações do SI, as unidades cujos nomes são derivados de nomes de cientistas não devem ser traduzidas e sim escritas como no idioma de origem.

÷ Ainda de acordo com as recomendações do SI, os múltiplos e submúltiplos das unidades devem ser estabelecidos em múltiplos de 10^3 e 10^{-3} . Os principais prefixos utilizados em eletrônica para designar os múltiplos e submúltiplos de unidades são:

Múltiplos

giga (G = 10^9 ou 1 000 000 000)

mega (M = 10^6 ou 1 000 000)

kilo (k = 10^3 ou 1 000)

Submúltiplos

mili (m = 10^{-3} ou 1/1 000),

micro (μ = 10^{-6} ou 1/1 000 000)

nano (n = 10^{-9} ou 1/1 000 000 000)

pico (p = 10^{-12} ou 1/1 000 000 000 000)

Simbologia. Os resistores podem ser **fixos** ou **variáveis**. Serão fixos se sua resistência for constante ou variáveis se puder modificar-se por algum

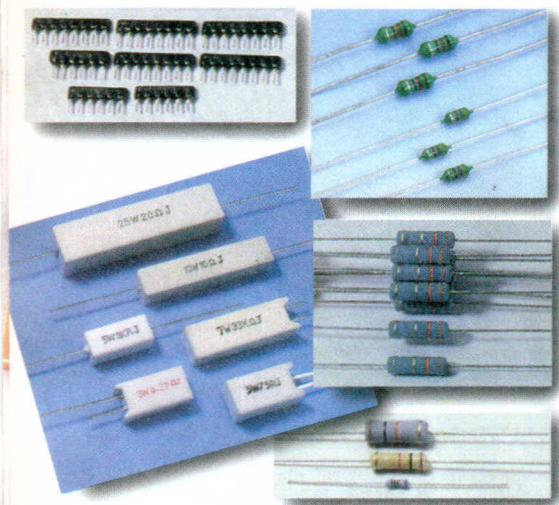


Figura 2.3 Resistências fixas

meio. Na **figura 2.4** mostram-se os símbolos utilizados nos esquemas eletrônicos para representar resistores fixos.

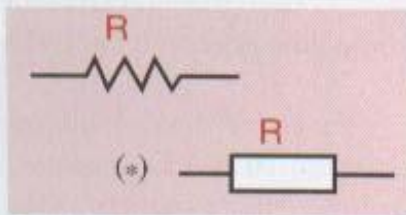


Figura 2.4 Simbologia de resistências fixas

Os resistores variáveis por meios eletromecânicos são denominados comumente **potenciômetros**. Por enquanto nos referiremos apenas às resistências fixas. Os potenciômetros serão brevemente analisados na **seção 2.5**.

+ Neste curso são utilizados preferencialmente os símbolos esquemáticos recomendados pelas normas norte-americanas (ANSI) para representar componentes, circuitos, funções e demais itens. Outros símbolos alternativos, utilizados em esquemas feitos sob outras normas, como a resistência no lado direito da figura 2.4, são indicadas através de um asterisco (*). Estes últimos são fornecidos somente a título de informação.

Tipos. Além de sua divisão entre fixas ou variáveis, as resistências são classificadas principalmente levando-se em conta os materiais utilizados em sua construção, pois estes são os que determinam suas características e aplicações.



Figura 2.5 Construção interna de uma resistência de carvão

Sob essa perspectiva, os principais tipos de resistências utilizadas em eletrônica são as de composição de carvão (aglomeradas), as películas de carvão (pirolíticas), as películas metálicas e as de fios enrolados (bobinadas). Neste curso trabalharemos principalmente com resistências de composição de carbono, **figura 2.5**.

As resistências também são classificadas levando-se em conta o método de instalação ou montagem para a qual foram projetadas. Sob essa perspectiva, as resistências podem ser de **montagem por inserção** ou de **montagem superficial**.

As peças de montagem por inserção são instaladas através dos furos existentes nas placas de circuito impresso. As peças de montagem superficial, caracterizadas por seu tamanho diminuto, são instaladas e soldadas diretamente sobre as pistas do circuito impresso. Na **figura 2.6** mostra-se o aspecto típico de uma resistência de montagem superficial.

A mesma classificação se aplica a outros componentes eletrônicos como capacitores, bobinas, diodos, transistores, circuitos integrados, etc. As peças de montagem superficial, em geral, são muito mais pequenas e precisas que suas equivalentes de montagem por inserção.

Formas de identificação. Os resistores são identificados de várias formas, dependendo de seu tipo. Nos resistores de composição de carvão, por exemplo, os valores da resistência são codificados utilizando-se uma série de faixas coloridas pintadas ao redor do corpo da peça e colocadas em uma das extremidades da mesma, **figura 2-7**.

Cada cor está associada a um número, **tabela 2.1**. A decodificação ou leitura do valor da resistência é realizada



Figura 2.6 Resistência de montagem superficial (chip)

da esquerda para a direita segundo as seguintes regras:

+ Presume-se que estejamos lidando com um código de cores de quatro faixas. Para o código de cinco faixas, muito utilizado em resistências de película metálica, segue-se um procedimento similar.

1.A primeira faixa, que é a mais próxima de uma das extremidades do resistor, apresenta o primeiro dígito do valor da resistência.

2.A segunda faixa apresenta o segundo dígito do valor da resistência.

3.A terceira faixa apresenta o **multiplicador decimal**, ou seja, o número de zeros ou ca-

sas decimais que devem ser acrescentados à direita ou à esquerda dos primeiros algarismos para se obter o valor nominal da resistência.

Por exemplo, se em um dado resistor a primeira faixa for **azul (6)**, a segunda **cinza (8)** e a terceira **vermelha (x100)**, o valor de resistência do mesmo é simplesmente $68 \times 10^2 \Omega$, ou seja 6800Ω (68 seguido de dois zeros) ou $6.8 \text{ k}\Omega$.

Se a terceira faixa fosse preta (x1), seu valor seria $68 \times 10^0 \Omega$ ou seja, 68Ω (68 somente). Da mesma forma, se a terceira faixa fosse **dourada (x 0.1)**, seu valor seria $68 \times 10^{-1} \Omega$ ou seja, $68 \times 0.1 \Omega$ ou 6.8Ω (68 com o ponto decimal uma casa à esquerda).

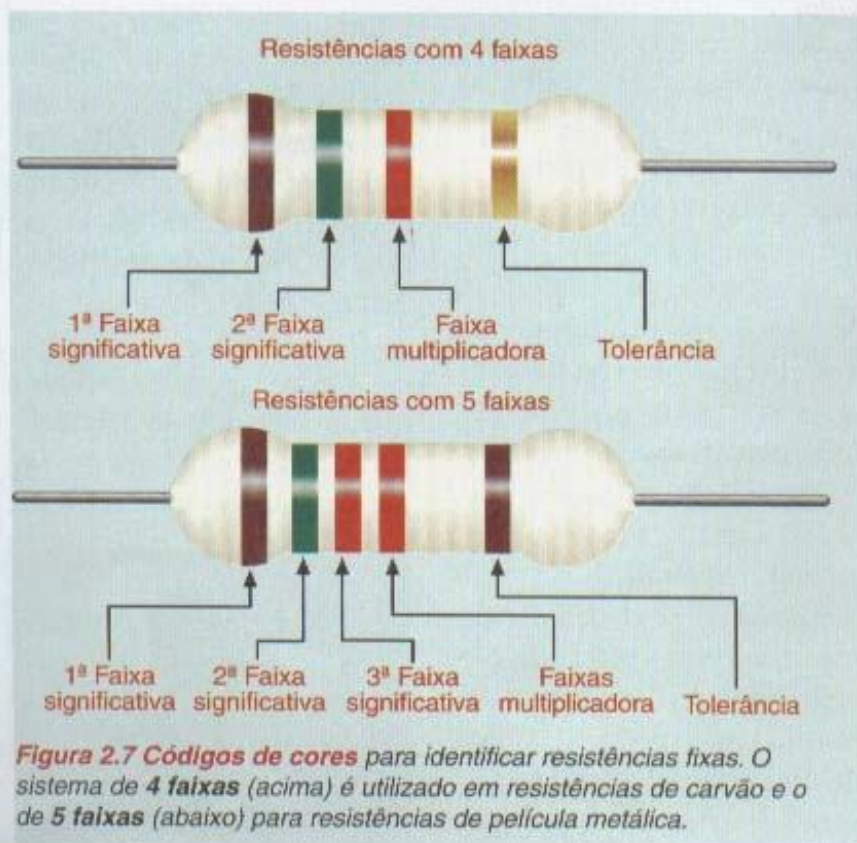
4.A quarta faixa proporciona a exatidão ou **tolerância** do valor de resistência apresentado pelas três primeiras faixas. É especificada como uma porcentagem (%).

Por exemplo, se em um resistor de $10\ 000 \Omega$ (marrom-preto-laranja), a quarta faixa for **dourada ($\pm 5\%$)**, o valor real da resistência é $10\ 000 \Omega \pm 5\%$, quer dizer, pode estar entre $9\ 500 \Omega$ ($10\ 000 \Omega - 500 \Omega$) e $10\ 500 \Omega$ ($10\ 000 \Omega + 500 \Omega$), já que 500Ω é 5% de $10\ 000 \Omega$.

No caso dos resistores de película e de fio enrolado, os valores da resistência e a tolerância vêm, em geral, diretamente marcados sobre o corpo da peça. Algumas vezes, os fabricantes utilizam seus próprios códigos.

Por exemplo, muitos resistores de montagem superficial trazem impresso um código de 3 dígitos, tal como **103**. Neste caso, os dois primeiros algarismos (**10**) indicam os dois primeiros números do valor da resistência e o terceiro (**3**) o multiplicador decimal ou número de zeros que devem ser agregados. Portanto, trata-se de um resistor de $10\ 000 \Omega$, ou seja, $10 \text{ k}\Omega$.

Outra característica distintiva importante dos resistores é a quantidade máxima de potência que podem dissipar sem aquecer-se demasiadamente.



Cor	Faixas significativas	Faixas multiplicadora	Tolerância
Preto	0	x1	
Marrom	1	x10	$\pm 1\%$
Vermelho	2	x100	$\pm 2\%$
Laranja	3	x1,000	
Amarelo	4	x10,000	
Verde	5	x100,000	
Azul	6	x1,000,000	
Roxo	7		
Cinza	8		
Branco	9		
Dourado		x0,1	$\pm 5\%$
Prata		x0,01	$\pm 10\%$

Tabela 2.1 Código de cores padrão para as resistências fixas

Este parâmetro é denominado **potência nominal**.

A potência nominal é especificada em **watts (W)**. Se durante seu trabalho normal, uma resistência dissipa uma potência superior à sua potência nominal, ela se sobreaquece e pode chegar a destruir-se ou queimar-se.

No caso das resistências de carvão, a potência nominal

não vem marcada sobre o corpo da peça, mas está relacionada com o tamanho físico da mesma, ou seja, quanto maior o tamanho, maior a potência e vice-versa, **figura 2.8**.

As resistências de carvão de **1/4 W (0,25 W)**, por exemplo, tem normalmente um comprimento de 12,7 mm (1/2") e as de **1W** um comprimento de 19,05 mm (3/4").



Figura 2.8 A potência das resistências está geralmente relacionada com seu tamanho físico. A fotografia mostra, por ordem, uma resistência de 1/4 W, uma de 1/2 W e uma de 1 W

Para outros tipos de resistências, o valor da potência nominal pode vir marcado ou codificado sobre o corpo da peça, ou estar especificado no manual do fabricante.

Além da resistência nominal (Ω), a tolerância (%) e a potência (W), outras características distintivas importantes das resistências, que determinam sua seleção para uma aplicação determinada, são o **coeficiente de temperatura** e a **voltagem de trabalho**. Estes e outros parâmetros serão analisados em maior detalhe em capítulos posteriores deste curso.

+ Neste curso recorre-se frequentemente ao uso de exemplos numéricos para explicar conceitos gerais e particulares recentemente introduzidos. Desta forma, são propostos exercícios para que o leitor pratique os conhecimentos adquiridos. Todos os exercícios vêm com suas respectivas respostas e explicações correspondentes.

Ao final do curso apresenta-se um questionário completo de avaliação com perguntas, problemas práticos e exercícios de análise. Ao responder esse questionário e remeter a folha de respostas à CEKIT S. A., você opta por um certificado de conhecimentos e treinamento em **Eletrônica Básica Moderna**.

+ De acordo com as recomendações

Exercício 2.1 Um resistor de composição de carvão que forma parte do circuito de um amplificador de áudio tem marcadas sobre seu corpo quatro faixas de cores que são, da esquerda para a direita, amarelo, violeta, laranja e dourado. Entre que limites se encontra o valor real da resistência desta peça?

Resposta: Entre 44650Ω e 49350Ω . O valor nominal da resistência é 47000Ω (amarelo=4, violeta=7 e laranja=000), ou seja, $47 \text{ k}\Omega$, e a da tolerância **5%** (dourado=5%). Visto que 5% de 47000 é 2350 , o limite inferior deve ser $47000 - 2350 = 44650 \Omega$ e o superior $47000 + 2350 = 49350 \Omega$. Entre esses dois limites se encontra o valor real da resistência, o qual poderia ser, por exemplo, 45670Ω .

do SI, ao se escreverem números deve-se utilizar uma vírgula (,) e **não** um ponto (.) ou outra grafia para separar a parte inteira da parte decimal. Desta forma, ao se escreverem números de muitos dígitos, estes devem ser agrupados de três em três, a partir da vírgula, tanto para a parte inteira como para a decimal.

Neste curso adota-se esse último critério para números de 6 ou mais dígitos. A separação entre grupos se realiza deixando um espaço em branco. Os números de 5 dígitos ou menos podem ou não estar separados em grupos. Exemplos:

$6,8 \mu\text{F} = 0,000\ 006\ 8 \text{ F}$
 $2,2 \text{ M}\Omega = 2\ 200\ 000 \Omega$
 $32,768 \text{ kHz} = 32768 \text{ Hz}$

Aplicações. As resistências são utilizadas principalmente para controlar ou limitar a quantidade de corrente que circula através de um circuito, converter uma corrente em uma voltagem equivalente,

obter voltagens variáveis a partir de voltagens fixas, estabelecer voltagens de referência, definir níveis lógicos e outras aplicações.

De fato, as resistências são os componentes eletrônicos mais abundantes, variados e de mais baixo custo. Neste curso, elas serão utilizadas constantemente. Na **Experiência 2.1**, por exemplo, aprenderemos a utilizá-las como limitadores de corrente.

Conceito de potência

Ao circular através da matéria, a corrente elétrica produz uma grande variedade de efeitos úteis interessantes, incluindo luz, calor, som, magnetismo, etc. Ao trabalho realizado por uma corrente elétrica denomina-se **potência**. A potência é representada através do símbolo "p" ou "P". A unidade de medida da potência é **watt (W)**, assim denominada em homenagem ao engenheiro escocês **James Watt** (1736-1819), inventor da máquina a vapor.

→ A experimentação é um fator-chave em qualquer disciplina científica ou tecnológica. A eletrônica, naturalmente, não é uma exceção. Por esta razão, ao longo deste curso, ao final das seções pertinentes, realizam-se experimentos, guiados passo a passo, com a finalidade de reforçar, de forma prática, os conhecimentos imediatamente aprendidos ou comprovar resultados gerais.

Os experimentos são, de um modo geral, muito simples e todos utilizam como ferramenta básica uma bancada de testes sem soldagens ou **protoboard**. Na maioria dos casos requer-se como fonte de alimentação apenas uma bateria convencional de 9 V. Sem dúvida, o mais recomendável e econômico é possuir uma fonte de alimentação regulável, preferivelmente variável.

A CEKIT S. A. oferece para os pesquisadores vários tipos de fontes de alimentação reguláveis, bem como diversos módulos de ensaio e módulos de experimentação que incluem **protoboards**, fontes de alimentação e outras ajudas. Consulte-nos.

Experiência 2.1

A resistência como elemento limitador de corrente

Objetivos

- Verificar experimentalmente a operação das resistências como limitadoras de corrente.
- Familiarizar-se com o uso do código de cores das resistências.
- Aprender a utilizar adequadamente a bancada de conexões sem soldagem ou *protoboard*.
- Compreender intuitivamente os conceitos de circuito e potência.

Aspectos práticos preliminares

Este experimento, além de **resistências**, utiliza outros componentes e elementos com os quais você provavelmente não está familiarizado, **figura 1**. Especificamente, necessita-se de um *protoboard* para ar-

mar o circuito de testes, uma **bateria** para produzir uma corrente através do mesmo, um **LED** para visualizar o efeito dessa corrente, um **conector** para comunicar a bateria com o *protoboard* e **fios de conexão** para levar a corrente de um ponto do protobard a outro, ver **lista de materiais**.

O funcionamento e a forma de uso do *protoboard* são explicados na **Prática 2** da seção **Eletrônica Prática** deste mesmo curso. Refira-se a essa informação se tiver dúvidas.

As baterias, os LEDs, os **conectores** e os **fios de conexão** serão analisados, de um modo geral, mais adiante dentro deste mesmo capítulo e em forma mais detalhada em capítulos posteriores. Por enquanto, somente mencionaremos as características gerais

Lista de materiais

Componentes

- 1 Resistência de 100 Ω (marrom-preto-marrom-dourado)
- 1 Resistência de 220 Ω (vermelho-vermelho-marrom-dourado)
- 1 Resistência de 470 Ω (amarelo-violeta-marrom-dourado)
- 1 Resistência de 1 k Ω (marrom-preto-vermelho-dourado)
- 1 Resistência de 3.3 k Ω (laranja-laranja-vermelho-dourado)
- 1 Resistência de 4.7 k Ω (amarelo-violeta-vermelho-dourado)
- 1 Resistência de 10 k Ω (marrom-preto-laranja-dourado)
- 1 Resistência de 33 k Ω (laranja-laranja-laranja-dourado)
- 1 Resistência de 47 k Ω (amarelo-violeta-laranja-dourado)
- 1 Resistência de 150 k Ω (marrom-verde-amarelo-dourado)
- 1 Resistência de 330 k Ω (laranja-laranja-amarelo-dourado)
- 1 Resistência de 1 M Ω (marrom-preto-verde-dourado)
- 1 LED ou diodo emissor de luz
- 1 Bateria de 9 volts
- 1 Conector para bateria
- 1 Protoboard
- 1 Ponte de fio #22 ou #24

Ferramentas

Alicates de ponta plana, alicates de corte, desencapadores

Instrumentos

Nenhum

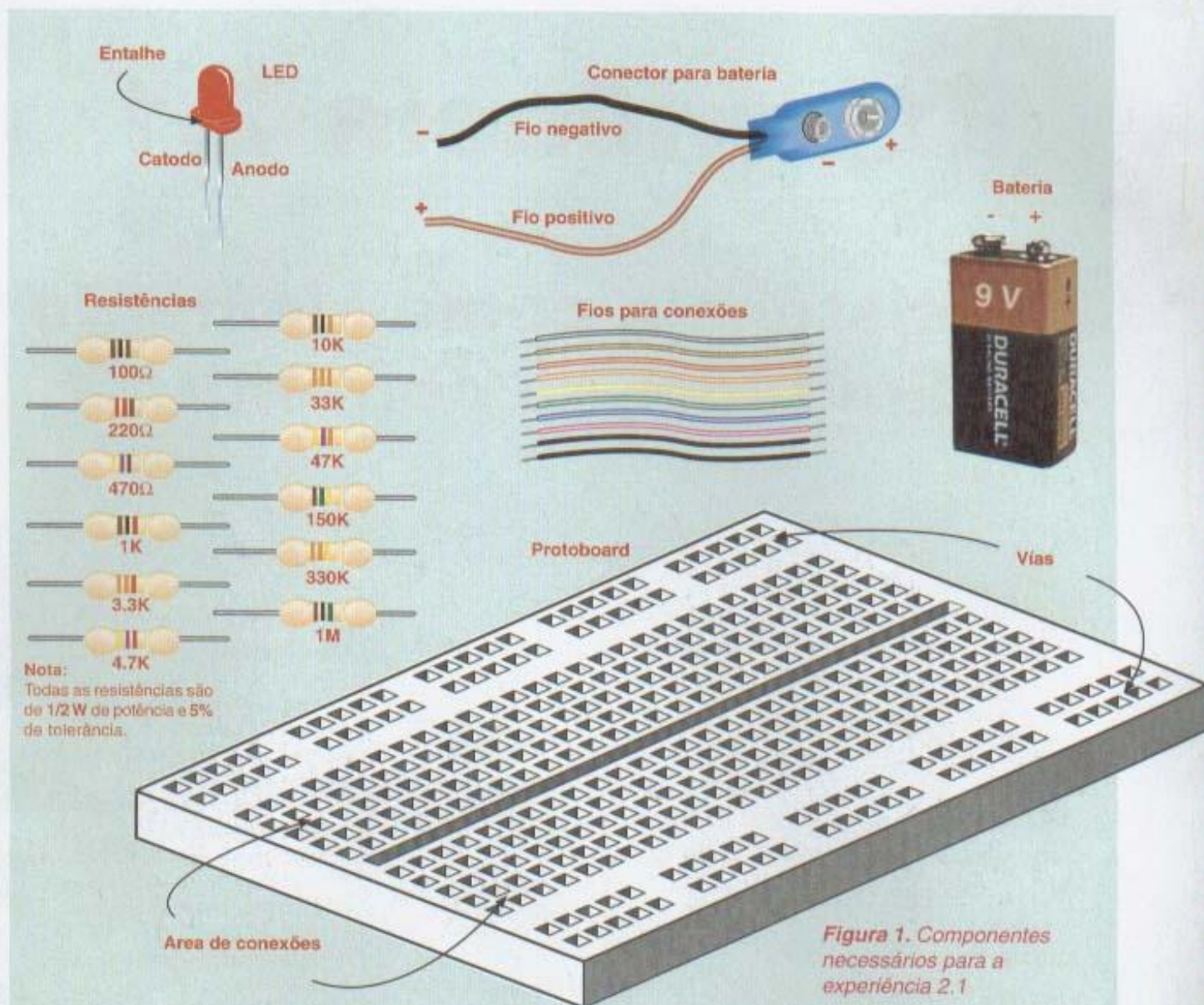


Figura 1. Componentes necessários para a experiência 2.1

dos mesmos que são de utilidade para este experimento.

Bateria. Proporciona a força elétrica (**voltagem**) necessária para impulsionar uma **corrente** através de um circuito. Possui dois terminais chamados **positivo (+)** e **negativo (-)**. Estes sinais vêm marcados no corpo da peça. As baterias são especificadas em **volts (V)**. A requerida neste experimento é de 9 V.

LED. Emite luz quando

através dele circula uma corrente, atuando como indicador de presença da mesma. Possui dois terminais chamados **catodo (-)** e **anodo (+)**. O catodo é identificado por estar localizado próximo do lado plano da capsula.

A luz emitida por um LED pode ser vermelha, amarela, verde, etc., dependendo de sua composição. Os LEDs devem ser protegidos mediante uma resistência em série para limitar a corrente que

passa através dele a um valor seguro. Caso contrário podem destruir-se.

Conector de bateria. Permite extrair de maneira fácil, segura e confiável a voltagem da bateria. Possui em uma extremidade um par de **clips** metálicos que se acoplam aos terminais da bateria e no outro um par de cabos: um vermelho e um preto. O cabo **vermelho** corresponde ao pólo **positivo (+)** e o **preto** ao **negativo (-)**.

Fios de conexão.

Proporcionam um caminho de resistência muito baixa para a circulação da corrente, permitindo levá-la de um ponto ao outro sem perdas. São feitos de cobre e vêm recobertos por uma capa colorida de material isolante, geralmente de plástico.

Os fios são identificados por um número ou calibre. Os utilizados nos experimentos deste curso, devem ser de calibre #22 ou #24 e são obtidos comercialmente sob a forma de cabo telefônico multipar.

O cabo multipar possui numerosos fios coloridos que, ao serem separados e cortados, são úteis para se fazerem conexões entre os diferentes componentes de um circuito. Tenha uma quantidade suficiente de cabos

deste tipo para seus experimentos e projetos futuros.

Procedimento

1. Classifique sobre sua mesa de trabalho as 12 resistências em ordem ascendente, ou seja, começando com a de **100 Ω** (marrom- preto - marrom- dourado) e terminando com a de **1 M Ω** (marrom- preto - verde - dourado). Identifique-as pelo código de cores, como explicado na teoria.

Lembre-se de que a leitura das resistências é feita da esquerda para a direita, começando pela faixa que estiver mais próxima do corpo. À direita deve estar a faixa dourada. As duas primeiras faixas correspondem aos dois primeiros números do valor da resistência, a terceira ao

multiplicador (número de zeros que devem ser acrescentados) e a quarta ou à tolerância.

2. Instale as resistências, o LED, o conector da bateria e as pontes suspensas no *proto-board* conforme indicado na **figura 2**. As resistências devem ser colocadas na mesma ordem como foram classificadas no passo 1.

Siga as instruções sobre ou uso do *proto-board* que são oferecidas na **Prática 2**. Utilize os alicates de ponta plana para dobrar as pontas das resistências em ângulo reto e os alicates de corte para cortá-las num comprimento adequado, digamos 10 mm.

Para garantir um ótimo contato das pontes (jumpers), retire de 4 a 8 mm do isolante das extremidades de cada

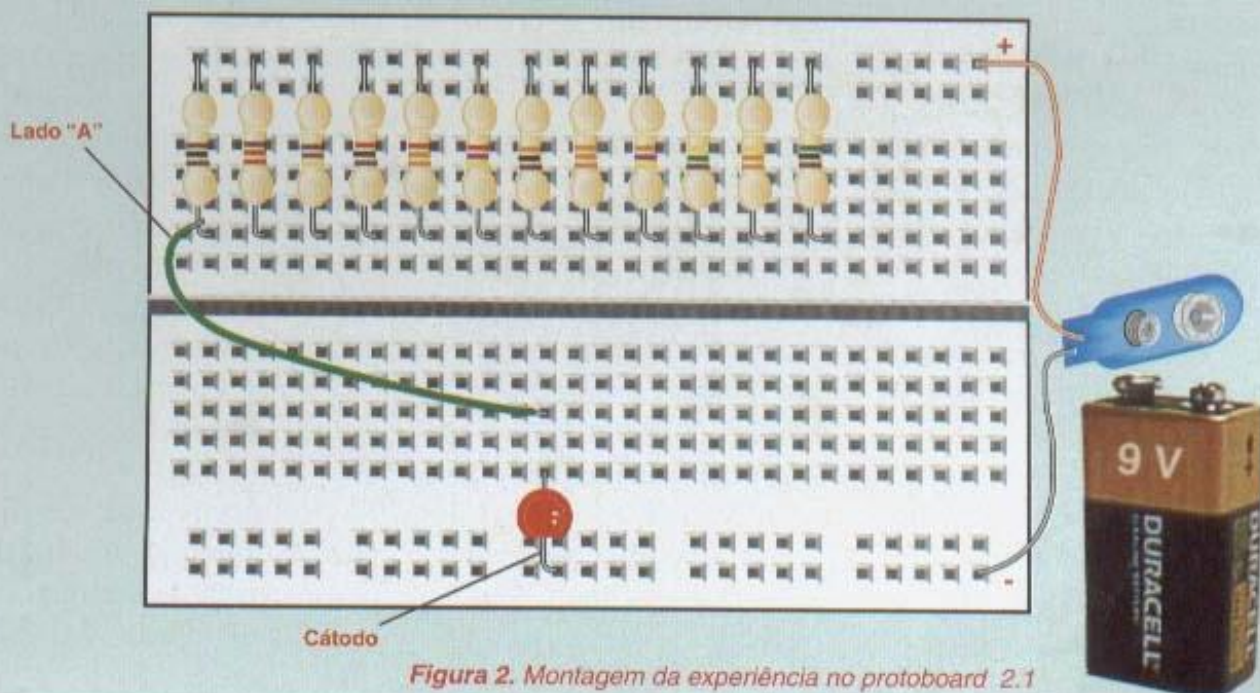


Figura 2. Montagem da experiência no proto-board 2.1

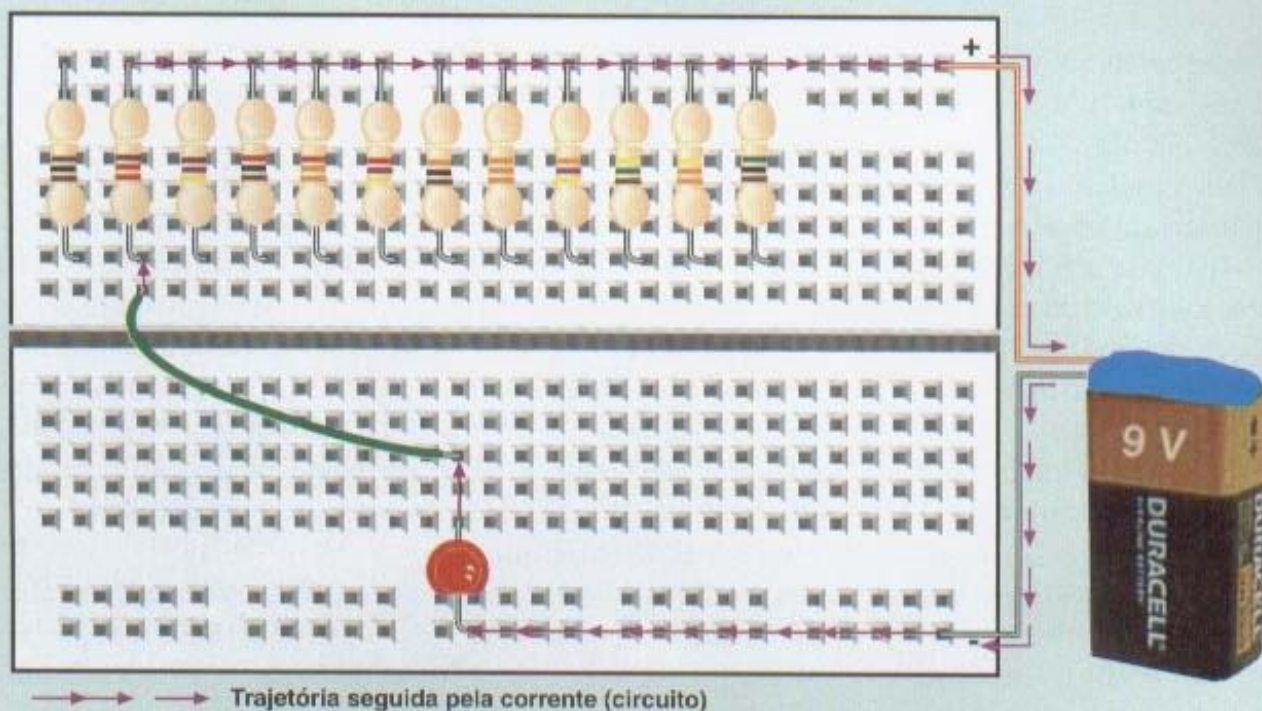


Figura 3. Detalhe do circuito de ativação do LED

um deles com um alicate de desencapador e insira as pontas nos furos correspondentes da *proto-board*.

3. Instale a bateria em seu respectivo conector para alimentar o circuito.

4. Conecte sucessivamente a ponta do fio "A" a cada uma das extremidades livres das resistências, começando pela de $100\ \Omega$, e observe o que acontece com o brilho do LED.

Você notará que à medida em que se aumenta o valor da resistência conectada, o brilho do LED diminui, e vice-versa. Isto acontece porque uma resistência de valor baixo permite que mais corrente circule através do cir-

cuito que no caso de se ter uma resistência de valor mais alto ou que se oponha menos à passagem da corrente.

O brilho do LED é uma medida qualitativa da quantidade de corrente que está circulando: quanto maior a corrente, maior o brilho e vice-versa.

5. Conecte agora somente a ponta "A" à extremidade livre da resistência de $220\ \Omega$ e observe que o LED se acende.

A razão é simples: você formou um **circuito**, ou seja, uma trajetória fechada para a circulação da corrente. Neste caso, a corrente (ou fluxo de elétrons derivado da aplicação de uma voltagem) sai

pelo terminal negativo (-) da bateria, atravessa o LED e a resistência, e entra novamente na bateria pelo terminal positivo (+).

A trajetória seguida pela corrente para este caso em particular é mostrada na **figura 3**. O conector da bateria, os contatos do protoboard, os terminais dos componentes e as pontes suspensas somente servem como **condutores** e não apresentam resistência à passagem da corrente.

6. Utilizando o mesmo circuito, toque a resistência e observe que ela esquenta.

Novamente a razão é simples: ao circular através de um material, a corrente realiza um **trabalho**, ou seja,

uma transformação de energia. Ao trabalho realizado por uma corrente denomina-se **potência** e é especificado em **watts (W)**.

No caso da resistência, a potência se manifesta na forma de calor, enquanto que no LED se manifesta na forma de luz. Esta é uma outra razão pela qual o LED se ilumina.

7. Conecte agora a ponta "A" à extremidade livre da resistência de $4.7\text{ k}\Omega$, toque a resistência e observe que ela

se aquece menos que a de 220Ω do circuito anterior.

Outra vez, a razão é simples: através da resistência de $4.7\text{ k}\Omega$ circula menos corrente que através da resistência de 220Ω e, portanto, dissipa menos potência na forma de calor. Repita a mesma experiência com as demais resistências e tire suas próprias conclusões.

Conclusões

Além disso, sempre é visível, não importando a forma

como a resistência esteja colocada no circuito.

2. As resistências limitam a passagem de corrente através de um circuito. Quanto maior a resistência menor a corrente (menor o brilho do LED), e vice-versa.

3. Quando uma corrente circula através de uma resistência, dissipa-se a potência na forma de calor. Quanto maior a corrente maior a potência, e vice-versa.

2.5 Resistências variáveis

As resistências variáveis, em geral, são componentes eletrônicos cuja resistência muda em função de algum fator físico externo, por exemplo o movimento mecânico de um eixo, a quantidade de luz que incide sobre sua superfície, a temperatura do meio circundante, a voltagem aplicada, etc.

Por enquanto nos referiremos às resistências variáveis por meios mecânicos, comumente conhecidas como **potenciômetros**, figura 2.9. Neste tipo de dispositivo, a resistência varia deslocando mecanicamente uma peça metálica chamada **cursor** sobre uma pista circular ou reta de carvão ou fio.



Figura 2.9 Resistências variáveis (potenciômetros)

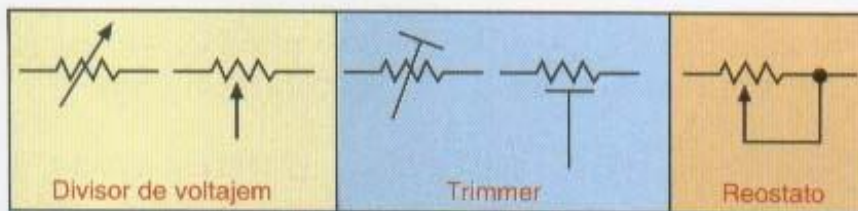


Figura 2.10 Simbologia de potenciômetros

Os potenciômetros possuem normalmente três terminais: dois conectados às extremidades do elemento resistivo e um conectado ao cursor. Os terminais das extremidades são denominados **fixos**. O usuário aciona o cursor a partir do exterior, girando um eixo ou deslizando uma alavanca.

À medida em que o cursor é deslocado até uma das extremidades fixas, diminui a resistência entre o cursor e esse terminal, enquanto aumenta a resistência entre o cursor e o outro terminal fixo. A resistência entre as extremidades fixas permanece constante.

Simbologia. Os potenciômetros podem ser **variáveis** ou **ajustáveis**, dependendo respectivamente de se, durante sua operação normal, a resistência varia sobre uma faixa contínua de valores ou simplesmente ajusta-se a um valor determinado. Na **figura 2.10** mostram-se os símbolos utilizados para representar estas possibilidades.

Os potenciômetros ajustáveis são conhecidos comumente como *trimmers* ou *trimpots*. Os *trimmers* são empregados principalmente

para calibrar equipamentos eletrônicos e compensar os efeitos de envelhecimento de outros componentes. Ao contrário dos potenciômetros comuns, são normalmente inacessíveis ao usuário final.

Um tipo particular de potenciômetro é o **reostato**, no qual o cursor está conectado internamente a um dos terminais fixos. Os reostatos são utilizados geralmente para controlar grandes correntes.

Tipos. Além de sua divisão em variáveis contínuas ou simplesmente ajustáveis, os potenciômetros são classificados de outras formas, principalmente dependendo de sua

função, da composição do material resistivo, do número de voltas e outras características.

Dependendo de sua função, os potenciômetros podem ser de propósito genérico, de semi-precisão e de precisão. Na **figura 2.11** mostra-se a estrutura interna de um potenciômetro de precisão. Os potenciômetros de propósito genérico e de semi-precisão são utilizados principalmente como **controles de volume**.

Dependendo do material de fabricação, os potenciômetros podem ser de fio enrolado, de carvão, de plástico condutor ou de **cermet**. Este último é uma espécie de tinta condutora composta por uma mistura de metais preciosos e vidro ou pó cerâmico.

Dependendo do número de rotações do eixo requeridas para que o cursor



Figura 2.11 Estrutura interna de um potenciômetro de precisão multivolta

percorra o elemento resistivo de uma extremidade a outra, os potenciômetros podem ser de **uma só volta** ou de **várias voltas** (multivolta). Nestes últimos, o elemento resistivo tem uma forma helicoidal.

Os potenciômetros podem ser também **lineares** e **não-lineares**. Nos primeiros, a resistência é proporcional ao ângulo de rotação do eixo, enquanto que nos segundos não. A maioria de potenciômetros não-lineares são logarítmicos ou anti-logarítmicos.

Também se dispõem de potenciômetros para montagem superficial e de potenciômetros múltiplos, formados por dois ou mais potenciômetros individuais acoplados entre si e acionados por um mesmo eixo. Alguns potenciômetros, inclusive, são acionados por um motor.

Formas de identificação. Os potenciômetros são identificados de várias formas, dependendo de seu tipo e tamanho, **figura 2.12**. Em alguns casos, o valor da resistência nominal, ou seja, a existente entre as extremidades fixas, vem diretamente marcada sobre o corpo da peça (500 Ω , 50 K, etc). Em outros vem codificado, por exemplo como **103**.

Neste exemplo, os dois primeiros algarismos (**10**) indicam os dois primeiros números do valor da resistência

nominal e o terceiro (**3**) o número de zeros que devem ser acrescentados. Portanto, trata-se de um potenciômetro de 10000 Ω , ou seja, de **10 k Ω** .

Além da resistência nominal (Ω), outras características distintivas que devem ser levadas em conta ao selecionar um potenciômetro para uma determinada aplicação são a tolerância, a potência, a graduação (linear, logarítmica, etc.), a resolução e a resistência de contato. Estes conceitos serão esclarecidos em capítulos posteriores.

Os potenciômetros de carvão, por exemplo, que são os mais comuns, são obtidos com resistência de menos de 100 Ω até mais de 5 M Ω e potências entre 1/2 W e 2 W. Valores comuns de resistência total são 500 Ω , 1 k Ω , 10 k Ω , 50 k Ω , 100 k Ω , 500 k Ω e 1 M Ω . Os potenciômetros li-

neares vêm marcados com um «B» e os não lineares com outras letras.

Aplicações. Os potenciômetros são utilizados principalmente como **reostatos** e como **divisores de voltagem**. No primeiro caso, permitem controlar a quantidade de corrente que circula através de um circuito e limitá-la a um valor determinado. No segundo, que é mais estendido, permitem obter qualquer voltagem entre zero e o máximo aplicado a suas extremidades.

Os controles de volume utilizados em televisores e aparelhos de som, por exemplo, são potenciômetros atuando como divisores de voltagem, e os controles de velocidade de alguns motores são potenciômetros atuando como reostatos. Ao longo deste curso conheceremos mais aplicações destes dispositivos.

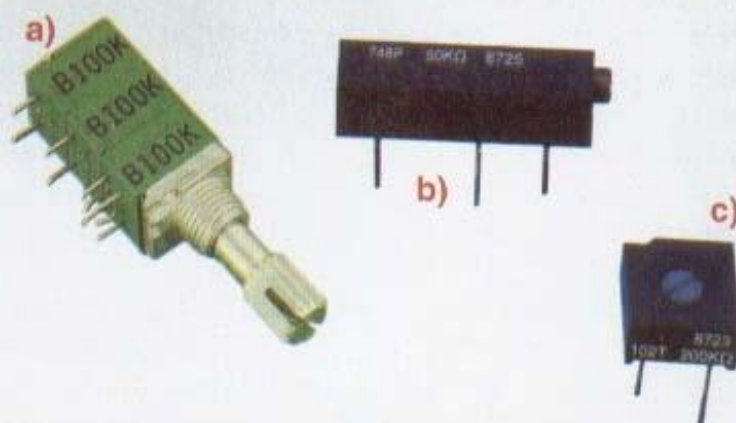


Figura 2.12 Exemplos de identificação de potenciômetros.

(a) Potenciômetro linear triplo de 100 k Ω .

(b) Trimmer multivolta de 50 k Ω de acionamento lateral.

(c) Trimmer de uma única volta de 200 k Ω de acionamento vertical.

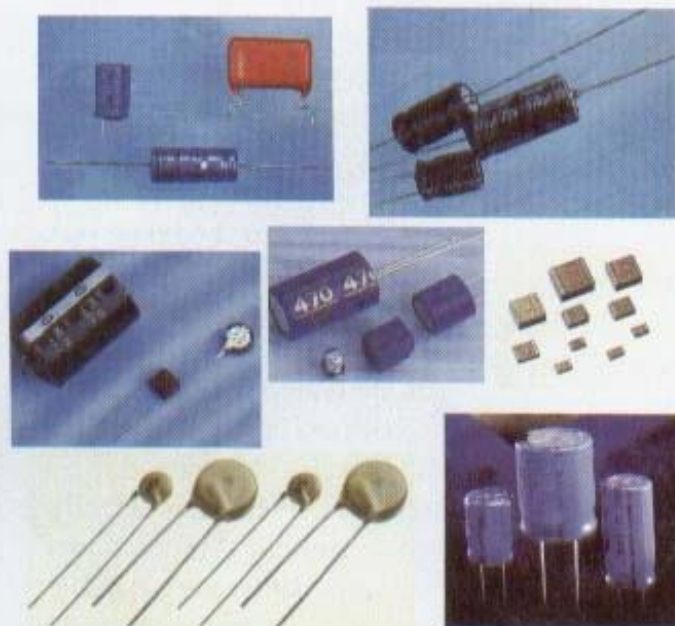


Figura 2.13.
Capacitores modernos.
Observe a grande variedade de formas, estilos e tecnologias de fabricação.

2.6 Capacitores

Os **capacitores**, **figura 2.13**, são componentes que armazenam energia elétrica em forma de voltagem, ou seja, de cargas elétricas. São formados basicamente por duas lâminas metálicas chamadas **placas**, separadas por um material isolante chamado **dielétrico**. À habilidade de um capacitor de armazenar cargas elétricas denomina-se **capacitância** e é uma característica intrínseca do dispositivo.

A capacitância é representada pelo símbolo **C** (do inglês *Capacity*: capacidade) e depende, entre outros fatores, da separação entre as placas, da área das mesmas e do material do dielétrico.

+ Neste curso, por razões de costume, nos referiremos freqüentemente aos capacitores como capacitores. Pelas mesmas razões, nos referiremos aos resistores como resistências, ainda que a resistência seja na verdade um fenômeno físico e um resistor um componente que tem uma resistência previsível.

Unidade de medida. a unidade fundamental de medida da capacitância no sistema SI é o **farad (F)**, assim denominado em homenagem ao físico francês

Michael Faraday (1791 - 1867), descobridor dos efeitos magnéticos das correntes elétricas.

Na prática, o farad é uma unidade demasiado grande para a maioria das situações reais. Por esta razão, são utilizadas unidades derivadas menores como o **microfarad** (μF) e o **picrofarad** (pF), equivalentes respectivamente à milionésima (1×10^{-6}) e à bilionésima (1×10^{-12}) parte de um farad.

Um capacitor de $100 \mu\text{F}$, por exemplo, pode armazenar 10 vezes mais carga que um de $10 \mu\text{F}$. Os capacitores modernos têm normalmente capacitâncias de menos de 1 pF até mais de $150\,000 \mu\text{F}$. A capacitância é medida utilizando-se um instrumento chamado **capacímetro**.

Simbologia. Os capacitores podem ser **fixos**, **variáveis** ou **ajustáveis**, dependendo, respectivamente, de se sua capacitância é constante, se pode variar continuamente sobre uma faixa de valores ou se se ajusta a um valor determinado. Também podem ser **polarizados** ou **não-polarizados**, dependendo de se devem ou não ser conectados a um circuito com uma polaridade ou orientação determinada.

Na **figura 2.14** mostram-se os símbolos utilizados nos circuitos eletrônicos para representar as possibilidades anteriores. No caso dos capa-

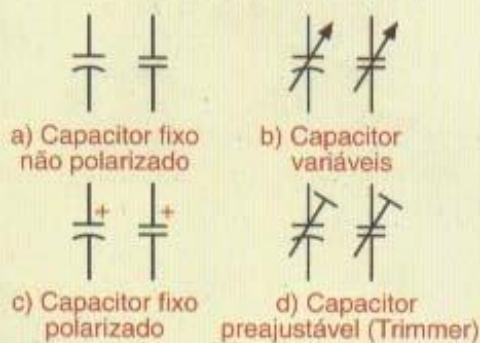


Figura 2.14 Simbologia de capacitores.
Comparam-se os símbolos norte-americanos e europeus.



Figura 2.15. Capacitores comuns. (a) Cerâmico. (b) De película de poliéster. (c) Eletrolítico de alumínio. (d) Eletrolítico de tântalo.

capacitores polarizados, ou terminal positivo (+) deve sempre ser conectado a uma voltagem mais alta que o terminal negativo (-). Caso contrário podem explodir ou sofrer danos irreversíveis.

Tipos. Além de sua divisão em fixos, variáveis ou ajustáveis e polarizados ou não-polarizados, os capacitores são classificados de outras formas, especialmente tendo em conta os materiais utilizados como dielétricos em sua construção.

Deste ponto de vista, os principais tipos de capacitores utilizados em eletrônica são os cerâmicos, os de película plástica e os eletrolíticos,

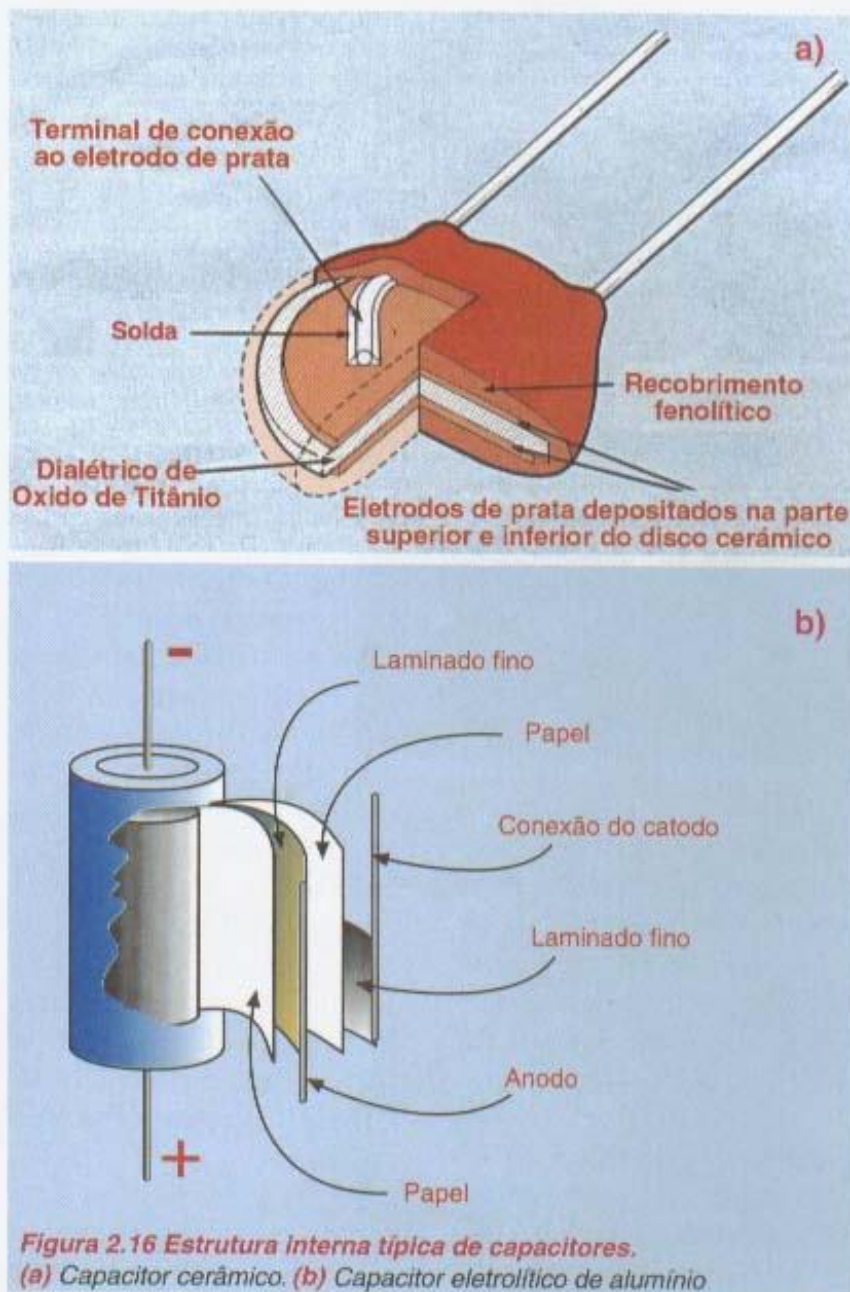


Figura 2.16 Estrutura interna típica de capacitores. (a) Capacitor cerâmico. (b) Capacitor eletrolítico de alumínio.

figura 2.15. Os dois primeiros tipos são sempre não-polarizados, enquanto que os eletrolíticos podem ser polarizados ou não. Na **figura 2.16a** mostra-se a construção interna típica de um capacitor cerâmico.

Os capacitores eletrolíticos, por sua vez, podem ser de alumínio ou de tântalo, e os de película plástica de poliestireno, propileno, po-

licarbonato ou poliéster. Na **figura 2.16b** mostra-se a construção interna de um capacitor eletrolítico de alumínio. Também existem capacitores de papel, vidro, mica e outros materiais.

Os capacitores podem ser também de montagem por inserção ou de montagem superficial, **figura 2.17**. Estes últimos, em sua versão cerâmica ou de película, externamente

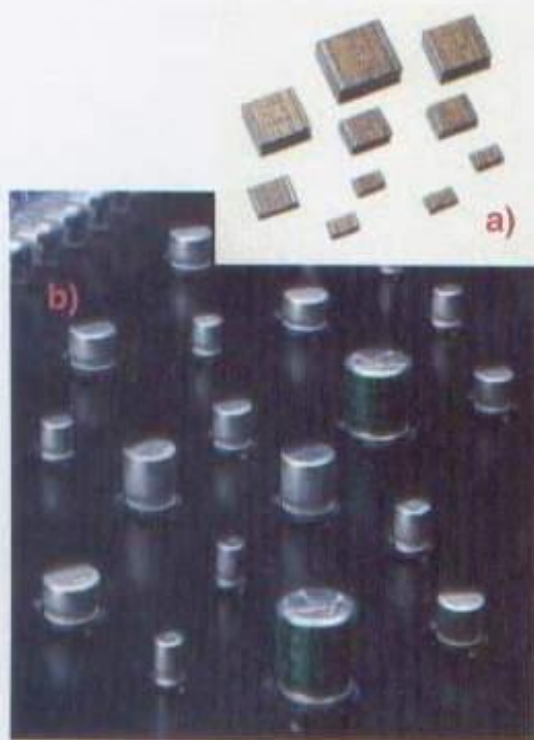


Figura 2.17 Capacitores de montagem superficial. (a) Chips cerâmicos. (b) Chips eletrolíticos de alumínio.

são muito parecidos com as resistências de mesma tecnologia. Nos de montagem por inserção, os terminais podem ser de disposição axial ou radial, **figura 2.18**.

Formas de identificação. Os capacitores são identificados de várias formas, dependendo de seu tipo e tamanho, **figura 2.19**. No caso dos capacitores eletrolíticos de alumínio, por exemplo, que são os maiores, o valor da capacitância, digamos 100 μF , está impresso diretamente sobre o corpo ou **cápsula**.

Sobre a cápsula são especificadas também a voltagem de trabalho, a tolerância, a máxima temperatura de operação, a data de

fabricação, a polaridade dos terminais e outros dados. O lado correspondente ao terminal negativo é especificado normalmente mediante uma faixa de sinais de menos («-»).

A voltagem de trabalho, por exemplo **16 V**, refere-se à voltagem máxima que pode ser aplicada através do capacitor em forma contínua sem causar sua destruição. Pode ser de uns poucos volts até várias centenas ou milhares de volts.

A **tolerância**, por sua vez, indica o erro ou variação no valor real da capacitância em relação ao que está marcado em sua cápsula. É especificado como uma porcentagem.

Por exemplo, em um capacitor de 1000 μF com uma tolerância de $-10/+100\%$, a capacitância real pode estar

entre 900 μF (1000 μF - 100 μF) e 2000 μF (1000 μF + 1000 μF), visto que 100 μF e 1000 μF são, respectivamente, 10% e 100% de 1000 μF . Poderia ser, digamos, 1230 μF se medidas com um capacitômetro.

Conceito de coeficiente de temperatura

O **coeficiente de temperatura** (TC) de um capacitor especifica como muda a capacitância do dispositivo com o aumento da temperatura. Expressa-se geralmente em **ppm/°C** (partes por milhão por grau centígrado) e pode ser positivo (P), negativo (N) ou zero (NPO), dependendo da capacitância aumentar, diminuir ou permanecer constante ao se aumentar a temperatura. Os capacitores com coeficiente NPO são os mais estáveis. Por esta razão são utilizados em circuitos osciladores para compensar os desvios de frequência devido às trocas de temperatura. Sempre que se troca um capacitor, deve ser utilizado um substituto com o mesmo TC.

Em outros casos, especialmente em capacitores pequenos de cerâmica, tântalo ou de película, a capacitância é especificada mediante um código, tal como **103** ou **4R7**. Algumas vezes, usa-se um código de cores similar ao das resistências, exceto que o valor decifrado é expresso em picofarads (pF).

No primeiro exemplo (**103**), os dois primeiros dígitos (10) correspondem aos dois primeiros números do valor da capacitância e o terceiro (3) ao número de zeros que devem ser acrescentados.

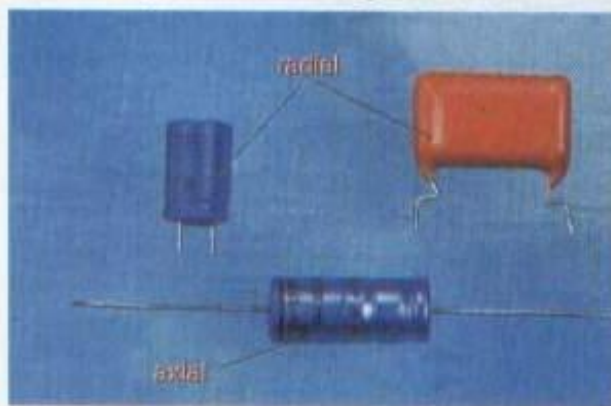


Figura 2.18 Os terminais dos capacitores podem estar em disposição **axial** ou **radial**.

O valor é expresso em picofarads (pF). Portanto, trata-se de um capacitor de 10000 pF, ou seja, 10 nF ou 0,01 μF .

No segundo exemplo (4R7), o primeiro dígito (4) corresponde à parte inteira do valor da capacitância, o segundo (R) à posição do ponto decimal e o terceiro (7) à parte decimal. O valor pode ser expresso em microfarads (μF) ou picofarads (pF), dependendo do tipo de capacitor. Portanto, trata-se de um capacitor de 4.7 μF ou de 4.7 pF.

Para a especificação da tolerância são utilizadas geralmente as letras **M**, **K** e **J**, correspondentes, respectivamente, a **20%**, **10%** e **5%**. Assim, um capacitor cerâmico identificado como **221J**, tem uma capacitância nominal de **220 pF** e uma tolerância de **5%**.

Além da capacitância, a voltagem de trabalho e a tolerância, outras características distintivas que devem ser levadas em conta ao se selecionar um capacitor para uma determinada aplicação são o coeficiente de temperatura, a resistência equivalente série e o fator de potência. Estes e outros parâmetros serão esclarecidos em capítulos posteriores deste curso.

Exercício 2.2.

(a) Os capacitores cerâmicos são fabricados tipicamente com capacitâncias nominais de 1 pF até 2,2 μF . Qual é a capacitância nominal em microfarads de um capacitor cerâmico identificado com a referência **473**?

R. 0,047 μF . Os dois primeiros dígitos (**47**) correspondem aos dois primeiros dígitos do valor da capacitância e o terceiro (**3**) ao número de zeros que devem ser acrescentados. O valor é expresso em picofarads (pF). Portanto, trata-se de um capacitor de 47000 pF, ou seja 47 nF, ou ainda **0,047 μF .**

(b) Os capacitores de película plástica metalizada são fabricados tipicamente com capacitâncias nominais desde 500 pF até 10 μF . Determine a faixa de valores na qual se encontra a capacitância de um capacitor de poliéster grande identificado com a referência **.22M**.

R. Entre 0,176 μF e 2,64 μF . O valor nominal da capacitância é **0,22 μF .** A letra **M** indica que o componente tem uma tolerância de 20%. Visto que 20% de 0,22 μF é **0,044 μF ,** a capacitância real deve estar entre 0,22 μF - 0,044 μF e 0,22 μF + 0,044 μF , ou seja, entre 0,176 μF e 2,64 μF .

Valor marcado diretamente sobre a cápsula

Valor codificado em forma numérica ou alfanumérica



Códigos numérico e de cores combinadas

Figura 2.19 Exemplos de identificação de capacitores

Aplicações. Os capacitores são, depois das resistências, os componentes eletrônicos passivos mais utilizados na prática. Entre outros usos, são empregados para armazenar temporariamente pequenas quantidades de energia elétrica, bloquear correntes diretas, gerar intervalos de tempo, etc. No **Experimento 2.2**, por exemplo, aprenderemos a utilizá-los como armazenadores de carga.

Conceito de carga

As partículas fundamentais dos átomos, bem como os átomos e a própria matéria, têm associada uma determinada quantidade de energia chamada **carga elétrica (Q)** que é a que torna possível os fenômenos elétricos e eletrônicos. A unidade de medida de carga no sistema SI é o **coulomb (C)**, assim denominada em homenagem a **Charles A. Coulomb** (1736 - 1806), descobridor da lei que leva seu nome (a Lei de Coulomb) e que explica as interações entre as cargas elétricas.

A carga elétrica associada a um átomo ou um material pode ser positiva, negativa ou neutra, dependendo de seu número de elétrons ser menor, maior ou igual a seu número de prótons. As cargas de mesmo sinal se repelem e as de sinal contrário se atraem.

Experimento 2.2

O capacitor como elemento armazenador de carga

Objetivos

- Verificar experimentalmente a operação dos capacitores como armazenadores de carga.
- Familiarizar-se com a identificação dos capacitores eletrolíticos de alumínio.
- Compreender intuitivamente as características de carga e de descarga de um capacitor.

Aspectos práticos preliminares

Este experimento, além de **capacitores**, utiliza vários elementos com os quais você já está familiarizado desde o experimento anterior, **figura 1**. Os elementos necessários são relacionados na **lista de materiais** anexada. Se tiver dúvidas quanto ao uso do *protoboard*, a identificação de resistências ou a função dos demais componentes, refira-se ao **Experimento 2.1** antes de continuar.

Procedimento

1. Arrume sobre sua mesa de

trabalho os 12 capacitores eletrolíticos em ordem ascendente de valores, ou seja, começando com o de **1 μ F** e terminando com o de **3300 μ F**.

Lembre-se de que nos capacitores eletrolíticos de alumínio, o valor da capacitância está impresso diretamente sobre o corpo do componente, juntamente com a polaridade e a voltagem de trabalho. Este último deve ser, no mínimo, igual a **10 V** (preferivelmente **16 V**).

2. Execute sobre o *protoboard* o circuito da **figura 2**, instalando no lugar de **Cx** o capacitor de **47 μ F** com a polaridade indicada. Através deste circuito comprovaremos a capacidade de um capacitor para armazenar cargas elétricas e servir como fonte temporária de voltagem.
3. Instale a bateria em seu respectivo conector para alimentar o circuito.
4. Conecte a ponta do fio "A" à extremidade livre de R1 duran-

Lista de materiais

Componentes

- 1 Capacitor de 1 μ F/16 V
- 1 Capacitor de 2,2 μ F/16 V
- 1 Capacitor de 4,7 μ F/16 V
- 1 Capacitor de 10 μ F/16 V
- 1 Capacitor de 22 μ F/16 V
- 1 Capacitor de 47 μ F/16 V
- 1 Capacitor de 100 μ F/16 V
- 1 Capacitor de 220 μ F/16 V
- 1 Capacitor de 470 μ F/16 V
- 1 Capacitor de 1000 μ F/16 V
- 1 Capacitor de 2200 μ F/16 V
- 1 Capacitor de 3300 μ F/16 V
- 1 Resistência de 1 k Ω , 1/2 W
- 1 Resistência de 10 k Ω , 1/2 W
- 1 LED (qualquer cor)
- 1 Bateria de 9 V
- 1 Conector para bateria
- 1 Protoboard
- Pontes suspensas (jumpers) #22

Ferramentas

- Alicates de ponta plana, alicate de corte, desencapadores

Instrumentos

- Nenhum

Observações

1. Todos os capacitores são eletrolíticos, de alumínio, polarizados e com uma voltagem de trabalho nominal de **16V** ou superior.
2. Todas as resistências são de carvão, de 1/2 W de potência e 5% de tolerância

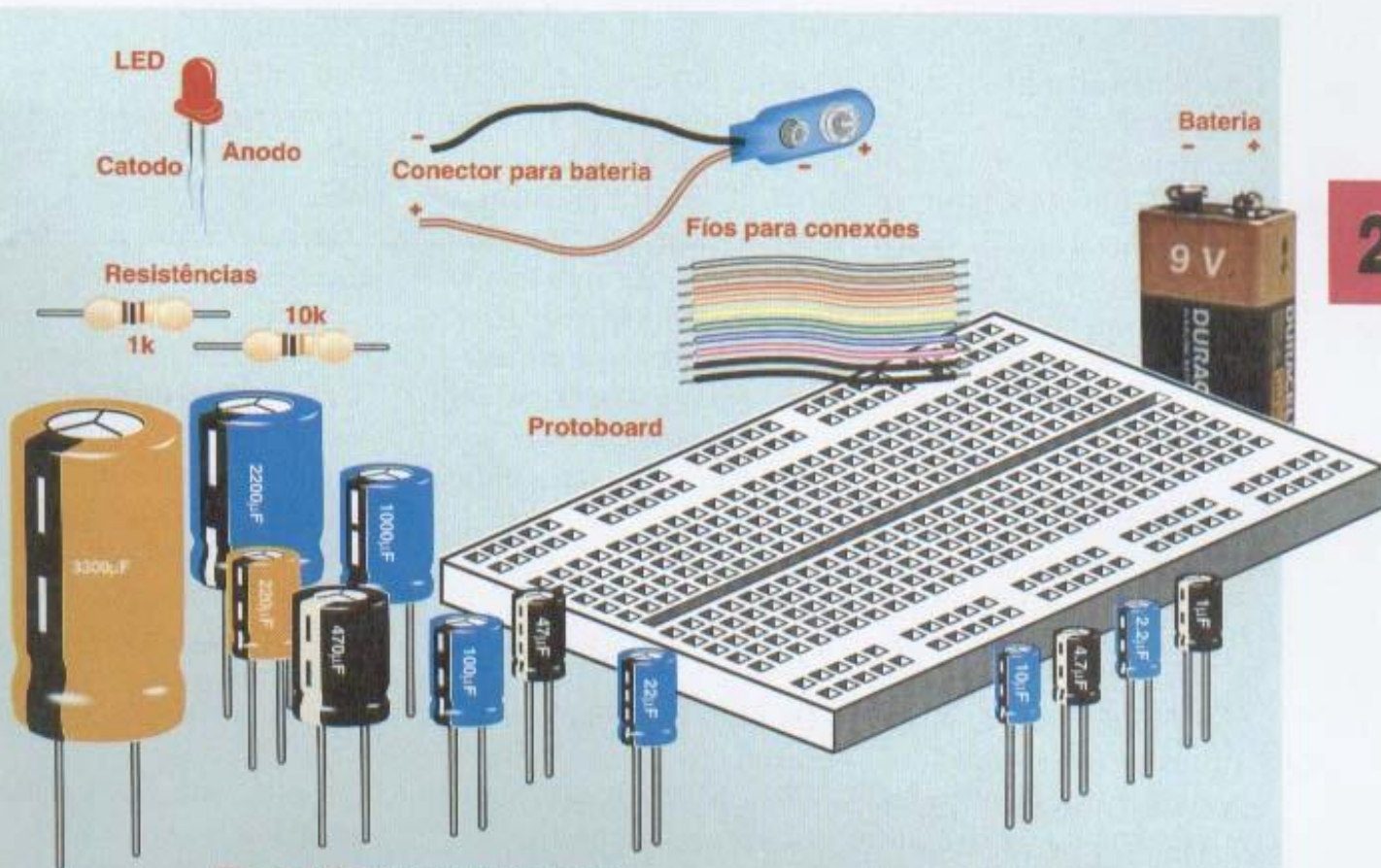


Figura 1. Componentes necessários

te uns poucos segundos, digamos 10. Ao cabo deste tempo, desconecte a ponta "A" de R1 e conecte-a **imediatamente** à extremidade livre de R2. Observe o que acontece.

Notará que o brilho do LED começa a diminuir gradualmente a partir de seu nível máximo inicial, apagando-se rapidamente ao cabo de uns poucos segundos. Por quê?

O que acontece pode ser resumido brevemente assim:

✓ Ao conectar o Cx ao R1, fecha-se o circuito com a bateria e esta última transfere

gradualmente uma carga elétrica às placas do capacitor, especificamente uma carga positiva à placa superior (+) e uma carga negativa à inferior (-). Diz-se, então, que Cx está em processo de **carga**. Ao final deste processo, a voltagem entre as placas de Cx é praticamente igual à da bateria (9 V).

✓ Ao desconectar o Cx de R1, as placas do capacitor retêm armazenada a carga transferida pela bateria e, portanto, mantêm-se a voltagem ou diferença de potencial entre elas. Em outras palavras, o Cx converteu-se em uma fonte de voltagem. Diz-se, então, que o capacitor está **carregado**.

✓ Ao conectar o Cx ao R2, fecha-se o circuito com o LED e o capacitor libera paulatinamente a carga armazenada, produzindo um fluxo de elétrons, ou seja, uma corrente, da placa negativa até a positiva. Por esta razão o LED se ilumina.

✓ À medida que o capacitor libera a carga armazenada, diminui paulatinamente a voltagem entre as placas e, portanto, a corrente que circula através do circuito. Por esta razão, o brilho do LED diminui gradualmente. Diz-se, então, que o capacitor está em processo de **descarga**.

✓ Ao terminar o processo de descarga e esgotar-se a carga armazenada no capacitor, a voltagem entre as placas é igual a zero e cessa a circulação de corrente. Por esta razão, o LED se apaga. Diz-se, então, que o capacitor está **descarregado**.

5. Retire o capacitor de $47 \mu\text{F}$ e instale um capacitor de $1000 \mu\text{F}$ no lugar de Cx. Repita então o passo 4. Notará novamente que o brilho do LED começa a diminuir gradualmente a partir de um nível máximo inicial, mas se extingue mais lentamente que no caso anterior. Por quê?

é carregado através da voltagem da bateria (9 V), mas acumula mais carga que o de $47 \mu\text{F}$ porque possui uma maior capacitância. Por esta razão, demorará mais tempo descarregando-se, quer dizer, liberando sua carga armazenada. Repita a mesma experiência com cada um dos capacitores restantes. Tire suas próprias conclusões.

Conclusões

1. Os capacitores armazenam energia na forma de cargas elétricas depositadas sobre suas placas. Quanto maior a capacitância, maior é a carga armazenada, e vice-versa.

O capacitor de $1000 \mu\text{F}$

2. Um capacitor carregado atua

como uma fonte de voltagem **temporária**, impulsionando uma corrente através de um circuito até que se esgote a carga armazenada e a voltagem entre seus terminais caia a 0 volts.

3. O tempo que dura a circulação da corrente de descarga de um capacitor através de um dado circuito depende de sua capacitância. Quanto maior a capacitância, mais lenta é a descarga, e vice-versa. Uma situação similar se apresenta durante a recarga, como veremos em uma futura oportunidade.

4. Os tempos de recarga e de descarga dependem também dos valores de R1 e R2, respectivamente. Quanto maior a resistência, maior o tempo, e vice-versa.

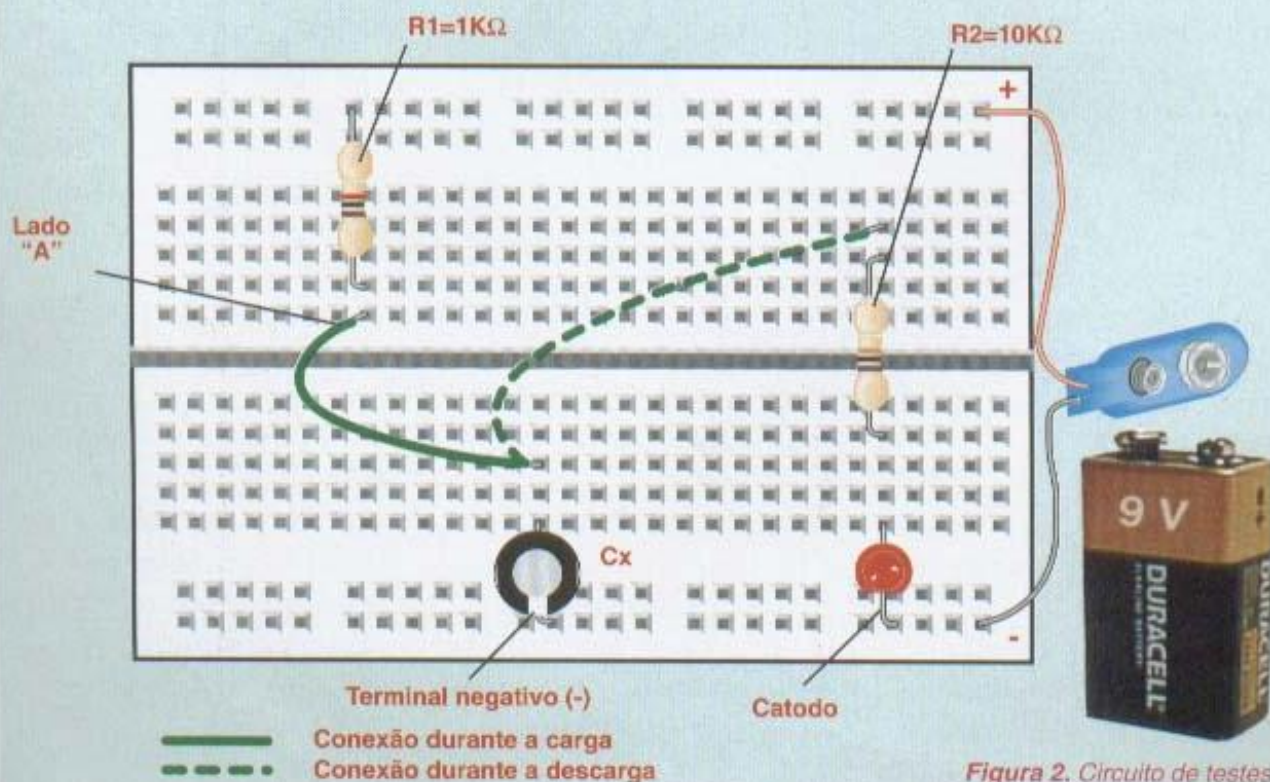


Figura 2. Circuito de testes



Figura 2.20 Bobinas ou indutores para uso eletrônico

2.7 Indutores

As bobinas, também chamadas **indutâncias** ou **indutores**, figura 2.20, são componentes construídos a partir de um fio enrolado e que armazenam energia elétrica na forma de corrente, ou seja, de **campos magnéticos**. A habilidade de um indutor para produzir campos magnéticos é denominada **indutância** e é uma característica intrínseca do dispositivo.

