1 Fundamentos

1.1 INTRODUÇÃO

O campo da eletrônica reúne grandes histórias de sucesso do século XX. A partir dos transmissores de centelha rudimentares e detectores de "ponto de contato" (também conhecidos pela expressão "bigode de gato") usados no princípio, a primeira metade do século trouxe uma era da eletrônica denominada tubo de vácuo (ou válvula termiônica), que promoveu sofisticação e encontrou aplicação imediata em áreas como comunicações, navegação, instrumentação, controle e computação. A última metade do século trouxe a eletrônica "de estado sólido" – primeiro, como transistores discretos e, em seguida, como magníficos arranjos dentro de "circuitos integrados" (CIs) –, em uma enxurrada de avanços impressionantes que não mostra sinais de diminuição. Produtos de consumo compactos e baratos agora normalmente contêm muitos milhões de transistores em chips VLSI (integração em escala muito ampla), combinados com optoeletrônica refinada (monitores, lasers e assim por diante); eles podem processar sons, imagens e dados, além de permitir, por exemplo, que redes sem fio e pequenos dispositivos portáteis acessem múltiplos recursos da Internet. Talvez tão notável quanto isso seja a tendência do aumento do desempenho por dólar.[1] Normalmente o custo de um microcircuito eletrônico diminui para uma fração de seu custo inicial à medida que o processo de fabricação é aperfeiçoado (ver Figura 10.87, por exemplo). Na verdade, muitas vezes os controles do painel e o gabinete do hardware de um instrumento custam mais do que seus componentes internos.

No estudo desta emocionante evolução da eletrônica, você pode ter a impressão de que é possível construir pequenos aparelhos poderosos e refinados, a baixo custo, para desempenhar qualquer tarefa – tudo o que você precisa saber é como todos esses dispositivos extraordinários funcionam. Se você já teve essa sensação, este livro é para você. Nele, buscamos transmitir a emoção e o conhecimento sobre a eletrônica.

Neste capítulo, começaremos o estudo das leis, regras práticas e dos truques que constituem a arte da eletrônica como a vemos. É necessário começar pelo princípio – abordando tensão, corrente, potência e os componentes que compõem os circuitos eletrônicos. Como você não pode tocar, ver, cheirar ou ouvir a eletricidade, será necessário um pouco de abstração (em especial no primeiro capítulo), e alguns instrumentos de visualização, como osciloscópios e voltímetros. Em muitos aspectos, o primeiro capítulo é também o que utilizará mais matemática, apesar de nossos esforços para manter a abordagem matemática no mínimo necessário, a fim de promover uma boa compreensão intuitiva do projeto e do comportamento dos circuitos.

Nesta nova edição, incluímos algumas aproximações intuitivas que nossos alunos consideram úteis. A introdução de um ou dois componentes "ativos" antes do momento que normalmente são apresentados possibilita irmos diretamente para algumas aplicações geralmente impossíveis de serem abordadas em um capítulo de "eletrônica passiva"; isso tornará as coisas interessantes e, até mesmo, estimulantes.

Depois dos fundamentos da eletrônica, entramos rapidamente nos circuitos ativos (amplificadores, osciladores, circuitos lógicos, etc.), que fazem o campo da eletrônica ser tão emocionante. O leitor que já tem algum conhecimento de eletrônica poderá pular este capítulo. Mais generalizações neste momento seriam inúteis, então vamos mergulhar no estudo.

1.2 TENSÃO, CORRENTE E RESISTÊNCIA

1.2.1 Tensão e Corrente

Há duas grandezas que gostamos de manter sob controle em circuitos eletrônicos: tensão e corrente. Em geral, elas variam com o tempo; caso contrário, nada de interessante aconteceria.

Tensão (símbolo V ou, algumas vezes, E). Conceitualmente, a tensão entre dois pontos é o custo da energia (trabalho) necessário para mover uma unidade de carga positiva a partir do ponto mais negativo (potencial mais baixo) para o ponto mais positivo (potencial mais elevado). Da mesma forma, é a energia liberada quando uma unidade de carga se move "para baixo" a partir do potencial mais elevado para o mais baixo.[2] A tensão

[1] Um computador de meados do século passado (o IBM 650) custava 300.000 dólares, pesava 2,7 toneladas e continha 126 lâmpadas em seu painel de controle; em uma engraçada reviravolta, atualmente uma lâmpada com controle de eficiência energética embutido contém um microcontrolador de maior capacidade *dentro de sua base* e custa cerca de 10 dólares.

[2] Esta é a *definição*, mas dificilmente é a forma como os projetistas de circuitos imaginam a tensão. Com o tempo, você desenvolverá um bom senso intuitivo do que realmente significa a tensão em um circuito eletrônico. Aproximadamente (*muito* aproximadamente) falando, tensão é o que você aplica para fazer a corrente fluir.

também é chamada de *diferença de potencial* ou *força eletromotriz* (FEM). A unidade de medida é o *volt*, com as tensões geralmente expressas em volts (V), quilovolts (1 kV $= 10^3$ V), milivolts (1 mV $= 10^{-3}$ V) ou microvolts (1 μV $= 10^{-6}$ V) (ver o quadro sobre prefixos). Um joule (J) de trabalho é gasto ao mover um Coulomb (C) de carga através de uma diferença de potencial de 1 V. (O Coulomb é a unidade de carga elétrica e é igual à carga de cerca de 6×10^{18} elétrons.) Por razões que se tornarão claras mais adiante, raramente faz-se uso de nanovolts (1 nV $= 10^{-9}$ V) e megavolts (1 MV $= 10^6$ V).

Corrente (símbolo *I*). Corrente é a taxa de fluxo de carga elétrica que passa em um ponto. A unidade de medida é o ampère, com as correntes normalmente expressas em ampères (A), miliampères (1 mA $= 10^{-3}$ A), microampères (1 μA $= 10^{-6}$ A), nanoampères (1 nA $= 10^{-9}$ A) ou, ocasionalmente, picoampères (1 pA $= 10^{-12}$ A). Uma corrente de 1 ampère é igual a um fluxo de 1 coulomb de carga por segundo. Por convenção, considera-se que a corrente no circuito flui a partir de um ponto mais positivo para um ponto mais negativo, embora o fluxo real de elétrons seja no sentido oposto.

Importante: a partir dessas definições, você pode perceber que as correntes fluem *através* dos elementos e as tensões são aplicadas (ou aparecem) *sobre* os elementos. Então, podemos dizer que sempre nos referimos à tensão *entre* dois pontos ou *sobre* dois pontos em um circuito e sempre nos referimos à corrente *através* de um dispositivo ou uma conexão de um circuito.

Dizer algo como “a tensão através de um resistor...” é um absurdo. No entanto, frequentemente falamos da tensão *em um ponto* em um circuito. Isso é sempre entendido como a tensão entre esse ponto e o “terra”, um ponto comum no circuito que todos conhecem. Em breve, você também o identificará.

Geramos tensões ao realizar trabalho sobre cargas em dispositivos, como baterias (conversão de energia eletroquímica), geradores (conversão da energia mecânica por forças magnéticas), células solares (conversão fotovoltaica da energia dos fótons), etc. Obtemos correntes ao aplicar tensões sobre elementos.

Neste ponto, você pode estar se perguntando como se faz para “ver” tensões e correntes. O instrumento eletrônico mais útil é o osciloscópio, que permite olhar para tensões (ou, às vezes, correntes) em um circuito como uma função do tempo.[3] Trataremos de osciloscópios, e também de voltímetros, quando discutirmos sinais; para uma consulta preliminar, veja o Apêndice O e o quadro sobre multímetro mais adiante neste capítulo.

Em circuitos reais, conectamos elementos com fios (condutores metálicos), cada um dos quais com a mesma tensão em todos os pontos (em relação ao terra, por exemplo).[4] Mencionamos isso agora para que você perceba que um circuito real não tem que parecer com o seu diagrama, pois os fios podem ser reorganizados.

Eis algumas regras simples sobre tensão e corrente:

1. A soma das correntes que entram em um ponto no circuito é igual à soma das correntes que saem (conservação de carga). Essa afirmação, às vezes, é denominada lei de Kirchhoff para corrente (LKC). Os engenheiros se referem a tal ponto como um *nó*. Disso resulta que, para um circuito em série (um monte de elementos de dois terminais, todos conectados com a extremidade de um na extremidade do outro), a corrente é a mesma em todos os pontos.
2. Elementos conectados em paralelo (Figura 1.1) têm a mesma tensão sobre eles. Dito de outra forma, a soma das “quedas de tensão” de A para B via um percurso através de um circuito é igual à soma por qualquer outro percurso e é simplesmente a tensão entre A e B. Ainda outra forma de dizer isto é que a soma das quedas de tensão ao longo de qualquer circuito fechado é zero. Essa é a lei de Kirchhoff para tensão (LKT).
3. A potência (energia por unidade de tempo) consumida por um dispositivo de circuito é

$$P = VI$$

Isso é simplesmente (energia/carga) × (carga/tempo). Para *V* em volts e *I* em ampères, *P* é dada em watts. Um watt é um joule por segundo (1 W = 1 J/s). Assim, por exemplo, a corrente que flui através de uma lâmpada de 60 W a 120 V é 0,5 A.

Potência se transforma (geralmente) em calor ou, às vezes, em trabalho mecânico (motores), energia irradiada (lâmpadas, transmissores) ou energia armazenada (baterias, capacitores, indutores). O gerenciamento de uma carga térmica em um sistema complicado (por exemplo, um grande computador, em que muitos quilowatts de energia elétrica são convertidos em calor, com o subproduto energeticamente insignificante de algumas páginas de resultados computacionais) pode ser uma parte crucial do projeto do sistema.

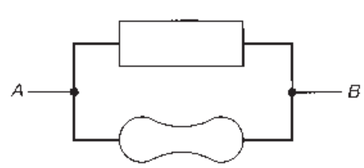

FIGURA 1.1 Conexão em paralelo.

[3] Engenheiros e técnicos da área elétrica têm essa esplêndida ferramenta de visualização de tensões e correntes em função do tempo. Saiba que existe, ainda, uma ferramenta igualmente poderosa, denominada analisador de espectro, em que o eixo horizontal é a frequência em vez do tempo.

[4] No domínio das frequências altas ou das baixas impedâncias, essa afirmação não é rigorosamente verdadeira. Teremos mais a dizer sobre isso mais tarde. Por enquanto, esta é uma boa aproximação.

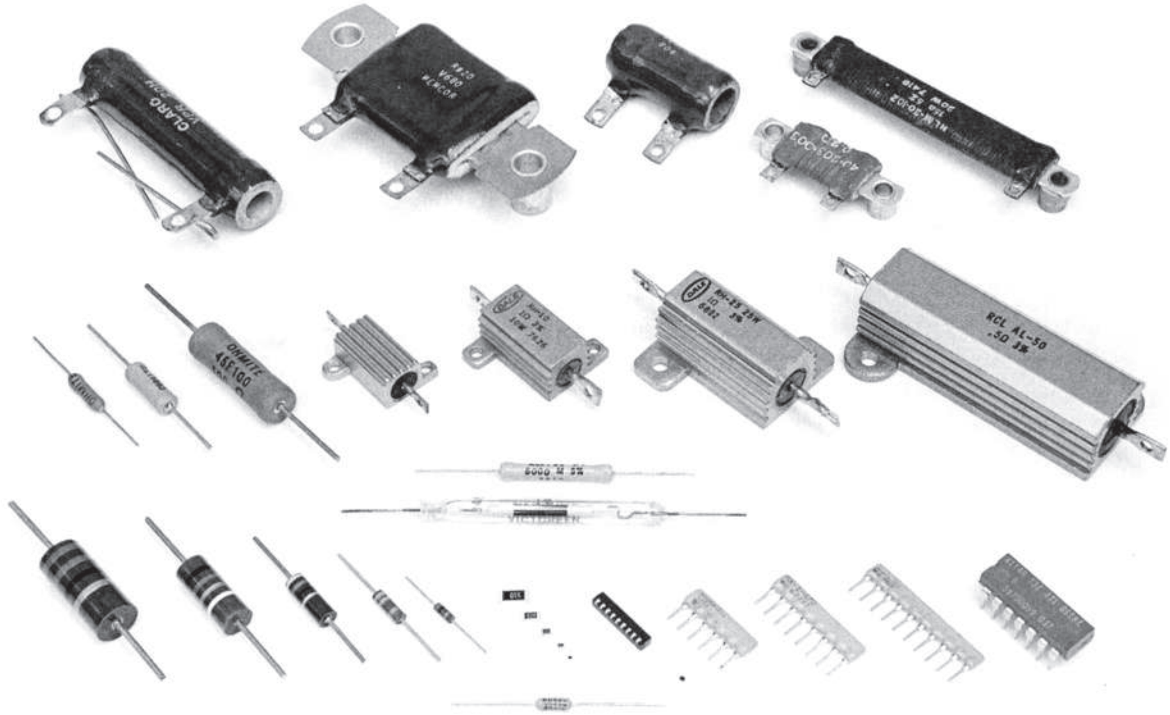

FIGURA 1.2 Uma seleção de tipos de resistores comuns. A linha superior, da esquerda para a direita (resistores cerâmicos de potência feitos de fio enrolado): esmalte vítreo com terminais de 20 W, montagem em chassi de 20 W, esmalte vítreo de 30 W, montagem em chassi de 5 W e 20 W. Linha do meio (resistores de potência feitos de fio enrolado): cerâmico axial de 1 W, 3 W e 5 W; montado em chassi com refrigeração por condução de 5 W, 10 W, 25 W e 50 W ("tipo Dale"). Linha inferior: composição de carbono de 2 W, 1 W, 1/2 W, 1/4 W e 1/8 W; filme espesso de montagem em superfície (tamanhos 2010, 1206, 0805, 0603 e 0402); matriz de resistor de montagem em superfície; matriz em linha de 6, 8 e 10 pinos; matriz DIP. O resistor na parte inferior é o onipresente RN55D 1/4 W, 1% do tipo filme metálico; e o par de resistores acima são *Victoreen* de alta resistência (vidro de 2 GΩ; cerâmica de 5 GΩ).

Em breve, quando lidarmos com tensões e correntes que variam periodicamente, teremos que generalizar a equação simples $P = VI$ para lidarmos com potência *média*, mas ela é uma expressão correta de potência *instantânea* tal como está.

Aliás, não chame corrente de "amperagem", que é uma expressão usada unicamente por amadores.[5] O mesmo cuidado se aplicará ao termo "ohmagem"[6] quando falarmos sobre resistência na próxima seção.

1.2.2 Relação Entre Tensão e Corrente: Resistores

Esta é uma história longa e interessante. É a essência da eletrônica. Grosseiramente falando, o x da questão é construir e usar aparelhos que tenham características *V versus I* interessantes e úteis. Resistores (*I* é proporcional a *V*), capacitores (*l* é proporcional à taxa de variação de *V*), diodos (*l* flui em apenas um sentido), termistores (resistor dependente da temperatura), fotorresistores (resistor dependente da luz), *strain gages*, ou extensômetros (resistor dependente de esforço de tensão ou compressão), etc., são alguns exemplos. Talvez mais interessantes ainda sejam os dispositivos de *três terminais*, como transistores, em que a corrente que pode fluir entre um par de terminais é controlada pela tensão aplicada a um terceiro terminal. Abordaremos gradualmente alguns desses dispositivos exóticos; por enquanto, começaremos com o elemento de circuito mais simples (e mais usado), o resistor (Figura 1.3).

A. Resistência e Resistores

É um fato interessante que a corrente através de um condutor metálico (ou outro material que conduz parcialmente) seja proporcional à tensão sobre ele. (No caso de fios condutores utilizados em circuitos, normalmente escolhemos uma bitola grossa o suficiente para que essas "quedas de tensão" sejam insignificantes.) Essa não é uma lei universal para todos os

FIGURA 1.3 Resistor.

5 A menos que você seja um engenheiro que lida com altas potências, trabalhando com transformadores gigantes de 13 kV e assim por diante – aqueles caras, sim, podem dizer amperagem.

6 ... neste caso também, meu amigo, "ohmagem" não é a nomenclatura preferida: utilize o termo *resistência*, por favor.

PREFIXOS

Múltiplo	*Prefixo*	*Símbolo*	*Origem*
10^{24}	yotta	Y	penúltima letra do alfabeto latino, faz alusão à letra grega *iota*
10^{21}	zetta	Z	última letra do alfabeto latino, faz alusão à letra grega *zeta*
10^{18}	exa	E	*Hexa* em grego (seis: potência de 1000)
10^{15}	peta	P	*Penta* em grego (cinco: potência de 1000)
10^{12}	tera	T	*Teras* em grego (monstro)
10^{9}	giga	G	*Gigas* em grego (gigante)
10^{6}	mega	M	*Megas* em grego (ótimo)
10^{3}	kilo	k	*Khilioi* em grego (mil)
10^{-3}	milli	m	*Milli* em latim (mil)
10^{-6}	micro	μ	*Mikros* em grego (pequeno)
10^{-9}	nano	n	*Nano* em grego (anão)
10^{-12}	pico	p	de italiano/espanhol *piccolo*/*pico* (pequeno)
10^{-15}	femto	f	Dinamarquês/norueguês *femten* (quinze)
10^{-18}	atto	a	Dinamarquês/norueguês *atten* (dezoito)
10^{-21}	zepto	z	Última letra do alfabeto latino, espelho de *zetta*
10^{-24}	yocto	y	Penúltima letra do alfabeto latino, espelho de *yotta*

Esses prefixos são universalmente utilizados para dimensionar unidades em ciência e engenharia. Suas origens etimológicas são controversas e não devem ser consideradas historicamente confiáveis. Quando se abrevia uma unidade com um prefixo, o símbolo para a unidade segue o prefixo sem espaço. Tenha cuidado com letras maiúsculas e minúsculas (especialmente m e M) em prefixo e unidade: 1 mW é 1 miliwatt, ou um milésimo de um watt; 1 MHz é um megahertz, ou 1 milhão de hertz. Em geral, as unidades são escritas com letras minúsculas, mesmo quando elas são derivadas de nomes próprios. O nome da unidade não é escrito em maiúsculo quando é expresso por extenso e usado com um prefixo, apenas quando abreviado. Assim: escrevemos hertz e quilohertz, mas escrevemos Hz e kHz; escrevemos watt, miliwatt e megawatt, mas escrevemos W, mW e MW.

objetos. Por exemplo, a corrente através de uma lâmpada de néon é uma função altamente não linear da tensão aplicada (que é igual a zero até uma tensão crítica, ponto no qual ela aumenta drasticamente). O mesmo vale para uma variedade de dispositivos interessantes especiais – diodos, transistores, lâmpadas, etc. (Se você está interessado em entender por que condutores metálicos se comportam dessa forma, leia as Seções 4.4 e 4.5 do livro *Electricity and Magnetism*, de Purcell e Morin.)

Um resistor é feito de algum material condutor (de carbono, filme de metal ou filme de carbono, ou fio de baixa condutividade), com um fio ou contatos em cada extremidade. Ele é caracterizado pela sua resistência:

$$R = V/I \tag{1.2}$$

R é em ohms para V em volts e I em ampères. Isso é conhecido como lei de Ohm. Resistências típicas do tipo mais frequentemente utilizado (película de óxido metálico, metal filme ou filme de carbono) têm valores de 1 ohm (1 Ω) até cerca de 10 megaohms (10 MΩ). Resistores também são caracterizados por quanta potência eles podem dissipar com segurança (os mais usados têm especificações de 1/4 ou 1/8 W), a sua dimensão física[7] e outros parâmetros, como tolerância (precisão), coeficiente de temperatura, ruído, coeficiente de tensão (na medida em que R depende da tensão V aplicada), estabilidade com o tempo, indutância, etc. Veja o quadro sobre resistores, Apêndice C, para mais detalhes. A Figura 1.2 mostra uma coleção de resistores, com a maioria das morfologias disponíveis representada.

De forma geral, as resistências são usadas para converter uma tensão em corrente, e vice-versa. Isso pode soar terrivelmente banal, mas em breve você entenderá o que queremos dizer.

[7] Os tamanhos de chips de resistores e outros componentes destinados à montagem em superfície são especificados por um código de quatro dígitos, em que cada par de dígitos especifica uma dimensão em unidades de 0,010 pol. (0,25 mm). Por exemplo, um resistor de tamanho 0805 é de 2 mm ×1,25 mm, ou 80 mils ×50 mils (1 mil é 0,001 pol.); a altura deve ser especificada separadamente. Além disso, o código de extensão de quatro dígitos pode estar no sistema métrico (por vezes, sem o mencionar!), em unidades de 0,1 mm: assim, um “0805” (sistema inglês) também é um “2012” (métrico).

RESISTORES

Resistores são realmente onipresentes. Há quase tantos tipos deles quanto aplicações. Os resistores são usados em amplificadores como cargas para dispositivos ativos, em redes de polarização e como elementos de realimentação. Em combinação com capacitores, estabelecem constantes de tempo e atuam como filtros. Eles são usados para definir as correntes de operação e níveis de sinal. Resistores são usados em circuitos de alimentação para reduzir as tensões por meio de dissipação de potência, para medir correntes e para descarregar os capacitores após a alimentação ser removida. Eles são utilizados em circuitos de precisão para estabelecer as correntes, para fornecer relações precisas de tensão e para definir valores de ganhos precisos. Em circuitos lógicos, agem como barramentos e terminadores de linha e como resistores de *pull-up* e *pull-down*. Em circuitos de alta tensão, são utilizados para medir as tensões e equalizar correntes de fuga entre diodos ou capacitores conectados em série. Em circuitos de radiofrequência (RF), eles definem a largura de banda de circuitos ressonantes e ainda são usados como formas de bobina de indutores.

Os resistores estão disponíveis com resistências de 0,0002 Ω a 10^{12} Ω, especificações de potência padrão de 1/8 watt a 250 watts e precisão de 0,005% a 20%. Resistores podem ser fabricados a partir de filmes metálicos, filmes de óxidos metálicos ou filmes de carbono; a partir de molduras de composição de cerâmica ou de carbono; a partir de folha de metal ou fio de metal enrolado sobre uma forma; ou a partir de elementos semicondutores semelhantes aos transistores de efeito de campo (FETs). O tipo de resistor mais utilizado é formado a partir de filme de carbono, de metal ou de óxido e vem em dois "encapsulamentos" amplamente utilizados: o tipo cilíndrico de *terminais axiais* (tipificado pelo genérico resistor de filme metálico RN55D 1% 1/4 W)[8] e o " chip de resistor" bem menor para *montagem em superfície*. Esses tipos comuns são encontrados com tolerâncias de 5%, 2% e 1%, em um conjunto padrão de valores que variam de 1 Ω a 10 MΩ. Os tipos de 1% têm 96 valores por década, enquanto os tipos de 2% e 5% têm 24 valores por década (ver Anexo C). A Figura 1.2 ilustra a maioria dos encapsulamentos de resistores comuns.

Os resistores são tão fáceis de usar e funcionam tão bem, que, muitas vezes, são esquecidos. No entanto, eles não são perfeitos, e você deve estar atento para algumas de suas limitações para que não seja surpreendido. Os principais defeitos são variações na resistência com temperatura, tensão, tempo e umidade. Outros defeitos referem-se à indutância (que pode ser grave em altas frequências), ao desenvolvimento de pontos quentes térmicos em aplicações de potência e à geração de ruído elétrico em amplificadores de baixo ruído.

[8] Especificado conservadoramente como 1/8 watt em sua especificação militar ("*MIL-spec*") RN55, mas especificado como 1/4 watt em sua especificação industrial CMF-55.

B. Resistores em Série e em Paralelo

A partir da definição de R, seguem alguns resultados simples:

1. A resistência de dois resistores em série (Figura 1.4) é

$$R = R_1 + R_2 \tag{1.3}$$

   Ao colocar resistores em série, você sempre terá uma resistência *maior*.

2. A resistência de dois resistores em paralelo (Figura 1.5) é

$$R = \frac{R_1R_2}{R_1 + R_2} \quad \text{ou} \quad R = \frac{1}{\dfrac{1}{R_1} + \dfrac{1}{R_2}}. \tag{1.4}$$

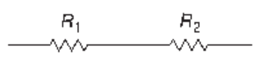

FIGURA 1.4 Resistores em série.

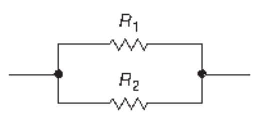

FIGURA 1.5 Resistores em paralelo

Ao colocar resistores em paralelo, você terá sempre uma resistência menor. A resistência é medida em ohms (Ω), mas, na prática, muitas vezes, omitimos o símbolo Ω quando se refere a resistências acima de 1.000 Ω (1 kΩ). Assim, uma resistência de 4,7 kΩ é, muitas vezes, referida como um resistor de 4,7k, e um resistor de 1 MΩ, como um resistor de 1M (ou 1 mega).[9] Se você estiver se aborrecendo com esta introdução, por favor, tenha paciência – chegaremos em breve a inúmeras aplicações divertidas.

[9] Uma notação alternativa popular "internacional" substitui o ponto decimal com o multiplicador da unidade, assim, podemos escrever 4k7 ou 1M0. Um resistor de 2,2 Ω torna-se 2R2. Há um esquema similar para capacitores e indutores.

Exercício 1.1 Você tem um resistor de 5k e um resistor de 10k. Qual é a sua resistência combinada (a) em série e (b) em paralelo?

Exercício 1.2 Se você colocar um resistor de 1 ohm nos terminais de uma bateria de carro de 12 volts, qual potência ele dissipará?

Exercício 1.3 Teste as fórmulas para o cálculo de resistores em séries e em paralelo.

Exercício 1.4 Mostre que vários resistores em paralelo têm resistência

$$R = \frac{1}{\dfrac{1}{R_1} + \dfrac{1}{R_2} + \dfrac{1}{R_3} + \cdots} \tag{1.5}$$

Iniciantes tendem a se afastar da álgebra complicada no projeto ou na tentativa de entender a eletrônica. Agora é a hora de começar a aprendizagem intuitiva e os atalhos. Eis dois bons truques:

Atalho nº 1 Uma grande resistência em série (em paralelo) com uma pequena resistência tem, aproximadamente, o valor da resistência maior (menor). Assim, você pode "cortar" um resistor, para obter um valor-alvo alto ou baixo, conectando um segundo resistor em série ou em paralelo: para obter um valor-alvo *alto*, escolha um valor de resistor disponível abaixo do valor-alvo e, em seguida, conecte-o em série ao resistor (que é muito menor) para completar a diferença; para obter um valor-alvo *baixo*, escolha um valor de resistor disponível acima do valor-alvo e, em seguida, conecte-o em paralelo ao resistor (que é muito maior). Para este último, pode-se aproximar com proporções – para diminuir o valor de uma resistência em 1%, por exemplo, coloque um resistor 100 vezes maior em paralelo.[10]

Atalho nº 2 Suponha que você queira uma resistência de 5k em paralelo com 10k. Se você imaginar o resistor de 5k como dois resistores de 10k em paralelo, então o circuito completo é semelhante a três resistores de 10k em paralelo. Uma vez que a resistência de n resistores iguais em paralelo é igual a $1/n$ vezes a resistência dos resistores individuais, a resposta, neste caso, é 10k/3, ou 3,33k. Esse truque é útil, pois permite analisar circuitos rapidamente por meio de cálculos mentais, sem distrações. Queremos incentivar a análise mental, ou, pelo menos, esboços mentais.

Um pouco mais de filosofia caseira: há uma tendência entre os iniciantes de querer calcular valores de resistência e valores de componente de circuito com muitos algarismos significativos, especialmente utilizando calculadoras e computadores. Há duas razões para você evitar esse hábito: (a) os componentes em si são de precisão finita (resistências normalmente têm tolerâncias de ±5% ou ±1%; para capacitores, é tipicamente ±10% ou ±5%; e os parâmetros que caracterizam transistores, por exemplo, frequentemente são conhecidos apenas por um fator de 2); (b) um sinal de um bom projeto de circuito é a insensibilidade do circuito final a valores precisos de componentes (há exceções, claro). Você também aprenderá a usar a intuição em circuito mais rapidamente se adquirir o hábito de fazer cálculos mentais aproximados em vez de observar números sem sentido aparecerem no visor da calculadora. Acreditamos firmemente que a confiança em fórmulas e equações logo no início de seus estudos sobre circuitos eletrônicos impede a compreensão do que está realmente acontecendo.

[10] Com um erro, neste caso, de apenas 0,01%.

Na tentativa de desenvolver a intuição em operações com resistências, algumas pessoas acham que é útil pensar usando *condutâncias*, $G = 1/R$. A corrente através de um dispositivo de condutância G submetido a uma tensão V é, então, dada por $I = GV$ (lei de Ohm). Uma pequena resistência é uma grande condutância, com uma grande corrente correspondentemente sob a influência de uma tensão aplicada. Desse ponto de vista, a fórmula para resistências em paralelo é óbvia: quando várias resistências ou trilhas condutoras estão conectadas na mesma tensão, a corrente total é a soma das correntes individuais. Por conseguinte, a condutância resultante é simplesmente a soma das condutâncias individuais, $G = G_1 + G_2 + G_3 + ...$, que é a mesma fórmula deduzida anteriormente para resistores em paralelo.

Engenheiros gostam de definir unidades recíprocas, e eles designaram como unidade de condutância o siemens ($S = 1/\Omega$), também conhecido como mho (que é ohm escrito invertido, representado pelo símbolo ℧). Embora o conceito de condutância seja útil no desenvolvimento da intuição, não é amplamente utilizado;[11] a maioria das pessoas prefere lidar com resistência em vez disso.

C. Potência em Resistores

A potência dissipada por uma resistência (ou qualquer outro dispositivo) é $P = IV$. Usando a lei de Ohm, você pode obter as formas equivalentes $P = I^2R$ e $P = V^2/R$.

Exercício 1.5 Mostre que não é possível exceder a potência de um resistor de 1/4 watt de resistência maior do que 1k, não importando como você o conecte, em um circuito operando a partir de uma bateria de 15 volts.

Exercício 1.6 Exercício Opcional: A cidade de Nova York necessita de cerca de 10^{10} watts de potência elétrica, em 115 volts (isso é plausível: 10 milhões de pessoas consomem, em média, 1 quilowatt cada). Um cabo de alimentação para alta corrente pode ter uma polegada (2,54 cm) de diâmetro. Calculemos o que acontecerá se tentarmos transferir energia elétrica através de um cabo com 1 pé (30,48 cm) de diâmetro feito de cobre puro. Sua resistência é 0,05 $\mu\Omega$ (5×10^{-8} ohms) por pé. Calcule (a) a potência perdida por pé a partir da "perda I^2R"; (b) o comprimento do cabo sobre o qual você perderá toda a potência de 10^{10} watts; e (c) o quão quente o cabo estará, se você conhecer a física envolvida ($\sigma = 6 \times 10^{-12}$ W/K^4 cm^2). Se você tiver feito seus cálculos corretamente, o resultado deve parecer absurdo. Qual é a solução para este enigma?

[11] No entanto, o inteligente *teorema Millman* tem seus admiradores: ele diz que a tensão de saída de um conjunto de resistores (chamemo-los de R_i) que são acionados a partir de um conjunto de tensões de entrada correspondente (V_i) e conectados entre si na saída é $V_{\text{out}} = (\sum V_i G_i)/\sum G_i$, onde G_i são as condutâncias ($G_i = 1/R_i$).

D. Entrada e Saída

Quase todos os circuitos eletrônicos aceitam algum tipo de *entrada* aplicada (geralmente uma tensão) e produzem algum tipo de *saída* correspondente (que, mais uma vez, geralmente é uma tensão). Por exemplo, um amplificador de áudio pode produzir uma tensão de saída (variável) 100 vezes maior que a tensão de entrada (que varia de forma semelhante). Ao descrever tal amplificador, imaginamos medir a tensão de saída para uma dada tensão de entrada aplicada. Engenheiros falam da *função de transferência* **H**, a relação da saída (medida) dividida pela entrada (aplicada); para o amplificador de áudio mencionado, **H** é simplesmente uma constante (**H** = 100). No próximo capítulo, abordaremos os amplificadores. No entanto, apenas com resistores já podemos olhar para um fragmento de circuito muito importante, o *divisor de tensão* (que pode ser chamado de "atenuador " ou "deamplificador").

1.2.3 Divisores de Tensão

Chegamos agora ao assunto do divisor de tensão, um dos fragmentos mais difundidos dos circuitos eletrônicos. Mostre-nos qualquer circuito real, e mostraremos meia dúzia de divisores de tensão. De forma mais simples, um divisor de tensão é um circuito que, dada uma determinada tensão de entrada, produz uma fração previsível da tensão de entrada como tensão de saída. O divisor de tensão mais simples está representado na Figura 1.6.

Uma explicação importante: quando os engenheiros projetam um circuito como esse, eles geralmente consideram que V_{in} à esquerda é uma tensão que você está aplicando ao circuito e que V_{out} à direita é a tensão de saída resultante (produzida pelo circuito) que você está medindo (ou pelo menos em que está interessado). Você deve saber tudo isso (a) por causa da convenção que sinaliza geralmente o fluxo da esquerda para a direita, (b) a partir dos nomes sugestivos ("in", "out") dos sinais e (c) a partir de familiaridade com circuitos como este. Isso pode ser confuso no início, mas com o tempo torna-se fácil.

O que é V_{out}? Bem, a corrente (a mesma em todos os pontos, considerando que não há "carga" na saída, ou seja, nada conectado na saída) é

$$I = \frac{V_{in}}{R_1 + R_2}.$$

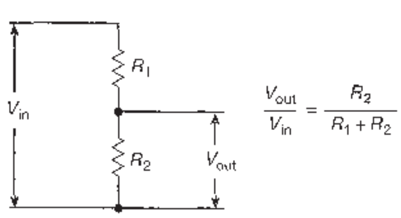

FIGURA 1.6 Divisor de tensão. Uma tensão V_{in} aplicada resulta numa tensão de saída (menor) V_{out}.

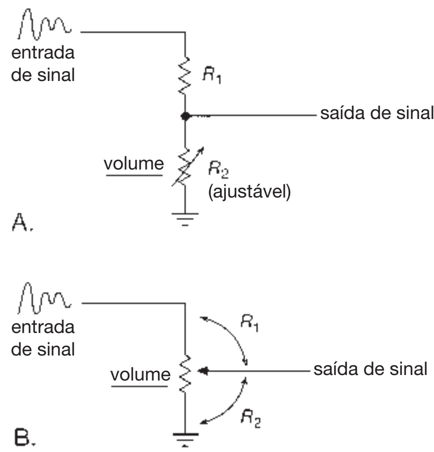

FIGURA 1.7 Um divisor de tensão ajustável pode ser feito a partir de um resistor fixo e um variável, ou a partir de um potenciômetro. Em alguns circuitos atuais, porém, você encontrará uma cadeia longa em série de resistências de mesmo valor, com um arranjo de chaves eletrônicas que lhe permite escolher qualquer uma das junções como a saída; isso soa muito mais complicado, mas tem a vantagem de possibilitar ajustar a relação de tensão eletricamente (em vez de mecanicamente).

(Usamos a definição da lei da resistência e da conexão em série.) Então, para R_2,

$$V_{out} = IR_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{in}. \tag{1.6}$$

Note que a tensão de saída é sempre inferior (ou igual) à tensão de entrada; é por isso que ele é denominado divisor. Você poderia obter amplificação (saída maior do que a entrada) se uma das resistências fosse negativa. Isso não é tão estranho quanto parece; é possível fazer dispositivos com resistências "incrementais" negativas (por exemplo, o componente conhecido como um *diodo túnel*) ou mesmo verdadeiras resistências negativas (por exemplo, o conversor de impedância negativa, sobre o qual falaremos na Seção 6.2.4B). No entanto, essas aplicações são bastante especializadas, e você não precisa se preocupar com elas agora.

Divisores de tensão são, muitas vezes, utilizados em circuitos para gerar uma tensão específica a partir de uma tensão fixa (ou variável) maior. Por exemplo, se V_{in} for uma tensão variável e R_2 for um resistor ajustável (Figura 1.7A), você terá um "controle de volume"; de forma mais simples, a combinação R_1R_2 pode ser feita a partir de um único resistor variável, ou potenciômetro (Figura 1.7B). Esta e outras aplicações semelhantes são comuns, e potenciômetros existem em uma variedade de estilos, alguns dos quais são mostrados na Figura 1.8.

O divisor de tensão simples é ainda mais útil como uma forma de *imaginar* um circuito: a tensão de entrada e resistência superior pode representar a saída de um amplificador, por exemplo, e a resistência inferior pode representar a

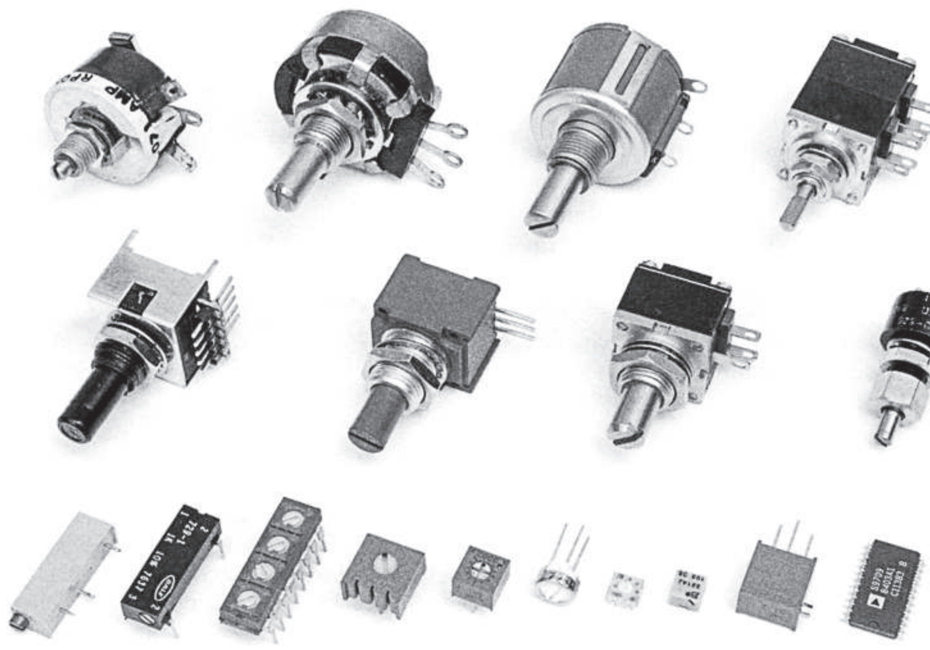

FIGURA 1.8 A maioria dos tipos de potenciômetros comuns é mostrada aqui. Linha superior, da esquerda para a direita (montagem em painel): fio enrolado de potência, “tipo AB” composição de carbono de 2 W, híbrido fio enrolado/plástico de 10 voltas, potenciômetro duplo. Linha média (montagem em painel): Encoder óptico (rotação contínua, 128 ciclos por volta), cermet (liga de cerâmica e metal) de uma volta, carbono de uma volta, ajuste por parafuso com trava de uma volta. Primeira fila (trimpots para montagem em placa): multivoltas com ajuste lateral (dois estilos), quádruplo de uma volta, quadrado de uma volta de 3/8” (9,5 mm), quadrado de uma volta de 1/4” (6,4 mm), redondo de uma volta de 1/4” (6,4 mm), quadrado de 4 milímetros para montagem em superfície, quadrado multivoltas de 4 milímetros para montagem em superfície, quadrado multivoltas de 3/8” (9,5 mm), potenciômetro quadrado não volátil de 256 degraus integrado (E^2POT) em CI de perfil baixo (SO) de 24 pinos.

entrada do estágio seguinte. Neste caso, a equação do divisor de tensão lhe diz quanto de sinal entra no último estágio. Isso ficará mais claro depois que você aprender sobre um fato notável (o teorema de Thévenin), que será discutido mais adiante. Primeiro, porém, abordaremos fontes de tensão e fontes de corrente.

1.2.4 Fontes de Tensão e Fontes de Corrente

Uma *fonte de tensão* perfeita é uma “caixa preta” de dois terminais que mantém uma tensão fixa em seus terminais, independentemente da resistência de carga. Isso significa, por exemplo, que ela deve fornecer uma corrente $I = V/R$ quando uma resistência R for conectada aos seus terminais. Uma fonte de tensão real pode fornecer apenas uma corrente máxima finita e, além disso, em geral, comporta-se como uma fonte de tensão perfeita com uma pequena resistência em série. Obviamente, quanto menor for essa resistência em série, melhor. Por exemplo, uma bateria alcalina de 9 volts padrão se comporta aproximadamente como uma fonte de tensão de 9 volts perfeita em série com um resistor de 3 Ω e pode proporcionar uma corrente máxima (quando em curto) de 3 ampères (que, no entanto, destruirá a bateria em poucos minutos). Uma fonte de tensão “gosta” de uma carga de circuito aberto e “odeia” uma carga em curto-circuito, por razões óbvias. (O significado de “circuito aberto” e “curto-circuito”, algumas vezes, confunde o iniciante: um circuito aberto é caracterizado pela ausência de conexão, ao passo que um curto-circuito é um pedaço de fio que faz uma ponte na saída.) Os símbolos utilizados para indicar uma fonte de tensão são mostrados na Figura 1.9.

Uma *fonte de corrente* perfeita é uma caixa preta de dois terminais que mantém uma corrente constante através do circuito externo, independentemente da resistência de carga ou tensão aplicada. Para isso, ela deve ser capaz de fornecer qualquer tensão necessária entre os seus terminais. Fontes de corrente comuns (um assunto pouco abordado na maioria dos livros) têm um limite para a tensão

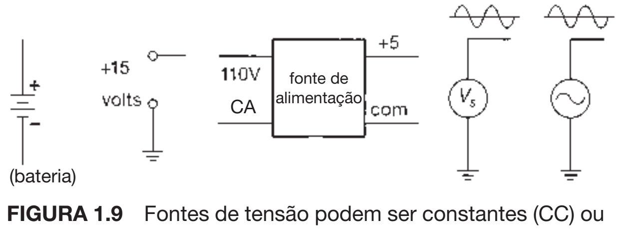

FIGURA 1.9 Fontes de tensão podem ser constantes (CC) ou variáveis (CA).

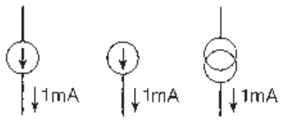

FIGURA 1.10 Símbolos de fontes de corrente.

que podem fornecer (denominado compliance da tensão de saída, ou apenas compliance) e, além disso, não fornecem a corrente de saída absolutamente constante. Uma fonte de corrente “gosta” de uma carga em curto-circuito e “odeia” uma carga de circuito aberto. Os símbolos utilizados para indicar uma fonte de corrente são mostrados na Figura 1.10.

Uma bateria é uma aproximação real para uma fonte de tensão (não há um análogo para uma fonte de corrente). Uma pilha padrão tamanho D de lanterna, por exemplo, tem uma tensão terminal de 1,5 V, uma resistência em série equivalente de cerca de 0,25 Ω e uma capacidade total de energia de cerca de 10.000 watts-segundos (as suas características se deterioram gradualmente com o uso; ao final da sua vida útil, a tensão pode ser de cerca de 1,0 V, com uma resistência interna em série de alguns ohms). É fácil construir fontes de tensão com características muito melhores, como você aprenderá quando estudarmos realimentação; esse é um dos principais tópicos do Capítulo 9. À exceção da importante classe de dispositivos destinados a portabilidade, o uso de baterias em dispositivos eletrônicos é raro.

1.2.5 Circuito Equivalente de Thévenin

O teorema de Thévenin afirma[12] que qualquer rede de dois terminais de resistores e fontes de tensão é equivalente a uma única resistência *R* em série com uma única fonte de tensão *V*. Isso é notável. Qualquer emaranhado de baterias e resistores pode ser mimetizado com uma bateria e um resistor (Figura 1.11). (Aliás, há outro teorema, o teorema de Norton, que diz que você pode fazer a mesma coisa com uma fonte de corrente em paralelo com um resistor.)

Como você pode descobrir o R_{Th} e o V_{Th} do equivalente de Thévenin para um determinado circuito? Fácil! V_{Th} é a tensão de circuito aberto do circuito equivalente de Thévenin; por isso, se os dois circuitos se comportam de forma idêntica, também deve ser a tensão de circuito aberto do circuito dado (que você obtém por cálculo, se você sabe o que o circuito é, ou por medição, caso não saiba). Então, você determina R_{Th} observando que a corrente de curto-circuito do circuito equivalente é V_{Th}/R_{Th}. Em outras palavras,

$$\begin{aligned} V_{\text{Th}} &= V \text{ (circuito aberto)} \\ R_{\text{Th}} &= \frac{V \text{ (circuito aberto)}}{I \text{ (curto-circuito)}}. \end{aligned} \tag{1.7}$$

[12] Fornecemos uma demonstração, para aqueles que estão interessados, no Apêndice D.

