

Variáveis dos Circuitos Elétricos

CAPÍTULO

NESTE CAPÍTULO

- | | | | |
|-----|---------------------------------------|-----|---|
| 1.1 | Introdução | 1.7 | Como Podemos Testar...? |
| 1.2 | Circuito Elétrico e Corrente Elétrica | 1.8 | EXEMPLO DE PROJETO: Controlador do Motor de um Foguete |
| 1.3 | Sistemas de Unidades | 1.9 | Resumo |
| 1.4 | Tensão | | Problemas |
| 1.5 | Potência e Energia | | Problemas de Projeto |
| 1.6 | Análise e Projeto de Circuitos | | |

1 INTRODUÇÃO

Circuito é um conjunto de componentes elétricos ligados entre si. Os engenheiros usam circuitos elétricos para resolver problemas e são importantes para a sociedade moderna. Em particular:

Circuitos elétricos são usados na geração, transmissão e consumo da energia elétrica.

Circuitos elétricos são usados na codificação, decodificação, armazenamento, recuperação, transmissão e processamento da informação.

Neste capítulo vamos fazer o seguinte:

Representar a corrente e a tensão de um componente, com atenção especial para o sentido de referência da corrente e a polaridade de referência da tensão

Calcular a potência e a energia fornecidas e recebidas por um componente

Usar a convenção passiva para determinar se o produto da corrente pela tensão de um componente é a potência fornecida pelo componente ou a potência recebida pelo componente

Usar a notação científica para representar grandezas elétricas com uma larga faixa de valores

2 CIRCUITO ELÉTRICO E CORRENTE ELÉTRICA

As características marcantes da eletricidade, quando comparada com outras fontes de energia, são sua mobilidade e sua versatilidade. A energia elétrica pode ser conduzida para qualquer lugar por meio de um par de fios e, dependendo das necessidades do usuário, convertida em luz, calor ou movimento.

Circuito elétrico é um conjunto de componentes elétricos ligados entre si de modo a formar um percurso fechado através do qual pode circular uma corrente.

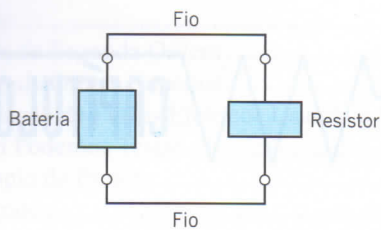


FIGURA 1.2-1 Um circuito simples.



FIGURA 1.2-2 Componente elétrico de dois terminais, a e b.

Considere o circuito simples da Figura 1.2-1, constituído por dois componentes elétricos bem conhecidos, uma bateria e um resistor. Cada componente é representado por um elemento de dois terminais como o da Figura 1.2-2. Os componentes também são chamados de dispositivos, e os terminais, de nós.

A carga pode circular em um circuito elétrico. *Corrente é a taxa de variação com o tempo da carga que passa em um dado ponto.* Carga é a propriedade intrínseca da matéria responsável pelos fenômenos elétricos. A quantidade de carga q pode ser expressa em termos da carga de um elétron, que é igual a $-1,602 \times 10^{-19}$ coulombs. Assim, -1 coulomb é a carga de $6,24 \times 10^{18}$ elétrons. A corrente que atravessa uma área dada é definida pela carga elétrica que passa pela área por unidade de tempo. Assim, q é definida como a carga expressa em coulombs (C).

Carga é a quantidade de eletricidade responsável pelos fenômenos elétricos.

A corrente pode ser expressa na forma

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1.2-1)$$

A unidade de corrente é o ampère (A); um ampère corresponde a 1 coulomb por segundo.

Corrente é a taxa de variação do fluxo de carga elétrica em um ponto dado.

Neste capítulo vamos usar letras minúsculas, como q , para representar grandezas que variam com o tempo, como $q(t)$, e letras maiúsculas, como Q , para representar grandezas constantes.