A indutância de uma bobina depende, entre outros fatores, do número de voltas ou espirais do fio que o constitui e do material do núcleo sobre o qual o fio é enrolado. A indutância é representada através do símbolo **L** (do inglês *Linkage*: linhas de fluxo magnético) e se mede utilizando um instrumento chamado **indutômetro**.

Unidade de medida. A unidade fundamental de medida da indutância no Sistema Internacional (SI) é o **henry (H)**, assim denominado em homenagem ao físico norte-americano **Joseph Henry** (1797 - 1878), inventor do interruptor eletromagnético ou relé.

Na prática, o henry é uma unidade relativamente grande para a maioria das situações reais. Por esta razão, são utilizadas unidades derivadas mais pequenas como o **microhenry (μH)** e o **milihenry (mH)**, equivalentes respectivamente à milionésima (1×10^{-6}) e à milésima (1×10^{-3}) parte de um henry.

Uma bobina de 100 mH, por exemplo, pode armazenar 100 vezes mais corrente que uma de 1 mH. Na prática, as bobinas podem ter indutâncias de uns poucos microhenrys até várias centenas de milihenrys, e inclusi-

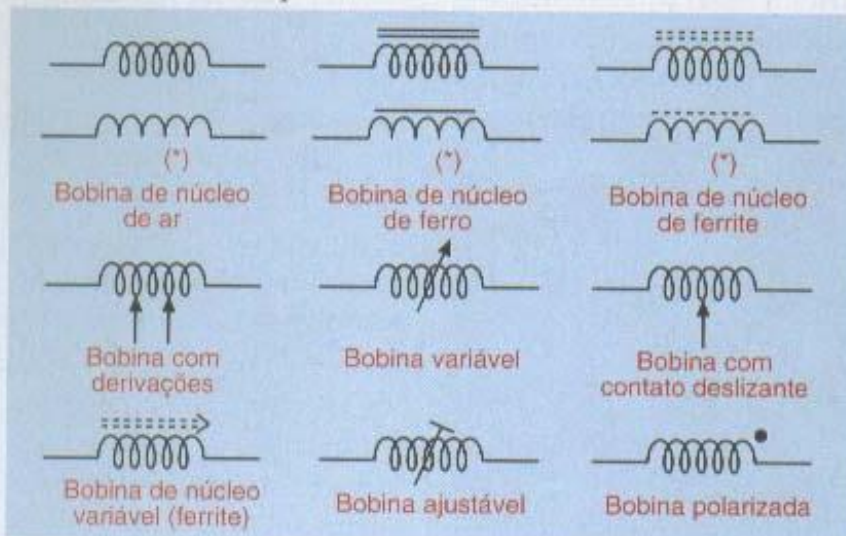


Figura 2.21 Simbologia de indutores fixos, variáveis e ajustáveis

Conceito de campo magnético

Assim como uma carga produz em sua vizinhança um **campo elétrico**, uma corrente circulando através de um condutor produz ao seu redor um **campo magnético**. Este campo tem as mesmas propriedades do campo magnético produzido por um ímã e pode ser concentrado enrolando-se o fio em forma de bobina. O símbolo para a densidade de fluxo de um campo magnético é «B» e sua unidade de medida no sistema SI é o **Tesla (T)**, assim chamada em homenagem ao físico croata **Nikola Tesla** (1856-1943), inventor do motor de indução. As primeiras observações sobre os efeitos magnéticos da corrente foram realizadas em 1819 pelo físico dinamarquês **Hans Christian Oersted** (1777-1851).



Figura 2.22 Exemplos de núcleos

ve de vários henrys. Além disso, são os únicos componentes que podem ser construídos pelos usuários à medida de suas necessidades.

Simbologia. As bobinas podem ser **fixas**, **variáveis** ou **ajustáveis**, dependendo da sua indutância ser constante, variar continuamente sobre

uma faixa de valores ou ajustar-se a um valor determinado. Na **figura 2.21** são mostrados os símbolos utilizados nos diagramas para representar distintos tipos de bobinas.

Note que o símbolo não somente informa sobre a natureza fixa, variável ou ajustável do componente, mas que também especifica o material do núcleo. Por exemplo, duas linhas pontilhadas indicam que se trata de uma bobina de núcleo de ferrite.

A variação da indutância em uma bobina é feita geralmente deslocando-se o núcleo ou selecionando-se o número de espirais. Neste último caso, a seleção do valor desejado pode realizar-se utilizando derivações ou *taps* previamente definidas na bobina ou movendo um contato deslizante, que atua como cursor.

Um tipo particular de bobina é o **transformador**, constituído por dois ou mais fios enrolados ao redor do

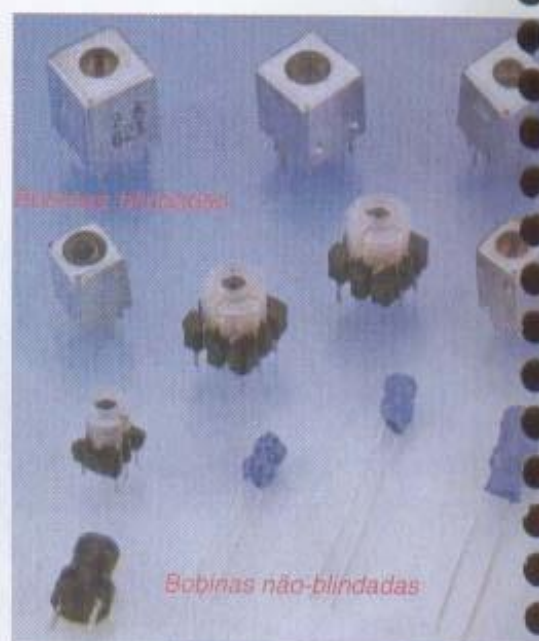


Figura 2.24 Exemplos de bobinas blindadas e não-blindadas

mesmo núcleo, porém isolados eletricamente. As características gerais dos transformadores são discutidas na próxima seção.

Tipos. Além de sua divisão em fixas, variáveis ou ajustáveis, as bobinas são classificadas principalmente tendo em vista o material do núcleo utilizado em sua construção e a forma geométrica do mesmo.

Dependendo do material do núcleo, os principais tipos de bobinas empregadas em eletrônica são as de ar, as de ferro laminado, as de ferro pulverizado e as de ferrite. Os núcleos de ferro pulverizado, por exemplo, são compostos de partículas de ferro ou ligas de ferro finamente misturadas com um plástico que lhes serve de aglutinador.



Figura 2.23 Estruturas típicas de bobinas retas e toroidais



Figura 2.25 Indutores de montagem superficial

Segundo sua forma, as bobinas podem ser retas ou toroidais, **figura 2.23**, ainda que na prática também sejam possíveis outras formas. Em cada tipo, as espirais que constituem a bobina podem estar distribuídas em uma ou várias camadas.

As bobinas também podem ser blindadas ou não. As bobinas **blindadas**, **figura 2.24**, possuem uma cobertura metálica de cobre ou alumínio chamada **blindagem** que as protege de campos magnéticos externos e evita que as mesmas venham a interferir com a operação de circuitos próximos. Estes conceitos serão analisados em detalhe em capítulos posteriores.

As bobinas também podem ser de montagem por inserção ou de montagem superficial, **figura 2.25**. Estas últimas, tal como as resistências e capacitores de mesma tecno-

logia, não possuem terminais ou prolongações de conexão, mas coberturas metálicas que são soldadas diretamente às pistas de circuito impresso.

Formas de identificação. As bobinas encontradas nos circuitos eletrônicos geralmente não possuem sobre seu corpo nenhum tipo de identificação. A única informação sobre as mesmas é a que se pode obter examinando o circuito onde são utilizadas, ou medindo sua indutância em um indutômetro.

Comercialmente, é possível que se consigam bobinas **moldadas** ou pré-fabricadas protegidas em um encapsulamento semelhante ao das resistências e com uma série de faixas ou pontos de cores, **figura 2.26**. Estas bobinas seguem a mesma codificação de cores das resistências, exceto que os valores obtidos são expressos em microhenrys (μH).

Outras vezes, em lugar de códigos de cores, se utilizam códigos numéricos ou alfanuméricos similares aos dos capacitores. Novamente, o valor determinado é expresso em microhenrys (μH).

Por exemplo, um indutor moldado identificado com a referência **152** tem uma indutância nominal de **1500 μH** , ou seja, **1,5 mH**. Os dois primeiros dígitos (15) correspondem aos dos primeiros dígitos do valor em microhenrys e o terceiro (2) ao número de zeros que devem ser acrescentados.

Além da indutância, quando se seleciona uma bobina para uma determinada aplicação, deve-se levar em conta outras características distintas como a tolerância, a corrente máxima que podem suportar, a resistência, e o fator de qualidade. Estes parâmetros serão estudados em detalhe em capítulos posteriores.

Aplicações. As bobinas têm a propriedade de se opor às variações de corrente, produzindo como resposta entre seus terminais uma voltagem que pode ser grande ou pequena dependendo da rapidez da mudança. Também têm a habilidade de induzir voltagens em bobinas próximas e de produzir campos magnéticos ao seu redor.

Estas e outras propriedades são utilizadas nos circuitos eletrônicos para uma grande variedade de aplicações, incluindo a produção de oscilações, a abertura e fechamento de cargas por meios magnéticos, a transferência de sinais de uma etapa a outra, etc.

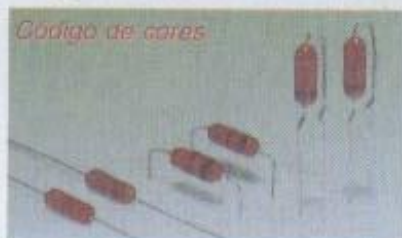


Figura 2.26 Exemplos de identificação de bobinas moldadas



Figura 2.27. Transformadores para aplicações eletrônicas

2.8 Transformadores

Os **transformadores**, figura 2.27, são componentes formados por duas bobinas ou grupos de bobinas que são utilizadas nos sistemas eletrônicos para aumentar ou diminuir o nível de sinais de voltagem ou corrente, transferir potência entre circuitos e outras aplicações. As bobinas estão colocadas sobre o mesmo **núcleo** e se denominam **primária** e **secundária**, respectivamente.

A **primária** é a bobina que recebe o sinal de entrada e a **secundária**, a que proporciona o sinal de saída. A secundária pode ser formada por várias bobinas separadas ou estar integrada com a primária num mesmo enrolamento. Os transformadores com esta última característica são denominados **auto-transformadores**. A voltagem da secundária pode ser maior, menor ou igual à da primária.

Os transformadores aproveitam a propriedade das bobinas de induzir uma voltagem em um condutor próximo-

mo, neste caso outra bobina, quando são atravessadas por uma corrente variável. Esta propriedade, que analisaremos em detalhe em capítulos posteriores, é denominada **indutância mútua** e é representada pelo símbolo LM.

Simbologia. Na figura 2.28 são mostrados os principais símbolos utilizados nos esquemas eletrônicos para representar tipos distintos de transformadores. O símbolo informa sobre o material do núcleo, a maneira como estão distribuídas as bobinas primária e secundária, a natureza variável ou não da peça, etc.

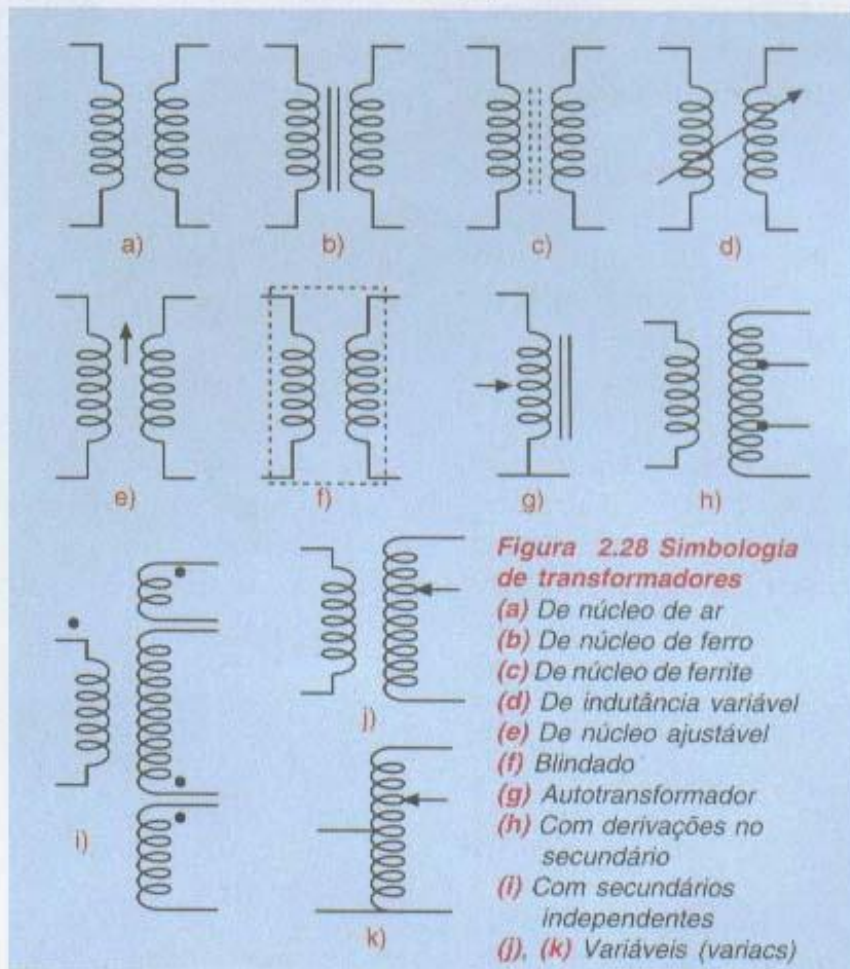




Figura 2.29 Transformadores de núcleo laminado para potência.

Tipos e aplicações. Os transformadores podem ser fixos, variáveis ou ajustáveis, dependendo da sua indutância mútua ser constante, poder variar sobre uma faixa contínua ou individual de valores, ou ajustar-se a um valor determinado. A variação da indutância pode ser realizada deslocando-se o núcleo ou mudando o número de espirais do secundário, seja mediante um contato deslizante ou utilizando derivações (*taps*).



Figura 2.30 Adaptadores de voltagem com transformadores

Os transformadores também se classificam de acordo com outros critérios. Existem, por exemplo, transformadores de núcleo de ferro e de núcleo de ferrite, transformadores de áudio-frequência e de rádio-frequência, transformadores de corrente e de voltagem, transformadores elevadores, redutores, de acoplamento, etc.

Os transformadores de **áudio-frequência** (AF) foram projetados para trabalhar em baixas frequências, abaixo de 20 kHz. São de **núcleo de ferro** laminado ou pulverizado. São utilizados principalmente em circuitos de áudio e fontes de alimentação, **figura 2.29**.

Os transformadores de **rádio-frequência** (RF) foram projetados para trabalhar em altas frequências, acima de 100 kHz. São de **núcleo de ferrite** e são utilizados principalmente em equipamentos de comunicações.

Os transformadores de **voltagem**, como seu próprio nome indica, foram projetados para converter voltagens e os de **corrente** para converter correntes. Estes últimos são muito utilizados em instrumentação para medir grandes correntes.

Os transformadores de voltagem, por sua vez podem ser **redutores**, **elevadores** ou de **isolamento**, conforme a voltagem da secundária seja menor, maior ou igual à vol-

tagem da primária. Os transformadores redutores são muito utilizados em fontes de alimentação, incluindo os populares **adaptadores**, **figura 2.30**, para obter as baixas voltagens requeridas pelos circuitos eletrônicos para funcionar.

Os transformadores elevadores, por sua vez, são muito utilizados nos **flybacks**, **figura 2.31**, para obter as altas voltagens requeridas para excitar as telas dos televisores e monitores de vídeo.



Figura 2.31 Transformadores flyback de alta voltagem

Os transformadores de isolamento são utilizados para evitar a conexão direta de certos equipamentos às linhas de energia da rede pública de corrente alternada. Ao interpor um transformador de isolamento entre a rede e o equipamento, a armação metálica deste último atua como um **terra** flutuante, protegendo o usuário da possibilidade de receber uma descarga elétrica.



Figura 2.32
Transformadores de
seção transversal
circular

(a) Transformadores toroidais.

(b) Transformadores retangulares



Outros tipos de transformadores muito utilizados em eletrônica são os toroidais, os retangulares e os de pulsos. Os transformadores **toroidais**, figura 2.32a, e os **retangulares**, figura 2.32b, são muito utilizados em equipamentos de áudio, vídeo e medições, bem como em monitores, impressoras, drives de discos e outras aplicações de baixa potência.

Os transformadores **de pulsos**, figura 2.33, por sua vez, são utilizados para transferir **pulsos**, ou seja, voltagens ou correntes que mudam rapidamente de valor durante um curto tempo. Muitos dispositivos eletrônicos, como os tiristores e as lâmpadas estroboscópicas operam a base de pulsos.

Formas de identificação. Os transformadores são identificados de várias formas, dependendo de seu tipo e aplicação. Os transformadores de potência, por exemplo, são caracterizados especificando-se a voltagem da bobina primária, a voltagem da secundária e a **potência**. Exemplo:

Voltagem primária = 120 V
Voltagem secundária = 12 V
Potência = 18 W

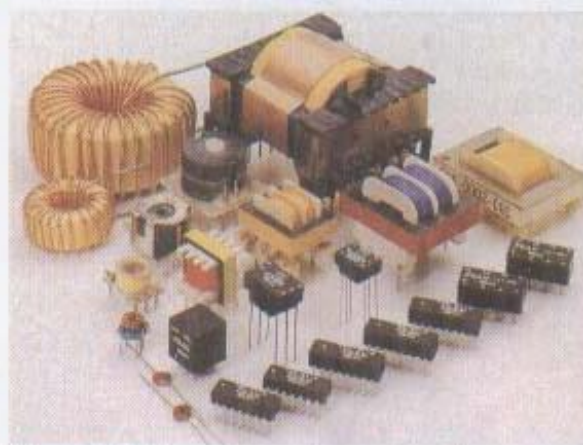


Figura 2.33 Transformadores de pulsos

A **potência** se refere ao produto da voltagem da bobina secundária pela máxima corrente que pode ser extraída da mesma de uma forma segura sem causar danos ao transformador. Portanto, um transformador de **12 W**, projetado para aceitar uma voltagem de entrada de 240 V e proporcionar uma voltagem de saída de **15 V**, pode distribuir no máximo uma corrente de **0,8 A**, visto que $15V \times 0,8A = 12W$.

A razão da voltagem primária em relação à secundária é denominada **relação de transformação**. O transformador anterior, por exemplo, tem uma relação de transformação de 240/15, ou seja, de 16 a 1. Isto implica que se a bobina primária tiver, digamos, 800 espirais, a secundária terá 50 espirais.

Outros parâmetros que são utilizados para caracterizar os transformadores são a corrente de fuga, a faixa de variação da voltagem de saída, a resposta de frequência, as perdas de inserção, etc. A corrente de fuga, por exemplo, é de particular importância nos transformadores de isolamento, enquanto que a resposta de frequência é nos transformadores de áudio e de RF. Estes parâmetros serão analisados em maiores detalhes nos capítulos posteriores deste curso. ➔

Capítulo 3

Componentes Eletromecânicos



3.1 O que são?

3.2 Condutores

3.3 Fios

3.4 Cabos

3.5 Interruptores

3.6 Conectores

Os componentes eletromecânicos são elementos essenciais de qualquer equipamento eletrônico, onde cumprem funções-chave. Sem dúvida, apesar de sua importância, são frequentemente ignorados e incompreendidos. Este capítulo examina em detalhe os principais componentes eletromecânicos utilizados nos circuitos e sistemas eletrônicos, dando especial ênfase aos fios, cabos, interruptores e conectores. Para cada um são explicadas suas funções e características básicas, os símbolos utilizados nos diagramas esquemáticos para representá-los, as principais variedades ou tipos existentes de cada um, os parâmetros utilizados para identificá-los e suas aplicações gerais.

3.1 Componentes eletromecânicos

Os **componentes eletromecânicos** são dispositivos geralmente passivos que executam funções elétricas simples partindo de movimentos mecânicos externos ou internos. Também são classificados segundo essa categoria os elementos que realizam funções de suporte mecânico e de interconexão elétrica. Os principais componentes eletromecânicos utilizados em eletrônica, aos quais nos referiremos neste capítulo, são os condutores, os interruptores e os conectores.

3.2 Condutores

Os **condutores**, **figura 3.1**, são utilizados na forma de fios, cabos ou linhas impressas para transportar ou transferir sinais de corrente ou de voltagem de um ponto a outro. Tam-

bém servem para conectar componentes entre si e como elementos de reforço. Neste capítulo nos referiremos exclusivamente aos condutores na forma de fios e cabos. Os condutores em forma de linhas são utilizados principalmente nas placas de circuito impresso.

A característica mais importante dos condutores é sua baixa resistência. O principal material utilizado como condutor em eletrô-

ca é o **cobre**. Entretanto, para algumas aplicações especiais se utilizam o alumínio, o ouro, a prata e outros metais.

No extremo oposto aos dos condutores se encontram os materiais isolantes como o papel, o vidro e o plástico, que têm resistências muito altas, da ordem de vários megohms. Entre os isolantes e os condutores se encontram os materiais semicondutores como o carbono, o silício e o germânio, que têm uma resistência controlável eletronicamente. Acima dos condutores estão os supercondutores, os quais têm uma resistência praticamente igual a zero a temperaturas muito baixas.

Os condutores, em geral, são simbolizados nos diagramas eletrônicos como linhas retas

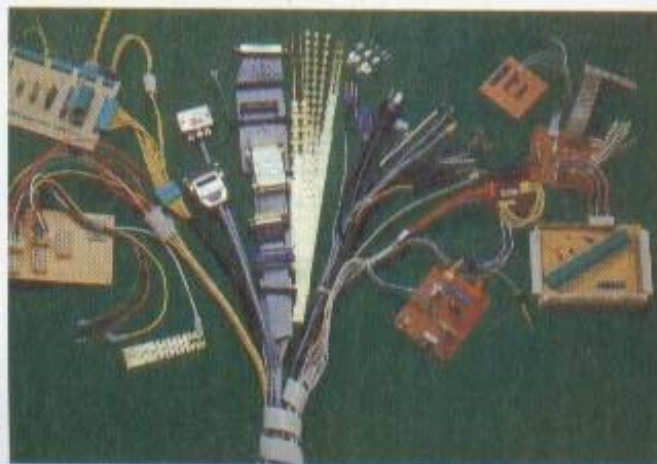


Figura 3.1 Condutores e acessórios para o alambrado de circuitos eletrônicos

que indicam as conexões entre os componentes individuais, **figura 3.2**. Também são utilizadas convenções especiais para indicar condutores blindados, conexões cruzadas, pontos de junção, conexões (do fio-terra), etc. Estes aspectos serão tratados com maior detalhe em capítulos posteriores deste curso.

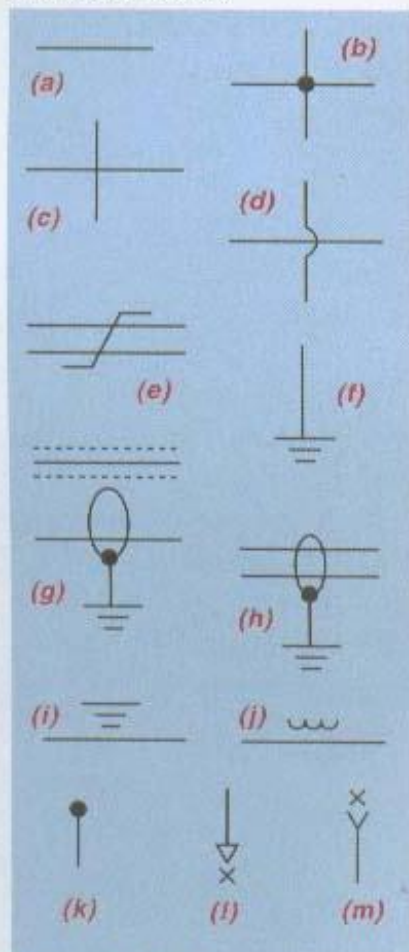


Figura 3.2 Símbologia de condutores. (a) Geral. (b) Unidos. (c), (d) Cruzados. (e) Entrelaçados. (f) Condutor de terra. (g) Condutor blindado. (h) Condutores blindados. (i) Condutor subterrâneo. (j) Condutor submarino. (k) Condutor de testes. (l), (m) Indicadores de junção (todos os condutores com a mesma marca devem unir-se entre si eletricamente).



Figura 3.3 Fios para aplicações elétricas e eletrônicas

3.3 Fios

Os fios, **figura 3.3**, tal qual os cabos e as linhas de circuito impresso, são componentes de muito baixa resistência que são utilizados como **condutores**, ou seja, para transportar correntes ou transferir voltagens, sem perdas apreciáveis, entre dois pontos de um circuito ou sistema elétrico ou eletrônico. Os fios, em geral, são mais rígidos que os cabos e podem transportar correntes mais altas que as linhas impressas.

Normalmente, um fio é formado por um condutor metálico central de forma cilíndrica chamado núcleo, cercado por um revestimento isolante, **figura 3.4**. O condutor central é geralmente de cobre mole recozido, entretanto, em alguns casos, outros metais como o alumínio, o ouro e a prata são utilizados. Alguns condutores de cobre são **estanhados**, ou seja, trazem uma fina camada de estanho que lhes proporciona uma aparência similar à da prata e facilita sua soldagem.



Figura 3.4 Estrutura de fios isolados comuns

(a) Fio sólido
(b) Fio trançado

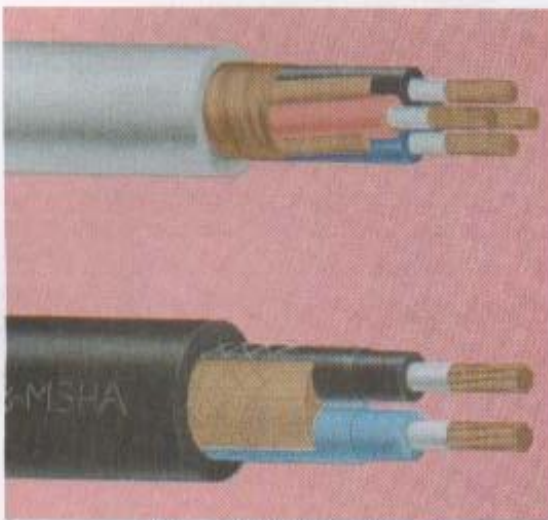


Figura 3.5 Cabos com fios trançados para potência.

O condutor central de um fio pode ser sólido ou ser formado por vários condutores individuais enrolados em forma de hélice ou trança. Os fios com esta característica são denominados **trançados**. O revestimento isolante exterior pode ser uma capa plástica ou de borracha, ou uma cobertura de laca ou esmalte. Os fios com esta última característica são denominados **esmalçados**.

A finalidade do revestimento é isolar eletricamente o elemento condutor e protegê-lo contra a umidade, a oxidação, o calor e outras condições externas. Além disso, mantém a corrente confinada dentro do mesmo e evita que haja contato com outros condutores.

Quando fios isolados não são utilizados, é muito fácil criar acidentalmente condições de **curto-circuito**, as

quais, além de alterar o funcionamento normal dos sistemas, podem chegar a ser catastróficas.

O isolamento também permite identificar as funções dos condutores de um equipamento por cores e colocar sobre os mesmos códigos, marcas e outros tipos de dados impressos. No caso de fios que transportam correntes altas, a correta seleção do tipo de isolamento é um fator-chave para prevenir incêndios.

Tipos e aplicações. Os fios podem ser basicamente de dois tipos, **sólidos** ou **trançados**. Os fios sólidos são utilizados para realizar conexões relativamente permanentes, não submetidas a flexões e nem a esforços mecânicos. A disposição trançada, por sua vez, proporciona aos fios um maior grau de flexibilidade e uma menor susceptibilidade à ruptura. Isto é particularmente importante em cabos para aplicações de potência, **figura 3.5**.

Os condutores que formam um fio trançado podem chegar a ser muito finos, praticamente linhas ou filamentos, constituindo o que se chama de **cabo multifilar**, muito utilizado como fio de conexões em máquinas e todos os tipos de aparelhos eletrônicos. Na **figura 3.6**, por exemplo, mostra-se o interior de um

aparelho eletrônico que tem como parte da sua fiação cabo multifilar.

Os fios também podem ser classificados de acordo com o tipo de material utilizado como condutor, a forma geométrica da seção transversal do mesmo e o material isolante empregado como revestimento. A grande maioria dos fios utilizados em eletrônica são de cobre, de seção transversal circular e com isolamento plástico. Sem dúvida, também são possíveis outras formas, composições e métodos de isolamento.

Formas de identificação. Os fios utilizados em eletricidade e eletrônica são identificados mediante um **número** ou **bitola** que indica o tamanho da seção transversal do condutor central em termos



Figura 3.6 Equipamento eletrônico com fiação de cabo multifilar.

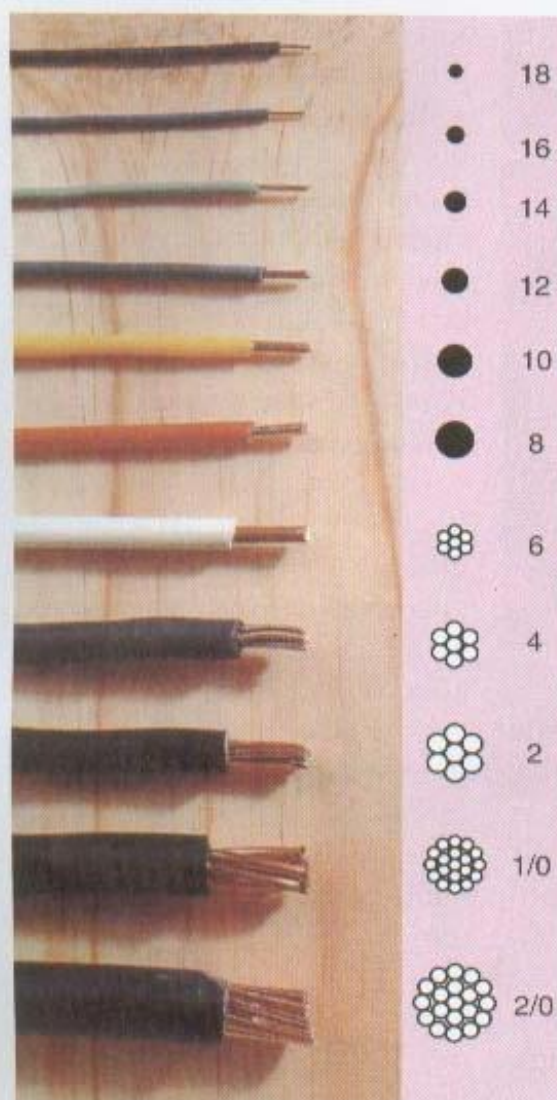


Figura 3.7 Comparação de bitolas de fio AWG comuns

de diâmetro e da área da mesma, figura 3.7. Neste curso adotaremos o sistema de numeração AWG, originalmente desenvolvido pela companhia Brown & Sharpe e atualmente convertido em um padrão pela *American Wire Gage*.

A tabela 3.1 especifica o diâmetro AWG e a área da seção transversal de alguns fios de cobre de uso comum em eletrônica. A faixa de numeração do sistema

AWG se estende do fio N° 40, que é o mais delgado e tem um diâmetro de 0,08 mm (0,003 polegadas) até o fio N° 0000 o 4/0 (pronuncia-se “quatro zero”), que é o mais grosso e tem um diâmetro de 11,43 mm (0,450 polegadas).

Os cabos ou fios multifilares também

são identificados por um número AWG. Neste caso, o número e bitola dos filamentos individuais dependem do diâmetro final desejado e das características de flexibilidade requeridas. A tabela 3.2 relaciona as características de alguns fios de 7

filamentos de uso comum em eletrônica.

Na prática, o diâmetro final de um fio multifilar é ligeiramente maior que o do fio sólido equivalente devido aos espaços vazios que ficam entre os filamentos individuais.

Além da bitola e da resistência por unidade de comprimento,

outra característica distintiva dos fios que deve se levar em conta ao selecionarmos para uma aplicação determinada é o **tipo de isolamento**. Este último determina, por exemplo, a máxima corrente e a máxima voltagem que pode manejar um dado fio de forma segura, bem como as condições ambientais extremas (temperatura e umidade) em que pode trabalhar.

N° (AWG)	Diâmetro (mm)	Área (mm²)	Resistência (Ω/m)
40	0,079	0,004 902	3,441 601
38	0,102	0,008 171	2,165 354
36	0,127	0,012 668	0,508 530
34	0,160	0,020 106	0,856 299
32	0,203	0,032 365	0,538 058
30	0,254	0,050 671	0,337 927
28	0,320	0,080 425	0,203 412
26	0,404	0,128 189	0,131 234
24	0,511	0,205 084	0,084 318
22	0,643	0,324 722	0,052 953
20	0,813	0,519 124	0,033 301
18	1,024	0,823 550	0,020 948
16	1,290	1,306 981	0,013 166
14	1,628	2,081 607	0,008 284
12	2,052	3,307 079	0,005 210
10	2,588	5,260 396	0,003 278

Tabela 3.1 Características de fios de cobre de uso comum em eletrônica

Calibre (AWG)	Diâmetro (mm)	Área (mm²)	Resistência (Ω/m)
24	0,647 70	0,205 084	0,093 176
22	0,800 10	0,324 722	0,057 087
20	0,922 02	0,519 124	0,034 580
18	1,158 24	0,823 550	0,021 772
16	1,463 04	1,306 981	0,013 688
14	1,844 04	2,081 607	0,008 609
12	2,324 10	3,307 079	0,005 413
10	2,946 40	5,260 396	0,003 406

Tabela 3.2 Características de fios multifilares de 7 filamentos



Figura 3.8 Cabos blindados e não-blindados para uso eletrônico

3.4 Cabos

Os cabos, figura 3.8, são estruturas relativamente flexíveis formados por dois ou mais condutores isolados, sólidos ou multifilares, protegidos dentro de uma cobertura comum. São utilizados para conectar componentes ou equipamentos que estejam separados a uma certa distância e transportar vários sinais ao mesmo tempo. Em alguns casos, um dos condutores é uma malha metálica que circunda aos demais. Os cabos com esta característica são denominados **blindados**.

Tipos. Os cabos utilizados em eletrônica podem ser de

vários tipos, dependendo de suas características construtivas e das aplicações para as quais foram projetados. Os mais comuns são os seguintes:

Cabos multicondutores. São formados por vários fios individuais, sólidos ou multifilares, isolados entre si e envolvidos em um revestimento (jaqueta) comum, figura 3.9. Normalmente, o isolamento dos fios individuais é de cor diferente para facilitar sua identificação e permitir a codificação de funções por cores. São utilizados em comunicações, áudio, computadores e outras aplicações.



Figura 3.9 Cabo multicondutor

Cabos coaxiais. São formados por um condutor central, sólido ou multifilar, rodeado por uma cobertura de polietileno relativamente grossa, chamada **dielétrico**, sobre a qual se encontra um segundo condutor trançado em forma de malha, figura 3.10. Este último é denominado **blindagem**.

Os cabos coaxiais são utilizados principalmente em aplicações de alta frequência, incluindo vídeo e comunicações. O propósito da blindagem é proteger o condutor interno central contra interferências externas, evitando assim a degradação dos sinais transportados pelo mesmo.

Cabos de fita. São constituídos por vários condutores multifilares individuais dispostos em forma de fita e unidos por seus isolamentos, figura 3.11. São utilizados principalmente para transportar sinais de controle em computadores e sistemas digitais.



Figura 3.10 Cabos coaxiais

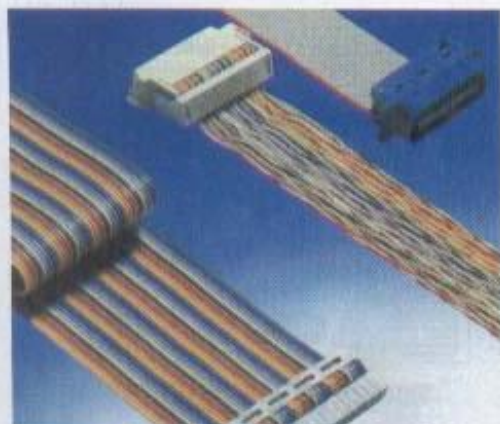


Figura 3.11 Cabos de fita extrudados

Cabos de alimentação. São cabos com terminações em pinos moldados que são utilizados para a conexão de equipamentos e aparelhos elétricos e eletrônicos às tomadas, **figura 3.12**. São projetados de forma a serem bem flexíveis para suportar as torções usuais quando se manipulam produtos portáteis.

Formas de identificação. Os cabos utilizados em eletrônica são identificados de várias formas, dependendo de seu tipo. Os **cabos multicondutores e multipares**, por exemplo, são identificados especificando-se o número de seus condutores individuais e a



Figura 3.12 Cabos de alimentação

bitola AWG dos mesmos. Para os cabos de potência também deve-se especificar a capacidade de corrente. Os **cabos coaxiais**, por sua vez, são identificados especificando-se sua **impedância característica** e o diâmetro AWG do condutor central. Este último pode ser sólido ou multipar.

Aplicações. Em geral, cada campo de aplicação da eletrônica requer seus próprios tipos de cabos, projetados de acordo com as condições específicas que devem suportar. Em áudio, por exemplo, são utilizados **cabos blindados ou entrelaçados**, **figura 3.13**, para conduzir os sinais fracos transmitidos por microfones, cabeças e outros transdutores, e evitar que sejam alterados por sinais de ruído induzidos por transformadores, motores, instalações elétricas, automóveis, etc.

Em comunicações, utiliza-se uma grande variedade de cabos, desde estruturas simples como os pares trançados, os cabos multifilares e os cabos de antena, até estruturas sofisticadas de cabos coaxiais, **figura 3.14**. No campo dos computadores também são utilizados cabos especializados para interconectar unidades de disco e outros periféricos, transferir dados a altas velocidades e realizar outras funções, **figura 3.15**.

Conceito de impedância característica

O espaçamento constante entre dois condutores, como acontece em um cabo coaxial, dá origem ao que se chama de **linha de transmissão**. Cada segmento de uma linha de transmissão tem uma resistência, uma indutância e uma capacitância associadas. O efeito combinado destes três fatores ao longo da linha dá origem a um parâmetro intrínseco da mesma chamado **impedância característica** ou Z_0 . A impedância característica é especificada em ohms (Ω) e mede a capacidade da linha para transportar sinais de corrente alternada de alta frequência. Os cabos coaxiais utilizados para antenas de receptores de TV, por exemplo, têm uma Z_0 de 75 Ω , enquanto que os utilizados para antenas de transceptores (transmissores/receptores) de faixa de onda civil (CB) têm uma Z_0 de 50 Ω .



Figura 3.13 Cabos blindados para áudio

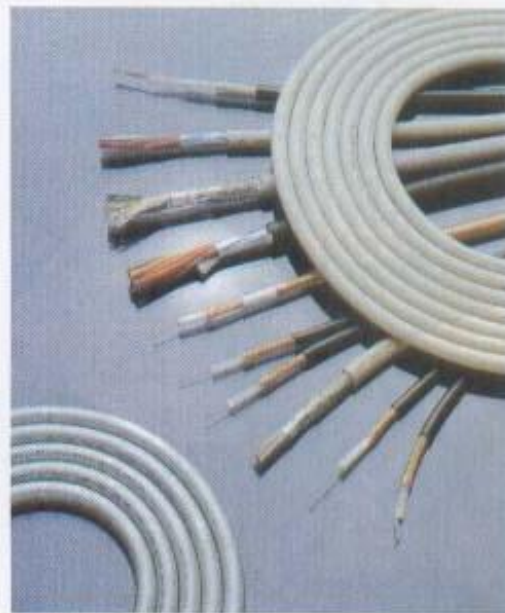


Figura 3.14 Cabos para comunicações



Figura 3.15 Cabos para computadores



Figura 3.16 Cabos de fibra ótica

Hoje em dia, muitos sistemas eletrônicos têm substituído os cabos metálicos convencionais por **cabos de fibra ótica**, figura 3.16, que transportam sinais elétricos de um ponto a outro em forma de pulsos de luz, em lugar de fazê-lo através de portadores de carga (elétrons).

Na figura 3.17 mostra-se a estrutura típica de um cabo de fibra ótica. O **núcleo** ou condutor ótico é um fio muito fino de plástico ou vidro, a **capa** é um anel refrator de luz



Figura 3.17 Estrutura de um cabo de fibra ótica

também de plástico ou vidro e a **jaqueta** é um envólucro protetor de borracha ou plástico. Um único cabo de fibra ótica pode transportar mais informação que vários milhares de pares telefônicos ou de cabos coaxiais, com um mínimo de perdas e a um custo muito baixo.

3.4. Interruptores

Os **interruptores**, figura 3.18, são dispositivos que são utilizados para permitir ou interromper mecanicamente a passagem de sinais de corrente ou voltagem de um ponto a outro, bem como para diregi-la ou roteá-la desde ou até vários pontos.

Um interruptor é formado por um contato móvel, um ou dois contatos fixos e um me-

canismo de acionamento, figura 3.19. Este último, que pode ser operado de formas muito diversas (por deslizamento, por alavanca, por pressão, etc.), conecta eletricamente o contato móvel com um dos contatos fixos, fechando o circuito controlado, quando o interruptor encontra-se na posição fechada (ON), e os separa quando o interruptor encontra-se na posição aberta (OFF), abrindo o circuito.

Simbologia. Os interruptores podem ser de um ou vários **pólos** e de um ou vários **tiros**, bem como de **ação permanente** ou de **ação momentânea**. Na figura 3.20 mostram-se os símbolos utilizados nos esquemas eletrônicos para representar estas possibilidades. As linhas pontilhadas indicam



Figura 3.18 Interruptores para uso eletrônico

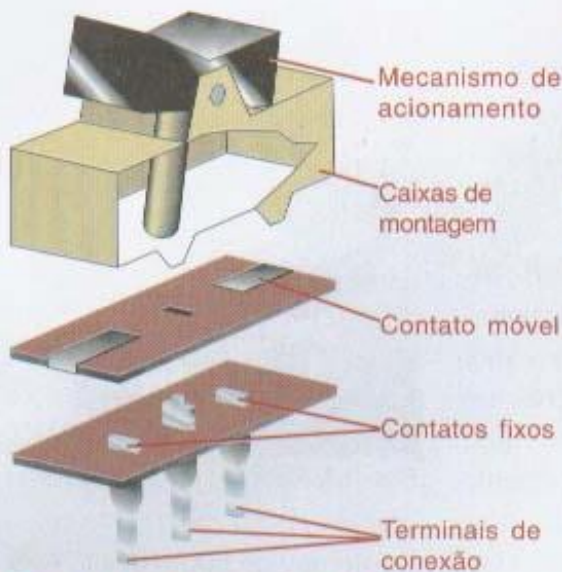


Figura 3.19 Estrutura interna de um interruptor

que os interruptores relacionados estão engatados entre si; ou seja, se abrem ou fecham, ou passam de uma posição a outra, ao mesmo tempo.

Um interruptor é de ação **permanente** quando puder estar indistintamente aberto

ou fechado e fica **encravado**, ou seja, uma vez acionado e liberado, permanece indefinidamente fixado neste último estado até que o mesmo seja modificado voluntariamente pelo usuário.

Da mesma forma, um interruptor é de ação **momentânea** quando estiver normalmente aberto ou fechado, muda de estado enquanto se mantém acionado e retorna ao seu estado normal quando é liberado.

Os **pólos** (p) de um interruptor referem-se ao número de circuitos independentes que podem abrir ou fechar ao mesmo tempo e os **tiros** ou posi-

ções (t) ao número de vias ou rotas diferentes que podem fornecer para a circulação da corrente. As configurações de pólos e tiros mais comuns são a **spst** (um pólo/um tiro), a **spdt** (um pólo/dois tiros), a **dpst** (dois pólos/um tiro) e a **dpdt** (dois pólos/dois tiros). Esta última é a mais universal e pode substituir facilmente qualquer uma das outras três configurações.

A maioria dos interruptores de um tiro (spst e dpst) são do tipo **"Off-On"**, ou seja, sempre estão fechados (ON) em uma posição e abertos (OFF) na outra. Também existem interruptores spst e dpst de ação momentânea dos tipos **"Off-(On)"** e **"On-(Off)"**, os quais permanecem normalmente em um estado (abertos ou fechados) e passam ao estado contrário (indicado entre parênteses) enquanto se mantêm acionados.

Da mesma maneira, a maioria dos interruptores de dois tiros (spdt e dpdt) são do tipo **"On-On"**, ou seja, sempre estão fechados em uma das posições possíveis. Também existem interruptores spdt e dpdt com uma posição central neutra na qual sempre estão abertas (**Off**). Os interruptores com esta característica são chamados de **"On-Off-On"**.

Os interruptores spdt e dpdt também podem ser, total ou parcialmente, de ação mo-

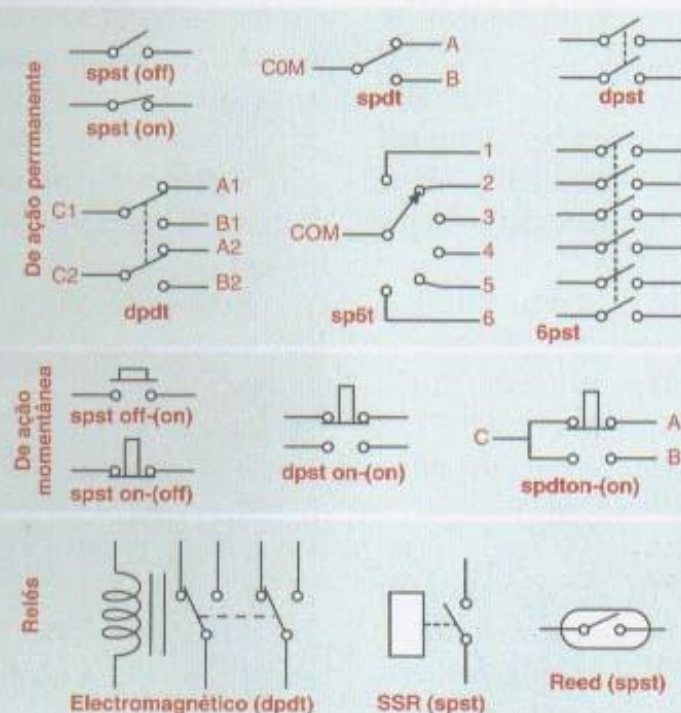


Figura 3.20 Simbologia dos interruptores



Figura 3.21
Interruptores

mentânea. As configurações mais comuns são “On-(On)”, “(On)-Off-(On)” e “On-Off-(On)”. Em todos estes casos, a condição indicada entre parênteses é momentânea, quer dizer, acontece enquanto o interruptor se mantiver acionado nesta posição.

Tipos.

Dependendo de suas características construtivas e do método de acionamento, os interruptores podem ser de vários tipos, sendo os mais comuns os com ação de alavanca, os deslizantes, os de tecla, os rotatórios, os de pressão ou *push-buttons* e os eletromagnéticos ou relés. Outros tipos

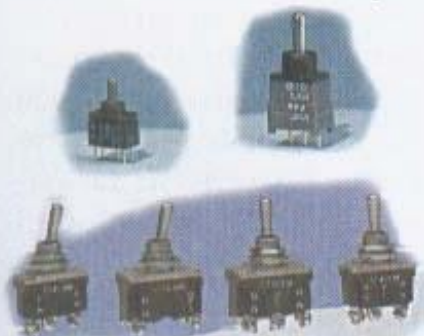


Figura 3.22 Interruptores de alavanca

de interruptores como os *dip-switches*, os microswitches e os teclados são na realidade variações ou associações destes tipos básicos.

Os **interruptores deslizantes**, **figura 3.21**, geralmente vêm em versões spst, spdt ou dpdt, e algumas vezes em versões dpst, sp3t, dp3t, 3pdt, 4pdt e p3t. São relativamente simples de se fabricar, mas desgastam-se facilmente com o uso devido ao atrito contínuo das superfícies de contato.

Os **interruptores com ação de alavanca**, **figura 3.22**, também chamados *toggle*, vêm nas mesmas versões que os deslizantes, mas são mecanicamente mais robustos. Além disso, podem manejar correntes mais altas.

Os **interruptores de tecla**, **figura 3.23**, também chamados *rockers*, vêm principalmente em versões spst, spdt, dpdt e 4pdt dos tipos “Off-On” e “On-On”. São mais complicados que os deslizantes e os com ação de alavanca do ponto de vista mecânico, mas apresentam menor desgaste e podem chegar a manejar correntes e tensões muito elevadas.

Os **interruptores de pressão** ou *push-buttons*, **figura 3.24**, vêm geralmente em versões spst dos tipos “Off-(On)” e “On-(Off)”,

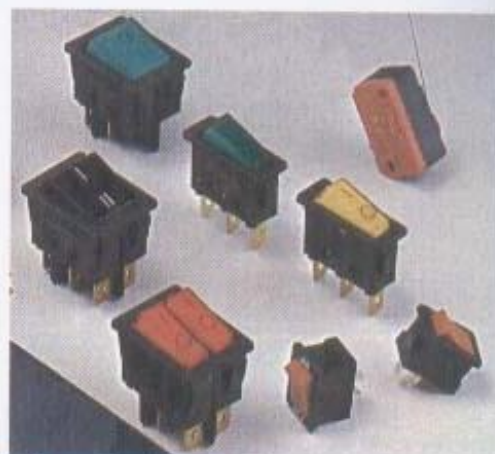


Figura 3.23 Interruptores de tecla

apesar de que também são comuns outras configurações como spdt, dpdt e 4pdt.

A maioria de interruptores *push-button* são de ação momentânea. Alguns, sem dúvida, oferecem a opção de serem encravados, podendo ser utilizados como interruptores convencionais “On-Off”, “On-On” ou “On-(On)”. Nestes casos, o botão deve ser acionado uma vez para fechar os contatos do interruptor e outra vez para reabri-los.

Também existem modelos do tipo dpst que podem operar em sua posição normal como interruptores “On-Off”,



Figura 3.24 Interruptores *push-button*

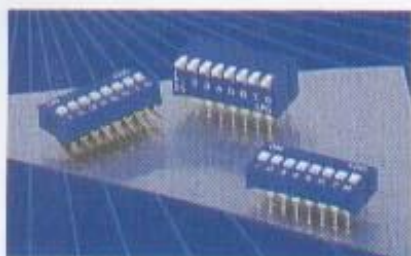


Figura 3.25 Interruptores DIP ou dipswitches

ou seja, com um pólo fechado e o outro aberto, e em sua posição temporária como interruptores “(Off)-(On)”. Esta opção também existe em outros tipos de interruptores.

Os **interruptores DIP ou de linha dupla**, figura 3.25, comumente conhecidos como *dipswitches*, são obtidos em versões de 1 até 12 interruptores individuais. São utilizados em aplicações de comutação onde as correntes a controlar são muito baixas e os acionamentos não são muito frequentes. Normalmente não são acessíveis aos usuários finais.

Os **interruptores rotativos**, figura 3.26, também chamados **comutadores** ou chaves seletoras, consistem de um ou mais discos de material isolante (bolachas) que giram entre um número similar de bolachas fixas, cada uma com um máximo de 12 contatos. Dependen-



Figura 3.26 Interruptores rotativos

do da forma como se dispõem os contatos em ambos os tipos de bolachas, pode-se obter várias configurações de pólos e tiros.

Os **microinterruptores** ou **microswitches**, figura 3.27, são interruptores muito sensíveis que se abrem ou fecham mediante cames ou outras peças mecânicas e incluem frequentemente elementos especiais de acionamento como alavancas e roldanas. São muito utilizados como detectores de posição em máquinas e outros equipamentos.

Os **relés**, figura 3.28, são interruptores constituídos por uma bobina de núcleo de ferro e um arranjo de contatos. Quando se aplica uma corrente à bobina, o campo magnético produzido por esta última aciona os contatos, abrindo os que estavam fechados e fechando os que estavam abertos. Ao suspender-se a corrente, os contatos retornam às suas posições originais. São obtidos principalmente em versões spst, spdt, dpst, dpdt, 3pdt e 4pdt.

Um caso particular de interruptor magnético é o **relé reed**, formado por um ou dois pares de bandas metálicas magnetizáveis chamadas **lingüetas** ou *reeds*, muito próximas entre si, que atuam como contatos. Os contatos se fecham como resultado do campo magnético criado por um ímã ex-

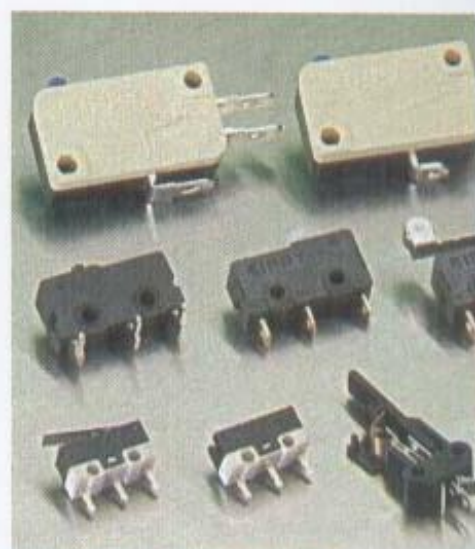


Figura 3.27 Interruptores de acionamento por cor ou microswitches

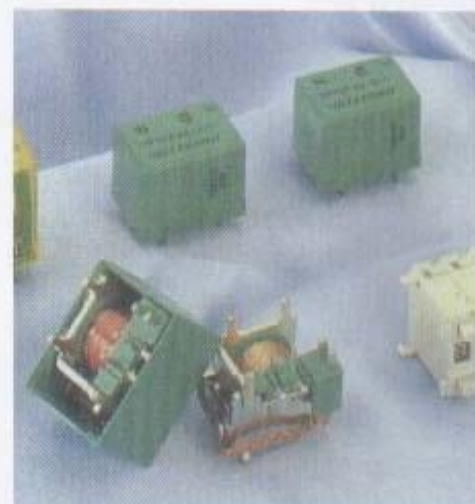


Figura 3.28 Interruptores eletromagnéticos ou relés

terno ou uma bobina interna. As configurações mais usuais dos contatos são a spst e a dpst.

Também existem relés completamente eletrônicos, baseados em semicondutores, chamados **relés de estado sólido** ou SSRs. Os SSR são mais rápidos, compactos e silenciosos que os relés convencionais. Além disso, não se desgastam e podem manejar correntes muito altas.

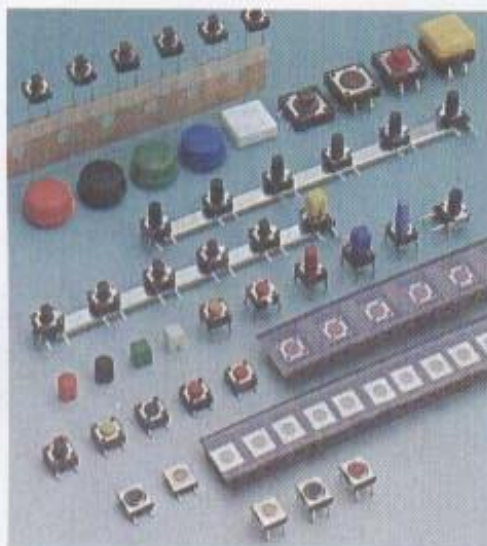


Figura 3.29 Interruptores para circuito impresso

Dependendo do método de instalação, os interruptores podem ser de montagem superficial, de montagem por inserção ou de montagem em chassis. Estes últimos são conectados a outros componentes através de fios ou cabos, enquanto que os dois primeiros são instalados e conectados diretamente sobre as placas de circuito impresso, figura 3.29.

Atualmente dispõe-se de uma grande variedade de interruptores operados eletronicamente que respondem a di-

ferentes variáveis físicas como luz, temperatura, campos magnéticos, umidade, movimento, etc. Também existem interruptores operados por chave, interruptores de mercúrio e outros tipos para aplicações especiais.

Formas de identificação.

Além da configuração de contatos, o tipo de acabamento e o método de montagem, existem outros fatores distintivos que devem ser levados em consideração ao se selecionar um interruptor para uma aplicação específica. Os mais importantes do ponto de vista elétrico são a capacidade de corrente e a capacidade de voltagem.

A **capacidade de corrente**, por exemplo 5 A, refere-se à máxima corrente que um interruptor pode manejar de forma segura quando está fechado. Se esta corrente for superior à especificada, o dispositivo se sobreaquece e seus contatos podem chegar a se fundir.

A **capacidade de voltagem**, por exemplo 28 VCC ou 120 VCA, refere-se à máxima voltagem CA ou CC que os contatos de um interruptor podem suportar quando o mesmo está aberto. Se esta voltagem for superior à especificada, arcos voltaicos podem chegar a ser produzidos entre os contatos.

Outros aspectos que devem ser levados em consideração ao se selecionar um interruptor, são o material dos contatos (por exemplo, cobre banhado em prata), a faixa de temperaturas de operação (exemplo de -30°C até +85°C) e a vida mecânica útil (ex.: 10.000 ciclos).

Algumas vezes, por razões estéticas ou ergonômicas, a cor da tampa ou o aspecto externo do mecanismo de acionamento pode ser uma consideração importante. Atualmente, muitos fabricantes projetam seus interruptores com tampas de acionamento removíveis e facilmente substituíveis. Outros oferecem



Figura 3.30 Interruptor modular com mecanismos de acionamento intercambiáveis

módulos interruptores básicos que aceitam diferentes estilos de acionadores, **figura 3.30**.

No caso de interruptores rotativos e multiposicionais, às vezes é conveniente considerar a forma como a transição de uma posição à próxima é realizada. Deste ponto de vista, existem duas opções, uma denominada **de não-contato** ou **BBM** (*Break-Before-Make: interrupção de contato antes de fazer outro*) e outra chamada **de contato** ou **MBB** (*Make-Before-Break: Contato de fecho antes de abertura*).

No primeiro caso (BBM), o interruptor primeiro desconecta completamente o circuito da posição atual antes de conectá-lo à posição seguinte, enquanto que no segundo (MBB), primeiro conecta-se à posição seguinte e em seguida desconecta-se da posição atual. Portanto, em um dado momento, ambos os circuitos estão eletricamente conectados. Alguns interruptores rotativos combinam os dois modos de funcionamento em uma mesma unidade.

Na maioria das aplicações é irrelevante se o interruptor que está sendo utilizado é um BBM ou MBB. Sem dúvida, existem situações que exigem o emprego de um ou outro tipo. Por exemplo, para se prevenir circuitos abertos durante a passagem de uma posição à outra deve-se utilizar interruptores MBB.

No caso de interruptores eletromagnéticos (relés), além da configuração de contatos e da capacidade de voltagem e corrente dos mesmos, também deve-se levar em conta a voltagem de trabalho da bobina e a resistência interna da mesma, por exemplo 12 VCC e 200Ω.

Aplicações. Os interruptores, com sua capacidade para permitir ou impedir a passagem de corrente e direcioná-la de um ponto a outro, são os elementos de controle essenciais de qualquer circuito ou sistema eletrônico, **figura 3.31**. De fato, muitos dispositivos semicondutores como os transistores, os diodos, os tiristores e os circuitos integrados, que têm revolucionado a eletrônica, atuam na prática como interruptores ou arranjos de interruptores, exceto que não contém partes eletromecânicas.

As aplicações dos interruptores eletromecânicos são muito variadas, dependendo da configuração de seus contatos e de suas características construtivas. Na **Experiência 3.1**, por exemplo, aprenderemos a utilizá-los para abrir ou fechar um único circuito ou vários circuitos independentes, para gerar estados lógicos,

para produzir padrões de comutação e para direcionar sinais desde e até vários circuitos.

Os interruptores **spst**, por exemplo, são muito empregados como **interruptores gerais**, ou seja, para se conectar ou desconectar circuitos ou sistemas da fonte principal, isto é, para conectar ou desconectar circuitos ou sistemas da fonte principal de administrador de energia, e como **interruptores lógicos**, ou seja, para proporcionar níveis **altos** (1's) e **baixos** (0's) de voltagem que servem de dados de entrada para sistemas digitais.

Os interruptores **spdt** e **dpdt**, além de serem empregados como interruptores gerais e lógicos, também são utilizados como **seletores**, ou seja, para direcionar um ou dois sinais de entrada até uma ou duas saídas possíveis. Quando se necessitam de muitas vias de direcionamento recorre-se ao uso de interruptores rotativos.



Figura 3.31 Rebobinadora automática de fitas de vídeo com seus respectivos interruptores de operação.

Experiência 3.1

Os interruptores como elementos de controle

Objetivos

1. Aprender a utilizar interruptores spst e spdt como elementos de controle básicos.
2. Aprender a utilizar interruptores spdt como seletores de duas vias.
3. Aprender a utilizar interruptores DIP para controlar vários circuitos independentes.

Aspectos práticos preliminares

Este experimento, além de **interruptores**, utiliza vários componentes com os quais você seguramente já está familiarizado, **figura 1**. O único elemento relativamente novo é o visualizador ou *display* de sete segmentos, cujas características gerais são descritas em seguida. Todas as partes necessárias são relacionadas na **lista de materiais** anexa.

O display de 7 segmentos

é um dispositivo utilizado para visualizar os números de 0 a 9, bem como algumas letras e símbolos especiais. Os segmentos, cada um dos quais é um LED, estão organizados em forma de "8" e são designados conforme o indicado na

figura 2. A maioria deles inclui um LED adicional que serve como ponto decimal. O display utilizado neste experimento traz esta opção. Os *displays* podem ser de anodo ou de catodo comum, de-

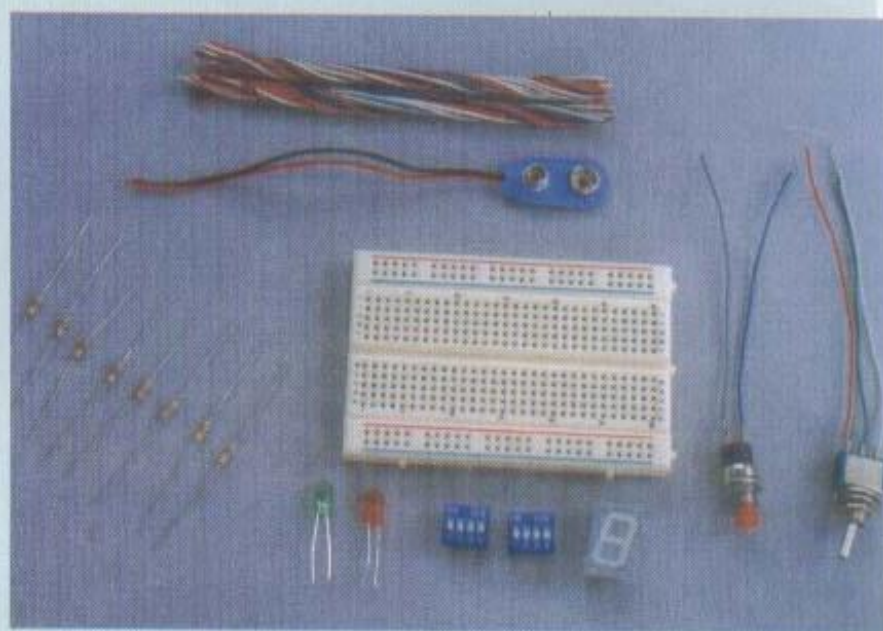


Figura 1. Materiais necessários para a Experiência 3.1

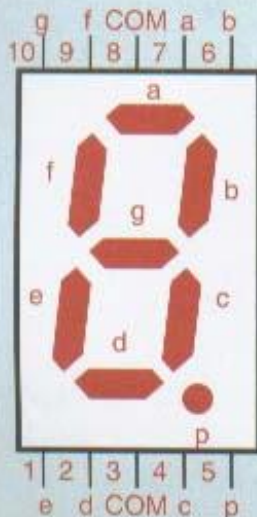


Figura 2 Nomenclatura para o display da Experiência 3.1.

pendendo de como os segmentos estejam conectados internamente. O utilizado neste experimento é um anodo comum. Neste caso, todos os anodos de todos os LEDs estão conectados entre si, formando um anodo comum, e todos os catodos estão livres. Em um *display* de catodo comum acontece o contrário.

Lista de materiais

Componentes

- 1 Interruptor spst push-button tipo off-on)
- 1 Interruptor spdt com ação de alavanca do tipo on-on ou on-off-on
- 2 Interruptores DIP de 4 posições
- 1 Bateria de 9 V
- 1 Conector de bateria
- 1 Protoboard
- 8 Resistências de 1kΩ, 1/4W
- 1 LED vermelho
- 1 LED verde
- 1 Visualizador LED de 7 segmentos de anodo comum
- Jumpers variados de fio telefônico Nº 24 AWG

Ferramentas

- Alicates de ponta, alicate de corte e desencapadores
- Ferro de solda, solda

Instrumentos

- Nenhum

Note que externamente estão disponíveis 10 terminais de conexão: 2 para o anodo comum (COM), 7 para os catodos dos segmentos (a, b, c, d, e, f, g) e 1 para o catodo do ponto decimal (P). Os terminais são numerados de 1 a 10 conforme o indicado. Para visualizar um caractere qualquer, por exemplo o número 5, deve-se energizar certos segmentos (a, f, g, c y d, neste caso) enquanto que os segmentos restantes devem ser desenergizados. Na **figura 3** mostram-se outras possibilidades. A luz emitida pelos segmentos pode ser vermelha, verde, etc., dependendo do projeto.

Procedimento

1. Antes de começar, teste os interruptores spst (*push-button*) e spdt (alavanca) dos fios de conexão apropriados. Simplesmente corte 5 segmentos de fio telefônico Nº 22 AWG de diferentes cores em um comprimento de 60 a 80 mm, desencape as pontas de cada um deles em um trecho de 5 mm e solde-as aos terminais dos interruptores.

Em nosso caso, temos utilizado fios verde e cinza para o interruptor spdt. As instruções básicas sobre como soldar fios a terminais de com-

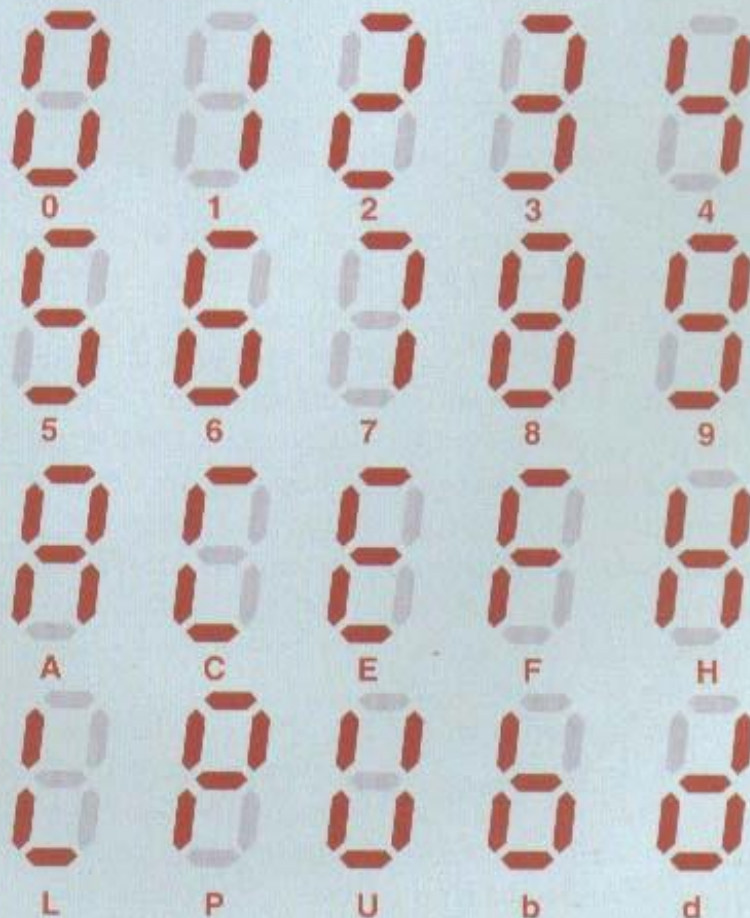


Figura 3 Alguns caracteres visualizáveis com um display de sete segmentos

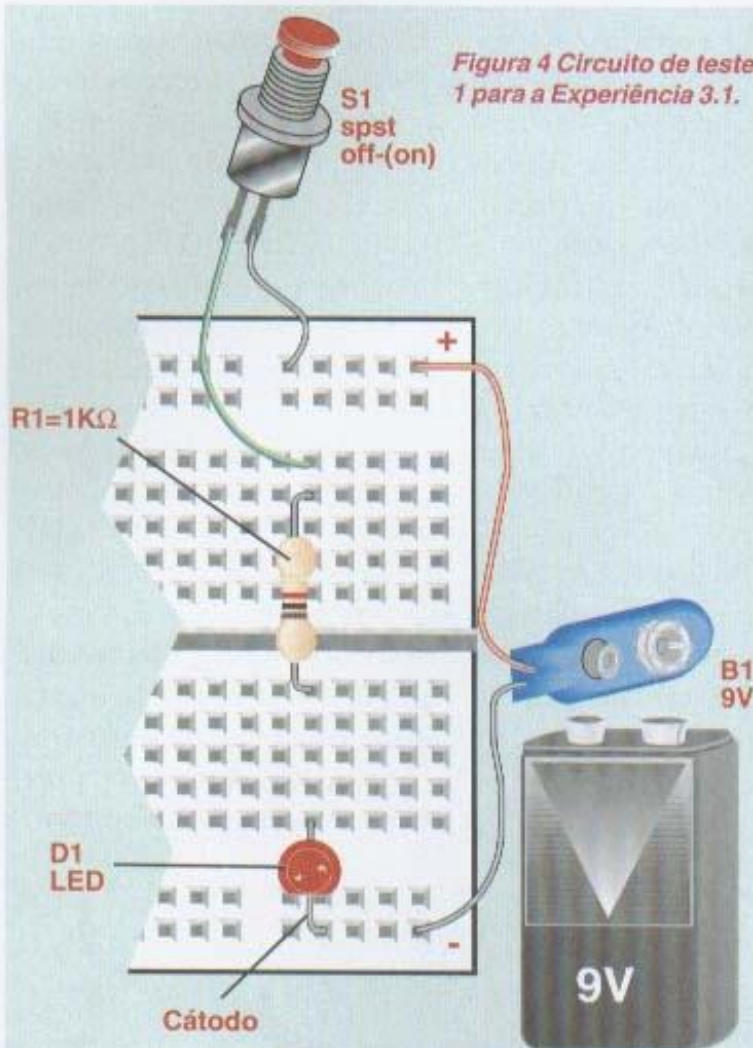


Figura 4 Circuito de testes N° 1 para a Experiência 3.1.

ponentes são oferecidas no Projeto N° 1 e na Prática N° 3 deste curso.