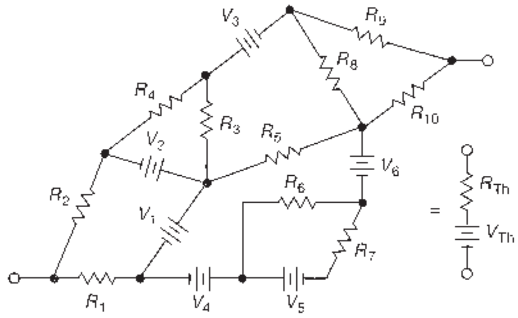

FIGURA 1.11 O circuito equivalente de Thévenin.

Apliquemos esse método para o divisor de tensão, que deve ter um equivalente de Thévenin:

1. A tensão de circuito aberto é

$$V = V_{\text{in}} \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$

2. A corrente de curto-circuito é

$$V_{\text{in}}/R_1.$$

Assim, o circuito equivalente de Thévenin é uma fonte de tensão,

$$V_{\text{Th}} = V_{\text{in}} \frac{R_2}{R_1 + R_2},$$

em série com um resistor de

$$R_{\text{Th}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

(Não é uma coincidência que este passe a ser a resistência em paralelo de R_1 e R_2. A razão disso ficará clara mais adiante.)

A partir desse exemplo, é fácil ver que um divisor de tensão não é uma bateria muito boa, na medida em que a sua tensão de saída cai significativamente quando a carga é conectada. Como um exemplo, considere o Exercício 1.10. Você já sabe tudo o que precisa para calcular exatamente qual será a queda de saída para uma determinada resistência de carga: use o circuito equivalente de Thévenin, anexe uma carga e calcule a nova saída, observando que o novo circuito é nada além de um divisor de tensão (Figura 1.12).

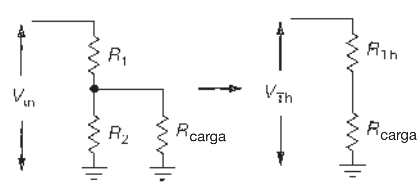

FIGURA 1.12 Equivalente de Thévenin do divisor de tensão.

MULTÍMETROS

Existem diversos instrumentos que permitem medir tensões e correntes em um circuito. O osciloscópio é o mais versátil; ele permite "ver" tensões em função do tempo em um ou mais pontos em um circuito. Pontas de prova lógica e analisadores lógicos são instrumentos especiais para a resolução de problemas de circuitos digitais. Um simples multímetro fornece uma boa maneira de medir tensão, corrente e resistência, muitas vezes com boa precisão; no entanto, ele responde lentamente e, portanto, não pode substituir o osciloscópio quando as tensões de interesse são as variantes. Existem duas variedades de Multímetros: aqueles que indicam as medições em uma escala convencional, com um ponteiro em movimento, e aqueles que usam um mostrador digital.

O tradicional (e agora em grande parte obsoleto) multímetro VOM (volt-ohm-miliamperímetro) usa um galvanômetro que mede a corrente (geralmente 50 μA de fundo de escala). (Procure um livro menos voltado a projetos eletrônicos para ver fotos bonitas da parte interna de um galvanômetro; para os nossos propósitos, basta dizer que ele usa bobinas e ímãs.) Para medir a tensão, o VOM coloca um resistor em série com o galvanômetro. Por exemplo, um tipo de VOM terá um alcance de 1 V (fundo de escala), colocando uma resistência de 20k em série com um galvanômetro de 50 μA; faixas de tensão mais elevados usam resistores correspondentemente maiores. Tal VOM é especificado como 20.000 Ω/V, o que significa que ele se parece com um resistor cujo valor é 20k multiplicado pela tensão de fundo de escala da faixa específica selecionada. Fundo de escala é qualquer faixa de tensão de 1/20.000 A, ou 50 μA. Deve ficar claro que um desses voltímetros produz menor perturbação em um circuito em uma escala maior, uma vez que ele se parece com uma resistência maior (pense no voltímetro como o resistor inferior de um divisor de tensão e a resistência de Thévenin do circuito que você está medindo como o resistor superior). Idealmente, um voltímetro deve ter resistência de entrada infinita.

A maioria dos multímetros atuais usa amplificação eletrônica e tem uma resistência de entrada de 10 MΩ a 1.000 MΩ quando se mede a tensão; eles exibem seus resultados digitalmente e são conhecidos coletivamente como multímetros digitais (DMMs). Uma advertência: às vezes, a resistência de entrada desses medidores é muito elevada nas faixas mais sensíveis, caindo para uma menor resistência para as faixas mais altas. Por exemplo, você pode tipicamente ter uma resistência de entrada de 10^9 Ω nos intervalos de 0,2 V e 2 V, e 10^7 Ω em todas as faixas mais elevadas. Leia as características atentamente! No entanto, para a maioria das medições de circuitos, essas resistências de entrada elevadas produzirão efeitos de carga desprezíveis. Em qualquer caso, é fácil calcular a gravidade do efeito utilizando a equação do divisor de tensão. Tipicamente, os multímetros fornecem faixas de tensão de um volt (ou menos) a um quilovolt (ou mais), de fundo de escala.

Um multímetro geralmente inclui a capacidade de medição de corrente, com um conjunto de faixas selecionáveis. Idealmente, um medidor de corrente deve ter resistência zero[13], a fim de não perturbar o circuito em teste, uma vez que deve ser colocado em série com o circuito. Na prática, você tolera alguns décimos de queda de tensão (algumas vezes, chamado de " tensão de carga") tanto para os multímetros VOM quanto digitais. Para qualquer tipo de medidor, a seleção de uma faixa de corrente coloca um pequeno resistor entre os terminais de entrada do medidor, tipicamente um valor de resistência para criar uma queda de tensão de 0,1 V a 0,25 V para o fundo de escala da corrente escolhida; a queda de tensão é, então, convertida em uma indicação de corrente correspondente.[14] Normalmente, os multímetros fornecem faixas de corrente de 50 μA (ou menos) a 1 A (ou mais), de fundo de escala.

Multímetros também têm uma ou mais baterias para alimentar o sistema de medição de resistência. Pelo fornecimento de uma pequena corrente e a medição da queda de tensão, eles medem a resistência, com várias faixas para cobrir valores de 1 Ω (ou menos) a 10 MΩ (ou mais).

Importante: não tente medir "a corrente de uma fonte de tensão" colocando os terminais do medidor na tomada da parede; o mesmo se aplica para ohms. Essa é uma das principais causas de queima de medidores.

Exercício 1.7 Qual será a indicação de um medidor de 20.000 Ω/V, na escala de 1 V, quando conectado a uma fonte de 1 V com uma resistência interna de 10k? O que ele indicará quando conectado a um divisor de tensão de 10k-10k acionado por uma fonte estável (resistência da fonte igual a zero)?

Exercício 1.8 Um galvanômetro de 50 μA tem uma resistência interna de 5k. Que resistência *shunt* (de derivação) é necessária para convertê-lo em um medidor de 0 a 1 A? Que resistência em série irá convertê-lo em um medidor de 0 a 10 V?

Exercício 1.9 A resistência interna muito elevada de multímetros *digitais*, em suas faixas de medição de tensão, pode ser usada para medir correntes extremamente baixas (embora um DMM não possa oferecer uma gama de correntes baixas explicitamente). Suponha, por exemplo, que você queira medir a pequena corrente que flui através de uma resistência de "fuga" de 1.000 MΩ (o termo é usado para descrever uma pequena corrente que, idealmente, deve ser inteiramente ausente, por exemplo, com o isolamento de um cabo subterrâneo). Você dispõe de um DMM padrão, cuja faixa de 2 V CC tem 10 MΩ de resistência interna, e de uma fonte CC de +10 V. Como você pode usar o que tem para medir com precisão a resistência de fuga?

[13] Este é o oposto de um medidor de tensão ideal, o qual deve apresentar resistência infinita entre os seus terminais de entrada.

[14] Uma classe especial de medidores de corrente conhecida como *medidores eletrônicos* opera com tensões de cargas muito pequenas (como 0,1 mV), utilizando a técnica de realimentação, algo que aprenderemos nos Capítulos 2 e 4.

Exercício 1.10 Para o circuito mostrado na Figura 1.12, com $V_{in} = 30$ V e $R_1 = R_2 = 10$k, determine (a) a tensão de saída sem carga conectada (a tensão de circuito aberto); (b) a tensão de saída com uma carga de 10k (tratar como um divisor de tensão, com R_2 e R_{carga} combinados em um único resistor); (c) o circuito equivalente de Thévenin; (d) o mesmo que em (b), mas utilizando o circuito equivalente de Thévenin [novamente, você acabará com um divisor de tensão; a resposta deve concordar com o resultado em (b)]; (e) a potência dissipada em cada uma das resistências.

A. Resistência de Fonte Equivalente e Efeito de Carga em Circuito

Como acabamos de ver, um divisor de tensão alimentado a partir de alguma tensão fixa é equivalente a uma fonte de tensão menor em série com uma resistência. Por exemplo, os terminais de saída de um divisor de tensão de 10k-10k acionado por uma bateria de 30 volts perfeita são precisamente equivalentes a uma bateria de 15 volts perfeita em série com uma resistência de 5k (Figura 1.13). Colocar uma resistência de carga faz a saída do divisor de tensão cair, devido à *resistência de fonte* finita (resistência equivalente de Thévenin da saída do divisor de tensão, visto como uma fonte de tensão). Isso é, muitas vezes, indesejável. Uma solução para o problema de fazer uma fonte de tensão estável ("estável" é utilizado, neste contexto, para descrever qualquer coisa que não se altere sob carga) pode ser a utilização de resistências muito menores em um divisor de tensão. Ocasionalmente, essa abordagem de "força bruta" é útil. No entanto, geralmente é melhor construir uma fonte de tensão ou fonte de alimentação, como é normalmente denominada, usando componentes ativos, como transistores ou amplificadores operacionais, que trataremos nos Capítulos 2 a 4. Desta forma, você pode facilmente fazer uma fonte de tensão com resistência interna (equivalente de Thévenin) muito pequena, como miliohms (milésimos de ohm), sem as grandes correntes e dissipação de potência características de um divisor de tensão de baixa resistência que fornece o mesmo desempenho. Além disso, com uma fonte de alimentação ativa, é fácil tornar a tensão de saída ajustável. Esses temas são tratados extensivamente no Capítulo 9.

O conceito de resistência interna equivalente é aplicável a todos os tipos de fontes, não apenas a baterias e divisores de tensão. Fontes de sinal (por exemplo, osciladores, amplificadores e dispositivos de detecção) têm uma resistência interna equivalente. Colocar uma carga cuja resistência seja menor ou mesmo comparável à resistência interna reduzirá consideravelmente a saída. Essa redução indesejável da tensão de circuito aberto (ou de sinal) pela carga é denominada "efeito de carga." Portanto, você deve se esforçar para fazer $R_{carga} >> R_{interna}$, porque uma carga de alta resistência tem pouco efeito atenuante sobre a fonte (Figura 1.14).[15] Veremos diversos exemplos de circuitos nos próximos capítulos. Essa condição de alta resistência idealmente caracteriza instrumentos de medição, como voltímetros e osciloscópios.

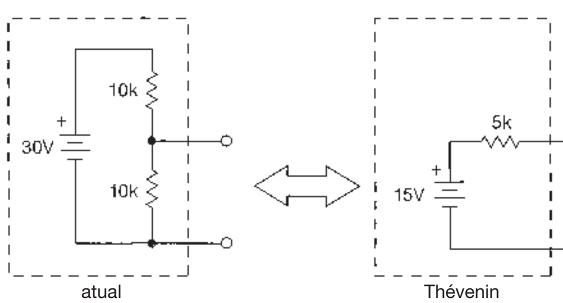

FIGURA 1.13 Exemplo de divisor de tensão.

Uma advertência sobre a linguagem usada: você costuma ouvir coisas como "a resistência olhando para o divisor de tensão" ou "a saída vê uma carga de tantos ohms", como se os circuitos tivessem olhos. A terminologia é realmente essa (na verdade, é uma boa maneira para indicar de qual resistência você está falando) para dizer qual parte do circuito está realizando a ação de "olhar".[16]

B. Transferência de Potência

Eis um problema interessante: qual resistência de carga resultará em máxima potência sendo transferida para a carga em uma determinada resistência de fonte? (Os termos *resistência de fonte*, *resistência interna*, e *resistência equivalente de Thévenin* significam a mesma coisa.) É fácil ver que tanto $R_{carga} = 0$ quanto $R_{carga} = \infty$ resultam em potência transferida igual

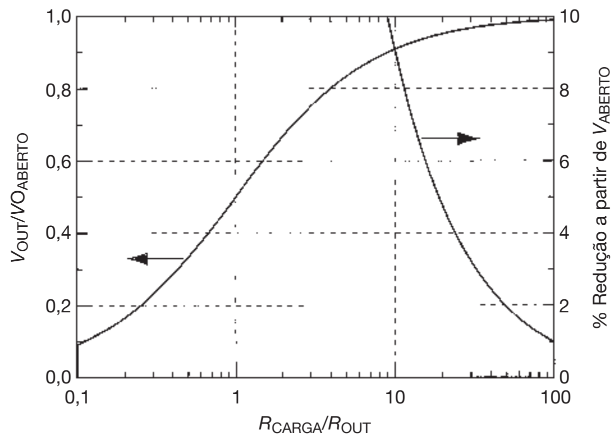

FIGURA 1.14 Para minimizar a atenuação de uma fonte de sinal abaixo da sua tensão de circuito aberto, mantenha a resistência de carga grande em comparação com a resistência de saída.

[15] Há duas exceções importantes a esse princípio geral: (1) uma fonte de corrente tem uma alta resistência interna (idealmente infinita) e deve acionar uma carga de resistência relativamente baixa; (2) quando se tratar de frequências de rádio e linhas de transmissão, você deve "casar as impedâncias " (ou seja, fazer $R_{carga} = R_{interna}$), a fim de evitar a reflexão e a perda de potência. Consulte o Apêndice H sobre linhas de transmissão.

[16] O desejo de antropomorfizar é forte na engenharia e na comunidade científica, apesar de advertências como "não antropomorfize computadores... eles não gostam disso."

a zero, porque $R_{carga} = 0$ significa que $V_{carga} = 0$ e $I_{carga} = V_{fonte}/R_{fonte}$, de modo que $P_{carga} = V_{carga}I_{carga} = 0$. Mas $R_{carga} = \infty$ significa que $V_{carga} = V_{fonte}$ e $I_{carga} = 0$, de modo que, novamente, $P_{carga} = 0$. Tem de haver um máximo no meio.

Exercício 1.11 Mostre que $R_{carga} = R_{fonte}$ maximiza a potência da carga para uma determinada resistência de fonte. Nota: ignore este exercício se você não sabe o cálculo e, por enquanto, apenas acredite que essa premissa é verdadeira.

Para que esse exemplo não deixe uma impressão errada, gostaríamos de enfatizar novamente que os circuitos são, normalmente, projetados de modo que a resistência da carga seja muito maior do que a resistência da fonte do sinal que aciona a carga.

1.2.6 Resistência de Pequenos Sinais

Muitas vezes, lidamos com dispositivos eletrônicos para os quais I não é proporcional a V; em tais casos, não há muito sentido em falar sobre resistência, uma vez que a relação V/I dependerá de V em vez de ser uma constante, independentemente de V. Para esses dispositivos, às vezes, é útil saber a inclinação da curva V–I – em outras palavras, a razão de uma pequena variação na tensão aplicada pela variação resultante na corrente através do dispositivo, ΔV (ou ΔV). Essa grandeza tem a unidade de resistência (ohms) e substitui a resistência em muitos cálculos. Ela é chamada de resistência de pequeno sinal, resistência incremental ou resistência dinâmica.

A. Diodos Zener

Como um exemplo, considere o *diodo zener*, que tem a curva $I-V$ mostrada na Figura 1.15. Zeners são usados para criar uma tensão constante dentro de um circuito em algum ponto, simplesmente proporcionando uma corrente (mais ou menos constante) derivada a partir de uma tensão mais elevada no interior do circuito.[17] Por exemplo, o diodo zener na Figura 1.15 converte uma corrente aplicada na faixa indicada para uma faixa correspondente (mas fracionalmente mais estreita) de tensões. É importante saber quanto a tensão zener resultante variará com corrente aplicada; essa é uma medida de sua "regulação" contra variações na corrente fornecida a ele. Incluída nas especificações de um zener está a sua resistência dinâmica, dada para uma certa corrente. Por exemplo, um zener pode ter uma resistência dinâmica de 10 Ω em 10 mA, para uma tensão zener especificada de 5 V. Utilizando a definição de resistência dinâmica, descobrimos que uma variação de 10% na corrente aplicada, por conseguinte, resultará em uma variação de tensão de

$$\Delta V = R_{\text{din}}\Delta I = 10 \times 0{,}1 \times 0{,}01 = 10 \text{ mV}$$

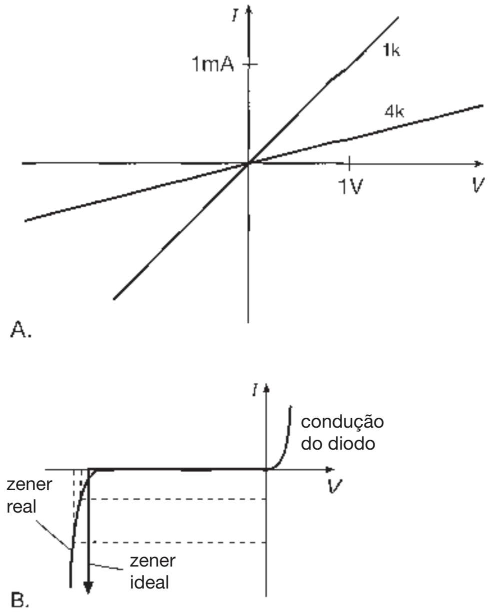

FIGURA 1.15 Curvas I–V: A. resistor (linear). B. Diodo zener (não linear).

ou

$$\Delta V/V = 0{,}002 = 0{,}2\%,$$

demonstrando uma boa capacidade de regulação de tensão. Nesse tipo de aplicação, você frequentemente obtém a corrente zener através de uma resistência de tensão mais elevada disponível em algum ponto do circuito, como mostra a Figura 1.16.

Então,

$$I = \frac{V_{\text{in}} - V_{\text{out}}}{R}$$

e

$$\Delta I = \frac{\Delta V_{\text{in}} - \Delta V_{\text{out}}}{R},$$

assim,

$$\Delta V_{\text{out}} = R_{\text{din}}\Delta I = \frac{R_{\text{din}}}{R}(\Delta V_{\text{in}} - \Delta V_{\text{out}})$$

e, por fim,

$$\Delta V_{\text{out}} = \frac{R_{\text{din}}}{R + R_{\text{din}}}\Delta V_{\text{in}}.$$

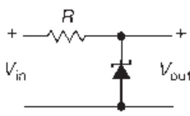

FIGURA 1.16 Regulador zener.

[17] Os diodos zener pertencem à classe mais geral de *diodos* e *retificadores*, dispositivos importantes que estudaremos mais adiante neste capítulo (Seção 1.6) e durante todo o restante do livro. O diodo ideal (ou retificador) atua como um condutor perfeito para o fluxo de corrente em um sentido e como um isolante perfeito para o fluxo de corrente no sentido inverso; é uma "válvula unidirecional" para corrente.

Aha! A equação do divisor de tensão outra vez! Assim, para *variações* na tensão, o circuito se comporta como um divisor de tensão, com o zener substituído por uma resistência igual à sua resistência dinâmica na corrente de operação. Essa é a utilidade da resistência incremental. Por exemplo, suponhamos que, no circuito anterior, tenhamos uma tensão de entrada que varia entre 15 e 20 V e que usemos um 1N4733 (diodo zener de 5,1 V, 1W), a fim de gerar uma fonte de alimentação estável de 5,1 V. Escolhemos R = 300 Ω, para uma corrente zener máxima de 50 mA: (20V − 5,1 V)/300 Ω. Agora podemos estimar a regulação de tensão de saída (variação de tensão de saída), sabendo que este zener tem uma resistência dinâmica máxima especificada de 7,0 Ω em 50 mA. A corrente zener varia de 50 mA a 33 mA ao longo da faixa de tensão de entrada; uma variação de 17 mA na corrente produz, então, uma variação de tensão de saída de $\Delta V = R_{din}\Delta I$, ou 0,12 V.

É um fato útil, quando se lida com diodos zener, que a resistência dinâmica de um diodo zener varie, aproximadamente, de forma proporcionalmente inversa à corrente. Vale a pena saber também que existem CIs projetados para substituir diodos zener; essas "referências de tensão de dois terminais" têm desempenho superior − resistência dinâmica muito menor (menos de 1 Ω, mesmo com correntes muito pequenas, como 0,1 mA; isso é mil vezes melhor do que o zener que acabamos de utilizar) e excelente estabilidade de temperatura (melhor que 0,01%/C). Veremos mais sobre zeners e referências de tensão nas Seções 2.2.4 e 9.10.

Na vida real, um zener proporcionará uma melhor regulação se acionado por uma fonte de corrente, que tem, por definição, $R_{inc} = \infty$ (a mesma corrente, independentemente da tensão). No entanto, fontes de corrente são mais complexas e, portanto, na prática, muitas vezes, recorremos ao resistor simples. Ao pensar sobre zeners, vale a pena lembrar que as unidades de baixa tensão (por exemplo, 3,3 V) comportam-se bastante mal em termos de constância de tensão *versus* corrente (Figura 1.17); se você acha que precisa de um zener de baixa tensão, utilize, então, uma referência de dois terminais (Seção 9.10).

1.2.7 Um Exemplo: "Está Muito Quente!"

Algumas pessoas gostam de aumentar bastante a temperatura do termostato, irritando outras pessoas que preferem um ambiente mais fresco. Eis um pequeno aparelho (Figura 1.18) que permite às pessoas deste último grupo saber quando se queixar – ele acende um diodo emissor de luz (LED) vermelho quando o ambiente da sala está a uma temperatura superior a 30°C (86°F). Ele também mostra como usar o divisor de tensão simples (e até mesmo a mais humilde lei de Ohm) e como lidar com um LED, que se comporta como um diodo zener (e, às vezes, é usado como tal).

O símbolo triangular é um *comparador*, um dispositivo prático (discutido na Seção 12.3) que alterna a sua saída de acordo com as tensões relativas em seus dois terminais de entrada. O dispositivo sensor de temperatura é R_4, que diminui a resistência em cerca de 4%/°C e que vale 10 kΩ a 25°C. Então, nós o colocamos como resistência inferior do divisor de tensão (R_3R_4), cuja saída é comparada com o divisor R_1R_2, não influenciado pela temperatura. Quando a temperatura é superior a 30°C, o ponto "X" está em uma tensão menor do que o ponto "Y", por isso o comparador puxa sua saída para o terra.

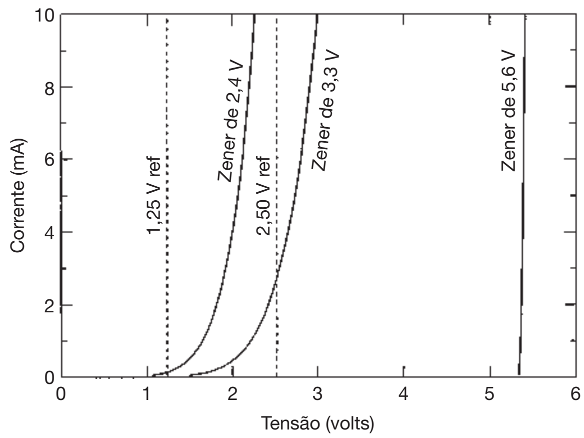

FIGURA 1.17 Zeners de baixas tensões são bastante decepcionantes, como pode ser visto nestas curvas de *I versus V* medidas (para três membros da série 1N5221-67), sobretudo em contraste com o excelente desempenho medido de um par de "CIs de referência de tensão" (LM385Z-1.2, LM385Z-2.5 e LM385Z-2.5, ver Seção 9.10 e Tabela 9.7). No entanto, diodos zener com valores próximos de 6 V (como o 1N5232B de 5,6 V ou o 1N5234B de 6,2 V) exibem curvas admiravelmente íngremes e são dispositivos úteis.

Na saída, existe um LED, que se comporta eletricamente como um diodo zener de 1,6 V, e quando a corrente está fluindo, ele acende. Seu terminal inferior está, então, em 5 V − 1,6 V, ou 3,4 V. Então, adicionamos um resistor em série, dimensionado para permitir 5 mA quando a saída do comparador está no terra: R_5 = 3,4 V/5 mA, ou 680 Ω.

Se você quisesse, poderia fazer o ponto operação ajustável, substituindo R_2 por um potenciômetro de 5k em série com um resistor fixo de 5k. Veremos mais tarde que também é uma boa ideia adicionar um pouco de *histerese*, para incentivar o comparador a ser decisivo. Note que esse circuito é insensível à tensão de alimentação exata, pois compara *razões*. Técnicas de medidas de relação são boas; nós as estudaremos novamente mais tarde.

1.3 SINAIS

Em uma seção mais adiante neste capítulo, lidaremos com capacitores, dispositivos cujas propriedades dependem da forma como as tensões e correntes em um circuito *variam*. Nossa análise de circuitos CC até agora (lei de Ohm, circuitos equivalentes de Thévenin, etc.) ainda se mantém, mesmo que as tensões e correntes variem com o tempo. Porém, para

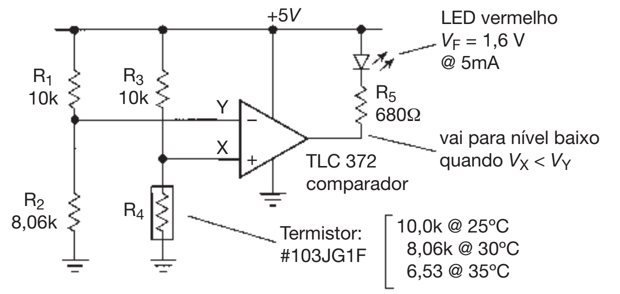

FIGURA 1.18 O LED acende quando está mais quente do que 30 °C. O comparador (que veremos mais adiante, nos Capítulos 4 e 12) puxa a sua saída para o terra quando a tensão em "X" é menor do que a tensão em "Y". R4 é um termistor, uma resistência com um coeficiente de temperatura deliberadamente negativo; ou seja, a sua resistência diminui com o aumento da temperatura – cerca de 4%/ºC.

uma compreensão adequada de circuitos de corrente alternada (CA), é útil ter em mente certo tipos comuns de *sinais*, tensões que variam no tempo de forma especial.

1.3.1 Sinais Senoidais

Sinais senoidais são os sinais mais populares; são eles os que obtemos da tomada de parede. Se alguém diz algo como "obtenha um sinal de 10 μV em 1 MHz", quer dizer uma onda senoidal. Matematicamente, o que você tem é uma tensão descrita por

$$V = A \text{ sen } 2\pi f t \qquad (1.10)$$

onde A é denominado amplitude e f é a frequência em hertz (ciclos por segundo). A onda senoidal se parece com a onda mostrada na Figura 1.19. Às vezes, é importante conhecer o valor do sinal em algum momento arbitrário $t = 0$, caso em que você poderá ver uma fase ϕ na expressão:

$$V = A \text{ sen } (2\pm\pi f t + \phi)$$

A outra variação deste tema simples é a utilização de *frequência angular*, que é como a expressão a seguir:

$$V = A \text{ sen } \omega t$$

Aqui, ω é a frequência angular, medida em radianos por segundo. Basta lembrar a importante relação $\omega = 2\pi f$, e você não errará.

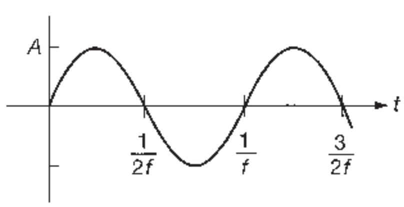

FIGURA 1.19 Senoide de amplitude *A* e frequência *f*.

O grande mérito das senoides (e a causa de sua popularidade perene) é o fato de que elas são as soluções para certas equações diferenciais lineares que descrevem muitos fenômenos na natureza, bem como as propriedades dos circuitos lineares. Um circuito linear tem a propriedade de a sua saída, quando acionada pela soma de dois sinais de entrada, ser igual à soma das suas saídas individuais quando acionadas por cada sinal de entrada; ou seja, se $\mathcal{O}(A)$ representa a saída quando acionada por um sinal A, então um circuito é linear se $\mathcal{O}(A - B) = \mathcal{O}(A) + \mathcal{O}(B)$. Um circuito linear acionado por uma onda senoidal sempre responde com uma onda senoidal, embora, em geral, a fase e a amplitude sejam alteradas. Para nenhum outro sinal periódico pode-se fazer essa afirmação. É uma prática padrão, na verdade, descrever o comportamento de um circuito pela sua *resposta de frequência*, pela qual se entende a forma como o circuito altera a amplitude de uma onda senoidal aplicada como uma função da frequência. Um amplificador de som, por exemplo, deve ser caracterizado por uma resposta de frequência "plana" em toda a faixa de 20 Hz a 20 kHz, pelo menos.

As frequências de onda senoidal com que costumamos lidar estão na faixa de poucos hertz a algumas dezenas de megahertz. As frequências mais baixas, até 0,0001 Hz ou inferior, podem ser geradas, se necessário, com o uso de circuitos construídos cuidadosamente. Frequências mais altas, até, digamos, 2.000 MHz (2 GHz) e acima, podem ser geradas, mas elas exigem técnicas especiais de linha de transmissão. Acima disso, você está lidando com micro-ondas, para as quais circuitos convencionais com fio com elementos de circuito concentrados tornam-se impraticáveis, e, dessa forma, guias de onda exóticos ou "*striplines*" são usados.

1.3.2 Amplitudes de Sinal e Decibéis

Em adição à sua amplitude, existem diversas outras maneiras de caracterizar o módulo de uma onda senoidal ou qualquer outro sinal. Às vezes, você o vê especificado pela amplitude de pico a pico (amplitude PP), que é nada mais do que o dobro da amplitude. O outro método é dar a *amplitude da raiz do valor médio quadrático* (amplitude RMS), que é $V_{RMS} = (1/\sqrt{2})A = 0{,}707A$ (isto é somente para ondas senoidais; a razão entre os valores PP e RMS é diferente para outras formas de onda). Por mais estranho que possa parecer, esse é o método habitual, porque a tensão RMS é a que é usada para calcular a potência. A tensão nominal entre os terminais de uma tomada de parede (nos Estados Unidos) é de 115 volts RMS, 60 Hz. A *amplitude* é de 163 volts (325 volts PP).[18]

[18] Ocasionalmente, você encontrará dispositivos (por exemplo, medidores com movimento mecânico de ponteiro) que respondem à amplitude *média* de um sinal CA. Para uma onda senoidal, a relação é $V_{méd} = V_{RMS}/1{,}11$. No entanto, tais medidores são geralmente calibrados de modo a indicar a amplitude RMS de uma onda senoidal. Para outros sinais, a indicação é uma medida errada; não se esqueça de usar um medidor "*True* RMS" ("RMS verdadeiro") se você quer a resposta certa.

A. Decibéis

Como você compara as amplitudes relativas de dois sinais? Pode-se dizer, por exemplo, que o sinal X é duas vezes maior que o sinal Y. Isso está correto, e útil para muitas finalidades. No entanto, como lidamos, muitas vezes, com proporções muito grandes, como um milhão, é melhor usar uma medida logarítmica, e para isso apresentamos o decibel (um décimo do tamanho de algo chamado bel, que ninguém nunca usa). Por definição, a razão entre dois sinais, em decibéis (dB), é

$$\mathrm{dB} = 10\log_{10}\frac{P_2}{P_1}, \tag{1.11}$$

em que P_1 e P_2 representam a *potência* dos dois sinais. No entanto, frequentemente lidamos com *amplitudes* de sinal, que, neste caso, podemos expressar a relação de dois sinais com a mesma forma de onda como

$$\mathrm{dB} = 20\log_{10}\frac{A_2}{A_1}, \tag{1.12}$$

em que A_1 e A_2 são as duas amplitudes de sinal. Assim, por exemplo, um sinal com o dobro da amplitude do outro é 6 dB em relação a ele, uma vez que $\log_{10} 2 = 0{,}3010$. Um sinal 10 vezes maior que o outro é +20 dB; um sinal igual a um décimo do outro é −20dB.

Embora decibéis sejam, normalmente, usados para especificar a relação de dois sinais, eles são, por vezes, utilizados como uma medida da amplitude absoluta. O que acontece é que você está assumindo um nível de sinal de referência e expressando qualquer outro nível em decibéis relativamente a ele. Existem vários níveis padrão (que não são declarados, mas subentendidos) que são utilizados dessa forma; as referências mais comuns são: (a) 0 dBV (1 V RMS); (b) 0 dBm (a tensão que corresponde a 1 mW em alguma impedância de carga considerada, que para as radiofrequências é normalmente 50 Ω, mas para áudio é, muitas vezes, 600 Ω; as amplitudes que correspondem a 0 dBm, quando carregadas por essas impedâncias, são, então, 0,22 V RMS e 0,78 V RMS); e (c) a pequena tensão de ruído gerada por um resistor à temperatura ambiente (este fato surpreendente é discutido na Seção 8.1.1). Além dessas, existem amplitudes de referência utilizadas para medições em outros campos da engenharia e da ciência. Por exemplo, em acústica, 0 dB SPL (nível de pressão sonora) é uma onda cuja pressão eficaz é de 20 μPa (que é 2×10^{-10} atm); em comunicações de áudio, os níveis podem ser indicados em dBrnC (referência de ruído relativa ponderada em frequência pela "curva C"). Ao expressar amplitudes dessa forma, o melhor é ser específico sobre a amplitude de referência de 0 dB; diga algo como "uma amplitude de 27 decibéis em relação a 1 V RMS", ou abrevie "27 dB relativo a 1 V RMS", ou, ainda, defina um termo como "dBV".[19]

[19] É claro que, a esta altura dos seus estudos, pode parecer estranho usar essa representação em dB e suas variantes. À medida que avançar nos estudos, você se deparará com situações envolvendo, por exemplo, ganhos e atenuações de sinais, em que verá a praticidade dessa representação.

Exercício 1.12 Determine as relações de tensão e potência para um par de sinais com as seguintes relações em decibéis: (a) 3 dB, (b) 6 dB, (c) 10 dB, (d) 20 dB.

Exercício 1.13 Podemos chamar este exercício divertido de "Ilha Deserta de dBs": na tabela a seguir, começamos a introduzir alguns valores para as relações de potência correspondentes à primeira dúzia completa de dBs, utilizando os resultados para as partes (a) e (c) do último exercício. Seu trabalho é completar a tabela sem recorrer a uma calculadora. Uma dica possivelmente útil: a partir de 10 dB, percorra a tabela de cima para baixo em degraus de 3 dB; em seguida, suba a tabela em um degrau de 10 dB e, então, desça novamente. Por fim, livre-se de números desagradáveis, como 3,125 (e seus parentes próximos), desnecessariamente próximo de π.

dB	relação (P/P_0)
0	1
1	
2	
3	2
4	
5	
6	4
7	
8	
9	8
10	10
11	

1.3.3 Outros Sinais

A. Rampa

A rampa é um sinal que se parece com o mostrado na Figura 1.20A. É simplesmente uma tensão ascendente (ou descendente) a uma taxa constante. Isso não pode continuar para sempre, é claro, mesmo em filmes de ficção científica. Por vezes, é aproximada por uma rampa finita (Figura 1.20B) ou por uma rampa periódica (conhecida como *dente de serra*, Figura 1.20C).

B. Triangular

A onda triangular é uma prima próxima da rampa; ela é simplesmente uma rampa simétrica (Figura 1.21).

C. Ruído

Os sinais de interesse são, muitas vezes, misturados com o ruído; essa é uma frase abrangente que normalmente se aplica ao ruído aleatório de origem térmica. Tensões de ruído podem ser especificadas pelo seu espectro de frequências (potência por hertz) ou pela sua distribuição de amplitude. Um dos tipos mais comuns de ruído é o ruído *Gaussiano branco*

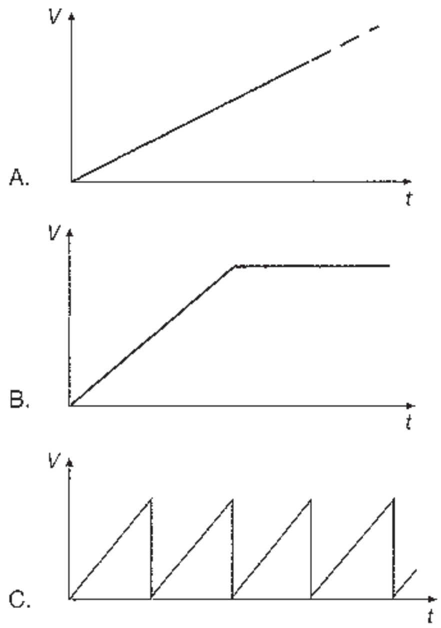

FIGURA 1.20 A: Forma de onda de tensão em rampa. B: Rampa com limite. C: Onda dente de serra.

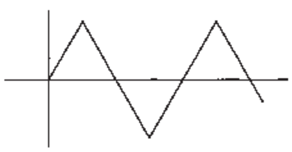

FIGURA 1.21 Onda triangular.

FIGURA 1.22 Ruído.

limitado em banda, que significa um sinal com igual potência por hertz em alguma banda de frequências e que apresenta uma distribuição Gaussiana (em forma de sino) de amplitudes quando muitas medições instantâneas de sua amplitude são feitas. Esse tipo de ruído é gerado por um resistor (ruído Johnson ou ruído de Nyquist), e aflige medições sensíveis de todos os tipos. Em um osciloscópio, ele aparece como mostrado na Figura 1.22. Discutiremos técnicas de ruído e de baixo ruído mais detalhadamente no Capítulo 8.

D. Onda Quadrada

Uma onda quadrada é um sinal que varia com o tempo, como mostrado na Figura 1.23. Como a onda senoidal, ela é carac-

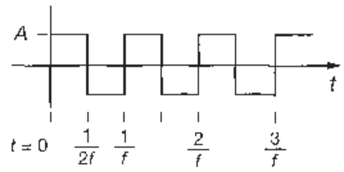

FIGURA 1.23 Onda quadrada.

terizada pela amplitude e frequência (e talvez a fase). Um circuito linear acionado por uma onda quadrada raramente responde com uma onda quadrada. Para uma onda quadrada, a amplitude de pico e a amplitude RMS são iguais.

As bordas de uma onda quadrada não são perfeitamente quadradas; em circuitos eletrônicos típicos, o *tempo de subida* t_r varia de alguns nanossegundos para alguns microssegundos. A Figura 1.24 mostra o tipo de situação geralmente vista. O tempo de subida é convencionalmente definido como o tempo necessário para o sinal ir de 10% a 90% de sua transição total.

E. Pulsos

Um pulso é um sinal como as formas mostradas na Figura 1.25. Eles são definidos pela largura de pulso e amplitude. Você pode gerar um trem de pulsos periódicos (igualmente espaçados), caso em que você pode falar sobre a frequência, ou a taxa de repetição de pulso e o "ciclo de trabalho", a razão entre a largura de pulso e o período de repetição (o ciclo de trabalho varia de zero a 100%). Pulsos podem ter polaridade positiva ou negativa; além disso, eles podem ser "de curso positivo" ou "de curso negativo." Por exemplo, o segundo pulso na Figura 1.25 é um pulso de curso negativo de polaridade positiva.

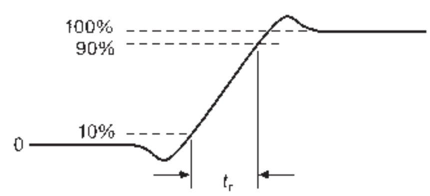

FIGURA 1.24 Tempo de subida de uma forma de onda em degrau.

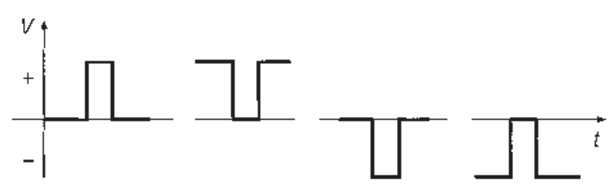

FIGURA 1.25 Pulsos de curso positivo e negativo de ambas as polaridades.

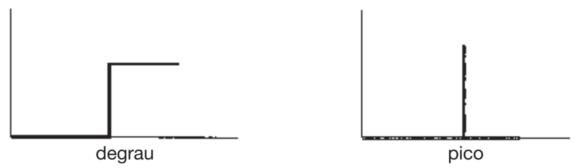

FIGURA 1.26 Degraus e picos.

F. Degraus e Picos

Degraus e picos (*spikes*) são sinais dos quais se fala muito, mas não são tão frequentemente utilizados. Eles fornecem uma boa maneira de descrever o que acontece em um circuito. Se você pudesse desenhá-los, eles seriam algo parecido com os exemplos na Figura 1.26. A função degrau é parte de uma onda quadrada; o pico é simplesmente um salto de duração extremamente curta.

1.3.4 Níveis Lógicos

Os pulsos e as ondas quadradas são utilizados extensivamente em eletrônica digital, em que os níveis de tensão predefinidos representam um de dois estados possíveis presentes em qualquer ponto no circuito. Esses estados são chamados simplesmente de ALTO e BAIXO e correspondem aos estados 1 (verdadeiro) e 0 (falso) da lógica booleana (a álgebra que descreve esses sistemas de dois estados).

Tensões precisas não são necessárias em eletrônica digital. Você precisa apenas distinguir qual dos dois estados possíveis está presente. Portanto, cada família lógica digital especifica os estados ALTO e BAIXO válidos. Por exemplo, a família lógica digital "74LVC" opera a partir de uma fonte simples de +3,3 V, com os níveis de saída que são tipicamente 0 V (BAIXO) e 3,3 V (ALTO), e um limiar de decisão de entrada de 1,5 V. No entanto, as saídas reais podem ser até 0,4 V acima do terra ou abaixo de +3,3 V sem defeito no componente. Teremos muito mais a dizer sobre níveis lógicos nos Capítulos 10 a 12.

1.3.5 Fontes de Sinal

Muitas vezes, a fonte de um sinal é alguma parte do circuito em que você está trabalhando. Porém, para fins de teste, uma fonte de sinal flexível é inestimável. Elas vêm em três versões: geradores de sinais, geradores de pulso e geradores de funções.

A. Geradores de Sinais

Geradores de sinal são osciladores de onda senoidal geralmente equipados para dar uma larga gama de frequência de cobertura, com provisão para um controle preciso da amplitude (usando uma rede de divisores resistivos denominada *atenuador*). Algumas unidades permitem *modular* (ou seja, variar no tempo) a amplitude de saída ("AM" para "amplitude modulada") ou a frequência ("FM" para "frequência modulada"). Uma variação desse tema é o *gerador de varredura*, um gerador de sinal que pode varrer sua frequência de saída repetidamente ao longo de um intervalo. Ele é útil para circuitos de teste cujas propriedades variam com a frequência de uma forma particular, por exemplo, "Circuitos sintonizados" ou filtros. Atualmente, esses dispositivos, assim como a maioria dos instrumentos de teste, estão disponíveis em configurações que permitem que você programe a frequência, amplitude, etc., a partir de um computador ou outro instrumento digital.

Para muitos geradores de sinal, a fonte de sinal é um *sintetizador de frequência*, um dispositivo que gera ondas senoidais cujas frequências podem ser definidas com precisão. A frequência é definida digitalmente, muitas vezes, para oito algarismos significativos ou mais e é internamente sintetizada a partir de um padrão preciso (um oscilador autônomo de cristal de quartzo ou padrão de frequência de rubídio, ou um oscilador derivado de GPS) por métodos digitais que discutiremos mais adiante (Seção 13.13.6). Típico entre sintetizadores é o SG384 programável da *Stanford Research Systems*, com um intervalo de 1 μHz a 4 GHz de frequência, uma variação de amplitude de −110 dBm a +16,5 dBm (0,7 μV a 1,5 V, RMS) e vários modos de modulação tais como AM, FM e ΦM; ele custa cerca de 4.600 dólares. Você pode sintetizar um gerador de varredura e pode obter sintetizadores que produzem outras formas de onda (ver Geradores de Funções, a seguir). Se a sua necessidade é gerar frequência sem uma precisão absurda, nada melhor que um sintetizador.

B. Geradores de Pulso

Geradores de pulsos produzem apenas pulsos, mas são pulsos excelentes! Largura de pulso, taxa de repetição, amplitude, polaridade, tempo de subida, etc., tudo pode ser ajustável. Os mais rápidos alcançam taxas de pulso de gigahertz. Além disso, muitas unidades permitem a geração de pares de pulsos, com espaçamento e taxa de repetição ajustáveis, ou até mesmo padrões programáveis (às vezes, são denominados geradores de padrão). A maioria dos geradores de pulsos contemporâneos está equipada com saídas de nível lógico para fácil conexão com circuitos digitais. Tal como acontece com os geradores de sinais, existe uma versão programável deles.