A corrente elétrica é tradicionalmente representada como o movimento de cargas positivas. Essa convenção foi criada por Benjamin Franklin, o primeiro grande cientista americano a estudar a eletricidade. Naturalmente, hoje sabemos que o movimento de carga nos condutores elétricos é o resultado do movimento de elétrons, que possuem carga negativa. Mesmo assim, descrevemos a corrente como um movimento de cargas positivas, de acordo com a convenção adotada no passado.

A Figura 1.2-3 mostra a notação que usamos para descrever uma corrente. A notação tem duas partes: um valor (talvez representado pelo nome de uma variável) e um sentido. É indiferente afirmar que a corrente *existe* em um componente ou *atravessa* o componente. A Figura 1.2-3 mostra que há duas formas de atribuir um sentido à corrente em um componente. A corrente i_1 é a taxa de variação da carga elétrica do terminal a para o terminal b. Por outro lado, a corrente i_2 é a taxa de variação da carga elétrica do terminal b para o terminal a. As correntes i_1 e i_2 têm o mesmo valor numérico, mas sentidos opostos. Assim, i_2 é o negativo de i_1 :

$$i_1 = -i_2$$

Para indicar o sentido da corrente que é considerado positivo, usamos uma seta. Uma descrição completa de uma corrente requer tanto um valor (que pode ser positivo ou negativo) quanto um sentido (indicado por uma seta).

Se a corrente em um componente é constante, é representada pela letra I , como na Figura 1.2-4. Uma corrente constante é chamada de *corrente contínua* (cc).

Corrente contínua (cc) é uma corrente de valor constante.

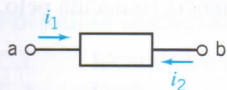
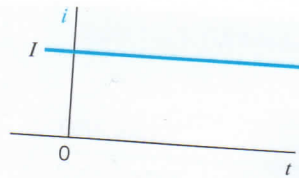
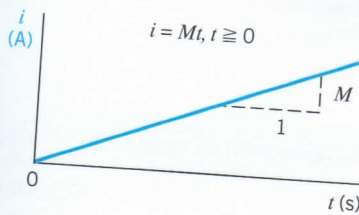


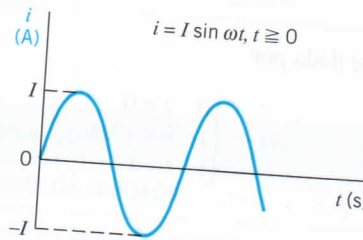
FIGURA 1.2-3 Corrente em um componente.

FIGURA 1.2-4 Corrente contínua de valor absoluto I .

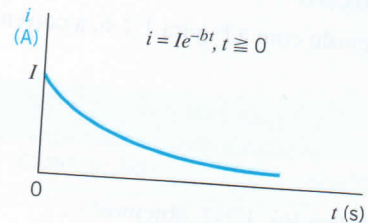
Uma corrente que varia com o tempo, $i(t)$, pode ter muitas formas, como de uma rampa, uma senoide ou uma exponencial (Figura 1.2-5). Uma corrente senoidal é chamada de *corrente alternada* ou *ca*.



(a)



(b)



(c)

FIGURA 1.2-5 (a) Rampa de inclinação M . (b) Senoide. (c) Exponencial. I é uma constante. A corrente i é zero para $t < 0$.

Se a carga q é conhecida, a corrente i pode ser facilmente calculada usando a Eq. 1.2-1. Da mesma forma, se a corrente i é conhecida, a carga q pode ser facilmente calculada; integrando a Eq. 1.2-1, obtemos

$$q = \int_{-\infty}^t i d\tau = \int_0^t i d\tau + q(0) \quad (1.2-2)$$

onde $q(0)$ é a carga no instante $t = 0$.

EXEMPLO 1.2-1 Corrente a partir da Carga

Determine a corrente em um componente sabendo que a carga que entra no componente é dada por

$$q = 12t \text{ C}$$

onde t é o tempo em segundos.

Solução

Lembre que C representa o coulomb, a unidade de carga. De acordo com a Eq. 1.2-1, temos:

$$i = \frac{dq}{dt} = 12 \text{ A}$$

onde A representa a unidade de corrente, o ampère.