2. Arme sobre o protoboard o circuito mostrado na figura 4, instalando no lugar do S1 o interruptor spst *push-button* e no do D1 um LED vermelho ou de outra cor. Através deste circuito verificaremos a função de um interruptor como controlador de passagem de corrente.

3. Aperte e libere repetidamente o S1 e observe o que acontece com o brilho do LED. Notará que enquanto o S1

está livre, o LED não se ilumina, indicando que não está circulando corrente através do circuito. Da mesma forma, enquanto o S1 está pressionado, o LED se ilumina, indicando a presença de uma corrente. Apertar e liberar repetidamente o S1 faz com que o LED brilhe ao ritmo imposto pelo operador.

Portanto, comprova-se que um interruptor controla a passagem de corrente através de um circuito. Neste caso, por tratar-se de um interruptor **Off-(On)** ou normalmente aberto, a ação de controle é

momentânea, ou seja, o interruptor permite a passagem de corrente enquanto se mantiver acionado, mas a bloqueia automaticamente quando se libera. Com um interruptor **On-(Off)** ou normalmente fechado aconteceria o contrário.

4. Instale agora no lugar do S1 o interruptor spdt com ação de cotovelo, utilizando o terminal central e qualquer um dos terminais das extremidades. Repita o passo anterior comutando repetidamente o interruptor de uma posição a outra. Você notará que em uma posição o LED se ilumina, indicando a presença de corrente, e na outra se apaga, indicando a ausência da mesma.

Novamente comprova-se que um interruptor permite ou impede o fluxo de corrente em um circuito. Neste caso, por se tratar de um interruptor **Off-On**, a ação de controle é **permanente**, ou seja, o interruptor mantém-se indistintamente na posição "On" ou "Off" (a última fixa) depois de ser liberado. Em outras palavras, não tem uma posição de repouso.

5. Arme agora sobre o protoboard o circuito da figura 5, instalando no lugar do S1 o interruptor spdt com ação de cotovelo, no do D1 um LED vermelho e no do D2 um LED verde. Através desta montagem comprovaremos a

função de um interruptor como seletor de sinais.

- Comute alternadamente o S1 entre suas duas posições extremas. Você notará que em uma posição se ilumina o LED vermelho (D1) e na outra o verde (D2), indicando que em cada caso somente circula corrente através de um dos dois circuitos (o selecionado com o interruptor). Se o interruptor possui uma posição central neutra, você notará que nesta posição D1 e D2 não se iluminam.

Portanto, comprova-se a ação de um interruptor spdt como seletor de sinais. Neste caso, o interruptor transfere a voltagem da bateria (9 V) ao circuito do LED D1 ou ao circuito do LED D2, mas não a ambos. Por tratar-se de um interruptor de não-contato (BBM), o dispositivo primeiro desconecta um circuito antes de conectar o outro. Por esta razão, em nenhum momento os dois LEDs se observam iluminados. O que aconteceria se o S1 fosse do tipo MBB?

Da mesma forma, ao situar o interruptor em sua posição central neutra, ambos os circuitos ficam desconectados da bateria. Por esta razão, nenhum dos LEDs se ilumina. Observe finalmente que quando a alavanca do interruptor é movida para a esquerda, o terminal

central fica conectado com o terminal direito, e quando se move à direita fica conectado com o terminal esquerdo.

- Para finalizar, arme sobre o *protoboard* o circuito da **figura 6**, instalando nos lugares do S1 e S2 os interruptores DIP e no lugar do DIS1 o *display* de sete segmentos. Através desta montagem aprenderemos a utilizar interruptores spst para controlar vários circuitos independentes, cada um representado por um LED do *display* e sua correspondente resistência limitadora de corrente.

- Coloque inicialmente os interruptores de S1-1 até S2-4 em OFF. Notará que os segmentos do *display* não se iluminam. Coloque agora o S1-2, S1-3, S2-2 e S2-3 em ON. Você notará que se iluminam os segmentos "b", "c", "f" e "g", visualizando-se um número "4".

A razão é simples: Cada interruptor controla um segmento. Por exemplo, S1-1 controla o segmento "a", S1-2 o segmento "b", e assim sucessivamente. Ao fechar ou abrir um interruptor qualquer, circula ou não corrente através do segmento correspondente e o mesmo se ilumina ou não.

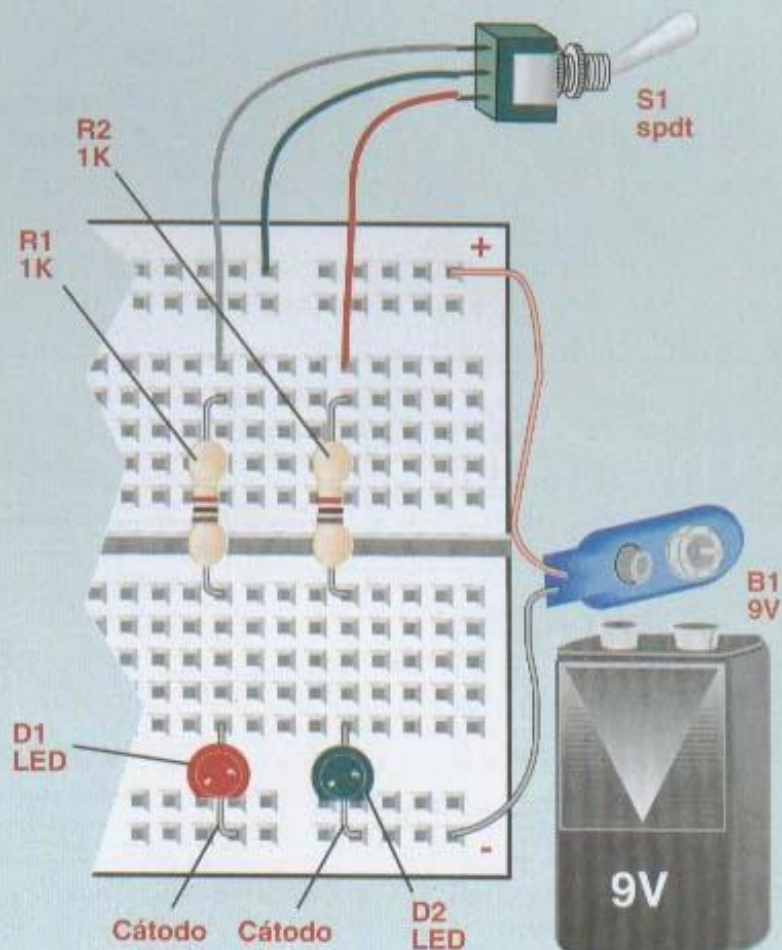


Figura 5 Circuito de testes Nº 2 para a Experiência 3.1.

Em outras palavras, um interruptor aberto (OFF) corresponde a um segmento não iluminado (OFF), e um interruptor fechado (ON) a um segmento iluminado (ON). Cada combinação possível dos estados dos oito interruptores pode interromper-se apropriadamente como um **código** que produz um padrão luminoso característico no *display*.

9. Repita o passo anterior com outras combinações de estados dos interruptores. São possíveis 256 combinações diferentes. Tente pelo menos encontrar as combinações necessárias para produzir os 20 caracteres representados na **figura 3**.

Conclusões

1. Os interruptores são os elementos básicos de controle dos circuitos eletrônicos.

2. Dependendo de sua configuração de contatos e suas características construtivas, os interruptores podem servir para realizar uma grande variedade de funções de comutação, incluindo as seguintes: abrir ou fechar um ou vários circuitos ao mesmo tempo ou de forma independente, abrir ou fechar um ou vários circuitos enquanto fecham ou abrem o mesmo número de circuitos, direcionar um mesmo sinal até um de vários circuitos, direcionar um de vários sinais até um mesmo circuito, etc.

3. Os interruptores podem ser de ação permanente ou de ação momentânea, dependendo do estado final que adotam uma vez liberados. Os primeiros têm “memória”, ou seja, se mantêm por si mesmos na última posição programada pelo

usuário, enquanto que os segundos são “voláteis”, ou seja, retornam automaticamente à sua posição normal ou de repouso.

4. Os interruptores de várias posições podem ser de contato ou de não-contato, dependendo de como realizam a passagem de uma posição a outra. Os de não-contato (BBM) se desconectam primeiro da posição prévia e logo se conectam na posição seguinte, enquanto que os de contato (MBB) se conectam primeiro à próxima posição e em seguida se desconectam da posição prévia.

5. Os *displays* de 7 segmentos são um meio muito convincente de apresentar informação numérica. Também permitem representar algumas letras e caracteres especiais.

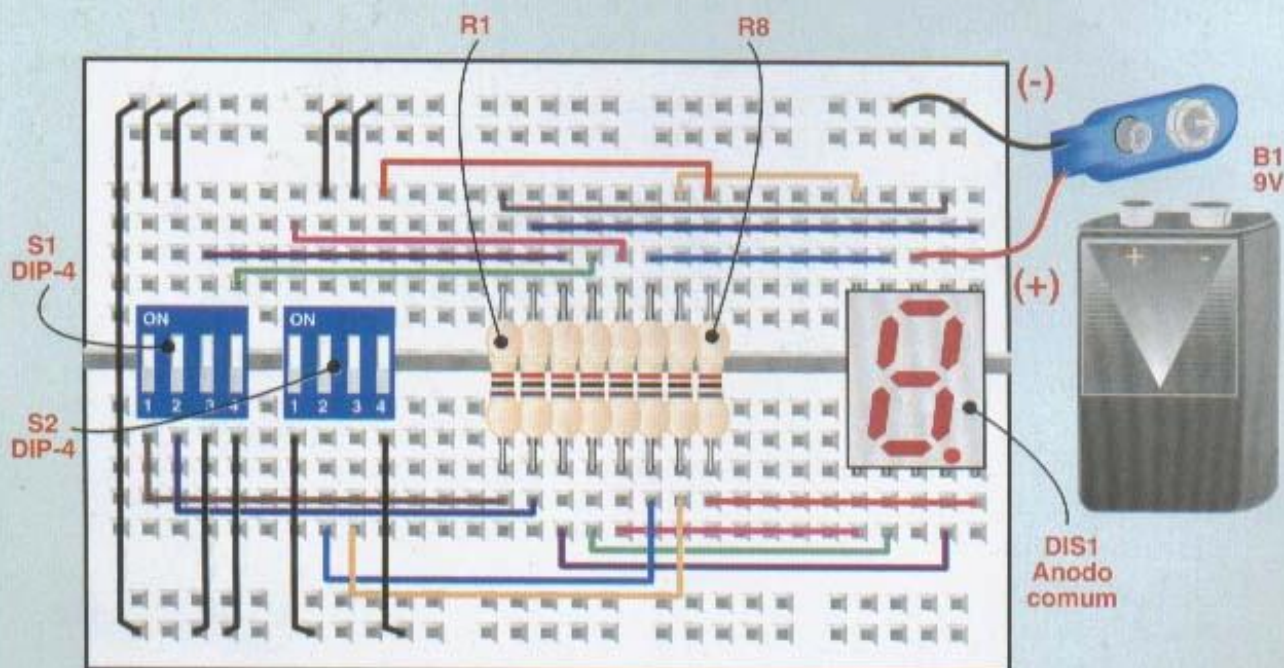


Figura 6 Circuito de testes Nº 3 para a Experiência 3.1.



Figura 3.32 Conectores para aplicações eletrônicas

3.6 Conectores

Os conectores, figura 3.32, são componentes eletromecânicos que são utilizados para amarrar ou unir eletricamente duas ou mais partes de um sistema eletrônico de forma permanente, mas com a particularidade de que tal união pode ser facilmente desfeita por métodos manuais, sem necessidade de recorrer a dessoldadores e outras ferramentas especiais.

Os conectores facilitam a montagem, o teste e a operação de circuitos e sistemas eletrônicos e em muitos casos são absolutamente necessários. Mesmo que algumas vezes as conexões entre as distintas partes de um sistema possam ser realizadas somente com fios e solda, o uso de conectores proporciona um maior grau de conveniência, flexibilidade e segurança.

Os conectores podem ser **aéreos**, isto é, acoplados a cabos, ou **fixos**, isto é, alojados em gabinetes de montagem ou instalados diretamente em placas de circuito impresso, figura 3.33. São geralmente compostos por duas peças complementares, conectáveis entre si, chamadas **macho** e **fêmea**, figura 3.34. Em alguns co-

nectores, o macho é chamado de **plug** e a fêmea de **jack**.

Os conectores são feitos de ligas metálicas de cobre e, tal como os interruptores, devem ter idealmente uma resistência de contato igual a zero. Na prática, sem dúvida, devido às asperezas naturais que apresentam as superfícies em contato, isto não acontece e os conectores oferecem por si mesmos uma resistência muito baixa chamada **resistência de constricção**.

Simbologia. Os conectores são representados nos esquemas eletrônicos de várias formas, dependendo de seu tipo. Na figura 3.35 mostram-se alguns símbolos comuns. Ainda que não exista uma simbologia padronizada, são utilizadas convenções especiais para re-

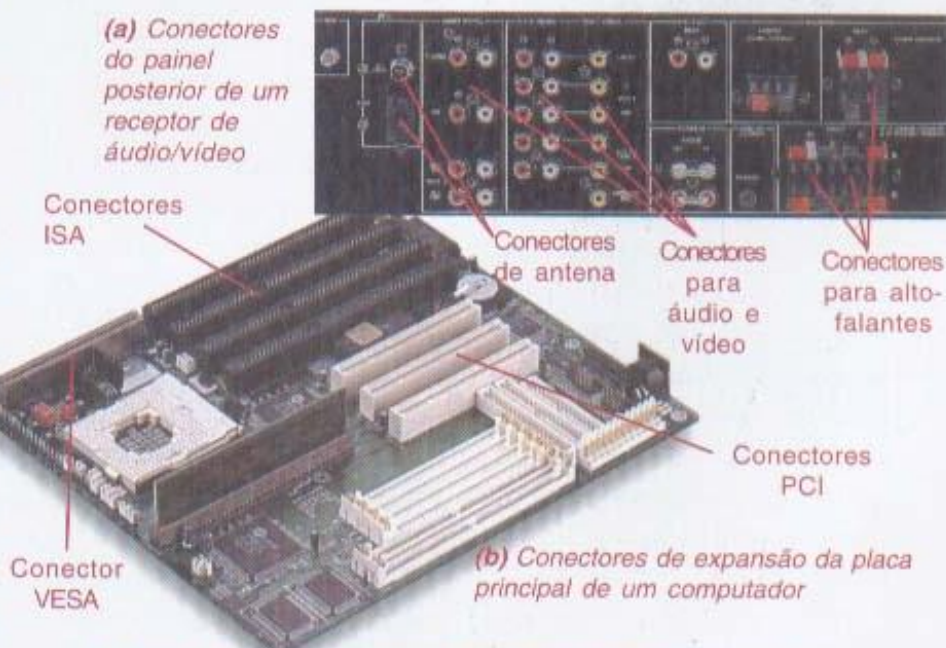


Figura 3.33 Os conectores podem estar instalados em cabos, painéis de operação (a) ou placas de circuito impresso (b).



Figura 3.34 Versões macho e fêmea de conectores comuns

presentar conectores de um só fio, bem como para conectores coaxiais, de áudio, de alimentação e outras aplicações.

Tipos e identificação. Os conectores são classificados de acordo com diversos critérios, dependendo de sua aplicação e características construtivas. Estes fatores devem ser levados em conta ao selecionar um conector para um trabalho específico. A seleção incorreta de um conector pode causar muitos problemas, incluindo conexões frouxas, intermitentes, inseguras ou propensas à ruptura.

Os conectores podem ser classificados, de modo geral, conforme o número de vias ou pontos de contato independentes que proporcionam. Sob esta perspectiva, existem conectores de uma via e conectores de várias vias. Os de quatro ou mais vias são normalmente conhecidos como **conectores multipinos**.

Os conectores de uma via, como seu próprio nome indica, possuem um único ter-

minial de conexão, destinado a receber um único fio. Os principais tipos de conectores utilizados em eletrônica são os terminais, os jacarés, os bananas e os postes, **figura 3.36**. Outros conectores populares de um único condutor são os ganchos ou *clips* e as pontas ou *tips*, utilizados principalmente para a execução de pontas de teste de instrumentos.

Os conectores de várias vias, por sua vez, possuem um número equivalente de terminais de conexão, destinados a receber um cabo multicondutor ou serem soldados diretamente a placas de circuito impresso. Alguns destes conectores são do tipo IDC (*Insulation Displacement Connectors*: conectores deslocadores de isolamento), ou seja, conectam-se aos condutores de pressão, enquanto que em outros os condutores devem ser soldados e presos a algumas garras metálicas removíveis.

Os conectores também podem ser classificados conforme sua aplicação específica (áudio, vídeo, potência, instrumentação, computadores, bases, adaptadores, etc.) ou seu método de montagem (cabo, chassis, circuito impresso, etc.).

Para aplicações de potência, ou seja, que envolvam correntes relativamente grandes, são utilizados conectores es-

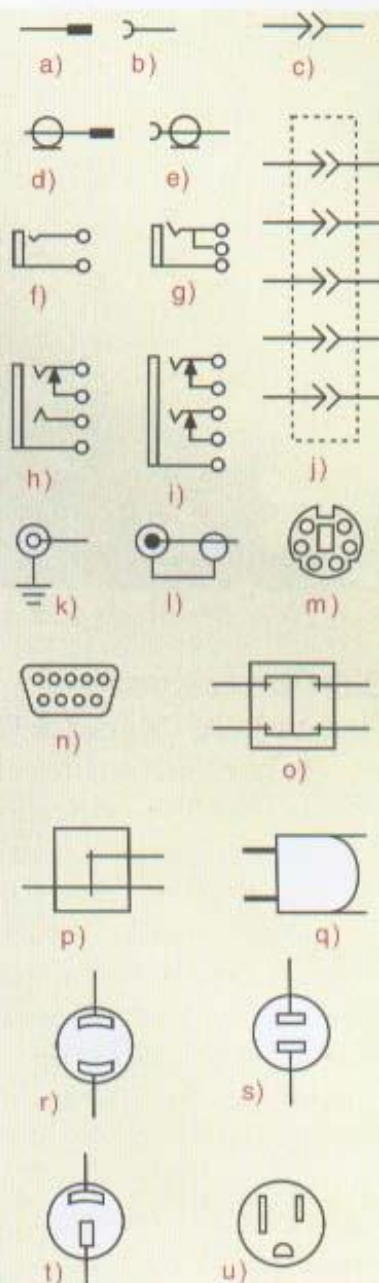
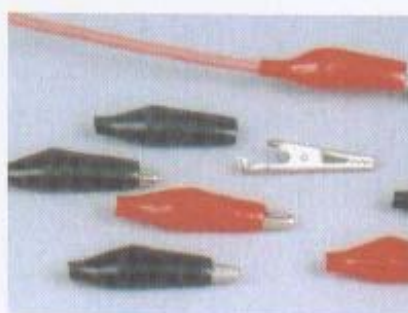


Figura 3.35 Simbologia de alguns conectores comuns

- (a) Terminal macho (plug)
- (b) Terminal fêmea (jack)
- (c) Conectores separáveis
- (d) Conector coaxial macho
- (e) Conector coaxial fêmea
- (f), (g) Jacks phono monofônicos
- (h), (i) Jacks phono estéreo
- (j) Conector multipino separável
- (k) Conector RCA fêmea (plug)
- (l) Conectores RCA macho (jack)
- (m) Conector mini-DIN (6 pinos)
- (n) Conector sub-D (9 pinos)
- (o), (p) Terminais IDC
- (q) Plugue CA de alimentação
- (r), (s) Tomadas CA não-polarizadas
- (t), (u) Tomadas CA polarizadas



(a) Terminais



(b) Jacarés



(c) Pólo

Figura 3.36 Exemplos de conectores para condutores simples

peciais como os receptáculos ou *sockets* CA, os *jacks* e *plugs* CC e os blocos de terminais, **figura 3.37**. Também se podem incluir dentro dessa categoria as tomadas de parede e os benjamins (multitomadas), bem como os *plugs* e *sockets* acoplados às extremidades dos cabos de força.

Em áudio são utilizadas uma grande variedade de conectores para a terminação de cabos balanceados e não-balanceados, bem como para a transferência de sinais até e desde os microfones, fones de

sinal, amplificadores, alto-falantes, fones de ouvido e outros componentes. Os mais utilizados são os conectores RCA, *phono*, DIN e XLR, **figuras 3.38**. Todos estes conectores são circulares e a maioria também é utilizada para vídeos, computadores, instrumentação e outras aplicações.

Os conectores *phono* ou **de fone de ouvido**, em particular, podem ser monofônicos (um canal) ou estereofônicos (dois canais). Na **figura 3.39** mostra-se a estrutura de um *plug phono* estéreo típico. Um *plug* monofônico é similar a esse, exceto que não tem o anel e a manga se estende até onde este último deveria ir.

Em aplicações de RF os cabos coaxiais são amplamente utilizados e, por isso, são necessários conectores compatíveis com os mesmos para ingressar e extrair sinais desde e até transmissores, receptores e outros equipamentos. Os mais utilizados são os BNC, os F e os UHF, **figura 3.40**. Outros conectores de

RF comuns são o TNC, o N, o SMA, o LEMO, o SMC e o MHV, a maioria deles são versões do conector BNC padrão.

Muitos sistemas eletrônicos utilizam diversos tipos de sinais de entrada e de saída e portanto requerem conectores com vários pinos ou pontos de contato para se comunicar in-



(b) Blocos de terminais



Figura 3.37 Exemplos de conectores para potência



(a) Jacks e plugues RCA

(b) Jacks e plugues phono
Figura 3.38 Exemplos de conectores para áudio

Figura 3.39 Estrutura de um plugue phono estéreo



Figura 3.40 Conectores para cabos coaxiais

ternamente ou com equipamentos externos. Os conectores com estas características são denominados **conectores multipinos** e podem ser soldáveis ou do tipo IDC. Os mais populares são os D sub-miniatura ou sub-D, os *headers*, os de terminação na massa, os de borda para placas de circuito impresso e os modulares para equipamentos telefônicos. Outros conectores multipinos comuns são os MTRA, os MS, os Molex, os Centronics, etc.



Figura 3.41 Estrutura de um conector sub-D moldado

figura 3.41 mostra-se como exemplo a estrutura interna de um conector sub-D para cabo multicondutor. Estes tipos de conectores são retangulares e podem ser de 9, 15, 25, 37 ou 50 pinos. Uma das versões mais conhecidas é a de 25 pinos, utilizado como conector da porta paralela ou de impressora dos computadores pessoais.

Para a acoplagem de cabos de fibra ótica a transmissores, receptores e repetidores também são necessários conectores especiais, figura 3.42. Muitos destes conectores incorporam lentes e outros componentes dedicados em sua estrutura para facilitar o acoplamento, reduzir custos e incrementar o rendimento. Outros, inclusive, são híbridos, ou seja, aceitam tanto cabos coaxiais quanto fibras óticas.

Para acoplar entradas ou saídas mecanicamente incompatíveis são utilizados conectores especiais como os **adaptadores** e os **cabos de interconexão**. Estes últimos também são chamados de **arreios**. Ambos os tipos de estruturas possuem em cada uma de suas extremidades um conector de várias vias, vários conectores de uma via ou uma combinação de ambos os sistemas. Os adaptadores são geralmente rígidos, enquanto que os cabos de interconexão são flexíveis.

Aplicações. Os conectores são peças essenciais, frequentemente ignoradas e incompreendidas, dos sistemas eletrônicos, aonde cumprem funções-chave. A seguir estão algumas de suas principais aplicações:

- Levar e trazer sinais desde e até um equipamento. Os conectores que transmitem sinais atuam como conectores de saída e os que recebem os mesmos atuam como conectores de entrada. Em muitos sistemas, um mesmo conector realiza ambas as funções.
- Direcionar sinais e distribuir a potência de alimentação entre as distintas partes de um equipamento ou sistema de forma eficiente.
- Proporcionar flexibilidade aos sistemas, permitindo que as placas de circuito impresso e os módulos maiores de um equipamento, bem como o equipamento em si e seus componentes-chave, possam ser desconectados e substituídos de uma forma rápida, segura e conveniente. ➡



Figura 3.42 Conectores para cabos de fibra ótica

Capítulo 4

4

Pilhas e baterias



- 4.1 O que é uma bateria?
- 4.2 Simbologia
- 4.3 Tipos e formas de identificação
 - 4.3.1 Baterias primárias ou não-recarregáveis
 - 4.3.2 Baterias secundárias ou recarregáveis
- 4.4 Aplicações gerais

As baterias são as fontes de alimentação básicas de muitos circuitos e sistemas eletrônicos e uma parte muito importante da vida moderna. De fato, praticamente todos os novos produtos eletrônicos que saem no mercado utilizam ou contêm algum tipo de bateria. Neste capítulo conheceremos o que são as baterias, como funcionam, que tipos existem, como são identificadas e para que servem.

4.1 O que são as baterias?

As **baterias**, **figura 4.1**, são dispositivos que produzem energia elétrica a partir de reações químicas controladas. Diferentemente dos capacitores, que armazenam quantidades de energia relativamente pequenas e as liberam totalmente em um curto período de tempo, as baterias podem produzir grandes quantidades de energia durante períodos muito prolongados. Além disso, não necessitam ser recarregadas previamente, como acontece com os capacitores.

As baterias produzem entre seus terminais uma voltagem CC constante que, ao ser conectada a um circuito, gera uma corrente. Esta característica permite que elas sejam utilizadas como **fontes de alimentação** de uma grande variedade de circuitos, sistemas e equipamentos eletrônicos, tanto portáteis quanto fixos, **figura 4.2**.

Uma bateria é formada basicamente por dois eletrodos chamados **anodo (-)** e **catodo (+)**, separados por uma solução aquosa, sólida ou líquida, condutora da eletricidade, chamada **eletrólito**, **figura 4.3**. Durante a utilização da bateria, o anodo libera elétrons que viajam pelo circuito externo, são recolhidos pelo catodo e recirculam através do eletrólito. O

fluxo de elétrons continuará até que qualquer dos agentes químicos envolvidos na reação se esgotem e a bateria se descarregue, ou seja, deixe de administrar corrente à carga alimentada.

À estrutura básica mostrada na **figura 4.3** se chama uma **célula** ou **pilha** e produz entre os eletrodos uma voltagem



Figura 4.1. Pilhas e baterias para uso eletrônico

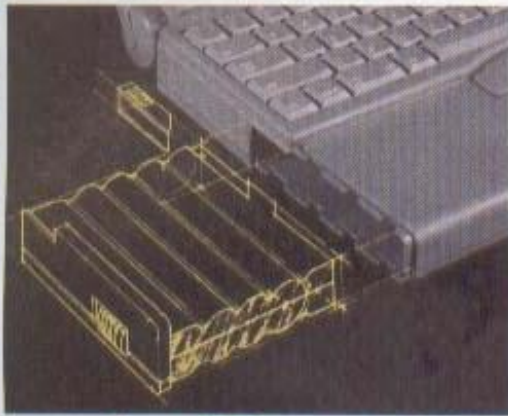


Figura 4.2 Computador portátil mostrando o compartimento das baterias

CC específica determinada por sua composição química. As pilhas secas comuns, por exemplo, produzem uma voltagem nominal de saída de **1,5 V**. Nelas o catodo é de dióxido de manganês (MnO_2), o anodo de zinco (Zn) e o eletrólito uma solução de cloro de amônia (NHCl) e/ou cloro de zinco (ZnCl_2).

Na prática, as baterias são formadas internamente por uma ou várias células conectadas entre si. Neste caso, a voltagem final distribuída pela bateria é a soma das voltagens das células individuais. Por exemplo, 6 células de níquel-cádmio constituem uma bateria de 7,2 V já que cada uma delas produz 1,2 V.

As baterias são fabricadas em uma grande variedade de formas e tamanhos. Existem, por exemplo, células de formas cilíndricas e retilíneas que utilizam eletrodos planos ou tubulares, e células de forma redonda ou retangular do tipo

pastilha que se acoplam ou se empilham muito facilmente com a finalidade de gerar qualquer voltagem requerida. Seu tamanho pode variar desde os diminutos botões utilizados nos aparelhos para surdez até os imensos blocos requeridos para impulsionar naves. Todas, sem dúvida, trabalham sob o mesmo princípio: reações químicas controladas.

4.2 Simbologia

Independentemente de sua estrutura química, as baterias podem ser de uma ou de várias células. Estas últimas são as baterias propriamente ditas. As baterias de uma só célula são conhecidas comumente como **pilhas**. Na **figura 4.4** mostram-se os símbolos utilizados

nos circuitos eletrônicos para representar ambas possibilidades. O sinal (+) corresponde ao eletrodo **positivo** ou **catodo** e o sinal (-) ao eletrodo **negativo** ou **anodo**.

4.3. Tipos e forma de identificação

As baterias podem ser basicamente de dois tipos, **secundárias** ou **primárias**, dependendo de serem recarregáveis ou não, e são fabricadas utilizando-se diversas tecnologias de células, cada uma das quais oferecendo uma combinação diferente de propriedades físicas e elétricas que se adaptam a necessidades específicas. A seguir examinam-se alguns casos particulares.

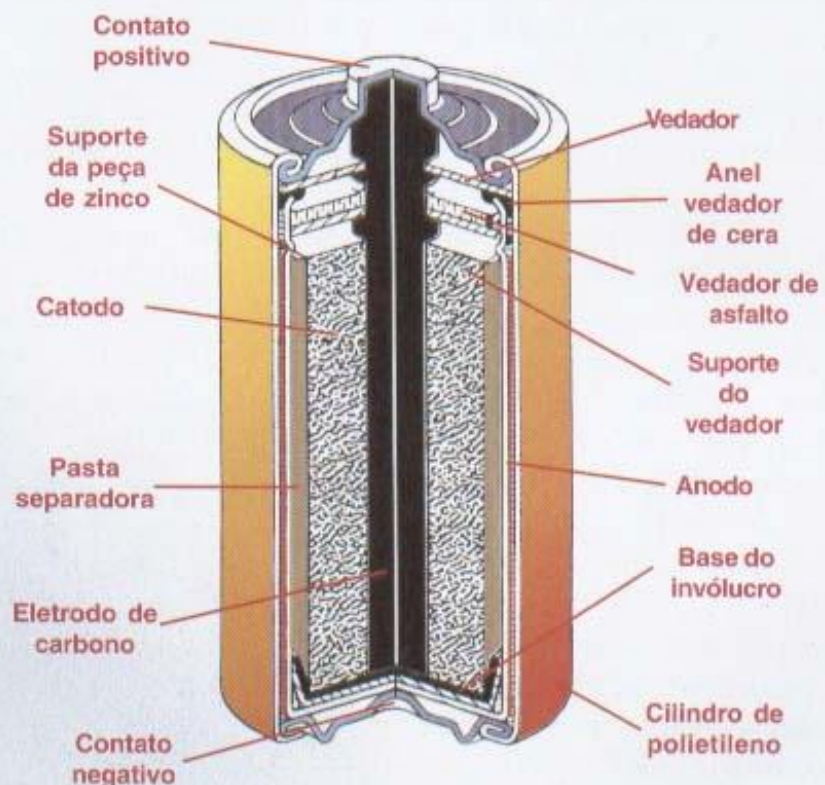


Figura 4.3 Estrutura interna de uma bateria comum. O desenho corresponde a uma pilha seca de carbono-zinco de 1,5 V tamanho D

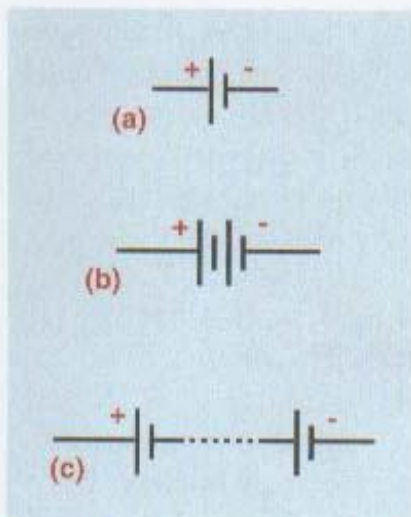


Figura 4.4 Simbologia de pilhas (a) e baterias (b,c)

4.3.1 Baterias primárias ou não-recarregáveis

Nestes tipos de baterias, as reações químicas produtoras de corrente elétrica são irreversíveis e, portanto, uma vez que se tenha descarregado, ou seja, perdido sua capacidade de administrar corrente, as mesmas deixam de cumprir uma função útil, convertendo-se em produtos descartáveis.

As tecnologias de baterias primárias mais utilizadas na atualidade são as de carvão-zinco, as alcalinas, as de lítio e as de óxido de prata. Também se dispõe de baterias primárias de mercúrio, cloro de zinco, magnésio e outras tecnologias.

As **baterias de carvão-zinco**, figura 4.5, também conhecidas como **baterias secas** ou de **LeClanché**, proporcionam tipicamente uma voltagem nominal de 1.5 V/célula.

O anodo é de dióxido de manganês, o catodo é de zinco e o eletrólito uma solução de cloro de amônia ou de cloro de zinco embebida no material ativo do catodo.

Uma variante das baterias secas são as de **trabalho pesado** (*heavy-duty*), caracterizadas por ter uma alta concentração de cloro de zinco no eletrólito e proporcionar correntes mais altas que as baterias secas normais.

As baterias secas são identificadas pela voltagem nominal e pelo tamanho. Exemplo: Pilha seca cilíndrica de 1.5 V AAA (leia-se A triplo). Esta bateria mede aproximadamente 9,9 mm (25/64") de diâmetro e 42,9 mm (27/16") de altura. Outros tamanhos comuns de baterias secas cilíndricas são os designados como N, AA, A, B, C, D, E, F e G, figura 4.6.

O tamanho de uma bateria guarda uma relação direta com sua **capacidade**. A **capacidade** de uma bateria, ex-

pressa em ampères-hora (Ah), determina a máxima quantidade de corrente que a mesma pode administrar em forma contínua durante um determinado período de tempo. Uma bateria com uma capacidade de 600mAh para 5 horas, por exemplo, administraria continuamente 80 mA durante este tempo. A capacidade e, portanto, o tempo de descarga, diminui à medida em que aumenta a corrente, e vice-versa.

As baterias secas são econômicas, vêm em uma grande variedade de formas e tamanhos, podem produzir altas voltagens em espaços reduzidos e são fáceis de serem obtidas. Sem dúvida, elas têm muito baixa capacidade de corrente, se autodescarregam quando permanecem guardadas durante longos períodos, sua voltagem diminui gradualmente à medida em que se descarregam e trabalham mais eficientemente quando não são utilizadas de forma contínua.



(a) Uso geral

(b) Trabalho pesado

Figura 4.5 Baterias secas ou de carvão-zinco

As baterias alcalinas, figura 4.7, têm uma voltagem nominal de 1.5V/célula. Tal como nas pilhas secas, os materiais básicos do anodo e do catodo são, respectivamente, zinco pulverizado e dióxido de manganês, mas o eletrólito é uma solução fortemente alcalina de hidróxido de potássio, a qual lhe confere propriedades especiais.

As baterias alcalinas são identificadas tal como as baterias secas e vêm nas mesmas apresentações. Exemplo: Bateria alcalina de 9 V. Esta bateria tem forma retangular e mede aproximadamente 16 mm de largura x 44 mm de altura x 25 mm de comprimento.

As baterias alcalinas têm uma maior capacidade de corrente que as baterias secas, trabalham eficientemente a baixas temperaturas e de forma contínua, não se descarregam facilmente quando ficam guardadas e possuem uma longa vida útil. Sem dúvida, são mais caras, sua voltagem diminui à medida em que se descarregam e, sob condições muito adversas, podem chegar a liberar gases tóxicos. São muito utilizadas em rádios portáteis, equipamentos fotográficos, brinquedos e outras aplicações similares.

As baterias de lítio, figura 4.8, têm uma voltagem nominal de 3V/célula e proporcionam correntes mais altas que as baterias secas e alcalinas.



Figura 4.6 Tamanhos relativos de baterias secas comuns.

Utilizam dióxido de manganês (MnO_2) no catodo e lítio metálico no anodo. O eletrólito é uma solução de dióxido de enxofre (SO_2). Estão disponíveis principalmente com voltagens de 3 V e 6 V. Também dispõe-se de baterias de lítio de 3.6 V/célula, as quais empregam cloro de (tionilo) ($SOCl_2$) como eletrólito. São muito empregadas como baterias de reserva (*backup*) em computadores e outros sistemas digitais.

As baterias de lítio são identificadas pela voltagem nominal e a capacidade. Exemplo: Bateria de lítio de 3V/200mAh. Têm geralmente forma de botão, ainda que também se possa consegui-las em outras apresentações (cilíndricas, retangulares, planas, etc.).

As baterias de lítio proporcionam uma alta capacidade (várias vezes superior à de

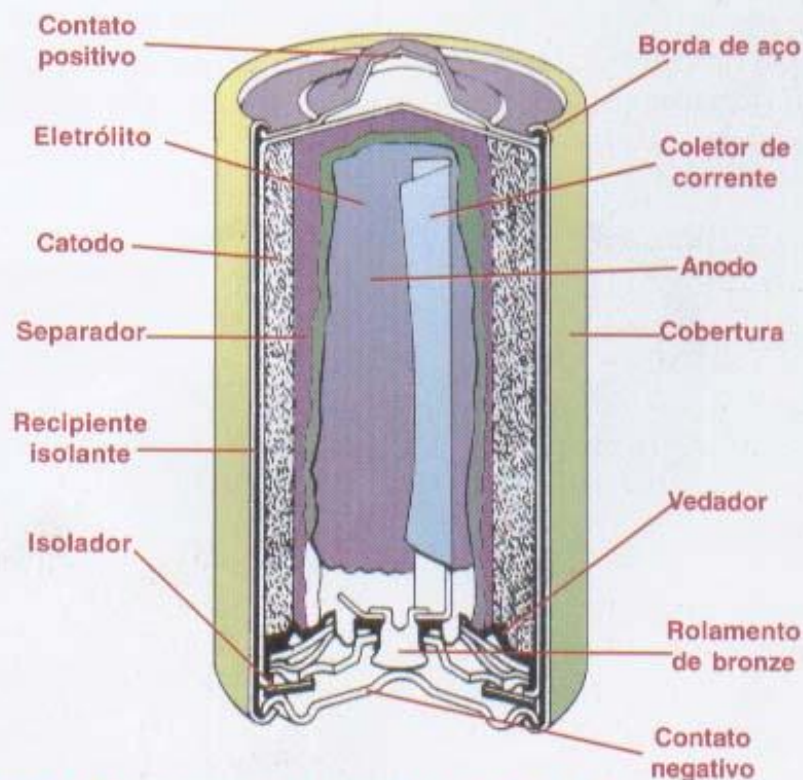


Figura 4.7 Estrutura interna de uma bateria alcalina



Figura 4.8 Baterias de lítio

uma bateria alcalina de tamanho comparável), são compactas e leves, têm uma longa vida útil (de 5 a 20 anos), trabalham eficientemente a qualquer temperatura, etc.

Além disso, ao contrário do que acontece nas baterias secas e alcalinas, as baterias de lítio têm uma curva de descarga **plana**, ou seja, sua voltagem

gem permanece praticamente constante durante todo o ciclo de descarga. Sem dúvida, devem ser usadas com cuidado porque podem explodir sob condições adversas.

As **baterias de óxido de prata, figura 4.9**, têm uma voltagem nominal de 1.55 V/célula. Nas mesmas, o anodo é um gel de zinco pulverizado, o catodo um amálgama de óxido de prata com pequenas quantidades de dióxido de manganês e o eletrólito uma solução de hidróxido de sódio ou de potássio. São muito utilizadas em aparelhos para surdez e relógios.

As pilhas de óxido de prata são vendidas em forma de botão, têm boa capacidade, apresentam uma curva de descarga plana e operam bem a baixas temperaturas. São identificadas por sua voltagem nominal, seu tamanho e sua capacidade.

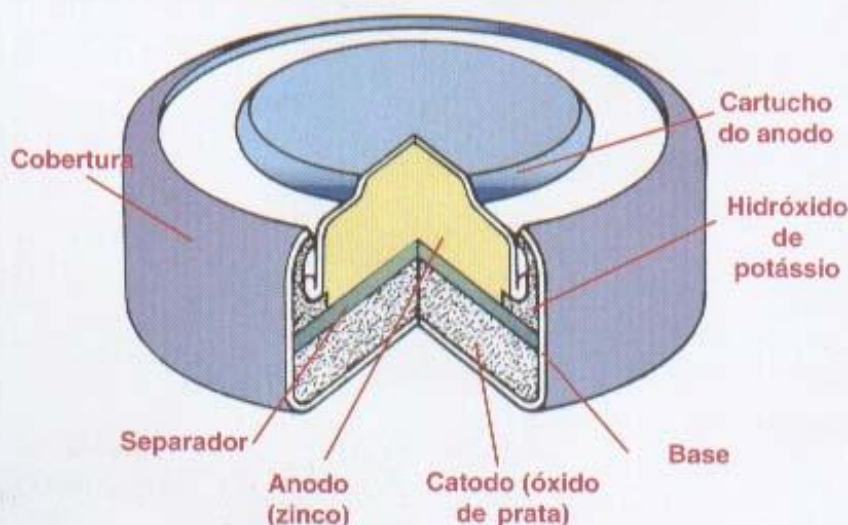


Figura 4.9 Estrutura de uma **bateria de óxido de prata**. Esta mesma estrutura é válida para pilhas de mercúrio, de dióxido de manganês e outras tipo botão. Somente muda-se a composição do catodo.

4.3.2 Baterias secundárias ou recarregáveis

Nestes tipos de baterias, os materiais ativos, uma vez descarregados total ou parcialmente, podem ser restabelecidos a seu estado químico original invertendo o fluxo da corrente, ou seja, proporcionando-lhes energia elétrica controlada a partir de uma fonte externa. A maioria admite entre 200 e 1000 ciclos de descarga antes de tornar-se imprestável.

As tecnologias de baterias recarregáveis mais utilizadas na atualidade são as de chumbo-ácido, as de níquel-cádmio (NiCd), as de níquel-metal híbridas (NiMH) e as de lítio iônico (li-Ion). Também existem baterias recarregáveis de chumbo-cálcio (Pb-Ca), prata-zinco (Ag-Zn), prata-cádmio (Ag-Cd), lítio-metal-sulfeto (LiMS), ar-zinco, etc.

As **baterias de chumbo-ácido, figura 4.10**, proporcionam uma voltagem nominal de 2V/célula. Utilizam chumbo no anodo (+) e óxido de chumbo no catodo (-). O eletrólito é uma solução aquosa de ácido sulfúrico. São fabricadas tipicamente com voltagens de 2 V, 4 V, 6 V e 12 V. Sua capacidade pode chegar a ser muito alta, em alguns casos superior aos 500Ah. As baterias utilizadas em automóveis e motocicletas, por exemplo, são deste tipo.



Figura 4.10 Baterias de chumbo-ácido

As baterias de chumbo-ácido modernas são geralmente seladas e são identificadas por sua voltagem e sua capacidade nominal. Estes parâmetros determinam suas dimensões físicas. Exemplo: Bateria selada de chumbo-ácido de 12V/12Ah. Em um caso particular, esta bateria poderia medir, digamos, 5.94" de comprimento x 3.86" de largura x 3.70" de altura.

As baterias de chumbo-ácido vêm em uma grande variedade de formas e tamanhos com o fim de satisfazer uma gama muito ampla de necessidades de potência. São de baixo custo, são facilmen-



Figura 4.11 Baterias de níquel-cádmio

te obtidas, têm uma curva de descarga plana, trabalham bem a altas temperaturas, têm uma longa vida útil (de 5 a 10 anos) e podem ser carregadas e descarregadas repetidamente. Sem dúvida, requerem manutenção freqüente, sua capacidade de voltagem e corrente tende a se reduzir a baixas temperaturas e, sob determinadas circunstâncias, podem liberar hidrogênio.

As **baterias de níquel cádmio**, **figura 4.11**, proporcionam uma voltagem nominal de 1.2V/célula. Utilizam geralmente o cádmio (Cd) metálico como anodo e oxi-hidróxido de níquel (NiOOH) como catodo. O eletrólito é uma solução aquosa de hidróxido de potássio (KOH). São utilizados extensivamente em telefonia celular, computadores pessoais, câmeras de vídeo, etc. Algumas unidades para uso industrial podem ter capacidades superiores aos 250Ah.

As baterias de níquel-cádmio são identificadas pelo tamanho, pela voltagem nominal e pela capacidade. Exemplos: Bateria NiCd AA de 1.2V/600mAh. Vêm em uma grande variedade de apresentações ou tamanhos, sendo as mais comuns as células do tipo botão, AAA, AA, C e D de 1.2V, as baterias quadradas de 7.2V e os pacotes ou *packs*, constituídos por várias pilhas interconectadas.



Figura 4.12 Baterias NIMH de botão

As baterias de níquel-cádmio podem proporcionar correntes muito altas em forma contínua, não requerem manutenção, trabalham bem a baixas e altas temperaturas e têm uma longa vida útil (de 2 a 4 anos). Sem dúvida, são relativamente mais caras que as de chumbo-ácido e apresentam com freqüência um fenômeno chamado "**efeito memória**", que lhes impede de desenvolver sua plena capacidade quando se descarregam ciclicamente até um mesmo valor e em seguida se recarregam.

As **baterias híbridas de níquel-metal** ou NiMH, **figura 4.12**, proporcionam uma voltagem nominal de



Figura 4.13 Baterias recarregáveis de lítio de estado sólido



Figura 4.14 As baterias são fundamentais na vida moderna. A fotografia mostra alguns produtos que operam com **baterias alcalinas**.

1.2V/célula. Elas vêm nas mesmas apresentações que as baterias de NiCd e são identificadas da mesma forma. Sem dúvida, elas têm uma capacidade energética muito superior. Além disso, podem suportar um grande número de ciclos de carga e descarga (superior a 1000 em muitos casos), possuem uma faixa muito ampla de temperaturas de funcionamento (entre -20°C e $+65^{\circ}\text{C}$) e sua auto-descarga é muito lenta. Não obstante, são relativamente caras e sua disponibilidade é limitada.

As **baterias recarregáveis de lítio**, **figura 4.13**, proporcionam uma voltagem nominal de 3.6V/célula. Utilizam uma fibra sintética de carbono e dióxido de manganês como anodo, um polímero sólido de óxido metálico como

eletrólito e carvão impregnado com íons de lítio como catodo. São relativamente novas no mercado e, por isso mesmo, sua disponibilidade é também muito limitada. Têm geralmente forma plana.

Estas baterias foram desenvolvidas originalmente para impulsionar veículos elétricos. Sem dúvida, seu uso está se estendendo rapidamente a todo o tipo de aplicações pois proporcionam mais potência por unidade de volume que qualquer uma das outras tecnologias correntes.

4.4 Aplicações gerais

As baterias são uma parte muito importante da vida moderna. Atualmente, muitos produtos de uso corrente e especializado como computadores, equipamentos de comunica-

ções, telefones celulares, instrumentos musicais, brinquedos, televisores, câmeras de vídeo, lanternas de emergência, ferramentas elétricas, equipamentos médicos, instrumentos de medição, sistemas de segurança, máquinas de barbear, etc. utilizam ou contém algum tipo de bateria, **figura 4.14**.

As baterias são populares principalmente por sua conveniência, portabilidade, e, no caso das baterias recarregáveis, pela possibilidade de reutilização. Estas últimas, além disso, têm uma longa vida útil, podem suportar descargas muito intensas, não requerem manutenção na maioria dos casos e oferecem capacidades de corrente muito altas.

Em geral, as baterias primárias (descartáveis) são utilizadas em aplicações de baixa corrente, ciclos de trabalho curtos e operação remota. Exemplos: Relógios, aparelhos para audição, abridores automáticos de portas, detectores de fumaça, rádios, etc.

As baterias secundárias (recarregáveis), por sua vez, são utilizadas em aplicações que envolvem altas correntes e uso extensivo, daí que o custo de substituição de baterias descartáveis pode ser proibitivo. Exemplos: Computadores portáteis, telefones celulares, veículos elétricos, câmeras de vídeo, brocas, ferros de soldar sem fio, etc. ➔



Figura 4.10 Baterias de chumbo-ácido

As baterias de chumbo-ácido modernas são geralmente seladas e são identificadas por sua voltagem e sua capacidade nominal. Estes parâmetros determinam suas dimensões físicas. Exemplo: Bateria selada de chumbo-ácido de 12V/12Ah. Em um caso particular, esta bateria poderia medir, digamos, 5.94" de comprimento x 3.86" de largura x 3.70" de altura.

As baterias de chumbo-ácido vêm em uma grande variedade de formas e tamanhos com o fim de satisfazer uma gama muito ampla de necessidades de potência. São de baixo custo, são facilmen-



Figura 4.11 Baterias de níquel-cádmio

te obtidas, têm uma curva de descarga plana, trabalham bem a altas temperaturas, têm uma longa vida útil (de 5 a 10 anos) e podem ser carregadas e descarregadas repetidamente. Sem dúvida, requerem manutenção freqüente, sua capacidade de voltagem e corrente tende a se reduzir a baixas temperaturas e, sob determinadas circunstâncias, podem liberar hidrogênio.

As **baterias de níquel cádmio**, **figura 4.11**, proporcionam uma voltagem nominal de 1.2V/célula. Utilizam geralmente o cádmio (Cd) metálico como anodo e oxi-hidróxido de níquel (NiOOH) como catodo. O eletrólito é uma solução aquosa de hidróxido de potássio (KOH). São utilizados extensivamente em telefonia celular, computadores pessoais, câmeras de vídeo, etc. Algumas unidades para uso industrial podem ter capacidades superiores aos 250Ah.

As baterias de níquel-cádmio são identificadas pelo tamanho, pela voltagem nominal e pela capacidade. Exemplos: Bateria NiCd AA de 1.2V/600mAh. Vêm em uma grande variedade de apresentações ou tamanhos, sendo as mais comuns as células do tipo botão, AAA, AA, C e D de 1.2V, as baterias quadradas de 7.2V e os pacotes ou *packs*, constituídos por várias pilhas interconectadas.



Figura 4.12 Baterias NIMH de botão

As baterias de níquel-cádmio podem proporcionar correntes muito altas em forma contínua, não requerem manutenção, trabalham bem a baixas e altas temperaturas e têm uma longa vida útil (de 2 a 4 anos). Sem dúvida, são relativamente mais caras que as de chumbo-ácido e apresentam com freqüência um fenômeno chamado "**efeito memória**", que lhes impede de desenvolver sua plena capacidade quando se descarregam ciclicamente até um mesmo valor e em seguida se recarregam.

As **baterias híbridas de níquel-metal** ou NiMH, **figura 4.12**, proporcionam uma voltagem nominal de



Figura 4.13 Baterias recarregáveis de lítio de estado sólido



Figura 4.14 As baterias são fundamentais na vida moderna. A fotografia mostra alguns produtos que operam com **baterias alcalinas**.

1.2V/célula. Elas vêm nas mesmas apresentações que as baterias de NiCd e são identificadas da mesma forma. Sem dúvida, elas têm uma capacidade energética muito superior. Além disso, podem suportar um grande número de ciclos de carga e descarga (superior a 1000 em muitos casos), possuem uma faixa muito ampla de temperaturas de funcionamento (entre -20°C e $+65^{\circ}\text{C}$) e sua auto-descarga é muito lenta. Não obstante, são relativamente caras e sua disponibilidade é limitada.

As **baterias recarregáveis de lítio**, **figura 4.13**, proporcionam uma voltagem nominal de 3.6V/célula. Utilizam uma fibra sintética de carbono e dióxido de manganês como anodo, um polímero sólido de óxido metálico como

eletrólito e carvão impregnado com íons de lítio como catodo. São relativamente novas no mercado e, por isso mesmo, sua disponibilidade é também muito limitada. Têm geralmente forma plana.

Estas baterias foram desenvolvidas originalmente para impulsionar veículos elétricos. Sem dúvida, seu uso está se estendendo rapidamente a todo o tipo de aplicações pois proporcionam mais potência por unidade de volume que qualquer uma das outras tecnologias correntes.

4.4 Aplicações gerais

As baterias são uma parte muito importante da vida moderna. Atualmente, muitos produtos de uso corrente e especializado como computadores, equipamentos de comunica-

ções, telefones celulares, instrumentos musicais, brinquedos, televisores, câmeras de vídeo, lanternas de emergência, ferramentas elétricas, equipamentos médicos, instrumentos de medição, sistemas de segurança, máquinas de barbear, etc. utilizam ou contêm algum tipo de bateria, **figura 4.14**.

As baterias são populares principalmente por sua conveniência, portabilidade, e, no caso das baterias recarregáveis, pela possibilidade de reutilização. Estas últimas, além disso, têm uma longa vida útil, podem suportar descargas muito intensas, não requerem manutenção na maioria dos casos e oferecem capacidades de corrente muito altas.

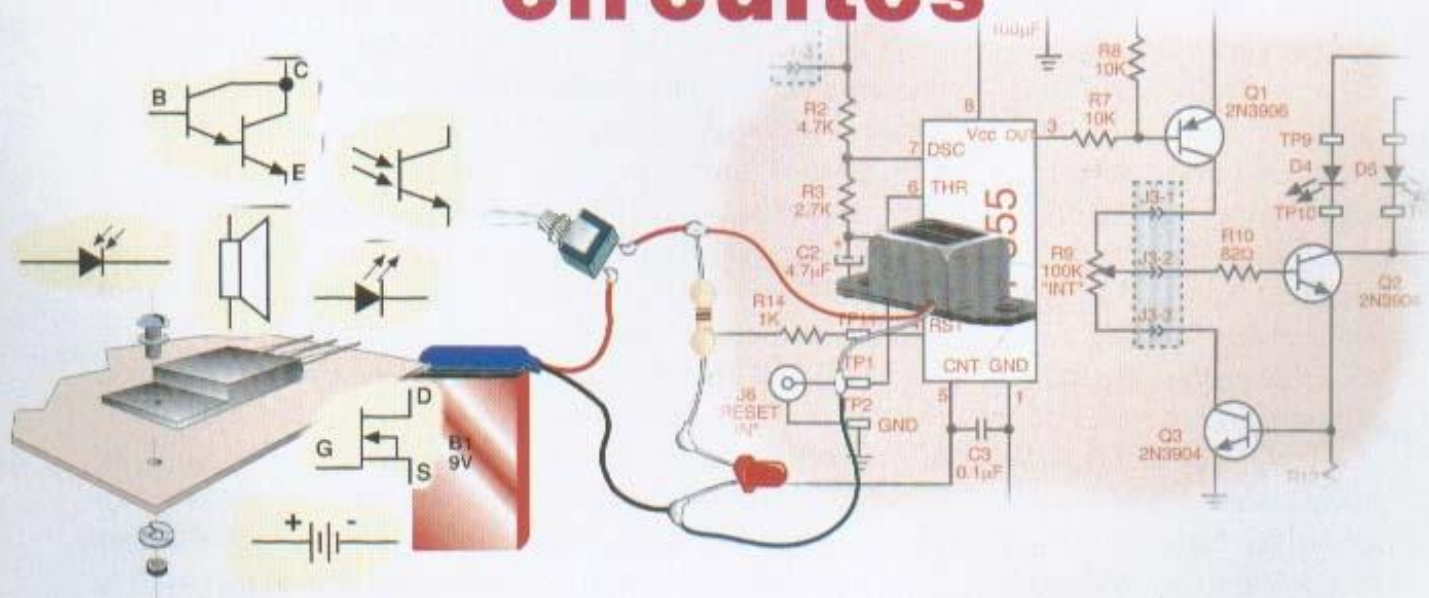
Em geral, as baterias primárias (descartáveis) são utilizadas em aplicações de baixa corrente, ciclos de trabalho curtos e operação remota. Exemplos: Relógios, aparelhos para audição, abridores automáticos de portas, detectores de fumaça, rádios, etc.

As baterias secundárias (recarregáveis), por sua vez, são utilizadas em aplicações que envolvem altas correntes e uso extensivo, daí que o custo de substituição de baterias descartáveis pode ser proibitivo. Exemplos: Computadores portáteis, telefones celulares, veículos elétricos, câmeras de vídeo, brocas, ferros de soldar sem fio, etc. ➤

Capítulo 5

Conceitos básicos de circuitos

5



5.1 O que é um circuito?

5.2 Formas de representação

5.3 Parâmetros e leis fundamentais

5.4 Circuitos DC

5.5 Circuitos AC

5.6 Aplicações

A eletrônica trata fundamentalmente do estudo de **circuitos**. Neste capítulo, um dos mais importantes deste curso, introduz-se formalmente o conceito de circuito, descrevem-se as características básicas dos elementos do mesmo e examinam-se os principais métodos para sua representação em eletrônica, dando-se especial ênfase aos diagramas esquemáticos. Também se explicam os principais parâmetros e leis associadas aos circuitos e o comportamento característico dos componentes lineares passivos (resistências, capacitores e bobinas) quando expostos a corrente contínua (CC) e a corrente alternada (CA).

5.1 O que é um circuito?

De um modo geral, um circuito é uma combinação de componentes conectados de forma a proporcionar uma ou mais trajetórias fechadas para a circulação da corrente e permitir o aproveitamento da energia dos elétrons em movimento para produzir um trabalho útil, **figura 5.1**. Este trabalho pode implicar não somente a conversão de energia elétrica em outras formas de energia, e vice-versa, mas também o seu processamento, ou seja, a conversão de sinais elétricos de um tipo em sinais elétricos de outro tipo.

5.1.1 Elementos básicos de um circuito

Os circuitos eletrônicos podem vir a ser muito complexos. No entanto, independentemente de sua complexidade, todos precisam de pelo menos uma fonte de energia, um par de condutores e uma carga, **figura 5.2**. Além disso, a maioria dos circuitos também requer dispositivos de controle para regular o fluxo de elétrons até a carga e dispositivos para bloqueá-lo automaticamente quando se produz uma condição anormal de funcionamento.

As fontes de energia administram a força necessária para impulsionar correntes de elétrons através de circuitos. Na **figura 5.3** mostram-se os símbolos utilizados para representar alguns tipos de fontes de energia comuns, incluindo fontes de alimentação e fontes de sinal. Estas últimas compreendem não somente os instrumentos de laboratório conhecidos por este nome, como também qualquer outro dispositivo, circuito ou parte de um circuito que produza um sinal de corrente ou voltagem em forma natural sob a influência de um estímulo externo.

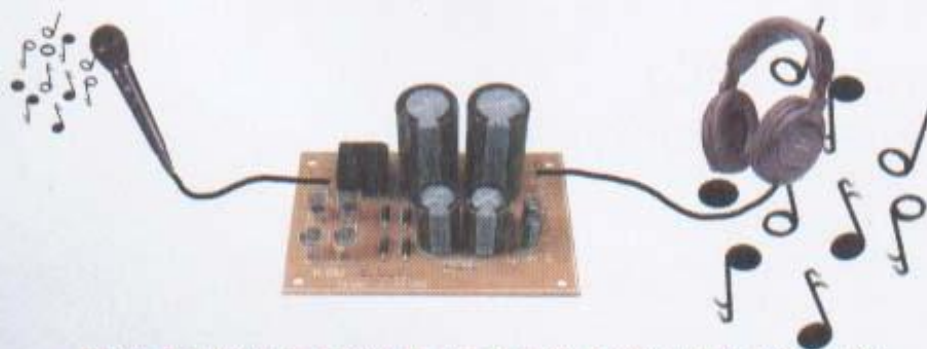
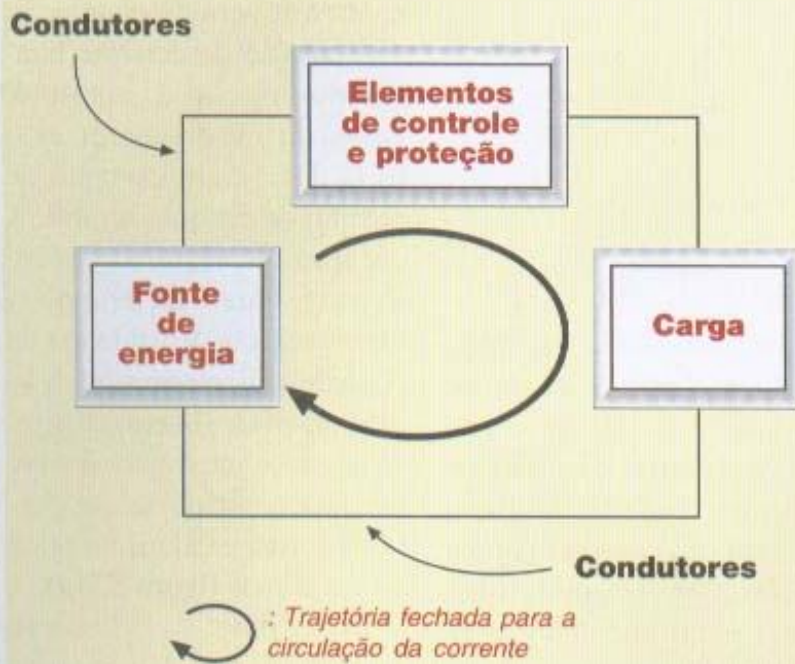
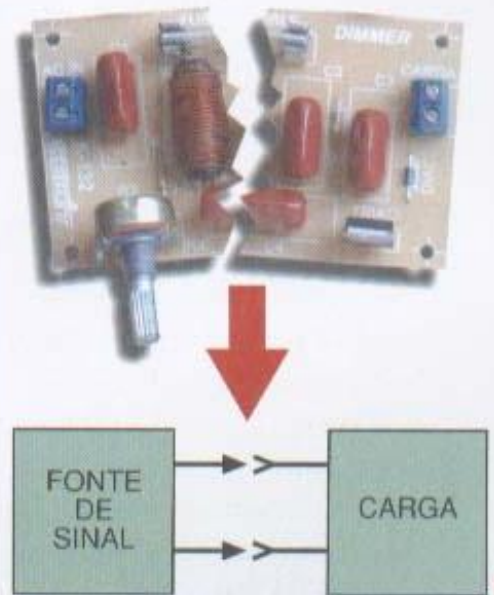


Figura 5.1 A função básica de um **circuito** é converter a energia dos elétrons em movimento em outras formas de energia e executar uma função útil, por exemplo reproduzir um som.

Os **condutores** proporcionam um caminho de baixa resistência para a circulação da corrente de e até a carga. Dentro desta categoria se incluem tanto os condutores propriamente ditos quanto os conectores. Caso nada seja dito em contrário, neste curso estaremos presumindo que se traba-



(a) Elementos gerais de um circuito



(b) Qualquer circuito pode ser dividido do ponto de vista analítico em duas partes relacionadas entre si, uma das quais atua como fonte de sinal e a outra como carga.

Figura 5.2 Estrutura genérica de um circuito

lha com condutores ideais, isto é, sem resistência elétrica. Dessa forma, a energia administrada pela fonte transfere-se completamente para a carga. Na prática, a resistência dos condutores não é exatamente 0Ω , mas é suficientemente baixa para poder ser desprezada.

As **cargas** convertem a energia dos elétrons em movimento, em sinais elétricos ou outras formas de energia. Na **figura 5.4** mostram-se os símbolos utilizados nos circuitos eletrônicos para representar alguns tipos de cargas comuns. Para efeito de análise, qualquer circuito pode ser sempre dividido em duas partes, uma das quais atua como fonte de sinal e a outra como carga.

Os **dispositivos de controle** regulam ou controlam a passagem de corrente até a carga. Na **figura 5.5** mostram-se os símbolos utilizados nos circuitos eletrônicos para representar alguns dispositivos comuns de controle. Os mais utilizados são os interruptores, tanto eletromecânicos quanto eletrônicos. De fato, a maioria dos dispositivos de estado sólido (transistores, tiristores, etc.) operam na prática como interruptores, porém não contém partes móveis.

Os **dispositivos de proteção** protegem a carga contra níveis de corrente ou de tensão anormais. Na **figura**

5.6 mostram-se os símbolos utilizados nos circuitos eletrônicos para representar alguns dispositivos de proteção comuns. Os fusíveis e os *breakers* protegem a carga contra corrente excessiva, desconectando fisicamente o circuito, enquanto que os varistores a protegem contra sobretensões, absorvendo a tensão excedente. Um dispositivo de proteção pode ser formado por um só componente, um grupo de componentes ou um circuito completo dedicado.

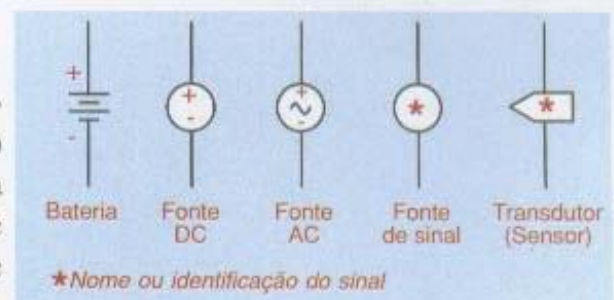


Figura 5.3 Simbologia de fontes de energia comuns

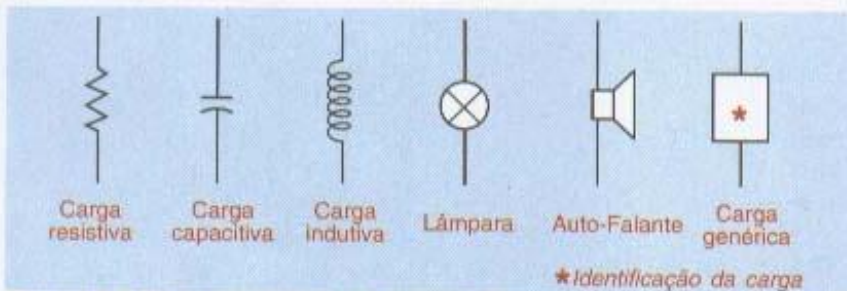


Figura 5.4 Simbologia de cargas comuns

Como exemplo de aplicação da teoria anterior, na **figura 5.7** mostram-se três versões de um circuito com um LED. Em todas as situações, a bateria B1 atua como fonte de energia, a resistência R1 como dispositivo de proteção, o LED D1 como carga, e o conector da bateria, os terminais dos componentes e os pontos de soldagem como condutores.

Em (a), a resistência R1, o LED D1 e seus condutores associados formam com a bateria B1 um caminho fechado para a circulação de uma corrente de elétrons. Esta última sai pelo terminal «-» da bateria, atravessa o LED a partir do catodo (C) até o anodo (A), passa pela resistência, entra pelo pólo «+» da bateria e sai novamente pelo pólo «-» da mesma. O processo se repete indefinidamente.

Em sua passagem através do circuito, a corrente provoca a emissão de luz através do LED e o aquecimento da resistência. Também cria um campo magnético ao redor dos condutores e reações químicas no interior da bateria.

Em (b) acrescentou-se o interruptor S1, que atua como elemento de controle. Com o S1 em «OFF», o circuito fica interrompido, a corrente não circula e o LED não se ilumina. Esta condição é chamada **circuito aberto**. Ao se colocar o interruptor na posição ON, o circuito se completa, circula uma corrente e o LED se ilumina. Esta condição é chamada **circuito fechado**.

Portanto, a função de controle realizada pelo interruptor no circuito anterior é simples-

mente a de permitir ou impedir a circulação de corrente através do circuito e, portanto, energizar ou desenergizar o LED. Este é um exemplo de circuito de controle **digital**. A qualquer momento, a corrente só pode ser zero ou ter um valor específico, dependendo da posição do interruptor. Não existem estados intermediários. Enquanto o interruptor estiver fechado, o circuito se comporta de forma exatamente igual ao circuito da **figura 5.7(a)**.

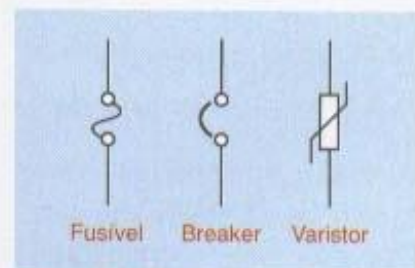


Figura 5.6 Simbologia de dispositivos de proteção comuns.

Em (c) acrescentou-se o potenciômetro R2, que também atua como elemento de controle. Entretanto, o circuito está sempre fechado e, portanto, o LED sempre está iluminado. Quando o R2 está em sua posição de mínima resistência (0Ω), a corrente do circuito é máxima e o LED brilha intensamente. Quando o R2 está em sua posição de máxima resistência ($5k\Omega$), a corrente é mínima e o LED brilha fracamente.

Portanto, a função de controle realizada pelo potenciômetro no circuito anterior é simplesmente a de regular a

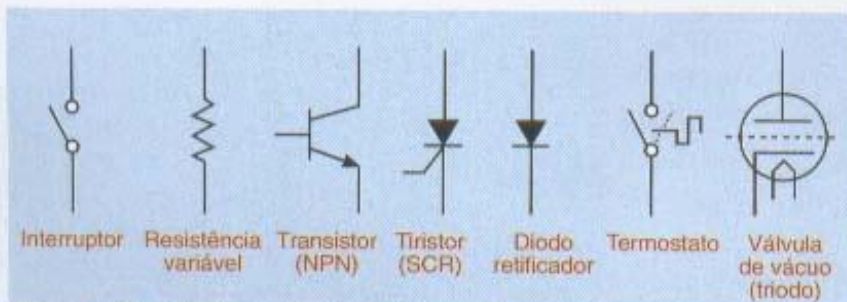


Figura 5.5 Simbologia de dispositivos de controle comuns

quantidade de corrente que circula através do circuito e, como resultado, a quantidade de luz emitida pelo LED. Este é um exemplo de circuito de controle **análogo**. A corrente que passa através do circuito e portanto o brilho do LED podem variar continuamente dentro de uma gama infinita de valores compreendidos entre um mínimo e um máximo. Com o potenciômetro em sua posição de mínima resistência, o circuito se comporta exatamente igual ao circuito da **figura 5.7(a)**.

5.1.2 Tipos de circuitos

Em todos os circuitos mostrados anteriormente, os elementos estão conectados em seguida um do outro, formando uma única trajetória fechada para a circulação da corrente. A um arranjo de componentes deste tipo chama-se **circuito em série**. Em um circuito em série, a mesma corrente passa por todos os seus elementos. Portanto, se o circuito é interrompido em qualquer ponto, não circula corrente através de nenhum de seus elementos.