C. Geradores de Funções

Em muitos aspectos, os geradores de funções são as fontes de sinal mais flexíveis de todas. Pode-se produzir ondas senoidais, triangulares e quadradas ao longo de um intervalo de frequência enorme (0,01 Hz a 30 MHz é típico), com controle de amplitude e deslocamento (*offset*) CC (uma tensão CC constante adicionada ao sinal). Muitos deles têm provisão para a varredura de frequência, algumas vezes, de vários modos (variações de frequência linear ou logarítmica em função do tempo). Eles estão disponíveis com saídas de pulso (embora não com a flexibilidade que você obtém com um gerador de pulsos), e alguns deles têm provisão para modulação.

Geradores de funções tradicionais utilizam circuitos analógicos, mas os modelos atuais são geralmente geradores de funções digitais sintetizados, que exibem toda a flexibilidade de um gerador de funções, juntamente com a estabilidade e a precisão de um sintetizador de frequência. Além disso, eles permitem que você programe uma forma de onda "arbitrária", especificando a amplitude em um conjunto de pontos igualmente espaçados. Um exemplo é o Tektronix AFG3102, com um limite inferior de frequência de 1 *micro*hertz, que pode gerar ondas senoidais e quadradas de até 100 MHz, pulsos e "ruído" de até 50 MHz e formas de onda arbitrárias (até 128k pontos) de até 50 MHz. Ele tem modulações (cinco tipos), varreduras (linear e logarítmica) e modos rajada (1 a 10^6 ciclos), e tudo é programável, incluindo a frequência, largura de pulso e tempos de subida, modulação e amplitude (20 mV para $10V_{PP}$); ainda, inclui algumas formas de onda bizarras embutidas, tais como sen(x)/x, subida e descida exponenciais, Gaussiana e Lorentziana. Ele tem duas saídas independentes e custa cerca de 5 mil dólares. Para uso geral, se você pode ter apenas uma fonte de sinal, o gerador de funções é o melhor para você.

1.4 CAPACITORES E CIRCUITOS CA

Uma vez que entramos no mundo das tensões e correntes variáveis, ou "sinais", deparamo-nos com dois elementos de circuito muito interessantes que são inúteis em circuitos puramente CC: capacitores e indutores. Como você verá, estes dispositivos simples, combinados com resistências, completam a tríade de elementos de circuito lineares passivos que formam a base de quase todos os circuitos.[20] Os capacitores, em especial, são essenciais em quase todas as aplicações de circuito. Eles são usados para geração de forma de onda, filtragem e aplicações de bloqueio e desvio. Também são usados em integradores e diferenciadores. Em combinação com indutores, eles tornam possíveis filtros pontiagudos (de banda estreita) para separar os sinais desejados dos de fundo. Você verá algumas dessas aplicações à medida que prosseguirmos neste capítulo, e haverá diversos exemplos interessantes em capítulos posteriores.

Prosseguiremos, então, no estudo dos detalhes dos capacitores. Parte da abordagem que segue é necessariamente

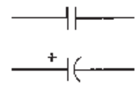

FIGURA 1.27 Capacitores. O eletrodo em curva indica o terminal negativo de um capacitor polarizado, ou a "folha exterior" de um capacitor de filme enrolado.

de natureza matemática; o leitor com menos conhecimento de matemática pode recorrer a uma útil revisão de matemática no Apêndice A. Em todo caso, uma compreensão dos detalhes é menos importante em longo prazo do que a compreensão dos resultados.

1.4.1 Capacitores

Um capacitor (Figura 1.27) (o nome antigo era *capacitor*) é um dispositivo que tem dois terminais que saem dele e tem a propriedade

$$Q = CV. \qquad (1.13)$$

Em sua forma básica, é um par de placas de metal estreitamente espaçadas, separadas por um material isolante, como o "capacitor axial de filme" enrolado da Figura 1.28. Um capacitor de C farads com V volts entre os seus terminais tem Q coulombs de carga armazenada em uma placa e $-Q$ na outra. A capacitância é proporcional à área e inversamente proporcional ao espaçamento. Para o simples capacitor de placas paralelas, com separação d e área da placa A (e com o espaçamento d muito menor do que as dimensões das placas), a capacitância C é dada por

$$C = 8{,}85 \times 10^{-14}\, \varepsilon A/d\ F \qquad (1.14)$$

em que ε é a constante dielétrica do isolante, e as dimensões são medidas em centímetros. Ele tem uma área relativamente grande e um espaçamento bem pequeno, para se obter as capacitâncias comumente usadas em circuitos.[21] Por exemplo, um par de placas de 1 cm^2 separadas por 1 mm é um capacitor de pouco menos do que 10^{-12} F (um picofarad); você precisaria de 100 mil deles só para obter o capacitor de 0,1 μF da Figura 1.28 (que não é nada especial; rotineiramente usamos capacitores com muitos microfarads de capacitância). Normalmente, você não precisa calcular capacitâncias, pois compra um capacitor como um componente eletrônico.

Para uma primeira aproximação, os capacitores são dispositivos que podem ser considerados simplesmente resistores dependentes da frequência. Eles permitem, por exemplo,

[20] Os leitores da revista científica *Nature* (Londres) foram recebidos, em 2008, com um artigo intitulado "*The missing memristor found*" (D. B. Strukov et aI., **453**, 80, 2008), que diz ter encontrado o "quarto elemento fundamental [circuito passivo], que não existia até então. Nós somos céticos. Ainda que a controvérsia esteja finalmente resolvida, deve-se perceber que o memristor é um elemento *não* linear; há apenas três elementos de circuito passivos de dois terminais *lineares*.

[21] E não faz mal ter uma alta constante dielétrica também: o ar tem $\varepsilon = 1$, mas os filmes de plástico têm $\varepsilon = 2{,}1$ (polipropileno) ou 3,1 (poliéster). E certas cerâmicas são populares entre os fabricantes de capacitores: $\varepsilon = 45$ (tipo "C0G") ou 3.000 (tipo "X7R"). Observação: o "ε" aqui mencionado é a permissividade elétrica relativa do material.

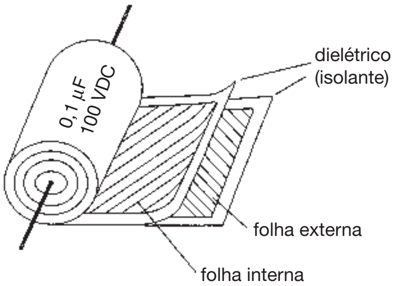

FIGURA 1.28 Você obtém uma grande área enrolando um par de filmes de plástico metalizados. E é muito divertido desenrolar um desses capacitores Mylar de terminais axiais (idem para as antigas bolas de golfe, com a sua longa banda de borracha).

que você faça divisores de tensão dependentes de frequência. Para algumas aplicações (desvio, acoplamento), isso é quase tudo o que você precisa saber, mas, para outras (filtragem, armazenamento de energia, circuitos ressonantes), é necessária uma compreensão mais profunda. Por exemplo, os capacitores ideais não podem dissipar energia, mesmo que a corrente possa fluir através deles, porque a tensão e a corrente estão 90° defasadas.

Antes de entrar em detalhes sobre capacitores nas páginas a seguir (incluindo alguma matemática necessária para descrever o seu comportamento no tempo e na frequência), queremos enfatizar as duas primeiras aplicações – desvio e acoplamento –, pois essas aplicações de capacitores são as mais comuns e são fáceis de entender no nível mais simples. Nós as veremos em detalhe mais adiante (Seções 1.7.1C e 1.7.16A), mas não há necessidade de esperar – é fácil e intuitivo. Como um capacitor se parece com um circuito aberto em CC, ele permite que você acople um sinal que varia enquanto bloqueia o seu nível médio CC. Esse é um capacitor de *bloqueio* (também denominado capacitor de *acoplamento*), como na Figura 1.93. Da mesma forma, devido ao capacitor se parecer com um curto-circuito em altas frequências, ele suprime ("desvia") sinais de onde você não os quer, por exemplo, sobre as tensões CC que alimentam seus circuitos, como na Figura 8.80A (em que capacitores suprimem sinais nas tensões de alimentação CC de +5 V e −5 V e também no terminal da base do transistor Q_2).[22] Demograficamente, essas duas aplicações representam a grande maioria dos capacitores usados nos circuitos pelo mundo.

Tomando a derivada da Equação 1.13, a da definição, você obtém

$$I = C\frac{dV}{dt}. \tag{1.15}$$

[22] Ironicamente, estes capacitores de desvio (*bypass*) essenciais estão tão presentes, que geralmente são omitidos de diagramas esquemáticos (uma prática que seguimos neste livro). Não cometa o erro de omiti-los também de seus circuitos reais!

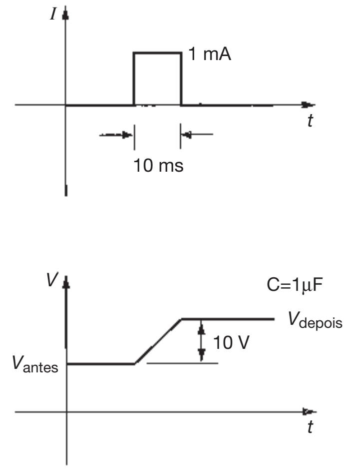

FIGURA 1.29 A tensão sobre um capacitor varia quando uma corrente flui através dele.

Assim, um capacitor é muito mais complicado do que um resistor: a corrente não é simplesmente proporcional à tensão, mas à taxa de variação da tensão. Se você variar a tensão em 1 volt por segundo sobre 1 farad, você estará fornecendo 1 A. Por outro lado, se você fornecer 1 A, a tensão variará 1 volt por segundo. Um farad é uma enorme capacitância, e você geralmente lida com valores de microfarads (μF), nanofarads (nF) ou picofarads (pF).[23] Por exemplo, se você fornecer uma corrente de 1 mA para um capacitor de 1 μF, a tensão subirá 1.000 volts por segundo. Um pulso de 10 ms desse valor de corrente aumentará a tensão sobre o capacitor em 10 volts (Figura 1.29).

Quando você carrega um capacitor, você está fornecendo energia. O capacitor não fica quente; em vez disso, ele armazena a energia em seus campos elétricos internos. Não é difícil descobrir que a quantidade de energia armazenada em um capacitor carregado é exatamente

$$U_C = \frac{1}{2}CV^2, \tag{1.16}$$

em que U_C está em joules para C em farads e V em volts. Esse é um resultado importante; nós o veremos muitas vezes.

Exercício 1.14 Eis o desafio energético: imagine a carga de um capacitor de capacitância C, a partir de 0 V até uma tensão final V_f. Se você fizer isso direito, o resultado não dependerá de como você chegar lá, de modo que você não precisa considerar uma carga com corrente constante (embora você possa fazê-lo). A qualquer instante, a taxa do

[23] As unidades são, muitas vezes, omitidas nos valores de capacitores especificados em diagramas esquemáticos, tornando as coisas confusas para os menos experientes. Você tem que deduzi-las a partir do contexto.

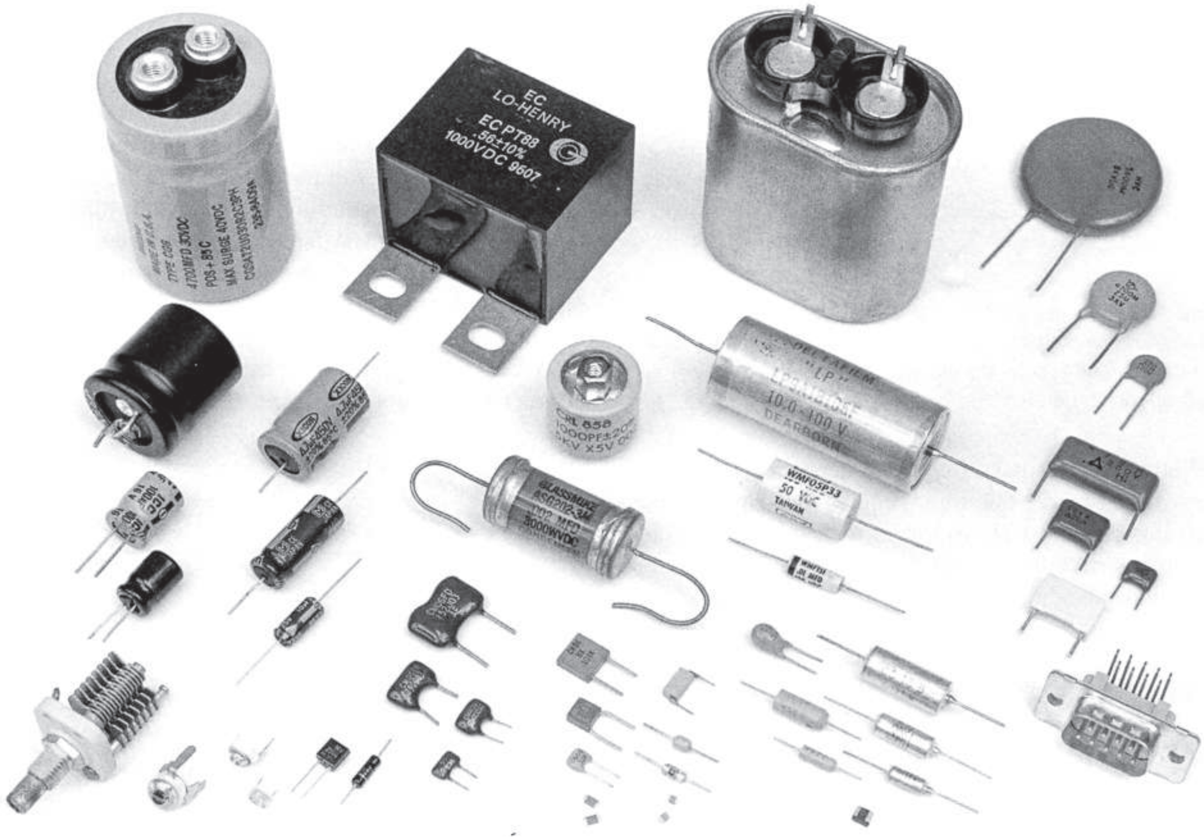

FIGURA 1.30 Capacitores se disfarçam de qualquer coisa que quiserem! Aqui está uma coleção representativa. No canto inferior esquerdo, estão capacitores variáveis de pequeno valor (um de ar e três de cerâmica), com os eletrolíticos de alumínio polarizados de grande valor acima deles (os três do lado esquerdo têm terminais radiais, os três à direita têm terminais axiais e o exemplar com terminais de parafuso na parte superior é, muitas vezes, denominado *eletrolítico de computador*). Em seguida, na linha superior, está um capacitor de filme de baixa indutância (note os terminais cinta larga), em seguida, um capacitor de papel embebido em óleo e, por último, um conjunto de capacitores de cerâmica de disco à direita. Os quatro objetos retangulares abaixo são capacitores de filme (poliéster, policarbonato ou polipropileno). O conector D subminiatura parece ter sido colocado incorretamente, mas ele é um conector *com filtro*, com um capacitor 1.000 pF de cada pino para a carcaça. À sua esquerda, está um grupo de sete capacitores eletrolíticos polarizados de tântalo (cinco com terminais axiais, um com terminais radiais e um para montagem em superfície). Os três capacitores acima deles são capacitores de filme axiais. Os dez capacitores no centro, na parte inferior, são todos do tipo cerâmico (quatro com terminais radiais, dois axiais e quatro de montagem em superfície); acima deles, estão capacitores de alta tensão – um capacitor de vidro axial e um *capacitor de transmissão* de cerâmica com terminais de parafuso. Por fim, abaixo deles e à esquerda, estão quatro capacitores de mica e um par de diodos conhecidos como *varactores*, que são capacitores de capacitância variável com a tensão construídos a partir de um diodo de junção.

fluxo de energia no capacitor é VI (joules/s); então, você precisa integrar $dU = VIdt$ do início ao fim. Dê o devido prosseguimento.

Existem capacitores em uma incrível variedade de formas e tamanhos (a Figura 1.30 mostra exemplos da maioria deles); com o tempo, você reconhecerá os tipos mais comuns. Para as capacitâncias menores, você pode ver exemplos básicos de construção do tipo placas paralelas (ou pistão cilíndrico). Para uma maior capacidade, você precisa de mais área e espaçamento menor; a abordagem de construção usual é colocar um condutor sobre um fino material isolante (o dielétrico), por exemplo, um filme plástico aluminizado enrolado em uma configuração cilíndrica pequena. Outros tipos populares são pastilhas finas cerâmicas (capacitores SMD de cerâmica), folhas de metal com isoladores de óxido (capacitores eletrolíticos) e de mica metalizados. Cada um desses tipos tem propriedades únicas. Em geral, os tipos de cerâmico e de poliéster são usados na maioria das aplicações de circuito não críticas; capacitores com dielétrico de policarbonato, poliestireno, polipropileno, Teflon ou vidro são usados em aplicações críticas; capacitores de tântalo são usados quando é necessária uma maior capacitância; e eletrolíticos de alumínio são usados na filtragem de fontes de alimentação.

A. Capacitores em Paralelo e em Série

A capacitância de vários capacitores em paralelo é a soma de suas capacitâncias individuais. Isso é fácil de ver: coloque a tensão V sobre a combinação em paralelo; em seguida,

$$\begin{aligned} C_{\text{total}}V &= Q_{\text{total}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \cdots \\ &= C_1V + C_2V + C_3V + \cdots \\ &= (C_1 + C_2 + C_3 + \cdots)V \end{aligned}$$

ou

$$C_{\text{total}} = C_1 + C_2 + C_3 + \cdots .$$

Para capacitores em série, a fórmula é como para resistores em paralelo:

$$C_{\text{total}} = \frac{1}{\dfrac{1}{C_1} + \dfrac{1}{C_2} + \dfrac{1}{C_3} + \cdots}$$

ou (dois capacitores apenas)

$$C_{\text{total}} = \frac{C_1C_2}{C_1 + C_2}.$$

Exercício 1.15 Deduza a fórmula para a capacitância de dois capacitores em série. *Dica*: como não há nenhuma conexão externa no ponto onde os dois capacitores são interconectados, eles devem ter cargas armazenadas iguais.

A corrente que flui em um capacitor durante a carga ($I = C\,dv/dt$) tem algumas características incomuns. Ao contrário da corrente resistiva, ela não é proporcional à tensão, mas à taxa de variação (a "derivada temporal" – ao longo do tempo) da tensão. Além disso, ao contrário da situação em um resistor, a potência ($V \times I$) associada com a corrente capacitiva não é transformada em calor, mas é armazenada como energia no campo elétrico interno do capacitor. Você consegue toda essa energia de volta quando descarrega o capacitor. Veremos outra maneira de olhar para essas propriedades curiosas quando falarmos de reatância, começando na Seção 1. 7.

1.4.2 Circuitos *RC*: *V* e *I* em Função do Tempo

Ao lidar com circuitos CA (corrente alternada) (ou, em geral, quaisquer circuitos que tenham variações de tensão e corrente), há duas abordagens possíveis. Você pode falar em V e I em função do tempo, ou pode falar em amplitude em função da frequência do sinal. Ambas as abordagens têm seus méritos, e você pode fazer sua própria escolha alternando entre uma e outra de acordo com a descrição que for mais conveniente em cada situação. Começamos nosso estudo de circuitos CA no *domínio do tempo*. Ao iniciar a Seção 1.7, abordaremos o *domínio da frequência*.

Quais são algumas das características de circuitos com capacitores? Para responder a essa pergunta, começaremos com o circuito *RC* simples (Figura 1.31). Ao aplicarmos as regras de capacitores, temos

$$C\frac{dV}{dt} = I = -\frac{V}{R}. \tag{1.19}$$

Esta é uma equação diferencial, e a sua solução é

$$V = Ae^{-t/RC}. \tag{1.20}$$

Assim, um capacitor carregado colocado sobre um resistor descarregará, como na Figura 1.32. O uso da intuição é adequado neste caso: a corrente que flui (a partir da equação do resistor) é proporcional à tensão remanescente, mas a inclinação da descarga (a partir da equação do capacitor) é proporcional àquela corrente. Assim, a curva de descarga tem que ser uma função cuja derivada seja proporcional ao seu valor, ou seja, uma exponencial.

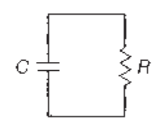

FIGURA 1.31 O circuito *RC* mais simples.

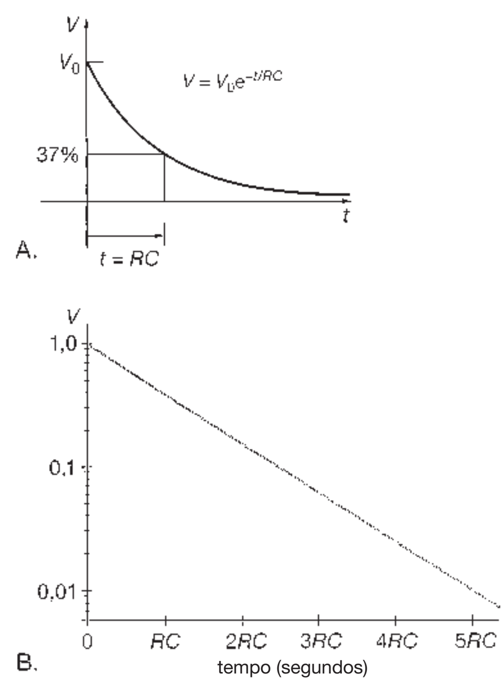

FIGURA 1.32 Forma de onda de descarga *RC*, desenhada com o eixo de tensão (A) linear e (B) logarítmico.

A. Constante de Tempo

O produto RC é denominado *constante de tempo* do circuito. Para R em ohms e C em farads, o produto RC é dado em segundos. Um microfarad sobre 1,0k tem uma constante de tempo de 1 ms; se o capacitor é carregado inicialmente até 1,0 V, a corrente inicial é 1,0 mA.

A Figura 1.33 mostra um circuito um pouco diferente. No tempo $t = 0$, alguém liga a bateria. A equação para o circuito é, então,

$$I = C\frac{dV}{dt} = \frac{V_f - V_{out}}{R},$$

com a solução

$$V_{out} = V_f + Ae^{-t/RC}.$$

(Não se preocupe se você não conseguir acompanhar a matemática. O que estamos fazendo é obtendo alguns resultados importantes, dos quais você deve se lembrar. Mais tarde, utilizaremos os resultados muitas vezes, sem mais a necessidade do uso da matemática para obtê-los. Para os leitores cujo conhecimento da matemática está um pouco "enferrujado", a breve revisão no Apêndice A pode ser útil.) A constante A é determinada pelas condições iniciais (Figura 1.34): $V = 0$ em $t = 0$; por conseguinte, $A = -V_f$ e

$$V_{out} = V_f\,(1 - e^{-t/RC}). \tag{1.21}$$

Mais uma vez, há uma boa possibilidade de intuição: conforme o capacitor carrega, a inclinação (que é proporcional à corrente, pois é um capacitor) é proporcional à tensão *restante* (pois isso é o que aparece sobre o resistor, produzindo a corrente); por isso, temos uma forma de onda cuja inclinação diminui proporcionalmente com a distância vertical ainda a percorrer – uma exponencial.

Você pode trocar os membros da última equação para descobrir o tempo necessário para atingir uma tensão V no caminho para a tensão final V_f. Experimente! (Consulte o Apêndice A se precisar de ajuda com logaritmos.) Você deve obter

$$t = RC \log_e\left(\frac{V_f}{V_f - V}\right)$$

B. Declínio Até o Equilíbrio

Eventualmente (quando $t \gg RC$), V atinge V_f. (Apresentação da "regra prática 5RC": um capacitor carrega ou descarrega dentro de 1% do seu valor final em cinco constantes de tempo.) Se, então, alterarmos a tensão da bateria para algum outro valor (digamos, 0 V), V decairá em direção a esse novo valor com uma exponencial $e^{-t/RC}$. Por exemplo, a substituição da entrada degrau da tensão da bateria de 0 a $+V_f$, por uma entrada de onda quadrada $V_{in}(t)$, deve produzir a saída mostrada na Figura 1.35.

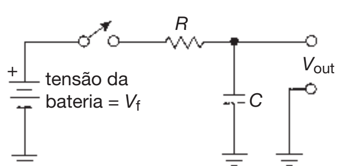

FIGURA 1.33 Circuito de carga *RC*.

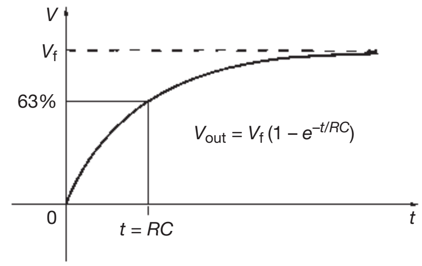

FIGURA 1.34 Forma de onda de carga *RC*.

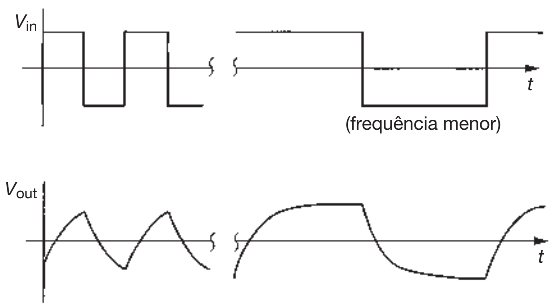

FIGURA 1.35 Formas de onda (inferior) de saída através de um capacitor, quando acionado por ondas quadradas através de um resistor.

Exercício 1.16 Mostre que o tempo de subida (o tempo necessário para passar de 10% a 90% do seu valor final) deste sinal é 2,2RC.

Você pode se fazer a seguinte pergunta: o que acontece se $V(t)$ for uma $V_{in}(t)$ arbitrária (t)? A solução envolve uma equação diferencial não homogênea e pode ser resolvida por métodos convencionais (que, no entanto, estão além do escopo deste livro). Você encontraria

$$V(t) = \frac{1}{RC}\int_{-\infty}^{t} V_{in}(\tau)e^{-(t-\tau)/RC}d\tau.$$

Ou seja, o circuito RC produz a média das entradas antecedentes com um fator de ponderação de

$$e^{-\Delta t/RC}.$$

Na prática, você raramente faz essa pergunta. Em vez disso, você trabalha no *domínio da frequência*, no qual você pergunta quanto de cada componente de frequência presente na entrada é transmitido. Chegaremos a esse importante tó-

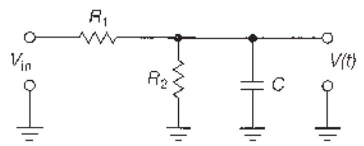

FIGURA 1.36 Parece complicado, mas não é! (O equivalente de Thévenin é a salvação.)

pico em breve (Seção 1.7). Antes disso, no entanto, existem alguns outros circuitos interessantes que podemos analisar simplesmente com esta abordagem no domínio do tempo.

C. Simplificação por Equivalentes de Thévenin

Poderíamos ir em frente e analisar circuitos mais complicados por meio de métodos semelhantes, anotando as equações diferenciais e tentando encontrar soluções. Para a maioria dos fins, simplesmente não vale a pena. Isso é tão complicado como um circuito RC que vamos precisar. Muitos outros circuitos podem ser reduzidos a ele; consideremos, por exemplo, o circuito da Figura 1.36. Apenas usando o equivalente de Thévenin do divisor de tensão formado por R_1 e R_2, você pode encontrar a saída $V(t)$ produzida por uma entrada em degrau V_{in}.

Exercício 1.17 No circuito mostrado na Figura 1.36, $R_1 = R_2 = 10\text{k}$ e $C = 0{,}1\ \mu\text{F}$. Determine $V(t)$ e desenhe-a.

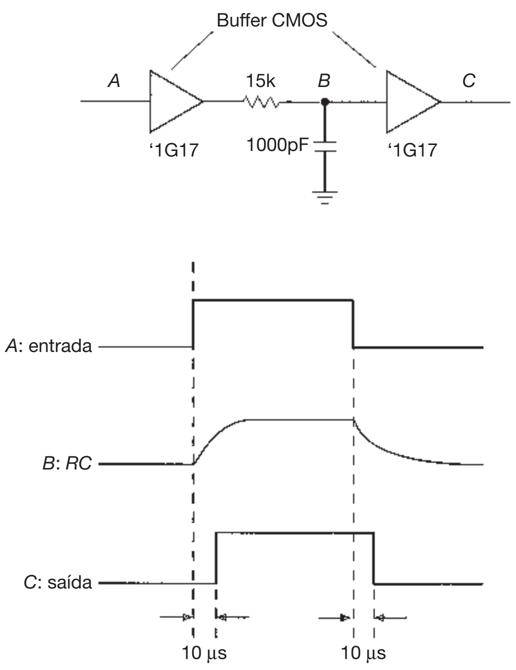

FIGURA 1.37 Produzindo uma forma de onda digital atrasada com a ajuda de um circuito *RC* e um par de *buffers* da família lógica LVC (partes pequenas com um enorme número de identificação [*part number*): SN74LVC1G17DCKR!).

D. Um Exemplo de Circuito: Circuito Temporizador

Faremos um pequeno desvio para provar essas ideias teóricas em um par de circuitos reais. Os livros didáticos geralmente evitam tal pragmatismo, especialmente nos primeiros capítulos, mas acho divertido para fazer uso da eletrônica em aplicações práticas. Precisaremos introduzir alguns componentes "caixa-preta" para começar o trabalho, mas você aprenderá sobre eles em detalhe mais tarde, então não se preocupe.

Já mencionamos níveis lógicos, as tensões em que vivem os circuitos digitais. A Figura 1.37 apresenta uma aplicação de capacitores para produzir um pulso retardado. Os símbolos triangulares são "*buffers* CMOS[24]". Eles produzem uma saída de nível ALTO se a entrada for nível ALTO (mais do que a metade da tensão CC de alimentação usada para os alimentar), e vice-versa. O primeiro *buffer* fornece uma réplica do sinal de entrada, mas com baixa resistência de fonte, para evitar o efeito de carga no sinal de entrada pela malha *RC* (lembre-se da nossa discussão anterior do efeito de carga em circuitos na Seção 1.2.5A). A saída *RC* tem os decaimentos característicos e faz o *buffer* de saída comutar 10 μs após as transições da entrada (uma malha *RC* atinge a saída de 50% depois de um tempo $t = 0{,}7RC$). Em uma aplicação real, teríamos que considerar o efeito do desvio em relação a metade da tensão de alimentação do limiar de entrada do *buffer*, o que alteraria o atraso e também a largura do pulso de saída. Tal circuito é, por vezes, utilizado para atrasar um pulso, de modo que outra coisa possa acontecer antes. No projeto de circuitos, tente não confiar demasiadas vezes em truques como esse, mas eles são ocasionalmente úteis.

E. Outro Circuito Exemplo: "Um Minuto de Acionamento"

A Figura 1.38 mostra outro exemplo do que pode ser feito com simples circuitos de tempo *RC*. O símbolo triangular é um comparador, algo que trataremos em detalhe mais adiante, nos Capítulos 4 e 10; tudo o que você precisa saber por enquanto é que (a) esse componente é um CI (contendo um grupo de resistores e transistores), (b) ele é alimentado a partir de uma tensão CC positiva que você conecta ao pino identificado como "V_+" e (c) ele aciona a sua saída (o fio que sai do triângulo pelo lado direito) para V_+ ou para o terra, dependendo de a entrada marcada com "+" ser mais ou menos positiva do que a entrada marcada com "−", respectivamente. (Essas entradas são denominadas *não inversora* e *inversora*, respectivamente). Ele não consome qualquer corrente de suas entradas, mas, felizmente, aciona cargas que exigem até 20 mA. E um comparador é decisivo: sua saída é nível "ALTO" (em V_+) ou "BAIXO" (terra).

Eis como o circuito funciona: o divisor de tensão R_3R_4 mantém a entrada (−) a 37% da tensão de alimentação – neste caso, cerca de +1,8 V; vamos denominá-la "tensão de referência".

[24] Semicondutor de óxido metálico complementar, a forma dominante de lógica digital, como veremos a partir do Capítulo 10.

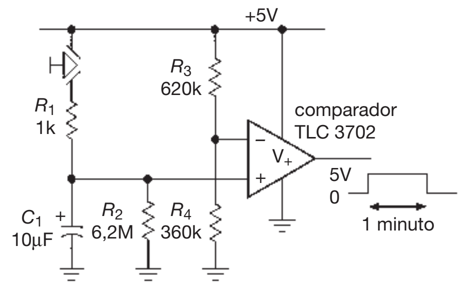

FIGURA 1.38 Circuito de temporização *RC*: um acionamento da chave → um minuto!

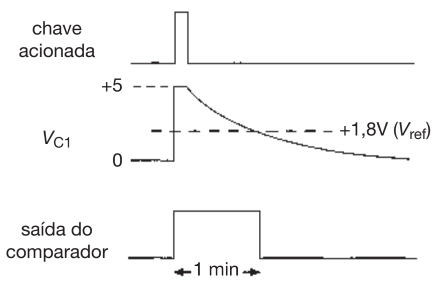

FIGURA 1.39 Produção de uma forma de onda digital temporizada pelo circuito da Figura 1.38. A tensão V_{C1} tem um tempo de subida de $R_1C_1 \approx 10$ ms.

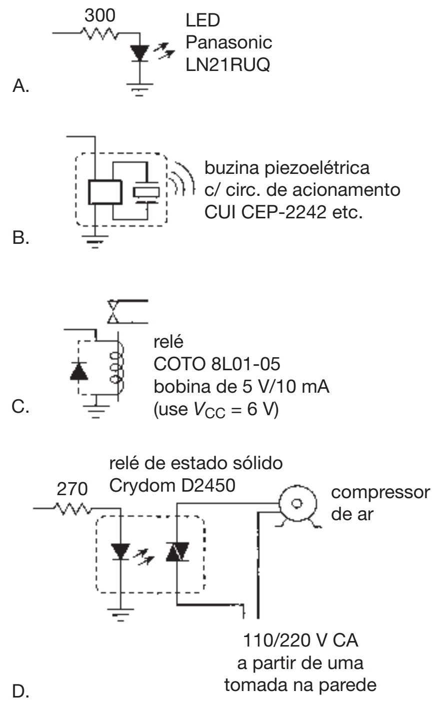

FIGURA 1.40 Exemplos de acionamentos interessantes a partir da saída do circuito temporizador na Figura 1.38.

Portanto, se o circuito está em repouso por algum tempo, C_1 está totalmente descarregado, e a saída do comparador está em nível BAIXO (terra). Quando você pressiona o botão PARTIDA momentaneamente, C_1 carrega rapidamente (constante de tempo de 10 ms) até +5 V, o que leva a saída do comparador para +5 V; ver Figura 1.39. Depois que o botão é liberado, o capacitor descarrega exponencialmente em direção ao terra, com uma constante de tempo de $\tau = R_2C_1$, que definimos para que seja de 1 minuto. Decorrido esse tempo, sua tensão cruza a tensão de referência, de modo que a saída do comparador muda rapidamente de volta para o terra. (Note que escolhemos convenientemente a tensão de referência para ser uma fração $1/e$ de V_+, de modo que leva exatamente uma constante de tempo τ para que isso aconteça. Para R_2, foi utilizado o valor padrão mais próximo de 6 MΩ; consulte o Apêndice C.) A linha inferior mostra que a saída permanece 1 minuto em +5 V depois que o botão é pressionado.

Adicionaremos alguns detalhes em breve, mas primeiro usaremos a saída para fazer algumas coisas interessantes, que são mostradas nas Figuras 1.40A-D. Você pode fazer um chaveiro-lanterna com autodesligamento conectando sua saída em um LED; você precisa colocar um resistor em série para definir a corrente (falaremos muito mais sobre isso depois). Se quiser, você pode conectar a ele uma *buzina piezoelétrica* para apitar continuamente (ou intermitentemente) por um minuto (esse pode ser um sinal de fim de ciclo para uma secadora de roupas). Outra possibilidade é anexar um pequeno *relé* eletromecânico, que é apenas uma chave mecânica operada eletricamente para acionar um par de contatos que pode ativar praticamente qualquer carga que você gostaria de ligar e desligar. O uso de um relé tem a importante propriedade de a carga – o circuito a ser ligado pelo relé – ser eletricamente isolada do +5 V e do terra do próprio circuito de temporização.

Por fim, para ligar e desligar máquinas industriais críticas, você provavelmente usaria um *relé de estado sólido* (SSR, Seção 12.7) robusto, que tem internamente um LED infravermelho acoplado a um dispositivo de comutação CA conhecido como *triac*. Quando ativado, o triac atua como uma chave mecânica excelente, capaz de comutar muitos ampères, e (como o relé eletromecânico) é completamente isolado eletricamente do seu circuito de entrada. O exemplo mostra esse dispositivo conectado a um compressor de ar, de modo que seus amigos receberão um crédito de ar de um minuto para inflar os pneus de suas bicicletas em seu "posto de gasolina caseiro" após inserirem uma moeda de 25 centavos em seu temporizador acionado por moeda. Você poderia fazer algo semelhante com um chuveiro de água quente que funciona com moedas (mas, hein, apenas *um minuto* para o banho?!).

Alguns detalhes: (a) no circuito da Figura 1.38, você poderia omitir R_1, e o circuito ainda funcionaria, mas haveria um grande transitório de corrente quando o capacitor descarregado fosse conectado na fonte de +5 V (lembre-se de que $I = C\,dv/dt$: aqui você estaria tentando produzir 5 V de "dV" em cerca de 0 s de "dt"). Ao adicionar um resistor R_1 em série, você limita a corrente de pico para um modesto 5 mA durante a suficientemente rápida carga do capacitor (> 99% em 5 constantes de tempo RC, ou 0,05 s). (b) A saída do comparador provavelmente ricocheteará um pouco (ver Figura 4.31), conforme a entrada (+) cruza a tensão de referência em seu vagaroso passeio exponencial em direção ao terra, devido a uma pequena porção inevitável de ruído elétrico. Para corrigir esse problema, você costuma ver o circuito organizado de modo que parte da saída é acoplada de volta para a entrada de uma maneira que reforça a comutação (isso é oficialmente denominado *histerese*, ou *realimentação positiva*; estudaremos o assunto nos Capítulos 4 e 10). (c) Em circuitos eletrônicos, é sempre uma boa ideia desviar (*bypass*) a fonte CC conectando um ou mais capacitores entre o "trilho" CC e o terra. O valor da capacitância não é crítico – valores de 0,1 μF a 10 μF são normalmente usados; ver Seção 1.7.16A.

Todos os nossos exemplos simples envolveram ligar e desligar cargas. Porém, existem outros usos para um sinal *lógico* eletrônico, como a saída do comparador, que está em um de dois possíveis estados binários, denominados ALTO e BAIXO (neste caso, +5 V e terra), 1 e 0, ou VERDADEIRO e FALSO. For exemplo, tal sinal pode ativar ou desativar a operação de algum outro circuito. Imagine que a abertura da porta do carro acione a nossa saída de nível ALTO de 1 min, que, em seguida, permite que um teclado numérico aceite um código de segurança para que você possa dar a partida no carro. Depois de um minuto, se você ainda não conseguiu digitar o código mágico, ele desliga, impedindo que um motorista possivelmente embriagado dirija.

1.4.3 Diferenciadores

Você pode fazer um circuito simples que diferencie um sinal de entrada; isto é, $V_{\text{out}} \propto dV_{\text{in}}/dt$. Analisemo-lo em duas etapas.

1. Primeiro, olhe para o circuito (impraticável) na Figura 1.41A: A tensão de entrada $V_{in}(t)$ produz uma corrente que passa pelo capacitor de $I_{\text{cap}} = C\, dV_{\text{in}}/dt$. Isso é justamente o que queremos – se ao menos pudéssemos, de alguma forma, usar a corrente através de C como a nossa "saída"! Mas não podemos.[25]
2. Então, adicionamos um pequeno resistor do lado inferior do capacitor para o terra, para funcionar como um resistor "sensor de corrente" (Figura 1.41B). A boa notícia é que agora temos uma saída proporcional à corrente através do capacitor. A notícia ruim é que o circuito não é mais um diferenciador matematicamente perfeito. Isso porque a tensão sobre C (cuja derivada produz a corrente que estamos detectando com R) não é mais igual a V_{in}; agora é igual à diferença entre V_{in} e V_{out}. Eis como ele funciona: a tensão sobre C é $V_{in} - V_{out}$, de modo que

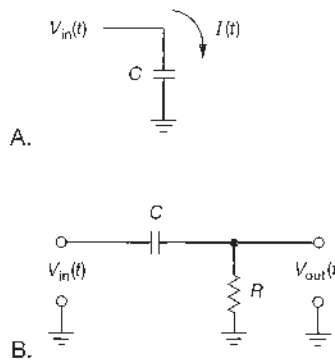

FIGURA 1.41 Diferenciadores. A. Perfeito (exceto por ele não ter terminal de saída). B. Aproximado (mas pelo menos ele tem uma saída!).

$$I = C\frac{d}{dt}(V_{\text{in}} - V_{\text{out}}) = \frac{V_{\text{out}}}{R}.$$

Se escolhermos R e C pequenos o suficiente para que $dV_{\text{out}}/dt \ll dV_{\text{in}}/dt$, então

$$C\frac{dV_{\text{in}}}{dt} \approx \frac{V_{\text{out}}}{R}$$

ou

$$V_{\text{out}}(t) \approx RC\frac{d}{dt}V_{\text{in}}(t).$$

Isto é, temos uma saída proporcional à taxa de variação da forma de onda de entrada.

Para manter $dV_{\text{out}}/dt \ll dV_{\text{in}}/dt$, fazemos o produto RC pequeno, tomando cuidado para não produzir "efeito de carga" na entrada fazendo R muito pequeno (na transição, a variação da tensão sobre o capacitor é zero, portanto R é a carga vista pela entrada). Teremos um critério melhor para isso quando analisarmos o circuito no domínio da frequência (Seção 1.7.10). Se você acionar esse circuito com uma onda quadrada, a saída será como mostrado na Figura 1.42.

Diferenciadores são úteis para detectar *bordas de subida* e *bordas de descida* em sinais de pulso, e, em circuitos digitais, às vezes, vemos coisas como as representadas na

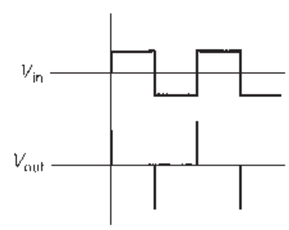

FIGURA 1.42 Forma de onda de saída (superior) a partir do diferenciador acionado por uma onda quadrada.

[25] Sempre existem situações em que parece não haver uma solução. Não desista, pois a solução é construída por nós mesmos. Continue a leitura sobre o diferenciador e você verá que não é tão difícil encontrar uma solução para a questão exposta.

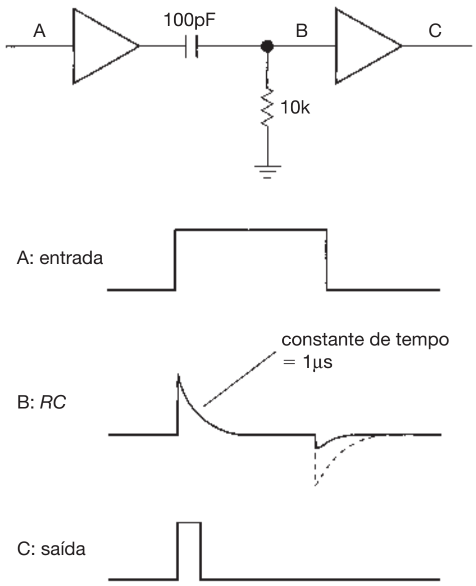

FIGURA 1.43 Detector de borda de subida.

Figura 1.43. O diferenciador *RC* gera picos nas transições do sinal de entrada, e o *buffer* de saída converte os picos em pulsos retangulares curtos. Na prática, o pico negativo será pequeno, por causa de um diodo (um dispositivo útil discutido na Seção 1.6) interno ao *buffer*.

Para trazermos algum realismo neste momento, montamos um diferenciador que configuramos para sinais de alta velocidade e fizemos algumas medições. Para isso, usamos $C = 1$ pF e $R = 50\ \Omega$ (este último é o padrão mundial para circuitos de alta velocidade; consulte o Apêndice H), que acionamos com um degrau de 5 V com taxa de variação configurável (isto é, dV/dt). A Figura 1.44 mostra as formas de onda de entrada e saída para três configurações de $dV\text{in}/dt$. Os circuitos nessas velocidades (note a escala horizontal: 4 *nano*ssegundos por divisão!) frequentemente se afastam do

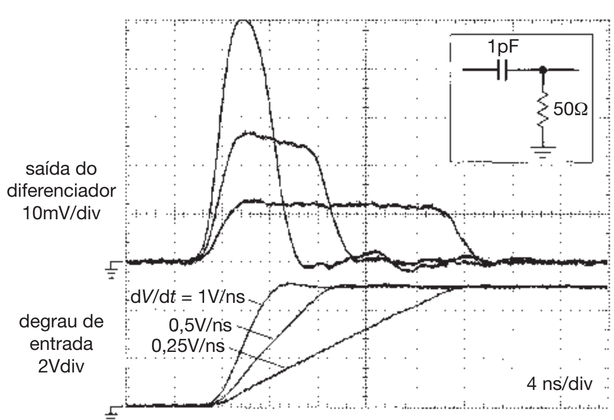

FIGURA 1.44 Três formas de onda em degrau rápidas diferenciadas pela rede *RC* mostrada. Para a forma de onda mais rápida (10^9 volts por segundo!), imperfeições nos componentes e instrumentos de medição causam o desvio do que seria ideal.