Os elementos de um circuito também podem estar conectados em paralelo ou em uma configuração mista entre circuito em série e paralelo. Em um **circuito em paralelo**, todos os seus elementos estão conectados a dois pontos de conexão comuns chamados

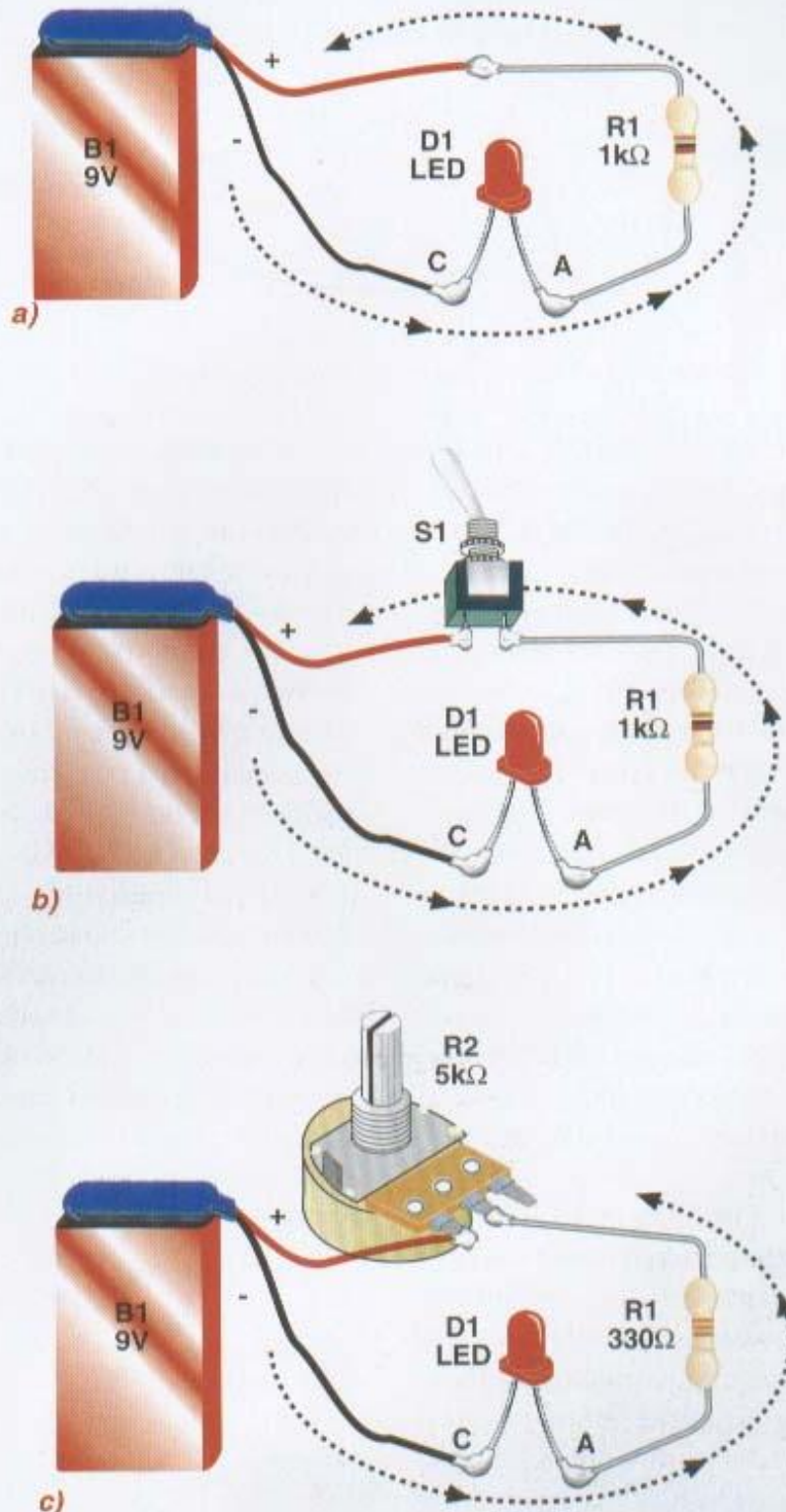


Figura 5.7 Exemplos de circuitos de energização de um LED

- (a) Circuito básico sem elementos de controle. A resistência $R1$ limita a corrente através do LED a um valor seguro
 (b) Circuito básico com controle digital. O interruptor $S1$, que pode estar fechado (ON) ou aberto (OFF), permite ou inibe a circulação de corrente através do circuito, energizando ou desenergizando o LED
 (c) Circuito com controle analógico. O potenciômetro $R2$ regula a quantidade de corrente que circula através do circuito, controlando o brilho do LED

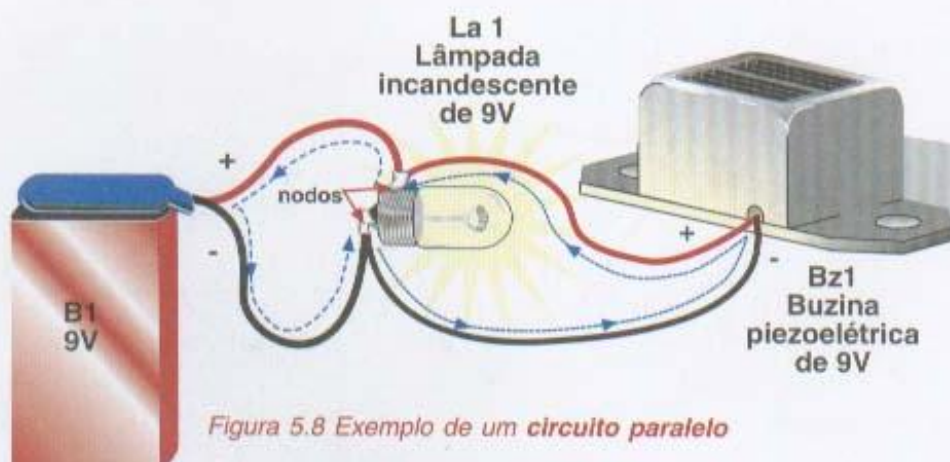


Figura 5.8 Exemplo de um **circuito paralelo**

nós e existe mais de uma trajetória para a circulação da corrente. Na **figura 5.8** mostra-se um exemplo.

Neste caso, a voltagem da bateria (fonte de alimentação) é aplicada ao mesmo tempo à lâmpada e à buzina (cargas em paralelo). Portanto, através de cada um destes elementos circula uma corrente. Se a lâmpada é retirada, a buzina continua energizada, e vice-versa. Cada uma das trajetórias para a circulação da corrente proporcionadas por um circuito em paralelo é denominada **ramo**.

Em um circuito misto **em série-paralelo**, como seu próprio nome indica, alguns elementos estão conectados em série, compartilhando a mesma corrente, enquanto que outros estão em paralelo, compartilhando a mesma voltagem. Como resultado, existem várias trajetórias fechadas para a circulação da corrente e vários pontos comuns de conexão de elementos. Na **figura 5.9** mostra-se um exemplo.

Neste caso, a resistência R1 está em série com o LED D1 enquanto que o interruptor S1 está em série com a bateria e com o resto do circuito. A buzina BZ1, por sua vez, está em paralelo com a associação em série de R1 e D1. Ao fechar o S1, uma parte da corrente administrada pela bateria circula através de R1 e D1 e a outra o faz através de BZ1. Se D1 ou R1 são retirados, não circula corrente através desse ramo do circuito, mas sim através de BZ1, e vice-versa. Se o S1 é aberto, a corrente deixa de circular através de todo o circuito. A maior parte dos circuitos eletrônicos são do tipo em série-paralelo.

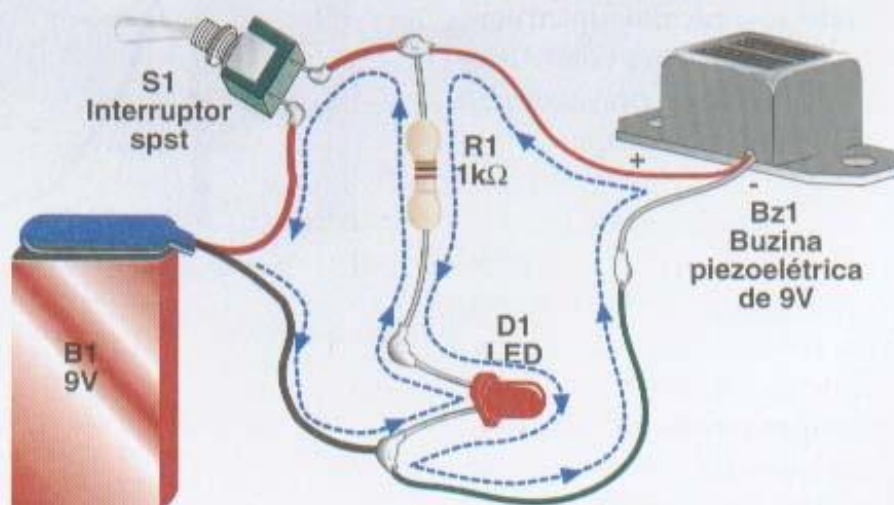


Figura 5.9 Exemplo de um **circuito misto em série e paralelo**

5.2 Formas de representação

Os circuitos são representados em eletrônica mediante **diagramas**. Um diagrama é uma ilustração gráfica ou pictórica da forma como estão conectados ou como devem se conectar os elementos de um circuito para realizar uma determinada função. Os diagramas são uma parte muito importante do trabalho eletrônico. De fato, todo o processo de conversão de uma idéia em um produto final está baseado ou apoiado no uso de diagramas, **figura 5.10**.

Os diagramas facilitam o projeto, a construção, a análise e a reparação de qualquer circuito ou sistema. Também servem de guia para quem desejar copiá-los, estudá-los ou adaptá-los às suas necessidades particulares. Tentar construir ou reparar um equipamento eletrônico sem a ajuda de um diagrama é como aventurar-se em uma expedição sem a ajuda de um mapa.

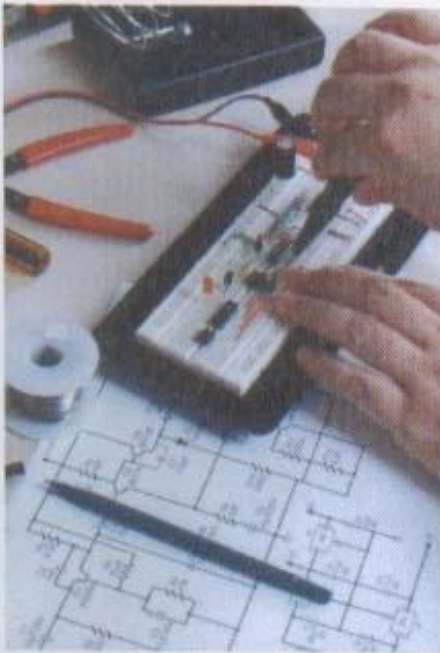


Figura 5.10 Os diagramas são a principal ferramenta gráfica para facilitar o desenho, a análise, a construção, o teste, a operação, a reparação, a reprodução, etc. de qualquer circuito ou sistema eletrônico

Em eletrônica são utilizados vários tipos de diagramas para representar circuitos e sistemas. Os mais comuns são os **pictogramas**, os diagramas **esquemáticos** e os de **blocos**. Nesta seção, empregaremos preferencialmente diagramas esquemáticos e diagramas de blocos. Os pictogramas serão utilizados principalmente nas seções de **Eletrônica Prática** e **Projetos**.

5.2.1 Pictogramas

Um **pictograma**, como seu próprio nome indica, é uma ilustração desenhada dos elementos que compõem um circuito, a maneira como estão conectados entre si e a posição relativa que ocupam dentro da montagem física. Em

outras palavras, um pictograma mostra como se parece ou deve parecer um circuito ou sistema uma vez armado, montado ou montado com fios. É inclusive mais descritivo que uma fotografia. Os pictogramas são a forma mais elementar e intuitiva de representação de circuitos eletrônicos.

Existem vários tipos de pictogramas, dependendo do método utilizado para proporcionar as conexões entre os distintos elementos constitutivos do circuito que representam e das características construtivas ou específicas que se deseja ressaltar. Nos experimentos realizados até este momento, por exemplo, temos utilizado pictogramas para ilustrar como se interconectam os elementos sobre o *protoboard*.

Um caso particular de pictogramas que empregaremos frequentemente neste curso são os **diagramas de exploração**, comumente conhecidos como **diagramas de montagem**. São utilizados principalmente para ilustrar como é montada uma peça de equipamento formada por várias partes individuais relacionadas entre si.

Na **figura 5.11** mostra-se um exemplo de diagrama de montagem. Observe que os

distintos elementos mostram-se conservando suas posições relativas, porém afastados entre si para que possam ser visualizados mais facilmente. As linhas finas indicam como estão interconectadas as partes individuais.

Outros tipos de pictogramas muito comuns são os **guias de colocação de componentes**, utilizadas para representar circuitos montados sobre placas de circuito impresso. Na **figura 5.12** mostra-se um exemplo. Os componentes podem estar representados através de sua forma física real, sua silhueta ou seu símbolo esquemático. Todos os circuitos da seção de **Projetos** deste curso, por exemplo, são representados através de diagramas deste tipo.

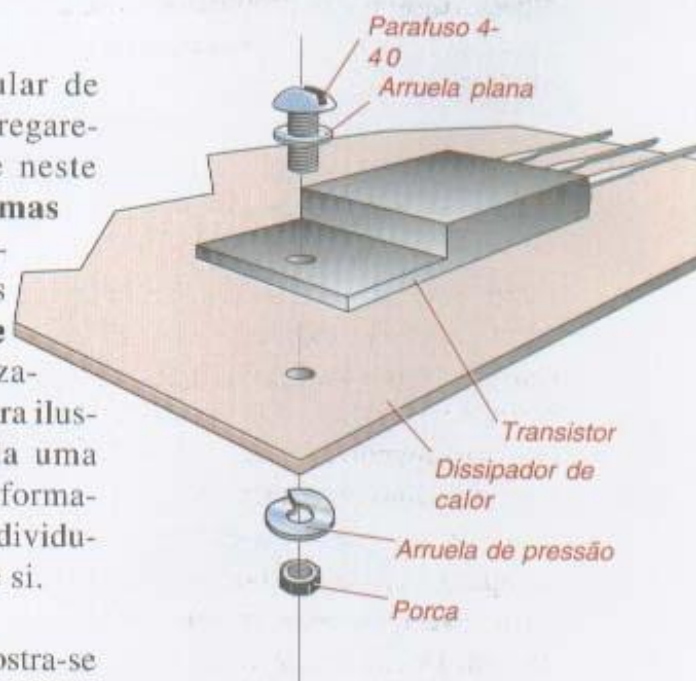


Figura 5.11 Exemplo de um diagrama pictórico de montagem

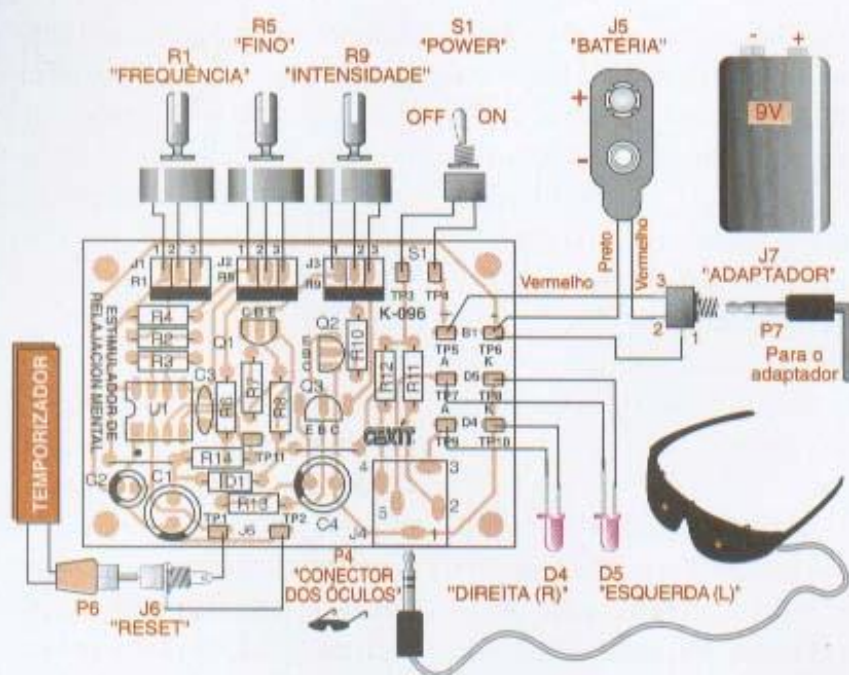


Figura 5.12 Exemplo de um guia de colocação de componentes

Os pictogramas são fáceis de serem compreendidos porque mostram os componentes em seu formato real, com suas dimensões muitas vezes em escala e em suas respectivas posições dentro do circuito físico. Além disso, permitem mostrar diagramas de montagem e outros detalhes

construtivos. Por esta razão, são muito utilizados para transmitir informação técnica a pessoal não especializado como hobistas, pessoas que fazem reparos ocasionais ou simples usuários de produtos eletrônicos. Sem dúvida, também possuem alguns inconvenientes.

Os pictogramas, por exemplo, não proporcionam informação clara sobre o funcionamento dos circuitos, sua elaboração é dispendiosa e consome muito tempo, ocupando freqüentemente demasiado espaço, etc. Por estas e outras razões, somente são utilizados em situações muito específicas.

5.2.2 Diagramas esquemáticos

Um **diagrama esquemático**, é uma representação gráfica em linguagem simbólica dos elementos que compõem um circuito e a forma como estão conectados entre si, independentemente de sua colocação ou de suas características físicas. Os diagramas esquemáticos, também chamados **esquemas ou planos**, são a linguagem natural de comunicação da eletrônica.

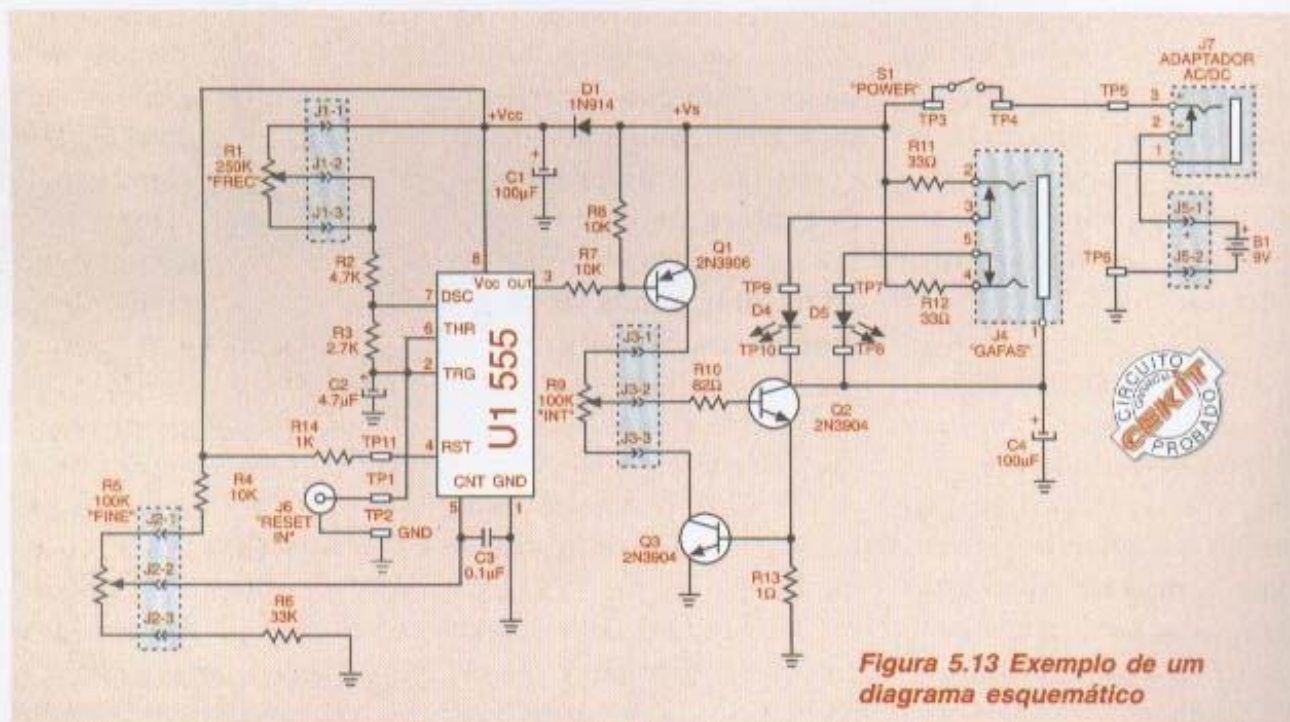


Figura 5.13 Exemplo de um diagrama esquemático

Na **figura 5.13** mostra-se como exemplo o diagrama esquemático correspondente ao circuito previamente apresentado em forma pictórica na **figura 5.12**. Em um diagrama esquemático, os componentes e suas conexões são representados mediante símbolos gráficos que indicam sua função dentro do circuito e permitem que possamos indentificá-los numa simples olhada.

Particularmente em um diagrama esquemático, as conexões entre componentes são representadas mediante linhas retas horizontais ou verticais e os componentes propriamente ditos mediante símbolos padrão. Idealmente as linhas não devem se cruzar. Visto que na maioria dos casos isto é inevitável, certas convenções devem ser seguidas para prevenir confusões. Neste curso adotaremos as seguintes, ver **figura 5.14**.

1. Para especificar que duas linhas estão conectadas entre si, coloca-se um ponto preto sólido indicador de união na intersecção das mesmas. Preferivelmente, não mais que três conexões devem chegar ao mesmo ponto. Se houver mais que três condutores chegando a um mesmo nó, pontos de conexão adicionais devem ser utilizados.

2. Para especificar que duas linhas cruzadas não estão conectadas entre si, simplesmente não se coloca ponto na intersecção.

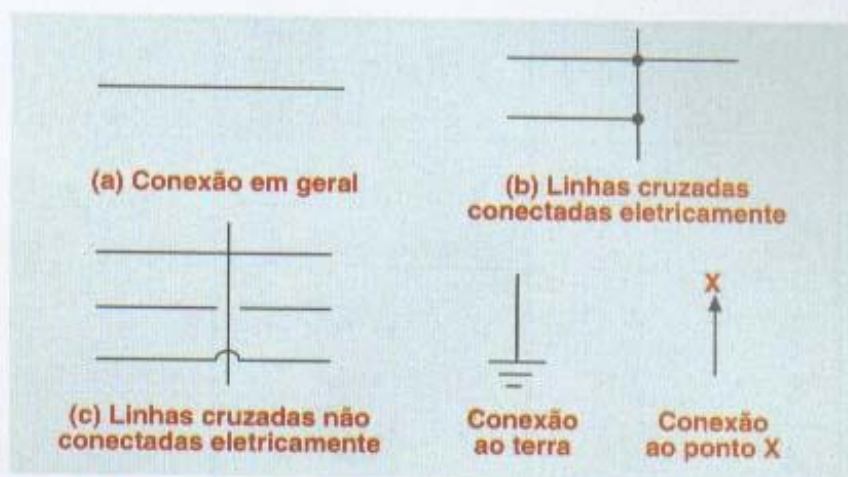


Figura 5.14 Simbologia de conexões

Algumas vezes, para indicar que um dos fios passa por cima de outro sem tocá-lo, utiliza-se um pequeno semicírculo ou uma interrupção (*gap*) em uma das linhas cortadas.

3. Para mostrar que um condutor, ou um ponto de união de vários condutores, deve ir conectado às linhas de alimentação ou às de aterramento gerais do circuito, são utilizados símbolos de aterramento e pontas de flechas marcadas com etiquetas tais como +VCC, -VEE, +VSS, etc. O mesmo critério se aplica para as linhas de sinal. Dessa forma, evita-se saturar o desenho de linhas e se consegue um diagrama mais legível. Todos os condutores com a mesma etiqueta devem ser conectados entre si no circuito físico.

Na **figura 5.15** mostram-se alguns símbolos utilizados nos diagramas esquemáticos para representar componentes. A maioria destes símbolos já foram apresentados no **Capítulo**

10. Outros serão introduzidos à medida que isto se faça necessário. Como regra geral, para evitar confusões e ambiguidades, utilize sempre o mesmo símbolo para o mesmo tipo de dispositivo; isto é, uma linha em zigue-zague para as resistências, duas linhas paralelas para os capacitores, uma linha helicoidal para as bobinas, etc.

Além de seu símbolo gráfico, os componentes de um diagrama esquemático também devem ser identificados mediante designadores. Um **designador** é um símbolo alfanumérico, formado por uma letra ou grupo de letras e um número, que individualiza cada componente e permite que seja diferenciado de outros componentes do mesmo tipo. Também é útil para referir-se ao mesmo em listas de peças ou explicações textuais, no lugar de recorrer a descrições vagas como "a resistência X que está sob o capacitor Z e ao lado do transistor Y".

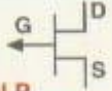
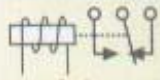
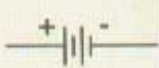
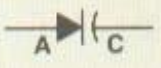
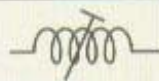
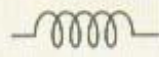
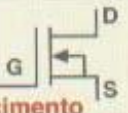
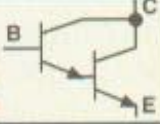
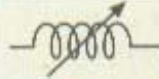
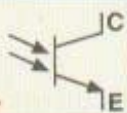
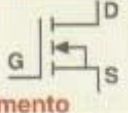
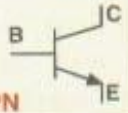
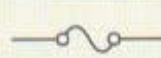
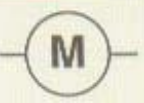
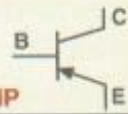
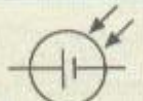
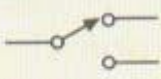
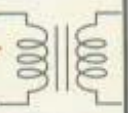
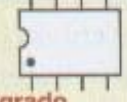
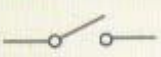
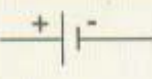
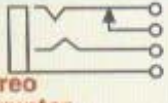
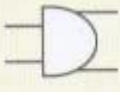
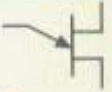
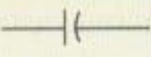
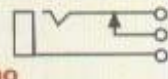
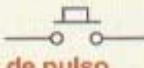
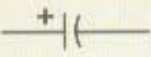
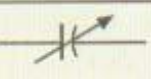
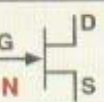
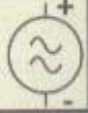
			
Amplificador	Conectores separáveis	JFET de canal P	Relé eletromecânico
			
Antena	Cristal piezoelétrico	Lâmpada de neón	Resistência ajustável
			
Auricular	Diodo retificador	Lâmpada incandescente	Resistência fixa
			
Bateria	Diodo varicap	LED	Resistência variável
			
Bobina ajustável	Diodo zener	* Identificação e tipo Microfone	SCR
			
Bobina fixa	Fotodiodo	MOSFET de empobrecimento	Transistor Darlington
			
Bobina variável	Fototransistor	MOSFET de enriquecimento	Transistor NPN
			
Celula fotocondutiva	Fusível	Motor	Transistor PNP
			
Celula fotovoltaica	Interruptor spdt	Auto-falante	Transformador de núcleo de ferro
			
Circuito integrado	Interruptor spst	Pilha	Triac
			
Capacitor ajustável	Jack estéreo com interruptor	Plug AC	UJT base tipo N
			
Capacitor não polarizado	Jack mono com interruptor	Interruptor de pulso off-(on) o NA	Válvula triodo
			
Capacitor polarizado	Jack RCA	Interruptor de pulso on-(off) o NC	Varistor
			
Capacitor variável	JFET de canal N	Relé de lâmina (reed switch)	Buzina piezoelétrica

Figura 5.15. Símbolos esquemáticos comuns de componentes

Na **tabela 5.1** são relacionados alguns designadores literais comuns que serão utilizados com frequência neste curso. Por exemplo, o R10 refere-se a uma resistência, C4 a um capacitor, L1 a uma bobina, Q3 a um transistor, etc. O designador deverá ser colocado tão próximo o quanto seja possível do componente e ser escrito de modo a que possa ser lido da esquerda para a direita. Na medida do possível, evite escrever na vertical.

Junto ao designador, o símbolo de cada componente pode estar acompanhado de seu valor ou referência correspondente, digamos 100k Ω , 2N3904, etc., colocado diretamente abaixo do designador. Na **figura 5.16** mostram-se alguns exemplos. Quando, por razões de espaço, não se indicarem os valores ou referências dos componentes nos esquemas, os mesmos devem ser relacionados em uma lista de peças acompanhadas das anotações pertinentes, por exemplo, "todas as resistências são de 1/4W, 5%".

Como parte do símbolo, pode-se incluir a identificação dos terminais quando o componente assim o exigir, por exemplo um "+" para o terminal positivo, um "5" para o pino #5, um "G" para a porta ou *gate*, etc. No caso de circuitos integrados, os números dos pinos são escritos fora do

símbolo e os nomes dos sinais correspondentes dentro dos mesmos. O designador e a referência podem ir dentro ou fora do símbolo, dependendo do espaço disponível.

Nos diagramas esquemáticos também se pode indicar nomes de sinais e de blocos funcionais, bem como voltagens, correntes, formas de onda ou outros tipos de parâmetros elétricos importantes que devem ser obtidos em pontos-chave do circuito sob condições normais de funcionamento. Esta informação é particularmente útil quando se conserta ou se ajusta o circuito.

Os diagramas esquemáticos são muito mais explícitos, compactos, universais e fáceis de desenhar que os pictogramas. Além disso, visto que os símbolos são pequenos, ocupam menos espaço. No entanto, lembre-se de que a posição de um dado componente em um esquema não corresponde necessariamente à sua posição real no circuito físico. Num esquema, a posição da peça é determinada pela necessidade de clareza do mesmo e não pelos detalhes de construção específicos.

A interpretação, elaboração e análise de diagramas esquemáticos são habilidades muito importantes na eletrônica que são adquiridas com o tempo e a prática, de modo si-

Componente	Designador
Amplificador	A
Bateria	B
Bobina ou indutor	L
Carga resistiva	RL
Célula fotocondutiva	R, LDR
Circuito integrado	U, IC
Condensador	C
Conector fêmea (jack)	J
Conector macho (plug)	P
Cristal	XTAL
Díac	DI
Diodo	D
Dissipador de calor	HS
Fusível	F
Indutor ou bobina	L
Interruptor	S
Lâmpada	LMP, La
LED	D, LED
Medidor	M
Microfone	MIC
Motor	MOT
Optoacoplador DIP	IC, OC
Alto-falante	SPKR
Potenciômetro	R, RV
Retificador em ponte	BR
Regulador de voltagem	IC, VR
Relé de estado sólido	SSR
Relé eletromecânico	K, Re
Resistência	R
Sensor	SEN
Placa de circuito impresso	PCB
Tíristor (SCR)	Q, Th
Triac	Q, Tri
Transformador	T
Transistor	Q, Tr
Tubo ou válvula	V
Varistor	MOV
Visualizador LED	LD
Visualizador de cristal líquido	LCD
Buzina ou buzzer	BZ

Tabela 5.1 Designadores comuns

milhar a como se aprende a ler, escrever e a falar um outro idioma. Neste curso, você terá a oportunidade de converter-se em um especialista. Para começar, na **Prática Nº 2** da seção de **Eletrônica Prática** se explica a forma de converter um diagrama esquemático em um protótipo de um circuito real.

Ao elaborar um diagrama esquemático, assegure-se de que o mesmo mostre claramente como o circuito funciona e que seja fácil de ser en-

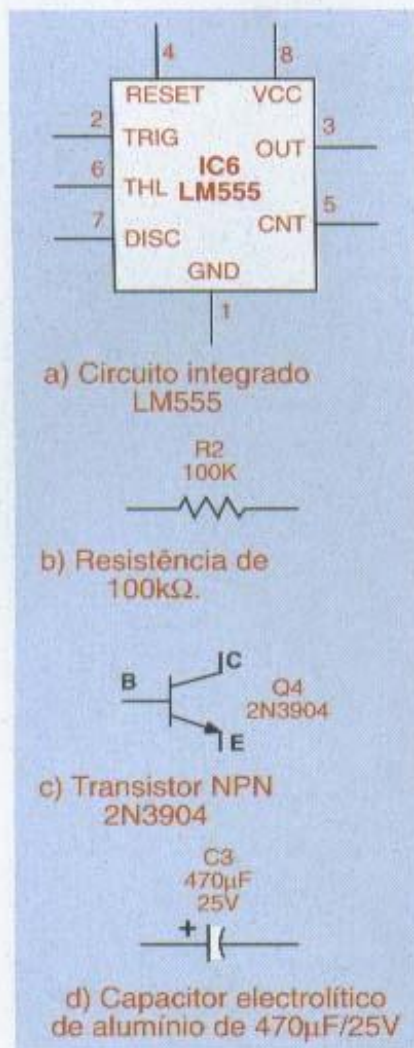


Figura 5.16 Exemplos de rotulação de componentes

tendido por outros. Evite especificamente as ambiguidades. Para isso, etiquete claramente os números e designações dos pinos, os valores das peças, as polaridades dos componentes, etc.

Da mesma forma, diferencie as distintas áreas ou etapas funcionais que formam o circuito. Se as mesmas tiverem uma distribuição facilmente reconhecível, desenhe-as sempre desta forma. Aprenderemos e aplicaremos essas e outras dicas-chave (*tips*) à medida em que elas se façam necessárias.

5.2.3 Diagramas de blocos

Os **diagramas de blocos** são um método de representação gráfica simplificada que permite visualizar muito facilmente as relações entre os distintos circuitos ou etapas funcionais que compõem um sistema, sem a necessidade de se visualizar sua estrutura interna. Desta forma, simplifica-se seu desenho, análise e reparação. São muito empregados para descrever sistemas complexos, mas em geral podem ser utilizados para representar circuitos ou sistemas de qualquer tipo.

Em um diagrama de blocos, os circuitos ou grupos de componentes que realizam determinadas funções são representados mediante blocos ou “caixas pretas”. Na **figura 5.17** mostra-se um exemplo. Note o uso de triângulos para representar os amplificadores. Também existem símbolos especiais para outras funções.

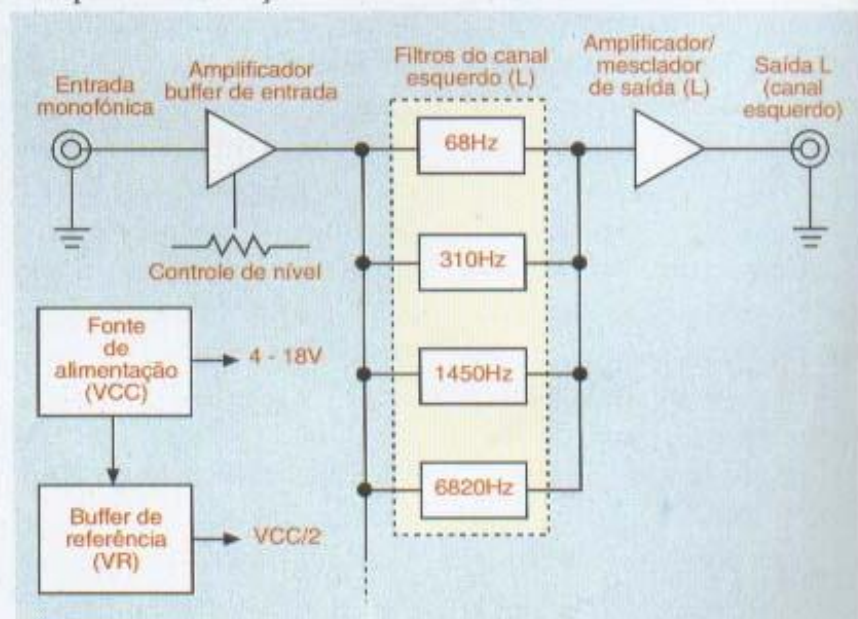


Figura 5.17 Exemplo de diagrama de blocos

Os diagramas de blocos devem ser desenhados de modo a que a direção do fluxo de sinais seja da esquerda para a direita e de cima para baixo. Esta direção pode ser indicada através de flechas nas linhas de interconexão. Os blocos devem ser preferivelmente do mesmo tamanho. Para maior clareza, fora de cada bloco pode-se indicar, através de símbolos esquemáticos convencionais, os elementos de ajuste ou de controle associados.

+ Como um material complementar do tema «**Formas de representação de circuitos**» tratado neste capítulo, a CEKIT tem disponível o vídeo didático «**Símbolos eletrônicos e interpretação de diagramas**». Outros vídeos complementares de temas tratados nos capítulos precedentes são «**Tudo sobre resistências**», «**Tudo sobre capacitores e bobinas**» e «**Meus primeiros passos em Eletrônica**». Consulte-nos.

5.3 Parâmetros e leis fundamentais dos circuitos

Os dois principais parâmetros associados com qualquer componente, circuito ou sistema eletrônico são a **corrente** e a **tensão**. A partir destas duas quantidades elétricas-chave definem-se todas as demais, como a potência, a resistência, a capacitância, a indutância, o ganho, etc. Um dos grandes segredos da eletrônica é, precisamente, o desenvolvimento de componentes, circuitos e sistemas que produzam ou tenham relações interessantes e úteis entre a tensão e a corrente.

Um resistor, por exemplo, produz entre seus terminais uma tensão proporcional à corrente através de si mesmo, independentemente do fato de esta última ser constante ou variável. Os capacitores e os condensadores, por sua vez, apenas respondem a correntes ou tensões variáveis, produzindo, respectivamente, uma tensão ou uma corrente proporcional à **velocidade de mudança** da corrente ou tensão.

Os semicondutores, os transdutores e outros tipos de componentes, por sua vez, oferecem relações mais interessantes e variadas entre a corrente e a tensão. Iremos explorá-las à medida em que as estudarmos em detalhe como elementos de circuitos.

5.3.1 Conceito de

corrente

Em eletrônica, uma **corrente** é um fluxo ordenado de portadores de carga. Os **portadores de carga** são partículas positivas ou negativas muito pequenas, que têm a liberdade de mover-se através da estrutura atômica de certos materiais.

Os portadores de carga mais comuns são os elétrons livres, as lacunas e os íons. Os elétrons livres são partículas de carga negativa, as lacunas espaços vazios de carga positiva e os íons, átomos carregados positiva ou negativamente. Os elétrons livres atuam como portadores de carga nos condutores metálicos, os semicondutores tipo N e as válvulas de vácuo, as lacunas nos semicondutores tipo P e os íons, em gases e em líquidos.

Natureza da corrente elétrica. Em um condutor, digamos um fio metálico, os elétrons livres estão muito fracamente ligados a seus átomos e deslocam-se de um átomo a outro de forma aleatória, ou seja, sem seguir uma ordem determinada, com uns elétrons movendo-se em uma direção e outros o fazendo na direção oposta, **figura 5.18a**. Esse movimento aleatório, contudo, por si mesmo, não constitui uma corrente elétrica.



(a) Elétrons livres movendo-se aleatoriamente em todas as direções. A corrente líquida é zero.



(b) Elétrons livres movendo-se ordenadamente em uma mesma direção. Existe uma corrente líquida diferente de zero.

Figura 5.18 Natureza da corrente elétrica.

Para que exista uma corrente propriamente dita é necessária uma força externa que obrigue os elétrons livres a moverem-se em uma mesma direção, **figura 5.18b**. Essa força, como veremos mais adiante, denomina-se **tensão**.

O número de portadores de carga positivos ou negativos que passam por um certo ponto de um circuito, em um tempo especificado, determina a **intensidade** da corrente. Esta última é representada pelo símbolo " I " ou " i ", dependendo se é constante (CC) ou variável com o tempo (CA).

A unidade de medida de intensidade de corrente é o **ampère** (A). Na prática, além do ampère, utilizam-se submúltiplos como o miliampère (mA), o microampère (μ A), o nanoampère (nA) e o picoampère (pA), equivalentes, respectivamente, a 10^{-3} A, 10^{-6} A, 10^{-9} A e 10^{-12} A.

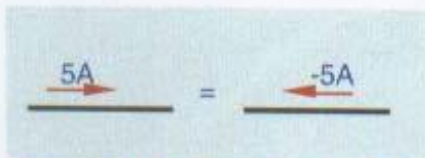


Figura 5.19 Formas de indicar a direção e magnitude de uma corrente

Convenções. A corrente, ao passar por um ponto determinado de um circuito, possui um valor ou intensidade e uma direção associadas a ela. Neste curso indicaremos a direção em que se movem os portadores de carga e a intensidade da corrente mediante uma ponta de flecha, conforme indicado na **figura 5.19**.

Em ambos os casos, a direção da flecha e as denominações “5A” e “-5A” representam, respectivamente, uma corrente de 5A devida a portadores positivos movendo-se para a direita ou uma corrente de 5A devida a portadores negativos movendo-se para a esquerda. Ambas as correntes produzem os mesmos efeitos e, portanto, são iguais.

Em eletrônica, para efeitos de análises e projeto, é bastante conveniente imaginar

sempre uma corrente como um movimento de portadores de carga **positivos**, ainda que, estritamente falando, essa afirmação não coincida exatamente com a natureza física da corrente em todos os casos.

Como se mencionou anteriormente, nos condutores metálicos e nos semicondutores do tipo N, por exemplo, a corrente é o resultado do movimento de elétrons, que são portadores de carga **negativos**. Nos semicondutores do tipo P, os gases ionizados e as soluções eletrolíticas, por sua vez, a corrente é o resultado do movimento de portadores de carga **positivos**.

A fim de evitar ambigüidades, **neste curso assumiremos que a corrente é o resultado do movimento de portadores de carga positivos**. Essa é a convenção normalizada e aceita universalmente.

Portanto, em um circuito como o mostrado na **figura 5.20b**, a corrente sai pelo terminal positivo da bateria, per-

corre o circuito e entra pelo pólo negativo da bateria. Esta direção se denomina **corrente convencional** e é exatamente oposta àquela em que seguem os elétrons, chamada **corrente real**, **figura 5.20a**.

Para efeitos práticos, uma corrente convencional de portadores positivos de uma determinada magnitude, digamos 7.5 mA, como no circuito anterior, é exatamente igual a uma corrente real de elétrons da mesma magnitude deslocando-se em sentido oposto porque produz exatamente os mesmos efeitos.

Medição. A corrente que circula por um ponto qualquer de um circuito é medida utilizando-se um instrumento chamado **amperímetro** (ou **miliamperímetro** ou **microamperímetro**, dependendo da magnitude da corrente a medir). O emprego do amperímetro é explicado nas **Práticas 4 e 5** da seção de **Eletrônica Prática** deste curso.

Na **figura 5.21** estão indicados o símbolo e a forma de conectar um amperímetro em um circuito. Note que deve-se abrir ou interromper-se o circuito para que a corrente a ser medida passe através do instrumento.

Os amperímetros CC medem corrente convencional. Portanto, se a corrente entra pelo terminal positivo e sai

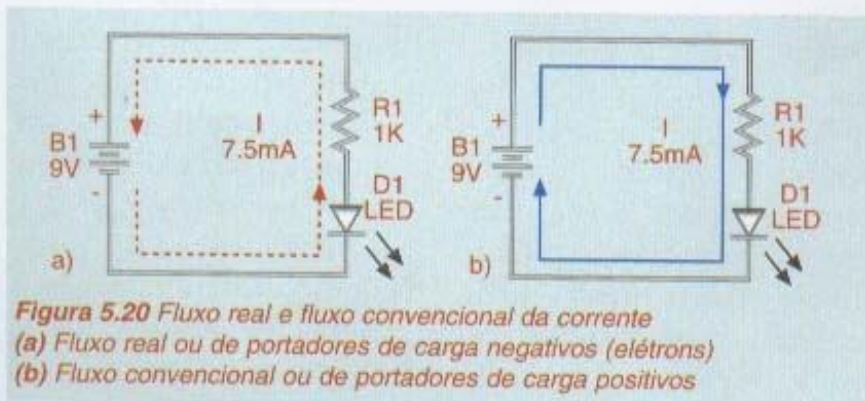


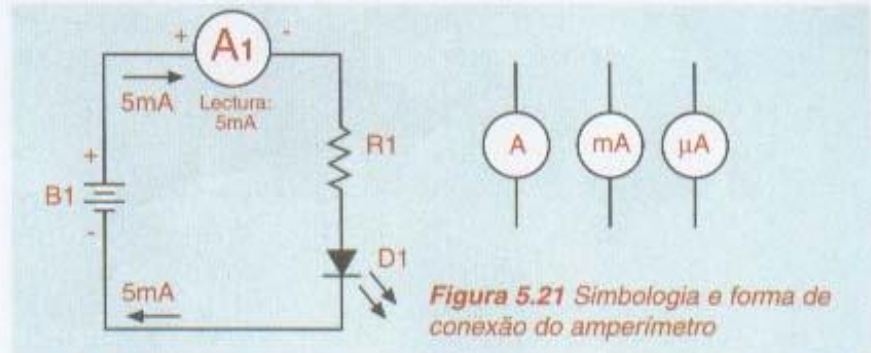
Figura 5.20 Fluxo real e fluxo convencional da corrente
(a) Fluxo real ou de portadores de carga negativos (elétrons)
(b) Fluxo convencional ou de portadores de carga positivos

pelo terminal negativo, conforme indicado na figura, a leitura oferecida pelo instrumento é positiva, digamos 5 mA. Do contrário, o instrumento oferece uma leitura negativa (-5 mA).

Idealmente, um amperímetro deve ter uma resistência interna igual a zero (0Ω). Portanto, sua inserção não deve afetar a magnitude e as características da corrente medida. Por enquanto assumiremos que isso é sempre assim, ainda que na prática todos os amperímetros tenham intrinsecamente uma resistência interna muito baixa, porém diferente de zero.

Tipos de correntes. Os circuitos eletrônicos lidam basicamente com correntes diretas e correntes alternadas. Uma corrente é **contínua** (CC) quando flui sempre na mesma direção, e **alternada** (CA) quando o faz alternadamente em uma direção e depois na outra. Na **figura 5.22** mostramos as formas de onda de alguns tipos de correntes contínuas e alternadas, as quais veremos frequentemente neste curso.

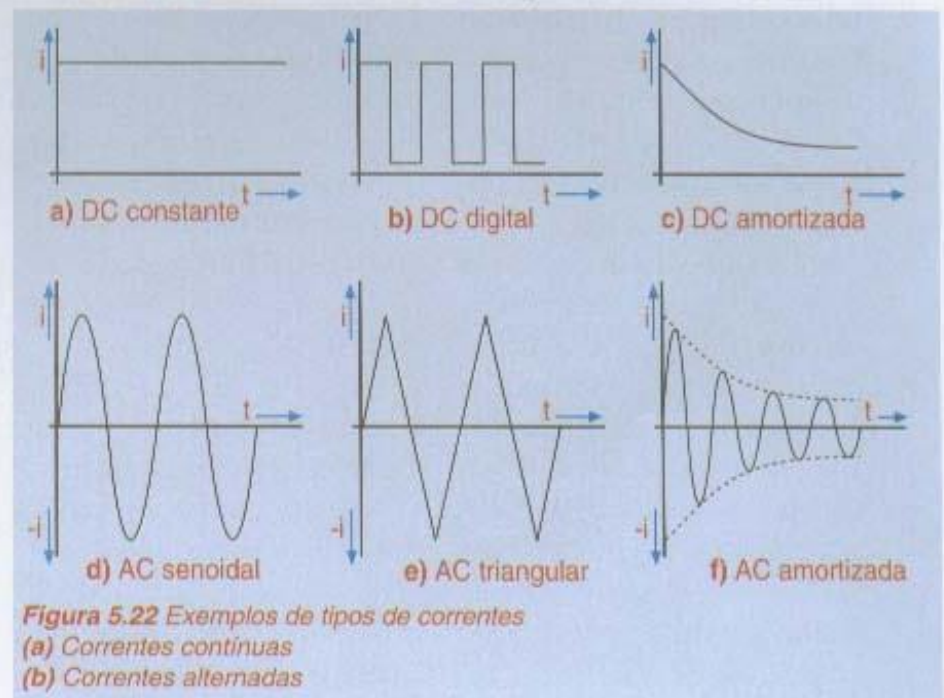
☒ Uma **forma de onda** é simplesmente uma representação gráfica do modo como se comportam a tensão ou a corrente em um ponto determinado de um circuito no transcorrer do tempo. As formas de onda são visualizadas em um osciloscópio.



5.3.2 Conceito de tensão

Em eletrônica, uma **tensão** ou **tensão** é uma força capaz de impulsionar uma corrente através de um circuito. Sempre que se aplica uma força a um objeto para movê-lo de um ponto a outro realiza-se um **trabalho** ou intercâmbio de energia. Portanto, a tensão pode ser também definida como o trabalho requerido para mover uma certa quantidade de carga entre dois pontos. Outros nomes para a tensão, os quais examinaremos mais adiante, são **força eletromotriz**, **potencial** e **diferença de potencial**.

Natureza da tensão. Para compreender a natureza da tensão, consideremos o caso de uma bateria, a fonte de energia básica da maioria dos circuitos eletrônicos, **figura 5.23**. Em uma bateria, as reações químicas que ocorrem no interior do elemento geram, permanentemente, cargas iguais e de sinal contrário nos eletrodos do elemento, mantendo uma diferença de potencial constante entre eles. Sempre que existir entre dois pontos do espaço uma diferença de cargas, se estabelecerá entre ambos um **campo elétrico**.



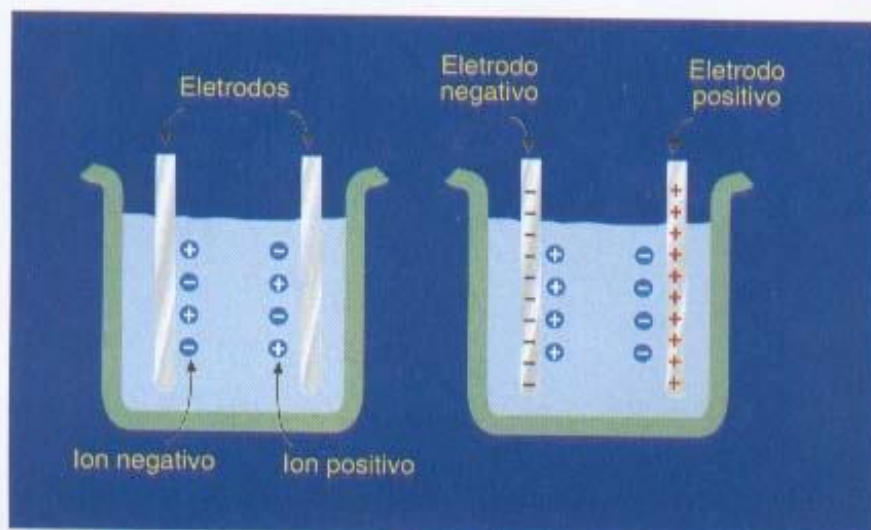


Figura 5.23 Natureza da tensão em uma bateria. A ação química provoca a formação de **íons** (átomos carregados) positivos e negativos no eletrólito (a) e no eletrodo da esquerda. Os íons positivos deste último passam ao eletrólito e o eletrodo fica carregado negativamente, ou seja, com um excesso de elétrons (b). Alguns íons positivos do eletrólito são repelidos para o eletrodo da direita, onde combinam-se com elétrons, carregando-o positivamente, ou seja, com uma deficiência de elétrons. Visto que os eletrodos ficam com cargas opostas, se estabelece uma tensão ou diferença de potencial entre eles. Ao conectar uma carga entre os eletrodos, os elétrons em excesso do eletrodo negativo circulam como uma corrente pelo circuito externo para o eletrodo positivo.

Para mover uma carga através de um campo elétrico é necessário vencer a força de atração ou repulsão que o campo elétrico exerce sobre a carga considerada. Em outras palavras, deve ser realizado um **trabalho**. O trabalho por unidade de carga (joules por coulomb ou J/C) requerido é, precisamente, a tensão.

No caso de um circuito é necessário fazer um trabalho contra o campo para mover os portadores de carga de um terminal da bateria até o outro. Também é necessário realizar um trabalho para levar os portadores de carga do extremo de um componente até o outro e, assim, produzir luz, calor, movimento, som, etc.

A tensão é representada pelo símbolo “V” ou “v”, dependendo de ser constante (CC) ou variável com o tempo (CA). Sua unidade de medida no sistema SI é o **volt (V)**. Na prática eletrônica também utilizam-se múltiplos e submúltiplos como o kilovolt (kV), o milivolt (mV) e o microvolt (μV), equivalentes, respectivamente, a mil volts (10^3V), um milésimo de volt (10^{-3}V) e um milionésimo de volt (10^{-6}V).

Convenções. Em um circuito, a tensão sobre um componente ou entre um par de pontos qualquer possui a todo instante uma polaridade, a qual, dependendo da direção em que circula a corrente, permite de-

terminar se o elemento está recebendo ou distribuindo energia desde ou para alguma fonte ou dispositivo externo. A polaridade da tensão é indicada por um par de sinais algébricos +/-.

Na **figura 5.24** mostram-se alguns exemplos. A caixa preta representa um elemento qualquer de um circuito, com um terminal para a entrada da corrente e outro para a saída da mesma. A corrente convencional em um circuito sempre flui dos pontos de mais alto potencial (+) até os pontos de mais baixo potencial (-).

Designações. As tensões em um circuito são designadas de várias formas, dependendo de sua natureza. Por exemplo, a tensão entre os terminais de uma bateria ou fonte de alimentação é uma **força eletromotriz**, a tensão entre os terminais de uma carga é uma **queda de tensão**, a tensão entre dois pontos quaisquer do circuito é uma **diferença de potencial** e a tensão entre qualquer ponto e o **terra** é um **potencial**.

☒ A terra (*ground* ou GND) é, simplesmente, um ponto de referência comum com relação ao qual se medem todas as tensões de um circuito. Portanto, enquanto não se especificar o contrário, assume-se que as tensões de um circuito referem-se à terra.

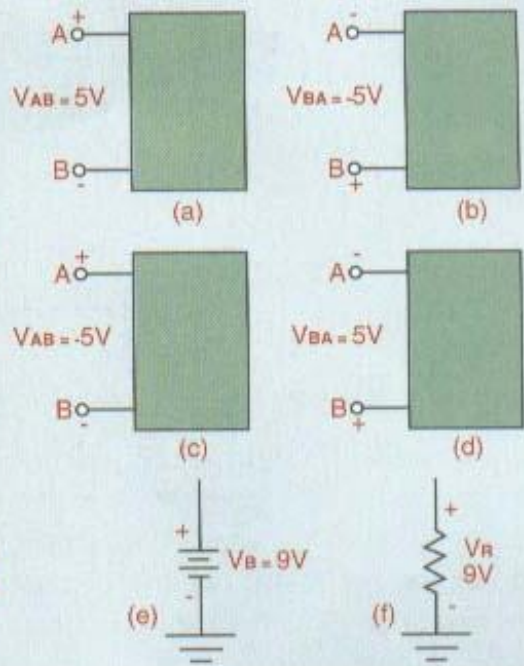
Na **figura 5.25** estão ilustrados os conceitos anteriores. Neste caso, duas lâmpadas, designadas como La1 e La2, estão conectadas em série com a bateria B1, a qual produz uma força eletromotriz de 6 V. Esta tensão divide-se entre as lâmpadas, de modo que sobre La1 há uma queda de 3.5 V e sobre La2 uma queda de 2.5 V.

Em outras palavras, a diferença de potencial entre os pontos A e B é $V_{AB}=3.5\text{ V}$ e a diferença de potencial entre os pontos B e C é $V_{BC}=2.5\text{ V}$. Se tomássemos C como ponto de referência ou terra (0V), diríamos que o potencial de A é de +6V e o de B de +2.5 V. Para evitar confusões, neste curso nos referiremos com frequência a todos esses termos simplesmente como **tensões**.

Medição. A tensão entre dois pontos quaisquer de um circuito é medida utilizando-se um instrumento chamado **voltímetro** (ou **milivoltímetro** ou **microvoltímetro**, dependendo da magnitude da tensão a medir). A utilização do voltímetro é explicada nas Práticas 4 e 5 da seção de **Eletrônica Prática** deste curso.

Na **figura 5.26** são indicados o símbolo e a forma de conectar um voltímetro em um circuito para medir a tensão entre dois pontos. Note que para realizar uma medição de tensão com

Figura 5.24 Exemplos de convenções para indicar a polaridade e o valor da tensão. Em (a) e em (b), o terminal A é 5 V positivo com relação ao terminal B. Em (c) e em (d), o terminal B é 5 V positivo com relação ao terminal A. Em (e) e em (f), o terminal superior está com um potencial de 9 V acima do potencial do terminal inferior (terra).



o voltímetro não se necessita abrir ou interromper o circuito. Simplesmente conecta-se um dos terminais do instrumento a um dos pontos sob teste e o outro terminal ao ponto restante.

Os voltímetros DC são sensíveis à polaridade da tensão medida. Portanto, se o ponto ao qual se conecta o terminal positivo (+) está em um potencial mais alto que o ponto ao qual se conecta o terminal negativo (-), o instrumento exibirá uma leitura positiva, digamos 4.75 V. Do contrário, o instrumento proporcionará uma leitura negativa (-4.75 V).

Idealmente, um voltímetro deve ter uma resistência interna infinita. Portanto, sua inserção não deve afetar a magnitude e as ca-

racterísticas da tensão medida. Por enquanto, assumiremos que isso é sempre assim, mesmo que, na prática, todos os voltímetros tenham, intrinsecamente, uma resistência interna muito alta, mas não infinita.

Tipos de tensões. Os circuitos eletrônicos lidam, basicamente, com tensões contínuas e tensões alternadas. Uma tensão é **contínua** (CC) quando conserva sempre a mesma polaridade, e **alternada** (CA) quando muda alternadamente

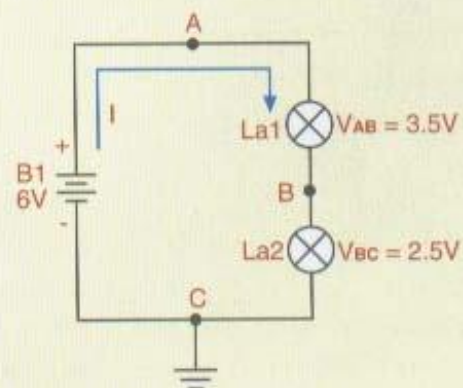


Figura 5.25 Força eletromotriz vs diferença de potencial

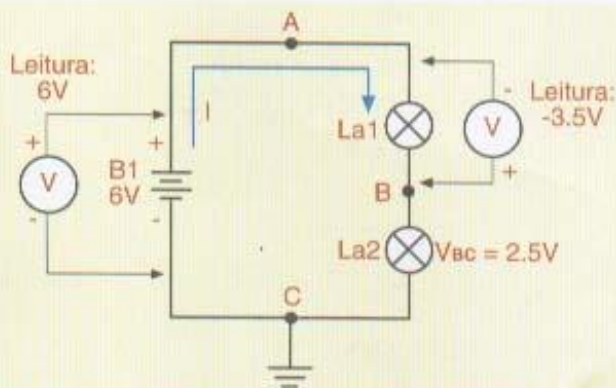


Figura 5.26 Simbologia e forma de conexão do voltímetro

de polaridade. Na figura 5.27 são mostrados dois exemplos de formas de onda de tensões de alimentação muito utilizados nos circuitos eletrônicos.

De modo similar à corrente, os componentes eletrônicos reagem de diversas formas ante

uma tensão CC ou CA. Por exemplo, a aplicação de uma tensão CA de onda senoidal ao primário de um transformador redutor produz no secundário uma tensão CA de menor amplitude, enquanto que a aplicação de uma tensão CC constante ao mesmo não produz nenhuma tensão de saída.

5.3.3 Conceito de resistência. A Lei de Ohm

Quando uma corrente circula por um condutor, os elétrons encontram uma certa oposição à sua passagem, como resultado das colisões com os átomos do material. Esta oposição à passagem da corrente denomina-se **resistência** e é uma característica intrínseca de todas as substâncias.

Os condutores, por exemplo, têm uma resistência muito baixa, enquanto que os isolantes apresentam uma resistência muito alta. Os semicondutores, por sua vez, apresentam uma resistência intermediária entre os condutores e os isolantes.

Todos os componentes utilizados em circuitos eletrônicos possuem alguma resistência. Os resistores, por exemplo, são projetados para proporcionar valores de resistência conhecidos, enquanto que os interruptores, os conectores, os fios, os fusíveis e outros tipos de materiais eletromecânicos são projetados para ter valores de resistência muito baixos, idealmente 0Ω .

Um caso especial de materiais resistivos são os **supercondutores**, que oferecem uma resistência praticamente igual a zero a temperaturas muito baixas. Exemplos de supercondutores são algumas variedades de óxidos cerâmicos formados por cobre, oxigênio e elementos exóticos como lantânio, bário, estrôncio e ítrio. Também certos metais comuns, como o chumbo, o estanho e o mercúrio comportam-se como supercondutores a temperaturas *criogênicas*, ou seja, cerca de -273°C (zero absoluto).

A resistência é representada mediante o símbolo "**R**" ou "**r**", dependendo de ser constante ou variar com o tempo. A unidade de medida da resistência (ver **Capítulo 2**) é o **ohm** (Ω). Na prática, além do ohm, utilizam-se múltiplos e submúltiplos como o megaohm ($\text{M}\Omega$), o kiloohm ($\text{k}\Omega$) e o miliohm ($\text{m}\Omega$), equivalentes respectivamente a $10^6\Omega$, $10^3\Omega$ e $10^{-3}\Omega$.

A resistência é medida uti-

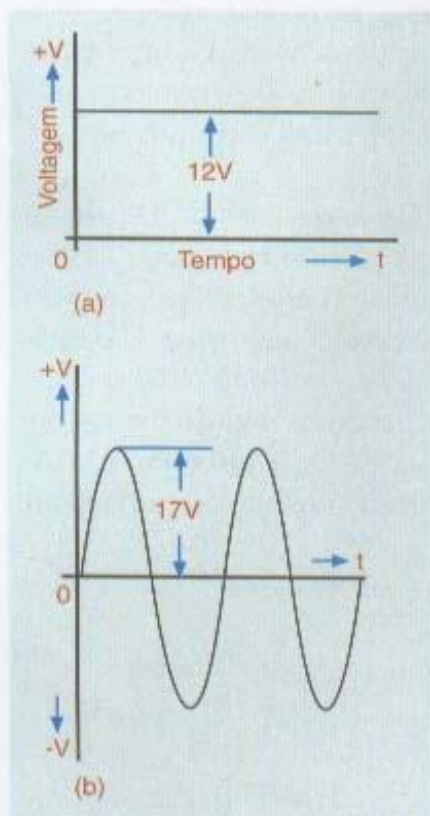


Figura 5.27 Formas de onda típicas de tensões de alimentação
(a) Tensão CC de saída de uma bateria
(b) Tensão CA de saída de um transformador

lizando-se um instrumento chamado **ohmímetro**. A utilização do ohmímetro é explicada nas Práticas 4 e 5 da seção de **Eletrônica Prática** deste curso. A resistência deve ser medida a frio, ou seja, sem corrente ou tensão aplicadas.

Condutância. A característica oposta à resistência é denominada **condutância** e mede a maior ou menor facilidade de um material em permitir a passagem da corrente. Quanto menor for a resistência, maior será a condutância, e vice-versa.

A condutância é representada pelo símbolo **G** e sua unidade de medida é o **siemens (S)**, denominada assim em homenagem ao inventor alemão Werner von Siemens (1816-1892). Matematicamente, a condutância é o recíproco ou inverso da resistência. Isto é:

$$G = \frac{1}{R}$$

Portanto, uma resistência de 10Ω é equivalente a uma condutância de $1/10 = 0.1 \text{ S}$ e uma resistência de $50 \text{ k}\Omega$ a uma condutância de $1/50 = 0.02 \text{ mS}$. O conceito de resistência é muito útil quando se analisam circuitos em série, enquanto que o de condutância é útil quando se analisam circuitos em paralelo. Neste curso trabalharemos indistintamente com ambos os conceitos.

A Lei de Ohm. A corrente e a tensão associados à resistência estão relacionados entre si por meio de uma fórmula muito útil e simples descoberta pelo físico alemão Georg Simon Ohm (1789-1854) e revelada oficialmente em 1828. Esta relação denomina-se **Lei de Ohm**.

De acordo com a **Lei de Ohm**, a corrente através de um condutor é diretamente proporcional à tensão aplicada, **figura 5.28**. Assume-se que a temperatura e demais condições ambientais não mudam. Sob esses parâmetros, a resistência de um condutor permanece constante. Portanto, se se aumenta a tensão, aumenta-se a corrente na mesma proporção e vice-versa.

Matematicamente, a **Lei de Ohm** pode ser representada por qualquer uma das seguintes equações equivalentes:

$$I = \frac{V}{R}$$

$$V = I \times R$$

$$R = \frac{V}{I}$$

onde **V** representa a tensão em volts (V), **I** a intensidade da corrente em ampères (A) e **R** a resistência em ohms (Ω). Estas relações podem ser

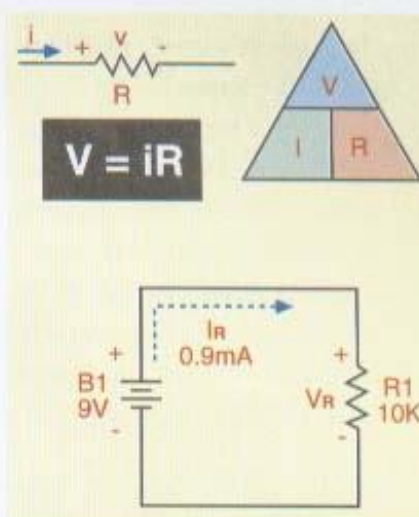


Figura 5.28 Ilustração da Lei de Ohm

facilmente lembradas utilizando-se o triângulo da **figura 5.28b**.

Para a utilização desta ajuda, simplesmente cubra com um dedo a grandeza de interesse e realize a multiplicação ou divisão que seja indicada. Por exemplo, ao cobrir **V** torna-se indicada a operação $I \times R$, isto é, a tensão (**V**) é o produto da corrente (**I**) pela resistência (**R**).

A expressão $I = V/R$ da Lei de Ohm simplesmente estabelece que se em um circuito a resistência (**R**) é fixa e a tensão (**V**) varia, então a corrente que circula através da resistência muda proporcionalmente à tensão aplicada. Por exemplo, se se aplicam 10 V a uma resistência de 100Ω , a corrente resultante é

$$I = \frac{10 \text{ V}}{100 \Omega} = 0.1 \text{ A} = 100 \text{ mA}$$

>>: Note que se a tensão é expressa em V e a resistência em Ω , a relação V/R é expressa em A. Isto é, $V/\Omega = A$. De maneira semelhante podem-se estabelecer as seguintes combinações de unidades, as quais convém memorizar porque aparecem com frequência quando se analisam ou projetam circuitos eletrônicos:

$$\begin{array}{ll} \mu V/\Omega = \mu A & mV/\Omega = mA \\ V/\Omega = A & \mu V/k\Omega = nA \\ mV/k\Omega = \mu A & V/k\Omega = mA \\ mV/M\Omega = nA & V/M\Omega = \mu A \end{array}$$

A expressão $V = I \times R$ da Lei de Ohm simplesmente estabelece que se em um circuito a resistência (R) é fixa e a corrente (I) varia, então a queda de tensão sobre a resistência varia proporcionalmente à tensão aplicada. Por exemplo, se fazemos circular $10 \mu A$ através de uma resistência de 220Ω , a queda de tensão resultante é

$$\begin{aligned} V &= 10 \mu A \times 220 \Omega = 2200 \mu V \\ V &= 2.2 mV \end{aligned}$$

Assim mesmo, se fazemos circular $2 mA$ através da mesma resistência, a queda de tensão resultante é $V = 2 \times 220 = 440 mV = 0.44 V$.

⊗ Note que se a corrente é expressa em μA e a resistência em Ω , o produto $I \times R$ é expresso em μV . Isto é, $\mu A \times \Omega = \mu V$. De maneira semelhante, podem-se estabelecer as seguintes combinações de unidades comuns:

$$\begin{array}{lll} \mu A \times \Omega & = \mu V & mA \times \Omega = mV \\ A \times \Omega & = V & \mu A \times k\Omega = mV \\ mA \times k\Omega & = V & mA \times m\Omega = \mu V \\ \mu A \times M\Omega & = V & mA \times M\Omega = kV \end{array}$$

A expressão $R = V/I$ da Lei de Ohm simplesmente estabelece que se para um elemento qualquer de um circuito se conhecem os valores da tensão (V) e a corrente (I) associados com o mesmo, pode-se determinar sua resistência dividindo a tensão pela corrente. Por exemplo, se a corrente através de uma lâmpada é $1.5 A$ quando lhe aplicamos uma tensão de $12 V$, a resistência da lâmpada é simplesmente

$$R = \frac{12V}{1.5A} = 8\Omega$$

>>: Note que se a tensão é expressa em V e a corrente em A, a relação V/I é expressa em Ω . Isto é, $V/A = \Omega$. De maneira semelhante podem-se estabelecer as seguintes relações comuns:

$$\begin{array}{lll} \mu A/\mu V = \Omega & \mu A/mV & = m\Omega \\ mA/\mu V = k\Omega & mA/mV & = \Omega \\ mA/V = m\Omega & A/\mu V & = M\Omega \\ A/mV = k\Omega & A/V & = \Omega \end{array}$$

As situações anteriores são ilustradas na **figura 5.29**. Em (a) conhecemos a tensão (V) e a resistência (R) e se desconhece a corrente (I). Em (b), conhecemos a corrente (I) e a resistência (R) e se desconhece a queda de tensão. Em (c) conhecemos a corrente (I) e a queda de tensão (V)

e se desconhece a resistência (R). Em todos os casos, a aplicação da Lei de Ohm permite conhecer a variável desconhecida.

A Lei de Ohm, que comprovaremos na prática no **Experimento 5.1**, é uma das fórmulas mais utilizadas em eletrônica. Todavia, deve-se aplicar com cuidado porque apenas é executada para os condutores feitos de metais, carbono e certas ligas. Nos semicondutores, por exemplo, a resistência não se mantém constante; muda com a tensão e a corrente. Os materiais que obedecem à Lei de Ohm denominam-se **ohmicos** ou **lineares** e os que não a seguem **não-ohmicos** ou **não-lineares**.

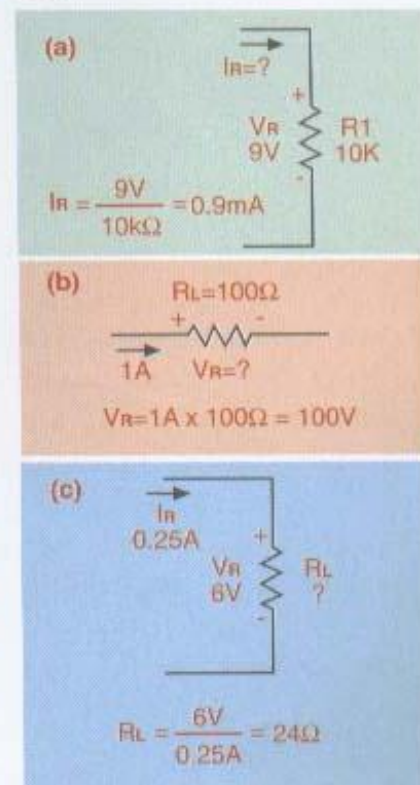


Figura 5.29 Exemplos de aplicação da Lei de Ohm

Experimento 5.1

Comprovação da Lei de Ohm

5

Objetivos

- Comprovar a Lei de Ohm em resistores de carbono.
- Familiarizar-se com as técnicas de análise de resultados

Aspectos teórico-práticos preliminares

Neste experimento comprovaremos de forma prática a relação $I=V/R$, a qual estabelece uma proporcionalidade direta entre a tensão (V) aplicada a um resistor (R) e a corrente (I) resultante. Para o experimento utilizaremos uma montagem como a mostrada na **figura 1**.

Neste caso, utiliza-se um resistor R de valor conhecido como carga e uma fonte CC variável como fonte de energia. O miliamperímetro, conectado em série, e o voltímetro, conectado em paralelo, registram, respectivamente, a

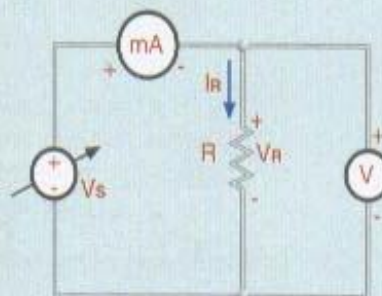
corrente através da resistência (IR) e a queda de tensão sobre a mesma (VR).

Inicialmente, observaremos qualitativamente o comportamento da corrente através do circuito, à medida que se aumenta ou diminui a tensão da fonte. Em seguida, realizaremos leituras quantitativas, variando a tensão da fonte de 0 até 12 V e medindo o valor de

corrente correspondente a valores específicos de tensão. Para conduzir um procedimento sistemático, anotaremos nossos resultados em uma tabela com um título como o seguinte:

Rt (k Ω)	Rm (k Ω)	VR (V)	IR (mA)	VR/IR (k Ω)

A primeira coluna (Rt) corresponde ao valor teórico do resistor, ou seja, o determinado a partir do código de cores impresso no corpo do dispositivo, e a segunda (Rm) a seu valor real, ou seja, o obtido ao medi-la com um ohmímetro digital. O valor teórico servirá unicamente como referência. Para nossos cálculos utilizaremos o valor real.



Vs: Fonte CC variável (0 - 12V)
mA: Miliamperímetro CC (2mA)
V: Voltímetro CC (20V)
R: Resistência em prova

Figura 1. Circuito experimental para comprovar a Lei de Ohm

A terceira e quarta colunas correspondem, respectivamente, aos valores da queda de tensão (V_R) e à corrente (I_R) na resistência. Para simplificar, registraremos os resultados de 0V até 12V, a cada 3V.

Finalmente, a quinta coluna (V_R/I_R) corresponde ao valor que resulta da divisão da tensão (coluna 3) pela corrente (coluna 4). Se as medidas foram realizadas cuidadosamente, o valor obtido em cada caso deve ser numericamente igual ao valor real da resistência em teste.

Procedimento

1. Selecione o resistor de 1 k Ω , meça com o ohmímetro seu valor real e o anote na tabela de dados. Por exemplo, $R_t = 1\text{ k}\Omega$; $R_m = 0.994\text{ k}\Omega$.

Materiais necessários

Resistores (1/2W, 5%)

- 1 Resistor de 1 k Ω
- 1 Resistor de 3.3 k Ω
- 1 Resistor de 6.8 k Ω
- 1 Resistor de 10 k Ω

Componentes eletromecânicos

- 1 Fio Nº 22 AWG isolado vermelho de 15 cm de comprimento
- 1 Fio Nº 22 AWG isolado preto de 15 cm de comprimento.
- 1 Protoboard (*)

Instrumentos

- 1 Fonte DC variável (*)
- 1 Multímetro digital

Outros

- 1 Calculadora

(*) Esses módulos podem ser obtidos a partir do Módulo de Ensaio Básico **CEKIT EB-1**, descrito na **Prática Nº 6** da seção **Eletrônica Prática**

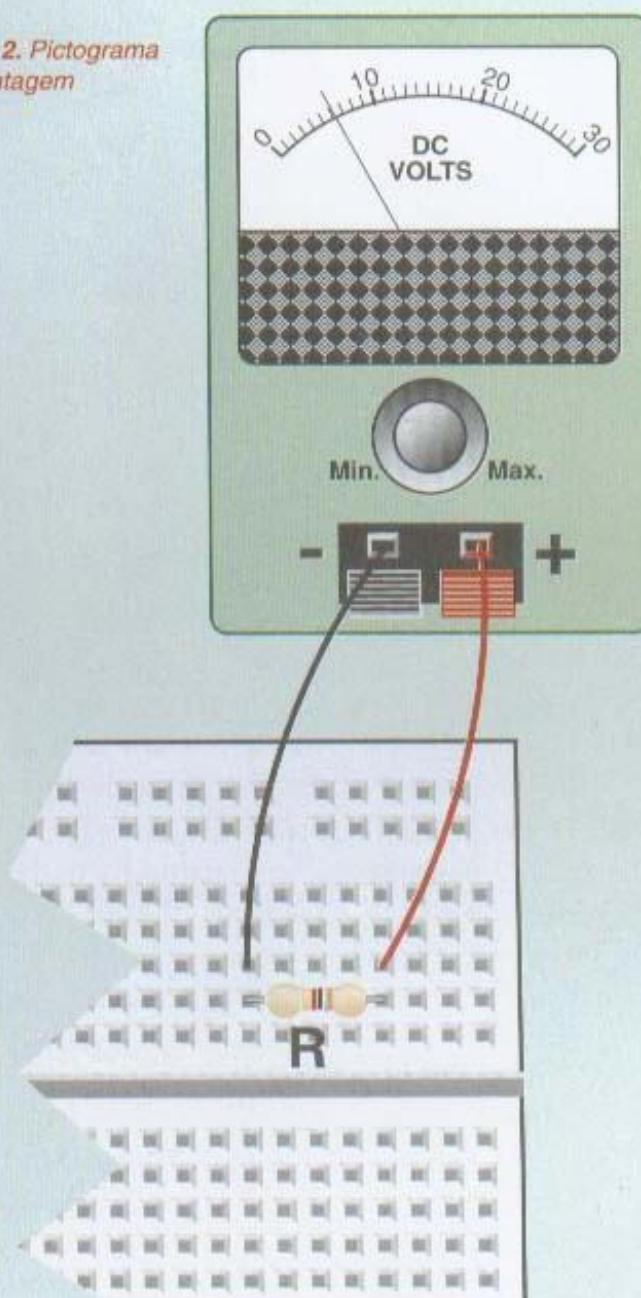
2. Arme sobre o protoboard o circuito da **figura 2**, instalando no lugar de R o resistor previamente selecionada e mantendo a fonte desenergizada.

3. Uma vez completada a montagem, energize a fonte e coloque o controle de tensão da mesma em uma posição intermediária, digamos 6 V.

4. Retire momentaneamente o fio vermelho conectado ao terminal positivo da fonte. Ajuste, então, seu multímetro digital como miliamperímetro CC.

5. Meça a corrente através do circuito, conectando o amperímetro conforme indicado na **figura 3**. Gire, então, lentamente o controle de

Figura 2. Pictograma da montagem



tensão da fonte e observe o que ocorre com a leitura do miliamperímetro. Notará que à medida que aumenta ou diminui a tensão a corrente também aumenta ou diminui. Por quê?

6. Retire o amperímetro e reconecte novamente o fio vermelho de alimentação positiva. Configure, então, seu multímetro como voltímetro CC.

7. Selecione, por meio do controle de tensão da fonte, uma saída de 3V. Verifique se a queda de tensão sobre o resistor possui este valor, conectando o voltímetro conforme indicado na **figura 4**. Manuseie o controle da fonte até que a leitura seja de 3.0V ou aproximada. Espere até que a saída da fonte se estabilize e anote o valor da tensão na tabela de dados.

8. Sem tocar o controle de tensão da fonte, repita as etapas 4 e 5 para medir a corrente que circula através do circuito. Anote esse valor na tabela de dados. Calcule, então, a relação V/I . Consigne este resultado na tabela de dados. O valor obtido deve ser, aproximadamente, igual ao valor real medido do resistor. Por quê?

9. Repita as etapas 6, 7 e 8 para as demais tensões de prova (6V, 9V, 12V) até completar a tabela. Na **figura 5** mostramos um exemplo de ta-

Rt k Ω	Rm k Ω	Vr (V)	Ir (mA)	Vr/Ir (k Ω)
1.0	0.994	2.99	3.00	1.002
1.0	0.994	6.01	6.00	1.002
1.0	0.994	9.01	9.10	0.990
1.0	0.994	12.04	12.06	0.998
Valor médio				0.998

Figura 5. Tabela de resultados

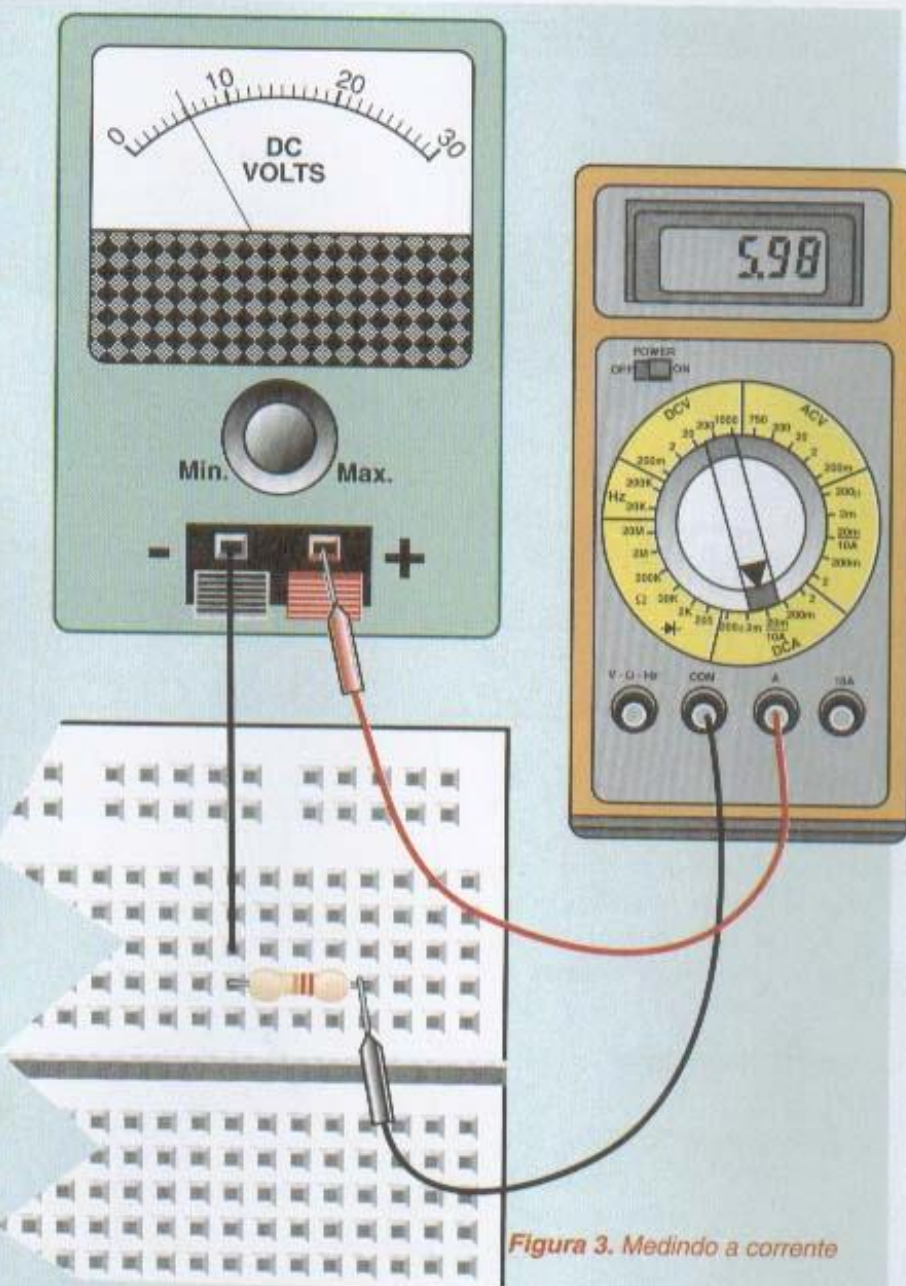


Figura 3. Medindo a corrente

bela de resultados. Esses dados foram obtidos em um experimento real, utilizando a fonte variável do módulo de ensaio **CEKIT EB-1**, um resistor comum de carbono de 1k Ω /5%/0.25W e um multímetro digital Fluke 77. Perceba que o valor da relação V/I não é, em todos os casos, exatamente igual a 0.994 k Ω como era de se esperar. Por quê?

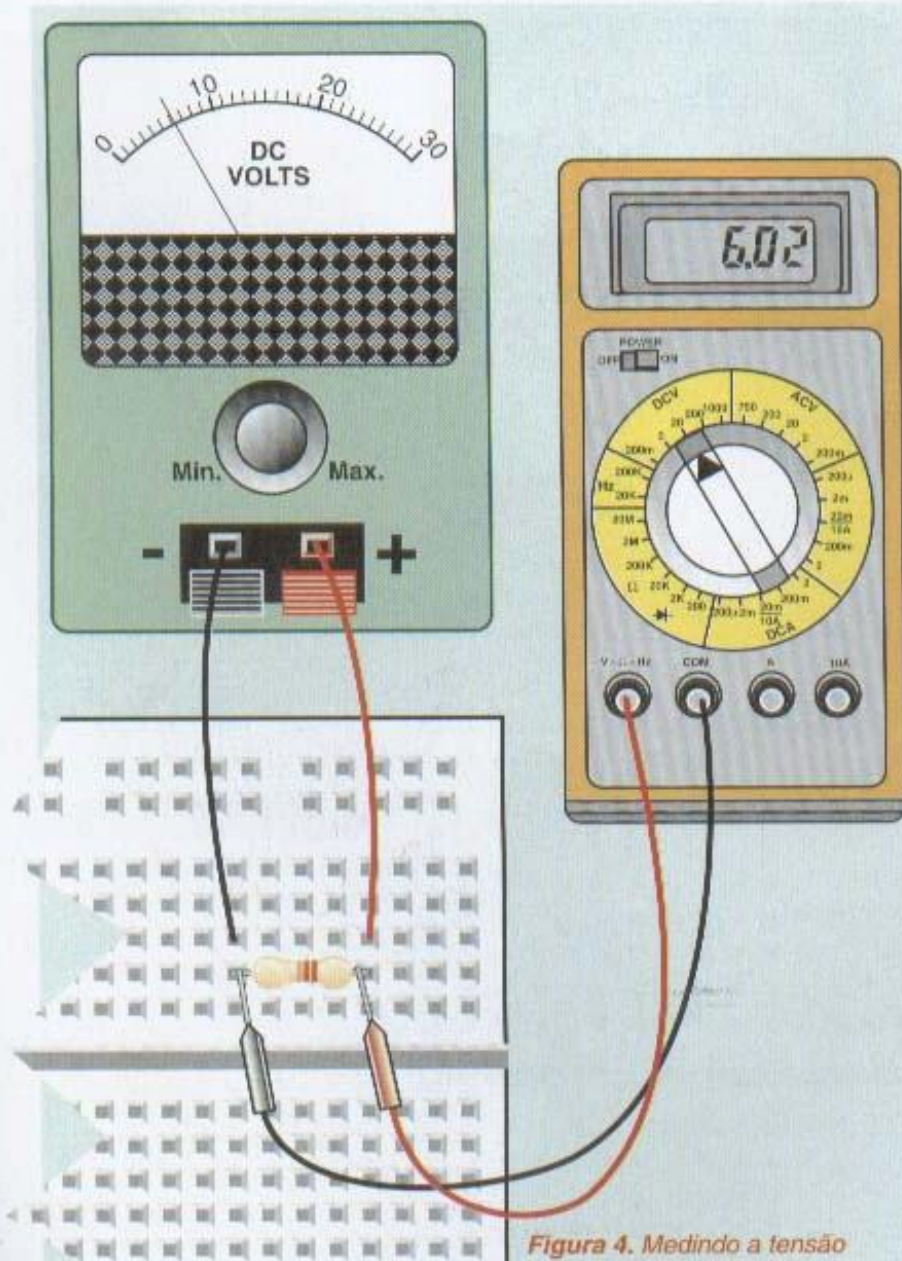


Figura 4. Medindo a tensão

10. Repita as etapas 1 a 9 para os demais valores de resistores relacionados na lista de materiais e analise os resultados obtidos da mesma forma. Você pode também manusear esses resultados de outras maneiras. Por exemplo, podem ser utilizados para analisar o comportamento da corrente com diversos valores de resistência para valores fixos de tensão.

Conclusões

1. Em um resistor, a corrente é diretamente proporcional à tensão aplicada.
2. Em um certo resistor, as mudanças iguais de tensão correspondem mudanças

iguais de corrente. Isto é, se a tensão aumenta ou diminui, a corrente também aumenta ou diminui e na mesma proporção.

3. Em toda medição sempre há um erro ou incerteza inerente, ou seja, uma diferença entre o valor obtido e o valor esperado. Em nosso caso, o erro na medição da relação V/I pode ser avaliado quantitativamente, utilizando a fórmula que aparece abaixo.

O valor esperado é, simplesmente, o valor do resistor em teste e o valor médio, o obtido ao somar todos os resultados parciais e dividir a soma pelo número de amostras (4). O valor médio da relação V/I obtido desta forma é $0.998 \text{ k}\Omega$ o qual, comparado com o valor esperado ($0.994 \text{ k}\Omega$), representa um erro de $\pm 0.40\%$, que é muito aceitável.

São possíveis várias fontes de erro, incluindo a própria exatidão da fonte de alimentação e do instrumento de medida. Também intervem as resistências próprias dos condutores e fatores humanos.

$$\% \text{Erro} = \pm \frac{\text{Valor esperado} - \text{Valor médio}}{\text{Valor esperado}} \times 100$$

5.3.4 Conceito de potência

Ao circular através da matéria, a corrente elétrica produz uma grande variedade de efeitos úteis interessantes, incluindo luz, calor, som, magnetismo, etc. O trabalho realizado por uma corrente elétrica denomina-se **potência**. A potência pode também definir-se como a velocidade ou taxa pela qual um elemento transforma a energia elétrica em outras formas de energia. Em outras palavras, a potência é a mudança de energia por segundo.

A potência é representada com o símbolo "**P**" ou "**p**", dependendo da constância ou da variação com o tempo, e sua unidade de medida é o **watt (W)**. Na prática, além do watt, utilizam-se múltiplos e submúltiplos como o kilowatt (kW), o miliwatt (mW) e o microwatt (μW). A potência pode ser medida diretamente, utilizando-se um instrumento chamado **wattímetro** ou indiretamente utilizando um voltímetro e um amperímetro.

Analiticamente, a potência é o produto da tensão (V) pela corrente (I). Isto é:

$$P = V \times I$$

Uma bateria de 9 V que impulsa uma corrente de 0.5 A através de um circuito, por exemplo, entrega ao mesmo uma potência de $9 \times 0.5 = 4.5\text{W}$.

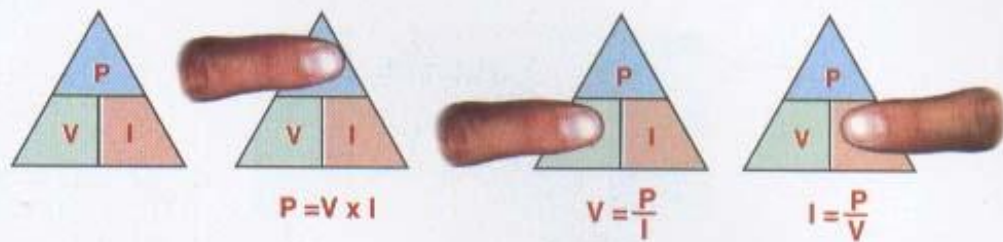


Figura 5.30 Triângulo de potência. É utilizado como o triângulo da Lei de Ohm. Simplesmente cubra a grandeza de interesse (P, V ou I) e realize a multiplicação ou divisão que estiver indicada.

A fórmula anterior permite também deduzir a tensão quando se conhece a potência e a corrente, assim como a corrente quando se conhece a potência e a tensão. Estas relações se resumem graficamente na **figura 5.30**. Por exemplo, a corrente que circula através de uma lâmpada de 75 W conectada a uma fonte de 120 V é $75/120 = 0.625$ A, ou seja, 625 mA.

Relações de potência em resistências. No caso de cargas puramente resistivas, que transformam toda a energia fornecida aos mesmos em calor, a potência dissipada pode ser também avaliada mediante as seguintes fórmulas:

$$P = I^2 \times R$$

$$P = V^2/R$$

Nestas equações, R (Ω) é a resistência do elemento, I (A) a sua corrente através e V (V) a tensão ou a diferença de potencial aplicada entre seus terminais.

Por exemplo, a potência dissipada por um resistor de 220 e submetido a uma tensão de 12

V é $P = 12^2/220 = 144/220 = 0.65$ W. Se o resistor está especificado para uma potência nominal de 0.25 W (1/4 W), uma dissipação da potência como a calculada (0.65 W) causa o superaquecimento do componente e possivelmente sua destruição.

Todas as relações possíveis entre a potência (P), a corrente (I), a tensão (V) e a resistência (R) se resumem na "roda de equações" da **figura 5.31**. Note que cada quadrante corresponde a uma variável. As equações associadas a um mesmo quadrante são equivalentes entre si e permitem avaliar um parâmetro qualquer quando se conhece dois dos três restantes.

Conversões para a potência. Em todo circuito existem elementos que distribuem potên-

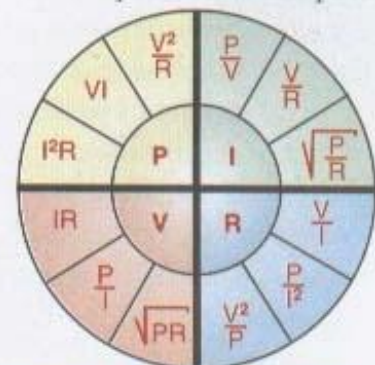


Figura 5.31 Roda de equações

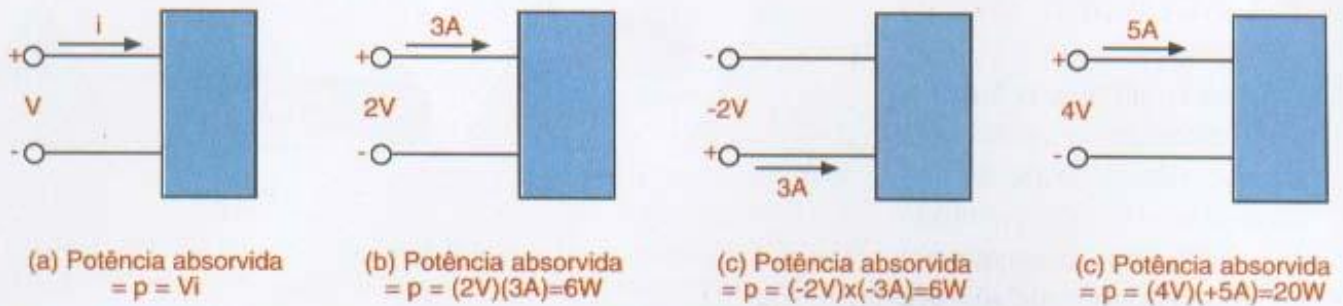


Figura 5.32 Convenções para a polaridade da potência. (a) A potência absorvida pelo elemento é $p=vi$. (b) e (c) O elemento absorve 6W. (d) O elemento distribui 20W

cia a outros e elementos que a recebem de outros. Para determinar se um elemento está absorvendo ou distribuindo potência, podemos seguir estas regras:

1. Destinamos arbitrariamente uma polaridade “+/-” à tensão entre os terminais do elemento e medimos ou calculamos de acordo com esta conversão o valor algébrico da tensão “v” do terminal “+” com relação ao terminal “-”.
2. Assumimos que a corrente “i” entra no elemento pelo terminal “+” e medimos ou calculamos seu valor algébrico de acordo com essa conversão.
3. Realizamos o produto algébrico “ $p=vi$ ”. Se este produto é **positivo**, o elemento considerado está **absorvendo** potência. Isto acontece quando “v” e “i” são ambos positivos ou ambos negativos. Se o produto “vi” é **negativo**, o elemento considerado está **distribuindo** potência. Isto acontece quando “v” é positivo e “i” é negativo, ou quando “v” é negativo e “i” é positivo.

Na **figura 5.32** ilustramos graficamente essas conversões. Na (a), o terminal superior é “v” volts positivo com relação ao terminal inferior e a corrente “i” que entra é positiva. Portanto, o elemento está absorvendo ou está sendo distribuída uma potência “ $p=vi$ ”.

Em (b), $V=2V$ e $I=3A$. Portanto, $VI=2 \times 3 = 6W$ (potência absorvida). Em (c), $V=-2V$ e $I=-3A$. Portanto, $VI=(-2) \times (-3) = 6W$ (potência absorvida). Em (d), $V=4V$ e $I=-5A$. Portanto, $VI=(4) \times (-5) = -20W$ (potência absorvida).

duas regras universais muito simples, conhecidas como as **Leis de Kirchhoff**, denominadas assim em homenagem ao físico alemão Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887), que as postulou em 1847.

As leis de Kirchhoff oferecem um método sistemático de análise de todo tipo de circuitos e são a base dos programas de simulação de circuitos por computador. A primeira dessas leis está relacionada com o comportamento das correntes nos **nós** e a segunda com o comportamento das tensões ao redor das malhas.

5.3.5 Leis de Kirchhoff

O comportamento quantitativo das correntes e das tensões em um circuito é regido por

Primeira lei de Kirchhoff. A **Lei das Correntes de Kirchhoff** (LKC) estabelece que a soma algébrica das corren-

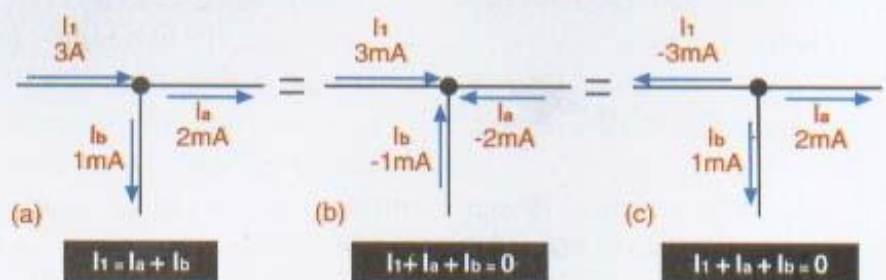


Figura 5.33 Lei das correntes de Kirchhoff

tes que entram em um nó em um dado instante é sempre igual à soma algébrica das correntes que saem nesse instante.

Em eletrônica, um **nó** é um ponto comum de conexão de três ou mais elementos. Na **figura 5.33** ilustra-se essa regra. Neste caso, no nó considerado entra a corrente I_1 e saem as correntes I_a e I_b . Portanto, de acordo com a Lei das correntes de Kirchhoff deve cumprir-se a seguinte identidade:

$$I_1 = I_a + I_b$$

$$3.0 \text{ mA} = 2.0 \text{ mA} + 1.0 \text{ mA}$$

Note que a primeira lei de Kirchhoff está formulada nos finais de somas algébricas. Isto implica que devem ter-se em conta os sinais das correntes. Se assumirmos que **todas** as correntes entram ou saem de um nó, a Lei das correntes de Kirchhoff pede que **a soma algébrica de todas as correntes que entram ou saem de um nó em um dado instante seja sempre igual a zero**.

Desse ponto de vista, a primeira lei de Kirchhoff para qualquer número "N" de correntes que entram ou saem de um nó pode ser representada pela seguinte expressão generalizada:

$$I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_N = 0$$

Um método conveniente para evitar confusões quando se aplica a primeira lei de Kirchhoff desta maneira, é considerar todas as correntes que entram em um nó como positivas e todas as que saem dele como negativas. Neste ponto de vista, uma corrente de $+2\text{A}$ entrando em um nó é equivalente a uma corrente de -2A saindo dele, e vice-versa (ver o **Exercício 5.1**).

Segunda lei de Kirchhoff. A Lei das Tensões de Kirchhoff (LKV), por sua vez, estabelece que **a soma algébrica das quedas de tensão ao redor de uma malha (malla) é sempre igual à soma algébrica das forças eletromotrizes ao redor da mesma**.

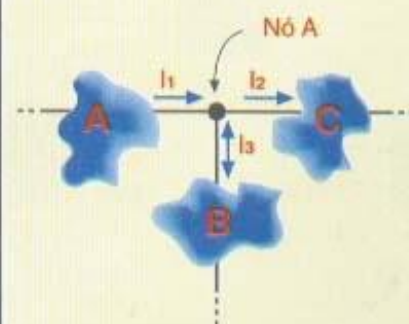
Na eletrônica, uma **malha** ou **circuito** (*loop*) é qualquer trajetória fechada que começa e termina em um mesmo ponto, mas não passa mais de uma vez por um mesmo ponto. Na **figura 5.34** ilustramos essa regra. Para este circuito, a Lei das tensões de Kirchhoff diz que

$$V_1 + V_2 = V_3$$

$$12\text{V} + 1.5\text{V} = 13.5\text{V}$$

Note novamente que a segunda lei de Kirchhoff está formulada em termos de somas algébricas. Isso implica que devem levar-se em conta as polaridades das tensões. Se assumimos que todas as tensões

Exercício 5.1 No circuito da figura, os objetos identificados como A, B e C representam elementos gerais de dois terminais, um para a entrada da corrente e outro para sua saída, que podem ser componentes individuais ou subcircuitos completos. Determine o valor e a direção da corrente I_3 .



Resposta. -3mA saindo do nó "A" ou $+3\text{mA}$ entrando no mesmo nó.

Solução. O problema proporciona o valor e a direção convencional das correntes I_1 e I_2 . Posto que ambos os valores são positivos, a corrente I_1 está efetivamente entrando no nó "A" e a corrente I_2 está efetivamente saindo do mesmo, conforme mostrado no diagrama. A corrente I_3 pode estar entrando ou saindo do nó. Se assumimos que I_3 está saindo, a aplicação da primeira Lei de Kirchhoff no nó "A" conduz à seguinte equação algébrica:

$$I_1 = I_2 + I_3$$

Substituindo valores:

$$87 \text{ mA} = 90 \text{ mA} + I_3$$

Portanto:

$$I_3 = 87 \text{ mA} - 90 \text{ mA}$$

Ou seja:

$$I_3 = -3 \text{ mA}$$

ao redor de uma malha têm a mesma polaridade, a Lei das tensões de Kirchhoff estabelece que **a soma algébrica de todas as tensões ao redor de uma trajetória fechada é sempre zero.**

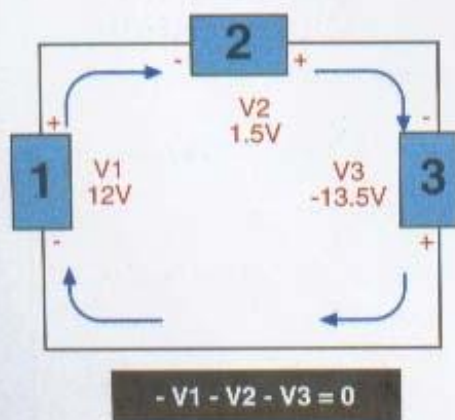
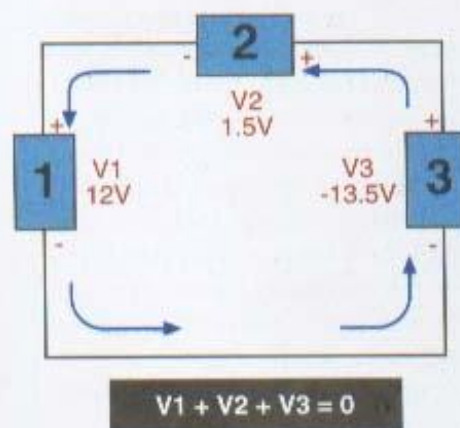
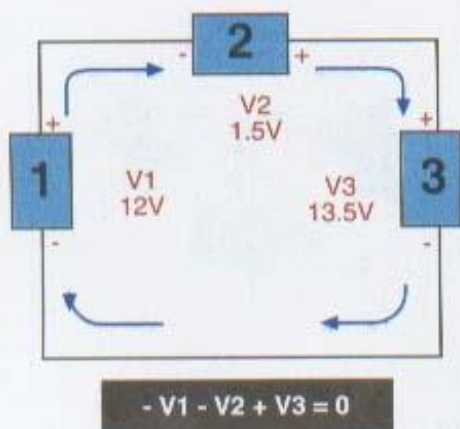


Figura 5.34 Ilustração da Lei das tensões de Kirchhoff

Desse ponto de vista, a segunda lei de Kirchhoff para qualquer número "N" de tensões em torno de uma malha ou circuito pode ser representada pela seguinte expressão generalizada:

$$V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_N = 0$$

Para evitar confusões ao determinar o sinal das tensões quando se aplica a lei de Kirchhoff desta forma, é conveniente seguir estas regras:

1. Identifique para cada elemento da malha a polaridade e o valor da tensão correspondente. Este último pode ser positivo ou negativo ("+" ou "-") esta em um potencial mais alto ou mais baixo que o terminal marcado como negativo ("-").

A designação da polaridade é, até certo ponto, arbitrária. Contudo, enquanto não se indique outra coisa, assume-se que o valor de tensão especificado é o do terminal "+" com relação ao terminal "-".

2. Percorra mentalmente a malha em um mesmo sentido partindo de qualquer ponto. Considere, então, como positivas todas as tensões sobre os elementos cujo terminal marcado "+" se encontre primeiro que seu terminal marcado "-",

e como negativas todas as demais. Este critério aplica-se tanto a forças eletromotrizes como a quedas de tensão.

Na figura 5.35 mostramos um exemplo de aplicação das Leis de Kirchhoff para um circuito resistivo simples. Neste circuito existem dois nós propriamente ditos (b e d), três malhas internas (abda, bcd b e abca) e uma malha externa (abcd a). Tanto as malhas como as supermalhas são trajetórias fechadas, porém estas últimas caracterizam-se por conter outras malhas em seu interior.

De acordo com a Lei das correntes de Kirchhoff, devem cumprir-se as seguintes identidades:

Nó "b"

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

Nó "d"

$$-I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

Note que essas equações são idênticas do ponto de vista algébrico. Em nosso caso, $I_1=3.99 \text{ mA}$, $I_2=3.64 \text{ mA}$ e $I_3=0.35 \text{ mA}$. Esses valores podem ser determinados matematicamente ou medidos na prática sobre o circuito físico.

Recolocando os valores obtidos nas equações anteriores você pode verificar o

cumprimento da primeira lei de Kirchhoff em cada um dos nós. Por exemplo, para o nó "b":

$$3.99 - 3.64 - 0.35 = 0 \text{ mA}$$

Assim mesmo, de acordo com a Lei das tensões de Kirchhoff devem cumprir-se as seguintes identidades:

Malha "abda":

$$-V_{ad} + V_{ab} + V_{bd} = 0$$

Malha "bcd b":

$$V_{bc} + V_{cd} - V_{bd} = 0$$

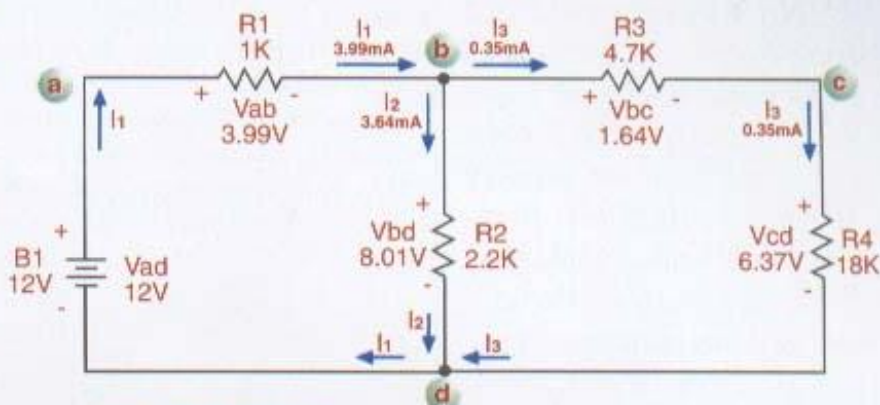
Malha "abcda":

$$V_{ab} + V_{bc} + V_{cd} - V_{ad} = 0$$

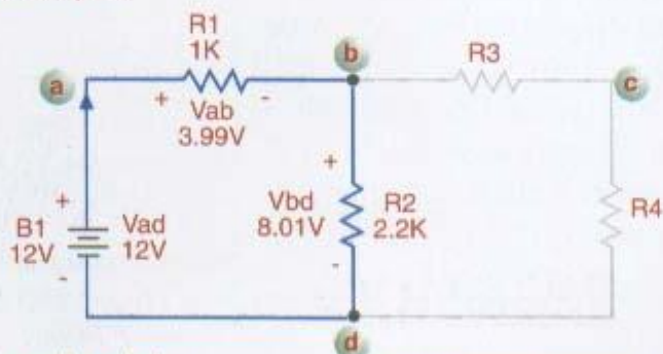
No nosso caso, $V_{ad}=12 \text{ V}$, $V_{ab}=3.99 \text{ V}$, $V_{bd}=8.01 \text{ V}$, $V_{bc}=1.64 \text{ V}$ y $V_{cd}=6.37 \text{ V}$. Novamente, esses valores podem ser calculados matematicamente ou medidos na prática sobre o circuito físico. Neste último caso, devemos ter em conta as quedas de tensão nos condutores.

Recolocando os valores obtidos nas equações anteriores, você pode verificar o cumprimento da Lei das tensões de Kirchhoff em cada uma das malhas consideradas. Por exemplo, para a malha **abcda**:

$$3.99 + 1.64 + 6.37 - 12.0 = 0$$

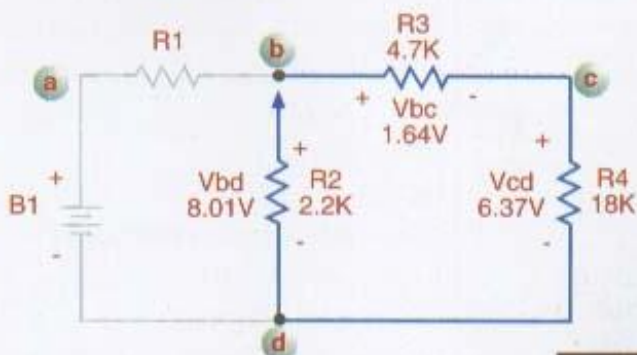


(a) Circuito completo



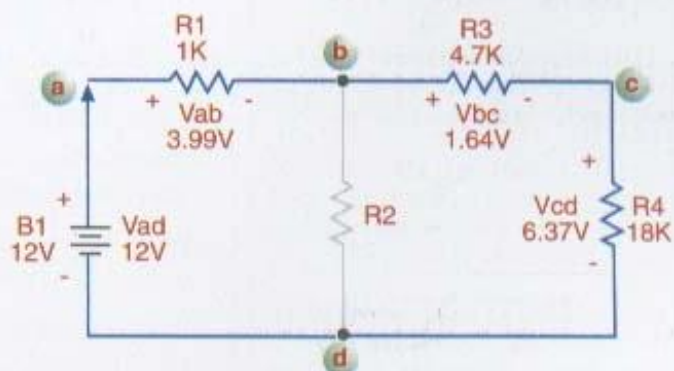
(b) Detalhe da malha abda

$$-V_{ad} + V_{ab} + V_{bd} = 0$$



(c) Detalhe da malha bcd b

$$V_{bc} + V_{cd} - V_{bd} = 0$$



(d) Detalhe da supermalha abcda

$$V_{ab} + V_{bc} + V_{cd} - V_{ad} = 0$$

Figura 5.35 Exemplo de aplicação das Leis de Kirchhoff

No **Experimento 5.2** comprovaremos na prática as **Leis de Kirchhoff** sobre um circuito resistivo mais elaborado. Isso não implica que as Leis de Kirchhoff sejam válidas unicamente para circuitos resistivos. De fato, são válidas para **qualquer** tipo de circuito eletrônico, como veremos mais adiante. Neste sentido, as Leis de Kirchhoff são mais universais que a Lei de Ohm, a qual aplica-se exclusivamente a elementos e circuitos lineares.

Valores comerciais de resistores

Devido ao fato de que em eletrônica geralmente não se requerem valores exatos de resistência e com o fim de simplificar os processos de manufatura e armazenamento, os resistores fixos são fabricados em grandes quantidades com valores de resistência específicos chamados **valores preferidos**. Isto traz como consequência que os resistores sejam econômicos e fáceis de se obter. Por exemplo, os valores preferidos para resistores de carbono com uma tolerância de 5% (última **banda dourada**) são:

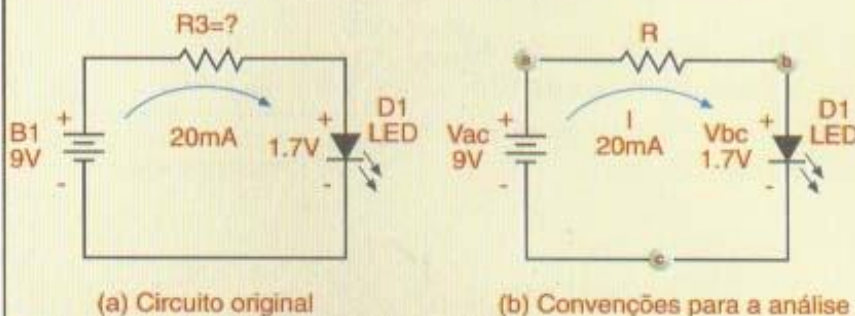
10Ω, 11Ω, 12Ω, 13Ω, 15Ω, 16Ω, 18Ω, 20Ω, 22Ω, 24Ω, 27Ω, 30Ω, 33Ω, 36Ω, 39Ω, 43Ω, 47Ω, 51Ω, 56Ω, 62Ω, 68Ω, 75Ω, 82Ω e 91Ω, com todos seus múltiplos e submúltiplos decimais desde 0.1Ω até 91MΩ.

Os resistores com uma tolerância de 10% (última **banda prateada**), por sua vez, são fabricados nos seguintes valores:

10Ω, 12Ω, 15Ω, 18Ω, 22Ω, 27Ω, 33Ω, 39Ω, 47Ω, 56Ω, 68Ω e 82Ω, com todos seus múltiplos e submúltiplos decimais desde 0.1Ω até 82MΩ.

Existem outras séries de valores preferidos para resistores especiais, porém as de 5% (chamada **E24**) e as de 10% (chamada **E12**) são as mais comuns e utilizadas. Um critério similar aplica-se para os capacitores ou condensadores.

Exercício 5.2 No circuito da figura (a), o resistor R limita a corrente através do LED a um valor seguro. Se esta resistência é muito alta, o brilho do LED é muito fraco e se é muito baixa, o LED pode chegar a destruir-se. Assumindo que sobre o LED sempre existe uma queda de tensão de 1.7 V, determine: (a) O valor de resistência de R necessário para limitar a corrente do LED a 20 mA, aproximadamente. (b) A potência dissipada por R sob estas condições. A máxima corrente admissível pelo LED é de 35 mA.



Resposta. (a) 365 Ω. (b) 0.146 W. Pode-se utilizar um resistor comercial de 360Ω, 5%, 1/4 W (ver o quadro da página 114).

Solução. Designando as tensões sobre cada elemento da malha conforme indicado na figura (b) e aplicando a segunda Lei de Kirchhoff se obtém a seguinte relação:

$$-V_{ac} + V_{ab} + V_{bc} = 0$$

Em nosso caso, $V_{ac} = 9\text{ V}$ (fem da bateria) e $V_{bc} = 1.7\text{ V}$ (queda de tensão sobre o LED). Portanto, a queda de tensão sobre a resistência R (V_{ab}) é, simplesmente:

$$V_{ab} = V_{ac} - V_{bc} = 9 - 1.7 = 7.3\text{ V}$$

De acordo com a Lei de Ohm, esta tensão deve ser igual ao produto da corrente I (20 mA ou 0.020 A) pela resistência R. Isto é:

$$V_{ab} = I \times R$$

Portanto, o valor de R deve ser

$$R = V_{ab}/I = 7.3\text{ V}/20\text{ mA} = 0.365\text{ k}\Omega = 365\text{ }\Omega$$

A potência absorvida por este resistor e dissipada em forma de calor, que designaremos como P_R , é simplesmente o produto da queda de tensão sobre a mesma ($V_{ab}=7.3\text{ V}$) e a corrente que passa através de si ($I=20\text{ mA}$). Também pode-se calcular utilizando as outras duas relações de potência para uma resistência indicadas na roda de equações da figura 5.31. Isto é:

$$P_R = V_{ab} \times I = 7.3\text{ V} \times 20\text{ mA} = 146\text{ mW} = 0.146\text{ W}$$

$$P_R = (V_{ab})^2 / R = (7.3\text{ V})^2 / 365\Omega = 0.146\text{ W}$$

$$P_R = I^2 \times R = (0.020\text{ A})^2 \times 365\Omega = 0.146\text{ W}$$

Experimento 5.2

5

Comprovação das Leis de Kirchhoff

Objetivos

1. Verificar experimentalmente as leis das correntes de Kirchhoff e das tensões
2. Aprender a realizar e interpretar medidas de corrente e tensão em CC.

Aspectos teórico-práticos preliminares

Neste experimento comprovaremos na prática as Leis de Kirchhoff sobre um circuito resistivo misto como o mostrado na **figura 1**. Os elementos necessários são relacionados na lista de materiais em anexo. Os condutores identificados como JU1A, JU2A, JU3A, etc., correspondem a **jumpers** ou pontes de fio removíveis, cada um dos quais pode ser retirado em um certo momento para abrir deliberadamente o circuito nesse ponto.

Para comprovar a primeira Lei de Kirchhoff mediremos as correntes que entram e saem de cada nó conforme indicado na **figura 2a**. Por exemplo, para medir a corrente I_1 que entra no nó "a" ou sai do nó "d", simplesmente

retiramos o jumper JU1A e conectamos em seu lugar o miliamperímetro com a polaridade mostrada.

De maneira semelhante procedemos com as outras correntes. Os valores obtidos

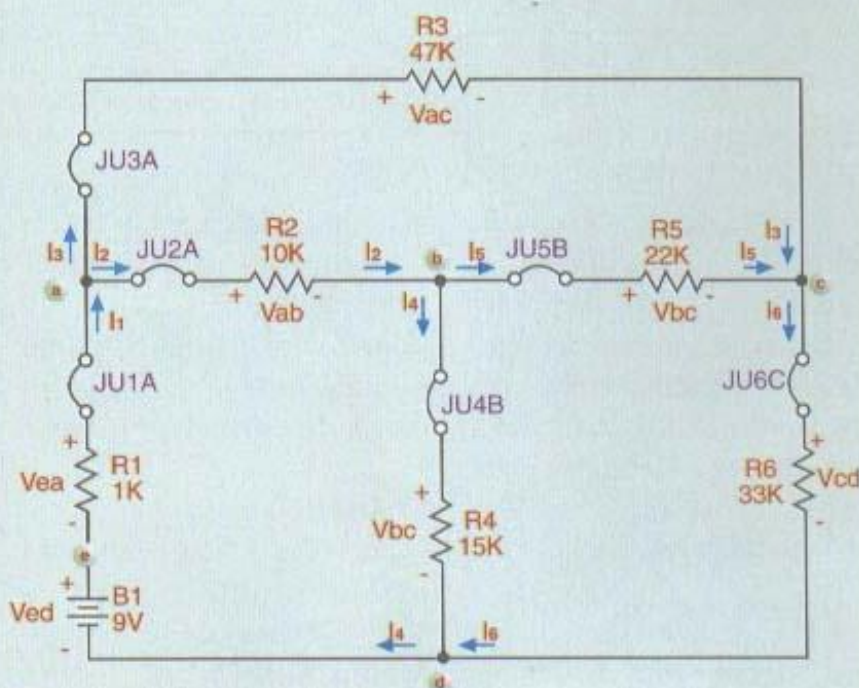


Figura 1. Diagrama esquemático

Lista de materiais

Resistores (1/4 W, 5%)

R1 - 1kΩ
(Marrom, preto, vermelho, dourado)
R2 - 10kΩ
(Marrom, preto, laranja, dourado)
R3 - 47kΩ
(Amarelo, violeta, amarelo, dourado)
R4 - 15kΩ
(Marrom, verde, laranja, dourado)
R5 - 22kΩ
(Vermelho, vermelho, laranja, dourado)
R6 - 33kΩ
(Laranja, laranja, laranja, dourado)

Instrumentos

1 Multímetro digital

Outros

1 Protoboard
1 Bateria de 9V
1 Conector de bateria
12 Pontes de fio Nº
22 AWG de 4 cm
1 Calculadora

são exibidos em uma tabela de resultados para sua interpretação. Em nosso caso, devem ser executadas, como mínimo, as seguintes relações para os três nós principais:

$$\text{Nós "a": } I_1 = I_2 + I_3$$

$$\text{Nós "b": } I_2 = I_4 + I_5$$

$$\text{Nós "c": } I_3 + I_5 = I_6$$

Para comprovar a segunda lei de Kirchhoff mediremos as tensões sobre cada componente conforme indicado na **figura 2b**. Por exemplo, para medir a queda de tensão sobre R2 conectamos o voltímetro entre os nós "a" (ponta positiva) e "b" (ponta negativa).

De maneira semelhante procedemos com as demais tensões. Os valores obtidos

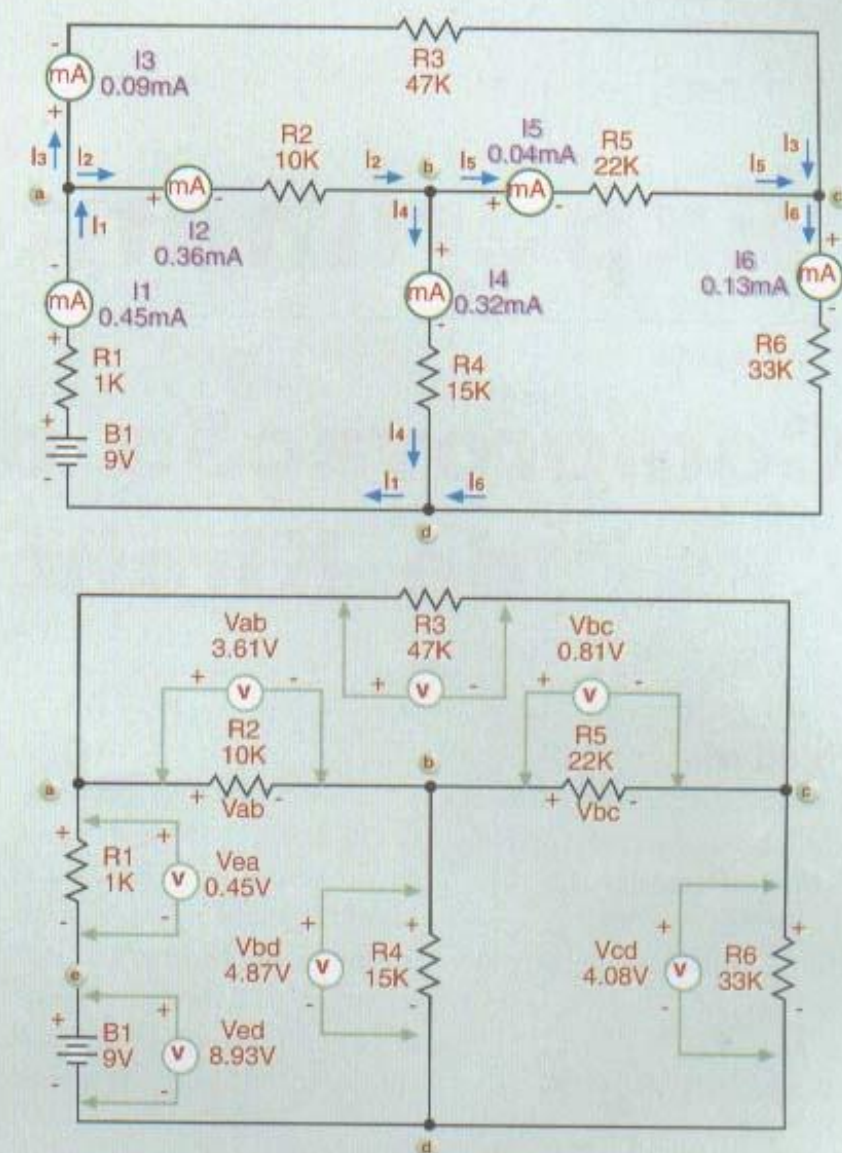


Figura 2. Medições a realizar

(a) Medições de corrente. (b) Medições de tensão. Os valores indicados foram obtidos em um experimento típico e servem apenas como referência.

são exibidos em uma tabela de resultados para sua interpretação. Em nosso caso, devem ser executadas, como mínimo, as seguintes relações para as três malhas principais:

Malha "abdea":

$$-V_{ed} + V_{ae} + V_{ab} + V_{bd} = 0$$

Malha "bcdcb":

$$V_{bc} + V_{cd} - V_{bc} = 0$$

Malha "acba":

$$V_{ac} - V_{bc} - V_{ab} = 0$$

Procedimento

1. Arme sobre o protoboard o circuito da **figura 3**. Note a utilização de cores distintas para identificar os condutores que constituem cada um dos nós do circuito.
2. Configure seu multímetro como miliamperímetro CC na escala de 2 mA. Sea cuidadoso neste aspecto.

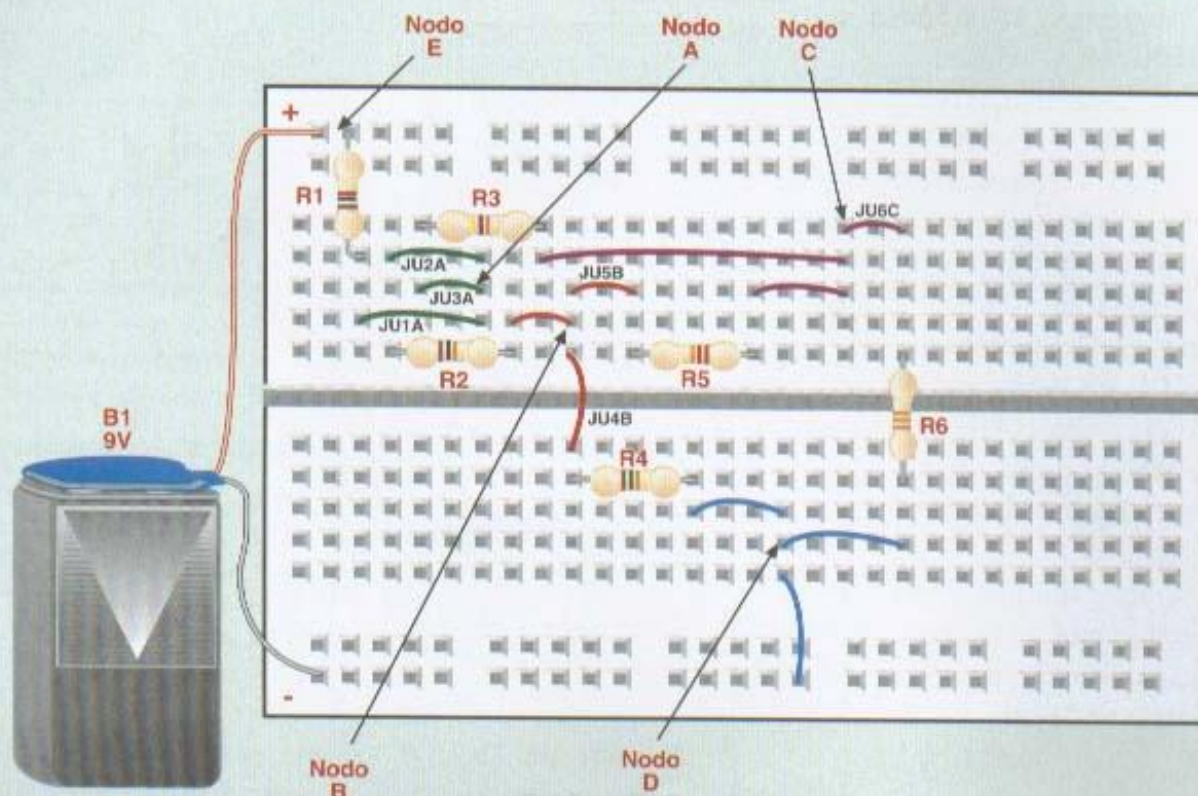


Figura 3. Pictograma de montagem

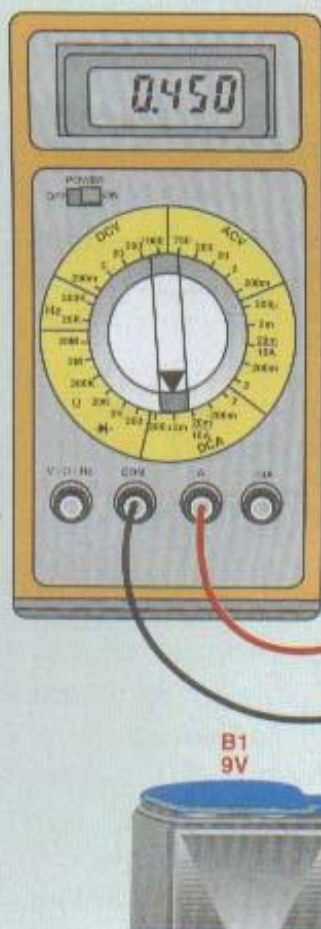


Figura 4. Medindo I_1

3. Meça a corrente I_1 que entra no nó "a" retirando a ponte marcada como JU1A e instalando em seu lugar o miliamperímetro como se indica na figura 4. Anote o valor obtido.

4. Meça a corrente I_2 que sai do nó "a" retirando a ponte marcada como JU2A e instalando em seu lugar o miliamperímetro conforme indicado na figura 5. Anote o valor obtido.

5. Meça a corrente I_3 que sai do nó "a" retirando a ponte marcada como JU3A e instalando em seu lugar o miliamperímetro conforme indicado na figura 6. Anote o valor obtido.

6. Recoloque os valores obtidos para I_1 , I_2 e I_3 na equação de correntes para o nó "a" com o fim de comprovar a validade da primeira lei de Kirchhoff nesse ponto. Em nosso caso,

$I_1=0.45\text{mA}$, $I_2=0.36\text{mA}$ e $I_3=0.09\text{mA}$. Portanto:

$$I_1 = I_2 + I_3$$

$$0.45 = 0.36 + 0.09$$

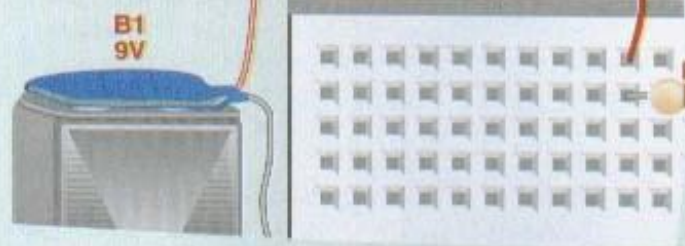
7. Aplique um procedimento semelhante ao seguido na etapa 3 para medir a corrente I_5 que entra no nó "c". Anote o valor obtido em sua tabela de dados. Em nosso caso, $I_5=0.04\text{ mA}$.

8. Aplique um procedimento semelhante ao seguido nas etapas 4 e 5 para medir a corrente I_4 que sai do nó "b" e a corrente I_6 que sai do nó "c". Anote os valores obtidos em sua tabela de dados. Em nosso caso, $I_4=0.32\text{ mA}$ e $I_6 = 0.13\text{ mA}$.

9. Aplique um procedimento semelhante ao da etapa 6 para comprovar a lei das



Figura 6. Medindo I_3



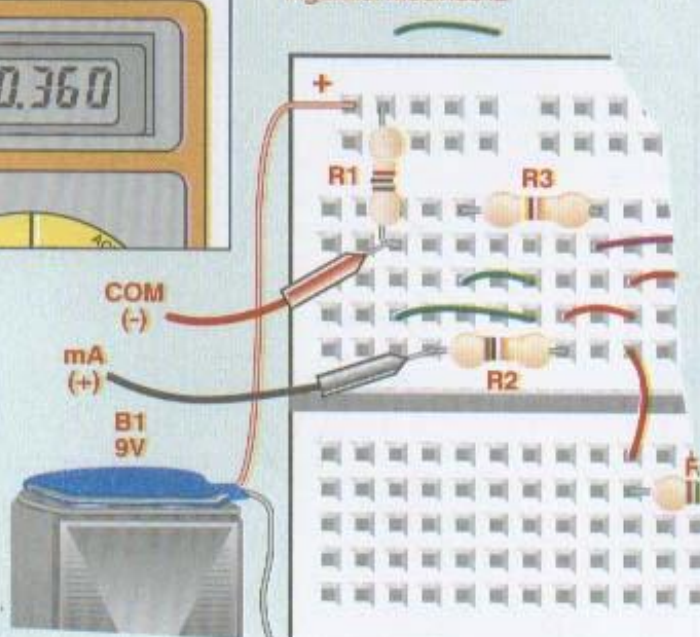
correntes nos nós "b", "c" e "d". Em nosso caso, por exemplo, para o nó "c":

$$I_3 + I_5 = I_6$$

$$0.09 + 0.04 = 0.13$$

10. Uma vez comprovada a primeira Lei de Kirchhoff para todos os nós, progra-

Figura 5. Medindo I_2



me seu multímetro digital como voltímetro CC na escala de 20 V. Proceda, então, à verificação da segunda lei de Kirchhoff para as malhas principais. Inicialmente realizaremos a comprovação correspondente sobre a malha "abda".

11. Meça a tensão V_{ed} da bateria B1 conectando o voltímetro conforme indicado na figura 7. Anote o valor obtido. Em nosso caso, $V_{ed}=8.93\text{ V}$.

12. Meça a tensão V_{ea} sobre o resistor R1 conectando o voltímetro conforme indicado na figura 8. Anote o valor obtido. Em nosso caso, $V_{ea}=0.45\text{ V}$.

13. Meça a tensão V_{ab} sobre o resistor R2 conectando o voltímetro conforme indica-

do na **figura 9**. Anote o valor obtido. Em nosso caso, $V_{ab}=3.61\text{ V}$.

14. Meça a tensão V_{bd} sobre o resistor R_4 conectando o voltímetro conforme indicado na **figura 10**. Anote o valor obtido. Em nosso caso, $V_{bd}=4.87\text{ V}$.

15. Recoloque os valores obtidos para V_{ed} , V_{ea} , V_{ab} e V_{bd} na equação de tensões para a malha "abdea". Com o fim de comprovar a validade da segunda lei de Kirchhoff para essa malha. Em nosso caso, percorrendo a malha em sentido horário:

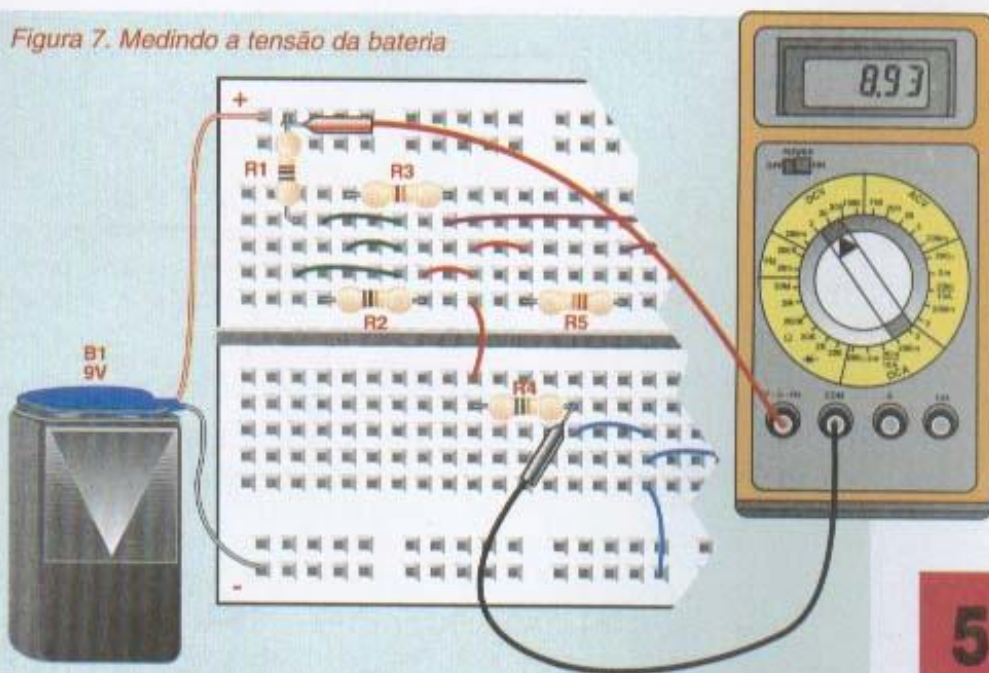
$$\begin{aligned} -V_{ed} + V_{ea} + V_{ab} + V_{bd} &= 0 \\ -8.93 + 0.45 + 3.61 + 4.87 &= 0 \end{aligned}$$

16. Aplique um procedimento semelhante ao seguido nas etapas 12, 13 e 14 para medir as tensões V_{ac} , V_{bc} e V_{cd} . Anote os valores obtidos na tabela de dados. Em nosso caso, $V_{ac}=4.42\text{ V}$, $V_{bc}=0.81\text{ V}$ e $V_{cd}=4.08\text{ V}$.

17. Aplique um procedimento semelhante ao seguido na etapa 15 para comprovar o cumprimento da Lei de Kirchhoff das tensões nas duas malhas principais restantes. Em nosso caso, por exemplo, para a malha "acba":

$$\begin{aligned} V_{ac} - V_{bc} - V_{ab} &= 0 \\ 4.42\text{V} - 0.81\text{V} - 3.61\text{V} &= 0 \end{aligned}$$

Figura 7. Medindo a tensão da bateria



Leve em conta que além das três malhas principais, no circuito é possível, também, definir várias malhas externas. Por exemplo, para a malha externa «abdcdea», a aplicação da segunda lei de Kirchhoff conduz ao seguinte resultado:

$$V_{ab} + V_{bc} + V_{cd} - V_{ed} + V_{ea} = 0.02$$

Note que, neste caso, o valor real obtido (0.02 V) não é exatamente igual ao valor teórico esperado (0V), porém é suficientemente aproximado para ser confiável. A diferença pode ser atribuída, por exemplo, ao efeito de carga do instrumento, às quedas de tensão nos condutores e outros fatores que, normalmente, se ignoram nas análises teóricas.

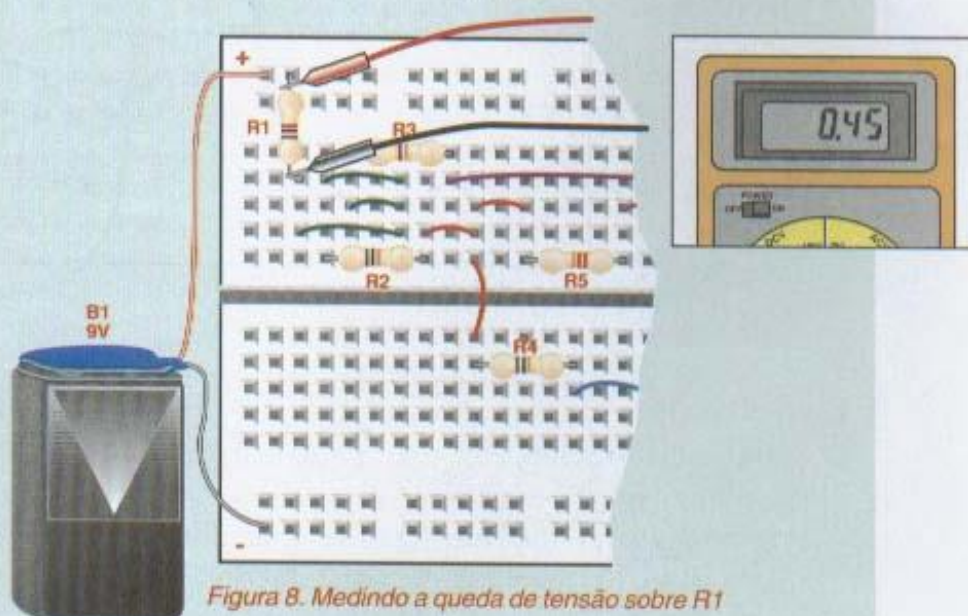


Figura 8. Medindo a queda de tensão sobre R_1

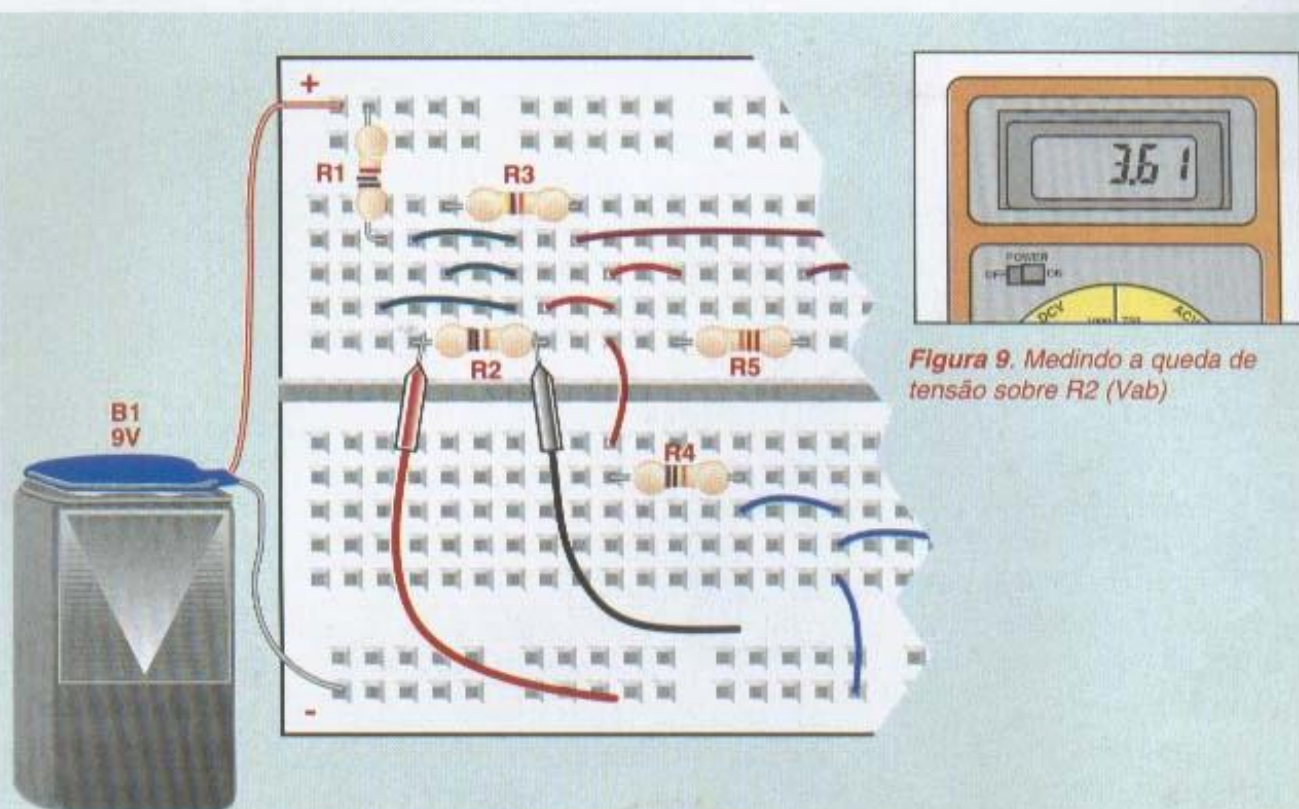


Figura 9. Medindo a queda de tensão sobre R2 (V_{ab})

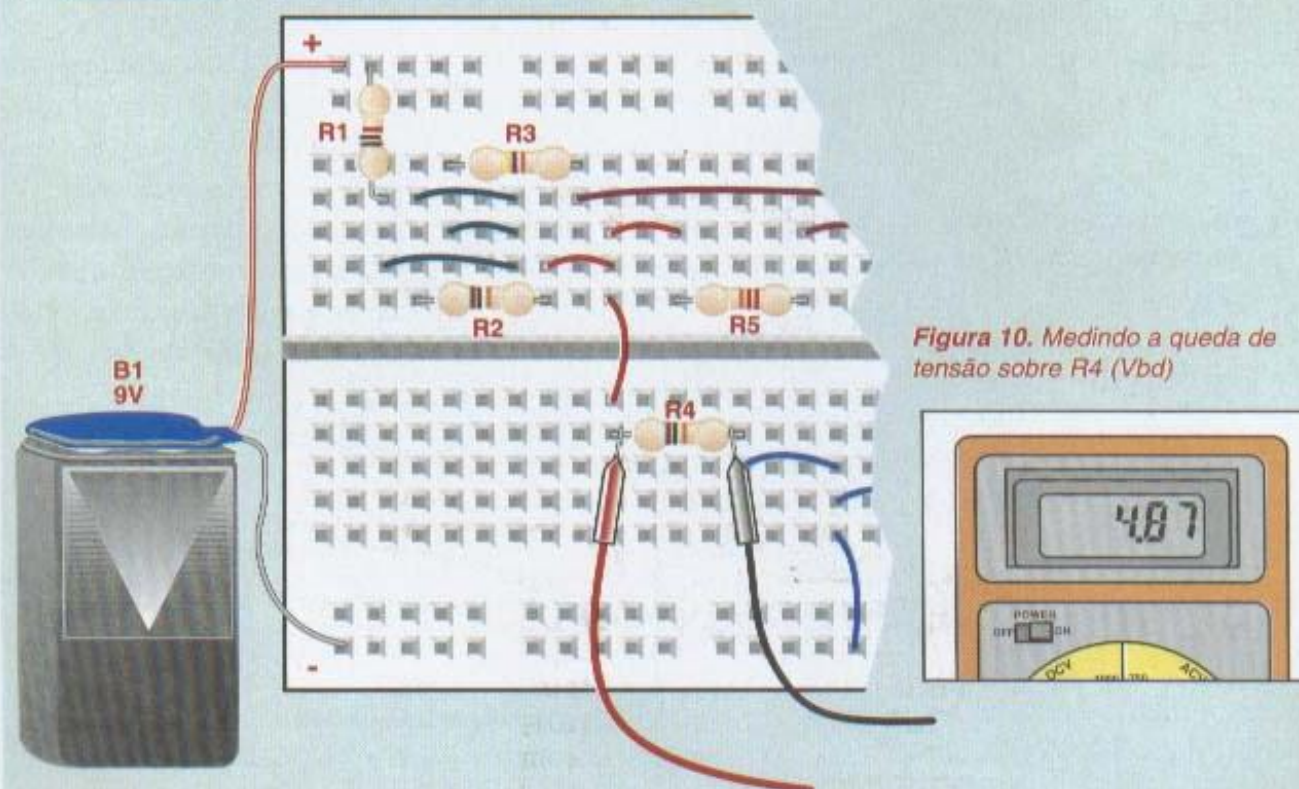


Figura 10. Medindo a queda de tensão sobre R4 (V_{bd})

Conclusões

1. A soma algébrica das correntes que entram em um nó qualquer é igual à soma algébrica das correntes que saem do mesmo.
2. A soma algébrica das tensões ao redor de uma trajetória fechada qualquer de um circuito é sempre igual a zero.
3. Em todo experimento sempre existe uma incerteza ou erro nos resultados obtidos, devido ao fato de se trabalhar com elementos reais.