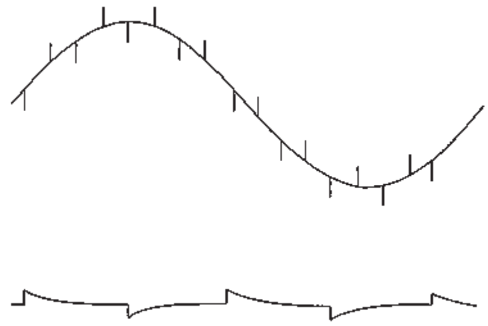

FIGURA 1.45 Dois exemplos de acoplamento capacitivo não intencional.

desempenho ideal, como pode ser visto no tempo de subida mais rápido. Os dois degraus mais lentos mostram um comportamento razoável; ou seja, uma forma de onda de saída plana na parte superior durante a rampa ascendente da entrada; verifique por si mesmo que a amplitude de saída foi corretamente prevista pela fórmula.

A. Acoplamento Capacitivo Não Intencional

Diferenciadores, por vezes, surgem inesperadamente em situações em que não são bem-vindos. Você pode ver sinais como os mostrados na Figura 1.45. O primeiro caso é causado pela onda quadrada em algum ponto no circuito que acopla capacitivamente na linha de sinal que você está observando; isso pode indicar a falta de um resistor de terminação em sua linha de sinal. Se não for isso, você deve reduzir a resistência da fonte da linha de sinal ou encontrar uma maneira de reduzir o acoplamento capacitivo da onda quadrada ofensiva. O segundo caso é típico do que você pode verificar quando olha para uma onda quadrada, mas tem uma conexão partida em algum ponto, geralmente na ponta de prova do osciloscópio. A capacitância muito pequena da conexão partida combinada com a resistência de entrada do osciloscópio forma um diferenciador. Saber que você tem "algum sinal" diferenciado pode ajudá-lo a encontrar o problema e eliminá-lo.

1.4.4 Integradores

Se circuitos *RC* podem levar a derivadas, por que não a integrais? Como anteriormente, analisaremos em duas etapas.

1. Imagine que haja um sinal de entrada que é uma *corrente* que varia em função do tempo, $I_{in}(t)$ (Figura 1.46A).[26] Essa corrente de entrada é precisamente a corrente através do capacitor, de modo que $I_{\text{in}}(t) = CdV(t)/dt$, e, por conseguinte, $V(t) = (1/C)\int I_{\text{in}}(t)\,dt$.

[26] Estamos acostumados a pensar em sinais como as tensões que variam no tempo, mas veremos como podemos converter esses sinais para *correntes* variáveis no tempo proporcionais usando "conversores tensão-corrente" (ou, com o nome mais sofisticado, "amplificadores de transcondutância").

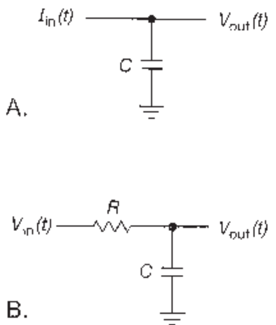

FIGURA 1.46 Integrador. A. Perfeito (mas requer um sinal de entrada de *corrente*). B. Aproximado (ver texto).

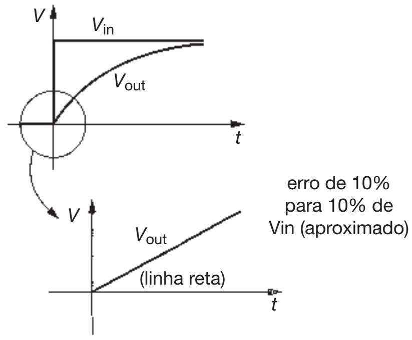

FIGURA 1.47 A aproximação de um integrador é boa quando $V_{out} \ll V_{in}$.

Isso é exatamente o que queríamos! Assim, um simples capacitor, com um lado conectado ao terra, é um integrador, *se* tivermos um sinal de entrada sob a forma de uma corrente de $I_{in}(t)$. Entretanto, na maioria dos casos, não o temos.

2. Então, conectamos um resistor em série com o sinal de *tensão* de entrada mais usual $V_{in}(t)$, para convertê-lo em corrente (Figura 1.46B). A boa notícia é que ele funciona razoavelmente. A notícias ruim é que o circuito não é mais um integrador perfeito. Isso porque a corrente através de C (cuja integral produz a tensão de saída) não é mais proporcional a V_{in}; agora é proporcional à diferença entre V_{in} e V. Eis como isso funciona: a tensão sobre R é $V_{in} - V$, assim,

$$I = C\frac{dV}{dt} = \frac{V_{\text{in}} - V}{R}.$$

Se conseguirmos manter $V \ll V_{\text{in}}$, mantendo o produto RC grande,[27] então

$$C\frac{dV}{dt} \approx \frac{V_{\text{in}}}{R}$$

ou

$$V(t) = \frac{1}{RC}\int^{t} V_{\text{in}}(t)\,dt + \text{constante}$$

Ou seja, temos uma saída proporcional à integral no tempo da forma de onda de entrada. Você pode ver como a aproximação funciona para uma entrada de onda quadrada: $V(t)$ é, então, a curva de carga exponencial que vimos anteriormente (Figura 1.47). A primeira parte da exponencial é uma rampa, a integral de uma constante; à medida que aumentamos a constante de tempo RC, pegamos uma menor parte da exponencial, ou seja, uma melhor aproximação de uma rampa perfeita.

Note que a condição $V \ll V_{in}$ é o mesmo que dizer que I é proporcional a V_{in}, que ocorreu no nosso primeiro circuito integrador. Uma tensão grande sobre uma resistência grande se aproxima de uma fonte de corrente e, de fato, é frequentemente usada como tal.

Logo mais, quando chegarmos ao estudo de amplificadores operacionais e realimentação, seremos capazes de construir integradores sem a restrição $V_{out} << V_{in}$. Eles trabalharão em grandes faixas de tensão e de frequência com erro insignificante.

O integrador é amplamente utilizado em computação analógica. É um subcircuito útil que encontra aplicação em sistemas de controle, realimentação, conversão analógico-digital e geração de forma de onda.

A. Geradores de Rampa

A este ponto, é fácil entender como um gerador de rampa funciona. Este interessante circuito é extremamente útil, por exemplo, em circuitos de temporização, geradores de funções e formas de onda, circuitos de varredura de osciloscópios analógicos e circuitos de conversão analógico-digital. O circuito usa uma corrente constante para carregar um capacitor (Figura 1.48). A partir da equação do capacitor $I = C(dV/dt)$, você obtém $V(t) = (I/C)t$. A forma de onda de saída é como mostrado na Figura 1.49. A rampa para quando a fonte de corrente "esgota a tensão", ou seja, atinge o limite de sua compliance. Na mesma figura, mostra-se a curva para um RC simples, com o resistor conectado a uma fonte de tensão igual à compliance da fonte de corrente, e com R escolhido de forma que a corrente na tensão de saída zero seja a mesma da fonte de corrente. (Fontes de corrente reais geralmente têm compliances de saída limitadas pela tensão de alimentação usada para construí-las, de modo que a comparação é realista.) No próximo capítulo, que trata de transistores, projetaremos algumas fontes de corrente, com alguns refinamentos para prosseguirmos para os capítulos sobre amplificadores operacionais (AOPs) e FETs. Aguardemos ansiosamente!

Exercício 1.18 Uma corrente de 1 mA carrega um capacitor de 1 μF. Quanto tempo a rampa leva para chegar a 10 volts?

[27] Assim como para o diferenciador, teremos outra maneira de enquadrar esse critério na Seção 1.7.10.

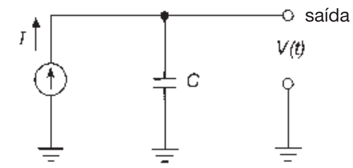

FIGURA 1.48 Uma fonte de corrente constante, ao carregar um capacitor, gera uma forma de onda de tensão em rampa.

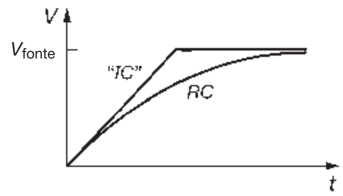

FIGURA 1.49 Carga de um capacitor por uma corrente constante (com compliance finita) *versus* uma carga *RC*.

1.4.5 Não Exatamente Perfeito...

Capacitores reais (o tipo que você pode ver, tocar e comprar) geralmente se comportam de acordo com a teoria; no entanto, eles têm algumas “características” adicionais que podem causar problemas em aplicações exigentes. Por exemplo, todos os capacitores apresentam *alguma resistência em série* (que pode ser uma função da frequência) e *alguma indutância em série* (ver a próxima seção), juntamente com uma resistência em paralelo dependente da frequência. Ainda, há um efeito “memória” (conhecido como *absorção do dielétrico*), o que raramente é discutido na sociedade civilizada: se você carregar um capacitor até alguma tensão V_0 e mantê-la por um tempo e, em seguida, descarregá-lo até 0 V, então, quando você remover o curto em seus terminais, ele tenderá a voltar um pouco em direção a V_0.

Por enquanto, você não precisa se preocupar com essas coisas.

1.5 INDUTORES E TRANSFORMADORES

1.5.1 Indutores

Se você entende os capacitores, não terá grandes problemas com indutores (Figura 1.50). Eles estão intimamente relacionados com capacitores: a taxa de variação da corrente em um indutor é proporcional à tensão aplicada nele (para um capacitor, ocorre o contrário – a taxa de variação de *tensão* é proporcional à *corrente* através dele). A equação de definição para um indutor é

$$V = L\frac{dI}{dt}, \tag{1.23}$$

em que *L* é denominada *indutância* e é medida em henry (ou mH, μH, nH, etc.). Colocar uma tensão constante sobre um indutor faz a corrente subir como uma rampa (compare com um capacitor, em que uma *corrente* constante faz a *tensão* subir como uma rampa); 1 V sobre um indutor de 1 H produz uma corrente que aumenta 1 A por segundo.

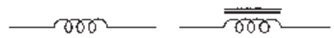

FIGURA 1.50 Indutores. O símbolo com as barras em paralelo representa um núcleo de material magnético.

Assim como com capacitores, a energia investida na elevação da corrente em um indutor é armazenada internamente – neste caso, na forma de campos magnéticos. A fórmula análoga é

$$U_L = \frac{1}{2}LI^2, \tag{1.24}$$

em que U_L está em joules (watts segundos) para *L* em henrys e *I* em ampères. Tal como acontece com capacitores, este é um resultado importante, o qual está no cerne da conversão de energia por chaveamento (exemplificado por essas pequenas caixas pretas conectadas na tomada da parede, que alimentam todos os tipos de aparelhos eletrônicos de consumo). Veremos muito mais sobre isso no Capítulo 9.

O símbolo para um indutor parece uma bobina de fio; isso porque, em sua forma mais simples, é justamente isso que o indutor é. O seu comportamento um tanto peculiar se dá porque indutores são dispositivos magnéticos, em que duas coisas estão acontecendo: um fluxo de corrente através da bobina cria um campo magnético alinhado ao longo do eixo da bobina; e, assim, as variações nesse campo produzem uma tensão (às vezes, denominada “FEM reversa”), de forma a tentar anular essas variações (um efeito conhecido como lei de Lenz). A indutância *L* de uma bobina é simplesmente a relação entre o fluxo magnético que passa através da bobina dividido pela corrente através da bobina que produz esse fluxo (multiplicada por uma constante global). A indutância depende da geometria da bobina (por exemplo, diâmetro e comprimento) e das propriedades do material magnético (“core”) que possa ser usado para confinar o campo magnético. Isso é tudo que você precisa entender sobre o motivo de a indutância de uma bobina de determinada geometria ser proporcional ao quadrado do número de espiras.

Exercício 1.19 Explique por que $L \infty n^2$ para um indutor que consiste de uma bobina de *n* espiras de fio, mantendo o diâmetro e o comprimento fixos enquanto *n* varia.

Vale a pena mostrar uma fórmula semiempírica aproximada para a indutância *L* de uma bobina de diâmetro *d* e comprimento *l*, em que a dependência de n^2 é exposta:

$$L \approx K\frac{d^2n^2}{18d + 40l} \quad \mu\text{H},$$

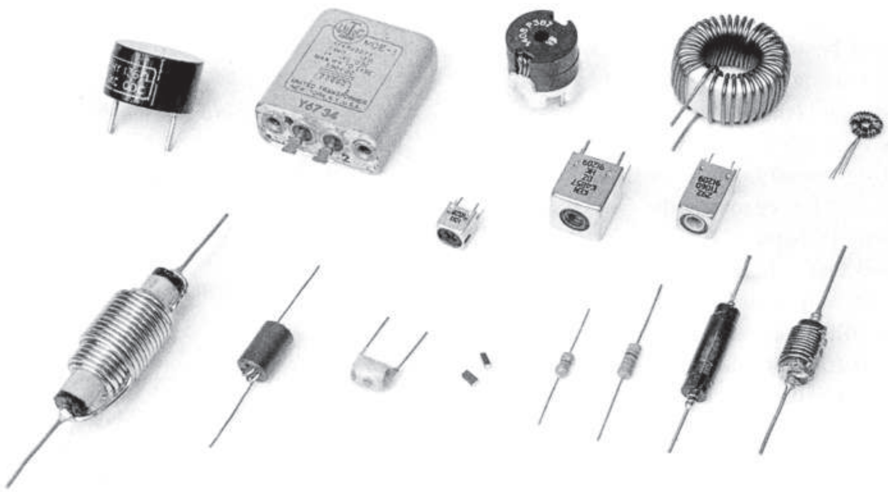

FIGURA 1.51 Indutores. Linha superior, da esquerda para a direita: toroide encapsulado, toroide hermeticamente fechado, núcleo em forma de pote para montagem em placa, toroide sem revestimento (dois tamanhos). Linha do meio: indutores de núcleo de ferrite sintonizado ajustável (três tamanhos). Linha inferior: choque de núcleo de ferrite de alta corrente, choque de ferrite em forma de anel, indutor de núcleo de ferrite revestido com chumbo, choque de ferrite SMD, choque de núcleo de ferrite de terminais axiais moldado (dois tipos), indutores de núcleo de ferrite envernizado (dois tipos).

em que $K = 1{,}0$ ou 0,394 para dimensões em polegadas ou centímetros, respectivamente. Isso é conhecido como fórmula de Wheeler e tem precisão de 1% enquanto $l > 0{,}4d$.

Tal como acontece com a corrente capacitiva, a corrente indutiva não é simplesmente proporcional à tensão (como em um resistor). Além disso, ao contrário da situação em um resistor, a potência associada com a corrente indutiva ($V \times I$) não é transformada em calor, mas é armazenada como energia no campo magnético do indutor (lembre-se de que, para um capacitor, a potência associada com a corrente capacitiva é igualmente não dissipada como calor, mas é armazenada como energia no campo elétrico do capacitor). Você obtém toda essa energia de volta quando interrompe a corrente no indutor (com um capacitor, você obtém toda a energia de volta quando descarregar a tensão até zero).

O indutor básico é uma bobina, que pode ser apenas um anel com uma ou mais espiras de fio, ou pode ser uma bobina com algum comprimento, conhecida como solenoide. Variações incluem bobinas enroladas em vários materiais de núcleo, os mais populares sendo ferro (ligas, lâminas ou pó) e ferrite (um material magnético cinza, não condutor e quebradiço). Esses são todos os truques para multiplicar a indutância de uma bobina dada pela "permeabilidade" do material do núcleo. O núcleo pode ser em forma de uma haste, um toroide (forma de uma rosca) ou mesmo das formas mais bizarras, como um "núcleo em forma de pote" (que tem que ser visto para ser entendido; a melhor descrição que posso dar é a de um molde de uma rosca dividido horizontalmente ao meio, se roscas fossem feitas em moldes). Veja a Figura 1.51, com algumas geometrias típicas.

Indutores encontram uso intenso em circuitos de radiofrequência (RF), servindo como "choques" de RF e como partes de circuitos sintonizados (Seção 1.7.14). Um par de indutores estreitamente acoplados forma um objeto interessante conhecido como transformador. Nós o abordaremos em breve.

Um indutor é, em um sentido real, o oposto de um capacitor.[28] Você verá como ele funciona mais adiante neste capítulo quando lidarmos com um importante assunto denominado *impedância*.

A. Olhando um Pouco Adiante: Magia com os Indutores

Só para dar um gosto de alguns dos truques que você pode fazer com indutores, dê uma olhada na Figura 1.52. Entenderemos muito melhor esses circuitos quando chegarmos a eles, no Capítulo 9, no entanto é possível ver o que está acontecendo com o que já sabemos. Na Figura 1.52A, o lado esquerdo do indutor L é alternadamente comutado entre uma tensão de entrada CC V_{in} e o terra, em uma taxa relativamente rápida, gastando tempos iguais conectado em cada uma dessas tensões (um "ciclo de trabalho de 50%"). Mas a equação de definição $V = L\,dI/dt$ exige que a tensão *média* sobre um indutor seja zero – caso contrário, a intensidade da sua cor-

[28] Na prática, no entanto, os capacitores são muito mais usados em circuitos eletrônicos. Isso porque indutores práticos se distanciam significativamente do desempenho ideal – por terem resistência de enrolamento, perdas do núcleo e autocapacitância –, enquanto capacitores práticos são quase perfeitos. Indutores são indispensáveis, no entanto, em *conversores chaveados*, bem como em circuitos LC sintonizados para aplicações de RF.

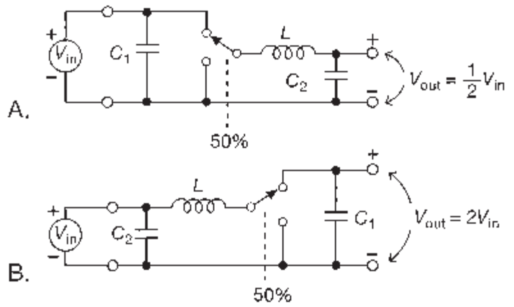

FIGURA 1.52 Indutores permitem que você faça truques, como *aumentar* a tensão de entrada CC.

rente média aumentaria sem limite. (Isso, às vezes, é denominado princípio de *equilíbrio volt-segundo*.) A partir disso, segue-se que a tensão de saída média é metade da tensão de entrada (certifique-se de compreender por que razão). Neste circuito, C_2 funciona como um capacitor de armazenamento para estabilizar a tensão de saída (mais sobre isso logo adiante, no Capítulo 9).

A produção de uma saída que é metade da tensão de entrada não é muito emocionante; afinal de contas, um simples divisor de tensão faz isso. Mas, ao contrário de um divisor de tensão, esse circuito o faz sem gastar energia; desconsiderando o comportamento não ideal dos componentes, ele é 100% eficiente. E, de fato, esse circuito é amplamente utilizado na conversão de energia; ele é denominado "conversor *buck* síncrono."

Mas observe agora a Figura 1.52B, que é apenas uma versão modificada da Figura 1.52A. Desta vez, o equilíbrio volts-segundo exige que a tensão de saída seja duas vezes a tensão de entrada. *Isso* você não pode fazer com um divisor de tensão! Mais uma vez, o capacitor de saída (C_1, neste momento) serve para manter a tensão de saída constante por meio da carga armazenada. Essa configuração é denominada "conversor *boost* síncrono".

Esses e outros conversores chaveados são amplamente discutidos no Capítulo 9, no qual a Tabela 9.5 lista cerca de cinquenta tipos representativos.

1.5.2 Transformadores

Um transformador é um dispositivo constituído por duas bobinas estreitamente acopladas (denominadas primário e secundário). Uma tensão CA aplicada ao primário aparece no secundário, com uma multiplicação de tensão proporcional à relação de espiras do transformador e com uma corrente de multiplicação inversamente proporcional à relação de espiras. A potência é conservada. A Figura 1.53 mostra o símbolo de circuito de um transformador de núcleo laminado (do tipo utilizado para conversão de potência CA de 60 Hz).

Transformadores são bastante eficientes (a potência de saída é quase igual à potência de entrada); assim, um transformador elevador fornece uma tensão maior para uma corrente menor. Adiantando o assunto por um momento, um transformador de relação de espiras n aumenta a impedância em n^2. Há uma corrente muito pequena no primário se o secundário estiver sem carga.

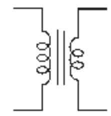

FIGURA 1.53 Transformador.

Transformadores de potência (destinados para uso a partir da rede elétrica de 115 V) servem a duas funções importantes em instrumentos eletrônicos: eles mudam a tensão da rede CA para um valor útil (geralmente menor) que pode ser usado pelo circuito e "isolam" o dispositivo eletrônico a partir de conexão efetiva para a rede elétrica, pois os enrolamentos de um transformador estão eletricamente isolados um do outro. Eles podem ter uma enorme variedade de tensões e correntes secundárias: saídas muito baixas, como 1 volt, ou então até vários milhares de volts, especificações de correntes de alguns miliampères a centenas de ampères. Transformadores típicos para uso em instrumentos eletrônicos podem ter tensões de secundário de 10 a 50 V, com especificações de corrente de 0,1 a 5 ampères ou mais. Uma classe relacionada de transformadores é usada na conversão de potência em eletrônica, na qual flui bastante potência, mas geralmente como formas de onda de pulso ou quadrados, e há frequências muito mais altas (tipicamente de 50 kHz a 1 MHz).

Transformadores para sinais em frequências de áudio e frequências de rádio também estão disponíveis. Às vezes, em frequências de rádio, você utiliza transformadores sintonizados se apenas uma faixa estreita de frequências estiver presente. Há também uma classe interessante de transformadores de linhas de transmissão. Em geral, transformadores para uso em altas frequências devem usar materiais especiais no núcleo ou um tipo de construção que minimize as perdas no núcleo, ao passo que os transformadores de baixa frequência (por exemplo, transformadores da rede elétrica CA) possuem núcleos grandes e pesados. Os dois tipos de transformadores não são, em geral, permutáveis.

A. Problemas, Problemas...

Esta simples descrição, em uma "primeira análise", ignora interessantes e importantes questões. Por exemplo, existem indutâncias associadas com o transformador, como sugerido pelo seu símbolo de circuito: uma indutância em paralelo eficaz (denominada *indutância de magnetização*) e uma indutância em série eficaz (denominada *indutância de fuga*). A indutância de magnetização produz uma corrente no primário mesmo sem carga no secundário; isso significa que você não pode fazer um " transformador CC". A indutância de fuga provoca uma queda de tensão que depende da corrente de carga, além de excitar circuitos que têm pulsos ou bordas rápidos. Outras características que distanciam o desempenho do ideal incluem a resistência do enrolamento, as perdas do núcleo, a capacitância e o acoplamento magnético para o mundo exterior. Ao contrário dos capacitores (que se comportam quase idealmente na maioria das aplicações de circuitos), as deficiências de indutores têm efeitos significativos em aplicações de circuito reais. Abordaremos isso no Capítulo 9.

1.6 DIODOS E CIRCUITOS COM DIODOS

Não encerramos os capacitores e indutores! Nós os abordamos no *domínio do tempo* (circuitos *RC*, carga e descarga exponencial, diferenciadores e integradores, e assim por diante), mas ainda não abordamos o seu comportamento no *domínio da frequência.*

Chegaremos a isso em breve. Mas este é um bom momento para fazer uma pausa em "*RLC*" e usar o nosso conhecimento com alguns circuitos inteligentes e úteis. Começamos com a introdução de um novo dispositivo, o diodo. É o nosso primeiro exemplo de dispositivo não linear, e você pode fazer coisas interessantes com ele.

1.6.1 Diodos

Os elementos do circuito que discutimos até agora (resistores, capacitores e indutores) são todos *lineares*, o que significa que uma duplicação do sinal aplicado (a tensão, por exemplo) produz uma duplicação da resposta (a corrente, por exemplo). Isso é verdade mesmo para dispositivos reativos (capacitores e indutores). Esses componentes também são *passivos*, sendo o contrário dos dispositivos *ativos*, estes últimos exemplificados pelos transistores, os quais são dispositivos semicondutores que controlam o fluxo de potência. E eles são todos dispositivos de dois terminais, o que é autoexplicativo.

O diodo (Figura 1.54) é um dispositivo passivo *não linear* de dois terminais importante e útil. Ele tem a curva *V-I* mostrada na Figura 1.55. (Em conformidade com a filosofia geral deste livro, não tentaremos descrever a física do estado sólido que torna tais dispositivos possíveis.)

A seta do diodo (o terminal do anodo) aponta no sentido do fluxo da corrente direta. Por exemplo, se o diodo está em um circuito no qual uma corrente de 10 mA está fluindo do anodo para o catodo, então (a partir do gráfico) o anodo está cerca de 0,6 V mais positivo do que o catodo; isso é de-

FIGURA 1.54 Diodo.

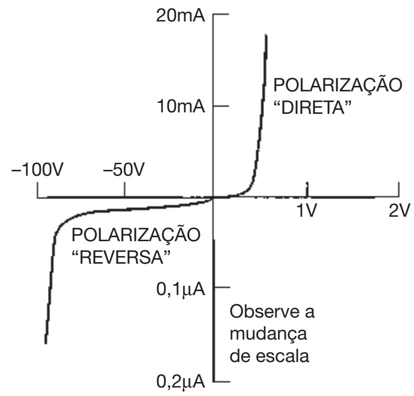

FIGURA 1.55 Curva *V-I* do diodo.

nominado "queda de tensão direta". A corrente reversa, que é medida na faixa de nanoampère para um diodo de propósito geral (observe as escalas bastante diferentes no gráfico para as correntes direta e reversa), quase nunca é útil até que seja atingida a tensão de ruptura reversa (também denominada tensão de pico inverso, PIV), tipicamente 75 volts para um diodo de uso geral como o 1N4148. (Normalmente, você não submete um diodo a tensões grandes o suficiente para provocar a ruptura reversa; a exceção é o diodo zener mencionado anteriormente.) Frequentemente, ainda, a queda de tensão direta de cerca de 0,5 a 0,8 V é de pouco interesse, e o diodo pode ser tratado, com uma boa aproximação, como um condutor unidirecional ideal. Há outras características importantes que distinguem os milhares de tipos de diodo disponíveis, como corrente máxima direta, capacitância, corrente de fuga e o tempo de recuperação reversa; a Tabela 1.1 inclui alguns diodos comuns, para dar uma ideia das capacidades desses pequenos dispositivos.

Antes de entrar em alguns circuitos com diodos, devemos salientar duas coisas: (a) um diodo não tem uma resistência (não obedece à lei de Ohm). (b) Se você colocar alguns diodos em um circuito, ele não terá um equivalente de Thévenin.

1.6.2 Retificação

Um retificador converte CA em CC; essa é uma das aplicações mais simples e mais importantes de diodos (que são, às vezes, denominados retificadores). O circuito mais simples é mostrado na Figura 1.56. O símbolo "CA" representa uma fonte de tensão CA; em circuitos eletrônicos, ela é normalmente obtida a partir de um transformador, alimentado a partir da rede elétrica CA. Para uma entrada de onda senoidal muito maior do que a queda de tensão direta (cerca de 0,6 V para diodos de silício, os tipos mais usuais), a saída será semelhante à da Figura 1.57. Se você pensar no diodo como um condutor unidirecional, não terá qualquer dificuldade para entender como o circuito funciona. Esse circuito é denomi-

TABELA 1.1 Diodos representativos

	V_R máx	I_R (típico, 25ºC)		V_F @I_F		Capacitância			
Nº Identif.	**(V)**	**(A@V)**		**(mV)**	**(mA)**	**(pF@ VR)**		**SMT[a] p/n**	**Observações**
Silício									
PAD5	45	0,25pA	20V	800	1	0,5pF	5V	SSTPAD5	metal + cápsula de vidro
1N4148	75	10nA	20V	750	10	0,9pF	0V	1N4148W	diodo de sinal comum
1N4007	1000	50nA	800V	800	250	12pF	10V	DL4007	1N4004 tem V_R menor
1N5406	600	<10μA	600V	1.0V	10A	18pF	10V	nenhum	conduz calor pelos terminais
Schottky[b]									
1N6263	60	7nA	20V	400	1	0.6pF	10V	1N6263W	veja também o 1N5711
1N5819	40	10μA	32V	400	1000	150pF	1V	1N5819HW	comum
1N5822	40	40μA	32V	480	3000	450pF	1V	nenhum	Shottky de potência
MBRP40045	45	500μA	40V	540	400A	3500pF	10V	você está brincando!	Módulo duplo Schottky

Notas: (a) SMT, tecnologia de montagem em superfície. (b) Diodos Schottky têm menor tensão direta e tempo de recuperação reversa zero, porém mais capacitância.

nado *retificador de meia-onda*, porque só metade da forma de onda de entrada é usada.

A Figura 1.58 mostra outro circuito retificador, uma "ponte de onda completa". A Figura 1.59 apresenta a tensão sobre a carga; note que toda a forma de onda de entrada é usada. As lacunas na tensão zero ocorrem por causa da queda de tensão direta nos diodos. Nesse circuito, dois diodos estão sempre em série com a entrada; quando você projeta fontes de alimentação de baixa tensão, a queda de tensão no diodo torna-se significativa (não se esqueça disso!).[29]

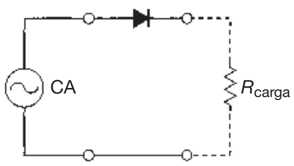

FIGURA 1.56 Retificador de meia-onda.

FIGURA 1.57 Tensão de saída de meia-onda (sem filtro).

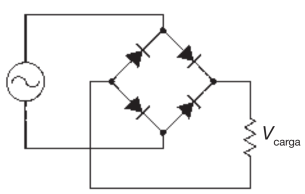

FIGURA 1.58 Retificador em ponte de onda completa.

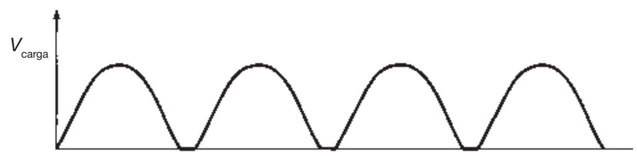

FIGURA 1.59 Tensão de saída de onda completa (sem filtro).

1.6.3 Filtragem da Fonte de Alimentação

As formas de onda retificadas anteriores não são adequadas para muitas aplicações tal como estão. Elas são "CC" apenas no sentido de que não mudam de polaridade. Porém, elas ainda têm muita "ondulação" (*ripple*) (variações periódicas na tensão sobre o valor estacionário), que deve ser suavizada a fim de gerar uma forma de onda genuinamente CC. Fazemos isso conectando um capacitor de valor relativamente grande (Figura 1.60); ele se carrega com a tensão de saída de pico durante a condução do diodo, e a sua carga armazenada ($Q = CV$) fornece a corrente de saída entre ciclos de carga. Note que os diodos evitam que o capacitor se descarregue de volta para a fonte CA. Nesta aplicação, você deve imaginar o capacitor como um dispositivo de armazenamento de energia, com a energia armazenada $U = \frac{1}{2}CV^2$ (lembre-se da Seção 1.4.1; para C em farads e V em volts, U é dado em joules, ou, equivalentemente, watt segundos).

O valor do capacitor é escolhido de forma que

$$R_{carga}C \gg 1/f,$$

[29] A queda do diodo pode ser eliminada com *comutação ativa* (ou *comutação síncrona*, uma técnica em que os diodos são substituídos por chaves transistorizadas acionadas em sincronismo com a forma de onda CA de entrada) (ver Seção 9.5.3B).

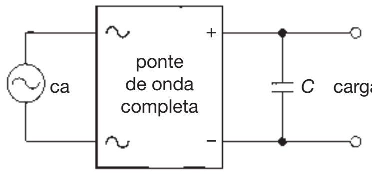

FIGURA 1.60 Ponte de onda completa com capacitor ("filtro") de armazenamento de saída.

(em que f é a frequência de ondulação – neste caso, 120 Hz), de modo a garantir uma pequena ondulação, fazendo a constante de tempo de descarga muito maior do que o tempo entre a recarga. Tornaremos essa vaga afirmação mais clara agora.

A. Cálculo da Tensão de Ondulação

É fácil calcular a tensão de ondulação aproximada, especialmente se for pequena em comparação com a tensão CC (ver Figura 1.61). A carga faz com que o capacitor descarregue um pouco entre ciclos (ou semiciclos, para a retificação de onda completa). Se você considerar que a corrente de carga permanece constante (o que ocorre para pequenas ondulações), você tem

$$\Delta V = \frac{I}{C}\Delta t \qquad \left(\text{a partir de } I = C\frac{dV}{dt}\right).$$

Basta usar $1/f$ (ou $1/2f$ para retificação de onda completa) para Δt (essa estimativa tem uma margem de segurança, pois o capacitor começa a carregar novamente em menos de um semiciclo). Você obtém[30]

$$\Delta V = \frac{I_{\text{carga}}}{fC} \qquad \text{(meia-onda)}$$

$$\Delta V = \frac{I_{\text{carga}}}{2fC} \qquad \text{(onda completa)}$$

Se você quiser fazer o cálculo sem qualquer aproximação, use a fórmula exata de carga exponencial. Entretanto, você cometeria um equívoco ao insistir no tipo de precisão, por duas razões. (a) A descarga é exponencial somente se a carga for uma resistência; muitas cargas não são. De fato, a carga mais comum, um *regulador de tensão*, parece-se com uma carga de corrente constante. (b) Fontes de alimentação são construídas com capacitores com tolerâncias típicas de 20% ou mais. Percebendo, então, a extensão nos valores dos componentes fabricados, você projeta de forma conservadora, considerando a combinação de pior caso dos valores dos componentes.

Neste caso, visualizar a parte inicial da descarga como uma rampa é, de fato, bastante preciso, especialmente se a ondulação for pequena, e, de qualquer modo, o erro está dentro da orientação de um projeto conservador – que superestima a ondulação.

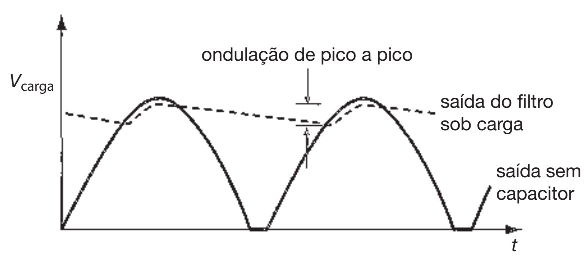

FIGURA 1.61 Cálculo da ondulação de uma fonte de alimentação.

[30] Enquanto ensinávamos eletrônica, notamos que os alunos gostam de memorizar essas equações! Uma pesquisa informal dos autores mostrou que dois em cada dois engenheiros não as memorizam. Por favor, não desperdice as células do cérebro dessa forma – em vez disso, aprenda a deduzi-las.

Exercício 1.20 Projete um circuito de uma ponte retificadora de onda completa para fornecer 10 V CC com uma ondulação menor do que 0,1 V (pp) em uma carga que consome até 10 mA. Escolha a tensão de entrada CA adequada, considerando quedas de diodos de 0,6 V. Certifique-se de usar a frequência de ondulação correta no cálculo.

1.6.4 Configurações de Retificador para Fontes de Alimentação

A. Ponte de Onda Completa

Uma fonte de alimentação CC com o circuito em ponte que acabamos discutir tem a aparência mostrada na Figura 1.62. Na prática, você geralmente compra uma ponte como um módulo pré-encapsulado. Os menores vêm com classificações de corrente máxima de 1 A média, com uma seleção de tensões de ruptura mínima especificada que vão desde 100 V a 600 V, ou mesmo 1.000 V. Grandes retificadores em ponte estão disponíveis com especificações de corrente de 25 A ou mais.

B. Retificadores de Onda Completa com Derivação Central

O circuito na Figura 1.63 é denominado retificador de onda completa com derivação central. A tensão de saída é metade do que você obteria se usasse uma ponte retificadora. Não é o circuito mais eficiente em termos de projeto do transformador, uma vez que cada metade do secundário é utilizada apenas metade do tempo. Para desenvolver alguma intuição sobre esse ponto sutil, considere duas configurações diferen-

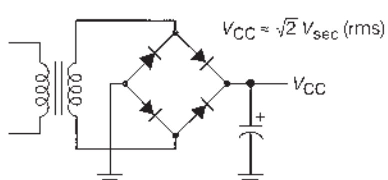

FIGURA 1.62 Circuito retificador em ponte. A marca de polaridade e o eletrodo curvo indicam um capacitor polarizado, que não permite uma carga com a polaridade oposta.

tes que produzam a mesma tensão CC de saída retificada: (a) o circuito da Figura 1.63 e (b) o mesmo transformador, desta vez com seu secundário com derivação central e reconectado com as duas metades em paralelo, a resultante do enrolamento secundário combinado conectado a uma ponte de onda completa. Agora, para fornecer a mesma potência de saída, cada metade do enrolamento em (a), durante o seu ciclo de condução, deve fornecer a mesma corrente que o par em paralelo em (b). Mas a potência dissipada nas resistências de enrolamento é I^2R, de modo que a potência perdida por aquecimento nos enrolamentos secundários do transformador é reduzida por um fator de 2 para a configuração em ponte (b).

Aqui está outra maneira de ver o problema: imagine que usemos o mesmo transformador como em (a), mas para o nosso circuito de comparação substituímos o par de diodos por uma ponte, como na Figura 1.62, e deixamos a derivação central desconectada. Agora, para fornecer a mesma *potência* de saída, a corrente através do enrolamento durante esse momento é duas vezes o que seria para um circuito de onda completa verdadeiro. Um detalhe: o aquecimento nos enrolamentos, calculado a partir da lei de Ohm, é I^2R, de modo que você tem quatro vezes o aquecimento para metade do tempo, ou duas vezes o aquecimento médio de um circuito em ponte de onda completa equivalente. Você teria que escolher um transformador com uma especificação de corrente 1,4 (raiz quadrada de 2) vez maior em comparação com o circuito em ponte (melhor); além de custar mais, a fonte resultante seria mais volumosa e pesada.

Exercício 1.21 Esta ilustração do aquecimento I^2R pode ajudá-lo a entender a desvantagem do circuito retificador com derivação central. Qual especificação (mínima) do fusível é necessária para a passagem da forma de onda de corrente mostrada na Figura 1.64, que tem uma corrente média de 1 A? *Dica*: um fusível "queima" derretendo (por aquecimento I^2R) um elo metálico ao ser percorrido por uma corrente estacionária maior do que a sua especificação. Suponha, para este problema, que a constante de tempo térmica para o elo fundível seja muito mais longa do que o intervalo de tempo da onda quadrada, isto é, que o fusível responda ao valor médio de I^2 ao longo de muitos ciclos.

C. Fonte Simétrica

Uma variação popular do circuito de onda completa com derivação central é mostrada na Figura 1.65. Ela mostra fontes simétricas (tensões positivas e negativas iguais), de que muitos circuitos precisam. É um circuito eficiente, pois as duas

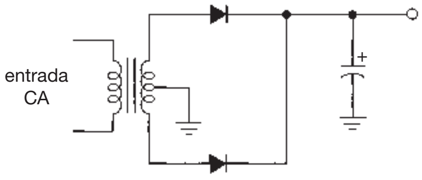

FIGURA 1.63 Retificador de onda completa usando o transformador de derivação central.

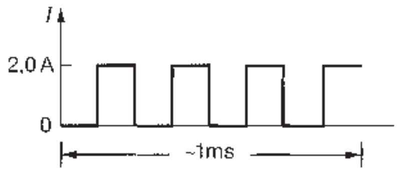

FIGURA 1.64 Ilustração do aquecimento I^2R maior com fluxo de corrente descontínuo.

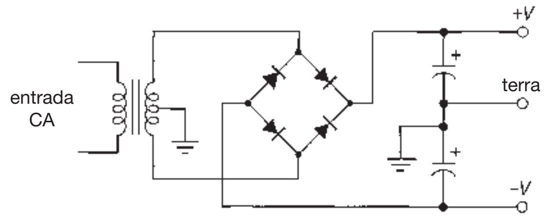

FIGURA 1.65 Fonte de polaridade dupla (simétrica).

metades da forma de onda de entrada são usadas em cada seção de enrolamento.

D. Multiplicadores de Tensão

O circuito mostrado na Figura 1.66 é denominado duplicador de tensão. Pense nele como dois circuitos retificadores de meia-onda em série. Ele é, oficialmente, um circuito retificador de onda completa, pois ambas as metades da onda de entrada são usadas – a frequência de ondulação é o dobro da frequência CA (120 Hz para a tensão de linha de 60 Hz nos Estados Unidos e em outros países).

Existem variações desse circuito para triplicadores de tensão, quadruplicadores de tensão, etc. A Figura 1.67 mostra os circuitos duplicador, triplicador e quadruplicador que permitem aterrar um lado do transformador. Você pode estender esse esquema tanto quanto quiser, produzindo o que é denominado gerador de Cockcroft-Walton; ele é usado em aplicações secretas (tais como aceleradores de partículas) e em aplicações cotidianas (como amplificadores de imagem, ionizadores de ar, copiadoras laser e até mesmo mata-mosquitos) que exigem uma alta tensão CC, mas pouca corrente.

1.6.5 Reguladores

Ao escolher capacitores que são suficientemente grandes, você pode reduzir a tensão de ondulação para qualquer nível desejado. Essa abordagem de "força bruta" tem três desvantagens.

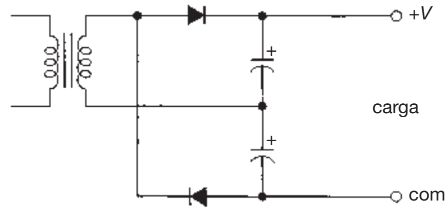

FIGURA 1.66 Dobrador de tensão.

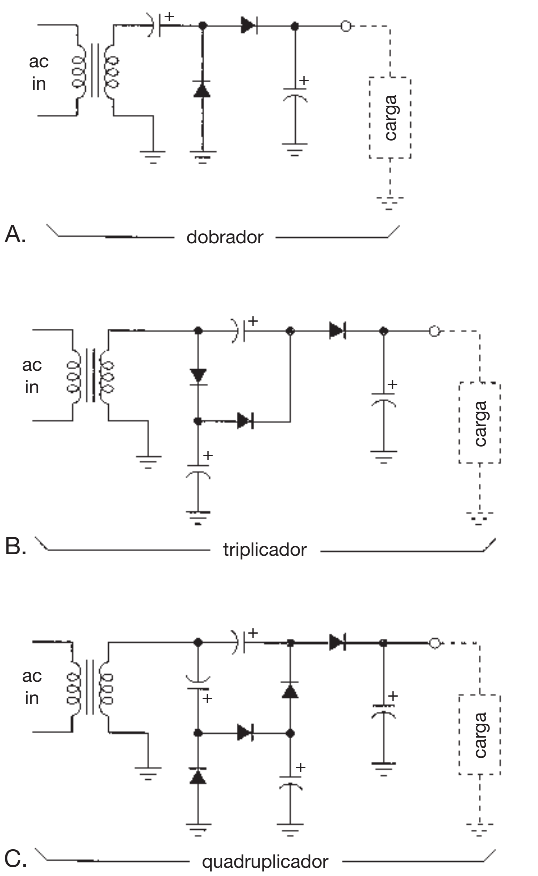

FIGURA 1.67 Multiplicadores de tensão; estas configurações não necessitam de uma fonte de tensão flutuante.

- Os capacitores necessários podem ser proibitivamente volumosos e caros.
- O intervalo muito curto do fluxo de corrente durante cada ciclo[31] (apenas muito próximo à parte superior da forma de onda senoidal) produz mais aquecimento I^2R.
- Mesmo com a ondulação reduzida a níveis insignificantes, você ainda tem as variações de tensão de saída devidas a outras causas. Por exemplo, a tensão de saída CC será aproximadamente proporcional à tensão de entrada CA, dando origem a flutuações provocadas por variações de tensão da linha de entrada. Além disso, alterações na corrente de carga continuarão a fazer a tensão de saída variar devido às resistências internas finitas do transformador, diodo, etc. Em outras palavras, o circuito equivalente de Thévenin da fonte de alimentação tem $R > 0$.

A melhor abordagem para o projeto de fonte de alimentação é a utilização de capacitância suficiente para reduzir a ondulação a baixos níveis (talvez 10% da tensão CC) e, em seguida, usar um *circuito de realimentação* ativo para eliminar a ondulação remanescente. Tal circuito de realimentação "olha

[31] Denominado ângulo de condução.