5.4 Circuitos CC

Os circuitos que temos analisado até o momento chamam-se **CC** ou **estáticos** porque utilizam como força eletromotriz uma tensão CC contínua, ou seja, que não varia de magnitude nem de polaridade com o tempo. Além disso, uma vez que temos assumido cargas resistivas, as correntes e as tensões são também contínuas, tanto em magnitude como em sentido.

Uma situação mais geral e interessante apresenta-se quando são introduzidas fontes CA e elementos armazenadores de energia como capacitores e bobinas. Sob estas condições, as correntes e tensões do circuito variam permanentemente de magnitude e polaridade. Os circuitos com esta característica denominam-se **circuitos CA** ou **dinâmicos**.

A grande maioria dos circuitos eletrônicos práticos trabalham tanto com níveis CC como com sinais CA. Portanto, devem ser analisados do ambas perspectivas, ou seja, como circuitos CC e como circuitos CA.

5.4.1 Elementos gerais dos circuitos CC e CA

Praticamente todos os circuitos eletrônicos, independentemente de sua complexidade ou da variedade de componentes utilizados, são, em última instân-

cia, o resultado da combinação de fontes de tensão e/ou de corrente com resistores, indutâncias e/ou capacitâncias. Cada um destes elementos gerais, que pode representar um componente real, um circuito completo, uma parte de um circuito ou um fenômeno físico, está caracterizado completamente por sua relação tensão-corrente.

Continuando, descrevemos brevemente esses elementos do ponto de vista de seu comportamento ideal, ou seja, como **modelos matemáticos**. Um modelo matemático é, simplesmente, uma representação simplificada e idealizada de um objeto físico que nos permite prever de, forma aproximada, como se comporta no mundo real, prescindindo de suas características construtivas.

Por exemplo, os condutores como fios, trilhos etc., utilizados nos circuitos possuem sempre um certo resistor. Todavia, normalmente a ignoramos, assumindo que não existe ou é desprezível. Portanto, nosso modelo matemático de um condutor é um resistor de $0\ \Omega$.

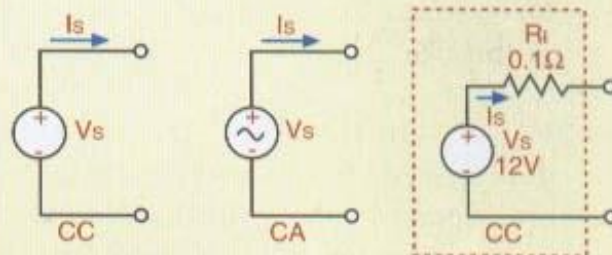
Fontes de tensão.

Uma **fonte de tensão**, figura 5.36, é um elemento caracterizado porque a tensão entre seus

terminais (v_s) é completamente independente da corrente (i_s) através de si. Deste ponto de vista, uma fonte de tensão possui idealmente um resistor interna igual a zero e é capaz de suportar uma corrente infinita.

As fontes de tensão com estas características obviamente não existem na realidade, porém constituem uma boa aproximação ao comportamento exibido em um circuito pelas fontes de tensão reais como baterias, geradores, conversores, transformadores, etc.

Para efeitos práticos, enquanto não se estabeleça o contrário, assumiremos neste curso que uma fonte de tensão é ideal quando seu resistor interna é pelo menos **100 vezes menor** que o resistor do circuito de carga. Quando for necessário levar em conta o resistor interna de uma fonte real, representaremos esta última como uma fonte de tensão ideal em série com seu resistor interna, figura 5.36c.



(a) Fonte ideal (b) Fonte ideal (c) Fonte real CC

Figura 5.36 Simbologia de fontes de tensão.

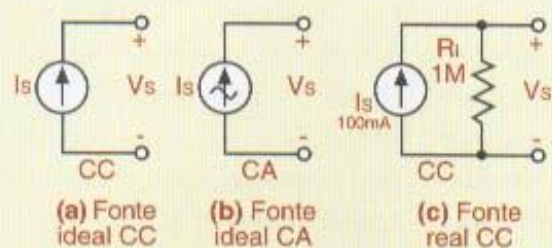


Figura 5.37

Simbologia de fontes de corrente

Fontes de corrente. Uma **fonte de corrente**, figura 5.37, é um elemento caracterizado porque a corrente através de si (I_s) é completamente independente da tensão entre seus terminais (V_s). Portanto, uma fonte de corrente possui idealmente uma condutância zero e é capaz de suportar uma tensão infinita. Novamente, as fontes de corrente com estas características apenas existem como elementos teóricos.

Para efeitos práticos, assumiremos que uma fonte de corrente é ideal quando seu resistor interna é pelo menos **100 vezes maior** que o resistor do circuito de carga. Quando for necessário levar em conta o resistor interna, representaremos uma fonte de corrente real como uma fonte ideal em paralelo com seu resistor ou condutância interna, figura 5.37c.

Fontes controladas. Os dois tipos de fontes anteriores denominam-se **fontes independentes** devido ao fato de que a tensão ou a corrente distribuídas pelas mesmas não depende do

que ocorre no resto do circuito. Quando isto não é assim, tem-se uma **fonte dependente ou controlada**, figura 5.38. As fontes dependentes são elementos caracterizados porque distribuem uma tensão ou uma corrente cujo valor depende de uma corrente e/ou um tensão presentes em outra parte do circuito considerado.

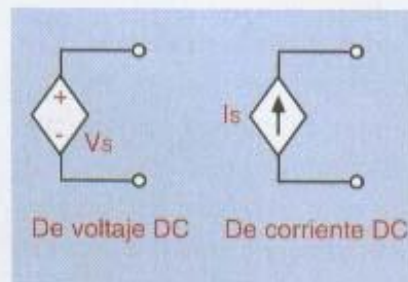


Figura 5.38 Simbologia de fontes dependentes ou controladas ideais

As fontes dependentes com a definição anterior continuam sendo elementos idealizados, porém são uma boa aproximação das fontes controladas reais. Em um transistor FET, por exemplo, a corrente do drenador depende da tensão aplicada à comporta, enquanto que em um transistor bipolar a corrente de coletor depende da corrente de base. Portanto, no primeiro caso temos uma fonte de corrente controlada por tensão, e no segundo, uma fonte de corrente controlada por corrente.

Resistores. Um **resistor**, figura 5.39, é um elemento caracterizado porque a tensão entre seus terminais (V_R) é diretamente proporcional à corrente que circula por ela (I_R). A contínua de proporcionalidade é o **resistor (R)** do elemento resistivo considerado. Portanto, estritamente falando, um resistor é qualquer objeto físico que cumpra a **Lei de Ohm**. Isto é:

$$V_R = I_R \times R$$

Idealmente, o resistor (R) deve ser contínua e independente da tensão, a corrente, a frequência, a temperatura ou qualquer outro fator externo. As resistors com esta característica denominam-se **resistors lineares** e, ainda que existam apenas como elementos teóricos, são uma boa aproximação das resistors reais feitas de carbono, cobre e outros metais.

Capacitâncias ou capacitores. Um **capacitor**, figura 5.40, é um elemento caracterizado por produzir através de si uma corrente (I_C) proporcional à velocidade com a qual muda ou varia a tensão entre seus terminais. A contínua de

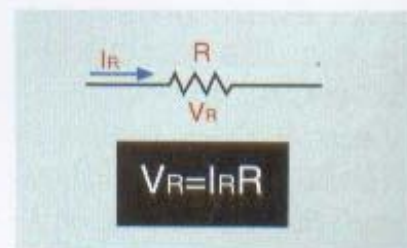


Figura 5.39 Simbologia e relação v-i de um resistor ideal

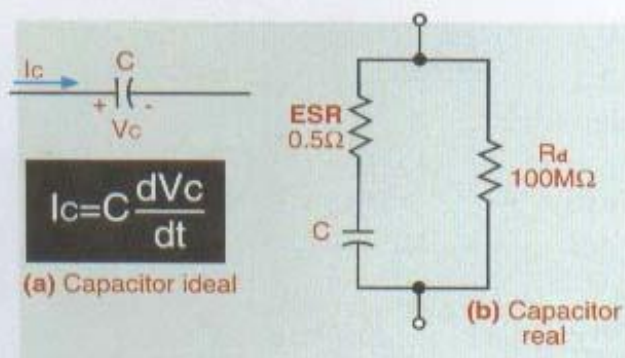


Figura 5.40 Simbologia e relação v-i de um capacitor

proporcionalidade é a **capacitância** (C) do elemento capacitivo considerado (ver Capítulo 2). Isto é:

$$I_c = C \times dV_c/dt$$

onde o símbolo “ dV_c/dt ” (leia-se “a derivada de v_c ”) representa a razão de mudança de tensão (volts por segundo ou V/s). Por exemplo, se a tensão sobre um capacitor de $47 \mu\text{F}$ varia em um certo instante a uma taxa de 10 V/s , a corrente através do elemento nesse mesmo instante é, simplesmente:

$$I_c = C \times \frac{dV_c}{dt} \\ = 47 \mu\text{F} \times 10 \text{ V/s} = 470 \mu\text{A}$$

No caso particular de um capacitor submetido a uma tensão V_c contínua, digamos 9 V , a razão de mudança dV_c/dt é 0 porque a tensão não varia e possui sempre o mesmo valor em qualquer instante. Portanto, a corrente I_c através do capacitor é 0 . Sob estas condições, o dispositivo se comporta, teoricamente, como um resistor infinita, ou seja,

⊗ Lembre-se que um capacitor é formado por duas placas condutoras separadas por um dielétrico isolante (ver Capítulo 2). Teoricamente se assume que o resistor das placas é zero e a do dielétrico infinita. Na realidade, porém, as placas possuem um resistor finita distinta de zero, mesmo que muito baixa, chamado **resistor equivalente em série** (ESR), e o dielétrico um resistor não infinita, porém muito alta, chamado **resistor de isolamento** (R_d), figura 5.40b. Por enquanto, ignoraremos esses elementos parasitas que afastam um capacitor real de seu comportamento ideal.

Indutâncias ou bobinas. Uma **bobina**, figura 5.42, é um elemento caracterizado por produzir entre seus terminais uma tensão (V_L) proporcional à velocidade com a qual muda ou varia a tensão entre seus terminais. A contínua de proporcionalidade é a **indutância** (L) do elemento indutivo considerado (ver Capítulo 2). Isto é:

$$V_L = L \times \frac{dI_L}{dt}$$

onde o símbolo “ dI_L/dt ” (leia-se “a derivada de I_L ”) representa a razão de mudança da corrente (ampéres por segundo ou A/s). Por exemplo, se a corrente através de uma bobina de 100 mH muda em um dado instante a uma taxa de 2 A/s , a tensão sobre o elemento nesse instante é simplesmente

$$V_L = L \times \frac{dI_L}{dt} \\ = 100 \text{ mH} \times 2 \text{ A/s} \\ = 200 \text{ mV}$$

No caso particular de uma bobina submetida a uma corrente I_L contínua, digamos 500 mA , a razão de mudança dI_L/dt é 0 porque a corrente sempre é a mesma em qualquer instante. Portanto, a tensão V_L sobre a bobina é zero. Sob estas condições, o dispositivo comporta-se, teoricamente, como um resistor de valor zero, ou seja, como um curto-circuito, figura 5.43. Em outras palavras, **uma bobina é um curto-circuito para a corrente contínua**.

⊗ Lembre-se que uma bobina é construída enrolando-se em forma de helicóide um fio de certo comprimento sobre um núcleo magnético. Teoricamente assume-se que o resistor do

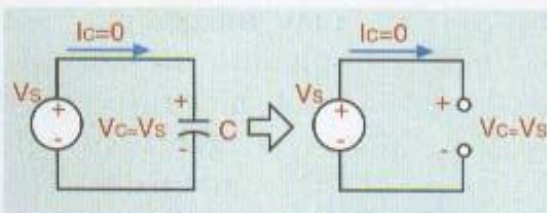


Figura 5.41 Um capacitor é um circuito aberto para a corrente contínua (CC)

fio e a capacitância entre as espiras são ambas zero. Na prática, porém, o fio de uma bobina possui um resistor finita distinta de zero chamado **resistor efetiva em série (RE)** e entre as espiras existe uma capacitância chamada **capacitância distribuída (Cd)**, distinta de zero, **figura 5.42 b**. Também se apresentam perdas no núcleo e no isolamento do fio.

5.4.2 Comportamento de um capacitor em CC. O circuito RC

Em contraste com as resistores, que dissipam em forma de calor toda a potência fornecida, os capacitores e as bobinas não absorvem energia a não ser que a armazenem em forma de um **campo** (elétrico ou magnético, de acordo com o caso), atuando como fontes temporais de tensão ou de corrente. A energia armazenada pode ser liberada proporcionando uma trajetória fechada para a circulação da corrente.

A ação básica de um capacitor como elemento armazenador de energia, examinada

em forma qualitativa no **Experimento 2.2** deste curso (ver página 46), pode ser analisada quantitativamente utilizando um circuito como o da **figura 5.44 (a)**. Assumese, inicialmente, que o interruptor S1 está em sua posição neutra (N) e que o capacitor C está completamente descarregado.

$$I_o = \frac{V_s}{R_1}$$

No instante de passar S1 à posição “A” para iniciar o processo de carga, o capacitor C comporta-se como um curto-circuito, mantendo uma tensão zero entre seus terminais, **figura 5.44b**. Como resultado, a tensão da fonte (V_s) fica aplicada sobre o resistor R_1 e, de acordo com a Lei de Ohm, através do circuito circula uma corrente máxima

Em nosso caso, $V_s=12V$ y $R_1=100k\Omega$. Portanto, $I_o=120 \mu A$.

A partir de então, C começa a carregar-se através de R_1 , **figura 5.44c**. Como resultado, a tensão sobre o capacitor aumenta paulatinamente do seu valor inicial (0V) até chegar a V_s (12V). Ao final do processo, toda a tensão da fonte

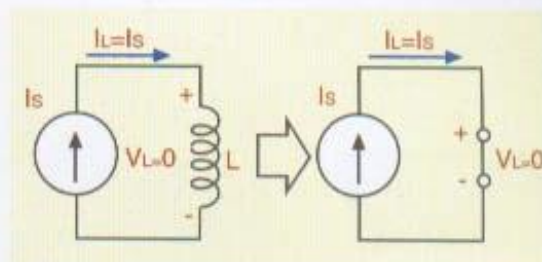


Figura 5.43 Uma bobina é um curto-circuito para a corrente contínua (CC).

fica aplicada sobre o capacitor e, portanto, não circula corrente através do circuito, **figura 5.44d**.

O comportamento das tensões sobre o resistor (V_R) e o capacitor (V_C) durante o processo de carga pode ser descrito mediante uma gráfica como a da **figura 5.44e**. A velocidade de carga do capacitor depende, essencialmente, da **contínua de tempo** do circuito. Esta última é simplesmente o produto do resistor pela capacitância e é representada pelo símbolo “ τ ” (leia-se “tao”). Isto é:

$$\tau = R \times C$$

Analicamente pode-se demonstrar que em um tempo igual a **RC**, o capacitor está carregado com uma tensão aproximadamente igual a 63% da tensão aplicada. Assim mesmo, pode-se demonstrar que em um tempo igual a **5RC** o capacitor está carregado em 99% da tensão aplicada. Para efeitos práticos, considera-se que a partir deste ponto, o capacitor está completamente carregado.

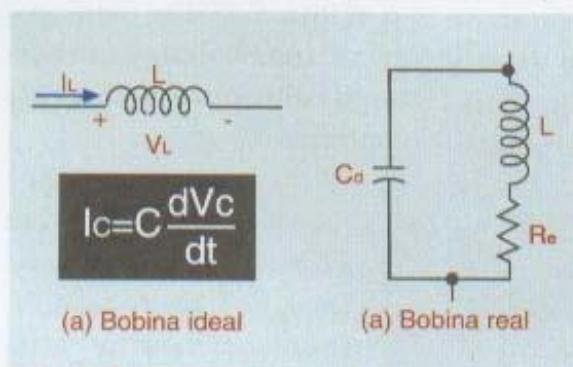


Figura 5.42 Simbologia e relação v-i de uma bobina ideal

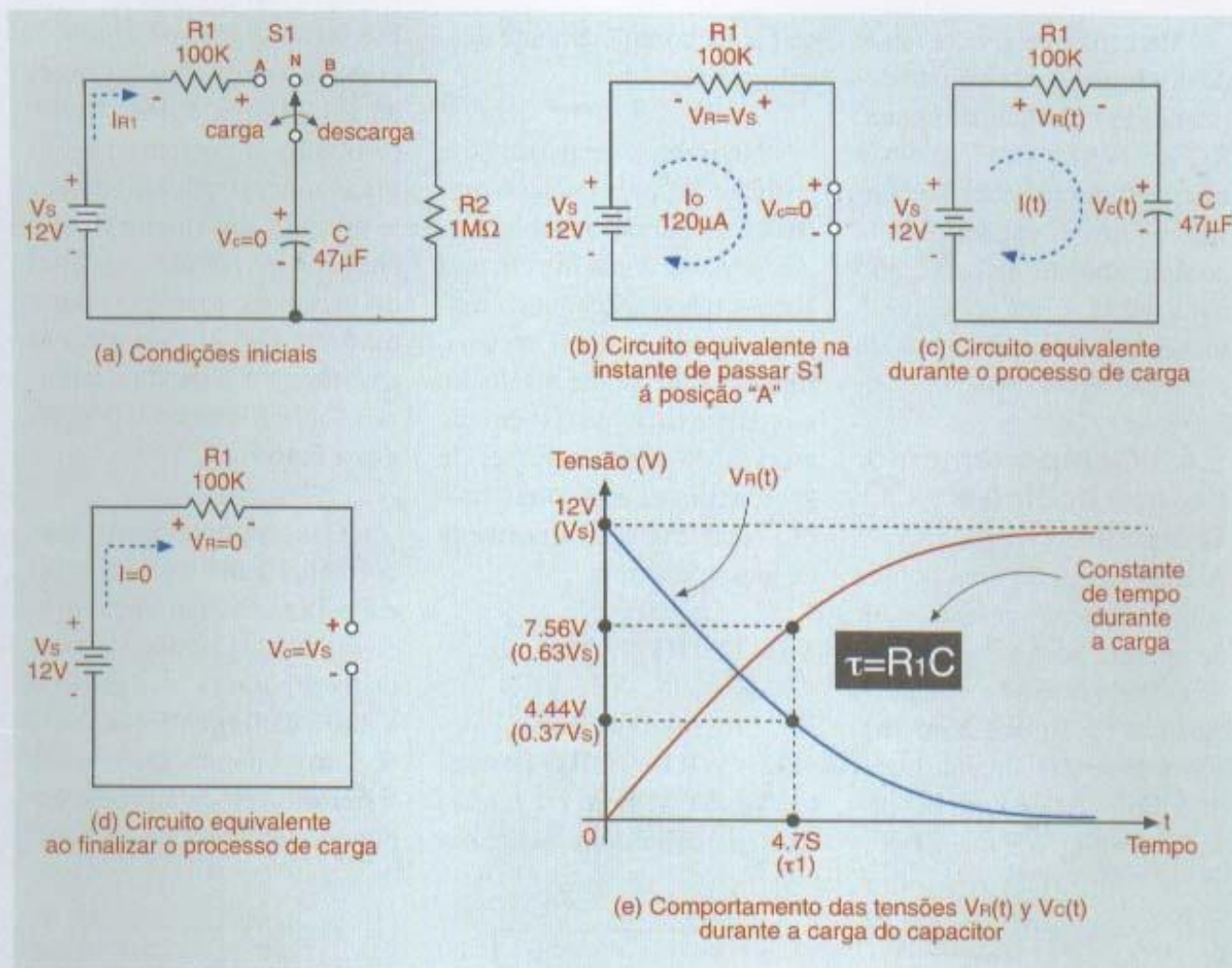


Figura 5.44 Circuito RC para mostrar a ação básica de um capacitor

No nosso caso, $V_s = 12V$ é a tensão aplicada e

$$\begin{aligned}\tau &= R_1 \times C \\ &= 100k\Omega \times 47\mu F \\ &= 4700 \text{ ms} = 4.7 \text{ s}\end{aligned}$$

é a contínua de tempo do circuito. Portanto, para um tempo $t = 4.7 \text{ s}$, o capacitor está carregado a 63% de 12 V (7.56 V) e para um tempo $t = 23.5 \text{ s}$ o está a 99% do mesmo (11.88 V). A partir de então pode-se considerar que o capacitor está completamente carregado.

Uma vez carregado o capacitor a tensão V_s , situamos imediatamente S_1 na posição "B" para iniciar o ciclo de descarga. O processo está descrito na figura 5.45. Inicialmente, C comporta-se como uma fonte de tensão contínua, distribuindo uma tensão V_s a R_2 , figura 5.45a. Como resultado, de acordo com a Lei de Ohm, através do circuito circula uma corrente máxima

$$I_0 = \frac{V_s}{R_2}$$

No nosso caso, $V_s = 12V$ e $R_2 = 1M\Omega$. Portanto, $I_0 = 12$

μA. A partir de então, C começa a descarregar-se através de R_2 , figura 5.45c. Como resultado, a corrente do circuito diminui paulatinamente de seu valor máximo I_0 até chegar a zero.

Ao final do processo, com o capacitor completamente descarregado, a tensão aplicada ao circuito é zero e, portanto, nenhuma corrente circula através do mesmo. O comportamento da corrente durante o processo de descarga pode ser descrito mediante um gráfico como a da figura 5.45 d.

Perceba que a velocidade de diminuição da corrente depende da contínua de tempo RC do circuito (47 s, neste caso). Portanto, pode-se considerar que o capacitor está completamente descarregado para $t=235$ s, ou seja, quase uns quatro minutos depois de começar o processo.

5.4.3 Comportamento de uma bobina em CC. O circuito RL

A ação básica de uma bobina como elemento armazenador de energia pode ser analisada quantitativamente mediante o circuito da **figura 5.46 (a)**. Assume-se inicialmente que o interruptor S1 está em sua posição neutra (N) e que a bobi-

na L está completamente descarregada.

No instante de passar S1 à posição "A" para iniciar o processo de carga, a bobina L comporta-se como um circuito aberto, mantendo uma corrente zero através de si mesma, **figura 5.46b**. Como resultado, a corrente da fonte (I_s) circula através do resistor R1 e, de acordo com a Lei de Ohm, produz sobre a mesma uma queda de tensão máxima

$$V_o = I_s \times R1$$

Em nosso caso, $I_s = 10\text{mA}$ e $R1 = 100\Omega$. Portanto, $V_o = 1\text{ V}$. Essa é a tensão que aparece inicialmente so-

bre R1. A partir de então, L começa a carregar-se através de R1, **figura 5.46c**. Como resultado, a corrente na bobina aumenta paulatinamente do seu valor inicial (0) até chegar a I_s (10mA). Ao final do processo, toda a corrente da fonte (I_s) circula através da bobina e a queda de tensão sobre a mesma é 0 V, **figura 5.46d**.

O comportamento das correntes sobre o resistor (I_R) e a bobina (I_L) durante o processo de carga pode ser descrito mediante um gráfico como a da **figura 5.46e**. Neste caso, o parâmetro que determina a velocidade de crescimento da corrente na bobi-

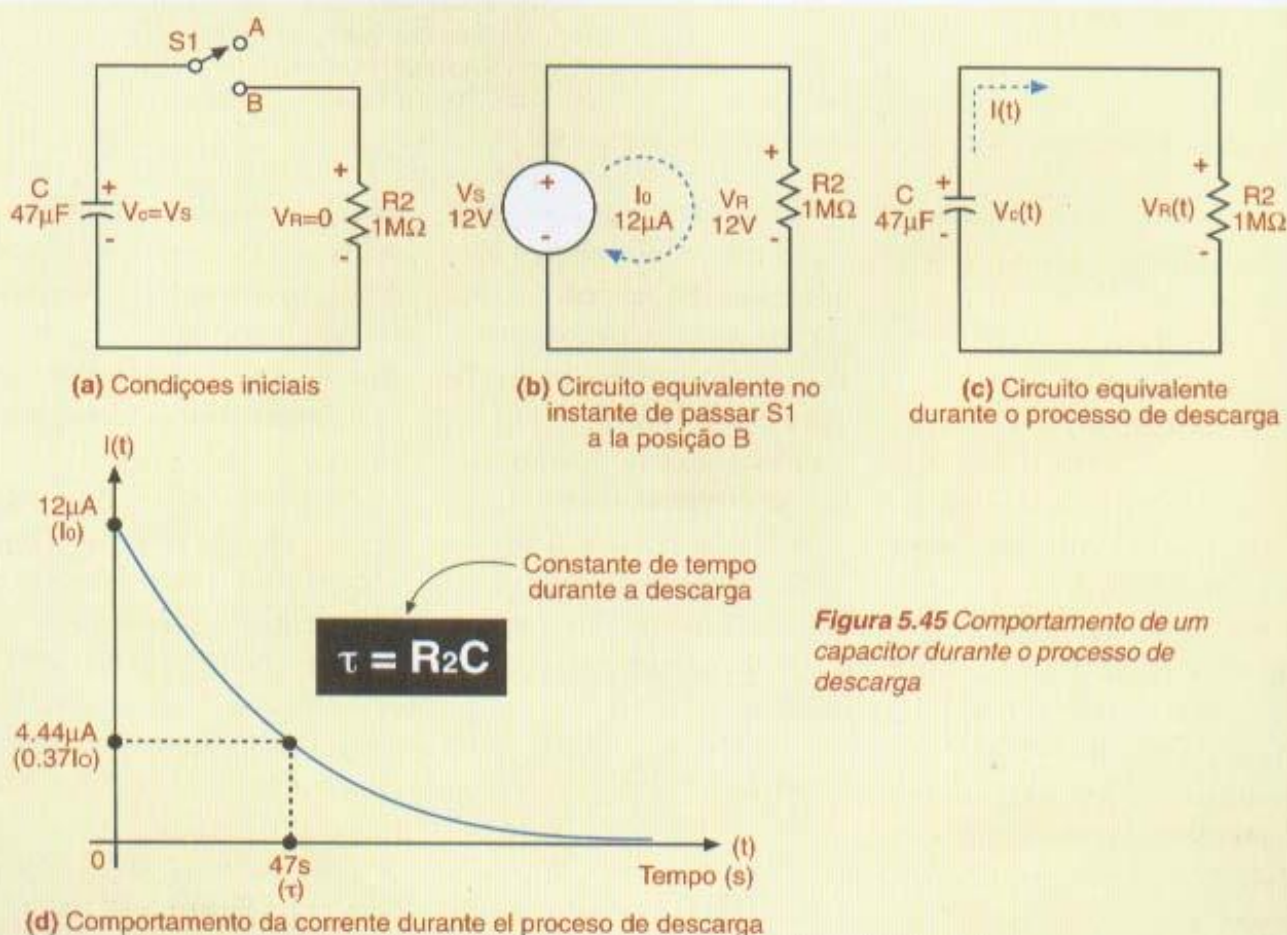


Figura 5.45 Comportamento de um capacitor durante o processo de descarga

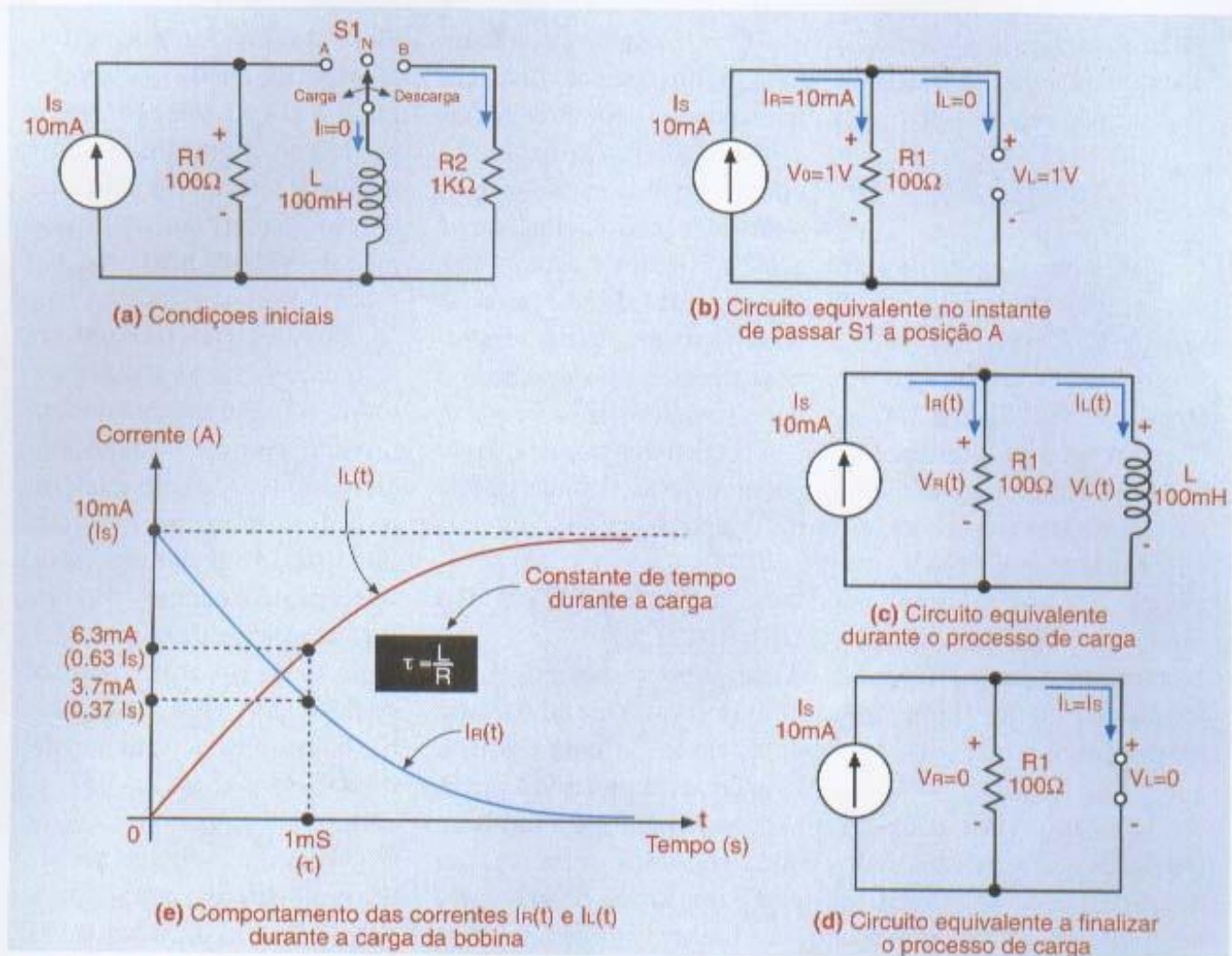


Figura 5.46 Circuito RL para mostrar a ação básica de uma bobina

na é a **contínua de tempo** (τ) do circuito. Essa última é simplesmente a relação entre a indutância e o resistor. Isto é

$$\tau = \frac{L}{R}$$

Analiticamente pode-se demonstrar que em um tempo igual a L/R , a bobina está carregada com uma corrente aproximadamente igual a 63% da corrente aplicada. Assim mesmo, pode-se demonstrar que em um tempo igual a $5L/R$ a bobina está carregada a 99% da corrente

aplicada. Para efeitos práticos, considera-se que a partir deste ponto, a bobina está completamente carregada.

No nosso caso, a corrente aplicada é $I_s = 10 \text{ mA}$ e a contínua de tempo é

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{L}{R} \\ &= \frac{100\text{mH}}{100\Omega} = 1 \text{ ms} \end{aligned}$$

Portanto, para um tempo $t = 1 \text{ ms}$, a bobina está carregada a 63% de 10 mA (6.3 mA) e para um tempo $t = 5 \text{ ms}$ o está a 99% do mesmo

(9.9 mA). A partir de então pode-se considerar que a bobina está completamente carregada.

Uma vez carregada a bobina à corrente aplicada, colocamos imediatamente o interruptor S1 na posição "B" para iniciar o ciclo de descarga. O processo é descrito graficamente na figura 5.47.

Inicialmente, L comporta-se como uma fonte de corrente contínua, fornecendo uma corrente I_s ao resistor, figura

5.47a. Como resultado, através desta última se produz uma queda de tensão máxima

$$V_o = I_s \times R_2$$

Em nosso caso, $I_s = 10$ mA e $R_2 = 1\text{ k}\Omega$. Portanto, $V_o = 10$ V. A partir de então, L começa a descarregar-se através de R_2 , **figura 5.47b**. Como resultado, a tensão sobre L ou R_2 começa a diminuir paulatinamente de seu valor máximo V_o (10V) até chegar a zero. Ao final do processo, a corrente injetada ao circuito é zero e, portanto, não há queda alguma de tensão sobre o resistor.

O comportamento da tensão durante o processo de descarga pode ser descrito mediante um gráfico como o da **figura 5.47c**. Neste caso, a tensão decai exponencialmente a uma velocidade determinada pela contínua de tempo L/R do circuito.

5.5 Circuitos CA

Um circuito é de corrente alternada (CA) quando é alimentado por uma fonte de tensão ou de corrente que muda alternativamente com o tempo, tanto em magnitude como em polaridade. Os circuitos CA são regidos pelos mesmos princípios gerais dos circuitos CC, exceto pelo fato de que devemos ter em conta fatores adicionais.

Continuando, examinaremos alguns aspectos básicos relacionados com circuitos de corrente alternada excitados por um sinal de tensão ou corrente de forma senoidal, que é a mais comum e importante. Inicialmente definiremos os principais parâmetros relacionados a este tipo de sinais e depois analisaremos como se comportam os resistores, os capacitores e as bobinas diante desse tipo de estímulo.

5.5.1 Parâmetros de um sinal CA

Ainda que sejam possíveis muitas formas de onda para uma tensão ou uma corrente CA, a mais importante do ponto de vista prático é a forma de onda **senoidal**, representada graficamente na **figura 5.48**. Na continuação definiremos seus principais parâmetros associados.

O **valor pico** é o máximo valor positivo ou negativo que pode alcançar um sinal durante um ciclo. A diferença líquida entre ambos valores pico denomina-se **tensão pico a pico**. Para uma senóide perfeita, o valor pico a pico é sempre igual ao dobro do valor pico. Por exemplo, o valor pico a pico de uma corrente de 375 mA de pico é 750 mA.

O **valor médio** é igual à média aritmética de todos as tensões que adotam uma onda senoidal durante um semici-

clo. Para uma senóide perfeita, o valor médio é sempre igual a 0.637 vezes o valor pico. Por exemplo, o valor médio de um sinal senoidal de tensão que possui um valor pico de 500 mV é 318.5 mV.

O **valor efetivo** é obtido somando-se os quadrados de todos os valores que adotam a onda senoidal durante um ciclo, dividindo pelo número de valores e extraindo a raiz quadrada do resultado. Essa operação é denominada raiz quadrada média ou RMS (*root mean square*). Por essa razão, o valor efetivo é conhecido também como **valor rms**.

Para uma senóide perfeita, o valor efetivo o rms é sempre igual a 0.707 vezes o valor pico. Por exemplo, o valor efetivo de uma onda senoidal de corrente que possui um valor pico de 300 mA é 212.10 mA.

O valor rms proporciona uma medida da capacidade de um sinal CA para produzir potência. Assim, uma onda senoidal de tensão com um valor efetivo ou rms de 12 V produz sobre um resistor a mesma dissipação de potência que uma tensão CC contínua de 12 V. Neste curso, enquanto não se indique outra coisa, assumiremos que todos os valores medidos de ondas senoidais são valores rms.

A relação entre o valor rms e o valor médio denomina-se **fator de forma**. Portanto, para uma senóide perfeita, o fator de forma é $0.707/0.637 = 1.11$, independentemente do valor pico.

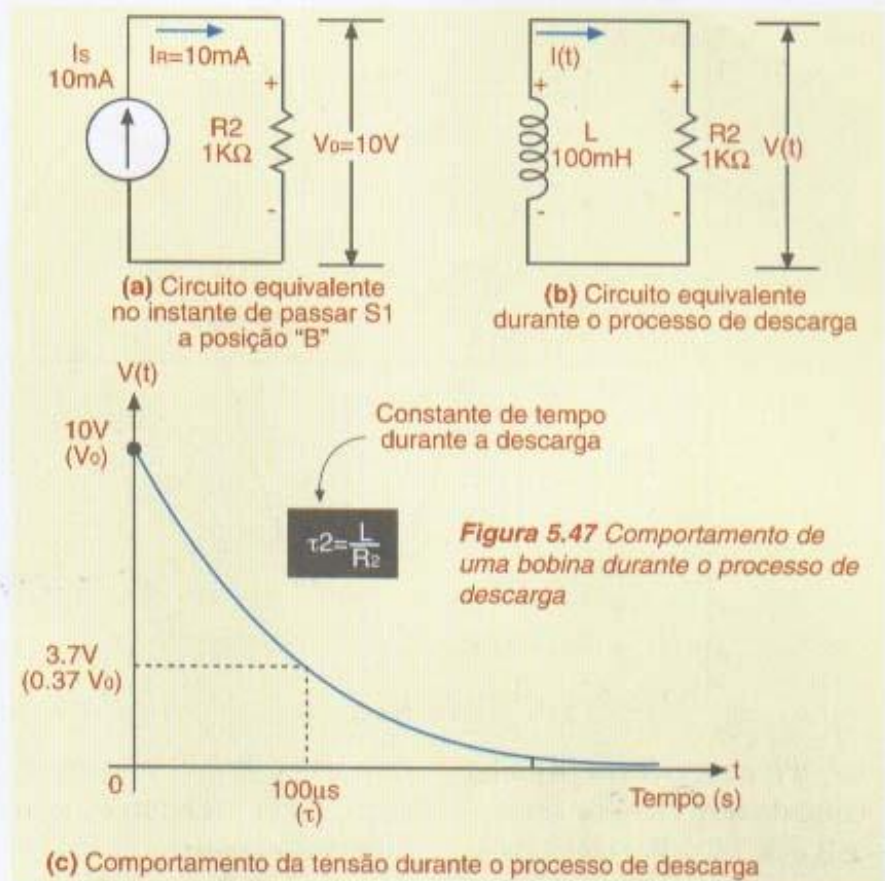
A **frequência** refere-se ao número de ciclos que se repetem em um segundo e se indica com o símbolo " f ". Um ciclo completo é medido entre dois pontos sucessivos que possuem o mesmo valor e a mesma direção. A unidade de medida da frequência é o **hertz (Hz)**. Na prática, também utilizam-se múltiplos como o kilohertz (kHz), o megahertz (MHz) e o gigahertz (GHz).

O **período** refere-se ao tempo que dura um ciclo, e é indicado com o símbolo **T** e sua unidade de medida é o **segundo (s)**. Na prática, expressa-se utilizando submúltiplos como o milissegundo (ms), o microsegundo (μs) e o nanosegundo (ns). Matematicamente, a frequência e o período são recíprocos, ou seja:

$$T = \frac{1}{f}$$

$$f = \frac{1}{T}$$

Por exemplo, uma onda senoidal de corrente ou de tensão cuja frequência é de 50 kHz, possui um período de 20 μs . Assim mesmo, um sinal



cujo período é de 100 ns, possui uma frequência de 10 MHz.

Finalmente, o **ângulo de fase** refere-se ao atraso ou adiantamento no tempo que experimenta um sinal, com relação a outro da mesma frequência tomado como referência. Na **figura 5.49** mostramos alguns exemplos. Em cada caso, um ciclo completo é considerado como dividido em 360°.

Em (a), o ângulo de fase entre os sinais C e D é de 60°, ou seja um sexto de ciclo. Se tomamos C como referência, D está atrasado 60°. Se tomamos D como referência, C está adiantada 60°.

Em (b), por sua vez, o ângulo de fase entre os sinais A e B é de 90°, ou seja, um quarto de ciclo. Se tomamos A como referência, B está adiantada 90°. Se tomamos B como referência, A está atrasada 90°. Note que sempre um dos sinais alcança seu valor máximo positivo ou negativo quando o outro é zero. Dizemos, então, que os dois sinais estão **em quadratura de fase**.

Em (c), o ângulo de fase entre os sinais A e B é 0. Portanto, as duas ondas alcançam seus valores máximos positivos e negativos ao mesmo tempo. Dizemos, então, que os dois sinais estão **em fase**.

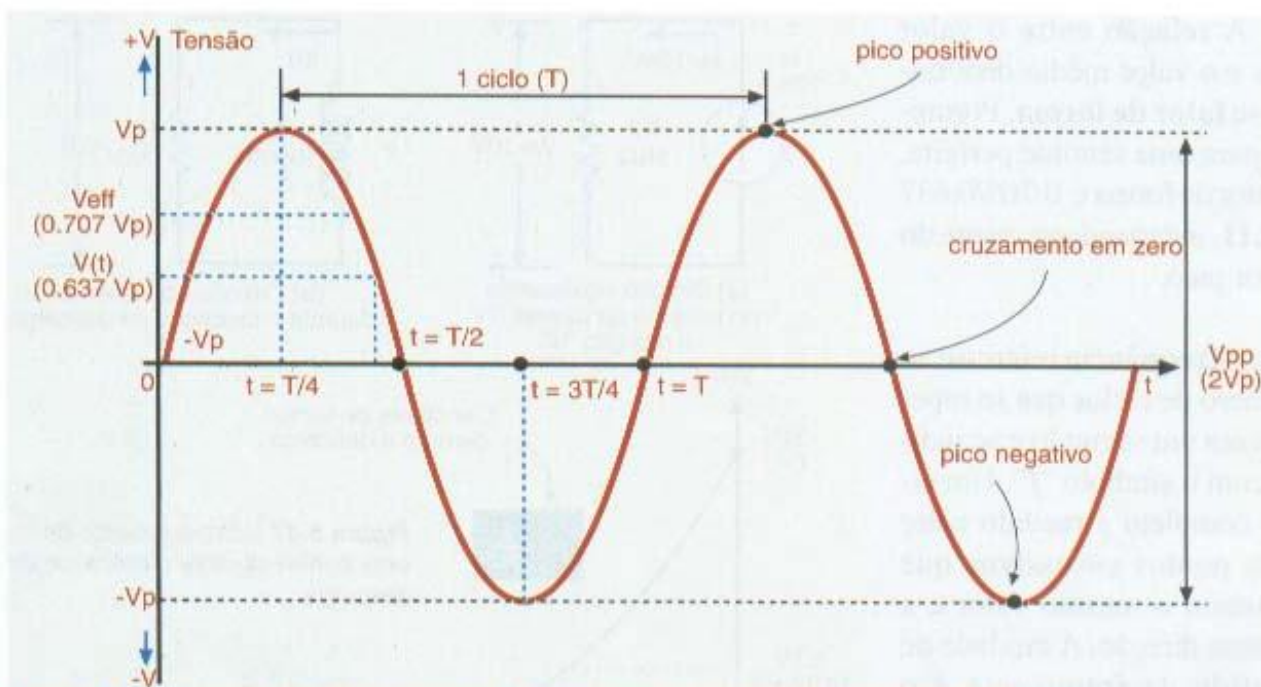


Figura 5.48 Parâmetros de uma senóide CA. São mostrados dois ciclos de sinal de tensão

Finalmente, em (d) o ângulo de fase entre os sinais A e B é de 180° . Por tanto, quando A alcança seu máximo valor positivo, B alcança seu máximo valor negativo, e vice-versa. Dizemos, então, que os dois sinais estão **oposição de fase**.

5.5.2 Resistores em CA

Quando se aplica uma tensão alternada senoidal a um resistor, se produz uma corrente também em fase com a tensão aplicada. Esta situação é ilustrada na **figura 5.50**. A magnitude da corrente produzida é determinada pela Lei de Ohm. Isto é

$$I = \frac{V}{R}$$

onde V_s (V) é o valor rms da tensão aplicada, I_R (A) o valor rms da corrente produ-

zida (A) e R (Ω) o valor do resistor. Por exemplo, se aplicamos uma tensão alternada eficaz de 12 V a um resistor de 16Ω , a corrente alternada efetiva produzida é simplesmente

$$\begin{aligned} I &= \frac{V}{R} \\ &= \frac{12V}{16\Omega} \\ &= 0.75 \text{ A} \end{aligned}$$

5.5.3 Capacitores em CA

Os capacitores e as bobinas apresentam uma certa oposição à passagem de uma corrente alternada. Essa condição é denominada **reatância**. Em razão disso, os capacitores e as bobinas são conhecidos como elementos **reativos**. Especificamente, um capacitor apresenta uma **reatância capacitiva**, que é representada como X_C , e uma bobina uma **reatância indutiva**, que é representada como X_L .

Tanto a reatância capacitiva como a reatância indutiva variam com a frequência e produzem uma comutação de fase de 90° entre a tensão e a corrente. Quando se combinam resistores e reatâncias em um mesmo circuito, todo o conjunto apresenta uma oposição à passagem da corrente denominada **impedância**. As impedâncias produzem ângulos de fase entre 0° e 90° . A unidade de medida da reatância e a impedância é o **ohm** (Ω), com seus múltiplos e submúltiplos.

Quando se aplica uma tensão CA senoidal a um capacitor, conforme mostrado na **figura 5.51a**, se produz uma corrente também senoidal e da mesma frequência a qual, porém, está adiantada 90° com relação à tensão aplicada. Essa situação é ilustrada na **figura 5.51b**.

O anterior implica que a corrente alcança seu valor pico um quarto de ciclo antes que da tensão ter feito o mesmo. Assim mesmo, quando a tensão de entrada alcança seu valor pico positivo ou negativo, a corrente é zero, e vice-versa. A magnitude rms da corrente I (A) produzida é dada pela fórmula:

$$I_c = \frac{V}{X_c}$$

sendo V (V) o valor rms da tensão aplicada e X_c (Ω) a reatância capacitiva do capacitor. O valor de X_c é dado pela fórmula:

$$X_c = \frac{1}{(2\pi fC)} \\ = (2\pi fC)^{-1}$$

sendo 2π uma contínua matemática aproximadamente igual a 6.2832, f (Hz) a frequência da tensão aplicada e C (F) a capacitância do capacitor. Por exemplo, a reatância capacitiva de um capacitor de $0.47 \mu\text{F}$ a uma frequência de 1 kHz seria:

$$X_C = \frac{1}{(6.28 \times 1\text{kHz} \times 0.47\mu\text{F})} \\ = 0.339 \text{ k}\Omega = 339 \Omega$$

O mesmo capacitor apresentaria uma reatância de $5.64 \text{ k}\Omega$ a 60 Hz e de 3.4Ω a 100 kHz. Portanto, um capacitor oferece uma alta oposição à passagem de sinais de baixa frequência e uma baixa oposição à passagem de sinais de alta frequência. As aplicações

práticas desta característica são virtualmente ilimitadas, como veremos mais adiante.

⊗ Note que se a capacitância é expressa em μF e a frequência em kHz, a reatância capacitiva fica automaticamente expressa em $\text{k}\Omega$. Isto é, $1/(\mu\text{F} \times \text{kHz}) = (\mu\text{F} \times \text{kHz})^{-1} = \text{k}\Omega$. Outras relações úteis que aparecem frequentemente nos cálculos de circuitos CA são as seguintes:

$$\begin{array}{ll} (n\text{F} \times \text{Hz})^{-1} = \text{G}\Omega & (\mu\text{F} \times \text{Hz})^{-1} = \text{M}\Omega \\ (\text{F} \times \text{Hz})^{-1} = \Omega & (\text{pF} \times \text{kHz})^{-1} = \text{G}\Omega \\ (n\text{F} \times \text{kHz})^{-1} = \text{M}\Omega & (\mu\text{F} \times \text{kHz})^{-1} = \text{k}\Omega \\ (\text{F} \times \text{kHz})^{-1} = \text{m}\Omega & (\text{pF} \times \text{MHz})^{-1} = \text{M}\Omega \\ (n\text{F} \times \text{MHz})^{-1} = \text{k}\Omega & (\mu\text{F} \times \text{MHz})^{-1} = \Omega \\ (\text{pF} \times \text{GHz})^{-1} = \text{k}\Omega & (n\text{F} \times \text{GHz})^{-1} = \Omega \end{array}$$

5.5.4 Bobinas em CA

Quando se aplica uma tensão CA senoidal a uma bobina, como mostramos na figura 5.52a, se produz uma corrente também senoidal e da mesma frequência a qual, porém, está atrasada 90° com relação à tensão aplicada. Essa situação é ilustrada na figura 5.52b.

O anterior implica que a corrente alcança seu valor pico um quarto de ciclo depois que a tensão o fez. Assim mesmo, quando a tensão de entrada alcança seu valor pico positivo ou negativo, a corrente é zero,

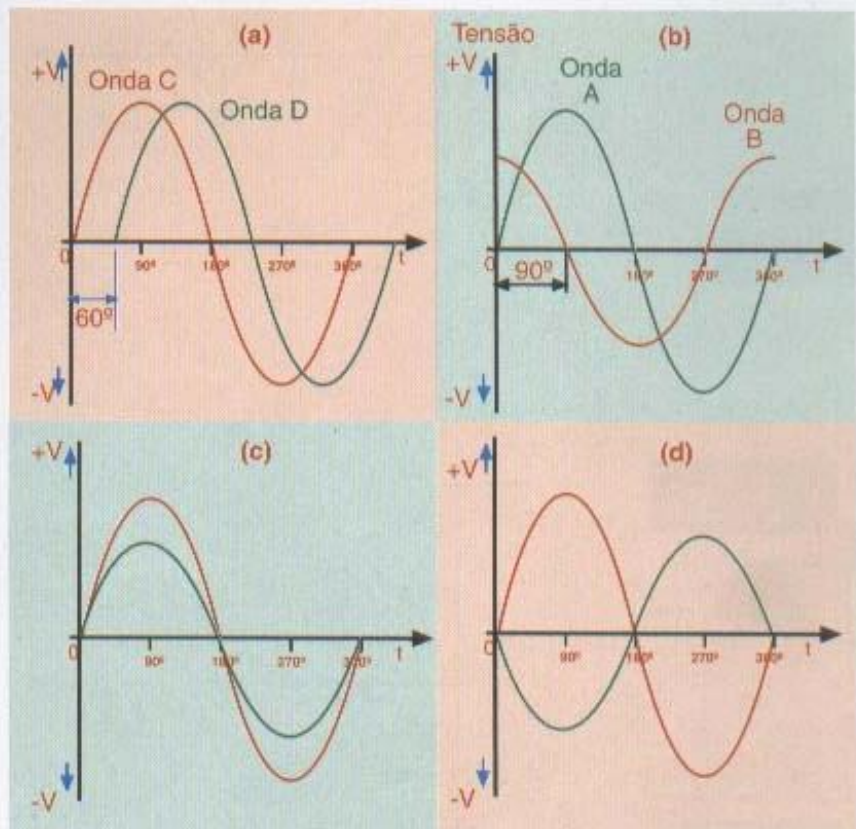


Figura 5.49 Conceito de ângulo de fase

- (a) Ângulo de fase de 60°
 (b) Ângulo de fase de 90° (sinais em quadratura)
 (c) Ângulo de fase de 0° (sinais em fase)
 (d) Ângulo de fase de 180° (sinais em oposição de fase)

DIAGRAMA FASORIAL DE IMPEDÂNCIA

$$Z = R + jX(\Omega)$$

para corrente contínua — $Z = R$
 para corrente alternada — $Z = -jX_C$

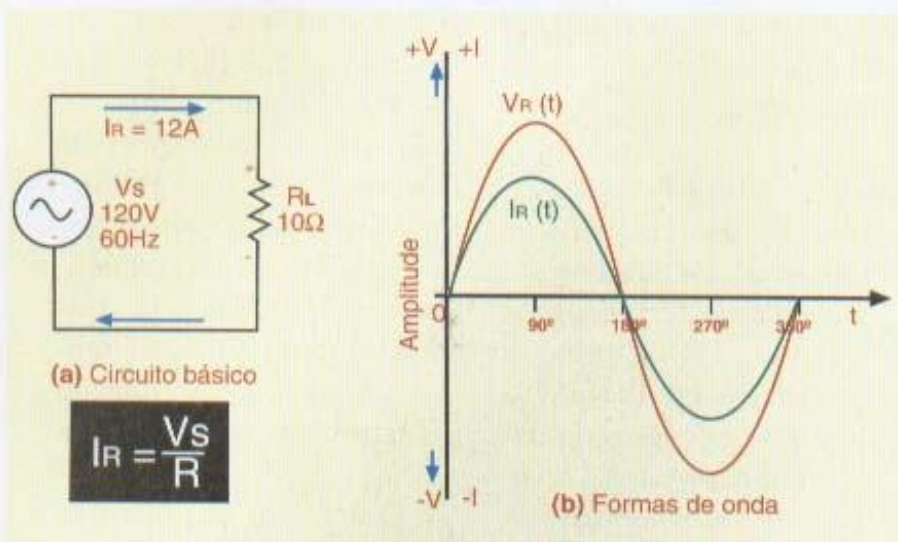


Figura 5.50 Comportamento de um resistor em CA

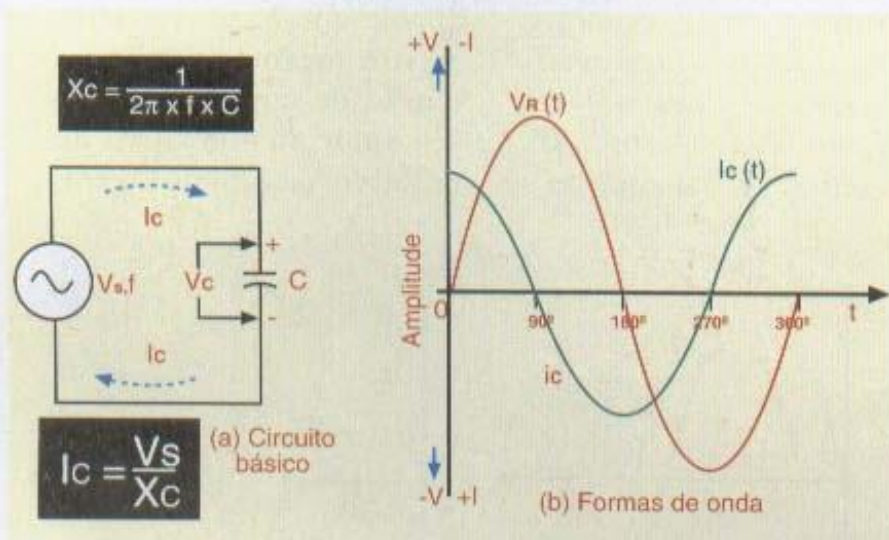


Figura 5.51 Comportamento de um capacitor em CA

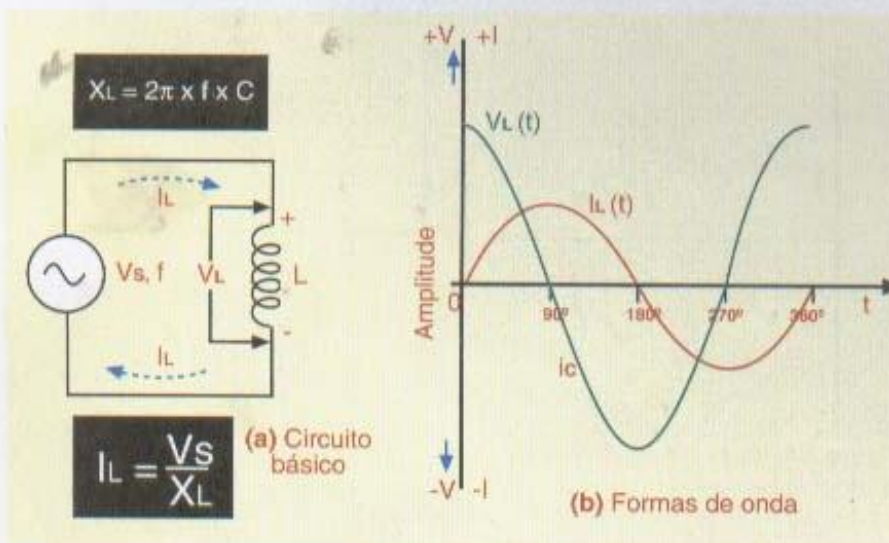


Figura 5.52. Comportamento de uma bobina em CA

e vice-versa. O valor rms da corrente $I_L(A)$ é dado pela fórmula:

$$I = \frac{V_S}{X_L}$$

onde $V(V)$ é o valor rms da tensão aplicada e $X_L(\Omega)$ é a reatância indutiva da bobina. O valor de X_L é dado pela fórmula:

$$X_L = 2\pi fL$$

onde 2π é aproximadamente igual a 6,2832, $f(Hz)$ é a frequência da tensão aplicada e $L(H)$ é a indutância da bobina. Por exemplo, a reatância indutiva de uma bobina de 100 mH a 1 kHz seria:

$$X_L = 6,28 \times 1 \text{ kHz} \times 100 \text{ mH} = 628 \Omega$$

A mesma bobina apresentaria uma reatância de 38 Ω a 60 Hz e de 62,8 k Ω a 100 kHz. Em todos os casos, a corrente através da bobina sempre está atrasada 90° com relação à tensão entre seus terminais. Para $f=0$ Hz, correspondente a um nível CC, a reatância seria de 0 Ω .

Portanto, uma bobina oferece uma baixa reatância para sinais de baixa frequência e uma alta reatância para sinais de alta frequência. Essa característica possui inúmeras aplicações práticas, como veremos mais adiante.

>>>: Perceba que se a indutância é expressa em mH e a frequência kHz, a reatância indutiva continua expressa em Ω . Isto é, $\text{mH} \times \text{kHz} = \Omega$. Outras relações úteis que aparecem frequentemente nos cálculos de circuitos CA são as seguintes:

$$\begin{aligned} \text{mH} \times \text{Hz} &= \text{m}\Omega & \text{H} \times \text{Hz} &= \Omega \\ \mu\text{H} \times \text{kHz} &= \text{m}\Omega & \text{mH} \times \text{kHz} &= \Omega \\ \text{H} \times \text{kHz} &= \text{k}\Omega & \mu\text{H} \times \text{MHz} &= \Omega \\ \text{mH} \times \text{MHz} &= \text{k}\Omega & \text{H} \times \text{MHz} &= \text{M}\Omega \\ \mu\text{H} \times \text{GHz} &= \text{k}\Omega & \text{mH} \times \text{GHz} &= \text{M}\Omega \end{aligned}$$

5.5.5 Circuitos combinados de resistores, capacitores e bobinas

As resistores, capacitâncias e indutâncias de um circuito CA podem estar ou ser conectadas entre si e em relação à fonte de alimentação ou de sinal, em série, em paralelo ou em uma configuração mista. Em qualquer dos casos, do ponto de vista da fonte, todo o conjunto se comporta como uma só carga equivalente que tem uma determinada resistência, reatância ou impedância, dependendo da relação específica que estabeleçam entre a tensão e a corrente de entrada. Em seguida, examinaremos os seguintes casos particulares:

1. Circuitos R ou resistivos formados por resistores em série ou em paralelo.
2. Circuitos X ou reativos formados por reatâncias indutivas e/ou capacitivas em série ou em paralelo.

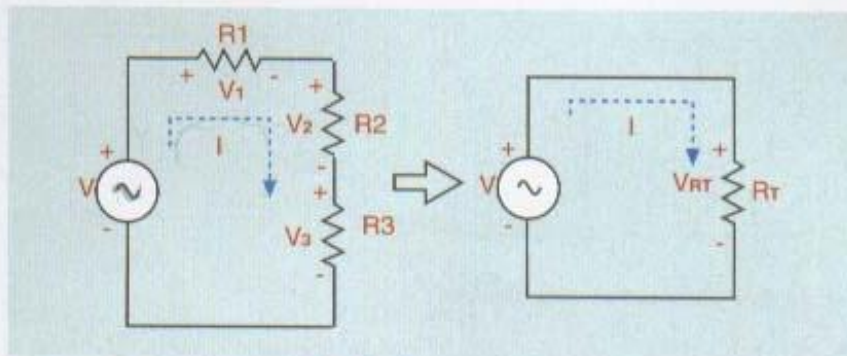


Figura 5.53 Resistores em série

rie ou em paralelo.

3. Circuitos RLC ou resistivo-reativos formados por resistores, reatâncias indutivas e reatâncias capacitivas em série ou em paralelo.

Circuitos resistivos formados por resistores em série. Na figura 5.53, os resistores R_1 , R_2 e R_3 estão conectados em série e alimentados por uma tensão V . Como resultado, produz-se uma corrente I . Esta corrente é a mesma para todas as cargas, está em fase com a tensão aplicada, e produz sobre cada resistência uma queda de tensão na forma $I \times R$. A resistência equivalente ao total do circuito (R_T) pode ser facilmente avaliada aplicando-se as Leis de Ohm e de Kirchhoff como segue:

$$\begin{aligned} R_T &= \frac{V}{I} = \frac{(V_1 + V_2 + V_3)}{I} \\ R_T &= \frac{(I \times R_1 + I \times R_2 + I \times R_3)}{I} \\ R_T &= \frac{I \times (R_1 + R_2 + R_3)}{I} \end{aligned}$$

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3$$

Portanto, a resistência equivalente de dois ou mais resistores em série é igual à soma dos resistores individuais. Este resultado é válido tanto para circuitos CA como para circuitos CC. Por exemplo, se $R_1 = 5\text{k}\Omega$, $R_2 = 1\text{k}\Omega$ e $R_3 = 10\text{k}\Omega$, então a resistência total do circuito é simplesmente $R_T = 5\text{k}\Omega + 1\text{k}\Omega + 10\text{k}\Omega = 16\text{k}\Omega$.

Note que a resistência equivalente em série sempre é maior que a maior das resistores envolvidas. No nosso caso, $16\text{k}\Omega > 10\text{k}\Omega$. Portanto, conectamos resistores em série para aumentar a resistência total. Se se conectam N resistores com o mesmo valor R em série, a resistência total equivalente é igual a $N \times R$. Por exemplo, a resistência total resultante de conectar 4 resistores de $2,2\text{k}\Omega$ em série é $4 \times 2,2\text{k}\Omega = 8,8\text{k}\Omega$.

No caso particular de duas resistores em série, a resistência equivalente é simplesmente:

$$V_1 = V_T \times \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3}$$

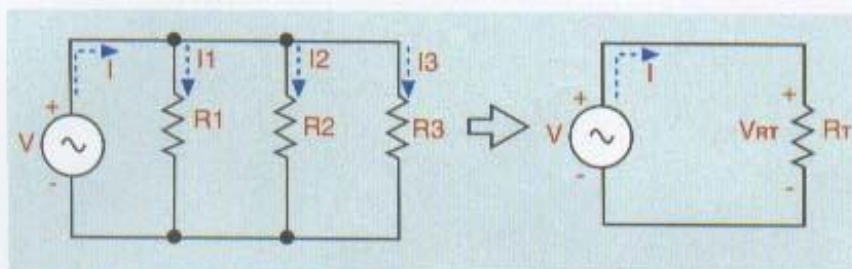


Figura 5.54 Resistores em paralelo

$$R_T = R_1 + R_2$$

Se R_1 é muito grande, comparada com R_2 , esta última praticamente não incide na resistência total e pode ser ignorada. Portanto:

$$R_T = R_1 \text{ se } R_1 \gg R_2$$

Circuitos resistivos formados por resistores em paralelo. Na figura 5.54, os resistores R_1 , R_2 e R_3 estão conectados em paralelo e alimentados por uma tensão V . Como resultado, produz-se uma corrente I . A tensão aplicada é a mesma para todas as cargas, está em fase com a corrente produzida e gera através de cada resistência uma corrente V/R . A resistência equivalente ou total do circuito (R_T) pode ser avaliada facilmente aplicando-se a lei de Ohm e a primeira lei de Kirchhoff como segue:

$$R_T = \frac{V}{I} = \frac{V}{I_1 + I_2 + I_3}$$

$$R_T = \frac{V}{\frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} + \frac{V}{R_3}}$$

Isto é, para resistores em paralelo:

$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$$

ou

$$\frac{1}{R_T} = G_T = G_1 + G_2 + G_3$$

Em outras palavras, a condutância (recíproco da resistência) equivalente de dois ou mais resistores em paralelo é igual à soma das condutâncias individuais. Este resultado é válido tanto para circuitos CA como para circuitos CC. Por exemplo, se $R_1=5\text{k}\Omega$, $R_2=1\text{k}\Omega$ e $R_3=10\text{k}\Omega$, então a resistência total do circuito é simplesmente

$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{5\text{k}\Omega} + \frac{1}{1\text{k}\Omega} + \frac{1}{10\text{k}\Omega}}$$

$$R_T = \frac{1}{0.2\text{mS} + 1.0\text{mS} + 0.1\text{mS}}$$

$$R_T = \frac{1}{1.3\text{mS}} = 0.769\text{k}\Omega = 769\Omega$$

Note que a resistência equivalente de um circuito paralelo sempre é menor que a menor das resistências envolvidas. Neste caso, $769\Omega < 1\text{k}\Omega$. Portanto, conectamos resistores em paralelo para diminuir a resistência

Exercício 5.3 Um circuito determinado necessita de um resistor de 4575Ω , que não é um valor comercial, para fixar uma tensão de referência de 1.83V . Determine uma combinação possível de três resistores comerciais de carvão conectados em série que permita obter a resistência requerida. Utilize resistores com uma tolerância de 5%.

Resposta. $4,3\text{ k}\Omega$, 270Ω e $5,1\Omega$

Solução. De acordo com a informação fornecida no quadro "Valores preferenciais de resistores" (ver página 114), os valores comerciais mais próximos do solicitado (4575Ω) são 4300Ω e 4700Ω . Este último valor não serve porque é maior que a resistência total requerida e esta última é sempre maior que a maior das resistores. Portanto, podemos escolher 4300Ω como primeiro resistor (R_1). Neste caso, nos faltariam $4575\Omega - 4300\Omega = 275\Omega$. O valor mais próximo a 275Ω é 270Ω , que seria o segundo resistor (R_2). O resistor restante (5Ω), que não é um valor comercial, pode-se completar com um resistor de $4,7\Omega$ ou $5,1\Omega$. Naturalmente, são possíveis outras combinações.

Posto que a tensão aplicada à resistência equivalente (4575Ω) é 1.83V , a potência dissipada em conjunto pelos três resistores é $(1.83\text{V})^2/4575\Omega = 0.732 \times 10^{-3}\text{W} = 0.732\text{mW}$. Portanto, todos os resistores podem ser de $1/8\text{W}$ (125mW) ou $1/4\text{W}$ (250mW).

Exercício 5.4 Utilizando a configuração mostrada na figura, deseja-se projetar um sistema de resistência variável que proporcione entre A e B uma resistência de $220\ \Omega$ quando o potenciômetro P está em sua posição de mínima resistência (cursor completamente deslocado até B) e de aproximadamente $38\ k\Omega$ quando está em sua posição de máxima resistência (cursor completamente deslocado até A). Assumindo-se que o potenciômetro P é de $100\ k\Omega$, determine os valores comerciais de R_1 e R_2 necessários para cumprir os requisitos do projeto.

Resposta. $R_1=220\ \Omega$, $R_2=62\ k\Omega$

Solução. A resistência equivalente entre os pontos A e B é simplesmente a combinação em série de R_1 e o paralelo de R_2 com R_3 , que chamaremos R_P . Isto é:

$$R_{AB} = R_1 + R_P = R_1 + R_2 \parallel P$$

Quando o potenciômetro P está em sua posição de mínima resistência, P é igual a $0\ \Omega$ e, portanto, R_P também é igual a $0\ \Omega$. Sob estas condições, a resistência mínima entre A e B, que deve ser de $220\ \Omega$, fica determinada pelo valor de R_1 . Portanto:

$$R_1 = R_{ABmin} = 220\ \Omega = 0,22\ k\Omega$$

Quando o potenciômetro P está em sua posição de máxima resistência, P é igual a $100\ k\Omega$ e, portanto, R_P tem um valor inferior a $100\ k\Omega$. Sob estas condições, a resistência máxima entre A e B, que deve ser de $38\ k\Omega$, fica determinada pelo valor de R_P e, especificamente, pelo valor de R_2 . Portanto:

$$R_P = R_{ABmax} - R_1 = 38\ k\Omega - 0,22\ k\Omega = 37,78\ k\Omega$$

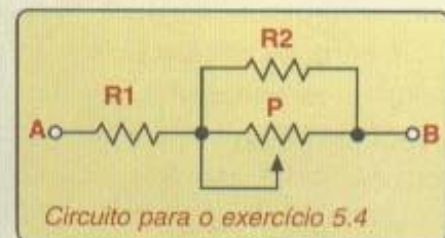
Este valor deve ser igual à resistência equivalente paralelo de R_2 e P. Isto é:

$$R_P = (P \times R_2) / (P + R_2)$$

Portanto:

$$R_2 = (P \times R_P) / (P - R_P) = (100\ k\Omega \times 37,78\ k\Omega) / (100\ k\Omega - 37,78\ k\Omega) = 60,72\ k\Omega$$

O valor comercial mais próximo é $R_2 = 62\ k\Omega$. Sob estas condições, a resistência máxima entre A e B seria igual a $38,27\ k\Omega$, que é um valor perfeitamente aceitável.



total. Se se conectam N resistores de mesmo valor R em paralelo, a resistência total equivalente é igual a R/N . Por exemplo, 5 resistores de $10\ k\Omega$ em paralelo produzem uma resistência equivalente de $2\ k\Omega$ porque $10\ k\Omega / 5 = 2\ k\Omega$.