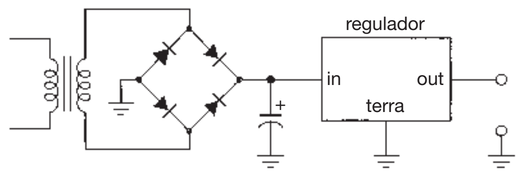

FIGURA 1.68 Fonte de alimentação CC regulada.

para" a saída, fazendo alterações em um resistor em série controlável (um transístor) conforme necessário para manter constante a tensão de saída (Figura 1.68). Isso é conhecido como "fonte de alimentação CC regulada linear".[32]

Esses reguladores de tensão são usados quase universalmente como fontes de alimentação para os circuitos eletrônicos. Atualmente, os reguladores de tensão completos estão disponíveis em CIs de baixo custo (preço abaixo de 1 dólar). Uma fonte de alimentação construída com um regulador de tensão pode ser facilmente ajustável e autoprotegida (contra curtos-circuitos, sobreaquecimento, etc.), com excelentes propriedades como uma fonte de tensão (por exemplo, a resistência interna medida em miliohms). Abordaremos as fontes de alimentação CC reguladas no Capítulo 9.

1.6.6 Aplicações de Circuito com Diodos

A. Retificador de Signal

Há outras ocasiões em que você usa um diodo para fazer uma forma de onda de apenas uma polaridade. Se a forma de onda de entrada não é uma onda senoidal, você geralmente não pensa nisso como uma retificação no sentido de uma fonte de alimentação. Por exemplo, você pode querer um trem de pulsos correspondentes à borda de subida de uma onda quadrada. A maneira mais fácil é retificar a onda diferenciada (Figura 1.69). Tenha sempre em mente a queda direta (queda na polarização direta) do diodo de 0,6 V (valor aproximado). Esse circuito, por exemplo, não produz nenhuma saída para as ondas quadradas menores do que 0,6 V pp. Se isso for um problema, existem vários truques para contornar essa limitação. Uma possibilidade é usar diodos de portador quente (diodos Schottky), com uma queda direta de cerca de 0,25 V.

Uma *solução de circuito* possível para esse problema da queda de diodo finita é mostrada na Figura 1.70. Aqui, D_1 compensa a queda direta de D_2 fornecendo 0,6 V de *polarização* para manter D_2 no limiar da condução. O uso de um diodo (D_1) para proporcionar a polarização (em vez de, digamos, um divisor de tensão) tem várias vantagens: (a) não há nada para ajustar, (b) a compensação será quase perfeita e (c) as variações da queda direta (por exemplo, com a varia-

[32] Uma variação popular é o conversor de potência *chaveado* regulado. Embora o seu funcionamento seja muito diferente em detalhe, ele usa o mesmo princípio de realimentação para manter uma tensão de saída constante. Consulte o Capítulo 9 para saber muito mais sobre as duas técnicas.

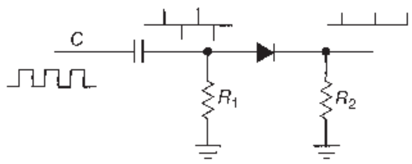

FIGURA 1.69 Retificador de sinal aplicado na saída de um diferenciador.

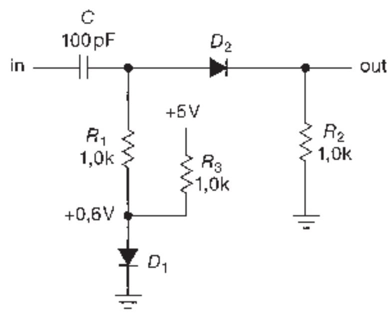

FIGURA 1.70 Compensação da queda de tensão direta de um retificador de sinal com diodo.

ção de temperatura) serão compensadas corretamente. Mais adiante, veremos outros exemplos de compensação de pares casados de quedas diretas em diodos, transistores e FETs. É um truque simples e eficaz.

B. Portas com Diodo

Outra aplicação de diodos, que conheceremos mais tarde sob o título geral de *lógica*, é passar a maior das duas tensões sem afetar a menor. Um bom exemplo disso é a bateria reserva (*backup*), um método de manter algo funcionando (por exemplo, um chip de "relógio de tempo real" de um computador, o qual mantém uma contagem de data e hora) mesmo quando o dispositivo está desligado. A Figura 1.71 mostra um circuito que faz esse trabalho. A bateria não faz nada até que a fonte de +5 V seja desligada; então, ela assume sem interrupção.

C. Diodo Ceifador

Às vezes, é desejável limitar o alcance de um sinal (isto é, evitar que exceda certos limites de tensão) em algum ponto em um circuito. O circuito mostrado na Figura 1.72 fará isso. O diodo impede a saída de exceder cerca de 5,6 V, não tendo efeito sobre tensões menores do que essa (incluindo tensões negativas). A única limitação é que a entrada não deve se tornar tão negativa a ponto de a tensão de ruptura reversa do diodo ser ultrapassada (por exemplo, −75 V para um 1N4148). A resistência em série limita a corrente do diodo durante a ação de ceifamento; no entanto, um efeito secundário é que se adiciona 1 kΩ de resistência em série (no sentido de resistência equivalente de Thévenin) para o sinal, por isso o seu valor é um compromisso entre manter uma resistência

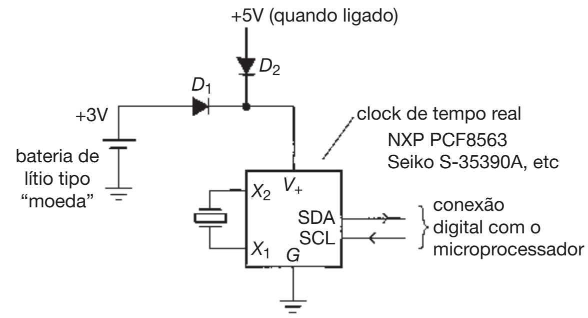

FIGURA 1.71 Porta OR com diodos: bateria reserva (*backup*). Os chips de relógio de tempo real são especificados para operar corretamente com tensões de alimentação de +1,8 V +a 5,5 V. Eles consomem mísero 0,25 μA, o que resulta em uma vida útil de 1 milhão de horas (cem anos) de uma célula tipo moeda CR2032 padrão!

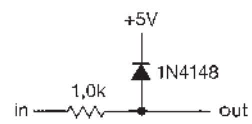

FIGURA 1.72 Ceifador de tensão com diodo.

(Thévenin) de fonte baixa desejável e uma baixa corrente de ceifamento desejável. Diodos ceifadores são componentes padrão em todas as entradas na lógica digital CMOS contemporânea. Sem eles, os circuitos de entrada delicados são facilmente destruídos por descargas de eletricidade estática durante o manuseio.

Exercício 1.22 Projete um ceifador simétrico, isto é, um que confine um sinal no intervalo de −5,6 a +5,6 V.

Um divisor de tensão pode fornecer a tensão de referência para um ceifador (Figura 1.73). Neste caso, você deve garantir que a resistência olhando para o divisor de tensão (R_{vd}) seja pequena em comparação com R, pois o que você tem se parece com o que é mostrado na Figura 1.74 quando o divisor de tensão é substituído pelo seu circuito equivalente de Thévenin. Quando o diodo conduz (tensão de entrada excede a tensão de ceifamento), a saída é realmente apenas

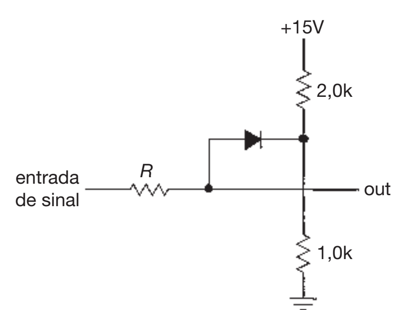

FIGURA 1.73 Divisor de tensão fornecendo a tensão de ceifamento.

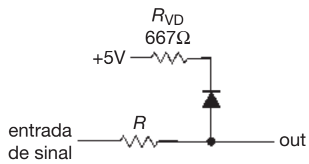

FIGURA 1.74 Ceifamento para o divisor de tensão: circuito equivalente.

a saída de um divisor de tensão, com a resistência equivalente de Thévenin da referência de tensão como a resistência mais baixa (Figura 1.75). Assim, para os valores mostrados, a saída do ceifador para uma entrada de onda triangular teria a aparência mostrada na Figura 1.76. O problema é que o divisor de tensão não fornece uma referência estável, na linguagem da eletrônica. Uma fonte de tensão estável é aquela em que a tensão não cai facilmente, ou seja, que tem uma resistência (Thévenin) interna baixa.

Na prática, o problema da impedância finita da referência do divisor de tensão pode ser facilmente resolvido com a utilização de um transistor ou um AOP. Isso é, normalmente, uma solução melhor do que usar valores de resistência muito pequenos, pois não consome grandes correntes, embora forneça uma tensão de referência com uma resistência Thévenin de alguns ohms ou menos. Além disso, existem outras maneiras de construir um ceifador, utilizando um AOP como parte do circuito de ceifamento. Você verá esses métodos no Capítulo 4.

Alternativamente, uma maneira simples para estabilizar o circuito de ceifamento da Figura 1.73, apenas para sinais que variam no tempo, é adicionar um denominado *capacitor de desvio* (*bypass*) no resistor inferior (1 kΩ). Para entender isso plenamente, precisamos ter conhecimentos sobre capacitores no domínio da frequência, um assunto que abordaremos em breve. Por enquanto, digamos simplesmente que você pode colocar um capacitor sobre o resistor de 1k, e sua carga armazenada age para manter esse ponto em tensão constante. Por exemplo, um capacitor de 15 μF para o terra faria o divisor parecer como se tivesse uma resistência Thévenin inferior a 10 Ω para frequências acima de 1 kHz. (Você poderia, de forma semelhante, adicionar um capacitor de desvio sobre D_1 na Figura 1.70.) Como aprenderemos, a eficácia desse truque diminui em baixas frequências, e ele não tem efeito em CC.

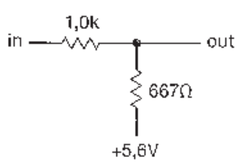

FIGURA 1.75 Ceifamento insuficiente: o divisor de tensão não é estável o suficiente.

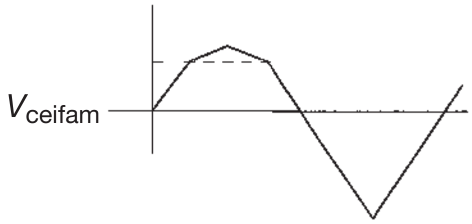

FIGURA 1.76 Forma de onda de saída para o circuito de ceifamento da Figura 1.73.

Uma aplicação de ceifamento interessante é a "restauração CC" de um sinal que foi acoplado em CA (acoplado capacitivamente). A Figura 1.77 mostra a ideia. Isso é especialmente importante para os circuitos cujas entradas se parecem com diodos (por exemplo, um transistor com emissor conectado ao terra, como veremos no próximo capítulo); caso contrário, um sinal acoplado em CA só desaparecerá quando o capacitor de acoplamento carregar com a tensão de pico do sinal.

D. Limitador

Um último circuito de ceifamento é mostrado na Figura 1.78. Esse circuito limita a "variação" da saída (novamente, um termo comum em eletrônica) para uma queda de diodo em uma ou outra polaridade, cerca de ± 0,6 V. Isso pode parecer muito pequeno, mas, se o próximo estágio for um amplificador com grande amplificação de tensão, a sua entrada estará sempre perto de 0 V; caso contrário, a saída estará em "saturação" (por exemplo, se o próximo estágio tiver um ganho de 1.000 e operar a partir de fontes de ±15 V, sua entrada deve ficar na faixa de ±15 mV para a sua saída não saturar). A Figura 1.79 mostra o que um limitador faz para sobredimensionar ondas senoidais e picos. Esse circuito ceifador é frequentemente utilizado como proteção de entrada para um amplificador de alto ganho.

E. Diodos como Elementos não Lineares

Para uma boa aproximação, a corrente direta através de um diodo é proporcional a uma função exponencial da tensão sobre ele a uma dada temperatura (para uma discussão so-

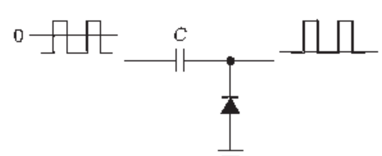

FIGURA 1.77 Restauração CC.

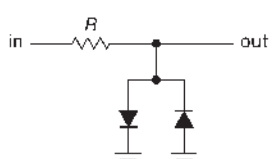

FIGURA 1.78 Limitador com diodos.

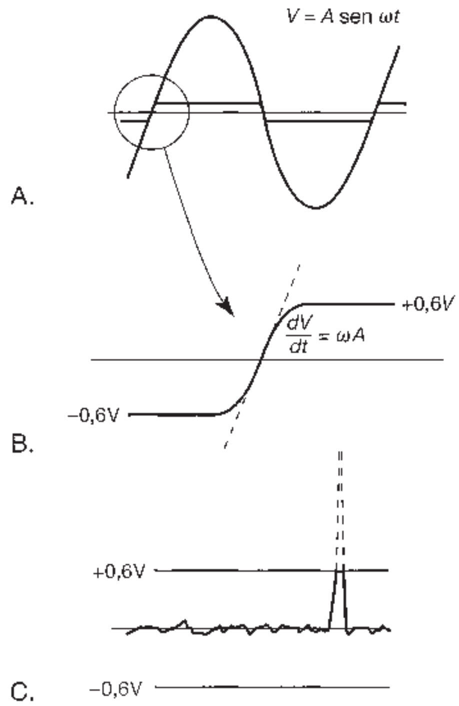

FIGURA 1.79 A. Limitação de ondas senoidais de grande amplitude; B. detalhes; e C. picos.

bre a lei exata, ver Seção 2.3.1). Assim, é possível utilizar um diodo para gerar uma tensão de saída proporcional ao logaritmo de uma corrente (Figura 1.80). Como V flutua na região de 0,6 V, com apenas pequenas variações de tensão que refletem as variações de corrente de entrada, é possível gerar a corrente de entrada com um resistor se a tensão de entrada for muito maior do que uma queda de diodo (Figura 1.81).

Na prática, pode ser que você queira uma tensão de saída não compensada pela queda de 0,6 V do diodo. Além disso, seria bom ter um circuito insensível às variações de temperatura (a queda de tensão de um diodo de silício diminui cerca de 2 mV/°C). O método de compensação de queda de diodo é útil aqui (Figura 1.82). R_1 faz D_2 conduzir, mantendo o ponto A em, aproximadamente, 0,6 V. O ponto B está, então, próximo do terra (aliás, fazendo I_{in} com precisão

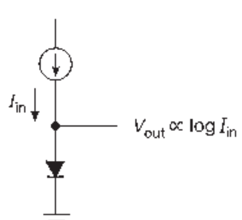

FIGURA 1.80 Explorando a curva não linear *V-I* do diodo: conversor logarítmico.

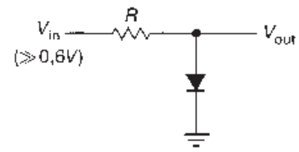

FIGURA 1.81 Conversor logaritmo aproximado.

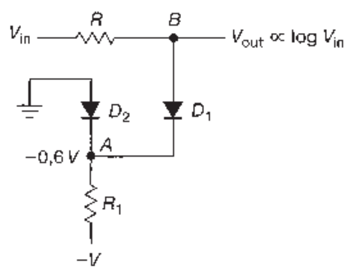

FIGURA 1.82 Compensação de queda de diodo no conversor logarítmico.

proporcional à V_{in}). Enquanto os dois diodos (idênticos) estão à mesma temperatura, existe um bom cancelamento das quedas diretas, exceto, evidentemente, pela diferença devida à corrente de entrada através de D_1, que produz o resultado desejado. Nesse circuito, R_1 deve ser escolhido de modo que a corrente através de D_2 seja significativamente maior do que a corrente máxima de entrada, a fim de manter D_2 em condução.

É necessária uma melhor compreensão das características de diodos e transistores, juntamente com uma compreensão de AOPs. Esta seção destina-se a servir apenas como uma introdução para as coisas que virão.

1.6.7 As Cargas Indutivas e a Proteção com Diodos

O que acontece se você abrir uma chave pela qual passa corrente para um indutor? Como os indutores têm a propriedade

$$V = LdI/dt,$$

não é possível desligar a corrente de repente, pois isso implicaria uma tensão infinita nos terminais do indutor. O que acontece é que a tensão através do indutor aumenta abruptamente e continua a subir até forçar a passagem de corrente. Dispositivos eletrônicos que controlam cargas indutivas podem ser facilmente danificados, especialmente o componente que "sofre ruptura" a fim de satisfazer o desejo do indutor para a continuidade da corrente. Considere o circuito na Figura 1.83. A chave está inicialmente fechada, e a corrente flui através do indutor (que pode ser um relé, como descrito mais adiante). Quando a chave é aberta, o indutor tenta manter a corrente fluindo de *A* para *B*, tal como era. Em outras palavras, ele tenta fazer a corrente fluir para fora de *B*, o que é

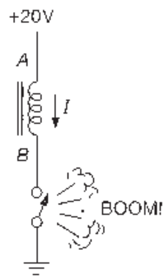

FIGURA 1.83 “Golpe” indutivo.

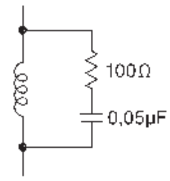

FIGURA 1.85 “Amortecedor” (*snubber*) *RC* para suprimir golpe indutivo.

feito forçando *B* com uma alta tensão positiva (em relação a *A*). Em um caso como esse, em que não há nenhuma conexão com o terminal B, a tensão pode ir a 1.000 V positivos antes de ocorrer um “arco elétrico” entre os contatos da chave. Isso reduz a vida útil da chave e também gera interferência impulsiva, que pode afetar outros circuitos nas proximidades. Se a chave for um transistor, seria eufemismo dizer que sua vida é encurtada; sua vida *acaba*.

A melhor solução, geralmente, é colocar um diodo sobre o indutor (em paralelo), como na Figura 1.84. Quando a chave estiver ligada, o diodo estará polarizado reversamente (a partir da queda CC na resistência do enrolamento do indutor). No desligamento, o diodo entra em condução, colocando o terminal da chave uma queda de diodo acima da tensão de alimentação positiva. O diodo deve ser capaz de lidar com a corrente inicial, que é igual à corrente estacionária que fluía através do indutor; algo como um 1N4004 é bom para quase todos os casos.

A única desvantagem desse circuito de proteção simples é que ele alonga o decaimento da corrente através do indutor, pois a taxa de variação da corrente no indutor é proporcional à tensão através dele. Para aplicações em que a corrente deve decair rapidamente (atuadores de alta velocidade ou relés, obturadores de câmera, bobinas magnéticas, etc.), pode ser melhor colocar um resistor em paralelo com o indutor, escolhendo o seu valor de modo que $V_{fonte} + IR$ seja menor do que a tensão máxima permitida sobre a chave. Para um decaimento mais rápido com uma dada tensão máxima, um zener (ou outro dispositivo de ceifamento de tensão) pode ser utilizado em vez disso, dando uma rampa linear decrescente de corrente em vez de um decaimento exponencial.

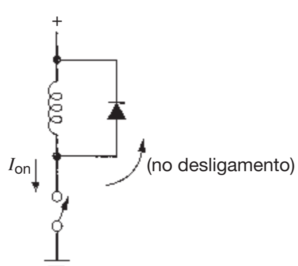

FIGURA 1.84 Bloqueio de golpe indutivo.

Para indutores acionados por CA (transformadores, relés CA), a proteção com diodo que acabamos de descrever não funcionará, pois o diodo conduzirá em semiciclos alternados quando a chave estiver fechada. Nesse caso, uma boa solução é um circuito “amortecedor” (*snubber*) *RC* (Figura 1.85). Os valores apresentados são típicos para as pequenas cargas indutivas acionadas a partir da rede elétrica CA. Tal amortecedor deve ser incluído em todos os instrumentos que operam a partir da rede elétrica CA, pois o transformador de potência é indutivo.[33]

Uma alternativa para o amortecedor *RC* é a utilização de um elemento de ceifamento de tensão como um zener bidirecional. Entre estes, os mais comuns são o zener supressor de transiente de tensão “TVS” (*transient voltage supressor*) bidirecional e o varistor de óxido metálico (“MOV” – *metal-oxide varistor*); este último é um dispositivo barato semelhante a um capacitor cerâmico de disco e se comporta eletricamente como um diodo zener bidirecional. Ambas as classes são projetadas para proteção contra transientes de tensão e estão disponíveis com variedade e especificações de tensão de 10 a 1.000 volts, podendo lidar com correntes transitórias de até milhares de ampères. Incluir um supressor transiente (com fusão apropriada) nos terminais da rede elétrica CA faz sentido em parte dos equipamentos eletrônicos, não só para evitar a interferência de pico indutivo a outros instrumentos nas proximidades, mas também para evitar que grandes picos ocasionais na rede elétrica danifiquem o próprio instrumento.

1.6.8 Entreato: Indutores como Amigos

Para não deixar a impressão de que indutância e indutores são apenas coisas a serem temidas, olharemos para o circuito da Figura 1.86. O objetivo é carregar o capacitor a partir de uma fonte de tensão CC V_{in}. No circuito superior (Figura 1.86A), fizemos isso da maneira convencional, com um resistor em série para limitar a corrente de pico exigida da fon-

[33] Como explicado na Seção 9.5.1, você deve escolher um capacitor especificado para o serviço “em paralelo com a linha”.

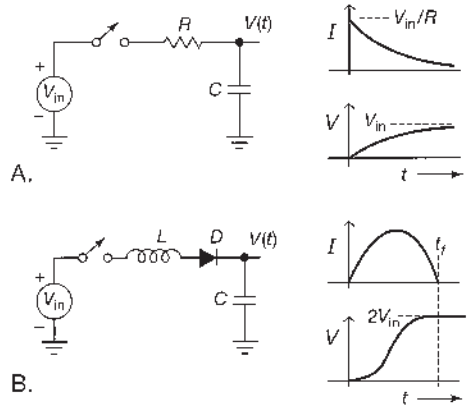

FIGURA 1.86 A carga de ressonância é sem perdas (com componentes ideais) em comparação com a eficiência de 50% da carga resistiva. A carga estará completa após t_f, igual a um semiciclo da frequência de ressonância. O diodo em série termina o ciclo, que, de outra forma, continuaria a oscilar entre 0 e $2V_{in}$.

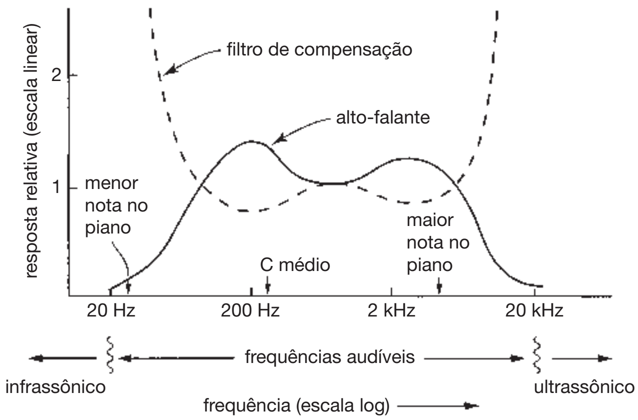

FIGURA 1.87 Exemplo de análise de frequência: equalização de alto-falantes de *boom-box* (*minisystem*). As notas de piano mais baixas e mais altas, chamadas de A0 e C8, estão em 27,5 Hz e 4,2 kHz; elas estão quatro oitavas abaixo de A440 e quatro oitavas acima do C médio, respectivamente.

te de tensão. OK, ele funciona – mas tem um inconveniente que pode ser grave: metade da potência é perdida na forma de calor no resistor. Por outro lado, no circuito com o indutor (Figura 1.86B), nenhuma potência é perdida (considerando componentes ideais); e, como bônus, o capacitor é carregado com o dobro da tensão de entrada. A forma de onda da tensão de saída é um semiciclo senoidal na frequência ressonante $f = 1/2\pi\sqrt{LC}$, um tema que veremos em breve (Seção 1.7.14).[34,35]

1.7 IMPEDÂNCIA E REATÂNCIA

Aviso: esta seção é um pouco matemática; pode ser que você queira ignorar a matemática, mas não deixe de prestar atenção aos resultados e gráficos.

Circuitos com capacitores e indutores são mais complicados do que os circuitos resistivos de que falamos anteriormente, nos quais o comportamento depende da frequência: um "divisor de tensão" que contém um capacitor ou indutor terá uma relação de divisão em função da frequência. Além disso, os circuitos que contêm esses componentes (conhecidos coletivamente como componentes *reativos*) "distorcem" formas de onda de entrada, tais como ondas quadradas, como vimos anteriormente.

No entanto, capacitores e indutores são dispositivos *lineares*, o que significa que a amplitude da forma de onda de saída, qualquer que seja a sua forma, aumenta exatamente na proporção da amplitude da forma de onda de entrada. Essa linearidade tem muitas consequências, e a mais importante é, provavelmente, a seguinte: *a saída de um circuito linear, acionado com uma onda senoidal, em alguma frequência f, é, em si mesma, uma onda senoidal na mesma frequência (com, no máximo, alteração de amplitude e fase).*

Devido a essa notável propriedade de circuitos que contêm resistências, capacitores e indutores (e, mais adiante, amplificadores lineares), é especialmente conveniente analisar qualquer circuito do tipo perguntando como a tensão de saída (amplitude e fase) depende da tensão de entrada *para uma entrada senoidal de uma única frequência*, mesmo que esse não seja o uso pretendido. Um gráfico da *resposta de frequência* resultante, no qual a relação entre a saída e a entrada é registada para cada frequência da onda senoidal, é útil para pensar em muitos tipos de formas de onda. Como exemplo, o alto-falante de uma *boom-box* pode ter a resposta de frequência mostrada na Figura 1.87, em que a "saída", neste caso, é de pressão acústica, é claro, e não de tensão. É desejável que um alto-falante tenha uma

[34] A analogia mecânica pode ser útil aqui. Imagine pacotes caindo em uma correia transportadora que se move a uma velocidade v; os pacotes são acelerados até esta velocidade por fricção, com uma eficiência de 50%, chegando por fim à velocidade da correia v, velocidade na qual eles se deslocam ao sair na extremidade da correia. Isso é uma carga resistiva. Agora tentamos algo completamente diferente, ou seja, equipamos uma correia transportadora com pequenos coletores conectados por molas na correia; e, ao lado dela, temos uma segunda correia, funcionando com o dobro da velocidade ($2v$). Agora, quando cai um pacote na primeira correia transportadora, ele pressiona a mola e, em seguida, ricocheteia para $2v$; e faz um pouso suave na segunda correia transportadora. Nenhuma energia é perdida (molas ideais), e o pacote transportado sai na extremidade da correia em $2v$. Isso é uma carga reativa.

[35] A carga ressonante é usada para a fonte de alta tensão em lâmpadas de flash e estroboscópios, com as vantagens de (a) carga completa entre flashes (espaçados não a menos do que t_f) e (b) nenhuma corrente imediatamente após a descarga (ver formas de onda), permitindo assim que a lâmpada "apague" depois de cada flash.

resposta "plana", o que significa que o gráfico de pressão sonora em função da frequência é constante ao longo da faixa de frequências audíveis. Neste caso, as deficiências do orador podem ser corrigidas com a introdução de um filtro passivo com a resposta inversa (como mostrado) dentro dos amplificadores do rádio.

Como veremos, é possível generalizar a lei de Ohm substituindo a palavra "resistência" por "impedância", a fim de descrever qualquer circuito contendo esses dispositivos passivos lineares (resistores, capacitores e indutores). Você poderia pensar no assunto de impedância (resistência generalizada) como a lei de Ohm para os circuitos que incluem capacitores e indutores.

Um pouco de terminologia: impedância (**Z**) é a "resistência generalizada"; indutores e capacitores, para os quais a tensão e a corrente estão sempre 90° fora de fase, são *reativos*; eles têm *reatância* (X). Resistores, com tensão e corrente sempre em fase, são *resistivos*; eles têm *resistência* (R). Em geral, em um circuito que combina componentes resistivos e reativos, a tensão e a corrente em algum ponto terão alguma relação de fase entre elas, descrita por uma impedância complexa: impedância = resistência + reatância, ou $\mathbf{Z} = R + jX$ (veremos mais sobre isso depois).[36] No entanto, você verá declarações como "a impedância do capacitor nesta frequência é..." A razão pela qual você não tem que usar a palavra "reatância" em tal caso é que impedância abrange tudo. Na verdade, você costuma usar a palavra "impedância" mesmo quando sabe que é de uma resistência que está falando; você diz "a impedância da fonte" ou "a impedância de saída" quando quer dizer a resistência equivalente de Thévenin de alguma fonte. O mesmo vale para "impedância de entrada".

Em tudo o que vem a seguir, estaremos falando sobre circuitos acionados por ondas senoidais em uma única frequência. A análise de circuitos acionados por formas de onda complicadas é mais elaborada, envolvendo os métodos utilizados anteriormente (equações diferenciais) ou decomposição da forma de onda para ondas senoidais (análise de Fourier). Felizmente, esses métodos são raramente necessários.

1.7.1 A Análise de Frequência de Circuitos Reativos

Começaremos analisando um capacitor acionado por uma fonte de tensão de onda senoidal $V(t) = V_0$ sen ωt (Figura 1.88). A corrente é

$$I(t) = C\frac{dV}{dt} = C\omega V_0 \cos \omega t,$$

[36] Mas, em poucas palavras, o módulo de **Z** dá a relação entre as amplitudes de tensão e corrente, e o ângulo polar de Z dá o ângulo de fase entre a corrente e a tensão.

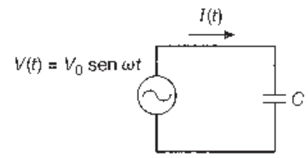

FIGURA 1.88 Uma tensão CA senoidal aciona um capacitor.

ou seja, uma corrente de amplitude ωCV_0, com a sua fase adiantada da tensão de entrada de 90°. Se considerarmos apenas as amplitudes e desprezarmos as fases, a corrente é

$$I = \frac{V}{1/\omega C}.$$

(Lembre-se de que $\omega = 2\pi f$.) Ele se comporta como uma frequência dependente da resistência $R = 1/\omega C$, mas, além disso, a corrente está 90° fora de fase com a tensão (Figura 1.89).

Por exemplo, um capacitor de 1 μF colocado em uma rede elétrica de 115 V (RMS) de 60 Hz consome uma corrente de amplitude RMS:

$$I = \frac{115}{1/(2\pi \times 60 \times 10^{-6})} = 43{,}4\,\text{mA (rms)}.$$

Em breve, complicaremos as coisas nos preocupando explicitamente com *deslocamentos de fase* e similares – o que nos levará a uma álgebra complexa que aterroriza iniciantes (muitas vezes) e os que têm fobia de matemática (sempre). Antes de fazer isso, porém, este é um bom momento para desenvolver a intuição sobre o comportamento dependente da frequência de alguns circuitos básicos e importantes que usam capacitores, ignorando no momento o fato problemático de que, quando acionado por um sinal senoidal, correntes e tensões em um capacitor não estão em fase.

Como acabamos de ver, a relação entre os *módulos* de tensão e corrente, em um capacitor acionado em uma frequência ω, é apenas

$$\frac{|V|}{|I|} = \frac{1}{\omega C},$$

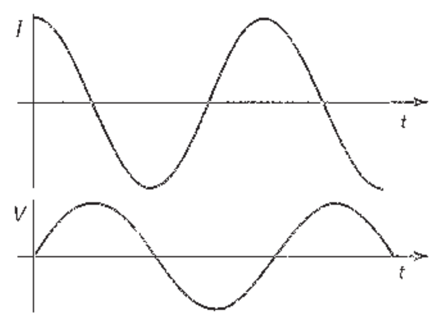

FIGURA 1.89 A corrente em um capacitor está adiantada 90° em relação à tensão senoidal.

que podemos pensar como uma espécie de "resistência" – o módulo da corrente é proporcional ao módulo da tensão aplicada. O nome oficial para essa grandeza é *reatância*, com o símbolo X. Assim, X_C representa a reatância de um capacitor,[37] de modo que, para um capacitor,

$$X_C = \frac{1}{\omega C}. \tag{1.26}$$

Isto significa que uma capacitância maior tem uma reatância menor. E isso faz sentido, porque, por exemplo, se você dobrar o valor de um capacitor, será necessário o dobro da corrente na carga e na descarga através da mesma oscilação de tensão e no mesmo tempo (lembre-se $I = C\,dV/dt$). Pela mesma razão, a reatância diminui à medida que a frequência aumenta – ao duplicar a frequência (mantendo V constante), a taxa de variação da tensão duplica, exigindo o dobro de corrente e, consequentemente, metade da reatância.

Assim, grosso modo, podemos pensar em um capacitor como uma "resistência dependente da frequência". Às vezes, isso é suficientemente bom; outras vezes, não é. Analisaremos alguns circuitos em que essa visão simplificada nos leva a resultados razoavelmente bons e fornece uma boa intuição; mais adiante, nós os corrigiremos, usando a álgebra complexa correta, para obter um resultado preciso. (Tenha em mente que os resultados a que estamos prestes a chegar são aproximados – estamos "*mentindo"* para você, mas é uma pequena mentira, e, de qualquer maneira, diremos a verdade mais tarde. Enquanto isso, usaremos o estranho símbolo $\asymp$ em vez de $=$ em todas as tais "equações aproximadas", e sinalizaremos a equação como aproximada.)

A. Filtro *RC* Passa-Baixas (Aproximado)

O circuito na Figura 1.90 é denominado *filtro passa-baixas*, pois ele passa as baixas frequências e bloqueia as altas. Se você pensar nele como um divisor de tensão dependente da frequência, isso faz sentido: a parte inferior do divisor (o capacitor) tem uma reatância que diminui com o aumento da frequência, de modo que a relação V_{out}/V_{in} diminui em conformidade:

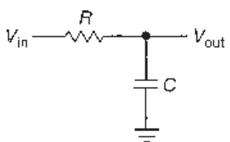

FIGURA 1.90 Filtro passa-baixas.

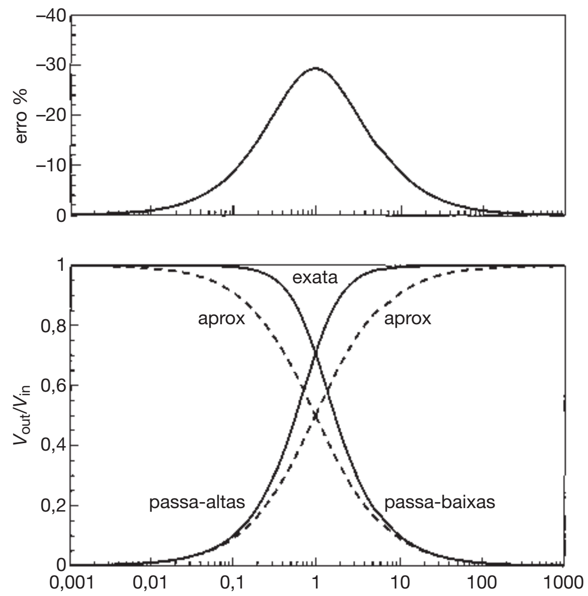

FIGURA 1.91 Resposta de frequência de um filtro *RC* de seção única, mostrando os resultados tanto de uma aproximação simples, que ignora fase (curva tracejada), quanto o exato (curva de linha contínua). O erro percentual (isto é, a tracejada/contínua) é apresentado acima.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} \asymp \frac{X_C}{R + X_C} = \frac{1/\omega C}{R + 1/\omega C} = \frac{1}{1 + \omega RC} \quad \text{(aproximado!)} \tag{1.27}$$

Temos essa relação plotada na Figura 1.91 (e também a de seu primo, o *filtro passa-altas*), juntamente com seus resultados exatos, que entenderemos em breve, na Seção 1.7.8.

Você pode ver que o circuito passa baixas frequências completamente (porque, em baixas frequências, a reatância do capacitor é muito alta, e por isso é como um divisor com um resistor menor acima de um maior) e que ele bloqueia as frequências altas. Em particular, a transição de "passar" para "bloquear" (muitas vezes, denominada ponto de interrupção) ocorre a uma frequência ω_0 na qual a reatância do capacitor ($1/\omega_0 C$) é igual à resistência R: $\omega_0 = 1/RC$. Em frequências muito além da transição (onde o produto $\omega RC \gg 1$), a saída diminui inversamente com o aumento da frequência; o que faz sentido, pois a reação do capacitor, já muito menor do que R, continua caindo como $1/\omega$. É interessante notar que, mesmo "ignorando os deslocamentos de fase", a equação (e gráfico) para a relação de tensões é muito precisa em ambas as frequências baixas e altas e está apenas ligeiramente errada quanto à frequência de transição, na qual a relação correta é $V_{out}/V_{in} = 1/\sqrt{2} \approx 0{,}7$, em vez do 0,5 que temos.[38]

[37] Mais adiante, estudaremos os *indutores*, que também têm um deslocamento de fase de 90° (embora de sinal oposto) e também são caracterizados por uma reatância X_L.

[38] Naturalmente, ela não consegue prever nada sobre os desvios de fase neste circuito. Como veremos mais adiante, a fase do sinal de saída atrasa a entrada em 90° nas frequências altas, indo suavemente a partir de 0° em baixas frequências, com um atraso de 45º em ω_0 (ver Figura 1.104 na Seção 1.7.9).

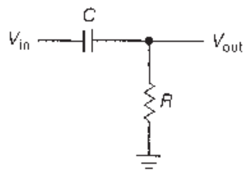

FIGURA 1.92 Filtro passa-altas.

B. Filtro Passa-Altas RC (Aproximado)

Você obtém o comportamento inverso (passa as altas frequências e bloqueia as baixas) trocando R e C, como na Figura 1.92. Tratando-o como um divisor de tensão dependente da frequência, e ignorando mais uma vez os deslocamentos de fase, obtemos (ver Figura 1.91)

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} \asymp \frac{R}{R+X_C} = \frac{R}{R+1/\omega C} = \frac{\omega RC}{1+\omega RC} \quad (aproximado!) \tag{1.28}$$

As altas frequências (acima da mesma frequência de transição que antes, $\omega \gg \omega_0 = 1/RC$) passam (porque a reatância do capacitor é muito menor do que R), enquanto frequências muito abaixo da transição são bloqueadas (a reatância do capacitor é muito superior a R). Como antes, a equação e o gráfico são precisos em ambas as extremidades, e apenas ligeiramente errados na transição, em que a relação correta é, mais uma vez, $V_{out}/V_{in} = 1/\sqrt{2}$.

C. Capacitor de Bloqueio

Às vezes, você quer deixar alguma banda de frequências de sinal passar através de um circuito, mas deseja bloquear qualquer tensão CC estacionária que possa estar presente (veremos como isso pode acontecer quando aprendermos sobre amplificadores no próximo capítulo). Você pode fazer o trabalho com um filtro passa-altas RC se escolher a frequência de transição corretamente: um filtro passa-altas sempre bloqueia CC. Assim, o que você deve fazer é escolher valores de componentes de modo que a frequência de transição seja *inferior* a todas as frequências de interesse. Essa é uma das utilizações mais frequentes de um capacitor e é conhecida como *capacitor de bloqueio* CC.

Por exemplo, cada amplificador de áudio estéreo tem todas as suas entradas acopladas capacitivamente, porque ele não sabe em qual nível CC os sinais de entrada podem estar sobrepostos. Em tal aplicação de acoplamento, você deve sempre escolher R e C de modo que todas as frequências de interesse (neste caso, 20 Hz a 20 kHz) passem sem perdas (atenuação). Isso determina o produto RC: $RC > 1/\omega_{min}$, para o qual você pode escolher $f_{mín} \approx 5$ Hz e, então, $RC = 1/\omega_{mín} = 1/2\pi f_{mín} \approx 30$ ms.

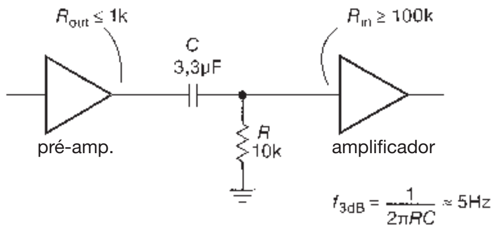

FIGURA 1.93 "Capacitor de bloqueio": um filtro passa-altas para o qual todas as frequências de sinal de interesse estão na banda de passagem.

Você obteve o produto, mas ainda tem que escolher valores individuais para R e C. Para fazer isso, note que o sinal de entrada vê uma carga igual a R nas frequências do sinal (onde a reatância de C é pequena – é apenas um pedaço de fio), você, então, escolha R como uma carga razoável – ou seja, não tão pequeno, que seja difícil de acionar; e não tão grande, que torne o circuito propenso a captar sinal de outros circuitos nas proximidades. No mundo do áudio, é comum ver um valor de 10 kΩ, por isso, podemos escolher esse valor, para o qual o C correspondente é 3,3 μF (Figura 1.93). O circuito conectado à saída deve ter uma resistência de entrada muito maior do que 10 kΩ, para evitar os efeitos de carga na saída do filtro; e o circuito de condução deve ser capaz de acionar uma carga de 10 kΩ sem atenuação significativa (perda de amplitude de sinal), para evitar efeitos de carga do circuito pelo filtro sobre a fonte do sinal. É importante notar que o nosso modelo aproximado, ignorando deslocamentos de fase, é perfeitamente adequado para o projeto de um capacitor de bloqueio; isso acontece porque a banda do sinal está totalmente na banda de passagem, na qual os efeitos dos deslocamentos de fase são desprezíveis.

Nesta seção, temos pensado no domínio da frequência (ondas senoidais de frequência f). Porém, é útil pensar no domínio do tempo, em que, por exemplo, você pode usar um capacitor de bloqueio para acoplar pulsos ou ondas quadradas. Em tais situações, você encontra *distorção* de forma de onda, sob a forma de "inclinação" e *overshoot* (sobrelevação) (em vez da simples atenuação de amplitude e deslocamentos de fase que você obtém com ondas senoidais). Pensando no domínio do tempo, o critério que você usa para evitar a distorção de forma de onda em um pulso de duração T é que a constante de tempo $\tau = RC \gg T$. A inclinação resultante é de aproximadamente T/τ (seguido por um *overshoot* comparável na próxima transição).

Muitas vezes, você precisa saber a reatância de um capacitor em uma determinada frequência (por exemplo, para o projeto de filtros). A Figura 1.100, na Seção 1.7.8, fornece um gráfico muito útil que abrange grandes intervalos de capacitância e frequência, dando o valor de $X_C = 1/2\pi f C$.

D. Acionamento e Efeito de Carga de Filtros *RC*

Este exemplo de capacitor de bloqueio de áudio levantou a questão do acionamento e efeito de carga do filtro *RC*. Como discutimos na Seção 1.2.5A, no contexto de divisores de tensão, geralmente é preferível organizar as coisas de modo que o circuito a ser acionado não seja uma carga significativa para a resistência de acionamento (resistência equivalente de Thévenin) da fonte de sinal.

O mesmo raciocínio se aplica aqui, mas com um tipo generalizado de resistência que inclui a reatância de capacitores (e indutores), conhecida como *impedância*. Assim, a impedância da fonte de sinal deverá geralmente ser pequena quando comparada com a impedância do que será acionado.[39] Em breve, teremos uma maneira precisa de falar de impedância, mas é correto dizer que, sem considerar os deslocamentos de fase, a impedância de um capacitor é igual à sua reatância.

O que queremos saber, então, são as impedâncias de entrada e saída dos dois filtros *RC* simples (passa-baixas e passa-altas). Isso parece complicado, pois há quatro impedâncias e todas elas variam com a frequência. No entanto, se você fizer a pergunta da maneira certa, a resposta é simples, e a mesma em todos os casos!

Primeiro, suponha que, em cada caso, a coisa certa esteja sendo feita para a outra extremidade do filtro: quando queremos saber a impedância de entrada, consideramos que a saída aciona uma alta impedância (em comparação com a sua própria); e, quando queremos saber a impedância de saída, consideramos que a entrada é acionada por uma fonte de sinal de baixa impedância (Thévenin) interna. Em segundo lugar, colocamos de lado as variações de impedâncias com a frequência, procurando saber apenas o valor de *pior caso*; ou seja, nos importamos apenas com a impedância de saída *máxima* que um circuito de filtro pode ter (porque isso é a pior situação para o acionamento de uma carga), e nos preocupamos somente com a impedância de entrada *mínima* (porque essa é mais difícil de ser acionada).

Agora, a resposta é surpreendentemente simples: em todos os casos, a impedância de pior caso é exatamente *R*.

Exercício 1.23 Mostre que a afirmação anterior está correta.

Assim, por exemplo, se você quiser pendurar um filtro passa-baixas *RC* na saída de um amplificador cuja resistência de saída é 100 Ω, comece com $R = 1\text{k}$ e, em seguida, escolha *C* para o ponto de interrupção que você deseja. Certifique-se de que tudo o que exerce carga na saída tenha uma impedância de entrada de, pelo menos, 10k. Você não errará.

Exercício 1.24 Projete um filtro *RC* "passa-faixa" de dois estágios, em que o primeiro estágio seja um passa-altas com um ponto de interrupção em 100 Hz e o segundo estágio seja um passa-baixas com um ponto de interrupção em 10 kHz. Considere que a fonte do sinal de entrada tem uma impedância de 100 Ω. Qual é a impedância de saída de pior caso do seu filtro e, portanto, qual é a impedância de carga mínima recomendada?

1.7.2 Reatância de Indutores

Antes de embarcar em um tratamento totalmente correto de impedância, repleto de exponenciais complexas e coisas semelhantes, usaremos nossos truques de aproximação para descobrir a reatância de um indutor.

Funciona como antes: imaginamos um indutor *L* acionado por uma fonte de tensão senoidal de frequência angular ω, de tal modo que flua uma corrente $I(\text{t}) = I_0 \text{sen}\, \omega t$.[40] Então, a tensão sobre o indutor é

$$V(t) = L\frac{dI(t)}{dt} = L\omega I_0 \cos \omega t.$$

E, assim, a relação entre os *módulos* de tensão e corrente – a grandeza semelhante à resistência denominada *reatância* – é exatamente

$$\frac{|V|}{|I|} = \frac{L\omega I_0}{I_0} = \omega L.$$

Então, para um indutor,

$$X_L = \omega L.$$

Indutores, assim como capacitores, têm uma reatância dependente da frequência; no entanto, aqui a reatância aumenta com o *aumento* da frequência (o oposto dos capacitores, onde ela *diminui* com o aumento da frequência). Assim, em uma visualização mais simples, um indutor em série pode ser utilizado para a passagem de CC e de baixas frequências (onde a sua reatância for pequena) enquanto bloqueia altas frequências (onde a sua reatância é alta). Muitas vezes, você vê indutores utilizados dessa maneira, especialmente em circuitos que operam em frequências de rádio; nessa aplicação, eles, às vezes, são denominadas *choques*.

1.7.3 Tensões e Correntes como Números Complexos

Neste ponto, é necessário utilizar um pouco de álgebra complexa; pode ser que você queira ignorar a matemática em algumas das seções a seguir, tomando nota dos resultados à medida que os deduzimos. Não é necessário um conhecimento dos detalhes matemáticos para a compreensão do restante do livro. Muito pouco de matemática será utilizado em capítulos posteriores. A seção à frente é, seguramente, a mais difícil para o leitor com pouca preparação matemática. *Não desanime*!

[39] Com duas importantes exceções – a saber, linhas de transmissão e fontes de corrente.

[40] Tomamos o caminho fácil aqui, especificando a corrente em vez da tensão; somos recompensados com uma derivada simples (em vez de uma integral simples!).

Como acabamos de ver, não pode haver deslocamentos de fase entre a tensão e a corrente em um circuito CA sendo acionado por uma onda senoidal em alguma frequência. No entanto, enquanto o circuito possuir apenas elementos *lineares* (resistores, capacitores, indutores), as magnitudes das correntes em todos os pontos do circuito ainda serão proporcionais à magnitude da tensão de acionamento, de modo que podemos esperar encontrar alguma generalização de tensão, corrente e resistência, a fim de resgatar a lei de Ohm. Evidentemente, um único número não é suficiente para especificar a corrente, por exemplo, em algum ponto do circuito, porque devemos, de algum modo, ter informação sobre o módulo e o desvio de fase.

Embora possamos imaginar especificar os módulos e deslocamentos de fase de tensões e correntes em qualquer ponto do circuito escrevendo-os explicitamente, por exemplo, $V(t) = 23{,}7\ \text{sen}(377t + 0{,}38)$, verifica-se que podemos atender mais às nossas necessidades simplesmente usando a álgebra de números complexos para representar as tensões e correntes. Então, podemos simplesmente somar ou subtrair as representações de números complexos em vez de laboriosamente ter que somar ou subtrair as funções senoidais reais no tempo. Como as verdadeiras tensões e correntes são quantidades reais que variam com o tempo, temos de desenvolver uma regra para conversão de quantidades reais para suas representações, e vice-versa. Lembrando mais uma vez de que estamos falando de uma única frequência de onda senoidal, ω, concordamos em usar as seguintes regras.

1. Tensões e correntes são representadas pelas quantidades complexas $\mathbf{V}$ e $\mathbf{I}$. A tensão $V_0 \cos(\omega t + \phi)$ deve ser representada pelo número complexo $V_0 e^{j\phi}$. Lembre-se de que $e^{j\phi} = \cos\phi + j\ \text{sen}\ \phi$, em que $j = \sqrt{-1}$.
2. Obtemos tensões e correntes reais multiplicando suas representações de números complexos por $e^{j\omega t}$ e, em seguida, tomamos a parte real: $V(t) = \mathscr{R}e(\mathbf{V}e^{j\omega t})$, $I(t) = \mathscr{R}e(\mathbf{I}e^{j\omega t})$.

   Em outras palavras,

tensão de circuito versus tempo		representação de número complexo
$V_0 \cos(\omega t + \phi)$	$\longrightarrow$ $\longleftarrow$ multiplique por $e^{j\omega t}$ e obtenha a parte real	$V_0 e^{j\phi} = a + jb$

(Em eletrônica, o símbolo j é usado no lugar de i na exponencial, a fim de evitar confusão com o símbolo i, que significa corrente de pequeno sinal.) Assim, no caso geral, as tensões e correntes reais são dadas por

$$\begin{aligned} V(t) &= \mathscr{R}e(\mathbf{V}e^{j\omega t}) \\ &= \mathscr{R}e(\mathbf{V})\cos\omega t - \mathscr{I}m(\mathbf{V})\,\text{sen}\,\omega t \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I(t) &= \mathscr{R}e(\mathbf{I}e^{j\omega t}) \\ &= \mathscr{R}e(\mathbf{I})\cos\omega t - \mathscr{I}m(\mathbf{I})\,\text{sen}\,\omega t. \end{aligned}$$

Por exemplo, uma tensão cuja representação complexa é

$$\mathbf{V} = 5j$$

corresponde a uma tensão (real) em função do tempo de

$$\begin{aligned} V(t) &= \mathscr{R}e[5j\cos\omega t + 5j(j)\,\text{sen}\,\omega t] \\ &= -5\,\text{sen}\,\omega t \text{ volts.} \end{aligned}$$

1.7.4 Reatância de Capacitores e Indutores

Com essa convenção, podemos aplicar a complexa lei de Ohm corretamente para circuitos que contêm capacitores e indutores, assim como para os resistores, uma vez que sabemos a reatância do capacitor ou indutor. Descobriremos o que isso significa. Começamos com uma tensão senoidal simples $V_0 \cos \omega t$ aplicada em um capacitor:

$$V(t) = \mathscr{R}e(V_0 e^{j\omega t}).$$

Então, utilizando $I = C(dV(t)/dt)$, obtemos

$$\begin{aligned} I(t) &= -V_0 C\omega\,\text{sen}\,\omega t = \mathscr{R}e\left(\frac{V_0 e^{j\omega t}}{-j/\omega C}\right), \\ &= \mathscr{R}e\left(\frac{V_0 e^{j\omega t}}{\mathbf{Z}_C}\right) \end{aligned}$$

isto é, para um capacitor,

$$\mathbf{Z}_C = -j/\omega C \quad (= -jX_C);$$

$\mathbf{Z}_C$ é a impedância de um capacitor na frequência ω; ela é igual em módulo à reatância $X_C = 1/\omega C$ que encontramos anteriormente, mas com um fator de $-j$ que responde por 90° de deslocamento de fase adiantado da corrente em função da tensão. Como um exemplo, um capacitor de 1 μF tem uma impedância de $-2.653\,j\Omega$ em 60Hz, e $-0{,}16j\Omega$ em 1 MHz. As reatâncias correspondentes são 2653 Ω e 0,16 Ω.[41] Sua reatância (e também a sua impedância) em CC é infinita.

Se fizéssemos uma análise semelhante para um indutor, encontraríamos

$$\mathbf{Z}_L = j\omega L \quad (= jX_L).$$

Um circuito contendo apenas capacitores e indutores sempre tem uma impedância puramente imaginária, o que significa que a tensão e a corrente estão sempre 90° fora de fase – ele é puramente reativo. Quando o circuito contém resistores, tem

[41] Note a convenção de que a reatância X_C é um número real (o deslocamento de fase de 90° está implícito no termo "reatância"), mas a impedância correspondente é puramente imaginária: $Z = R - jX$.

também uma parte real da impedância. O termo “reatância”, nesse caso, significa apenas a parte imaginária.

1.7.5 A Lei de Ohm Generalizada

Com estas convenções para representar tensões e correntes, a lei de Ohm toma uma forma simples. Ela é simplesmente

$$\mathbf{I} = \mathbf{V}/\mathbf{Z},$$
$$\mathbf{V} = \mathbf{IZ},$$

em que a tensão representada por **V** é aplicada no circuito de impedância **Z**, resultando em uma corrente representada por **I**. A impedância complexa de dispositivos em série ou em paralelo obedece às mesmas regras que a resistência:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{Z_1} + \mathbf{Z_2} + \mathbf{Z_3} + \cdots \quad \text{(em série)} \qquad (1.30)$$

$$\mathbf{Z} = \frac{1}{\dfrac{1}{\mathbf{Z_1}} + \dfrac{1}{\mathbf{Z_2}} + \dfrac{1}{\mathbf{Z_3}} + \cdots} \quad \text{(em paralelo)} \qquad (1.31)$$

Por fim, para completar, resumimos aqui as fórmulas para a impedância de resistores, capacitores e indutores:

$$\begin{aligned} \mathbf{Z_R} &= R && \text{(resistor)} \\ \mathbf{Z_C} &= -j/\omega C = 1/j\omega C && \text{(capacitor)} \qquad (1.32) \\ \mathbf{Z_L} &= j\omega L && \text{(indutor)} \end{aligned}$$

Com essas regras, podemos analisar diversos circuitos CA pelos mesmos métodos gerais que foram utilizados ao lidarmos com circuitos CC, isto é, a aplicação das fórmulas para circuitos em série e paralelo e a lei de Ohm. Nossos resultados para circuitos tais como divisores de tensão parecerão quase os mesmos de antes. Para multiplicarmos redes conectadas, podemos usar as leis de Kirchhoff, assim como em circuitos CC, neste caso utilizando as representações complexas para V e I: a soma das (complexas) quedas de tensão em torno de uma malha fechada é zero, e a soma das (complexas) correntes em um ponto é zero. A última regra implica, como em circuitos CC, que a corrente (complexa) em um circuito em série é a mesma em todos os pontos.

Exercício 1.25 Use as regras precedentes para a impedância de dispositivos em paralelo e em série para deduzir as fórmulas (1.17) e (1.18) para a capacitância de dois capacitores (a) em paralelo e (b) em série. *Dica*: em cada caso, considere que os capacitores individuais tenham capacitâncias C_1 e C_2. Determine a impedância da combinação em paralelo ou em série; então, iguale-a com a impedância de um capacitor com capacitância C. Em seguida, determine C.

Experimentaremos essas técnicas no circuito mais simples que se possa imaginar, uma tensão alternada aplicada em um capacitor, que vimos anteriormente, na Seção 1.7.1. Então, depois de um breve olhar sobre a potência em circuitos reativos (para terminar de preparar o terreno), analisaremos (corretamente, desta vez) os circuitos de filtros *RC* passa-baixas e passa-altas simples, porém extremamente importantes e úteis.

Imagine colocar um capacitor de 1 μF em uma rede elétrica de 115 V(RMS)/60 Hz. Qual o valor da corrente que flui? Usando a lei de Ohm complexa, temos

$$\mathbf{Z} = -j/\omega C.$$

Portanto, a corrente é dada por

$$\mathbf{I} = \mathbf{V}/\mathbf{Z}.$$

A fase da tensão é arbitrária, de modo que escolheremos **V** = A, ou seja, $V(t) = A \cos \omega t$, onde a amplitude $A = 115\sqrt{2} \approx$ 163 volts. Então,

$$\mathbf{I} = j\omega CA \approx 0.061 \,\mathrm{sen}\, \omega t.$$

A corrente resultante tem uma amplitude de 61 mA (43 mA RMS) e está adiantada 90° em relação à tensão. Isso concorda com o nosso cálculo anterior. De forma mais simples, poderíamos ter notado que a impedância do capacitor é imaginária negativa, então, qualquer que seja a fase absoluta de V, a fase de I_{cap} tem de estar adiantada 90°. E, em geral, o ângulo de fase entre a corrente e a tensão, para qualquer circuito *RLC* de dois terminais, é igual ao ângulo da impedância (complexa) desse circuito.

Observe que, se quiséssemos saber apenas o módulo da corrente, não importando a fase relativa, poderíamos ter evitado fazer qualquer álgebra complexa: se

$$\mathbf{A} = \mathbf{B}/\mathbf{C}$$

então,

$$A = B/C$$

em que A, B e C são os módulos dos respectivos números complexos; isso vale para multiplicação também (ver Exercício 1.18). Assim, neste caso,

$$I = V/Z = \omega CV$$

Esse truque, que já utilizamos anteriormente (porque não conhecíamos um melhor), é frequentemente útil.

Surpreendentemente, não existe nenhuma potência dissipada pelo capacitor neste exemplo. Tal atividade não aumentaár a sua conta de energia elétrica; você verá por que na próxima seção. Então, seguiremos para os circuitos que contêm resistores e capacitores com a nossa lei de Ohm complexa.

Exercício 1.26 Mostre que, se $\mathbf{A} = \mathbf{BC}$, então $A = BC$, em que A, B e C são módulos. *Dica*: represente cada número complexo na forma polar, ou seja, $\mathbf{A} = Ae^{i\theta}$.

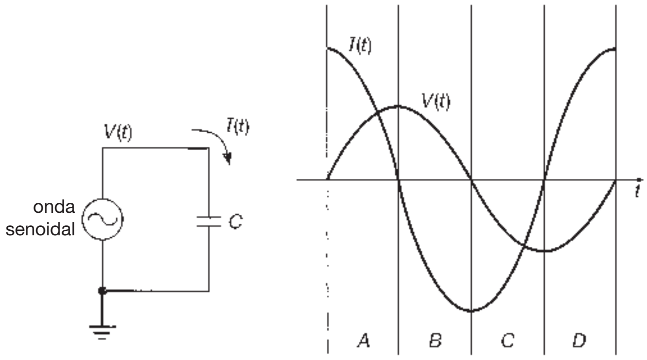

FIGURA 1.94 A potência fornecida a um capacitor é zero ao longo de um ciclo senoidal completo, devido ao deslocamento de fase de 90° entre tensão e corrente.

1.7.6 Potência em Circuitos Reativos

A potência instantânea entregue a qualquer elemento do circuito é sempre dada pelo produto $P = VI$. No entanto, em circuitos reativos em que V e I simplesmente não são proporcionais, você não pode simplesmente multiplicar as suas amplitudes. Coisas engraçadas podem acontecer; por exemplo, o sinal do produto pode inverter ao longo de um ciclo do sinal CA. A Figura 1.94 apresenta um exemplo. Durante os intervalos de tempo A e C, a energia está sendo entregue ao capacitor (embora a uma taxa variável), fazendo com que ele carregue; sua energia armazenada aumenta (potência é a taxa de variação de energia). Durante os intervalos B e D, a potência entregue ao capacitor é negativa; ele está descarregando. A potência média durante todo um ciclo deste exemplo é, na verdade, exatamente zero, uma afirmação que é sempre verdadeira para qualquer elemento de circuito puramente reativo (indutores, capacitores ou qualquer combinação dos mesmos). Se você conhece a sua integral trigonométrica, o próximo exercício mostrará como provar isso.

Exercício 1.27 Exercício Opcional: prove que um circuito cuja corrente está 90° fora de fase com a tensão de acionamento não consome energia, em média, em um ciclo completo.

Como é que encontraremos a potência média consumida por um circuito arbitrário? Em geral, podemos imaginar adicionar pequenos pedaços do produto VI, em seguida, dividindo-o pelo tempo decorrido. Em outras palavras,

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T V(t)I(t)\,dt, \tag{1.33}$$

em que T é o tempo para um ciclo completo. Felizmente, isso quase nunca é necessário. Em vez disso, é fácil mostrar que a potência média é dada por

$$P = \mathscr{R}e(\mathbf{V}\mathbf{I}^*) = \mathscr{R}e(\mathbf{V}^*\mathbf{I}), \tag{1.34}$$

em que **V** e **I** são amplitudes RMS complexas (e um asterisco significa *conjugado complexo* – veja a revisão de matemática, Anexo A, se isto não lhe for familiar).

Daremos um exemplo. Considere o circuito anterior, com uma onda senoidal de 1 volt (RMS) acionando um capacitor. Para simplificar, faremos tudo com amplitudes RMS. Temos

$$\mathbf{V} = 1,$$

$$\mathbf{I} = \frac{\mathbf{V}}{-j/\omega C} = j\omega C,$$

$$P = \mathscr{R}e(\mathbf{V}\mathbf{I}^*) = \mathscr{R}e(-j\omega C) = 0.$$

Isto é, a potência média é zero, como mencionado anteriormente.

Como outro exemplo, considere o circuito mostrado na Figura 1.95. Nossos cálculos são estes:

$$\mathbf{Z} = R - \frac{j}{\omega C},$$
$$\mathbf{V} = V_0,$$
$$\mathbf{I} = \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{Z}} = \frac{V_0}{R-(j/\omega C)} = \frac{V_0[R+(j/\omega C)]}{R^2+(1/\omega^2C^2)},$$
$$P = \mathscr{R}e(\mathbf{V}\mathbf{I}^*) = \frac{V_0^2 R}{R^2+(1/\omega^2C^2)}.$$

(Na terceira linha, multiplicamos numerador e denominador pelo conjugado complexo do denominador a fim de tornar o denominador real.) A potência[42] calculada é menor do que o produto dos módulos de **V** e **I**. Na verdade, a sua relação é denominada *fator de potência*:

$$|\mathbf{V}||\mathbf{I}| = \frac{V_0^2}{[R^2+(1/\omega^2C^2)]^{1/2}},$$

$$\text{fator de potência} = \frac{\text{potência}}{|\mathbf{V}||\mathbf{I}|}$$

$$= \frac{R}{[R^2+(1/\omega^2C^2)]^{1/2}}$$

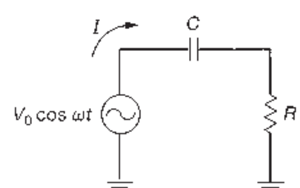

FIGURA 1.95 Potência e fator de potência em um circuito *RC* em série.

[42] É sempre uma boa ideia verificar valores limite: aqui vemos que $P \to V^2/R$ para C grande; e, para C pequeno, o módulo da corrente $|I| \to V_0/X_C$, ou $V_0\omega C$, assim, $P \to I^2R = V_0^2\omega^2C^2R$, de acordo com ambos os limites.

neste caso. O fator de potência é o cosseno do ângulo de fase entre a tensão e a corrente, e que varia de 0 (circuito puramente reativo) para 1 (puramente resistivo). Um fator de potência de menos de 1 indica uma componente de corrente reativa.[43] É interessante notar que o fator de potência vai para a unidade e a potência dissipada vai para V^2/R, no limite de capacitância grande (ou de alta frequência), em que a reação do capacitor se torna muito menor do que R.

Exercício 1.28 Mostre que toda a potência média entregue ao circuito anterior acaba no resistor. Para fazer isso, calcule o valor de V_R^2/R. Qual é a potência, em watts, para um circuito em série de um capacitor de 1 μF e uma resistência de 1,0k colocado entre os 115 volts (RMS)/60 Hz da rede elétrica?

O fator de potência é um assunto sério na distribuição de energia elétrica em grande escala, pois as correntes reativas não resultam em energia útil a ser entregue à carga, mas custa muito à companhia de energia elétrica em termos de aquecimento I^2R na resistência dos geradores, transformadores e fiação. Embora os usuários residenciais sejam cobrados somente pela potência "real" $[\mathscr{Re}(\mathbf{VI}^*)]$, as concessionárias de energia cobram os usuários industriais de acordo com o fator de potência. Isso explica os bancos de capacitores que você vê por trás de grandes fábricas, construídos para cancelar a reatância indutiva de máquinas industriais (ou seja, motores).

Exercício 1.29 Mostre que a adição de um capacitor em série de valor $C = 1/\omega^2 L$ torna o fator de potência igual a 1,0 em um circuito RL em série. Agora faça a mesma coisa, mas trocando a palavra "série" por "paralelo".

1.7.7 Divisores de Tensão Generalizados

O nosso divisor de tensão original (Figura 1.6) consistia de um par de resistências em série para o terra, com entrada na parte superior e saída na junção. A generalização desse divisor resistivo simples é um circuito semelhante em que um ou ambos os resistores são substituídos por um capacitor ou indutor (ou uma rede mais complicada feita a partir de R, L e C), como na Figura 1.96. Em geral, a relação de divisão V_{out}/V_{in} de tal divisor não é constante, mas depende da frequência (como já foi visto em nossa abordagem aproximada dos filtros passa-baixas e passa-altas na Seção 1.7.1). A análise é simples:

$$\mathbf{I} = \frac{\mathbf{V}_{in}}{\mathbf{Z}_{total}},$$

$$\mathbf{Z}_{total} = \mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2$$

[43] Ou, para circuitos não lineares, ele indica que a forma de onda de corrente não é proporcional à forma de onda da tensão. Mais sobre isso na Seção 9.7.1.

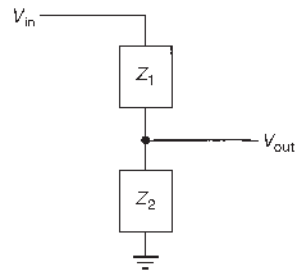

FIGURA 1.96 Divisor de tensão generalizado: um par de impedâncias arbitrárias.

$$\mathbf{V}_{out} = \mathbf{I}\mathbf{Z}_2 = \mathbf{V}_{in}\frac{\mathbf{Z}_2}{\mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2}.$$

Em vez de nos preocuparmos com esse resultado em geral, veremos alguns exemplos simples (mas muito importantes), começando com os filtros RC passa-altas e passa-baixas estudados por aproximação anteriormente.

1.7.8 Filtros *RC* Passa-Altas

Vimos que, por meio da combinação de resistores com capacitores, é possível fazer divisores de tensão dependentes da frequência, devido à dependência que a impedância de um capacitor tem em relação à frequência, $\mathbf{Z}_C = -j/\omega C$. Tais circuitos podem ter a propriedade desejável de passar frequências de sinal de interesse, enquanto rejeita frequências de sinal indesejado. Nesta seção e na próxima, voltamos aos filtros RC passa-baixas e passa-altas simples, corrigindo a análise aproximada da Seção 1.7.1; embora simples, esses circuitos são importantes e amplamente utilizados. O Capítulo 6 e o Apêndice E descrevem filtros de maior sofisticação.

Voltando ao filtro RC passa-altas clássico (Figura 1.92), vemos que a lei de Ohm complexa (ou a equação do divisor de tensão complexo) nos dá

$$\mathbf{V}_{out} = \mathbf{V}_{in}\frac{R}{R - j/\omega C} = \mathbf{V}_{in}\frac{R(R + j/\omega C)}{R^2 + (1/\omega^2 C^2)}.$$

(Para a última etapa, multiplique o numerador e o denominador pelo conjugado complexo do denominador.) Na maioria das vezes, não nos importamos com a fase de V_{out}, apenas com sua amplitude:

$$\begin{aligned} V_{out} &= (\mathbf{V}_{out}\mathbf{V}_{out}^*)^{1/2} \\ &= \frac{R}{[R^2 - (1/\omega^2 C^2)]^{1/2}} V_{in}. \end{aligned}$$

Observe a analogia com um divisor resistivo: onde

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{in}.$$

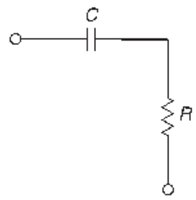

FIGURA 1.97 Impedância de entrada de um filtro passa-altas sem carga.

Aqui, a impedância da combinação *RC* em série (Figura 1.97) é como mostrado na Figura 1.98. Assim, a "resposta" do circuito, ignorando os desvios de fase por meio da tomada dos módulos das amplitudes complexas, é dada por

$$V_{\text{out}} = \frac{R}{[R^2 + (1/\omega^2C^2)]^{1/2}} V_{\text{in}}$$
$$= \frac{2\pi fRC}{[1 + (2\pi fRC)^2]^{1/2}} V_{\text{in}} \tag{1.35}$$

e se parece com a Figura 1.99 (e anteriormente a Figura 1.91).

Note que poderíamos ter conseguido esse resultado imediatamente, tomando a razão entre os módulos das impedâncias, como no Exercício 1.26 e o exemplo imediatamente anterior a ele; o numerador é o módulo da impedância da parte inferior do divisor (*R*), e o denominador é o módulo da impedância da combinação em série de *R* e *C*.

Como observamos anteriormente, a saída é aproximadamente igual à entrada em altas frequências (quão alto? $\omega \gtrsim 1/RC$) e vai para zero em baixas frequências. O filtro

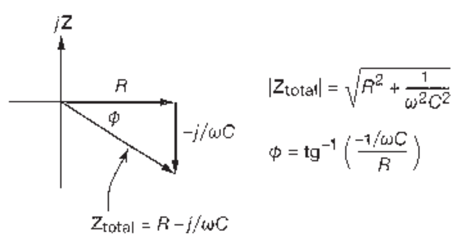

FIGURA 1.98 Impedância RC em série.

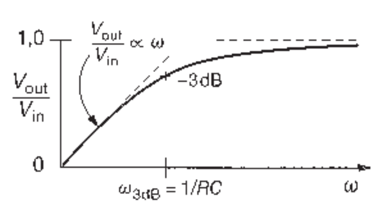

FIGURA 1.99 Resposta de frequência do filtro passa-altas. O deslocamento de fase correspondente varia lentamente de $+90°$ (em $\omega = 0$), passando em $+45°$ (em $\omega_{3\text{dB}}$) até 0° (em $\omega = 0$), análogo ao deslocamento do filtro passa-baixas (Figura 1.104).

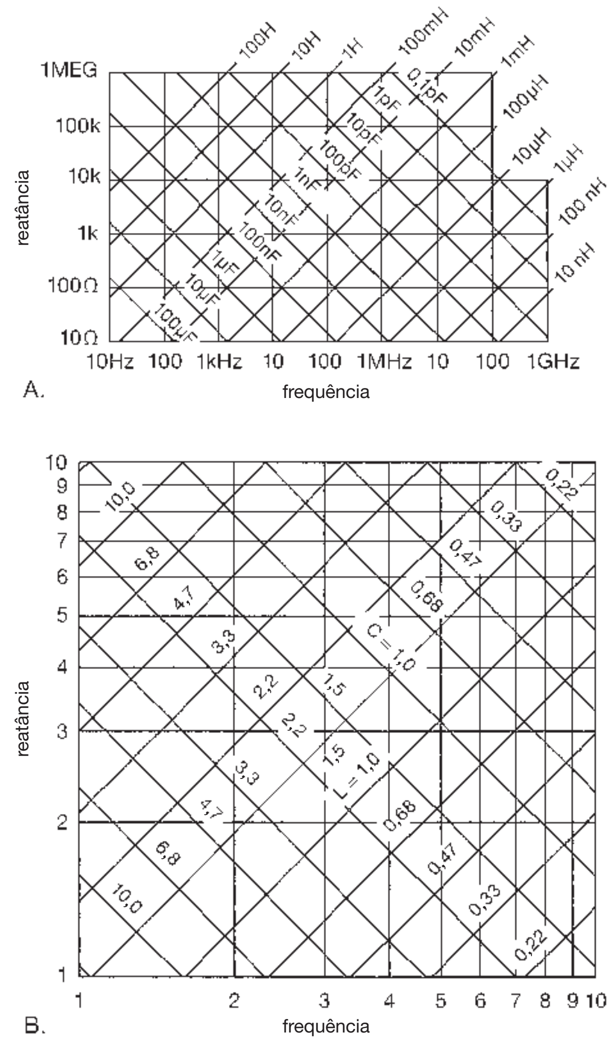

FIGURA 1.100 A: Reatância de indutores e capacitores em função da frequência; todas as décadas são idênticas, com exceção da escala. B: Uma única década da parte A ampliada, com valores de componente padrão de 20% (EIA "E6") mostrados.

passa-altas é muito comum; por exemplo, a entrada do osciloscópio pode ser mudada para "acoplamento CA". Isso é apenas um filtro *RC* de alta frequência com a mudança de inclinação em cerca de 10 Hz (você pode usar o acoplamento CA se quiser observar um pequeno sinal sobreposto a uma grande tensão CC). Engenheiros gostam de se referir ao "ponto de interrupção" de −3 dB de um filtro (ou de qualquer circuitos que se comporte como um filtro). No caso do filtro passa-altas *RC* simples, o ponto de interrupção de −3 dB é dado por

$$f_{3\text{dB}} = 1/2\pi RC.$$

Muitas vezes, você precisa saber a impedância de um capacitor em uma determinada frequência (por exemplo, para o projeto de filtros). A Figura 1.100 fornece um gráfico muito

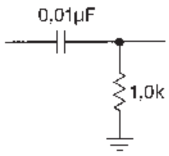

FIGURA 1.101 Exemplo de filtro passa-altas.

útil cobrindo grandes intervalos de capacitância e frequência, dando o valor de $|\mathbf{Z}| = 1/2\pi fC$.

Como um exemplo, considere o filtro mostrado na Figura 1.101. É um filtro passa-altas com o ponto de 3 dB[44] em 15,9 kHz. A impedância da carga acionada por ele deve ser muito maior do que 1,0k, a fim de evitar os efeitos de carga no circuito de saída do filtro, e a fonte de acionamento deve ser capaz de acionar uma carga de 1,0k sem atenuação significativa (perda de amplitude de sinal), a fim de evitar efeitos de carga sobre a fonte de sinal (lembre-se da Seção 1.7.1D para as impedâncias de fonte e carga de pior caso de filtros *RC*).

1.7.9 Filtros *RC* Passa-Baixas

Voltando ao filtro passa-baixas, em que você obtém o comportamento de frequência oposto trocando *R* e *C* (Figura 1.90, repetida aqui como Figura 1.102), encontramos o resultado exato

$$V_{\text{out}} = \frac{1}{(1+\omega^2R^2C^2)^{1/2}}V_{\text{in}}$$

como pode ser visto na Figura 1.103 (e anteriormente na Figura 1.91). O ponto de 3 dB está novamente a uma frequência[45] $f = 1/2\pi RC$. Filtros passa-baixas são bastante úteis na vida real. Por exemplo, um filtro passa-baixas pode ser usado para eliminar a interferência de estações de rádio e televisão nas proximidades (0,5 a 800 MHz), um problema que assola amplificadores de áudio e outros equipamentos eletrônicos sensíveis.

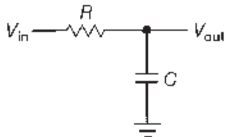

FIGURA 1.102 Filtro passa-baixas.

[44] Frequentemente se omite o sinal negativo para referir-se ao ponto de −3 dB.

[45] Como mencionado na Seção 1.7.1A, muitas vezes, gostamos de definir a frequência de ponto de interrupção $\omega_0 = 1/RC$ e trabalhar com as relações de frequência ω/ω_0. Então, uma forma útil para o denominador na Equação 1.36 é $\sqrt{1+(\omega/\omega_0)^2}$.. O mesmo se aplica para a Equação 1.35, em que o numerador se torna ω/ω_0.

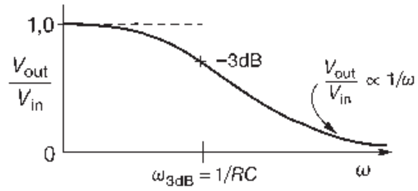

FIGURA 1.103 Resposta de frequência do filtro passa-baixas.

Exercício 1.30 Mostre que a expressão precedente para a resposta de um filtro passa-baixas *RC* está correta.

A saída do filtro passa-baixas pode ser vista como uma fonte de sinal por si só. Quando acionado por uma tensão CA perfeita (impedância de fonte zero), a saída do filtro parece *R* em baixas frequências (a fonte de sinal perfeita pode ser substituída por um curto, ou seja, por sua impedância de fonte de pequeno sinal, para o propósito do cálculo da impedância). A impedância cai para zero em altas frequências, nas quais o capacitor domina a impedância de saída. O sinal que aciona o filtro vê uma carga *R* mais a resistência de carga em frequências baixas, caindo para apenas R em altas frequências. Como observamos na Seção 1.7.1D, a impedância da fonte de pior caso e a impedância de carga de pior caso de um filtro *RC* (passa-baixas ou passa-altas) são ambas iguais a *R*.

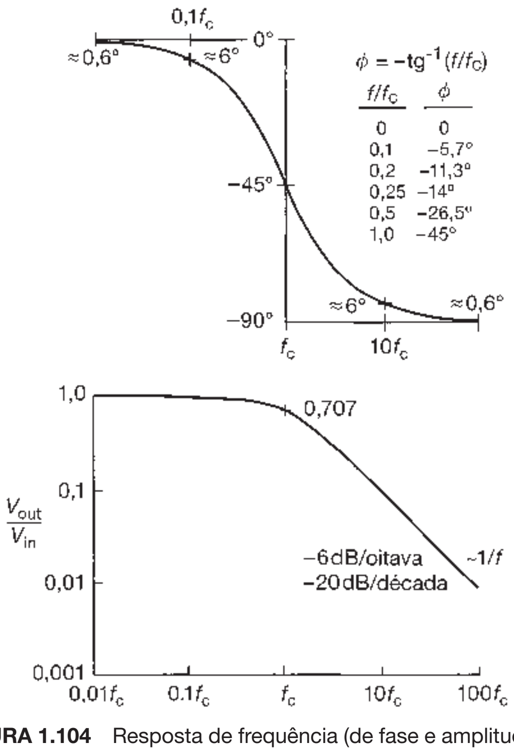

FIGURA 1.104 Resposta de frequência (de fase e amplitude) do filtro passa-baixas plotado em eixos logarítmicos. Note que o deslocamento de fase é −45° no ponto de −3 dB e está a 6° do seu valor assintótico para uma década de variação de frequência.

Na Figura 1.104, traçamos a mesma resposta do filtro passa-baixas com eixos logarítmicos, que é a maneira mais comum de isto ser feito. Você pode pensar no eixo vertical como decibéis e no eixo horizontal como oitavas (ou décadas). Em tal gráfico, distâncias iguais correspondem a relações iguais. Representamos também graficamente o desvio de fase, usando um eixo linear vertical (graus) e o mesmo eixo de frequência logarítmica. Esse tipo de gráfico é bom para ver a resposta detalhada, mesmo quando é muito atenuada (como à direita); veremos uma série de gráficos como esse no Capítulo 6, quando tratarmos de filtros ativos. Note que a curva de filtro plotada aqui se torna uma linha reta em grandes atenuações, com uma inclinação de −20 dB/década (engenheiros preferem dizer "−6dB/oitava"). Note também que o deslocamento de fase varia lentamente de 0° (em frequências bem abaixo do ponto de interrupção) até −90° (bem acima dele), com um valor de −45° no ponto de −3 dB. A regra prática para filtros *RC* de seção única é que o deslocamento de fase é ≈6° do seu valor assintótico em $0{,}1f_{3db}$ e em $10f_{3db}$

Exercício 1.31 Prove a última afirmação.

Uma questão interessante: é possível fazer um filtro com alguma resposta de amplitude especificada arbitrária e alguma outra resposta de fase especificada arbitrária? Surpreendentemente, a resposta é não: as demandas de causalidade (ou seja, que a resposta deve seguir a causa, e não precedê-la) forçam uma relação entre a resposta de fase e a amplitude de filtros analógicos realizáveis (conhecida oficialmente como a relação Kramers-Kronig).

1.7.10 Diferenciadores e Integradores *RC* no Domínio da Frequência

O diferenciador *RC* que vimos na Seção 1.4.3 é exatamente o mesmo circuito que o filtro passa-altas desta seção. Na verdade, ele pode ser considerado como qualquer um deles, dependendo de você estar pensando em formas de onda no domínio do tempo ou na resposta no domínio da frequência. Podemos reafirmar a condição de domínio do tempo anterior para o seu bom funcionamento ($V_{out} \ll V_{in}$) em termos da resposta de frequência: para que a saída seja pequena em comparação com a entrada, a frequência do sinal (ou frequências) deve estar bem abaixo do ponto de 3 dB. Isso é fácil de verificar: suponha que tenhamos o sinal de entrada V_{in} = sen ωt. Então, utilizando a equação anterior obtida para a saída do diferenciador, temos

$$V_{out} = RC\frac{d}{dt}\,\text{sen}\,\omega t = \omega RC\cos\omega t,$$

e, assim, $V_{out} \ll V_{in}$ se $\omega RC \ll 1$, ou seja, $RC \ll 1/\omega$. Se o sinal de entrada contém uma faixa de frequências, ele deve suportar as frequências mais elevadas presentes na entrada.

O integrador *RC* (Seção 1.4.4) é o mesmo circuito que o filtro passa-baixas; pelo raciocínio semelhante, o critério para um bom integrador é que as frequências mais baixas do sinal devem estar bem acima do ponto de 3 dB.

1.7.11 Indutores *Versus* Capacitores

Em vez de capacitores, indutores podem ser combinados com resistores para construir filtros passa-baixas (ou passa-altas). Na prática, porém, você raramente vê filtros *RL* passa-baixas ou passa-altas. A razão é que os indutores tendem a ser mais volumosos e caros e o desempenho é inferior (ou seja, eles estão mais longe do ideal) em relação aos capacitores. Se você puder escolher, use um capacitor. Uma exceção importante a essa declaração geral é o uso de anéis de ferrite e choques em circuitos de alta frequência. Você apenas coloca alguns anéis aqui e ali no circuito; eles tornam as interconexões de fio ligeiramente indutivas, aumentando a impedância em frequências muito altas e evitando oscilações, sem acrescentar resistência em série, o que faríamos em um filtro *RC*. Um *choque* de *RF* é um indutor, geralmente de algumas espiras de fio enrolado sobre um núcleo de ferrite, utilizado para o mesmo fim em circuitos de *RF*. Note, no entanto, que indutores são componentes essenciais em (a) circuitos *LC* sintonizados (Seção 1.7.14) e (b) conversores de energia chaveados (Seção 9.6.4).

1.7.12 Diagramas Fasoriais

Há um método gráfico agradável que pode ser útil quando tentamos compreender circuitos reativos. Daremos um exemplo: o fato de um filtro *RC* atenuar 3 dB na frequência $f = 1/2\pi RC$, que deduzimos na Seção 1.7.8. Isso é verdade para os filtros passa-altas e passa-baixas. É fácil ficar um pouco confuso aqui, pois, naquela frequência, a reação do capacitor é igual à resistência do resistor; desse modo, você pode esperar, no primeiro momento, 6 dB de atenuação (um fator de 1/2 na tensão). Isso é o que você obteria, por exemplo, se substituísse o capacitor por um resistor com o mesmo módulo da impedância. A confusão surge porque o capacitor é reativo, mas a questão é esclarecida por um diagrama de fase (Figura 1.105). Os eixos são as componentes real (resistiva) e imaginária (reativa) da impedância. Em um circuito em série como esse, os eixos também representam a tensão (complexa), porque a corrente é a mesma em todos os pontos. Portanto, para esse circuito (pense nele como um divisor de tensão *RC*), a tensão de entrada (aplicada no par *RC* em série) é proporcional ao comprimento da hipotenusa, e a tensão de saída (apenas sobre *R*) é proporcional ao comprimento do segmento *R* do triângulo. O diagrama representa a situação na frequência em que a reatância do capacitor é igual a *R*, isto é, $f = 1/2\pi RC$, e mostra que a relação entre a tensão de saída e a de entrada é $1/\sqrt{2}$, ou seja, −3 dB.

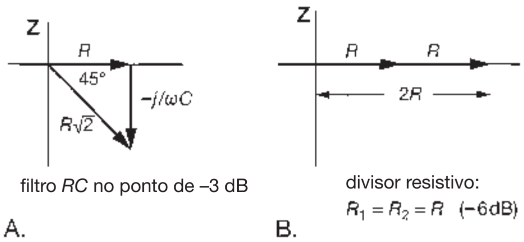

FIGURA 1.105 Diagrama fasorial para o filtro passa-baixas no ponto de 3 dB.

O ângulo entre os vetores fornece o deslocamento de fase da entrada para a saída. No ponto de 3 dB, por exemplo, a amplitude de saída é igual à amplitude de entrada dividida pela raiz quadrada de 2 e está adiantada 45° na fase. Esse método gráfico faz com que seja fácil obter as relações de amplitude e fase em circuitos *RLC*. Você pode usá-lo, por exemplo, para obter a resposta do filtro passa-altas que anteriormente deduzimos algebricamente.

Exercício 1.32 Use um diagrama fasorial para obter a resposta de um filtro passa-altas *RC*: $V_{\text{out}} = V_{\text{in}}R/\sqrt{R^2 + (1/\omega^2C^2)}$.

Exercício 1.33 Em qual frequência um filtro passa-baixas *RC* atenua a saída em 6 dB (tensão de saída igual à metade da tensão de entrada)? Qual é o deslocamento de fase nessa frequência?

Exercício 1.34 Use um diagrama fasorial para obter a resposta do filtro passa-baixas anterior deduzido algebricamente.

No próximo capítulo (Seção 2.2.8), veremos um bom exemplo de diagramas fasoriais em conexão com um circuito de deslocamento de fase e amplitude constante.

1.7.13 "Polos" e Decibéis por Oitava

Olhe novamente para a resposta do filtro passa-baixas *RC* (Figuras 1.103 e 1.104). Mais para a direita do "joelho", a amplitude de saída cai de forma proporcional a 1/*f*. Em uma oitava (como na música, uma oitava é o dobro da frequência), a amplitude de saída cairá pela metade, ou −6 dB; assim, um simples filtro *RC* tem uma queda de 6 dB/oitava. Você pode fazer filtros com várias seções *RC*; então, você obtém 12 dB/oitava (duas seções *RC*), 18 dB/oitava (três seções), e assim por diante. Essa é a maneira usual de descrever como um filtro se comporta além do corte. Outra forma popular é um "filtro de três polos", por exemplo, que significa um filtro com três secções *RC* (ou que se comporta como um). (A palavra "polo" deriva de um método de análise que está além do escopo deste livro e que envolve funções de transferência complexas no plano das frequências complexas, conhecido por engenheiros como "plano *s*".

Um cuidado com filtros de vários estágios: você não pode simplesmente conectar em cascata várias seções de filtros idênticos a fim de obter uma resposta de frequência que seja a concatenação das respostas individuais. A razão é que cada estágio exercerá uma carga significativa no anterior (uma vez que eles são idênticos), alterando a resposta geral. Lembre-se de que a função resposta para os filtros *RC* simples que deduzimos foi baseada em uma fonte acionadora de impedância zero e uma carga de impedância infinita. Uma solução é fazer com que cada seção sucessiva de filtro tenha uma impedância muito maior do que a anterior. Uma melhor solução envolve circuitos ativos como "*buffers*" entre estágios de transistor ou amplificador operacional (AOP), ou, então, filtros ativos. Esses assuntos serão tratados nos Capítulos 2 a 4, 6 e 13.

1.7.14 Circuitos Ressonantes

Quando capacitores são combinados com indutores ou são usados em circuitos especiais denominados filtros ativos, é possível fazer circuitos com características de frequência muito acentuadas (por exemplo, um pico grande na resposta a uma determinada frequência) em comparação com as características graduais de filtros *RC* que temos visto até agora. Esses circuitos encontram aplicações em vários dispositivos de áudio e de RF. Agora daremos uma olhada rápida em circuitos *LC* (falaremos mais sobre eles, e os filtros ativos, no Capítulo 6 e no Apêndice E).

A. Circuitos LC em Paralelo e em Série

Primeiro, considere o circuito mostrado na Figura 1.106. A impedância da combinação *LC* na frequência *f* é precisamente

$$\frac{1}{\mathbf{Z}_{LC}} = \frac{1}{\mathbf{Z}_L} + \frac{1}{\mathbf{Z}_C} = \frac{1}{j\omega L} - \frac{\omega C}{j}$$
$$= j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right),$$

ou seja,

$$\mathbf{Z}_{LC} = \frac{j}{(1/\omega L) - \omega C}.$$

Em combinação com *R*, forma um divisor de tensão. Por causa dos comportamentos opostos de indutores e capacito-

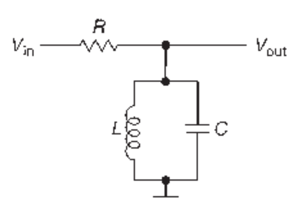

FIGURA 1.106 Circuito ressonante *LC:* filtro passa-faixa.

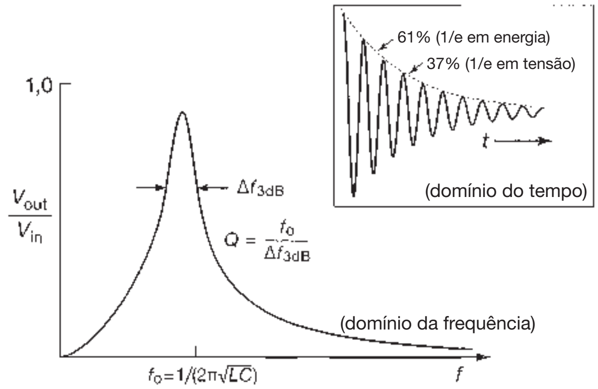

FIGURA 1.107 Resposta de frequência de um circuito "tanque" *LC* em paralelo. O conjunto mostra o comportamento no domínio do tempo: uma forma de onda de oscilação amortecida ("eco") em sequência a um degrau de tensão de entrada ou pulso.