No caso particular de dois resistores conectados em paralelo, digamos R_1 e R_2 , a resistência equivalente é simplesmente:

$$R_T = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2}$$

Se R_1 é muito pequena comparada com R_2 , esta última praticamente

não incide na resistência total e pode ser ignorada. Portanto:

$$R_T = R_1 \parallel R_2 = R_1 \text{ se } R_1 \ll R_2$$

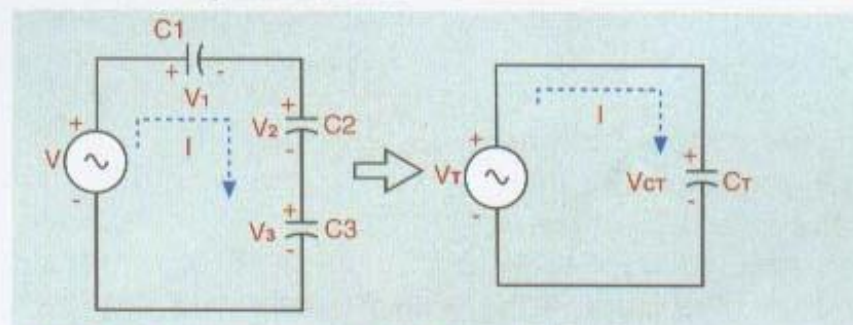


Figura 5.55 Reatâncias capacitivas em série

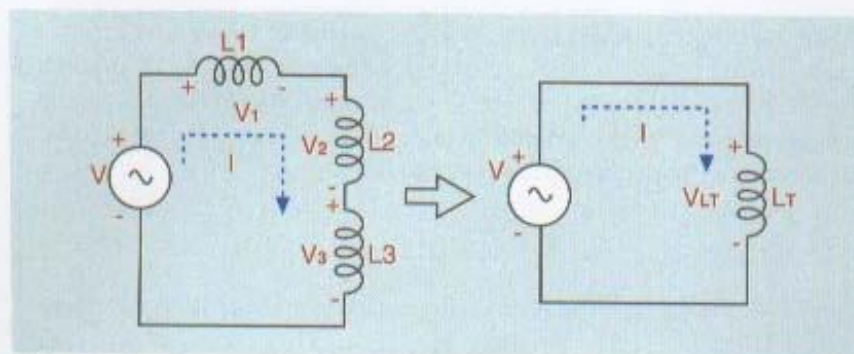


Figura 5.56 Reatâncias indutivas em série

Circuitos reativos. Tanto a reatância capacitiva (X_C) de um capacitor, como a reatância indutiva (X_L) de uma bobina, são uma medida da quantidade de oposição que os elementos apresentam à passagem da corrente alternada. Pela mesma razão, as reatâncias em série ou em paralelo comportam-se da mesma forma que as resistores em série ou em paralelo, exceto que produzem uma defasagem de 90° entre a corrente e a tensão. Em seguida, examinaremos os seguintes casos particulares:

1. Circuitos reativos capacitivos ou indutivos em série ou em paralelo.
2. Circuitos reativos capacitivos e indutivos em série ou em paralelo.
3. Resistores e reatâncias capacitivas e indutivas em série ou em paralelo.

Circuitos reativos formados por capacitâncias ou indutâncias conectadas em série.

Neste caso, a reatância total (X_T) é igual à soma das reatâncias individuais. Portanto, para

capacitores em série, **figura 5.55**, a reatância capacitiva total (X_{CT} , em Ω) é simplesmente

$$X_{CT} = X_{C1} + X_{C2} + X_{C3} + \dots$$

$$X_{CT} = \left(\frac{1}{2\pi f} \right) \left(\frac{1}{C_T} \right)$$

sendo X_{C1} , X_{C2} , X_{C3} , ... as reatâncias capacitivas de C_1 , C_2 , C_3 , ... à frequência de operação f (Hz), sendo $\pi=3.1416$ uma constante matemática e C_T (F) a capacitância equivalente total do circuito de carga. Esta última está dada pela seguinte fórmula, análoga à dos resistores em paralelo:

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

Portanto, conectamos capacitores em série para reduzir a capacitância total. Isto equivale a aumentar a espessura do dielétrico. Para o caso de dois capacitores em série:

$$C_T = \frac{C_1 \times C_2}{C_1 + C_2}$$

Para o caso de bobinas em série, **figura 5.56**, a reatância indutiva total (X_{LT}) é simplesmente:

$$X_{LT} = X_{L1} + X_{L2} + X_{L3} + \dots$$

$$X_{LT} = 2\pi \times f \times L_T$$

sendo X_{L1} , X_{L2} , X_{L3} , ... as reatâncias indutivas de L_1 , L_2 , L_3 , ... à frequência de operação f (Hz), sendo $\pi=3.1416$ e L_T (H) a indutância equivalente total. Esta última está dada pela seguinte fórmula, análoga à dos resistores em série:

$$L_T = L_1 + L_2 + L_3 + \dots$$

Portanto, conectamos bobinas em série para aumentar a indutância total. Isto equivale a aumentar a longitude axial do embobinamento. Para o caso particular de duas bobinas em série:

$$L_T = L_1 + L_2$$

A fórmula anterior assume que as bobinas não estão acopladas magneticamente, ou seja, não estão realizadas sobre o mesmo núcleo e são perpendiculares entre si ou se encontram o suficientemente afastadas para que seus campos magnéticos não interajam entre si. Quando este não é o caso, cada bobina induz uma tensão nas bobinas próximas, aumentando ou diminuindo a indutância total do ponto de vista da fonte. Esta variação aparente na indutância denomina-se **indutância mútua** (L_M) e é medida em henry (H).

A indutância mútua entre duas bobinas depende basicamente de seus valores nominais de indutância e da magnitude do acoplamento magnético entre elas. Este último fator é especificado mediante um parâmetro denominado **coeficiente de acoplamento** (k). O valor de k sempre é menor de 1 e é tipicamente da ordem de 0,05 a 0,30 para bobinas de núcleo de ar e de 0,90 a 1,00 para bobinas de núcleo de ferro ou de ferrite. Um k de 0,95, por exemplo, significa que 95% do fluxo magnético produzido por cada bobina atravessa ou enlaça a outra bobina.

Em qualquer caso, a indutância mútua é definida pela seguinte fórmula:

$$LM = k \sqrt{L1 \times L2}$$

Por exemplo, se $L1=225$ mH, $L2=400$ mH e $k=1,00$, a indutância mútua LM entre as duas bobinas é de 300 mH. Sob estas condições, a indutância total LT resultante de conectar em série duas bobinas acopladas magneticamente é definida pela seguinte expressão:

$$LT = L1 + L2 \pm 2LM$$

Utiliza-se o sinal “+” quando as bobinas estão enroladas na mesma direção e o sinal “-” quando estão enroladas em direções opostas. A direção do enrolamento em cada bobina é indicada nos diagramas

mediante um ponto, **figura 5.57**. Assim, não é necessário mostrar como cada bobina está construída fisicamente. As bobinas que têm pontos no mesmo extremo estão enroladas na mesma direção.

Circuitos reativos formados por capacitâncias ou indutâncias conectadas em paralelo. Neste caso, o recíproco da reatância total é igual à soma dos recíprocos das reatâncias individuais. O recíproco de uma reatância denomina-se **susceptância**, é representado com o símbolo **B** e é medido em **siemens** (S). A susceptância mede a habilidade de uma indutância ou de uma capacitância para facilitar a passagem da corrente alternada. Portanto, para capacitores em série, **figura 5.58**, a susceptância capacitiva total (BCT, em S) é simplesmente

$$BCT = \frac{1}{XCT} = \frac{1}{XC1} + \frac{1}{XC2} + \frac{1}{XC3} + \dots$$

$$BCT = 2\pi \times f \times CT$$

sendo $XC1$, $XC2$, $XC3$, ... as reatâncias capacitivas de $C1$, $C2$, $C3$, ... a frequência

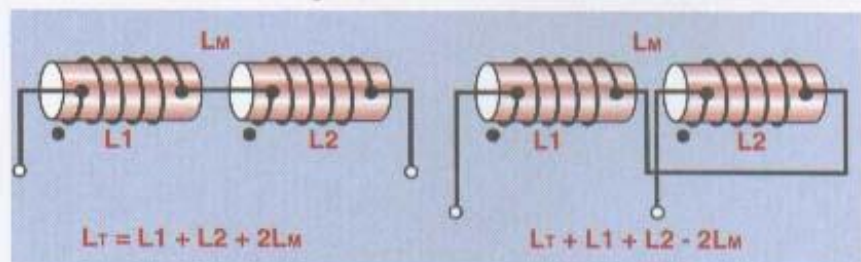


Figura 5.57 Indutância equivalente de bobinas acopladas magneticamente. (a) Campos magnéticos na mesma direção. (b) Campos magnéticos em direções contrárias.

Exercício 5.5. Duas bobinas, cada uma de 500 mH, estão enroladas sobre um mesmo núcleo de modo que o coeficiente de acoplamento entre elas é de 0,95. Determine a indutância resultante de conectar as bobinas em série.

Resposta. 1,47 H se estão conectadas com os enrolamentos na mesma direção, e 525 mH se estão na direção contrária

Solução. Calculamos inicialmente a indutância mútua LM . Neste caso, $L1=L2=500$ mH y $k=0,95$. Portanto:

$$LM = k \sqrt{L1L2}$$

$$LM = 0,95 \times \sqrt{(500\text{mH} \times 500\text{mH})}$$

$$LM = 0,95 \times 500 \text{ mH} = 475 \text{ mH}$$

O problema não especifica a forma como estão conectadas as bobinas. Portanto, podem ocorrer duas hipóteses:

1. As bobinas estão conectadas com seus enrolamentos no mesmo sentido. Neste caso, seus campos magnéticos se reforçam mutuamente e a indutância equivalente é:

$$LT = L1 + L2 + 2LM = 1000\text{mH} + 475\text{mH} = 1475 \text{ mH} = 1,47 \text{ H}$$

2. As bobinas estão conectadas com seus enrolamentos em sentido contrário. Neste caso, seus campos se diminuem mutuamente e a indutância equivalente é:

$$LT1 = L1 + L2 - 2LM = 1000\text{mH} - 475\text{mH} = 525\text{mH}$$

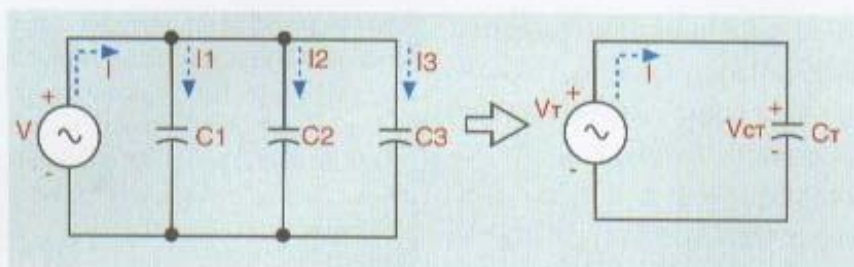


Figura 5.58 Reatâncias capacitivas em paralelo

de operação f (Hz), sendo $\pi=3.1416$ uma constante matemática e C_T (F) a capacitância equivalente total do circuito de carga. Esta última é definida pela seguinte fórmula, análoga à de resistência em série:

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3$$

Portanto, conectamos capacitores em paralelo para aumentar a capacitância total. Isto equivale a aumentar a área das placas. Para o caso específico dos capacitores em paralelo:

$$C_T = C_1 + C_2$$

Tratando-se de bobinas em paralelo, figura 5.59, a susceptância indutiva total (BLT, em S) é simplesmente

$$BLT = \frac{1}{X_{LT}} = \frac{1}{X_{L1}} + \frac{1}{X_{L2}} + \frac{1}{X_{L3}} + \dots$$

$$BLT = \frac{1}{2\pi \times f \times L_T}$$

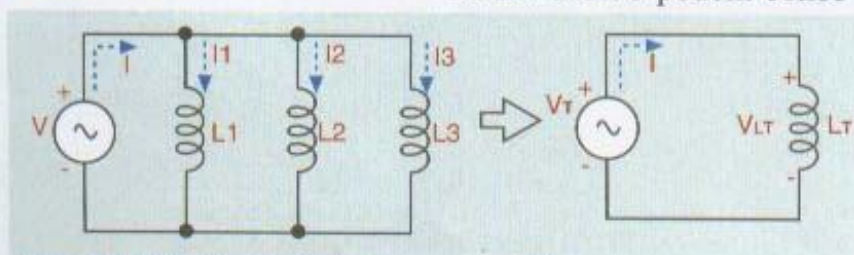


Figura 5.59 Reatâncias indutivas em paralelo

sendo X_{L1} , X_{L2} , X_{L3} , ... as reatâncias indutivas de L_1 , L_2 , L_3 , ... a frequência de operação f (Hz), $\pi=3.1416$ e L_T (H) a indutância equivalente total. Esta última é definida pela seguinte fórmula, análoga à dos resistores em paralelo:

$$L_T = \frac{1}{\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \dots}$$

Portanto, conectamos bobinas em paralelo para reduzir a indutância total. Isto equivale a reduzir a área da seção transversal do embobinamento. Para o caso específico duas bobinas em paralelo:

$$L_T = \frac{L_1 \times L_2}{L_1 + L_2}$$

Novamente, a fórmula anterior presume que as bobinas não estão acopladas magneticamente, ou seja, a indutância mútua entre elas é zero. As bobinas com acoplamento mútuo podem conectar-se também em paralelo.

Entretanto a análise é mais complicada do que aparenta ser inicialmente. Na prática, este tipo de conexão raramente é empregado.

► **Circuitos reativos formados por indutâncias e capacitâncias conectadas em série.** Um circuito que contém tanto reatâncias capacitivas como indutivas denomina-se **circuito LC**. Neste tipo de circuitos, os ângulos de fase opostos fazem com que uma reatância anule o efeito da outra. No caso das reatâncias conectadas em série, figura 5.60, a reatância líquida é igual à diferença entre as duas reatâncias, o que resulta em uma reatância líquida menor que ambas ou maior que as reatâncias. Isto é:

$$X_T = X_L - X_C$$

sendo X_L a reatância indutiva total (soma das reatâncias indutivas individuais) e X_C a reatância capacitiva total (soma das reatâncias capacitivas individuais). Note que se X_L é maior que X_C , a reatância equivalente é de sinal positivo. Isto indica que é de natureza indutiva. Em outras palavras, todo o conjunto se comporta como uma bobina de indutância L que atrasa em 90° a corrente em relação à tensão.

Mesmo assim, se X_L é menor que X_C , a reatância equivalente é de sinal negativo. Isto indica que é de natureza capacitiva. Em outras palavras, todo o conjunto se comporta como um capacitor de capacitância C que adianta em 90° a corrente em relação à tensão.

Um caso particularmente importante se apresenta quando X_L é igual a X_C . Nesta condição, X_T é igual a zero. Em outras palavras, o circuito se comporta como um curto-circuito e a corrente através do mesmo é máxima.

A condição anterior denomina-se **ressonância** e ocorre para um determinado valor de frequência chamado, por isso mesmo, **frequência de ressonância**. Esta frequência, que designaremos como F_0 ou F_r , é definida em Hz pela seguinte fórmula:

$$F_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

sendo L e C , respectivamente, a indutância (H) e a capacitância (F) totais do circuito. Geralmente, a frequências abaixo de F_0 o circuito se comporta como uma capacitância e a frequências acima de F_0 como uma indutância.

Circuitos reativos formados por capacitâncias e indutâncias conectadas em

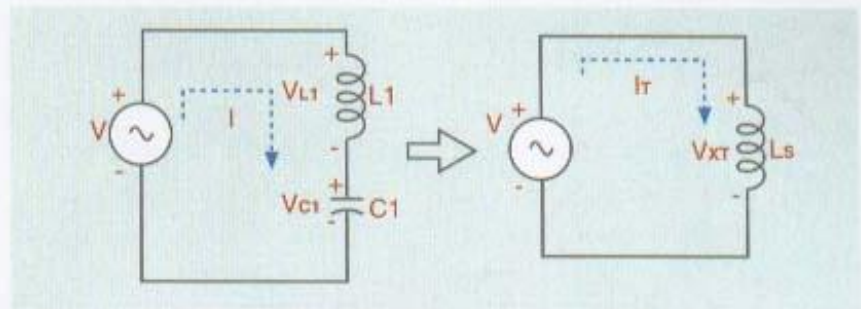


Figura 5.60 Reatâncias capacitivas e indutivas em série

paralelo. Neste caso, figura 5.61, as correntes das malhas capacitivas tendem a anular-se com as das malhas indutivas, fazendo com que a corrente líquida de entrada seja menor que qualquer das correntes da malha. A reatância equivalente é definida pela seguinte fórmula:

$$X_T = \frac{X_C X_L}{X_C - X_L}$$

Portanto, a reatância total pode adotar qualquer valor desde zero até infinito. Note que se X_C é maior que X_L , a reatância X_T resultante é positiva. Isto indica que é de natureza indutiva. Portanto, a corrente está atrasada 90° em relação à tensão. Mesmo assim, se X_C é menor que X_L , a reatância X_T resultante é negativa. Isto indica que é de natureza capacitiva. Portanto,

a corrente está adiantada 90° em relação à tensão.

No caso específico de $X_L = X_C$, o circuito se comporta como um circuito aberto de reatância infinita e a corrente líquida que circula através do mesmo é zero. Esta é a condição de ressonância do circuito. A **frequência de ressonância** (F_0) que ocorre neste fenômeno é definida em Hz pela fórmula

$$F_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

sendo L e C , respectivamente, a indutância (H) e a capacitância (F) totais do circuito. Em geral, com frequências abaixo de F_0 , o circuito se comporta como uma indutância e com frequências acima de F_0 , como uma capacitância.

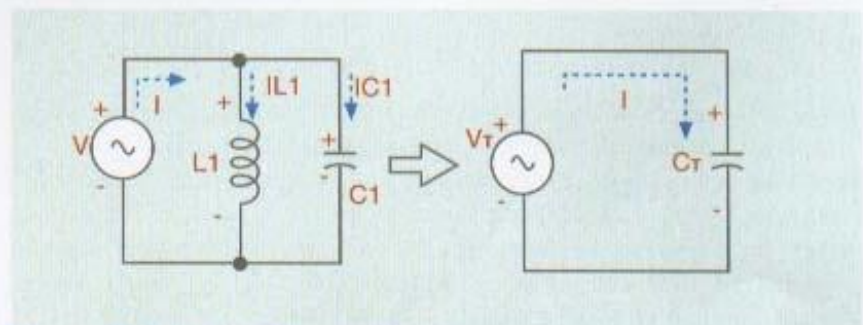


Figura 5.61 Circuito LC paralelo

>> : Note que se a capacitância (C) e a indutância (L) se expressam, respectivamente, em μF e μH , a frequência de ressonância (F_0) é expressada automaticamente em MHz. Mesmo assim, F_0 é expressa em Hz se C e L se expressam,

respectivamente, em F e H, e F_0 é expressa em kHz se C e L se expressam, respectivamente, em mF e mH. Estas relações simples de unidades são muito úteis quando analisamos e projetamos circuitos ressonantes.

Exercício 5.6 Um condensador de $0,47\mu\text{F}$ e uma bobina de 100 mH ($0,1\text{H}$) estão conectados em paralelo e alimentados por uma fonte de sinal CA de frequência variável. Determine (a) A capacitância ou a indutância equivalente do circuito a uma frequência de 15 kHz . (b) A frequência de ressonância própria do circuito

Respostas. (a) $1155\mu\text{F}$. (b) 734 Hz

Solução. (a) Calculamos inicialmente as reatâncias do capacitor (X_C) e da bobina (X_L) à frequência de operação (15 kHz). Isto é:

$$X_C = 1/(2\pi fC) = 1/(6,28 \times 15\text{kHz} \times 0,47\mu\text{F}) = 0,226\text{ k}\Omega = 226\ \Omega$$

$$X_L = 2\pi fL = 6,28 \times 15\text{kHz} \times 100\text{mH} = 9420\ \Omega$$

Neste caso, X_L é maior que X_C ($9420\Omega > 226\Omega$). Portanto, a reatância resultante é de natureza capacitiva e sua magnitude é:

$$X_T = X_L - X_C = 9420\Omega - 226\Omega = 9194\ \Omega = 9,19\text{ k}\Omega$$

El valor de capacitância C_T associado a este valor de reatância se encontra a partir da expressão clássica para a reatância capacitiva. Isto é:

$$X_T = 1/(2\pi fC_T)$$

$$\Rightarrow C_T = 1/(2\pi fX_T) = 1/(6,28 \times 15\text{kHz} \times 9,19\text{k}\Omega) = 1,155 \times 10^{-3}\text{ F} = 1155\ \mu\text{F}$$

Em outras palavras, a 15kHz , a carga observada pela fonte de sinal é uma capacitância de $1155\ \mu\text{F}$. Se a esta frequência retirarmos a bobina e o capacitor originais e os substituímos por um capacitor de $1155\ \mu\text{F}$, o circuito se comportaria exatamente da mesma forma, ou seja, não se alterariam a magnitude da corrente, nem a relação de fase entre a corrente e a voltagem.

(b) A frequência de ressonância própria do circuito é

$$f_0 = 1/2\pi\sqrt{LC} = 1/6,28 \times \sqrt{100 \times 10^{-3}\text{H} \times 0,47 \times 10^{-6}\text{F}} = 734\text{ Hz}$$

Isto é, a 734 Hz , o circuito se comporta como um curto-circuito e a corrente através do circuito é máxima, teoricamente infinita. Na prática, esta corrente estaria limitada pela resistência interna da fonte de sinal, a resistência interna da bobina e a ESR do capacitor. Além disso, é muito provável que a f_0 seja ligeiramente diferente de 734 Hz como resultado da tolerância dos capacitores componentes, a capacitância distribuída da bobina, e a indutância dos terminais do capacitor.

Circuitos resistivo-reativos formados por resistores, capacitâncias e indutâncias em série. Os circuitos que contêm resistores, reatâncias capacitivas e reatâncias indutivas denominam-se **circuitos RLC**. Quando combinam-se estes três tipos de elementos em um mesmo circuito, a magnitude e a fase da corrente dependem da resistência e da reatância total que apresentam estes elementos à fonte de tensão. O efeito combinado de uma resistência e uma reatância denomina-se **impedância**, e é medida em **ohms** (Ω) e é representada com o sinal **Z**.

A impedância é uma quantidade **fasorial** ou **complexa**. Isto significa que tem uma magnitude e uma fase ou, o que é o mesmo, uma parte **real**, que é a resistência, e uma parte **imaginária**, que é a reatância. A fase é dada pela quantidade de atraso ou adiantamento da corrente em relação à tensão que produz a combinação.

O recíproco da impedância, que é também uma quantidade fasorial, denomina-se **admitância**, é medida em **siemens** (S) e é representada com o sinal **Y**. A impedância é adequada para descrever circuitos em série e a admitância para descrever circuitos em paralelo.

No caso de um circuito RLC em série, **figura 5.62**, a magnitude da impedância (Z) e o ângulo de fase da tensão em relação à corrente, que representaremos com a letra grega ϕ ("fi") são dadas pelas seguintes fórmulas:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{X}{R} \right)$$

sendo R a resistência e X a reatância líquida totais do circuito calculadas da mesma forma como explicado anteriormente para circuitos resistivos e reativos em série. A expressão " $\tan^{-1} (X/R)$ " para ϕ significa "o ângulo cuja tangente é igual a X/R ". A tangente de um ângulo qualquer pode ser determinada a partir de tabelas trigonométricas ou utilizando uma calculadora.

Por exemplo, se X/R é igual a 0,707, o ângulo de fase é de 45° , porque a tangente de 45° é 0,707. Naturalmente, se $X_L=0$, então $X=X_C$ (circuito LC em série) e se $X_C=0$, então $X=X_L$ (circuito RL em série).

Note que em um circuito RLC em série a reatância líquida pode ser positiva ou negativa, dependendo de se a reatância indutiva total (X_L) é maior ou menor que a

Exercício 5.7 Considere um circuito formado por uma resistência R_1 de $1\text{k}\Omega$, uma bobina L_1 de $10\mu\text{H}$ e um capacitor C_1 de 100pF ideais conectados em série e alimentados por uma fonte de sinal de frequência variável que tem uma resistência interna R_G de 600Ω ($0,6\text{k}\Omega$). Determine: (a) A magnitude e o ângulo de fase da impedância a uma frequência de 100MHz . (b) A frequência de ressonância própria do circuito.

Respostas: (a) $6,26\text{k}\Omega$, $\tan^{-1} (3,9125)$. (b) $5,02\text{MHz}$

Solução. (a) Calculamos inicialmente a resistência e a reatância totais do circuito, tendo em conta a resistência interna da fonte. Isto é:

$$R = R_1 + R_G = 1\text{k}\Omega + 0,6\text{k}\Omega = 1,6\text{k}\Omega$$

$$X_C = 1/2\pi fC = 1/6,28 \times 100\text{MHz} \times 100\text{pF} = 15,92\text{k}\Omega = 0,016\text{k}\Omega$$

$$X_L = 2\pi fL = 6,28 \times 100\text{MHz} \times 10\mu\text{H} = 6,28\text{k}\Omega = 6280\text{k}\Omega$$

$$X = X_L - X_C = 6280\text{k}\Omega - 16\text{k}\Omega = 6264\text{k}\Omega = 6,26\text{k}\Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{(1,6\text{k}\Omega)^2 + (6,26\text{k}\Omega)^2} = \sqrt{41,75\text{k}\Omega} = 6,46\text{k}\Omega$$

$$\phi = \tan^{-1} (X/R) = \tan^{-1} (6,26\text{k}\Omega/1,6\text{k}\Omega) = \tan^{-1} (3,9125) = 76^\circ$$

Isto implica que, à frequência considerada, o circuito se comporta como um circuito LR, o que significa que é formado por uma resistência e uma indutância, e que a corrente está atrasada com referência à voltagem em um ângulo de fase de 76° .

(b) A frequência de ressonância é simplesmente

$$F_0 = 1/2\pi\sqrt{LC} = 1/6,28 \times \sqrt{10 \times 10^{-6}\text{H} \times 100 \times 10^{-12}\text{F}} = 5,02\text{MHz}$$

Isto implica que, a uma frequência de $5,02\text{MHz}$, o circuito se comporta como uma resistência de $1,6\text{k}\Omega$, com a corrente e a voltagem em fase, ou seja, $\phi = 0^\circ$.

reatância capacitiva total (X_C). No primeiro caso ($X_L > X_C$), o ângulo de fase é positivo, indicando que a tensão está adiantada em relação à corrente, enquanto que

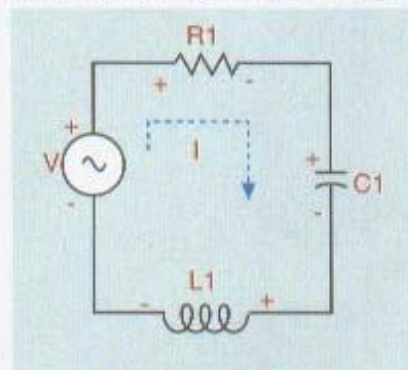


Figura 5.62 Circuito RLC em série

no segundo ($X_L < X_C$) é negativo, indicando que a tensão está atrasada em relação à corrente. Em qualquer dos casos, a magnitude do ângulo de fase sempre está entre 0° e 90° .

Um caso particularmente importante se apresenta quando X_L é igual a X_C , ou seja, quando a reatância líquida ($X_L - X_C$) é igual a zero. Sob essa condição, que apresenta a **frequência de ressonância** (F_0) própria do circuito, a im-

pedância Z é igual à resistência R . Isto significa que a corrente através do circuito é máxima e que a corrente está em fase com a tensão. Novamente, a frequência de ressonância (F_0 , em Hz) é definida pela fórmula:

$$F_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

onde 2π é uma constante (6,28), L é a indutância (H) e C é a capacitância (F),

Circuitos resistivo-reativos formados por resistores, capacitâncias e indutâncias em paralelo. No caso de um circuito RLC paralelo, **figura 5.63**, a magnitude da admitância (Y) e o ângulo de fase da corrente em relação à tensão (ϕ) são dados pelas seguintes fórmulas:

$$Y = \sqrt{G^2 + B^2} = \sqrt{G^2 + (BC - BL)^2}$$

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{B}{R}\right)$$

sendo $G=1/R$ a condutância (recíproca da resistência) e $B=1/X$ a susceptância (recíproca da reatância) líquidas totais do circuito.

Note que em um circuito RLC paralelo a susceptância líquida pode ser positiva ou negativa, dependendo se a susceptância capacitiva total (BC) é maior ou menor que a susceptância indutiva total (BL). No primeiro caso ($BC > BL$), o ângulo

de fase é positivo, indicando que a corrente está adiantada em relação à tensão, enquanto que no segundo ($BC < BL$) é negativo, indicando que a corrente está atrasada em relação à tensão. Em ambos os casos, a magnitude do ângulo de fase sempre está entre 0° e 90° .

Novamente, a condição de ressonância do circuito se apresenta quando X_C é igual a X_L , ou quando a reatância líquida é infinita. Sob esta condição, a admitância Y é igual à condutância G ($1/R$), a corrente através do circuito é mínima e a tensão está em fase com a corrente. A frequência de ressonância (F_0 , em Hz) é definida por:

$$F_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

onde 2π é 6,28, L (H) é a indutância e C (F) é a capacitância.

5.6 Aplicações especiais

Os conceitos examinados neste capítulo são de grande importância prática na análise e projeto de todo tipo de circuitos eletrônicos. Por esta razão, é importante que você os compreenda corretamente e aprenda

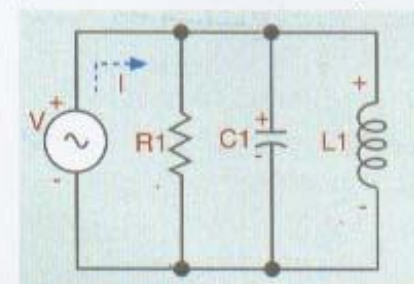


Figura 5.63 Circuito RLC paralelo

da a utilizá-los. Não se preocupe nem deixe-se intimidar pelos aspectos matemáticos envolvidos. Como você terá notado, são muito simples de aplicar e têm natureza dupla.

Por exemplo, o comportamento das bobinas é análogo ao dos capacitores, e o funcionamento dos circuitos em paralelo é análogo ao dos circuitos em série. Somente mudam os finais: tensão por corrente, resistência por condutância, indutância por capacitância, reatância por susceptância, impedância por admitância, etc.

Para finalizar, mostraremos algumas estruturas simples de circuitos passivos que são amplamente utilizadas na prática, e que encontraremos frequentemente. Em particular, nos referiremos aos divisores de tensão e de corrente resistivos (independente da frequência) e aos filtros RC passa-altos e passa-baixos, que são basicamente divisores de tensão dependentes da frequência.

Divisores de tensão. O circuito da **figura 5.64** denomina-se comumente um **divisor de tensão** porque produz uma tensão de saída (V_{OUT}), controlável mediante R_1 e R_2 , que é uma fração da tensão de entrada (V_{IN}). De acordo com a Lei de Ohm:

$$V_{OUT} = I \times R_2 = \frac{V_{IN}}{R_T} \times R_2$$

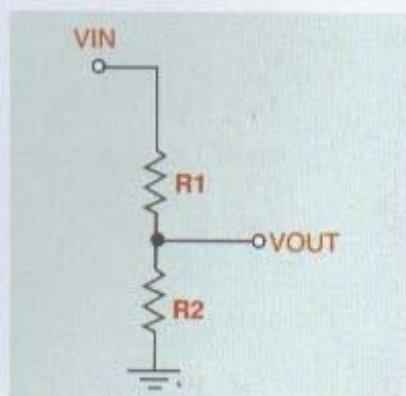


Figura 5.64 Divisor de tensão

sendo $I = V_{IN}/R_T$ a corrente do circuito e $R_T = R_1 + R_2$ a resistência equivalente do mesmo observada pela fonte. Portanto:

$$V_{OUT} = \frac{V_{IN} \times R_2}{R_2 + R_1}$$

Como $R_1 + R_2$ sempre é maior que R_2 , V_{OUT} é uma fração, entre 0,0 e 1,0, de V_{IN} . Por exemplo, se $R_2 = 1\text{k}\Omega$ e se deseja que V_{OUT} seja sempre 25% de V_{IN} , o valor de R_1 deve ser de $45\text{k}\Omega$.

Divisores de corrente. O circuito da figura 5.65 denomina-se comumente um **divisor de corrente** porque produz uma corrente de saída (I_{OUT}), controlável mediante R_1 e R_2 , que é uma fração da corrente de entrada (I_{IN}). De acordo com a Lei de Ohm:

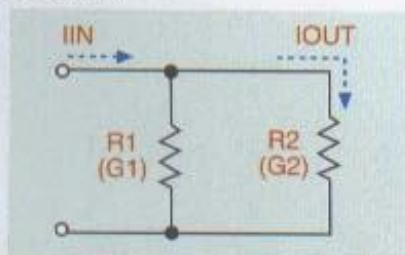


Figura 5.65 Divisor de corrente independente da frequência

$$I_{OUT} = \frac{V}{R_2} = \frac{I_{IN} \times R_T}{R_2}$$

sendo $V = I_{IN} \times R_T$ a tensão do circuito e $R_T = R_1 \parallel R_2$ a resistência equivalente do mesmo. Portanto:

$$I_{OUT} = \frac{I_{IN} \times R_1}{R_1 + R_2}$$

Posto que $R_1 + R_2$ sempre é menor que R_1 , I_{OUT} é uma fração, entre 0,0 e 1,0, de I_{IN} . Por exemplo, se $R_2 = 10\text{k}\Omega$ e se deseja que I_{OUT} seja sempre 70% de I_{IN} , o valor de R_1 deve ser de $23,3\text{k}\Omega$.

Filtros RC passa-altos. Combinando resistências com capacitâncias ou indutâncias podem-se fazer divisores de tensão dependentes da frequência. Este tipo de circuitos denominam-se **filtros RC** ou **RL** e têm a propriedade desejável de permitir a passagem de sinais de uma determinada frequência ou faixa de frequências enquanto impedem a passagem dos sinais com frequências fora daquela faixa.

Na figura 5.66, por exemplo, mostramos o circuito de um **filtro RC passa-altos**, denominado assim porque somente permite a passagem de frequências acima de certo ponto de referência denominado **frequência de corte (fc)**, que se avalia mediante a seguinte fórmula:

$$F_c = \frac{1}{2\pi \times R \times C}$$

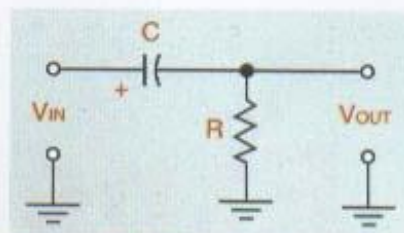


Figura 5.66 Filtro RC passa-alto

Por exemplo, se $C = 0,01\mu\text{F}$ e $R = 1\text{k}\Omega$, a frequência de corte do filtro seria de $15,9\text{kHz}$. Isto significa que os sinais com frequências acima $15,9\text{kHz}$ passam até a etapa seguinte, enquanto que as de frequências abaixo de $15,9\text{kHz}$ são atenuadas.

Filtros RC passa-baixos. O circuito da figura 5.67 é um **filtro RC passa-baixos**, denominado assim porque somente permite a passagem de frequências abaixo por certo ponto de referência denominado **frequência de corte (fc)**, que se avalia mediante a seguinte fórmula:

$$F_c = \frac{1}{2\pi \times R \times C}$$

Por exemplo, se $C = 0,01\mu\text{F}$ e $R = 1\text{k}\Omega$, a frequência de corte do filtro seria de $15,9\text{kHz}$. Isto significa que os sinais com frequências abaixo de $15,9\text{kHz}$ passam para a etapa, enquanto que as de frequências acima de $15,9\text{kHz}$ são atenuadas. ➡

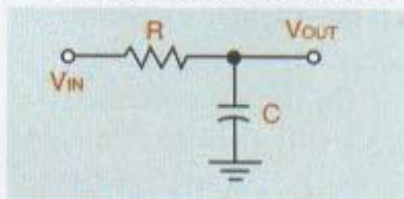


Figura 5.67 Filtro RC passa-baixo

Experimento 5.3

Divisores de tensão AC

Objetivos

1. Comprovar a operação de um divisor de tensão independente da frequência realizado com dois resistores.
2. Comprovar a operação de um divisor de tensão dependente da frequência realizado com um resistor e um capacitor.
3. Aprender a realizar cálculos de correntes, tensões e relações de fase em circuitos de corrente alternada.
4. Aprender a calcular a resistência interna de uma fonte de sinais.

Procedimento

1. Monte no protoboard o circuito da **figura 1**, correspondente a um divisor de tensão resistivo alimentado por um gerador CA de frequência variável. Sobre este circuito realizaremos com o multímetro digital as medidas das tensões CA indicadas. A idéia básica é demonstrar que (a) a tensão de entrada (V_{IN}) é igual à soma algébrica das tensões VR_1 e

VR_2 e (b) a relação entre a voltagem de saída e a de de entrada (V_{OUT}/V_{IN}) é independente da frequência e igual a R_2/RT , sendo RT a resistência equivalente do circuito.

2. Selecione com o gerador de sinais uma onda senóide CA com uma frequência de 1 kHz e um valor rms de 2 V aproximadamente. Aplique este último à entrada do circuito e meça-o como indicado na **figura 2**, utilizando o multímetro digital configurado como voltímetro CA. A frequência pode ser medida no painel de operação do

instrumento, ou utilizando um osciloscópio ou um freqüencímetro. Anote o valor obtido. No nosso, $V_{IN}=2,01V$.

$V_{IN} = \underline{\hspace{2cm}}$

Materiais necessários

Resistores (1/4W, 5%)

- 1 de 1 k Ω
- 1 de 3,3 k Ω
- 1 de 10 k Ω

Capacitores

- 1 de 0,47 μF , 50V, 10%

Instrumentos

- Gerador de sinais de áudio
- Multímetro digital com escala automática ou de 20 VAC

Outros

- Protoboard
- Calculadora
- Fios para conexão N° 22 AWG

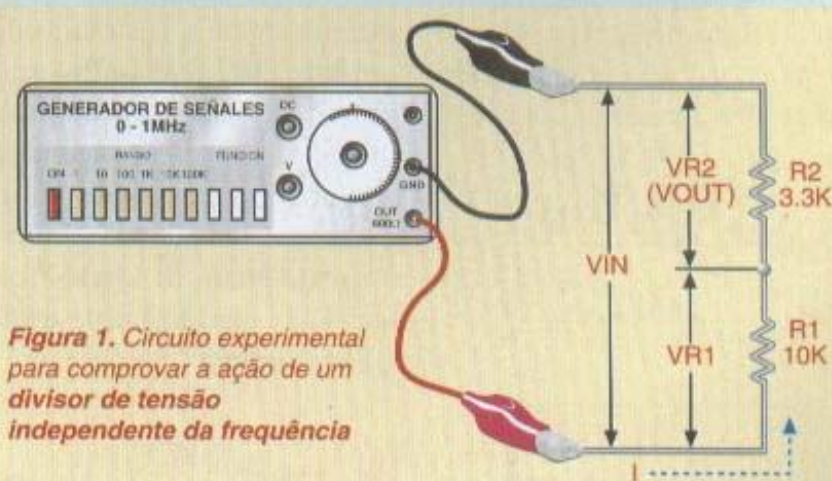


Figura 1. Circuito experimental para comprovar a ação de um divisor de tensão independente da frequência

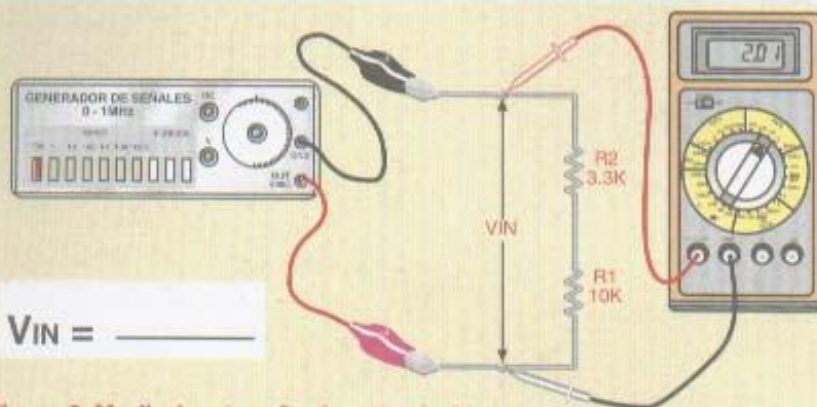


Figura 2. Medindo a tensão de entrada (V_{IN})

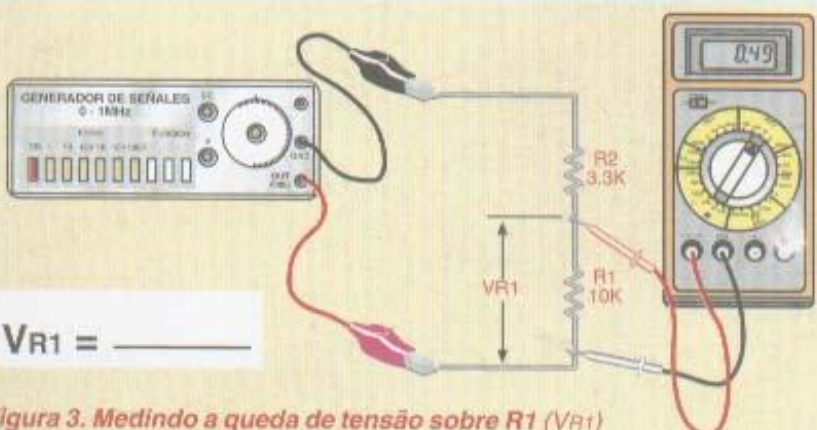


Figura 3. Medindo a queda de tensão sobre $R1$ (V_{R1})

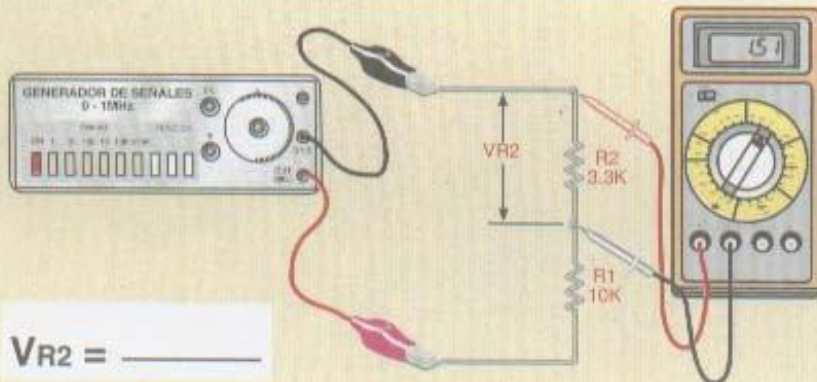


Figura 4. Medindo a queda de tensão sobre $R2$ (V_{R2})

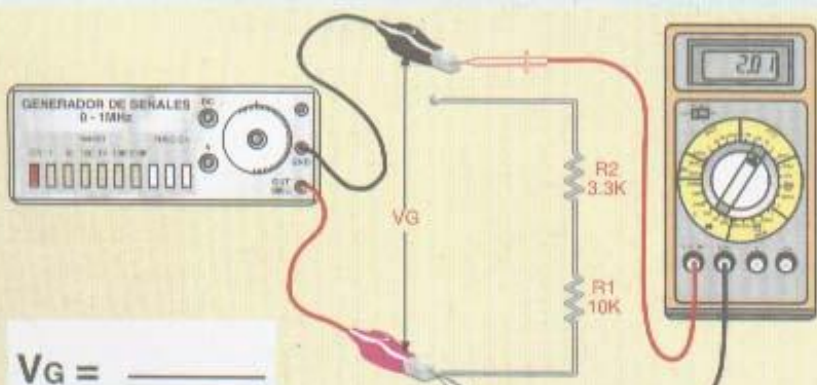


Figura 5. Medindo a saída do gerador sem carga (V_G)

3. Medir as quedas V_{R1} e V_{R2} como indicado nas figuras 3 e 4. A soma algébrica deve ser igual à tensão aplicada (V_{IN}). Isto é:

$$V_{IN} = V_{R1} + V_{R2}$$

Em nosso caso, $V_{R1}=1,51$ V e $V_{R2}=0,49$ V. Portanto, V_{IN} (calculado)= $2,00$ V = $2,01$ V (valor medido). Comparar também o valor medido de V_{R2} com o obtido mediante a fórmula:

$$V_{R2} = \frac{V_{IN} \times R2}{R1 + R2}$$

Em nosso caso, V_{R2} (calculado) = $0,499$ V = $0,49$ V (valor medido).

4. Por último, medir a tensão V_G entregue pelo gerador sem carga, como indicado na figura 5. Calcular então a resistência interna do gerador (R_G) assim:

$$R_G = \frac{R_T \times (V_G - V_{IN})}{V_{IN}}$$

Em nosso caso, o valor medido de V_G foi de $2,10$ V. Portanto, R_G (calculado) = 595Ω . Este valor coincide razoavelmente com o especificado pelo fabricante (600Ω).

5. Ligar novamente o gerador e repetir o passo 3, mas variando a frequência acima e abaixo de 1kHz. Observar o que acontece com V_{R1} e V_{R2} . Você poderá notar que estas tensões praticamente não

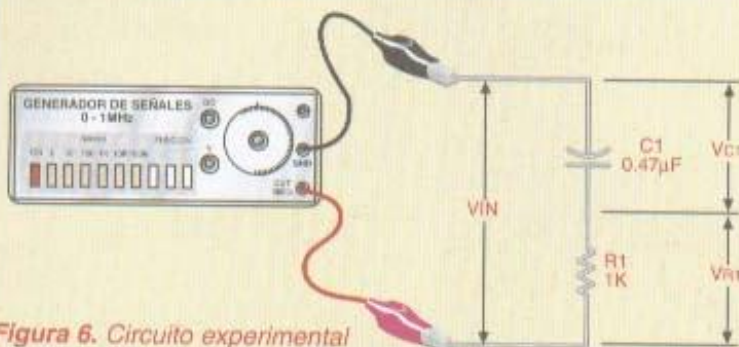


Figura 6. Circuito experimental para comprovar a ação de um divisor de tensão dependente da frequência.

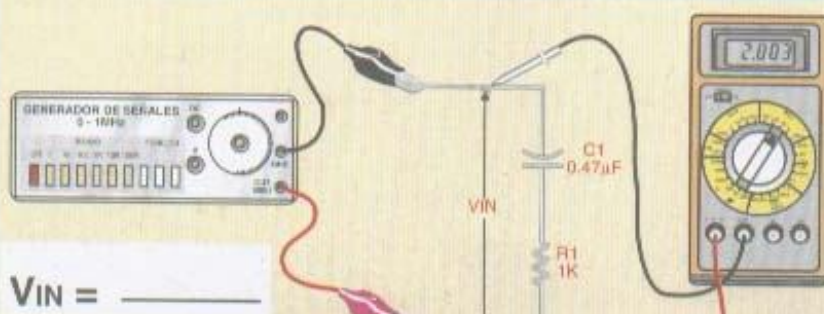


Figura 7. Medindo a tensão de entrada (VIN)

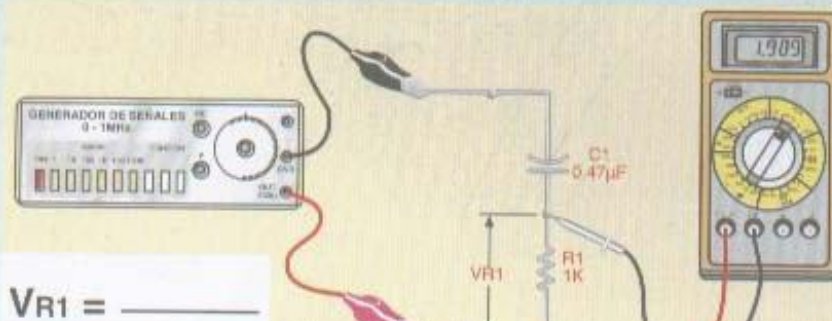


Figura 7. Medindo a queda de tensão sobre R1 (VR1)

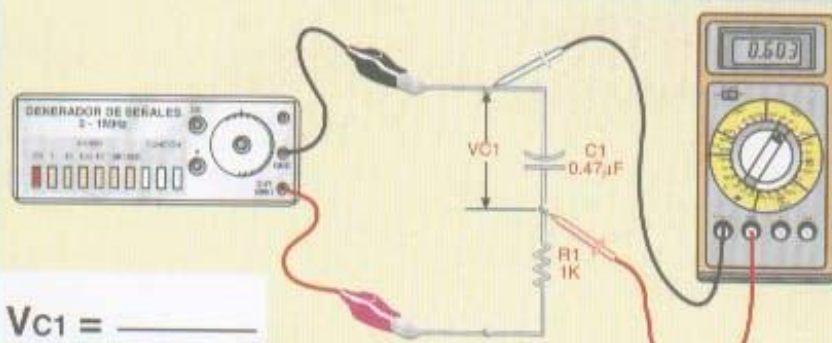


Figura 8. Medindo a queda de tensão sobre C1 (VC1)

mudam com a frequência. Por quê? Tire as suas próprias conclusões.

6. Arme agora o circuito da figura 6 sobre o protoboard. Selecione uma onda senoidal de 1kHz e 2,0 Vrms. Meça este último como indicado na figura 7. Em nosso caso, $V_{IN}=2,003V$.

7. Meça as quedas de tensão V_{R1} e V_{C1} como indicado nas figuras 7 e 8. A soma fasorial deve ser igual à tensão aplicada (V_{IN}). Isto é:

$$V_{IN} = \sqrt{V_{R1}^2 + V_{C1}^2}$$

Em nosso caso, $V_{R1}=1,909V$ e $V_{C1}=0,603V$. Portanto, V_{IN} (calculado) = $2,002V \approx 2,003V$ (V_{IN} medido). Calcular também o ângulo de avanço da corrente I com respeito à tensão V_{IN} , assim:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{V_{C1}}{V_{R1}}$$

Em nosso caso, $\theta = 17,5^\circ$.

8. Para finalizar, repetir o passo 7, mas variando a frequência acima e abaixo de 1kHz. Observar o que acontece com V_{R1} e V_{C1} . Você poderá notar que a V_{C1} aumenta com a diminuição da frequência, e vice-versa, enquanto que a V_{R1} se comporta de modo exatamente contrário. Por que? Tire as suas próprias conclusões.

Capítulo 6

Semicondutores



6

6.1 Teoria básica dos semicondutores

6.2 Os diodos

6.3 Os transistores bipolares

6.4 Os transistores de efeito de campo

6.5 Os tiristores

6.6 Os circuitos integrados

Os semicondutores têm revolucionado a eletrônica mais do que qualquer outra tecnologia. Não existe praticamente nenhum circuito, sistema ou equipamento eletrônico moderno que não utilize semicondutores de uma ou outra forma. Este capítulo explica em linhas gerais a teoria básica dos semicondutores e examina os principais tipos disponíveis atualmente, dando ênfase aos diodos, transistores bipolares, transistores de efeito de campo, tiristores e circuitos integrados. Para cada um analisam-se o seu funcionamento, sua simbologia, suas variantes ou tipos, suas formas de identificação e suas aplicações gerais. Nos capítulos seguintes se estudam em detalhe suas características e seu comportamento como elementos de circuito.

6.1 Teoria básica dos semicondutores

Os semicondutores, figura 6.1, são componentes eletrônicos baseados na propriedade de certos materiais do mesmo nome como o silício, o germânio, o sulfeto de cádmio e o arsenito de gálio de comportar-se indistintamente como condutores ou como isolantes sob determinadas condições ou estímulos externos. Estes estímulos podem ser, por exemplo, sinais elétricos de corrente ou de tensão, mudanças de luz ou de temperatura, presença de campos magnéticos, etc. Os semicondutores são denominados também **dispositivos de estado sólido**.

Atualmente, os dispositivos semicondutores “feitos pelo homem” mais utilizados em Eletrônica são

os diodos, os transistores, os tiristores e os circuitos integrados, construídos principalmente à base de silício. Cada uma destas categorias possui suas próprias variantes ou tipos. Por exemplo, existem diodos retificadores, zener, emissores de luz, de capacidade variável, Schottky, etc.; transistores bipolares e de efeito de campo; tiristores unidirecionais e bidirecionais; circuitos integrados analógicos, digitais, híbridos, etc.

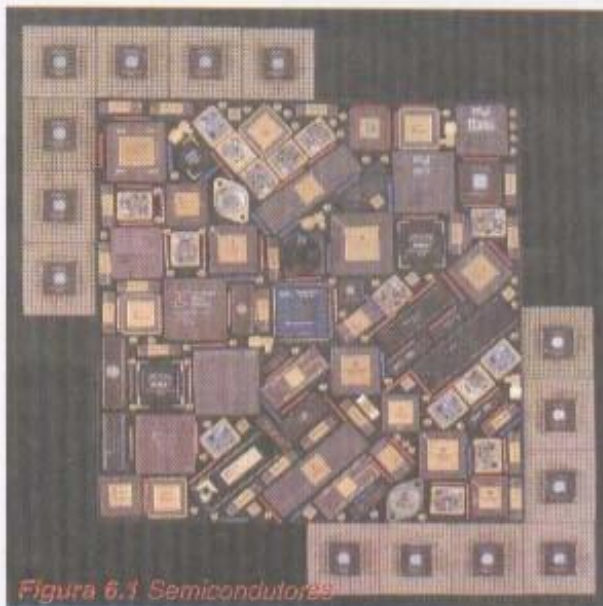


Figura 6.1 Semicondutores

6.1.1 Semicondutores intrínsecos

A característica principal dos semicondutores, diferentemente dos condutores e dos isolantes é sua estrutura atômica. Para compreender este conceito, é conveniente lembrar que no átomo, componente essencial da matéria, o **núcleo**, formado pelos **prótons** e os **neutrons**, está rodeado pelos **elétrons**, os quais se distribuem em órbitas ou níveis de energia, figura 6.2(a).

Os prótons são partículas de carga positiva (+), os elétrons partículas de carga negativa (-) e os neutrons partículas neutras, ou seja sem carga elétrica.

Os elétrons mais distantes do núcleo, localizados no nível de energia mais externo, são denominados **elétrons de valência** e são muito importantes do ponto de vista



Figura 6.2 Estrutura atômica de condutores e semicondutores

eletrônico porque determinam a **condutividade** de um material, ou seja sua maior ou menor facilidade para fornecer portadores de carga. Para ressaltar sua importância, a região do átomo constituída pelo núcleo e os elétrons das órbitas internas denomina-se comumente **parte central** (*core*). Portanto, um átomo consta de uma região central e um certo número de elétrons de valência.

Os condutores, como o

cobre, a prata e o ouro, **figura 6.2(b)**, têm pouquíssimos elétrons na faixa de valência, tipicamente 1, e os mesmos são fracamente atraídos pelo núcleo. Portanto, sob a influência de uma força externa, esses elétrons de valência podem facilmente escapar do átomo, convertendo-se em **elétrons livres** que viajam ou migram através do material e participam na criação das correntes elétricas.

de uma corrente elétrica.

Os semicondutores, como o silício e o germânio, **figura 6.2(c)**, se caracterizam por ser tetravalentes, ou seja, por ter quatro elétrons de valência. Estes elétrons formam **enlaces** com os elétrons de valência dos átomos vizinhos produzindo um padrão tridimensional regular chamado **rede cristalina** ou **crystal**, **figura 6.3**. Em um cristal semiconductor puro, cada átomo comparte seus elétrons de valência com os átomos vizinhos até ficar quimicamente estável, ou seja com **8 elétrons** em sua órbita mais externa (Lei do Octeto).

Um cristal semiconductor puro, como o descrito anteriormente, é um isolante perfeito a temperaturas próximas ao zero absoluto. Entretanto, à medida que aumenta a temperatura, a agitação térmica faz

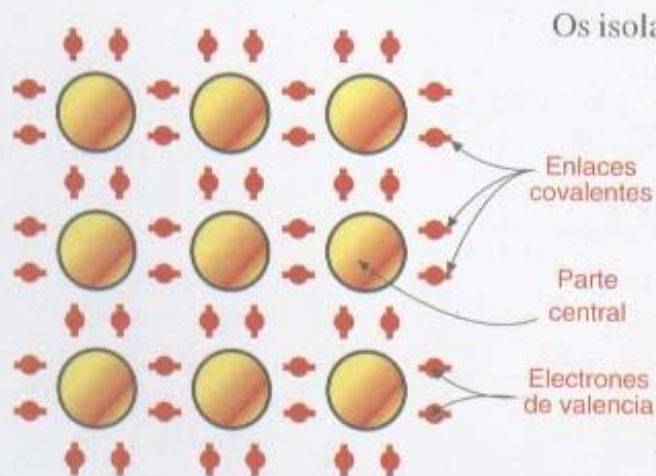


Figura 6.3 Estrutura de uma rede cristalina de

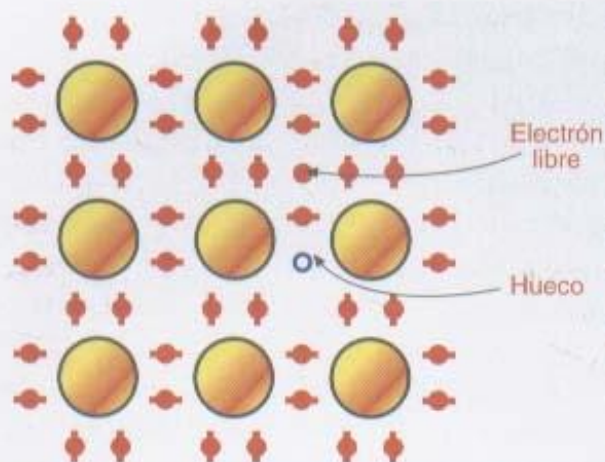


Figura 6.4 Cristal de silício intrínseco com elétrons livres e ocos formados por agitação térmica

com que alguns elétrons de valência rompem os enlaces que os mantêm ligados ao cristal e se convertem em elétrons livres, permitindo a circulação de correntes elétricas.

A saída de um elétron da faixa de valência deixa sempre na mesma um espaço vazio chamado lacuna, a qual é preenchida por outro elétron livre ou por um elétron de valência pertencente a um átomo vizinho, **figura 6.4**.

Portanto, dentro de um semicondutor onde circula uma corrente há um movimento permanente de elétrons e lacunas movendo-se ou propagando-se em direções opostas. Posto que o número de lacunas é sempre igual ao número de elétrons livres, a corrente de elétrons (real) é sempre da mesma grandeza que a corrente de

lacunas (convencional). À medida que aumenta a temperatura, cresce também o número de pares elétron-lacuna e, portanto, aumenta a grandeza de ambas correntes.

6.1.2 Semicondutores extrínsecos

Os cristais semicondutores puros ou intrínsecos são raramente empregados em Eletrônica devido a que, em seu estado natural, possuem muito poucos elétrons livres e precisam de grandes quantidades de energia para transportar correntes importantes. Na prática, os materiais semicondutores utilizados na fabricação de diodos, transistores, circuitos integrados, etc., são **dopados**, ou seja contém quantidades muito pequenas, mas controladas, de impurezas denominadas **dopantes** que são as que

determinam suas características elétricas. Estes tipos de semicondutores são denominados **extrínsecos**.

☒: O material semicondutor puro sobre o qual se realiza o processo de dopagem para se obter um semicondutor extrínseco é conhecido como **substrato**. A maioria dos dispositivos semicondutores práticos utilizam silício como substrato por ser um elemento muito estável, econômico e abundante. Dopar um semicondutor é como adicionar um pouco de levedura a um montão de farinha, misturar bem e colocar em um forno: aparentemente não aconteceu nada, mas os efeitos físicos são evidentes.

Os dopantes utilizados nos semicondutores extrínsecos são invariavelmente átomos de elementos químicos pentavalentes ou trivalentes, ou seja, com cinco ou três elétrons de valência. Devido à concentração de dopante, que é extremamente pequena, da ordem de um átomo de impureza por cada duzentos milhões de átomos de silício, estes últimos sempre envolverão aos primeiros e compartilharão seus elétrons de valência como no cristal original, com a diferença que agora um átomo de silício foi substituído por um átomo de impureza.

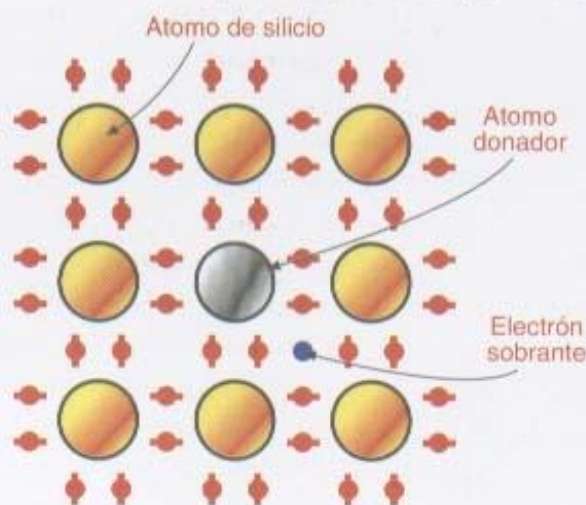


Figura 6.5. Semicondutor tipo N

Os substratos dopados com impurezas pentavalentes são denominados **semicondutores tipo N**, **figura 6.5**. Nestes, quatro dos cinco elétrons de valência do átomo dopante formam enlaces covalentes com os quatro átomos vizinhos. O elétron restante não fica ligado a nenhum átomo e é livre para mover-se através do cristal, convertendo-se em um portador potencial de corrente. Portanto, um semicondutor tipo N é um **doador** de elétrons. O principal elemento utilizado como doador em cristais de silício é o fósforo. Para cristais de germânio utilizam-se o antimônio e o arsênico.

Os substratos dopados com impurezas trivalentes são denominados **semicondutores tipo P**, **figura 6.6**. Nestes, os três elétrons de valência do átomo dopante formam enlaces covalentes com três átomos vizinhos de silício. O elétron faltante origina um lacuna, o qual se comporta como uma carga positiva livre, capaz de atrair um elétron externo. Portanto, um semicondutor tipo P é um **aceitador** de elétrons. Os principais elementos utilizados como impurezas aceitadoras em cristais de silício são o alumínio e o boro. Para cristais de germânio, utilizam-se o índio e o gálio.

Como resultado da adição de impurezas, um semicondutor do tipo N possui mais elétrons livres do que lacunas, e

um semicondutor tipo P mais lacunas do que elétrons. As cargas em excesso são denominadas **portadores majoritários** e as cargas em deficiência **portadores minoritários**.

Portanto, em um semicondutor tipo N, os portadores majoritários são os elétrons e os portadores minoritários são as lacunas. Por outro lado, em um semicondutor tipo P, os portadores majoritários são as lacunas e os portadores minoritários são os

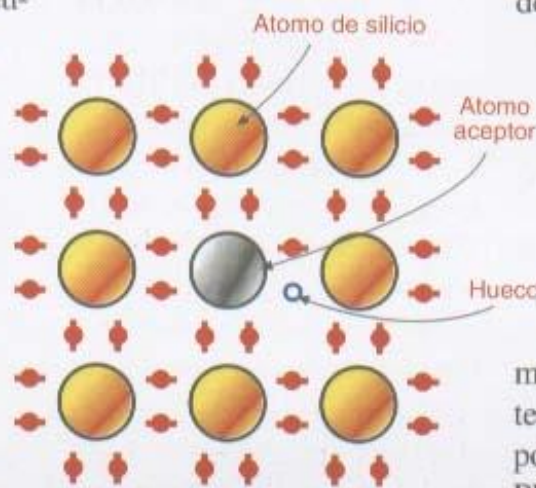


Figura 6.6 Semicondutor tipo P

elétrons.

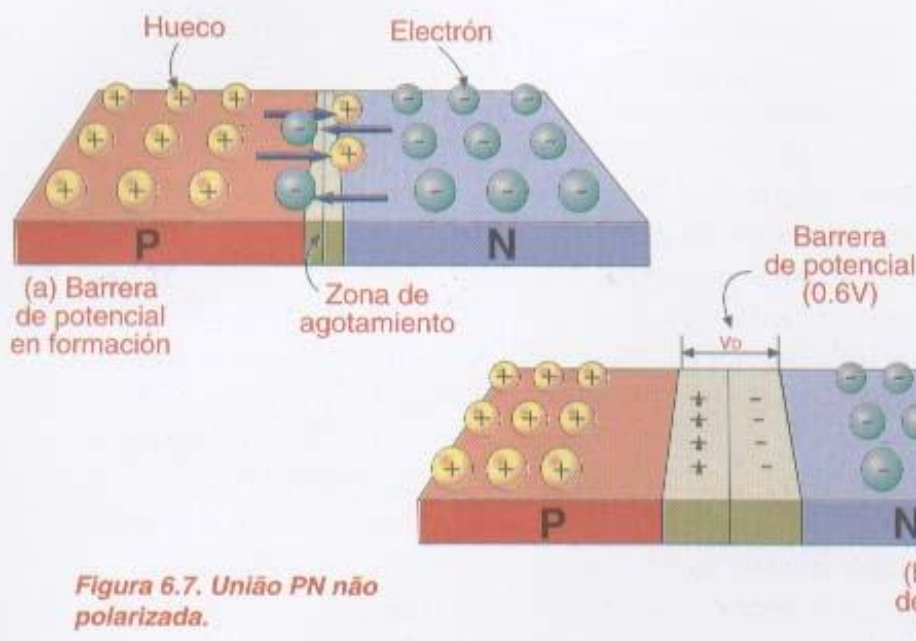
Quando se aplica uma tensão a um semicondutor tipo N ou P, o resultado é a circulação através do mesmo de uma corrente relativamente grande devido aos portadores majoritários e uma corrente relativamente pequena devido aos portadores minoritários. Esta última, que é da ordem dos micro-ampères (μA), denomina-se **corrente de fuga** e depende principalmente da temperatura.

6.1.3 União PN

Os semicondutores tipos N e P, por si mesmos, não têm maior utilidade prática, exceto quando estão fortemente dopados, e neste caso emprega-se como resistores que dependem da temperatura. Um dispositivo muito mais útil é a **união PN**, **figura 6.7**, obtida ao dopar um cristal de silício ou germânio puro (substrato) com impurezas pentavalentes e trivalentes de modo que uma metade seja do tipo N e a outra metade seja do tipo P.

Todos os dispositivos semicondutores, incluindo os diodos, os transistores, os tiristores e os circuitos integrados estão baseados na combinação de duas ou mais capas alternadas de materiais dos tipos N e P, ou seja, possuem uma ou mais uniões PN. Um **diodo**, por exemplo, é uma união PN.

Em uma união PN há inicialmente um excesso de elétrons livres no lado N e de lacunas no lado P. Portanto, alguns elétrons do lado N serão atraídos por algumas lacunas do lado P, e vice-versa, **figura 6.7(a)**. O processo de intercâmbio de cargas, que é extremamente rápido, continuará até que na divisa entre os dois materiais, denominada **zona de esgotamento**, seja formada uma barreira elétrica de tensão que impede a passagem de um maior número de portado-



res majoritários de um lado para o outro, **figura 6.7(b)**.

A formação de uma zona de esgotamento é a que faz útil uma união PN, já que as suas características podem ser controladas externamente para conseguir que a mesma se comporte como um condutor, um isolante, uma resistência, um condensador, uma referência de tensão, etc. Típicamente, o potencial da barreira é da ordem de **0,6V** para uniões PN de silício e de **0,3V** para uniões PN de germânio.

Se aplicarmos uma tensão externa com a polaridade indicada na **figura 6.8(a)**, o efeito da barreira se acentua. Sob esta condição, denominada **polarização inversa**, o pólo positivo (+) da bateria atrai os elétrons livres do material tipo N e o pólo negativo (-) as lacunas do material tipo (P). Como resultado, a zona de esgotamento se

alarga e a união PN apresenta uma resistência muito elevada à passagem da corrente, comportando-se como um isolante. Somente uns poucos portadores minoritários (algumas lacunas em N e alguns elétrons em P) conseguem atravessar a bar-

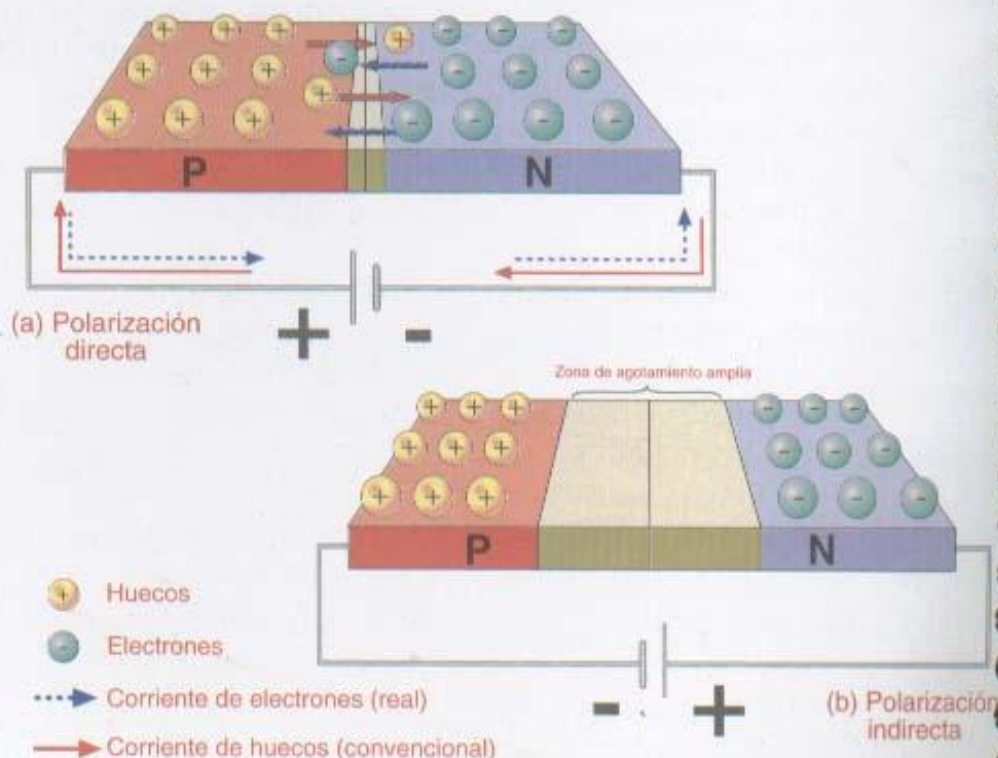
reira, permitindo que circule uma corrente de fuga muito fraca.

Se for aplicada uma tensão externa com a polaridade indicada na **figura 6.8(b)**, o efeito da barreira se atenua. Sob esta condição, denominada **polarização direta**, o pólo "+" da bateria repele as lacunas de P e o pólo "-" os elétrons de N, permitindo que atravessem a união. Como resultado, a

zona de esgotamento se estreita e a união PN apresenta uma resistência muito baixa à passagem da corrente, comportando-se como um condutor.

6. 2 Os diodos

Os **diodos** em geral, **figura 6.9**,



são dispositivos semicondutores de dois terminais, formados por uma união PN, que permitem a passagem de corrente em um sentido, oferecendo uma resistência muito baixa, e bloqueiam na direção contrária, apresentando uma resistência muito alta. Portanto, atuam como válvulas de passagem unidirecional. Os diodos semicondutores são denominados também **diodos de estado sólido**, para distingui-los dos **diodos de vazio** ou válvulas termoiônicas que deram origem, no início do século XX, à ciência eletrônica. Atualmente, a maioria de diodos semicondutores são fabricados em silício.

Existem vários tipos de diodos semicondutores, dependendo das suas características construtivas particulares. Estas últimas são as que determinam sua aplicação como retificadores, reguladores, detetores, misturadores, interruptores, etc. Os mais comuns são os diodos retificadores. Também existem diodos zener, LED, Varicap, fotodiodos, Schottky, túnel, laser e de outros tipos. A seguir

vamos nos referir aos aspectos gerais dos mais representativos. Sua operação detalhada como elementos de circuitos será examinada mais adiante nos capítulos correspondentes.