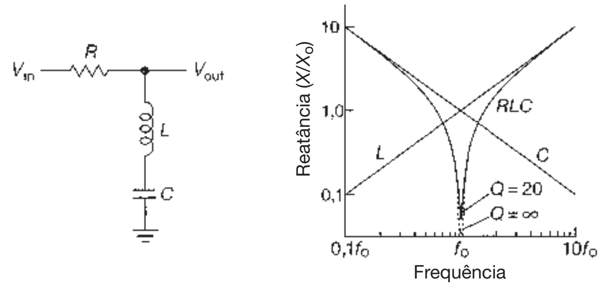

FIGURA 1.108 Filtro *notch LC* ("armadilha"). As reatâncias indutivas e capacitivas se comportam como mostrado, mas o sinal oposto de suas impedâncias complexas faz com que a impedância em série despenque. Para componentes ideais, a reatância do *LC* em série vai completamente a zero na ressonância; para componentes do mundo real, o mínimo é diferente de zero, e geralmente dominado pelo indutor.

res, a impedância de um *LC* em paralelo vai para infinito na *frequência ressonante*

$$f_0 = 1/2\pi\sqrt{LC}$$

(ou seja, $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$), dando um pico na resposta nessa frequência.

A resposta geral é como mostrado na Figura 1.107.

Na prática, as perdas de indutor e capacitor limitam a nitidez do pico, mas, com um bom projeto, essas perdas podem ser muito pequenas. Por outro lado, uma resistência de deterioração do fator *Q* é, às vezes, acrescentada intencionalmente para reduzir a acuidade do pico de ressonância. Esse circuito é conhecido simplesmente como um circuito ressonante *LC* paralelo (ou "circuito sintonizado", ou "tanque") e é amplamente utilizado em circuitos de *RF* para selecionar uma determinada frequência para a amplificação (*L* ou *C* podem ser variáveis, para que se possa sintonizar a frequência de ressonância). Quanto maior for a impedância de acionamento, mais nítido é o pico; não é incomum acioná-los com algo que se aproxima de uma fonte de corrente, como você verá mais adiante. O *fator de qualidade Q* é uma medida da acuidade do pico. Ele é igual à frequência de ressonância dividida pela largura nos pontos de −3 dB. Para um circuito *RLC* em paralelo, $Q = \omega_0 RC$.[46]

Outra variedade de circuito *LC* é o *LC* em série (Figura 1.108). Ao escrever as fórmulas de impedância envolvidas, e assumindo que tanto o capacitor como o indutor são ideais, ou seja, que eles não têm perdas resistivas,[47] você pode se convencer de que a impedância do *LC* vai para zero na ressonância ($f_0 = 1/2\pi\sqrt{LC}$). Tal circuito é uma "armadilha" para os sinais na frequência de ressonância ou próximos a ela, colocando-os em curto para o terra. Mais uma vez, esse circuito tem aplicação principalmente em circuitos de *RF*. A Figura 1.109 mostra a aparência da resposta. O *Q* de um circuito *RLC* em série é $Q = \omega_0 L/R$.[48] Para ver o impacto do aumento de *Q*, observe os gráficos precisos do circuito tanque e da resposta *notch* (resposta em forma de chanfro) na Figura 1.110.

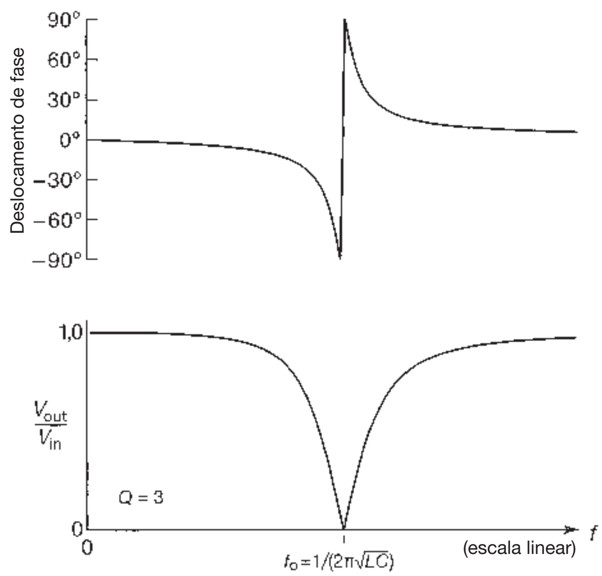

FIGURA 1.109 Frequência e resposta de fase da armadilha *LC* em série. A fase muda abruptamente na ressonância, um efeito observado em outros tipos de ressonadores (ver, por exemplo, a Figura 7.36).

[46] Ou, equivalentemente, $Q = R/X_C = R/X_L$, onde $X_L = X_C$ são a reatância em ω_0.

[47] Ao longo dos estudos, você verá que o comportamento dos componentes reais se distancia do ideal, muitas vezes expresso em termos de uma resistência efetiva em série.

[48] Ou, de forma equivalente, $Q = X_L/R = X_C/R$, em que $X_L = X_C$ são as reatâncias em ω_0.

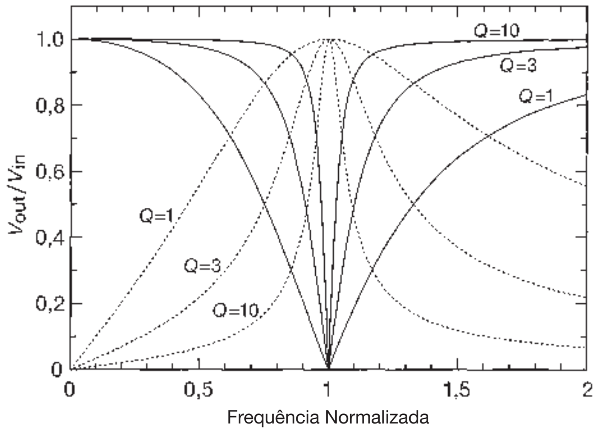

FIGURA 1.110 Resposta do tanque *LC* (curvas pontilhadas) e armadilha (curvas de linha contínua) para alguns valores do fator de qualidade, *Q*.

Exercício 1.35 Determine a resposta (V_{out}/V_{in} em função da frequência) para o circuito armadilha *LC* em série na Figura 1.108.

Essas descrições dos circuitos ressonantes *LC* são formuladas em termos da resposta de frequência, ou seja, no domínio da frequência. No domínio do tempo, você está geralmente interessado na resposta de um circuito a pulsos, ou degraus; nesse domínio, você vê o tipo de comportamento mostrado na inserção da Figura 1.107, um circuito *LC* com $Q = 20$. A tensão do sinal cai para $1/e$ (37%) em Q/π ciclos; a *energia* armazenada (proporcional a v^2) cai para $1/e$ (61% em amplitude) em $Q/2\pi$ ciclos. Pode ser que você prefira pensar em radianos: a energia cai para $1/e$ em Q radianos, e a tensão cai para $1/e$ em $2Q$ radianos. Circuitos *LC* ressonantes não são exclusivos para proporcionar um comportamento de circuito altamente seletivo em frequência; as alternativas incluem cristal de quartzo, cerâmica, e ressonadores de ondas acústicas de superfície (SAW – *surface acoustic-wave*); linhas de transmissão; e cavidades ressonantes.

1.7.15 Filtros *LC*

Ao combinar indutores com capacitores, você pode produzir filtros (passa-baixas, passa-altas e passa-faixa) com um comportamento muito mais acentuado na resposta de frequência do que seria possível com um filtro feito de uma malha *RC* simples, ou a partir de qualquer número de seções *RC* em cascata. Veremos mais sobre isso, e o tópico relacionado filtros ativos, no Capítulo 6. Contudo, vale a pena admirar agora como isso funciona bem, para apreciar a virtude de um simples indutor (um componente de circuito muitas vezes criticado).

Como exemplo, veja a Figura 1.111, uma fotografia de uma placa de circuito de um “misturador-digitalizador” que construímos para um projeto alguns anos atrás (especificamente, um receptor de rádio com 250 milhões de canais simultâneos). Há um monte de coisas na placa, que tem que

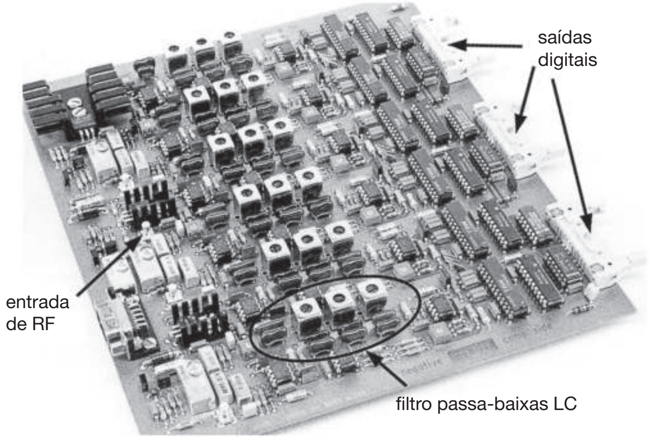

FIGURA 1.111 Existem seis filtros passa-baixas LC nesta placa de circuito, parte do processo de conversão de frequência e digitalização para o qual este “misturador-digitalizador” foi projetado.

deslocar a frequência e digitalizar três bandas de RF; seu projeto poderia ocupar um capítulo de livro. Por ora, apenas observe o filtro irregular dentro da linha oval (existem mais cinco na placa), composto por três indutores (os encapsulamentos metálicos quadrados) e quatro capacitores (os pares de retângulos brilhantes). É um filtro passa-baixas, projetado para cortar em 1,0 MHz; ele evita “*aliases*” (falseamento da frequência do sinal) na saída digitalizada, um assunto que abordaremos no Capítulo 13.

Como ele funciona? A Figura 1.112 mostra uma “varredura de frequência”, em que uma entrada de onda senoidal vai desde 0 Hz a 2 MHz conforme o traço vai da esquerda para a direita na tela. As formas de salsicha são as “envoltórias” da saída de onda senoidal. Se compararmos o filtro *LC* com um filtro passa-baixas *RC* com a mesma frequência de corte, 1 MHz (1 kΩ e 160 pF), o filtro *LC* ganhará, de longe. O filtro *RC* tem desempenho comparativo muito inferior. A rigor, não poderíamos dizer que seu corte é em 1 MHz: ele dificilmente corta tudo.

1.7.16 Outras Aplicações de Capacitores

Em adição às suas utilizações em filtros, circuitos ressonantes, diferenciadores e integradores, capacitores são necessários para várias outras aplicações importantes. Trataremos deles em detalhe mais adiante no livro; eles foram mencionados aqui apenas como uma pré-estreia.

A. Desvio

A impedância de um capacitor diminui com o aumento da frequência. Essa é a base de outra aplicação importante: *desvio* (*bypassing*). Há pontos nos circuitos em que você deseja permitir uma tensão CC, mas você não quer sinais presentes. Colocar um capacitor em paralelo com o elemento de circuito (normalmente, um resistor) ajudará a eliminar todos os si-

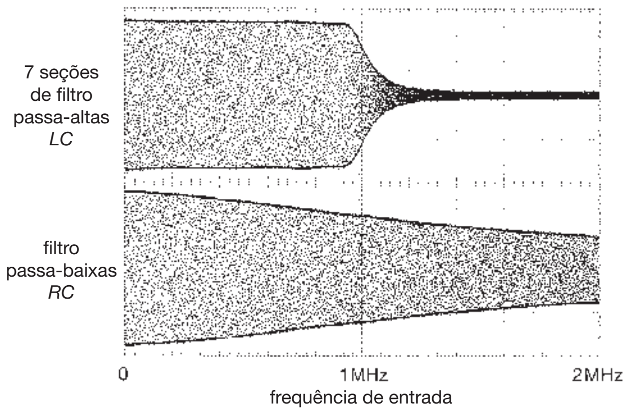

FIGURA 1.112 Varredura de frequência do filtro passa-baixas *LC* mostrado na Figura 1.111 em comparação com um filtro passa-baixas *RC* com a mesma frequência de corte de 1 MHz. O contorno escuro é a envoltória da amplitude da onda senoidal varrida rapidamente, que alcança um aspecto de lixa neste osciloscópio digital de captura.

nais desse ponto. Deve-se escolher o valor do capacitor (não crítico) de forma que a sua impedância nas frequências de sinal seja pequena em comparação com o que ele está desviando. Você verá muito mais sobre isso em capítulos posteriores.

B. Filtragem de Fonte de Alimentação

Vimos esta aplicação na Seção 1.6.3, para filtrar a ondulação de circuitos retificadores. Apesar de os projetistas de circuitos, muitas vezes, chamarem-nos de capacitores de *filtro*, essa é na realidade uma forma de desviar, ou armazenar energia, com capacitores de grande valor; preferimos o termo capacitor de *armazenamento*. E esses capacitores realmente são grandes – eles são os componentes redondos, grandes e brilhantes que você vê dentro da maioria dos instrumentos eletrônicos. Entraremos no projeto de fontes de alimentação CC em detalhe no Capítulo 9.

C. Temporização e Geração de Forma de Onda

Como vimos, um capacitor acionado por uma corrente constante se carrega com uma forma de onda de rampa. Essa é a base de geradores de rampa e dente de serra, usada em geradores de funções analógicos, circuitos de varredura de osciloscópios, conversores analógico-digitais e circuitos de temporização. Os circuitos *RC* também são usados para temporização, e eles formam a base de circuitos de atraso (multivibradores monoestáveis). Essas aplicações de temporização e formas de onda são importantes em muitas áreas da eletrônica e serão abordadas nos Capítulos 3, 6, 10 e 11.

1.7.17 Teorema de Thévenin Generalizado

Quando capacitores e indutores estão incluídos, o teorema de Thévenin deve ser atualizado: qualquer rede de dois terminais constituída de resistores, capacitores, indutores e fontes de sinal é equivalente a uma única impedância complexa em série com uma única fonte de sinal. Como antes, você encontra a impedância (complexa) e a fonte de sinal (forma de onda, amplitude e fase) a partir da tensão de saída em circuito aberto e da corrente de saída em curto-circuito.

1.8 JUNTANDO TUDO – RÁDIO AM

Em nosso curso de circuitos, unimos os tópicos deste capítulo agrupando-os em um rádio AM simples. O sinal que é transmitido é uma onda senoidal na frequência da estação na faixa AM (520 a 1720 kHz), com a sua amplitude variada ("modulada") de acordo com a forma de onda de áudio (Figura 1.113). Em outras palavras, uma forma de onda de áudio descrita por alguma função $f(t)$ seria transmitida como um sinal de *RF* $[A + f(t)]$ sen $2\pi f_c t$; aqui, f_c é a frequência da "portadora" da estação, e a constante A é adicionada à forma de onda de áudio, de modo que o coeficiente de $[A + f(t)]$ nunca é negativo.

No receptor (que somos *nós*!), a tarefa é selecionar essa estação (entre muitas) e, de alguma forma, extrair a *envoltória* da modulação, que é o sinal de áudio desejado. A Figura 1.114 mostra o rádio AM mais simples; é o "rádio de galena (ou cristal)" do passado. É realmente muito simples: o circuito ressonante *LC* em paralelo é sintonizado na frequência da estação pelo capacitor variável C_1 (Seção 1.7.14); o diodo D é um retificador de meia-onda (Seção 1.6.2), o qual (se ideal) passaria apenas os semiciclos positivos da portadora modulada; e R_1 proporciona uma carga leve, de modo que a saída retificada segue os semiciclos retornando para zero. Estamos quase terminando. Adicionamos um pequeno capacitor C_2 para evitar que a saída siga os semiciclos rápidos da portadora (que é um capacitor de armazenamento, Seção 1.7.16B), escolhendo a constante de tempo R_1C_2 para ser longa quando comparada com um período da portadora (~1 μs), porém curta em comparação com o período da maior frequência de áudio (~200 μs).

As Figuras 1.115 e 1.116 mostram o que você vê quando conecta um osciloscópio. A antena de *fio nu* mostra gran-

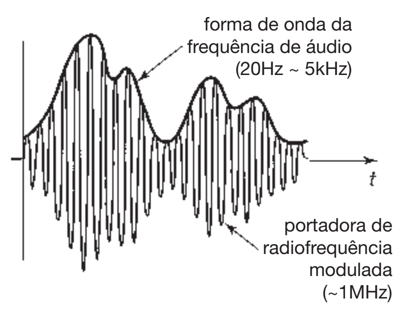

FIGURA 1.113 Um sinal AM é composto por uma portadora de *RF* (~1 MHz), cuja amplitude é variada pelo sinal de audiofrequência (voz ou música; frequências audíveis até ~5 kHz). A forma de onda de áudio é passada por compensação CC de modo que a envoltória não cruze o zero.

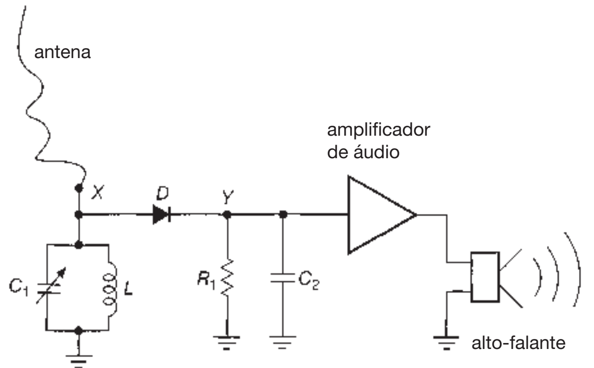

FIGURA 1.114 O receptor AM mais simples. O capacitor variável C_1 sintoniza a emissora desejada, o diodo D permite a passagem da envoltória positiva (suavizada por R_1C_2) e o sinal de áudio fraco resultante é amplificado para acionar o alto-falante.

de facilidade de captação de baixas frequências (principalmente 60 Hz da rede elétrica CA), e um pouquinho de sinal de todas as estações AM de uma vez. Mas, quando você conectá-la ao circuito ressonante *LC*, tudo o que for de baixa frequência desaparecerá (porque o *LC* se parece com uma impedância muito baixa, Figura 1.107) e ele só vê a estação AM selecionada. O interessante é que a amplitude da estação selecionada é muito maior com o *LC* conectado do que com nada conectado à antena: isso ocorre porque o *Q* elevado do circuito de ressonância armazena energia a partir de vários ciclos do sinal.[49]

O amplificador de áudio é divertido também, mas não estamos prontos para isso. Veremos como fazer um desses no Capítulo 2 (com transistores discretos) e novamente no Capítulo 4 (com amplificadores operacionais, um bloco construtivo Lego™ de projeto analógico).

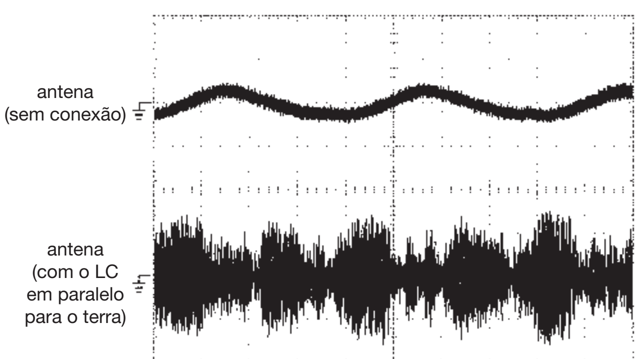

FIGURA 1.115 Formas de onda observadas no ponto “X” a partir da antena desconectada (em cima) e com o *LC* conectado. Note que os sinais sem interesse de baixa frequência desaparecem e que o sinal de rádio fica maior. Esse é o sinal de um único disparo, em que a portadora de radiofrequência de ~1 MHz aparece como uma área preenchida. Vertical: 1 V/div; horizontal: 4 ms/div.

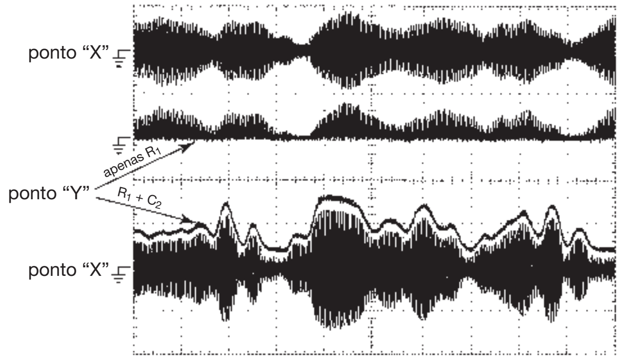

FIGURA 1.116 Formas de onda observadas no ponto “Y” com R_1 apenas (em cima) e com o capacitor de suavização C_2 incluído (embaixo). O par de formas de onda superior é uma captura de um único disparo (com a portadora de ~1 MHz aparecendo na área escura), e o par mais embaixo é uma captura de um único disparo separado, em que temos que compensar a onda retificada para maior clareza. Vertical: 1 V/div; horizontal: 1 ms/div.

E uma divertida nota final: em nossa aula de laboratório, gostamos de mostrar o efeito de uma ponta de prova em “X” com um comprimento de um cabo BNC (*Baioneta Neill-Concelman*) até a entrada de um osciloscópio (é assim que começamos, na primeira semana). Quando fazemos isso, a capacitância do cabo (cerca de 30 pF/pé) é acrescentada a C_1, diminuindo a frequência de ressonância e, assim, sintonizando uma estação diferente. Se escolhermos certo, ele muda a *língua* (de Inglês para Espanhol)! Os alunos se divertem com isso – um componente eletrônico “tradutor”. Então, usamos uma ponta de prova de osciloscópio comum, com seus ~10 pF de capacitância: nenhuma mudança de estação, nem de língua.

1.9 OUTROS COMPONENTES PASSIVOS

Nas seções seguintes, gostaríamos de apresentar brevemente uma seleção de componentes diversos, mas essenciais. Se você é experiente na construção de sistemas eletrônicos, pode ser que queira avançar para o próximo capítulo.

1.9.1 Dispositivos Eletromecânicos: Chaves

Estes dispositivos banais, mas importantes, tornam-se cada vez menos presentes na maioria dos equipamentos eletrônicos. Vale a pena dedicar alguns parágrafos ao assunto. As Figuras 1.117 e 1.118 mostram alguns tipos de chaves comuns.

A. Chave de Alavanca

A chave de alavanca simples está disponível em várias configurações, dependendo do número de polos; a Figura 1.119 mostra as comuns (SPST indica uma chave de um polo e uma

[49] Há formas mais complicadas de explicar isso, mas você ainda não vai querer saber...

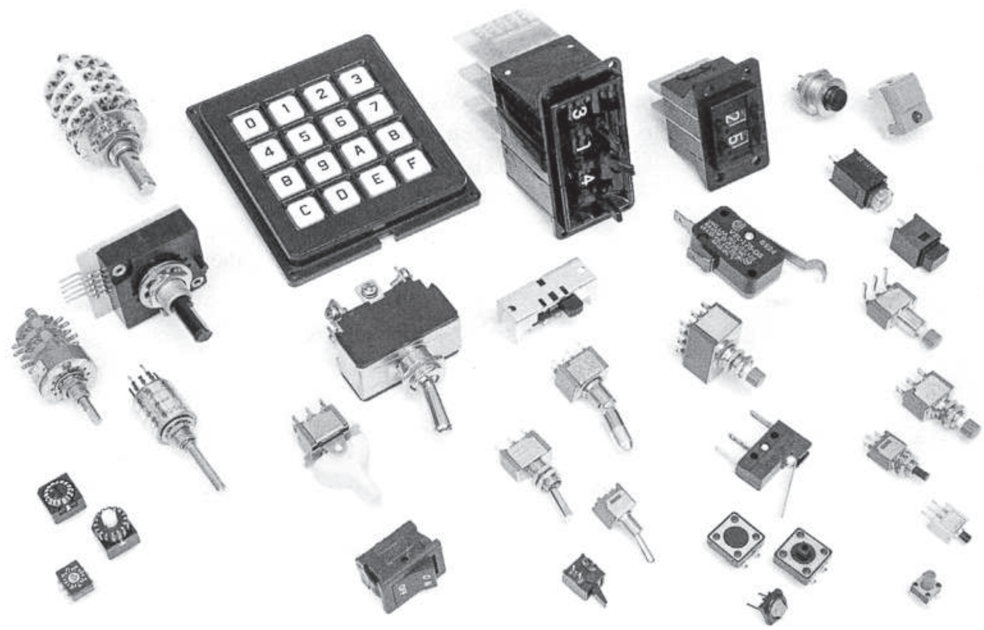

FIGURA 1.117 Miscelânea de chaves. As nove chaves à direita são chaves de contatos momentâneos ("botão de pressão" ou *pushbutton*), incluindo tanto o tipo de montagem em painel quanto o de montagem em placa de circuito impresso (PCI) ou PCB (*printed-circuit board*). À sua esquerda, estão os tipos adicionais, incluindo as chaves acionadas por alavanca e multipolo. Acima dessas, está um par de chaves *thumbwheel* codificada em binário para montagem em painel, à esquerda das quais está um teclado hexadecimal matricial. As chaves no centro em primeiro plano são chaves do tipo alavanca, nas variedades para montagem em painel e montagem em PCB; vários estilos de atuadores são mostrados, incluindo uma variedade de bloqueio (quarto da frente) que tem de ser puxado antes de comutar. As chaves rotativas na coluna da esquerda ilustram tipos codificados em binário (as três na frente e a quadrada maior) e as chaves tipo *wafer* tradicionais de multipolo-multiposição.

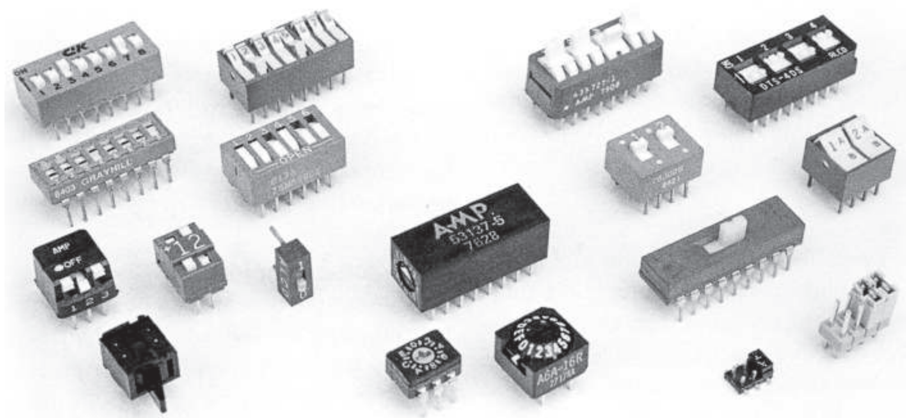

FIGURA 1.118 Chaves tipo "DIP switch" para montagem em placa. Grupo à esquerda, da frente para trás e da esquerda para a direita (todas são SPST): 1 via com alavanca de ação lateral; 3 vias ação lateral, 2 vias basculante e 1 via deslizante; 8 vias deslizante (perfil baixo) e 6 vias basculante; 8 vias deslizante e basculante. Grupo médio (todas são codificadas em hexadecimal): seis pinos de perfil baixo, seis pinos com ajuste superior ou lateral; 16 pinos com codificação verdadeira e de complemento. Grupo da direita: bloco cabeçote de 2 mm × 2 mm SMD com *jumper* móvel ("*shunt*"), bloco de cabeçote de 0,1" × 0,1" (2,54 mm × 2,54 mm) PTH com *shunts*; SPDT de 18 pinos (atuador comum); SPDT de 8 pinos duplo deslizante e de basculante; SPDT de 16 pinos quádruplo deslizante (dois exemplos).

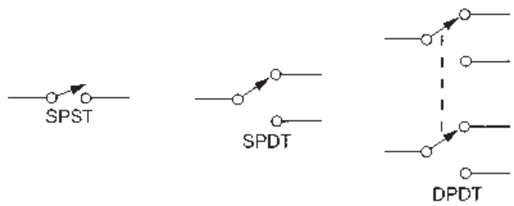

FIGURA 1.119 Tipos de chaves fundamentais.

posição, SPDT indica uma chave de um polo e duas posições e DPDT indica uma chave de dois polos e duas posições.). As chaves de alavanca também estão disponíveis com a posição de "desligamento no centro" e com até quatro polos comutados simultaneamente. As chaves são sempre do tipo "abre antes de fechar"; o contato móvel nunca conecta os dois terminais em uma chave SPDT, por exemplo.

B. Chaves *Pushbutton*

Chaves *pushbutton* são úteis para aplicações de contato momentâneo; elas são desenhadas esquematicamente, como mostra a Figura 1.120 (NA e NF significam normalmente aberta e normalmente fechada). Para chaves SPDT de contato momentâneo, os terminais devem ser identificados por NA e NF, enquanto para os tipos SPST o símbolo é autoexplicativo. Chaves de contato momentâneo são sempre do tipo "abre antes de fechar". Na indústria elétrica (em oposição à eletrônica), os termos forma A, forma B e forma C são usados para dizer SPST (NA), SPST (NF) e SPDT, respectivamente.

C. Chaves Rotativas

Chaves rotativas estão disponíveis com muitos polos e muitas posições, muitas vezes como kits com módulos individuais e eixo rotativo. Os dois tipos, *com curto* (fecha antes de abrir) e *sem curto* (abre antes de fechar), estão disponíveis e podem ser misturados na mesma chave. Em muitas aplicações, o tipo com curto é útil para evitar um circuito aberto entre posições da chave, pois os circuitos podem perder o controle com entradas sem conexão. Os tipos sem curto são necessários em linhas separadas, que, ao serem comutadas para uma linha comum, não devem nunca ser conectadas umas às outras.

Às vezes, você não quer realmente todos esses polos, você só quer saber quantos cliques (batentes) o eixo girou. Para isso, uma forma comum de chave rotativa codifica sua posição como uma quantidade binária de 4 bits, economizando, assim, um monte de fios (apenas cinco são necessários: os quatro bits e uma linha comum). Uma alternativa é o uso de um *codificador rotativo*, um dispositivo montado em painel que cria uma sequência de *N* pulsos por cada rotação completa do botão. Esses são encontrados em dois tipos (utilizando internamente contatos mecânicos ou métodos electro-ópticos) e geralmente fornecem de 16 a 200 pares de pulsos por revolução. Os tipos ópticos custam mais, porém duram para sempre.

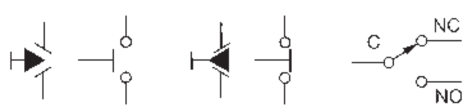

FIGURA 1.120 Chaves de contato momentâneo (botão de pressão ou *pushbutton*).

D. Chaves para Montagem PCBs

É comum ver pequenos conjuntos de chaves emplacas de circuito impresso (PCBs), como as mostradas na Figura 1.118. Eles são, muitas vezes, denominados *DIP switches*, referindo-se ao circuito integrado com encapsulamento DIP (*Dual In-Line Package*) de que eles fizeram uso, embora a prática contemporânea cada vez mais use o encapsulamento compacto da tecnologia de montagem em superfície (SMT – *surfasse-mount technology*). Como ilustra a fotografia, você pode obter chaves rotativas codificadas; e, por elas serem utilizadas para configurações internas que dificilmente são alteradas, você pode substituir um bloco de cabeçote de múltiplos pinos com poucas chaves deslizantes para fazer as conexões "*shunts*".

E. Outros Tipos de Chaves

Além desses tipos de chaves básicos, existem várias opções exóticas, tais como chaves de efeito Hall, *reed swiches*, sensores de proximidade, etc. Todas as chaves têm especificações máximas de corrente e tensão; uma pequena chave de alavanca pode ser especificada para 150 V / 5 A. A operação com cargas indutivas reduz drasticamente a vida útil da chave, por causa de arcos durante o desligamento. É sempre bom operar uma chave *abaixo* de suas especificações máximas, com uma notável exceção: uma vez que muitas chaves lidam com um fluxo substancial de corrente para limpar o óxido dos contatos, é importante usar uma chave projetada para "comutação de contato seco" quando se comutam sinais de nível baixo;[50] caso contrário, você terá uma operação com ruído e intermitente.

F. Exemplos de Chaves

Como um exemplo do que pode ser feito com chaves simples, consideraremos o seguinte problema: suponha que você queira fazer soar um aviso sonoro se o motorista de um carro estiver sentado e uma das portas do carro estiver aberta. Ambas as portas e o banco do motorista têm chaves, todas de contato normalmente aberto. A Figura 1.121 mostra um circuito que faz o que você quer. Se uma ou (OR) outra porta estiver aberta (chave fechada) e (AND) a chave do banco estiver fechada, o alarme soa. As palavras OR e AND são usadas em um sentido lógico (lógica digital) aqui, e veremos

[50] Estas usam contato com revestimento de ouro.

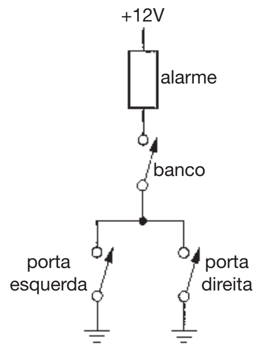

FIGURA 1.121 Exemplo de circuito com chave: aviso de porta aberta.

esse exemplo novamente nos Capítulos 2, 3 e 10 quando falarmos de transistores e lógica digital.

A Figura 1.122 mostra um circuito com chave clássico usado para ligar ou desligar uma lâmpada no teto a partir de um interruptor em qualquer uma das duas entradas de um ambiente.

Exercício 1.36 Embora poucos projetistas de circuito eletrônico saibam fazer, todo *eletricista* sabe como implementar o circuito de uma luminária de modo que qualquer um de N interruptores possa ligá-la ou desligá-la. Veja se você consegue descobrir essa generalização da Figura 1.122. São necessárias duas chaves SPDT e $N - 2$ DPDT.

1.9.2 Dispositivos Eletromecânicos: Relés

Relés são chaves controladas eletricamente. No relé eletromecânico tradicional, uma bobina puxa uma armadura (para fechar os contatos) quando flui corrente suficiente. Muitas variedades estão disponíveis, incluindo relés "biestáveis" (ou de remanência) e "de passo" (ou seletor de Strowger).[51] Relés

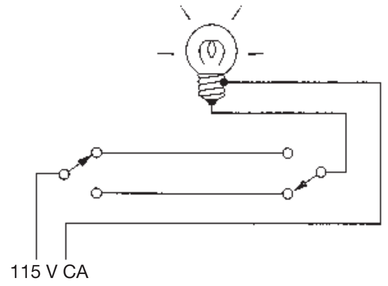

FIGURA 1.122 Diagrama de conexão de interruptores na configuração *three-way* usada por eletricistas.

[51] Uma nota de rodapé histórica e divertida: o relé de passo usado por um século como pedra angular de centrais telefônicas (o "seletor de Strowger") foi inventado por um empresário de Topeka (capital do Kansas), Almon Strowger, evidentemente porque ele suspeitava de que chamadas telefônicas destinadas ao seu negócio estavam sendo roteadas (pelas telefonistas em sua cidade) para uma funerária concorrente.

estão disponíveis para alimentação CC ou CA, e tensões de bobina de 3 a 115 V (CA ou CC) são comuns. Relés de mercúrio e *reed* destinam-se a aplicações de alta velocidade (~1 ms), e relés de grande porte destinados a comutar milhares de ampères são usados por concessionárias de energia elétrica.

O *relé de estado sólido* (SSR – *solid-state relay*) – que consiste de uma chave eletrônica semicondutora em que o estado ligado ou desligado é identificado por um LED – proporciona desempenho e confiabilidade melhores do que relés mecânicos, embora a um custo maior. SSRs operam rapidamente, sem "repique" de contato e geralmente fornecem uma comutação inteligente de potência CA (eles ligam no momento da tensão zero e desligam no momento da corrente zero). Veremos muito mais sobre esses dispositivos úteis no Capítulo 12.

Como aprenderemos, a comutação controlada eletricamente de sinais dentro de um circuito pode ser realizada com chaves transistorizadas, sem a necessidade do uso de relés de qualquer tipo (Capítulos 2 e 3). As principais utilizações de relés estão na comutação remota e na comutação de alta tensão (ou de alta corrente), nas quais é importante ter isolamento elétrico completo entre o sinal de controle e o circuito a ser comutado.

1.9.3 Conectores

Levar sinais para dentro e para fora de um instrumento, encaminhar sinal e alimentação CC entre as várias partes de um instrumento, proporcionar flexibilidade permitindo que as placas de circuito e módulos maiores do instrumento sejam desconectados (e substituídos) – essas são as funções do *conector*, um componente essencial (e geralmente a parte mais confiável) de qualquer peça de equipamento eletrônico. Conectores são encontrados em uma variedade desconcertante de tamanhos e formas.[52] As Figuras 1.123, 1.124 e 1.125 dão uma ideia da variedade.

A. Conectores de um Único Fio

O tipo mais simples de conector é o conector de pino banana ou *jack* simples usado em multímetros, fontes de alimentação, etc. É acessível e barato, mas não tão útil quanto o cabo blindado ou conectores multifio de que você muitas vezes precisa. O borne de conexão simples é outra forma de conector de um único fio, notável pela falta de jeito que ele inspira em quem tenta usá-lo.

B. Conectores para Cabo Blindado

Para evitar a captação capacitiva de sinais, e por outras razões que estão no Anexo H, geralmente é desejável confinar sinais que vão de um instrumento para outro em um cabo coaxial blindado. O conector mais popular é o tipo BNC que adorna a maioria dos painéis frontais de instrumentos. Ele se conecta

[52] Uma busca por "conector" no site da DigiKey retorna 116 categorias, com cerca de 43 mil variedades individuais em estoque.

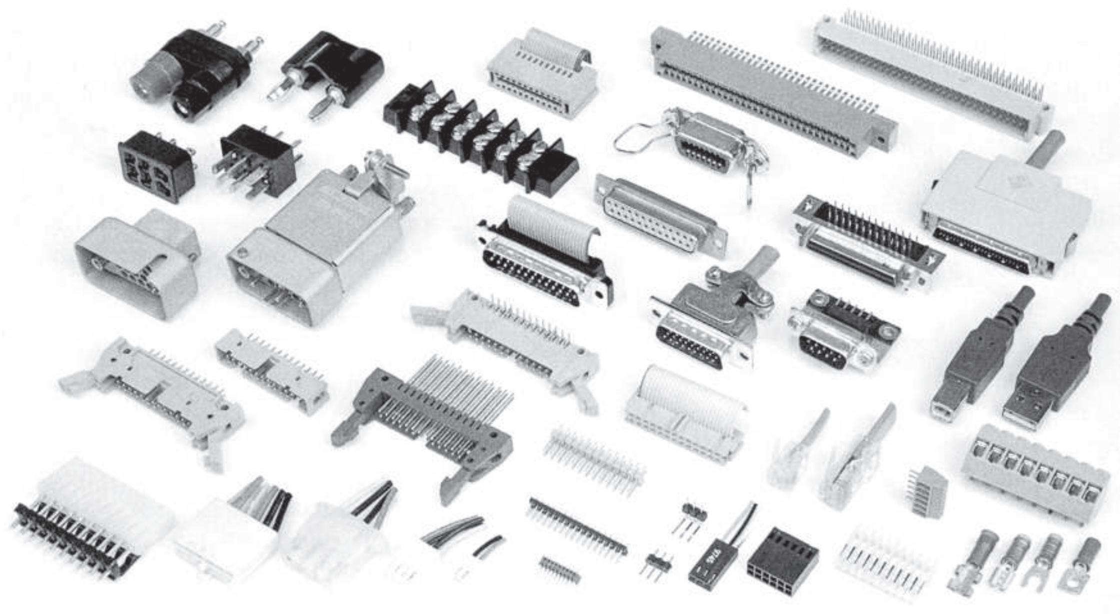

FIGURA 1.123 Conectores retangulares. A variedade de conectores multipinos disponíveis é impressionante. Aqui está uma coleção de tipos comuns: os cinco conectores na parte inferior esquerda são conectores de alimentação multipinos de nylon (às vezes, denominados *tipo Molex* por razões históricas). Acima deles, estão quatro conectores header com pinos em duas linhas (espaçamento de 0,1", mostrado com e sem ejetores, também com Wire-Wrap® e pinos em ângulo reto), e à sua direita um conector header aberto ("sem proteção externa") de pinos em duas linhas e espaçamento de 0,1", juntamente com um par de conectores header de pinos em duas linhas e passos mais finos (2 mm e 1,27 mm). Esses conectores macho de pinos em duas linhas se encaixam com conectores IDC (*insulation displacement conector*), como o que é mostrado conectado a um pequeno pedaço de cabo flat (um pouco acima do conector header sem proteção externa). Logo abaixo da fita, são mostrados conectores header de pinos em linha única e passo de 0,1" com carcaça de encaixe (AMP MODU) que aceitam conexões de fios individuais. No canto inferior direito, há vários terminais usados para fiação elétrica e quatro tipo "Faston" de bornes crimpáveis. Acima deles, estão os conectores USB, e, à sua esquerda, estão os conectores modulares comuns RJ-45 e RJ-11 de telefonia/dados. Os conectores populares e confiáveis subminiaturas D estão no centro, incluindo (direita para esquerda) um par de 50 pinos micro-D (plugue do cabo e tomada PCB), um sub-D de 9 pinos, 26 pinos de alta densidade e um par sub-D de 25 pinos (um IDC). Acima deles, estão (direita para esquerda) um conector de 96 pinos VME para placa de expansão, um conector de borda de 62 pinos para solda, um conector tipo "Centronics" com alças de fixação e um conector de borda com flat IDC. Na parte superior esquerda, existe uma miscelânea – um par de conectores de encaixe duplo de banana do "tipo GR", um par de conectores de encaixe tipo RCA (ou Cinch), um par de conectores de encaixe encobertos tipo Winchester com parafusos do bloqueio e (à sua direita) um bloco de terminais com parafuso. Não são mostrados aqui os conectores *realmente* pequenos usados em pequenos dispositivos eletrônicos portáteis (smartphones, câmeras, etc.); você pode ver um bom exemplo na Figura 1.131.

com uma torção de um quarto de volta estabelecendo a conexão dos circuitos da blindagem (terra) e do condutor interno (sinal) simultaneamente. Como para todos os conectores usados para encaixar um cabo a um instrumento, existem a versão de montagem de painel e a de terminação de cabo.

Entre outros conectores para uso com cabo coaxial, estão o TNC ("*threaded Neill-Concelman*", um primo próximo do BNC, mas com blindagem e rosca externa); o tipo N de alto desempenho, mas volumoso; os tipos miniatura SMA e SMB; os tipos subminiatura LEMO e SMC; e os de alta tensão MHV e SHV. O chamado jack fono utilizado em equipamentos de áudio é uma boa lição de projeto ruim, pois o condutor interno (sinal) encaixa *antes* da blindagem (terra) quando você o conecta; além disso, o projeto do conector é tal que a blindagem e o condutor interno são propensos a um mau contato. Você certamente já *ouviu* os resultados! Para não ficar para trás, a indústria da televisão respondeu com seu próprio padrão ruim, o "conector" de cabo coaxial tipo F, que usa o fio interno do cabo coaxial sem suporte como pino do plugue macho e um arranjo de má qualidade para encaixar a blindagem.[53]

Nós, por meio do presente livro, relegamos esses perdedores ao Hall da Infâmia dos Componentes Eletrônicos, do qual alguns membros fundadores são mostrados na Figura 1.126.

[53] Os defensores de cada um provavelmente responderiam: "Este é o nosso receptáculo com preço mais *em conta*".