6.2.1. Diodos retificadores.

Os diodos retificadores são diodos especialmente projetados para converter correntes CA ou bidirecionais em correntes CC ou unidirecionais. Este processo denomina-se **retificação** e, como poderemos ver em um capítulo posterior, é um passo essencial no desenho de fontes de alimentação CA/CC. Na **figura 6.9** são mostrados o símbolo utilizado nos esquemas eletrônicos para representar um diodo retificador, a estrutura de capas simplificada do dispositivo e a sua construção interna típica.

Os terminais de um diodo



Figura 6.9. Diodos semicondutores

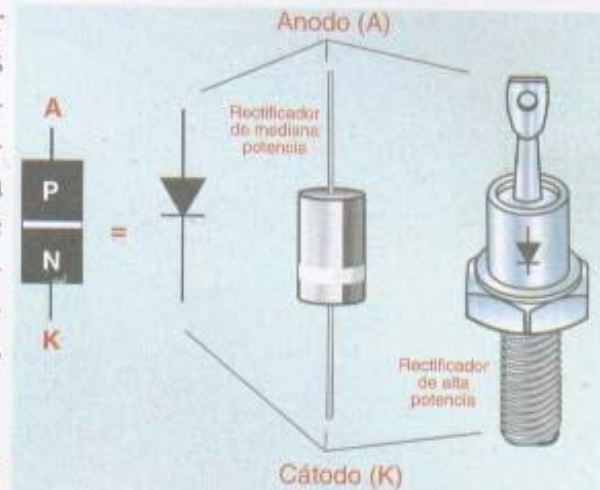


Figura 6.10. Simbologia e identificação de diodos retificadores

retificador, e em geral de qualquer diodo, são denominados **anodo (A)** ou terminal positivo é aquele ligado ao lado P e o **catodo (K)** ou terminal negativo o que é ligado ao lado N. No caso de diodos de forma cilíndrica, o catodo se identifica geralmente mediante uma faixa de cor marcada ao redor do corpo do dispositivo. Em outras apresentações, o catodo se identifica por associação com o símbolo do diodo marcado sobre o corpo do dispositivo ou porque a forma física da cápsula é diferente na extremidade correspondente a este terminal. Estas situações são ilustradas na **figura 6.10**.

Dependendo da forma de ligação em um circuito, um diodo pode estar polarizado direta ou inversamente. Estas duas situações são ilustradas na **figura 6.12**. Em (a), o anodo é positivo com respeito ao catodo e portanto circula uma corrente no sentido convencional indicado pela flecha.

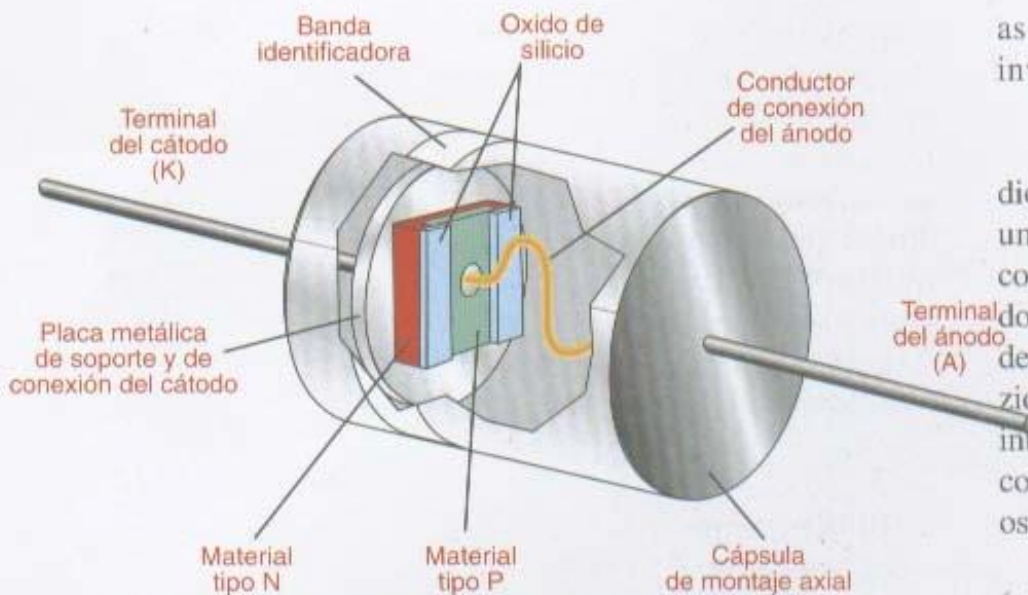


Figura 6.11. Construção interna típica de um diodo retificador

Diz-se então que o diodo está em **polarização direta** ou diretamente polarizado, comportando-se como um condutor. Em (b), o ânodo é negativo com respeito ao cátodo e portanto não circula corrente. Diz-se então que o diodo está em **polarização inversa** ou

inversamente polarizado, comportando-se como um isolante.

Idealmente, um diodo deveria comportar-se como um interruptor perfeito, apresentando uma resistência zero quando está polarizado diretamente e uma resistência infinita quando está polarizado inversamente. No primeiro caso, a queda de voltagem entre seus terminais deveria ser zero, independentemente da corrente que passa através da mesma, enquanto que no segundo, a corrente deveria ser zero, independentemente da voltagem aplicada. Ambas situações são ilustradas graficamente na **figura 6.13**, denominada uma **curva característica V-I** (voltagem vs corrente). O sub-índice "F" (*forward*) representa as condições em polarização direta e o sub-índice "R" (*reverse*)

as condições em polarização inversa.

Na prática, entretanto, os diodos retificadores mostram uma curva característica de comportamento como indicado na **figura 6.14(a)**. A partir desta curva, podem ser deduzidos os seguintes aspectos de interesse que são chaves para compreender como trabalham os diodos reais:

(a) A condução em condições de polarização direta não começa em 0 V mas a partir do momento em que a tensão externa supera um certo valor inicial V_T . Esta tensão é praticamente igual ao potencial de barreira da união PN.

(b) A queda de tensão em um diodo polarizado diretamente não é zero, mas possui um valor finito V_F ligeiramente superior ao potencial de barreira e sua grandeza depende da magnitude da corrente I_F conduzida. Esta queda denomina-se **tensão de condução direta**. Para poder visualizar o efeito desta voltagem, um diodo retificador pode ser representado por meio de um circuito equivalente como o da **figura 6.14(b)** ou **6.14 (c)**. O primeiro modelo assume que V_F é constante e igual a 0,7V, enquanto que o segundo possui em conta o incremento de V_F com a corrente. Este úl-

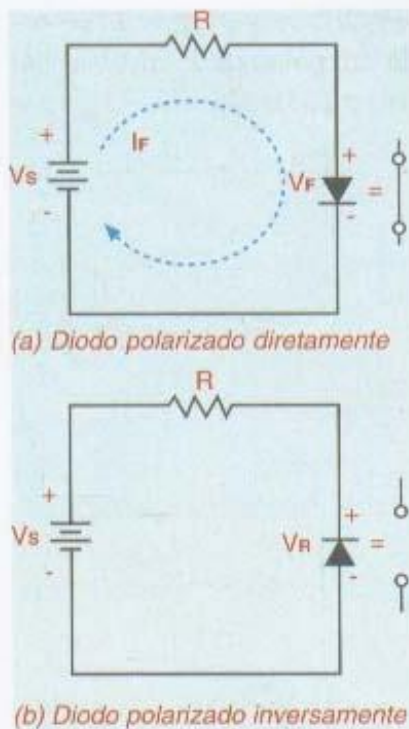


Figura 6.12. Circuitos de polarização de diodos retificadores

timo está representado por uma resistência em série, denominada **resistência incremental**, tipicamente inferior a $1\ \Omega$.

(c) A corrente através de um diodo polarizado inversamente não é igual a zero, mas possui um valor finito I_R muito baixo, da ordem dos μA ou nA , cuja grandeza depende diretamente da grandeza da tensão V_R aplicada. Esta corrente denomina-se **corrente inversa de fuga** e deve-se aos portadores minoritários do cristal.

(d) Um diodo polarizado inversamente pode chegar a conduzir quando a voltagem aplicada atinge um certo valor V_{BR} . Esta voltagem denomina-se **voltagem de ruptura** ou de **avalanche**. Quando um diodo entra na região de avalanche, a corrente inversa de fuga cresce

súbitamente e pode chegar a destruir o dispositivo se não for limitada adequadamente. Nos diodos retificadores, a voltagem de avalanche é geralmente muito alta, da ordem de 100 V ou mais.

Os diodos, em geral, são identificados em razão de uma **referência**. No sistema americano, a referência consta do prefixo "1N" seguido de um número de série, por exemplo **1N4004**. A "N" indica que se trata de um semicondutor, o "1" indica o número de uniões PN e o "4004" as características ou especificações exatas do dispositivo. No sistema europeu ou continental é utilizado um prefixo de duas letras, por exemplo **BY254**. Neste caso, a letra "B" indica o material (silí-

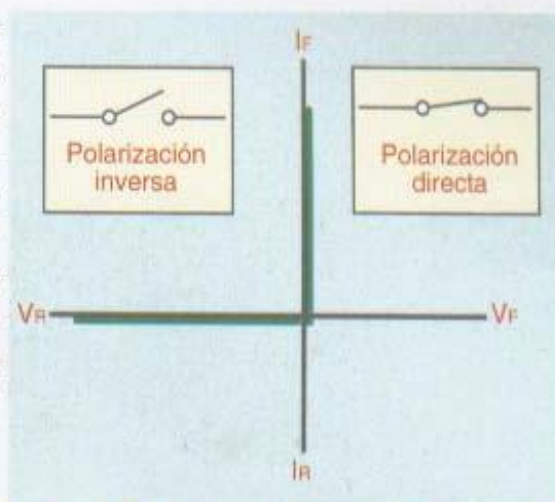


Figura 6.13 Curva característica de um diodo retificador ideal

cio) e a letra "E" o tipo (retificador). Muitos fabricantes, entretanto, utilizam suas próprias referências, por exemplo **ECG581**.

Os diodos retificadores são especificados principalmente pela corrente máxima média que podem conduzir em polarização direta sem destruir-se por superaquecimento e pela voltagem máxima que podem suportar em polarização inversa sem entrar em avalanche. Estes pa-

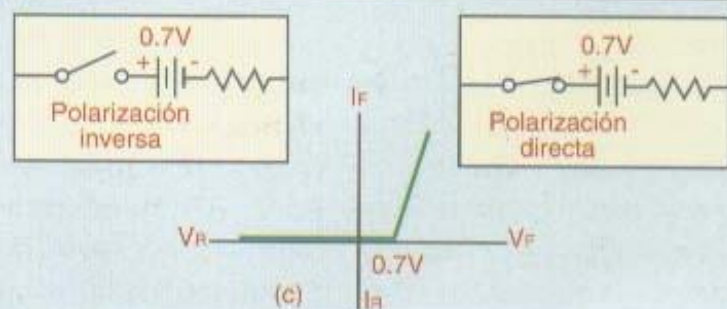
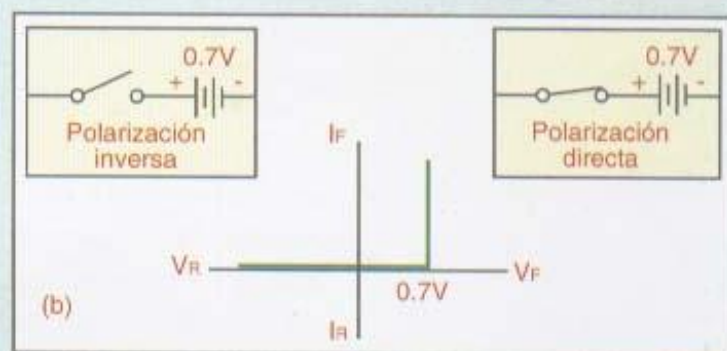
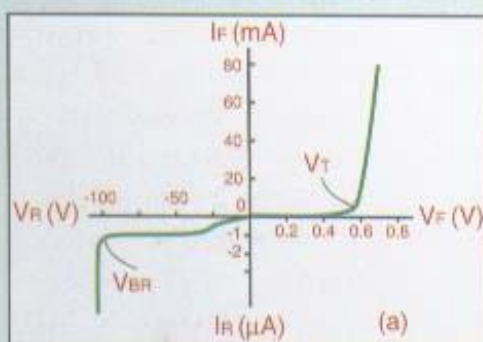


Figura 6.14 Comportamento de um diodo retificador real

- (a) Curva característica típica
(b) Circuito equivalente (V_F constante)
(c) Circuito equivalente (V_F variável)

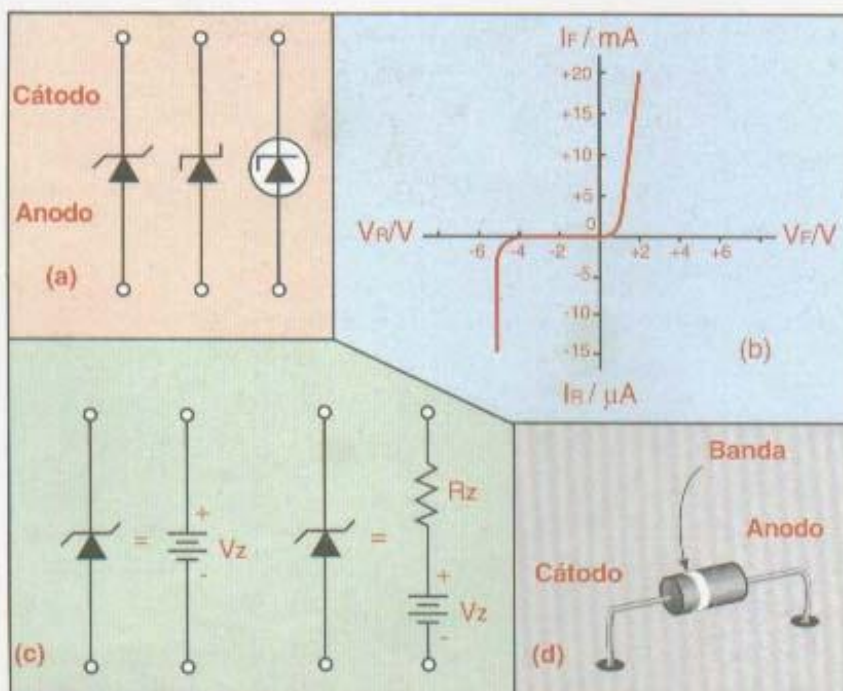


Figura 6.15 Diodos zener

(a) Símbolos, (b) Curva característica real, (c) Circuitos equivalentes, (d) Identificação de terminais.

râmetros foram designados nas folhas de dados como $I_{F(av)}$ e V_{RRM} , respectivamente. Conseguem-se diodos retificadores com valores de V_{RRM} com menos de 40V até mais de 600V e valores de $I_{F(av)}$ com menos de 100 mA até mais de 100 A.

6.2.2 Diodos zener

Os **diodos zener** são diodos especialmente projetados para trabalhar na zona de ruptura, comportando-se diretamente como diodos retificadores comuns e em inverso como referências de tensão. Sua principal aplicação é como reguladores de voltagem. Na **figura 6.15** são mostrados os símbolos utilizados nos esquemas eletrônicos para representar os diodos zener, a curva característica V-I típica de um diodo zener real e dois modelos equi-

valentes que podem ser utilizados para analisar seu comportamento como elemento de um circuito.

De acordo com a curva característica da **figura 6.15(b)**, em um diodo zener polarizado inversamente, a corrente inversa (I_R) é praticamente insignificante até que a tensão inversa (V_R) atinja um certo valor V_z , chamado **tensão zener** ou de referência. Quando chegar a este ponto, o diodo entra em condução, permitindo a circulação de uma corrente importante. A partir de então, a tensão entre seus terminais permanece praticamente constante e igual a V_z para uma ampla faixa

de valores de I_R . Esta propriedade é a que permite utilizar os diodos zener como reguladores de voltagem e/ou referências de tensão em um grande número de aplicações.

Na **figura 6.16** é mostrado como exemplo um circuito regulador de tensão que pode ser utilizado para demonstrar a ação de um diodo zener. Assuma-se $V_z=6,2V$. Para valores de V_i menores de 6,2 V, o diodo não conduz, comportando-se como um circuito aberto. Portanto, a corrente inversa (I_R) é zero e a tensão de saída (V_o) é igual a V_i . Para valores de V_i maiores de 6,2 V, o diodo conduz, comportando-se como uma fonte de tensão de 6,2 V. Portanto, I_R é diferente de zero e $V_o=6,2 V$.

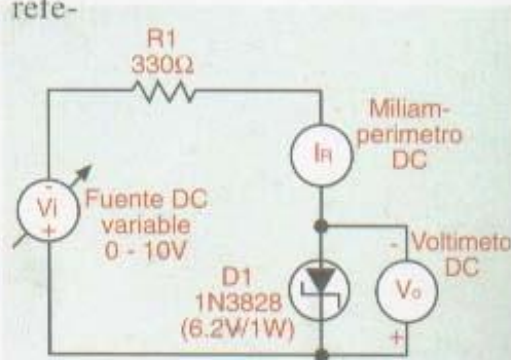


Figura 6.16 Circuito experimental para comprovar a ação de um diodo zener



Figura 6.17 Diodos emissores de luz (LEDs)

A tensão em excesso que aparece sobre o resistor R1, denominado **resistor de drenagem**, deve ser cuidadosamente selecionada para limitar a corrente a um valor seguro através do zener.

Os diodos zener identificam-se por uma referência, digamos **1N3828** ou **BZX85**, e são especificados principalmente por sua tensão zener nominal (V_z) e a potência máxima que podem absorver de forma segura sem se destruir (P_z). Atualmente se conseguem diodos zener com valores padrão de V_z desde 2,0 V até 200 V e valores máximos de P_z de 0,25 W, 0,5 W, 1 W, 5 W, 10 W e 50 W. Os valores de V_z disponíveis são similares aos da série de resistores de carvão E24 (5%, veja **página 114**). Por exemplo, os valores comerciais de V_z mais próximos a 5 V são 4,7 V e 5,1 V.

6.2.3. Diodos emissores de luz (LEDs)

Os LEDs (*Light Emitting Diodes*), **figura 6.17**, são diodos

feitos geralmente de arsenito de gálio fosfatado (GaAsP), que emitem luz de forma contínua ou intermitente quando polarizados diretamente. São utilizados primariamente como indicadores e visualizadores. Sob determinadas condições, podem também atuar como detectores de luz. A luz emitida por um LED pode ser vermelha, amarela, alaranjada, verde ou azul dependendo de sua composição.

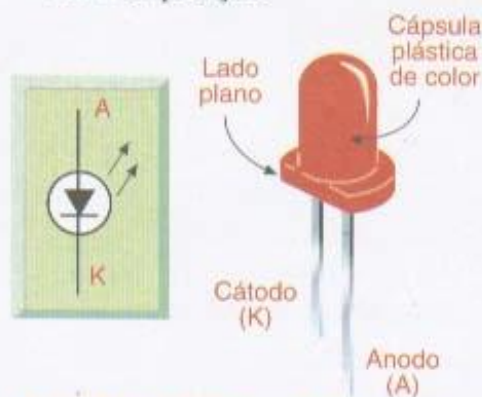


Figura 6.18 Identificação de terminais de um diodo emissor de luz (LED)

Também existem no mercado **LEDs infravermelhos** ou **IREDS**, que emitem uma luz invisível para o olho humano, e **diodos laser**, que emitem uma luz altamente concentrada e coerente.

Na **figura 6.18** são mostrados o símbolo utilizado nos esquemas eletrônicos para identificar um LED e a forma de identificar o cátodo (K) em um LED de cápsula circular. Os LEDs emitem luz devido aos elétrons combinarem-se

com os ocos, passando de um nível energético superior para um mais baixo. Nos diodos de silício comuns, esta mudança de energia se manifesta em forma de calor.

Os LEDs são especificados pela cor ou comprimento de onda da luz emitida, a queda de tensão direta (V_F), a máxima tensão inversa (V_R), a corrente máxima direta (I_F) e a intensidade luminosa. Tipicamente, V_F é da ordem de 1,6 V a 2,8 V e V_R da ordem de 4 V a 5 V. Conseguem-se LEDs com valores de I_F com menos de 20 mA até mais de 100 mA e intensidades com menos de 0,5 mcd (milicandelas) até mais de 4000 mcd. Quanto maior for a corrente aplicada, maior será o brilho, e vice-versa. O valor de V_F depende da cor, sendo mínimo para LEDs vermelhos e máximo para LEDs azuis.

Os LEDs devem ser protegidos com um resistor em série, como indicado na **figura 6.19**, para limitar a corrente que passa através deles a um valor seguro, inferior à I_F má-

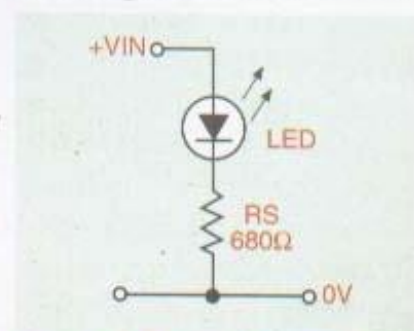


Figura 6.19 Circuito básico de utilização de um LED

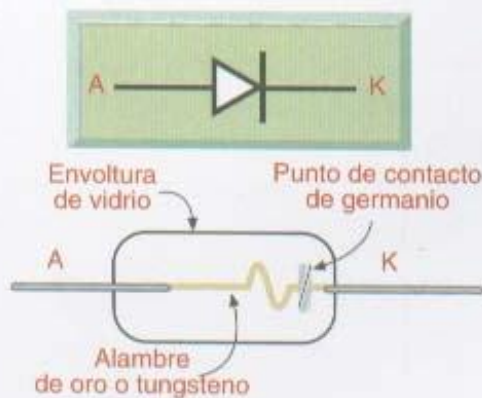


Figura 6.20 Estrutura de um diodo detector de germânio.

xima (ver **Exercício 5.2**, página 114). Os LEDs devem também ser protegidos contra tensões inversas excessivas. De fato, uma tensão inversa superior a 5 V causa geralmente sua destruição imediata.

6.2.4 Outros tipos de diodos

Aproveitando a propriedade básica de conduzir a corrente elétrica em um sentido, enquanto a bloqueiam no outro e às características excepcionais das uniões PN, foram desenvolvidos vários tipos de diodos para aplicações especiais. Dentro desta categoria se incluem, por exemplo, os diodos detectores, os fotodiodos, os diodos Schottky, os diodos varicap, os diodos túnel, os diodos laser e os diodos de microondas.

Os **diodos detectores**, também denominados **diodos de sinal** ou de **contato pontual**, figura 6.20, são feitos de germânio e caracterizam-se por possuir uma união PN muito diminuta. Isto lhes permite ope-

rar em altíssimas frequências e com pequenos sinais. São utilizados, por exemplo, em receptores de rádio para separar o componente de alta frequência (portador) do componente de baixa frequência (informação audível). Esta operação é denominada **detecção**.

Os **fotodiodos**, figura 6.21, são diodos que possuem uma janela transparente cuja corrente inversa pode ser controlada em uma ampla categoria, regulando a quantidade de luz que passa pela janela e incide sobre a união PN. Quanto maior for a quantidade de luz incidente, maior será a corrente inversa produzida, porque são gerados um maior número de portadores minoritários, e vice-versa. São muito utilizados como sensores de luz em fotografia, sistemas de iluminação, contadores de objetos, sistemas de segurança, receptores de comunicações óticas e outras aplicações.

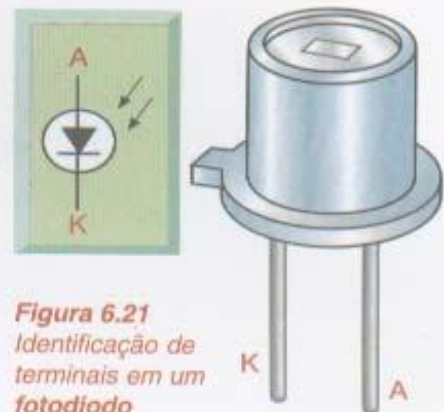


Figura 6.21 Identificação de terminais em um fotodiodo

Os **diodos Schottky**, também denominados **diodos de recuperação rápida** ou de **portadores quentes**, figura 6.22, são feitos de silício e caracterizam-se por possuir uma queda de tensão direta (V_F) muito pequena, de aproximadamente 0,25 V ou menos, e ser muito rápidos. São utilizados em fontes de potência, sistemas digitais e equipamentos de alta frequência.

Uma variante são os **diodos back** ou de **retrocesso**, que têm uma tensão de condução praticamente igual a zero, mas também uma tensão

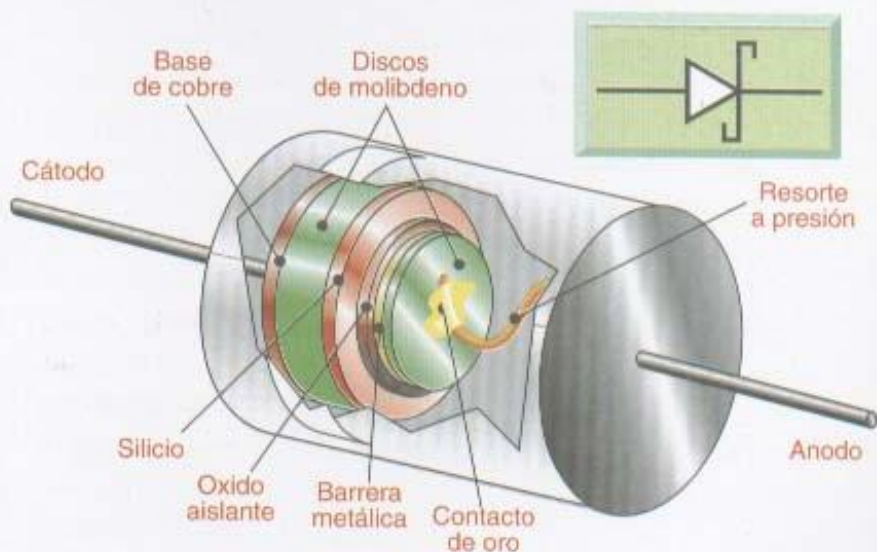


Figura 6.22 Estrutura interna típica de um diodo Schottky

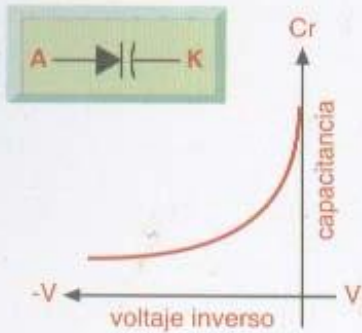


Figura 6.23 Curva característica de um diodo varicap

inversa de ruptura muito baixa. Isto limita seu uso a aplicações muito especiais.

Os diodos varicap, também chamados varactores ou diodos de sintonia, figura 6.23, trabalham polarizados inversamente e atuam como capacitores variáveis controlados por tensão. Esta característica os faz muito úteis como elementos de sintonia em receptores de rádio e televisão. São também muito utilizados em osciladores, multiplicadores, amplificadores, geradores de FM e outros circuitos de alta frequência. Uma variante dos mesmos são os diodos SNAP, utilizados para aplicações de UHF (frequência ultra elevada) e microondas.

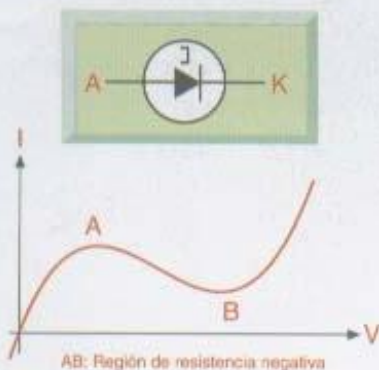


Figura 6.24 Curva característica de um diodo túnel

Os diodos túnel, também denominados diodos Esaki, figura 6.24, caracterizam-se por possuir uma zona de esgotamento extremamente delicada e ter em sua curva V-I uma região de resistência negativa onde a corrente diminui à medida que aumenta a tensão. Esta última propriedade os faz úteis como detectores, amplificadores, osciladores, multiplicadores, interruptores, etc., em aplicações de alta frequência.

Os diodos laser, também chamados lasers de injeção ou ILDs, figura 6.25, são LEDs que emitem uma luz monocromática, geralmente vermelha ou infravermelha, fortemente concentrada, focada, coerente e potente. São muito utilizados em computadores e sistemas de áudio e vídeo para ler compact discs (CDs) que contêm dados, música, filmes, etc., assim como em sistemas de comunicações para enviar informações através de cabos de fibra ótica. Também são usados em marcadores luminosos, leitores de códigos de barras e outras aplicações.

Os diodos de microondas, figura 6.26, são dispositivos desenvolvidos para trabalhar a frequências muito elevadas, onde a capacidade de resposta dos diodos comuns está limitada por seu tempo de trânsito, ou seja o tempo que demoram os portadores de carga para atravessar a união PN. Os mais conhecidos são os diodos Gunn, PIN e IMPATT.



Figura 6.25 Curva característica de potência de um diodo laser

PATT. Os diodos PIN são utilizados principalmente como resistores variáveis por tensão e os diodos Gunn e IMPATT como osciladores. Também existem diodos TRAPATT, BARITT, ILSA, etc.

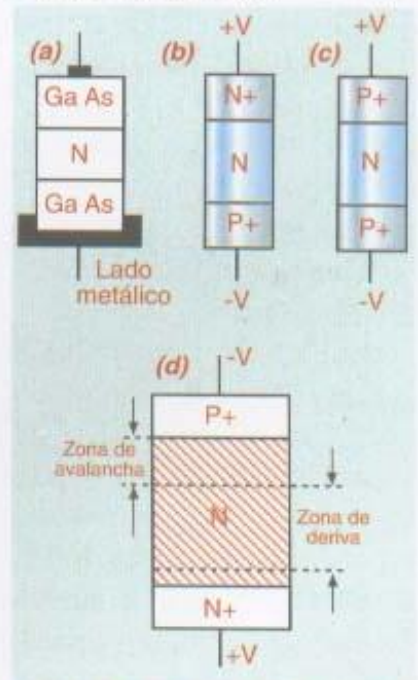


Figura 6.26 Estrutura de camadas de diodos de microondas comuns (a) Gunn. (b) TRAPATT. (c) BARITT. (d) IMPATT.

6.3 Transistores bipolares

A palavra **transistor** é derivada do termo *transfer resistor* (resistor de transferência) e designa, de forma genérica, um componente eletrônico de três terminais cuja resistência é uma função do nível de corrente ou tensão aplicada a um de seus terminais. Aproveitando esta propriedade, os transistores utilizam-se como fontes de corrente controlada em amplificadores, osciladores, misturadores, interruptores e muitas outras aplicações.

O transistor, inventado em **1948** nos laboratórios da Bell Telephone nos Estados Unidos por um grupo de cientistas liderados por John Bardeen, William Shockley e Walter Brattain, é, sem dúvida, um dos avanços

mais significativos de nossa era e um dos componentes mais versáteis e importantes da eletrônica moderna. Todos os circuitos integrados são fabricados com transistores.

Existem basicamente duas grandes famílias de transistores: os **transistores bipolares** e os **transistores de efeito de campo** ou **FETs** (*Field Effect Transistors*). Estes últimos incluem os FETs de união (JFETs) e os FETs de comporta isolada (MOSFETs). Atualmente são também muito populares os **transistores bipolares de comporta isolada** ou **IGBTs**, utilizados em aplicações de potência, que são muito parecidos com os MOSFETs em sua estrutura física, mas se assemelham mais aos transistores bipolares em sua operação elétrica.

Estrutura. Os **transistores bipolares**, **figura 6.27**, são dispositivos controlados por corrente formados por uma camada de material tipo P disposta entre duas camadas de material tipo N, ou uma de material tipo N disposta entre dois de tipo P. No primeiro caso tem-se um transistor **NPN** e no segundo um transistor **PNP**. A região central é denominada **base** (B) e as duas extremidades **emissor** (E) e **coletor** (C), respectivamente. A base é extremamente estreita e pouco dopada em relação ao emissor e o coletor. Em consequência, possui uma concentração muito baixa de portadores.

O emissor, por sua vez, está fortemente dopado e a concentração de portadores majoritários disponíveis supera amplamente a da base. De outro lado, o coletor é extremamente amplo e possui uma alta concentração de portadores minoritários em relação à base e muito poucos portadores majoritários em comparação com o emissor. No caso de um transistor NPN, isto significa que a base não possui a quantidade suficiente de lacunas para combinar-se com todos os elétrons que o emissor pode fornecer. Como resultado, a maioria destes elétrons atravessa a base em direção ao coletor.

Polarização e funcionamento. Devido à forma como se alternam as camadas P e N, em um transistor existem duas uniões

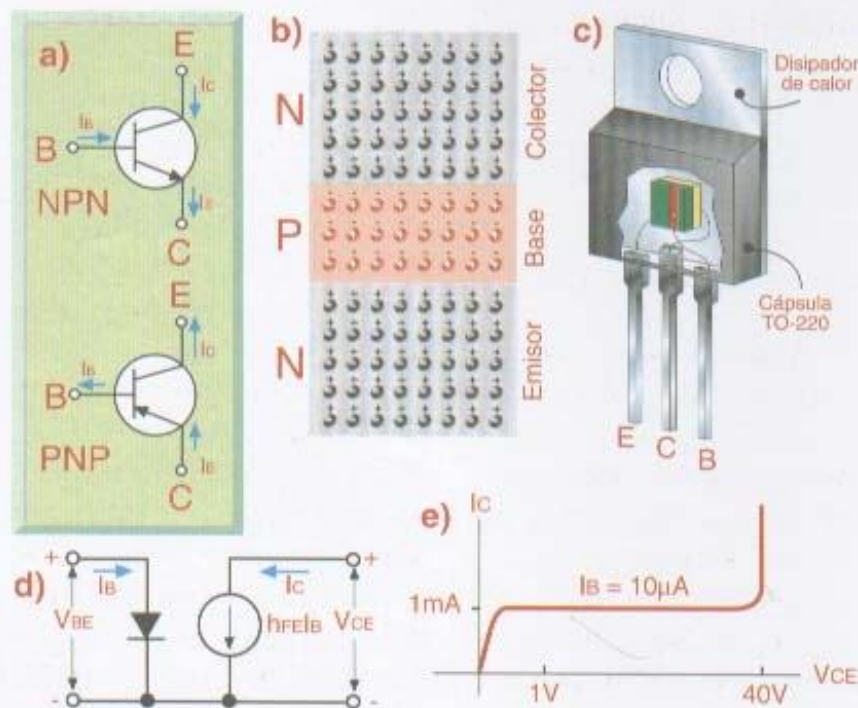


Figura 6.27 O transistor bipolar. (a) Simbologia. (b) Estrutura de camadas. (c) Identificação de terminais. (d) Circuito equivalente. (e) Curva característica.

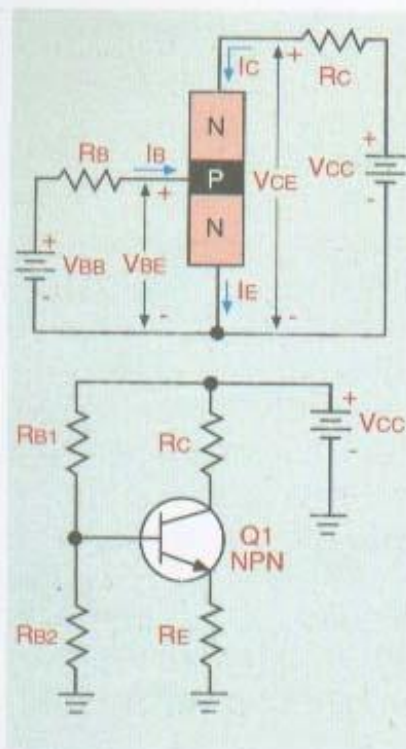


Figura 6.28 Polarização das uniões PN de um transistor
(a) Circuito básico de polarização.
(b) Exemplo de um circuito prático de polarização.

PN: uma entre o emissor e a base (EB) e outra entre o coletor e a base (CB). Estas uniões devem ser polarizadas como indicado na **figura 6.28**, ou seja a união EB diretamente e a união CB inversamente. Neste caso, a polarização da união BE a fornece a tensão V_{BB} e a da união BC a tensão V_{CC} . Portanto, em um transistor NPN, a base deve ser positiva com respeito ao emissor e negativa com respeito ao coletor. Por outro lado, em um transistor PNP, a base deve ser negativa com respeito ao emissor e positiva com respeito ao coletor.

Como resultado da polarização, em um transistor produzem-se três correntes: a de base (I_B), a de emissor (I_E) e a

de coletor (I_C). Devido a união BE estar polarizada diretamente, os portadores majoritários de ambas regiões são obrigados pela tensão V_{BB} a cruzar a união e combinar-se mutuamente. No caso de um transistor NPN, isto significa que uma parte dos elétrons fornecidos pelo emissor (de 1% a 5%) se combinam com as poucas lacunas disponíveis na base. Isto origina uma corrente de base (I_B) relativamente pequena.

Os elétrons restantes (de 95% a 99%) são atraídos para o coletor pela forte tensão inversa de polarização V_{CC} da união BC. Estes elétrons atravessam a união BC, passam através da extensa região do coletor e se dirigem para o pólo positivo da bateria V_{CC} , criando uma corrente de coletor (I_C) muito intensa. As correntes de coletor (I_C) e de base (I_B) estão relacionadas com a corrente de emissor (I_E) conforme a seguinte fórmula:

$$I_E = I_B + I_C$$

A capacidade de amplificação de um transistor é medida observando-se o efeito da corrente de base (I_B) sobre a corrente de coletor (I_C) para um determinado valor de V_{CE} . A relação incremental entre ambas as quantidades é denominada **ganho de corrente beta** e é representada pelo símbolo β ou h_{FE} . Isto é:

$$h_{FE} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

Na **figura 6.29** é mostrado um circuito prático de utilização de um transistor bipolar como amplificador de sinais. Neste caso, o sinal a amplificar (V_{IN}) se sobrepõe à tensão de polarização, variando I_B acima e abaixo de seu valor de repouso. O mesmo se passa com I_C , exceto que cada mudança se reflete amplificando β vezes.

Por exemplo, se $\beta=500$, uma mudança de $1\mu A$ em I_B corresponde a uma mudança de $500\mu A$ em I_C . Ao circular esta corrente através da resistor de carga (R_L) obtém-se uma tensão de saída variável (V_{OUT}) o que é uma réplica ampliada do sinal de entrada (V_{IN}). Esta é a essência do processo de **amplificação**.

Encapsulados. Os transistores são fabricados em série, formando simultaneamente várias centenas ou milhares de unidades sobre um waffer semicondutor de 38 a 50 mm de diâmetro e logo cortando-os um por um. As técnicas de fabricação mais utilizadas são a liga, a difusão, o processo planar e o crescimento epitaxial. Uma vez construídos, os transistores se hospedam em cápsulas plásticas ou metálicas, como as mostradas na **figura 6.30**. A cápsula protege o transistor da umidade e dos

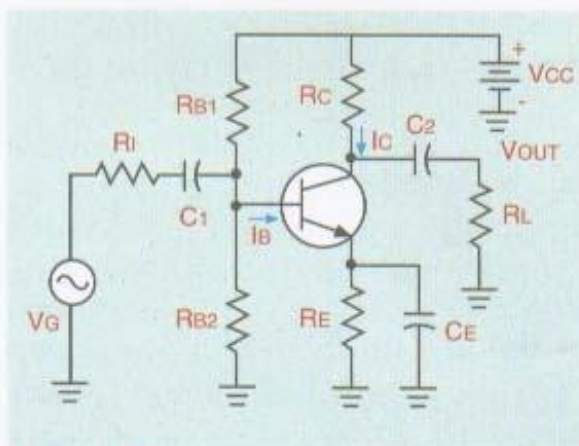


Figura 6.29 Circuito básico de utilização de um transistor bipolar como amplificador

contaminantes, serve como dissipador de calor, proporciona os pinos de acesso, facilita sua manipulação e identificação, etc.

Identificação. Os transistores, como todos os semicondutores, identificam-se por um código ou **referência** que representa suas características

exatas. Existem basicamente três sistemas de identificação: o americano, o europeu e o japonês. No sistema americano, a referência começa por 2N (2N3904), no europeu por BC, BS ou BF (BC108) e no sistema japonês por 2SA, 2SB, 2SC ou 2SD (2SC458, 2SA65, 2SD926). Apesar desta padronização, muitos fabricantes utilizam suas próprias referências (ECG123AP, CA3082, TIP31, MPS8099, etc.).

Especificações. Os transistores bipolares são especificados principalmente pela máxima corrente de coletor (I_C) que podem manipular de forma segura, a máxima tensão de polarização inversa que pode ser aplicada entre o coletor e o emissor sem entrar em avalanche (V_{CEO}) e o ganho de corrente beta (h_{FE}).

Outros parâmetros que os fabricantes especificam nas folhas de dados de seus produtos são a máxima tensão entre o emissor e a base (V_{EBO}), a potência máxima total (PTOT), a frequência de transição (fT), a figura de ruído (NF), etc.

6.4. Transistores de efeito de campo (FETs)

Os transistores de efeito de campo ou FETs (*Field Effect Transistors*), **figura 6.31**, são dispositivos de três terminais controlados por tensão e constituídos por um material de base tipo N ou P, chamado **substrato**, dentro do qual se forma uma região de tipo oposto, em forma de OU, denominada **canal**, ligeiramente dopada. O substrato atua como comporta ou *gate* (G), um dos extremos do canal como fonte ou *source* (S) e o outro como dreno ou *drain* (D). Portanto, entre a comporta e o canal se forma uma união PN. Os FETs com esta estrutura são denominados *FETs de união* ou **JFETs**.

Na maioria dos casos, o desenho do canal é simétrico e, portanto, qualquer um dos extremos pode ser utilizado como dreno ou como fonte. Entretanto, existem casos especiais nos quais o canal é assimétrico e, conseqüentemente, não se pode intercambiar estes terminais. Os JFETs podem ser de **canal N** ou de **canal P**, dependendo da dopagem do canal

Polarização e funcionamento. Para operar corretamente, os JFETs precisam ser polarizados em razão de duas tensões externas, como indicado na **figura 6.32**. A tensão V_{DD} dirige o passo dos portadores

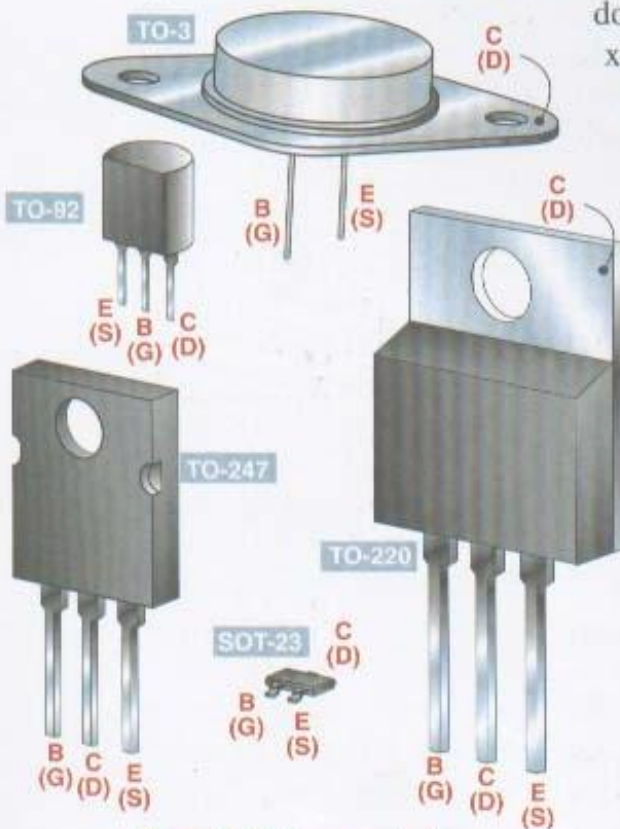


Figura 6.30 Encapsulados comuns de transistores e FETs

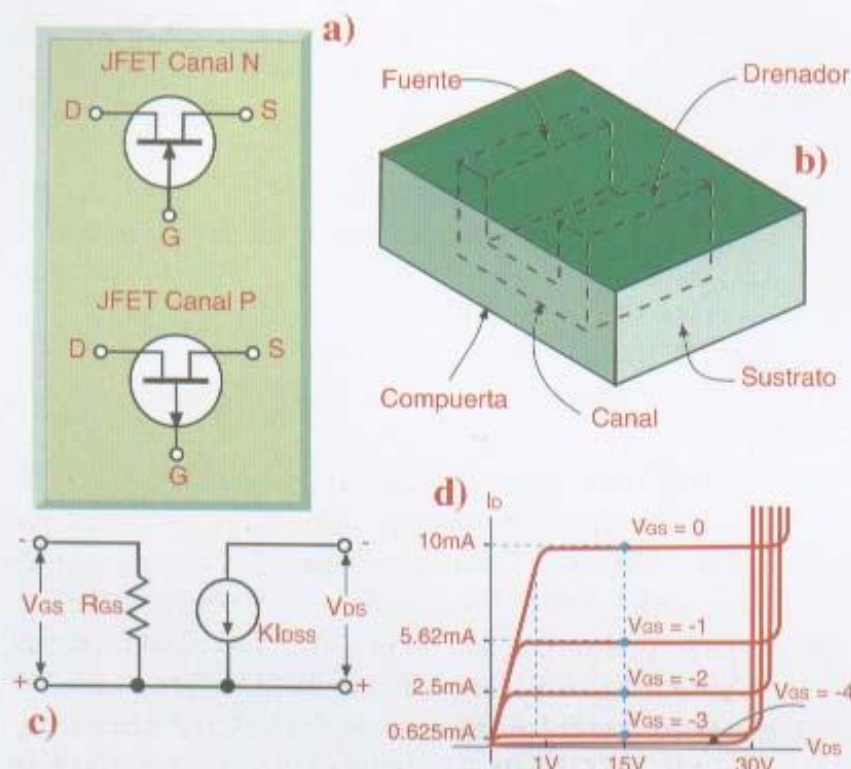


Figura 6.31 Transistores de efeito de campo de união (JFETs)
(a) Simbologia. (b) Estrutura interna. (c) Circuito equivalente. (d) Família de curvas características.

de corrente pelo canal e a tensão V_{GS} regula sua quantidade. Esta deve polarizar inversamente a união PN entre o canal e o substrato. Portanto, em um JFET de canal N, a fonte deve ser positiva com respeito à comporta e negativa com respeito ao dreno.

O efeito líquido da polarização é a criação, entre o dreno e a fonte, de uma **corrente de drenagem** (I_D), a qual circula ao longo do canal e depende da tensão V_{GS} . Portanto, o canal atua como um resistor variável. No caso de um JFET de canal N, a tensão V_{GS} cria nas proximidades da união substrato-canal uma **zona de esgotamento**, livre de elétrons. Esta região

se forma por completo dentro do canal devido a existência de uma forte concentração de lacunas no substrato e uma baixa concentração de elétrons no canal.

A espessura da zona de esgotamento determina a área útil ou efetiva do canal e, portanto, sua capacidade de deixar passar mais ou menos elétrons. A região de esgotamento se estende ao longo das paredes do canal, sendo mais ampla no lado do dreno que no lado da fonte. Isto é assim porque, do ponto de vista da comporta, o dreno está submetido a uma tensão inversa de polarização mais alta ($V_{DS} + V_{GS}$) que a fonte (V_{GS}).

Ao aumentar a V_{GS} , a região de esgotamento se alarga e, portanto, o canal se estreita. Em consequência, passam menos elétrons entre a fonte e o dreno, diminuindo-se assim I_D . Ao diminuir a V_{GS} , a região de esgotamento se estreita e, portanto, amplia-se o canal. Em consequência, passam mais elétrons entre a fonte e o dreno, aumentando-se assim I_D . Deste modo, a V_{GS} varia a resistência do canal e controla ou «modula» a corrente I_D . Em ambos casos, a corrente de comporta (I_G) é insignificante, a qual implica que a resistência de entrada de um FET é extremamente alta.

A capacidade de amplificação de um FET se mede observando o efeito da V_{GS} sobre I_D para um determinado valor de V_{DS} . A relação in-

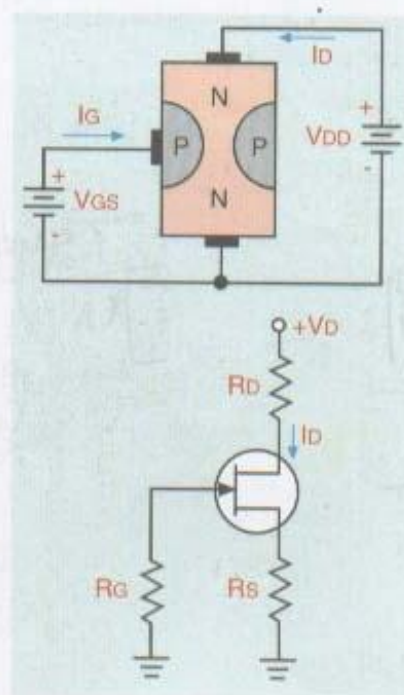


Figura 6.32 Polarização de um JFET.
(a) Circuito básico. (b) Circuito prático

cremental entre ambas as quantidades é denominada **transcondutância** e é designada pelo símbolo **gm** ou **gfs**. Isto é:

$$g_m = \frac{\Delta I_D}{\Delta V_{GS}}$$

A transcondutância se expressa em mhos ou siemens (S). Por exemplo, se $g_m = 5000 \mu\text{mhos}$ (valor típico), uma mudança de 200 mV em V_{GS} provoca uma mudança de $100 \mu\text{A}$ em I_D . Na **figura 6.33** é mostrado um circuito básico de utilização de um FET como amplificador de sinais. Neste caso, o sinal de entrada (V_{IN}) faz com que a V_{GS} oscile acima e abaixo de seu valor de repouso. Como resultado, muda também I_D . Ao circular esta corrente através de R_L , obtém-se uma tensão de saída (V_{OUT}) que é uma réplica ampliada de V_{IN} .

Especificações. Os FETs identificam-se da mesma forma que os transistores bipolares por uma referência e

são especificados principalmente por sua transcondutância (g_m ou g_{fs}), a tensão máxima entre a comporta e a fonte (V_{GS}), a corrente de drenagem com $V_{GS}=0\text{V}$ (I_{DSS}), a tensão de ruptura entre a comporta e a fonte (BV_{GSS}) e a máxima corrente de drenagem (I_D). Outros parâmetros que especificam os fabricantes de FETs nas folhas de dados de seus produtos são a capacidade de entrada (C_{iss}), a capacidade de transferência (C_{rss}), a potência máxima (P_D) e a resistência máxima entre o dreno e a fonte (r_{DSS}).

MOSFETs. Os MOSFETs (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistors*) ou **MOS**, **figura 6.34**, são FETs nos quais a comporta está eletricamente isolada do canal em razão de uma fina camada de bióxido de silício (SiO_2), a qual lhe confere umas características muito especiais, por exemplo, uma extrema alta impedância de entrada. Os circuitos com MOSFETs são altamente imunes ao barulho, consomem muito pouca potência e são muito flexíveis. Além disso, prestam-se à integração em grande escala.

Em um MOSFET o canal se forma dentro do substrato, mas,

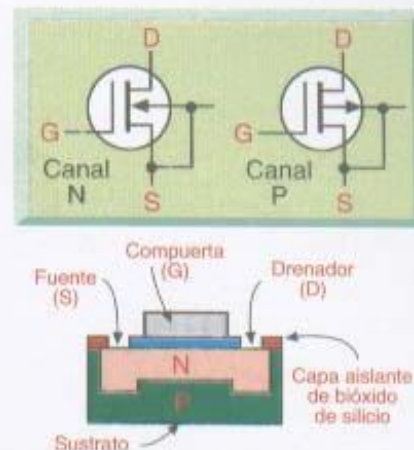


Figura 6.34 Estrutura de um FET de comporta isolada ou MOSFET.

diferentemente de um JFET, este último está ligado eletricamente à fonte e não à comporta. Entretanto a comporta e o canal já não formam uma união PN, a comporta segue sendo o terminal que controla a condutividade do canal. A tensão V_{GS} pode ser positiva ou negativa e controla a concentração de portadores de corrente no canal. Se o dreno é positivo com respeito à fonte e $V_{GS}=0$, flui uma corrente de drenagem através do canal.

No caso de um MOSFET de canal N, quando a V_{GS} se torna negativa, os elétrons do canal são atraídos pelas lacunas do substrato, reduzindo-se assim a concentração de portadores de corrente dentro do canal. Em consequência, aumenta a resistência do canal e reduz-se a corrente de drenagem. Se diz, então, que o MOSFET está operando no **modo de esgotamento**.

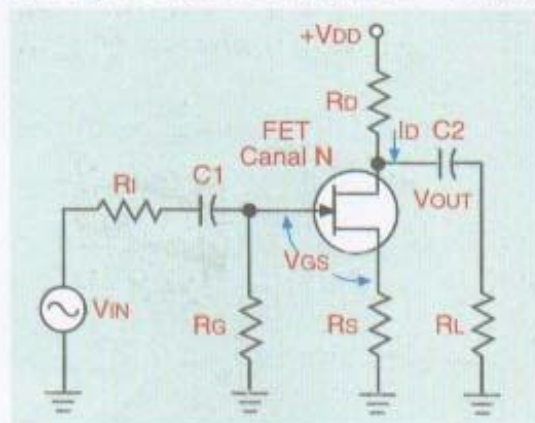


Figura 6.33 Circuito básico de um amplificador com JFET

Quando a VGS se faz positiva, os elétrons do canal são rejeitados pelas lacunas do substrato, aumentando assim a concentração de portadores de corrente dentro do canal. Em consequência, diminui a resistência do canal e aumenta a corrente de drenagem. Diz-se, então, que o MOSFET está operando no **modo de realce**. Este modo de operação não existe no FET de união. Os MOSFETs identificam-se como os FETs, por uma referência, e são especificados em razão dos mesmos parâmetros.

6.5 Tiristores

Um *tiristor* é um dispositivo construído com quatro camadas de material semicondutor dispostas de tal forma que produzem um efeito de encrustamento ou enganche (*latching*). Esta característica lhes permite atuar como interruptores eletrônicos de potência, diferentemente dos transistores bipolares e dos FETs que atuam essencialmente como amplificadores de sinal. Suas principais

aplicações são no campo do controle e manuseio de potência. Os dos principais tipos de tiristores são o retificador controlado de silício ou SCR (*Silicon Controlled Rectifier*) e o triodo de corrente alternada ou triac, cujas características gerais são examinadas posteriormente. Também dispõe-se de tiristores para aplicações especiais como os diacs, os GTOs, etc., que serão estudados nos capítulos correspondentes.

6.5.1 Retificadores controlados de silício (SCRs)

O SCR, como seu nome o indica, **figura 6.35**, é um diodo retificador de quatro camadas que, além de um ânodo (A) e de um cátodo (K) possui um terminal extra para fins de controle chamado **comporta** ou *gate* (G). Os SCRs foram desenvolvidos originalmente em 1956 como substitutos de estado sólido dos **tiratrões** ou válvulas de descarga gasosa.

Os SCRs são essencialmente diodos retificadores e se comportam da mesma forma, exceto que, quando estão diretamente polarizados, requerem a aplicação de uma corrente na comporta (IG) para realizar sua ação básica. Em outras palavras, devem ser **disparados** por um sinal de controle. Uma vez disparado, um SCR entra em condução, comportando-se como um interruptor fechado. Sob esta condição, a comporta deixa de ter controle sobre o estado do dispositivo. A única forma de travá-lo é interrompendo a corrente de ânodo (IA) ou reduzindo-a abaixo de um valor mínimo chamado **corrente de sustentação** (IH).

Para que se produza o disparo de um SCR, a IA deve ser superior a um valor mínimo chamado **corrente de engate** (IL). Em outras palavras, um SCR não entrará em condução se for suprimida a IG antes que a IA alcance o valor IL. Em general, $IL > IA$. O disparo

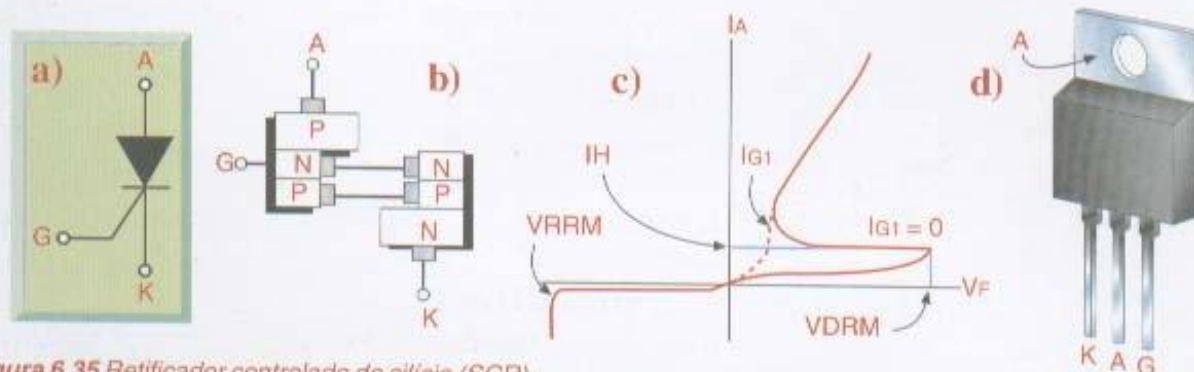


Figura 6.35 Retificador controlado de silício (SCR)

(a) Símbolo. (b) Estrutura de camadas. (c) Curva característica. (d) Apresentação usual em cápsula TO-220.

tampouco será efetivo se a I_G e a V_G forem inferiores aos valores mínimos I_{GT} e I_{GT} especificados.

Os SCRs podem também entrar em condução com uma corrente de comporta zero ($I_G=0$), estando direta ou inversamente polarizados, quando a tensão entre anodo e cátodo (V_{AC}) for superior a um valor crítico **VDRM** (direto) ou **VRRM** (inverso), respectivamente, chamado **tensão de ruptura**. Também pode haver condução com $I_G=0$ quando a velocidade de mudança de V_{AC} (dv/dt) é superior à especificada. Estes métodos de disparo não são utilizados na prática e devem ser evitados.

Os SCRs identificam-se por uma referência (C106, 2N6170, ECG5582) e são especificados principalmente pela máxima corrente de ânodo (I_{TRMS}), a tensão de ruptura direta (V_{DRM}) e a tensão de ruptura inversa (V_{RRM}). Conseguem-se SCRs com capacidades de

corrente com menos de 500 mA até mais de 300 A e tensões de ruptura com menos de 25V até mais de 2000V. Para o C106A, por exemplo, $I_{TRMS}=4A$ e $V_{DRM} = V_{RRM} = 100 V$. Um exemplo de circuito de aplicação de um SCR é o alarme contra ladrões que se descreve no **Projeto N° 1** deste curso.

6.5.2 Triodos de corrente alternada (triacs)

O triac, figura 6.37, como seu nome o indica, é um dispositivo de três terminais projetado para comutar correntes CA ou bidirecionais. Deste ponto de vista, um triac equivalente à associação de dois SCRs em **antiparalelo**. Portanto, requer um pulso de corrente na comporta para conduzir e se trava quando a corrente de ânodo cai abaixo de seu valor de sustentação. Os triacs se utilizam para manusear cargas de potência que trabalham com CA, incluindo motores, lâmpadas, fornos, solenóides, etc.

Os terminais de um triac são denominados **MT1 (terminal principal 1)**, **MT2 (terminal principal 2)** e **comporta ou gate (G)**. Este último realiza a mesma função que em um SCR. Durante cada semiciclo, um dos terminais principais atua como cátodo e o outro como ânodo, dependendo do sentido da corrente. Os triacs se identificam como os SCRs e se mantêm nas mesmas categorias de valores de I_{TRMS} e V_{DRM} . Dois exemplos de circuitos práticos com triac são o regulador de luminosidade e o relé de estado sólido descritos nos **Projetos 4 e 10** deste curso.

6.6 Circuitos integrados

Os circuitos integrados são dispositivos que alojam e interconectam circuitos ou subsistemas completos, formados por uma grande quantidade de componentes, e que realizam funções muito complexas e variadas, em um espaço extremamente reduzido, chamado **chip**, tipicamente de 2,6 mm a 6,6 mm de lado e 0,5 mm de espessura. Os circuitos integrados são atualmente os componentes mais importantes da eletrônica moderna. Por esta razão, o capítulo seguinte é totalmente dedicado a eles. 

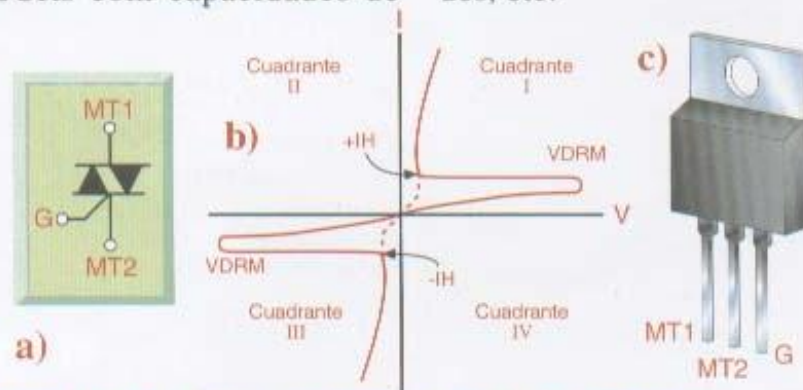


Figura 6.37 Triodo de corrente alternada (Triac). (a) Símbolo. (b) Curva característica. (c) Identificação de terminais na cápsula TO-220.

Índice Analítico Volume 1

Componentes e Teoria de Circuitos

Todos os itens ou conceitos relacionados em ordem alfabética neste índice são **importantes**. Após cada um, são indicadas as páginas onde são apresentados ou explicados. Os temas em **negrito** correspondem a capítulos completos ou aspectos metodológicos de interesse. Foram omitido muitos termos, componentes e conceitos, que seriam apenas **informativos**, e que são somente mencionados, mas não aparecem suficientemente explicados ou definidos.

- Admitância, 140
 Isolantes, 30
 Arames, 37, 57
 Aplicações dos, 58
 Identificação dos, 58
 Tipos de, 58
 Amplificação, 11, 161
 Ângulo de fase, 129
 Audiofone(s), 16
 Autotransformadores, 52
 Bateria(s), 21, 36, 78
 Aplicações das, 84
 Capacidade das, 81
 Identificação das, 79
Pilhas e, 77
 Primárias, 21, 80
 O que são as, 78
 Secundárias, 21, 82
 Simbologia das, 79
 Tipos de, 79, 80, 82
 Bobina(s), 9, 49
 Aplicações das, 51
 em CC, 126
 em CA, 131
 Identificação das, 51
 móveis, 20
 Simbologia das, 50
 Tipos de, 10, 50
 veja também *Indutância(s)*
 Breakers, 23
 Buzzer (s), 16
 Cabos, 60
 Aplicações dos, 61
 Identificação dos, 61
 Tipos de, 60
 Caixas de montagem, 24
 Campo elétrico, 99
 Campo magnético, 49
 Capacidade(s), 8, 42, 122
 distribuída, 124
 em série, 136
 em paralelo, 137
 Unidades de medida da, 42
 Capacitor(es),
 ver *Capacitor(es)*, *Capacidade(s)*
 Carga(s), 45, 87
 Chip(s), 5, 15, 166
 Choque(s), 9
 Ciclo, 11
 Circuito(s), 6, 25, 38
 aberto, 88
 CA, 121, 128
 fechado, 88
 combinados, 133
Conceitos básicos de, 85
 CC, 121
 Elementos básicos de um, 86
 Elementos gerais dos, 121
 Formas de representação dos, 90
 LC, 138
 Parâmetros e leis dos, 97
 O que é um, 86
 RC CC, 124
 Resistivos, 133, 134
 RL CC, 126
 Tipos de, 26, 89
 Reativos, 136, 140
 RLC, 140, 142
 Circuitos integrados, 5, 12, 14, 15, 25, 166
 Codificadores óticos, 19
 Código de cores, 32, 33
 Coeficiente de união, 137
 Coeficiente de temperatura, 44
 Componente(s), 5, 6, 25, 28
 ativos, 29
 eletromecânicos, 7, 21, 55, 56
 Guias de colocação de, 91
 passivos, 6, 27, 29
 O que é um, 28
 Tipos de, 2, 31
 Capacitor(es), 8, 42
 Aplicações dos, 45
 em CC, 124
 em CA, 130
 Identificação dos, 44
 Simbologia dos, 42
 Tipos de, 8, 9, 43
 veja também *Capacidade(s)*
 Condutância, 103
 Condutividade, 149
 Condutores, 21, 30, 38, 56, 86
 Conector(es), 22, 73
 Aplicações dos, 76
 Identificação dos, 74
 Simbologia dos, 73
 Tipos de, 23, 36, 74
 Constante de tempo, 124, 127
 Corrente(s), 5
 Conceito de, 97
 Convenções da, 98
 de drenagem, 163
 de elétrons, 150
 de engate, 165
 de lacunas, 150
 de sustentação, 165
 Divisores de, 143
 Intensidade da, 97
 inversa de fuga, 155
 Medição da, 98
 Natureza da, 97
 O que é a, 6
 Tipos de, 99
 Unidades de medida da, 97
 Cristais, 18, 21, 149
 Curvas características, 154, 160, 163, 166
 Designadores, 93
 Detecção, 158
 Diagramas, 7, 90
 de blocos, 26, 6, 96
 de desmontagem, 91
 esquemáticos, 7, 92
 pictóricos, 91
 Diferença de potencial, 9
 Diodos, 11, 153
 de estado sólido, 153
 de microondas, 159
 de vácuo, 153
 detectores, 158
 emissores de luz, 157
 laser, 159
 Outros tipos de, 158
 Retificadores, 11, 153
 Schottky, 158
 túnel, 159
 varicap, 159
 zener, 156
 Dissipadores de calor, 24
 Display(s), 17, 18, 68
 Dispositivos de controle, 87
 Dispositivos de proteção, 23, 87
 Dopado, 11, 150
 Efeito piezoelétrico, 20
Exercícios de desenho resolvidos, 34, 45, 111, 114, 134, 135, 137, 140, 141
 Eletricidade, 5
 Eletroímãs, 19
 Elétrons de valência, 148
 Elétrons livres, 149
Eletrônica

O mundo da, 4
Introdução à, 3
Experimentos, 35, 46, 68, 105, 115, 144
FET(s), 12, 13, 162
 Especificações dos, 163
 Funcionamento dos, 162
 Polarização dos, 162
 Tipos de, 13, 162
 Zona de esgotamento dos, 163
 veja também *MOSFETs, JFETs*
 Fator de forma, 129
 Filtros passa-altos RC, 143
 Filtros passa-baixos RC, 143
 Forma(s) de onda, 10, 99
 Fotocélulas, 16, 17
 Fotodiodos, 17, 158
 Fototransistores, 17
 Frequência(s), 11, 129
 de corte, 143
 de ressonância, 139, 141
 O que é, 11
 Fonte(s), 13
 controladas, 122
 de corrente, 122
 de energia, 86
 de tensão, 121
 Força eletromotriz, 8
 Fusíveis, 23
 Ganho, 11
 Ganho de corrente beta, 161
 Lacuna, 150
 IGBTs, 13, 160
 Impedância, 130, 140
 Impedância característica, 61
Índice analítico do Volume 1, 167
 Indutância(s), 123
 em série, 136
 em paralelo, 138
 mútua, 52, 136
 Unidades de medida da, 49
 Indutor(é)
 veja *bobina(s), Indutância(s)*
 Interruptores, 11, 22, 62,
 Aplicações dos, 67
 Identificação dos, 66
 Simbologia dos, 62
 Tipos de, 64
 JFET(s), 13, 162
 Lâmpadas, 16
 LED(s), 17, 36
 Lei(s)
 de Ohm, 30, 103
 de Kirchhoff, 110, 111
 Material(is)
 ôhmicos, 30
 semicondutores, 11
 Microeletrônica, 5
 Microfones, 15
 Microprocessador. O, 5
 Modelos matemáticos, 121, 160, 163

MOSFET(s), 13, 164
 Motor(es), 19
 Optoacopladores, 17
 Auto-falantes, 16
 PCBs, 21
 Período, 129
 Pilhas
 ver *Bateria(s)*
 Polarização, 152, 154
 Potência, 11, 33, 39
 Conceito de, 34, 109
 Convenções da, 109
 O que é, 11
 Relações de, 109
 Unidades de medida da, 109
 Potenciômetro(s), 8, 31, 39
 Aplicações dos, 41
 Identificação dos, 41
 Simbologia dos, 3
 Tipos de, 40
 Portadores de carga, 97, 151
 Reatância(s), 130
 em paralelo, 137, 139
 em série, 136, 138
 Retificação, 11, 153
 Relação de transformação, 10, 54
 Relé(s), 22, 65
 Resistor(es), 7, 8, 30, 122
 Aplicações dos, 34
 Conceito de, 102
 de isolamento
 de constrição, 73
 de drenagem, 157
 em CA, 13
 em paralelo, 134
 em série, 133
 Identificação dos, 32
 incremental, 155
 lineares, 122
 negativo, 159
 Relações de potência nos, 109
 Simbologia dos, 31
 Tipos de, 8, 31, 39
 Unidades de medida de, 30, 102
 Valores preferidos de, 114
 Resistência
 veja *Resistor(es)*
 Ressonância, 139, 141
 SCR(s), 15, 165
 Semicondutor(es), 6, 147
 extrínsecos, 150
 intrínsecos, 148
 óticos, 17
Teoria básica de, 148
 Tipos de, 17, 151
 Sensores, 20
 Sinal(is), 10
 de pulsos, 54
 Fase de, 129
 Parâmetros de um, 128

periódicos, 11
 O que é um, 10
 Tipos de, 10
Símbolos, 7-23, 31, 40, 42, 49, 52, 57,
 63, 74, 80, 87, 88, 93, 94, 99, 121-124,
 153, 156-160, 163, 165, 166
 Sistema(s), 6, 25
 ANSI de símbolos, 31
 AWG de bitola, 59
 SI de unidades, 29, 30, 34
 Solenóides, 19
 Supercondutores, 102
 Placas de circuito impresso, 21
 Teclados, 22
 Tempo de trânsito, 159
 Tensão(ões)
 Conceito de, 99
 Convenções de, 100
 de avalanche, 155, 165
 de condução direta, 154
 de ruptura, 155, 165
 Divisores de, 8, 41, 142
 Formas de designação de, 100
 Medição de, 101
 Natureza da, 99
 O que é, 9
 Tipos de, 101
 Unidades de medida de, 100
 zener, 156
 Tiristor(es), 13, 165
 Tipos de, 14, 165
 Tolerância, 32, 44
 Transcondutância, 164
 Transdutores, 7, 15, 16, 19, 20
 Transformadores, 10, 52
 Aplicações dos, 53
 diferenciais, 20
 Identificação dos, 54
 Simbologia dos, 52
 Tipos de, 10, 53
 Transistor(es), 11
 Transistores de efeito de campo
 ver *FETs, JFETs, MOSFETs*
 Transistores bipolares, 12, 160
 de comporta isolada, 13
 Encapsulado dos, 161
 Especificações dos, 162
 Estrutura dos, 160
 Funcionamento dos, 160
 Identificação dos, 162
 Polarização dos, 160
 Tipos de, 12, 160*
 Triac(s), 14, 166
 Tubos de raios catódicos, 18
 Tubos de vácuo, 5,
 União PN, 151
 Valores CA, 128
 Varistores, 23
 Visualizadores,
 veja *Displays*