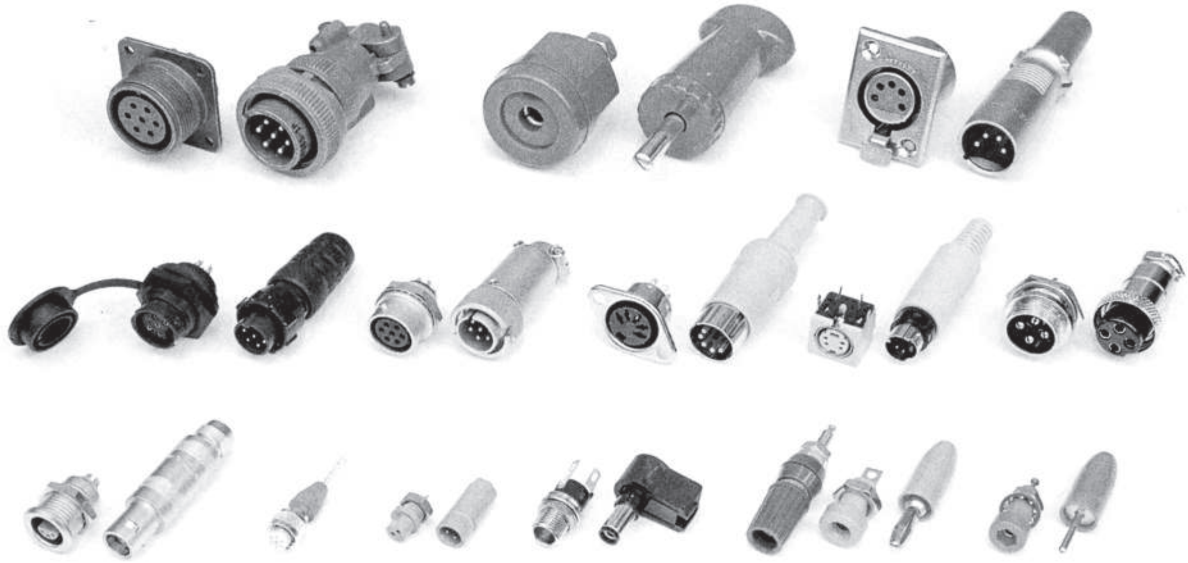

FIGURA 1.124 Conectores circulares. Uma seleção de conectores multipinos e outros conectores "não RF"; o receptáculo de montagem em painel é mostrado à esquerda de cada plugue que é montado no cabo. Linha superior, da esquerda para a direita: conector robusto tipo "MS" (MIL-C-5015) (disponível em centenas de configurações), conector "supericon" de alta corrente (50 A), conector multipino XLR com trava. Linha do meio: conector à prova de intempéries (Switchcraft EN3), conector de vídeo de 12 mm (Hirose RM), conector circular DIN, conector circular mini-DIN, conector de microfone de 4 pinos. Linha inferior: conector de 6 pinos com trava (Lemo), conector microminiatura de 7 pinos blindado (Microtech EP-7S), conector miniatura de 2 pinos encoberto (Litton SM), conector de alimentação de 2,5 mm, conector tipo banana e conector de pino tipo jack.

C. Conectores Multipino

Instrumentos eletrônicos frequentemente exigem cabos e conectores multifios. Há literalmente dezenas de diferentes tipos. O exemplo mais simples é um conector de cabo de alimentação de três fios "IEC". Entre os mais populares, estão o excelente subminiatura tipo-D, a série Winchester MRA, o venerável tipo MS e os conectores de cabo flat. Esses e outros são mostrados na Figura 1.123.

Cuidado com os conectores que não toleram uma queda no chão (os conectores miniatura hexagonais são clássicos exemplos) ou que não fornecem um mecanismo de trava seguro (por exemplo, a série Jones 300).

D. Conectores de Borda

O método mais comum usado para fazer conexão com cartões de circuito impresso é o conector de borda, que faz conexão a uma fila de contatos dourados na borda do cartão; exemplos comuns são os conectores da placa-mãe que aceitam módulos de memória de computador *plug-in*. Conectores de borda podem ter de 15 a 100 ou mais conexões e contam com diferentes estilos de terminais, de acordo com o método de conexão. É possível soldá-los a uma "placa-mãe" ou "placa de expansão", que é apenas outra PCB que contém interconexões entre as placas de circuitos individuais. Alternativamente, pode ser que você queira usar conectores de borda padrão com terminações com furo para solda, especialmente em um sistema com apenas alguns cartões. Uma solução mais confiável (embora mais cara) é o uso de conectores PCB de "duas partes", em que uma parte (soldada na placa) encaixa com a outra parte (em uma placa de expansão, etc.); um exemplo é o conector amplamente utilizado VME (*VersaModule Eurocard*) (canto superior direito da Figura 1.123).

1.9.4 Indicadores

A. Medidores

Para ler o valor de alguma tensão ou corrente, você tem uma escolha a fazer entre o medidor tipo ponteiro móvel, consagrado pelo tempo, e o digital. Este último é mais caro e mais preciso. Ambos os tipos estão disponíveis em uma variedade de faixas de corrente e tensão. Há, além disso, medidores de painel exóticos que indicam medidas como VUs (Unidades de volume, uma escala de áudio em dB), volts CA em escala expandida (por exemplo, 105 para 130 V), temperatura (de um termopar), carga de motor percentual, frequência, etc. Medidores digitais de painel, muitas vezes, oferecem a opção de saídas de nível lógico, além do display visível, para uso interno pelo instrumento.

FIGURA 1.125 Conectores de RF e blindados. O receptáculo de montagem em painel é mostrado à esquerda de cada plugue montado no cabo. Linha superior, da esquerda para a direita: conector jack fono estéreo, conector de áudio tipo "XLR"; conector N e UHF (conectores RF). Segunda linha de cima para baixo: conectores BNC, TNC e tipo F; conectores MHV e SHV (alta tensão). Terceira fila de cima para baixo: conector de áudio de 2,5 mm (3/32"), conector estéreo de 3,5 mm, conector estéreo melhorado de 3,5 mm, conector fono ("tipo RCA"), conector LEMO coaxial. Linha inferior: conector SMA (jack de painel, plugue de coaxial flexível), conector SMA (jack de montagem em placa, plugue de coaxial rígido), conector SMB; conectores SC e ST (fibra óptica).

Como substituto para um medidor dedicado (seja analógico ou digital), você vê cada vez mais o LCD (tela de cristal líquido) ou painel de LED como um medidor padrão. Isso é flexível e eficiente: com um módulo de display LCD gráfico (Seção 12.5.3), você pode oferecer ao usuário uma escolha de "medidores", de acordo com a grandeza que está sendo exibida, todos sob o controle de um controlador embutido (um microprocessador interno; ver Capítulo 15).

B. Lâmpadas, LEDs e Displays

Luzes piscando, telas cheias de números e letras, sons misteriosos – essas são coisas de filmes de ficção científica e, exceto pelo último, compõem o assunto das lâmpadas e displays (ver Seção 12.5.3). Pequenas lâmpadas incandescentes costumavam ser padrão para os indicadores do painel frontal, mas elas foram substituídas por LEDs. Estes últimos se comportam como diodos eletricamente comuns, mas com uma queda de tensão na faixa de 1,5 a 2 volts (para os LEDs vermelho, laranja e alguns verdes; 3.6 V para o azul[54] e verde de alta luminosidade; ver Figura 2.8). Quando a corrente flui no sentido direto, eles acendem. Normalmente, de 2 mA a 10 mA produzem luminosidade adequada. LEDs são mais baratos do que as lâmpadas incandescentes, duram praticamente para sempre e estão disponíveis em quatro cores padrão, além do "branco" (que é normalmente um LED azul com um revestimento amarelo fluorescente). Eles vêm em convenientes encapsulamentos de montagem em painel, e alguns até mesmo fornecem um limitador de corrente interno.[55]

LEDs também pode ser usado para displays digitais, por exemplo, displays numéricos de 7 segmentos ou displays de 16 segmentos (para a exibição de letras, bem como números – "alfanuméricos"), ou displays de matriz de pontos. No entanto,

[54] O LED azul de nitreto de gálio foi produto da descoberta de um funcionário solitário e desvalorizado da Nichia Chemical Industries, Shuji Nakamura.

[55] E, é claro, para a iluminação residencial e comercial. Agora os LEDs têm amplamente relegado à lata de lixo da história a centenária lâmpada incandescente de filamento aquecido.

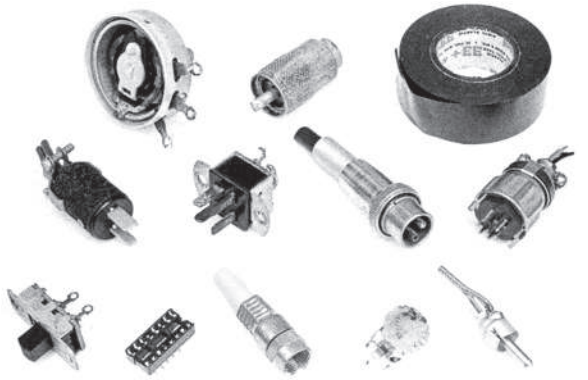

FIGURA 1.126 Componentes para evitar. É desaconselhado o uso de componentes como estes, se você puder evitar (veja o texto se você precisa se convencer!). Linha superior, da esquerda para a direita: potenciômetro de fio enrolado de baixo valor, conector tipo UHF, fita isolante ("apenas diga não!"). Linha do meio: conectores "tipo RCA", conector de microfone, conectores hexagonais. Linha inferior: chave deslizante, soquete de CI barato (e "pinos não torneados"), conector tipo-F, *trimmer* de elemento aberto, conector fono.

se mais do que alguns dígitos ou caracteres devem ser exibidos, os LCDs são geralmente preferidos. Eles vêm em matrizes organizadas em linhas (por exemplo, 16 caracteres por 1 linha, até 40 caracteres por 4 linhas), com uma interface simples que permite a entrada sequencial ou designável de caracteres alfanuméricos e símbolos adicionais. Eles são baratos, de baixa potência e visíveis mesmo sob luz solar. Versões com iluminação própria funcionam bem, mesmo em luz difusa, mas não são de baixa potência. Muito mais sobre esses (e outros) dispositivos optoeletrônicos você encontra na Seção 12.5.

1.9.5 Componentes Variáveis

A. Resistores Variáveis

Resistores variáveis (também chamados de controles de volume, potenciômetros ou *trimmers*) são úteis como controles de painel ou ajustes internos nos circuitos. Um tipo de painel clássico é o potenciômetro AB de 2 watts; ele usa o mesmo material básico que o resistor de composição de carbono fixo, com um cursor rotativo de contato. Outros tipos usados em painéis estão disponíveis com elementos de resistência de cerâmica ou plástico, com características melhoradas. Os tipos multivoltas (3, 5, ou 10 voltas) estão disponíveis, com indicadores (*dials*) de contagem, para melhores resolução e linearidade. Potenciômetros "agrupados" (várias seções independentes sobre um eixo) também são fabricados, embora em variedade limitada, para aplicações que os exigem. A Figura 1.8 mostra uma seleção representativa de potenciômetros e *trimmers*.

Para usar dentro de um instrumento, em vez de no painel frontal, os *trimmers* estão disponíveis nos estilos de uma volta única e multivoltas, a maioria destinada à montagem em PCBs. Eles são úteis para os ajustes de calibração do tipo "configurar e esquecer". Um bom conselho: resista à tentação de usar muitos *trimmers* em seus circuitos. Em vez disso, faça um bom projeto.

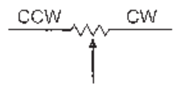

FIGURA 1.127 Potenciômetro (resistor variável de três terminais).

O símbolo de um resistor variável é mostrado na Figura 1.127. Às vezes, os símbolos CW e CCW são usados para indicar os sentidos horário e anti-horário, respectivamente.

Uma versão totalmente eletrônica de um potenciômetro pode ser feita com uma matriz de chaves eletrônicas (transistores) que selecionam uma derivação em uma longa cadeia de resistências fixas. Por mais estranho que isso possa parecer, é um esquema perfeitamente viável quando implementado em um CI. Por exemplo, Analog Devices, Maxim/Dallas Semiconductor e Xicor fazem uma série de "potenciômetros digitais" com até 1024 degraus; eles estão disponíveis como unidades individuais ou duplas, e alguns deles são "não voláteis", o que significa que eles se "lembram" do último ajuste, mesmo que a alimentação tenha sido desligada. Estes encontram aplicação em eletrônicos de consumo (televisores, aparelhos de som), nos quais você quer ajustar o volume a partir do seu controle remoto infravermelho em vez de girar um botão; veja a Seção 3.4.3E.

Um ponto importante sobre resistores variáveis: não tente usar um potenciômetro como substituto para um resistor de valor preciso em algum ponto de um circuito. Isso é tentador, pois você pode ajustar a resistência no valor desejado. O problema é que os potenciômetros não são tão estáveis quanto bons resistores (1%) e, além disso, eles podem não ter boa resolução (isto é, não podem ser ajustados para um valor preciso). Se você necessitar de um valor de resistor preciso e ajustável em algum ponto, use uma combinação de um resistor de precisão de 1% (ou melhor) com um potenciômetro, com o resistor fixo contribuindo mais na resistência final. Por exemplo, se você precisa de um resistor de 23,4k, use um resistor fixo de 22,6k 1% (um valor padrão) em série com um *trimmer* de 2k. Outra possibilidade é a utilização de uma combinação em série de vários resistores de precisão, selecionando o último (e menor) para dar a resistência em série desejada.

Como veremos mais adiante (Seção 3.2.7), é possível usar FETs como resistores variáveis controlados por tensão em algumas aplicações. Outra possibilidade é um "fotorresistor" (Seção 12.7). Transistores podem ser usados como amplificadores de ganho variável, novamente controlados por uma tensão. Mantenha a mente aberta quando fizer o *brainstorming* do projeto.

FIGURA 1.128 Capacitor variável.

B. Capacitores Variáveis

Capacitores variáveis são principalmente confinados aos valores de capacitância menores (até cerca de 1.000 pF) e são normalmente utilizados em circuitos de RF. Trimmers estão disponíveis para ajustes no circuito, em adição ao tipo de painel para a sintonização do usuário. A Figura 1.128 mostra o símbolo de um capacitor variável.

Diodos operados com aplicação de tensão reversa podem ser usados como capacitores de tensão variável; nessa aplicação, são chamados varactores ou, às vezes, varicaps ou epicaps. Eles são muito importantes em aplicações de *RF*, especialmente em malha de fase sincronizadas (PLL), controle automático de frequência (AFC), moduladores e amplificadores paramétricos.

C. Indutores Variáveis

Indutores variáveis são normalmente feitos por meio do movimento da peça do material do núcleo em uma bobina fixa. Eles estão disponíveis nessa forma com indutâncias que variam de microhenrys a henrys, tipicamente com uma faixa de sintonia 2:1 para qualquer indutor. Também estão disponíveis indutores rotativos (bobinas sem núcleo com um contato de rolamento.)[56]

D. Transformadores Variáveis

Transformadores variáveis são dispositivos acessíveis, especialmente os que são operados a partir da rede elétrica CA de 115 volts. Eles são geralmente configurados como "autotransformadores", o que significa que têm apenas um enrolamento, com um contato deslizante. Eles também são denominados apenas variacs (o nome dado a eles pela empresa General Radio) e são feitos pela TechniPower, pela Superior Electric e outras. A Figura 1.129 mostra uma unidade clássica da General Radio. Normalmente, eles fornecem de 0 a 135 volts CA na saída quando operados a partir de 115 volts e estão disponíveis com especificações de corrente de 1 a 20 ampères ou mais. Eles são bons para testar instrumentos que parecem ser afetados por variações de rede elétrica e, em qualquer caso, para verificar o desempenho de pior caso. *Aviso importante*: não se esqueça de que a saída não é eletricamente isolada da rede elétrica, como seria com um transformador!

[56] Uma forma interessante de indutor variável feito antigamente era o variômetro, uma bobina rotativa posicionada dentro de uma bobina exterior fixa e conectada em série com ela. Conforme a bobina interior era girada, a indutância total passava de máxima (quatro vezes a indutância de qualquer bobina sozinha) até chegar a zero. Essas coisas eram itens de *consumo*, listadas, por exemplo, no catálogo da Sears Roebuck de 1925.

FIGURA 1.129 Um transformador variável para rede elétrica ("Variac") permite ajustar a tensão de entrada CA para um valor de teste. Aqui é mostrada uma unidade de 5 A, tanto com o gabinete fechado quanto aberto.

1.10 A GOTA D'ÁGUA: CONFUSÃO DE MARCAÇÕES E COMPONENTES MINÚSCULOS

Em nosso curso de eletrônica,[57] e, de fato, no dia a dia da eletrônica na bancada, deparamo-nos com uma confusão maravilhosa na marcação de componentes. Capacitores, em especial, são simplesmente perversos: eles raramente se preocupam com especificação de *unidades* (mesmo que tenham um alcance da ordem de 12 na magnitude, picofarads para farads), e, para as variedades de dispositivos cerâmicos SMT, eles dispensam quaisquer marcações de qualquer natureza! Pior ainda, eles ainda são apanhados na transição da impressão do valor como um inteiro (por exemplo, "470", que significa 470 pF) *versus* usando a notação de expoente (por exemplo, "470", que significa 47×10^0, ou seja, 47 pF). A Figura 1.130 mostra exatamente esse caso. Outra armadilha para os descuidados (e, às vezes, os cautelosos também) é a *pegadinha* do código de data: o código de quatro dígitos (yydd) pode se passar pelo número de identificação do componente (*part number*), como nos quatro exemplos na foto. E, conforme os componentes se tornam cada vez menores, não há espaço para tudo, mas somente para a mais breve das marcações; assim, seguindo a indústria farmacêutica, os fabricantes inventam um código alfanumérico curto para cada compo-

[57] Física 123 ("laboratório de Eletrônica") Na Universidade de Harvard: "Metade do curso (período escolar do outono: repetido no período escolar da primavera). Uma introdução intensiva de laboratório para o projeto de circuitos eletrônicos. Desenvolve a intuição em circuitos e habilidades de depuração por meio de experiências diárias de laboratório, cada uma precedida por discussões em classe, com o uso mínimo de matemática e física. Move-se rapidamente a partir de circuitos passivos para transistores discretos e, em seguida, concentra-se em amplificadores operacionais, usado para fazer uma variedade de circuitos, incluindo integradores, osciladores, reguladores e filtros. A metade digital do curso aborda a interface analógico-digital, enfatizando o uso de microcontroladores e dispositivos lógicos programáveis (PLDs)". Ver http://webdocs.registrar.fas.harvard.edu/courses/Physics.html.

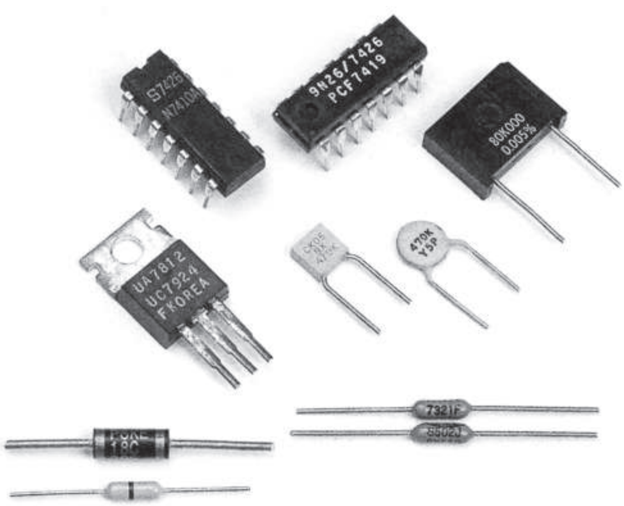

FIGURA 1.130 Central de confusão! Os três CIs são marcados tanto com um número de identificação (por exemplo, UA7812) e um "código de data" (por exemplo, UC7924, que significa a 24ª semana de 1979). Infelizmente, ambos são números de identificação perfeitamente válidos (um regulador de +12 V ou −24 V). O par de resistores (na verdade, duas visões de resistores marcados de forma idêntica) sofre do mesmo problema: ele poderia ser 7,32 kΩ ±1%, ou poderia ser 85,0 kΩ ±5% (é o primeiro, mas quem saberia?). Os dois capacitores de cerâmica são marcados com 470K (470.000 de algo?), mas, surpresa, o "K" significa uma tolerância de 10%; e, surpresa ainda maior, o capacitor quadrado é de 47 pF, e o outro nas proximidades é de 470 pF. E o que alguém deve fazer ao ler em um bloco preto a marcação 80K000: é um diodo com dois catodos (e sem anodo?)ou um resistor com uma única faixa preta no centro?

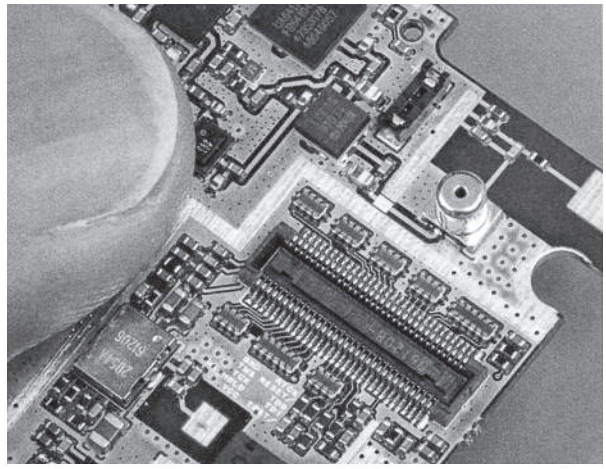

FIGURA 1.131 Somos "todos desajeitados" quando trabalhamos com tecnologia de montagem em superfície (SMT). Este é um canto de uma placa de circuito de um telefone celular, mostrando pequenos resistores e capacitores cerâmicos, circuitos integrados com pontos de conexão tipo *ball-grid* no lado inferior e os conectores Lilliputian para a antena e o painel do display. Veja também a Figura 4.84.

nente. E isso é tudo que você recebe. Por exemplo, o AOP LMV981 da National vem em vários encapsulamentos de 6 pinos: o SOT23 está marcado como "A78A", o SC70, que é menor, registra "A77", e os realmente minúsculos microSMD revelam uma única letra "A" (ou "H", indicando que é livre de chumbo). E é isso aí.

1.10.1 Tecnologia de Montagem em Superfície: a Alegria e a Dor

Já que estamos reclamando, lamentemos um pouco sobre a dificuldade de prototipagem de circuitos com dispositivos de montagem em superfície (SMD) pequenos. Do ponto de vista *elétrico*, eles são excelentes: têm baixa indutância e são compactos. No entanto, é quase impossível conectá-los em uma matriz de contatos (protoboard) para confecção de um protótipo, como é fácil fazer com componentes PTH (*Pin Through Hole*), tais como resistores com terminais axiais (um fio saindo de cada extremidade) ou circuitos integrados com encapsulamento DIP (*Dual In-Line*). A Figura 1.131 dá uma ideia da escala desses pequenos componentes, e a Figura 1.132 exibe o verdadeiro horror do mais ínfimo dentre eles – o tamanho "01005" de componentes SMD (0402, na dimensão métrica) que medem 200 μm × 400 μm: não muito mais espesso do que um fio de cabelo humano, e indistinguível de poeira!

Às vezes, você pode usar pequenos adaptadores (de empresas como Bellin Dynamic Systems, Capital Advanced Tecnologies ou Aries) para converter um circuito integrado SMT em um falso DIP. Mas o encapsulamento de montagem em superfície mais denso não tem nenhum terminal, apenas uma série de saliências (que pode somar até alguns milhares!) no lado de baixo; e estes requerem equipamento de "*reflow*" (técnica de soldagem) críticos antes que você possa fazer qualquer coisa com eles. Infelizmente, não podemos ignorar

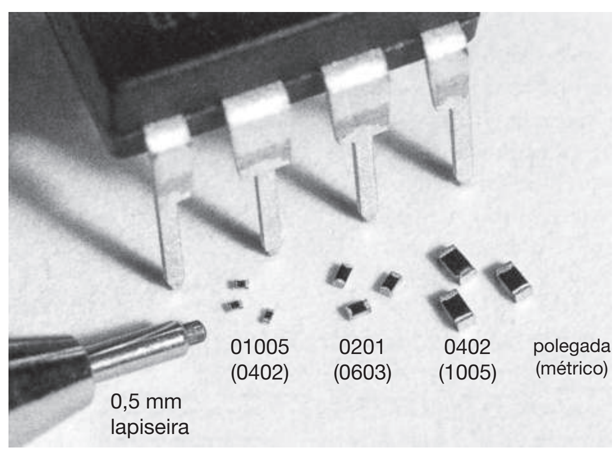

FIGURA 1.132 Quão pequenos esses componentes podem ser?! O SMT de tamanho "01005" (0,016" × 0,008", ou 0,4 mm × 0,2 mm) representa o maior insulto da indústria para o experimentador.

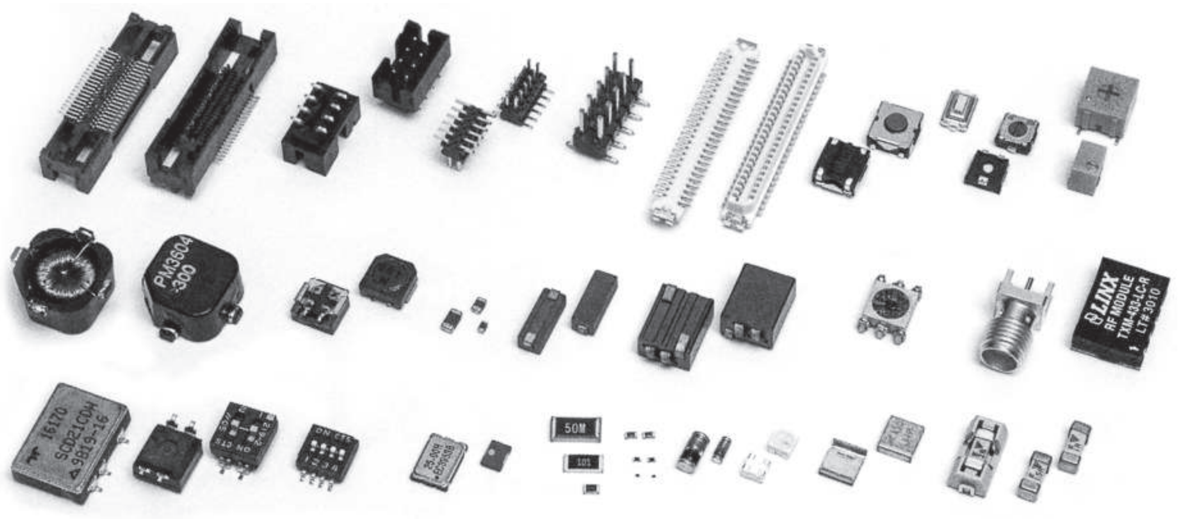

FIGURA 1.133 Uma pequena porção do mundo dos componentes passivos em encapsulamentos de montagem em superfície: conectores, chaves, *trimmers*, indutores, resistores, capacitores, cristais, fusíveis... seja lá o componente que você imagine, provavelmente poderá encontrá-lo em SMT.

essa tendência preocupante, pois a maioria dos novos componentes é oferecida em embalagens de montagem em superfície. Pobre do experimentador-inventor solitário de porão! A Figura 1.133 dá uma ideia da variedade de tipos de componentes passivos que existem em encapsulamentos SMD.

Exercícios Adicionais para o Capítulo 1

Exercício 1.37 Determine o circuito equivalente de Norton (uma fonte de corrente em paralelo com um resistor) para o divisor de tensão na Figura 1.134. Mostre que o equivalente de Norton dá a mesma tensão de saída que o circuito real quando conectado a um resistor de carga de 5k.

Exercício 1.38 Determine o equivalente de Thévenin para o circuito mostrado na Figura 1.135. É o mesmo que o do equivalente de Thévenin para o Exercício 1.37?

Exercício 1.39 Projete um "filtro *rumble*" (filtro de baixa frequência) para áudio. Ele deve passar frequências superiores a 20 Hz (defina o ponto de −3dB em 10 Hz). Considere a impedância da fonte zero (fonte de tensão perfeita) e impedância de carga de 10k (mínimo) (que é importante para que você possa escolher *R* e *C* de forma que a carga não afete significativamente o funcionamento do filtro).

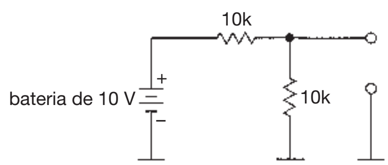

FIGURA 1.134 Exemplo para o circuito equivalente de Norton.

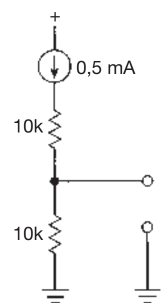

FIGURA 1.135 Exemplo para o circuito equivalente de Thévenin.

Exercício 1.40 Projete um "filtro de *scratch*" (filtro de ruído agudo) para sinais de áudio (queda de 3 dB em 10 kHz). Use as mesmas fonte e impedâncias de carga que as do Exercício 1.39.

Exercício 1.41 Como você faria um filtro com *R*s e *C*s para obter a resposta mostrada na Figura 1.136?

Exercício 1.42 Crie um filtro *RC* passa-faixa (como na Figura 1.137); f_1 e f_2 são os pontos de 3 dB. Escolha impedâncias de modo que o primeiro estágio não seja muito afetado pela carga do segundo estágio.

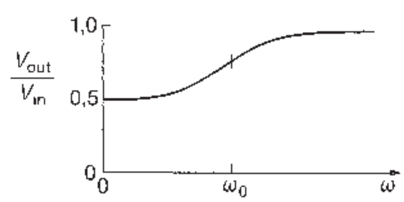

FIGURA 1.136 Resposta do filtro que enfatiza altas frequências.

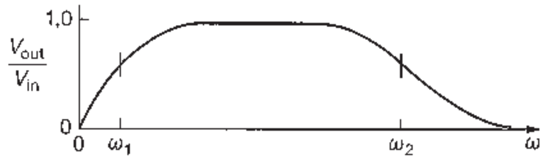

FIGURA 1.137 Resposta do filtro passa-faixa.

Exercício 1.43 Esboce a saída para o circuito mostrado na Figura 1.138.

Exercício 1.44 Projete uma "ponta de prova ×10" de osciloscópio para usar com um osciloscópio cuja impedância de entrada é 1 MΩ em paralelo com 20 pF para descobrir o que se passa no interior do cabo da sonda na Figura 1.139.

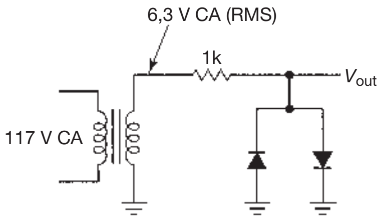

FIGURA 1.138 Circuito para o Exercício 1.43.

Considere que o cabo da ponta de prova acrescenta 100 pF e que os componentes da ponta de prova são colocados na extremidade da ponta do cabo (em vez de na extremidade do osciloscópio). A rede resultante deverá ter atenuação de 20 dB (relação de divisão de tensão ×10) em todas as frequências, incluindo CC. A razão para a utilização de uma ponta de prova ×10 é aumentar a impedância da carga vista pelo circuito a ser testado, o que reduz os efeitos de carga. Qual é o valor da impedância de entrada (*R* em paralelo com *C*) que a sua ponta de prova ×10 apresenta para o circuito em teste quando usado com o osciloscópio?

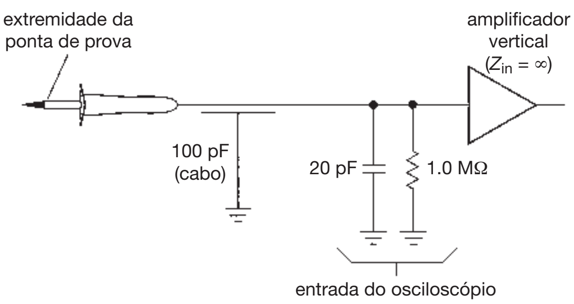

FIGURA 1.139 Ponta de prova ×10 de osciloscópio.

REVISÃO DO CAPÍTULO 1

Um resumo de A a H do que aprendemos no Capítulo 1. Revisaremos os princípios básicos e fatos do Capítulo 1, mas não abordaremos diagramas de circuitos de aplicações e conselhos práticos de engenharia apresentados durante o capítulo.

¶ A. Tensão e Corrente

Circuitos eletrônicos são constituídos por componentes conectados entre si com fios. A *Corrente* (I) é a taxa de fluxo de carga através de algum ponto nessas conexões; é medida em ampères (ou miliampères, microampères, etc.). A *Tensão* (V) entre dois pontos de um circuito pode ser vista como uma "força" de acionamento aplicada que faz com que flua corrente entre eles; a tensão é medida em volts (ou kilovolts, milivolts, etc.); ver Seção 1.2.1. Tensões e correntes podem ser constantes (CC) ou variáveis. Esta última pode ser tão simples quanto uma tensão alternada senoidal (CA) obtida da tomada na parede ou tão complexa quanto uma forma de onda de comunicação de alta frequência modulada, caso em que é normalmente denominado *sinal* (ver item ¶B a seguir). A soma algébrica das correntes em um ponto de um circuito (um *nó*) é *zero* (lei de Kirchhoff para corrente, LKC, uma consequência da conservação da carga), e a soma das quedas de tensão ao percorrer um caminho fechado em um circuito é *zero* (lei de Kirchhoff para tensão, LKT, uma consequência da natureza conservadora do campo eletrostático).

¶ B. Tipos e Amplitudes de Sinal

Veja a Seção 1.3. Em eletrônica digital, lidamos com *pulsos*, que são sinais que comutam entre duas tensões (por exemplo, +5 V e terra); no mundo analógico, são as *ondas senoidais* que ganham o concurso de popularidade. Em qualquer um dos casos, um sinal periódico é caracterizado pela sua frequência f (unidades de Hz, MHz, etc.) ou, de forma equivalente, o período T (unidades de ms μs, etc.). Para as ondas senoidais, muitas vezes, é mais conveniente usar a frequência *angular* (radianos/s), dada por $\omega = 2\pi f$

Amplitudes digitais são especificadas simplesmente por níveis de tensão denominados ALTO e BAIXO. Com ondas senoidais, a situação é mais complicada: a amplitude de um sinal $V(t) = V_0$ sen ωt pode ser dada como (a) amplitude de *pico* (ou apenas "amplitude") V_0, (b) raiz quadrática média (RMS) $V_{RMS} = V_0/\sqrt{2}$ ou (c) amplitude de pico a pico $V_{pp} = 2V_0$. Se não declarada, uma amplitude de onda senoidal é geralmente entendida como V_{RMS}. Um sinal de amplitude RMS, V_{RMS}, oferece potência $P = V^2_{\mathrm{RMS}}/R_{\mathrm{carga}}$ a uma carga resistiva (independentemente da forma de onda do sinal), o que explica a popularidade da medida de amplitude RMS.

Relações de amplitude de sinal (ou potência) são comumente expressas em decibéis (dB), definida como dB = 10 $\log_{10} (P_2/P_1)$ ou 20 $\log_{10} (V_2/V_1)$; ver Seção 1.3.2. Uma relação de amplitude de 10 (ou relação de potência de 100) é 20 dB; 3 dB é uma duplicação da potência; 6 dB é uma duplicação da amplitude (ou quádruplo da potência). A medida decibel também é utilizada para especificar a amplitude (ou potência) diretamente, dando um nível de referência: por exemplo, −30 dBm (dB relativamente a 1 mW) é 1 microwatt; +3 $\mathrm{dBV_{RMS}}$ é um sinal de amplitude de 1,4 V RMS (2 $\mathrm{V_{pico}}$, 4 $\mathrm{V_{pp}}$).

Outras formas de onda importantes são ondas quadradas, triangulares, rampas, o ruído e uma série de esquemas de *modulação* pelos quais uma onda simples, a "portadora", é variada a fim de transmitir informações; alguns exemplos são AM e FM para comunicação analógica e PPM (modulação de posição de pulso) ou QAM (modulação de amplitude em quadratura) para a comunicação digital.

¶ C. A Relação entre Corrente e Tensão

Este capítulo se concentrou nos fundamentais, essenciais e onipresentes *dispositivos lineares de dois terminais*: resistores, capacitores e indutores. (Os capítulos subsequentes abordam os *transistores* – dispositivos de três terminais em que um sinal aplicado a um terminal controla o fluxo de corrente através do outro par – e as suas muitas aplicações interessantes. Essas incluem amplificação, filtragem, conversão de potência, comutação e similares.) O dispositivo linear mais simples é o resistor, para o qual $I = V/R$ (Lei de Ohm, ver Seção 1.2.2A). O termo "linear" significa que a resposta (por exemplo, corrente) para uma soma combinada de entradas (isto é, tensões) é igual à soma das respostas que cada entrada produziria: $I(V_1 + V_2) = I(V_1) + I(V_2)$

¶ D. Resistores, Capacitores e Indutores

O resistor é claramente linear. Mas não é o único componente linear de dois terminais, porque a linearidade não necessita de $I \propto V$. Os outros dois componentes lineares são *capacitores* (Seção 1.4.1) e *indutores* (Seção 1.5.1), para os quais existe uma relação de dependência do tempo entre tensão e corrente: $I = C\, dV/dt$ e $V = L\, dI/dt$, respectivamente. Essas são as descrições no *domínio do tempo*. Pensando agora no *domínio da frequência*, esses componentes são descritos pelas suas *impedâncias*, a relação entre tensão e corrente (como uma função da frequência) quando acionados por uma onda senoidal (Seção 1.7). Um dispositivo linear, quando acionado por uma senoide, responde com uma senoide da mesma frequência, mas com amplitude e fase modificadas. Impedâncias são, portanto, complexas, com a parte real representando a amplitude da resposta que está em fase e a parte imaginária representando a amplitude da resposta que está em quadratura (90° fora de fase). Alternativamente, na representação polar de impedância complexa ($Z=|Z|e^{i\theta}$), o módulo $|Z|$ é uma relação de amplitudes ($|Z|=|V|/|I|$) e a quantidade θ é o desvio de fase entre V e I. As impedâncias dos três componentes lineares de 2 terminais são $Z_R = R$, $Z_C = -j/\omega C$ e $Z_L = j\omega L$, onde (como sempre) $\omega = 2\pi f$; veja a Seção 1.7.5. A corrente de onda senoidal através de um resistor está em fase com a tensão, ao passo que, para um capacitor, ela está adiantada 90° e, para um indutor, atrasada 90°.

¶ E. Série e Paralelo

A impedância de componentes conectados em série é a soma das suas impedâncias; assim $R_{\text{série}} = R_1 + R_2 + \cdots$, $R_{\text{série}} = R_1 + R_2 + \cdots$ $L_{\text{série}} = L_1 + L_2 + \cdots$ e $1/C_{\text{série}} = 1/C_1 + 1/C_2 + \cdots$. Quando conectado em paralelo, por outro lado, são as admitâncias (inverso da impedância) que são somadas. Assim, a fórmula para capacitores em paralelo se parece com a fórmula para resistores em série, $C_{\text{paralelo}} = C_1 + C_2 + \cdots$; e vice-versa para resistores e indutores, assim, $1/R_{\text{paralelo}} = 1/R_1 + R_2 + \cdots$. Para um par de resistores em paralelo, ela se reduz a $R_{\text{paralelo}} = (R_1R_2)/(R_1 + R_2)$. Por exemplo, dois resistores de valor R têm resistência $R/2$ quando conectados em paralelo, ou uma resistência de $2R$ em série.

A potência dissipada na resistência R é um $P = I^2R = V^2/R$. Não há dissipação de um capacitor ou indutor ideal, pois a tensão e a corrente estão 90° fora de fase. Veja a Seção 1.7.6.

¶ F. Circuitos Básicos com *R*, *L* e *C*

Resistores estão em toda parte. Eles podem ser usados para definir uma corrente de operação, por exemplo, ao ligar um LED ou polarizar um diodo zener (Figura 1.16); em tais aplicações, a corrente é simplesmente $I = (V_{fonte} - V_{carga})/R$. Em outras aplicações (por exemplo, como resistor de carga de um transistor em um amplificador, Figura 3.29), é a *corrente* que é conhecida, e um resistor é usado para convertê-la em tensão. Um fragmento de circuito importante é o *divisor de tensão* (Seção 1.2.3), cuja tensão de saída sem carga (sobre R_2) é $V_{\text{out}} = V_{\text{in}}R_2/(R_1 + R_2)$.

Se um dos resistores em um divisor de tensão for substituído por um capacitor, você terá um *filtro* simples: passa-baixas se a parte inferior for o capacitor, passa-altas se a parte superior for o capacitor (Seções 1.7.1 e 1.7.7). Em ambos os casos, a frequência de transição de −3 dB está em $f_{3\text{dB}} = 1/2\pi RC$. A taxa de atenuação final de tal filtro passa-baixas de "polo único" é −6 dB/oitava, ou −20 dB/década; ou seja, a amplitude do sinal cai como $1/f$ bem além de $f_{3\text{dB}}$. Mais filtros complexos podem ser criados pela combinação de indutores com capacitores; consulte o Capítulo 6. Um capacitor em paralelo com um indutor forma um *circuito ressonante*; sua impedância (para componentes ideais) vai para o infinito na frequência de ressonância $f-1/(2\pi\sqrt{LC})$.. A impedância de um *LC em série* vai para zero à mesma frequência ressonante. Veja a Seção 1.7.14.

Outras aplicações importantes de capacitores neste capítulo (Seção 1.7.16) incluem (a) *desvio* (*bypass*), em que a baixa impedância do capacitor nas frequências do sinal suprime sinais indesejados, por exemplo, em um barramento de alimentação CC; (b) *bloqueio* (Seção 1.7.1C), em que um filtro passa-altas bloqueia CC, mas passa todas as frequências de interesse (ou seja, o ponto de interrupção, ou corte, é escolhido abaixo de todas as frequências do sinal); (c) *temporização* (Seção 1.4.2D), em que um circuito *RC* (ou uma corrente constante em um capacitor) gera uma forma de onda inclinada usada para criar uma oscilação ou um intervalo de temporização; e (d) *armazenamento de energia* (Seção 1.7.16B), na qual a carga armazenada do capacitor, $Q = CV$, suaviza as ondulações em uma fonte de alimentação CC.

Nos próximos capítulos, veremos algumas aplicações adicionais de capacitores: (e) *detecção de pico* e *amostragem e retenção* (Seções 4.5.1 e 4.5.2), que capturam o pico de tensão ou valor transitório de uma forma de onda, e (f) *integrador* (Seção 4.2.6), o qual realiza uma integração matemática de um sinal de entrada.

¶ G. Efeito de Carga; Circuito Equivalente de Thévenin.

Conectar uma carga (por exemplo, um resistor) na saída de um circuito (uma "fonte de sinal") faz a tensão de saída sem carga cair; o montante de tal efeito de carga depende da resistência de carga e da capacidade da fonte de sinal para acioná-la. Esta última é geralmente expressa como a *impedância de fonte equivalente* (ou impedância de Thévenin) do sinal. Isto é, a fonte de sinal é modelada como uma fonte de tensão perfeita V_{sinal} em série com um resistor R_{sinal}. A saída do divisor de tensão resistivo acionado a partir de uma tensão de entrada V_{in}, por exemplo, é modelada como uma fonte de tensão $V_{sinal} = V_{in}R_2 / (R_1+R_2)$ em série com uma resistência $R_{\text{sinal}} = R_1R_2/(R_1 + R_2)$ (que é justamente $R_1 \| R_2$). Assim, a saída de um divisor de tensão de 1kΩ-1kΩ acionado por uma bateria de 10 V parece 5 V em série com 500 Ω.

Qualquer combinação de fontes de tensão, fontes de corrente e resistores pode ser modelada perfeitamente por uma única fonte de tensão em série com um único resistor (seu "circuito equivalente de Thévenin") ou por uma única fonte de corrente em paralelo com um único resistor (seu "circuito equivalente de Norton"); consulte o Apêndice D. Os valores da fonte e da resistência equivalentes de Thévenin são determinados a partir da tensão de circuito aberto (*open circuit*) e da corrente de curto-circuito (*short circuit*) como $V_{\text{Th}} = V_{\text{oc}}$, $R_{\text{Th}} = V_{\text{oc}}/I_{\text{sc}}$; e, para o equivalente de Norton, são $I_{\text{N}} = I_{\text{sc}}$, $R_{\text{N}} = V_{\text{oc}}/I_{\text{sc}}$.

Visto que a impedância de carga forma um divisor de tensão com impedância da fonte de sinal, geralmente é desejável que esta última seja pequena em comparação com qualquer impedância de carga antecipada (Seção 1.2.5A). No entanto, existem duas exceções: (a) uma *fonte de corrente* tem uma impedância alta (idealmente infinita) e deve acionar uma carga de impedância muito baixa; e (b) os sinais de *alta frequência* (ou tempo de subida rápido), deslocando-se através de um comprimento de cabo, sofrem reflexões a menos que a impedância da carga seja igual à chamada "impedância característica" Z_0 do cabo (geralmente 50 Ω); veja o Apêndice H.

¶ H. O Diodo, um Componente Não linear.

Existem dispositivos de dois terminais importantes que não são lineares, como o *diodo* (ou *retificador*); veja a Seção 1.6. O diodo ideal conduz em apenas um sentido; é uma "válvula de uma via". O início da condução nos diodos reais é aproximadamente a 0,5 V no sentido de "polarização direta", e há uma pequena corrente de fuga no sentido “reverso”; veja a Figura 1.55. Circuitos úteis com diodo incluem *retificação* da fonte de alimentação (conversão de CA em CC, Seção 1.6.2), *retificação* de sinal (Seção 1.6.6A), ceifamento (limitação de sinal, Seção 1.6.6C) e portas lógicas (Seção 1.6.6B). Diodos são geralmente utilizados para prevenir a polaridade reversa, como na Figura 1.84; e a sua corrente exponencial *versus* a tensão aplicada pode ser usada para moldar circuitos com resposta logarítmica (Seção 1.6.6E).

Os diodos têm uma especificação de tensão reversa máxima segura, para além da qual ocorre uma ruptura por avalanche (uma elevação abrupta de corrente). Não leve o diodo a esse ponto! Mas você pode (e deve) fazê-lo com um *diodo zener* (Seção 1.2.6A), para o qual uma tensão de ruptura reversa é especificada (em degraus, passando de cerca de 3,3 V a 100 V ou mais). Zeners são usados para estabelecer uma tensão dentro de um circuito (Figura 1.16) ou para limitar a oscilação de um sinal.