EXEMPLO 1.2-2 Carga a partir da Corrente

Determine a carga que entrou no terminal de um componente entre os instantes $t = 0$ s e $t = 3$ s, sabendo que a corrente no componente nesse intervalo foi a que aparece na Figura 1.2-6.

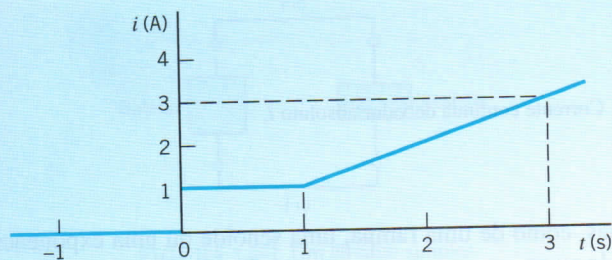


FIGURA 1.2-6 Corrente em função do tempo no Exemplo 1.2-2.

Solução

De acordo com a Figura 1.2-6, a corrente $i(t)$ é dada por

$$i(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & 0 < t \leq 1 \\ t & t > 1 \end{cases}$$

Usando a Eq. 1.2-2, obtemos:

$$\begin{aligned} q(3) - q(0) &= \int_0^3 i(t) dt = \int_0^1 1 dt + \int_1^3 t dt \\ &= t \Big|_0^1 + \frac{t^2}{2} \Big|_1^3 = 1 + \frac{1}{2}(9 - 1) = 5 \text{ C} \end{aligned}$$

Como alternativa, podemos observar que, para integrar $i(t)$ de $t = 0$ a $t = 3$, basta calcular a área sob a curva da Figura 1.2-6. Assim, temos:

$$q = 1 + 2 \times 2 = 5 \text{ C}$$

EXERCÍCIO 1.2-1 Determine a carga que entrou em um componente até o instante t , sabendo que $i(t) = 8t^2 - 4t \text{ A}$ para $t \geq 0$ e $q(t) = 0$ para $t < 0$.

Resposta: $q(t) = \frac{8}{3}t^3 - 2t^2 \text{ C}$

EXERCÍCIO 1.2-2 A carga que entrou em um componente de um circuito é dada por $q(t) = 4 \sin 3t \text{ C}$ para $t \geq 0$ e $q(t) = 0$ para $t < 0$. Determine a corrente no componente para $t > 0$.

Resposta: $i(t) = \frac{d}{dt} 4 \sin 3t = 12 \cos 3t \text{ A}$

1.3 SISTEMAS DE UNIDADES

Quando representamos um circuito e seus componentes, precisamos definir um sistema coerente de unidades para as grandezas presentes no circuito. Em uma reunião da Conferência Geral de Pesos e Medidas realizada em 1960, os representantes modernizaram o sistema métrico e criaram o Sistema Internacional de Unidades, mais conhecido como SI.

SI é a abreviação de Sistema Internacional de Unidades.

A Tabela 1.3-1 mostra as unidades fundamentais do SI. Os símbolos de unidades que representam nomes próprios são letras maiúsculas; os outros símbolos são letras minúsculas. Não são usados pontos depois dos símbolos, e os símbolos são usados sempre no singular. As unidades das outras grandezas físicas, conhecidas como unidades secundárias, são obtidas a partir de combinações das unidades fundamentais. A Tabela 1.3-2 mostra algumas das unidades secundárias mais usadas do SI e suas expressões

Tabela 1.3-1 Unidades Básicas do SI

GRANDEZA	UNIDADE DO SI	
	NOME	SÍMBOLO
Comprimento	metro	m
Massa	quilograma	kg
Tempo	segundo	s
Corrente elétrica	ampère	A
Temperatura termodinâmica	kelvin	K
Quantidade de substância	mol	mol
Intensidade luminosa	candela	cd

Tabela 1.3-2 Algumas Unidades Secundárias do SI

GRANDEZA	NOME DA UNIDADE	EXPRESSÃO	SÍMBOLO
Aceleração linear	metro por segundo ao quadrado	m/s^2	
Velocidade linear	metro por segundo	m/s	
Frequência	hertz	s^{-1}	
Força	newton	$\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$	Hz
Pressão ou tensão mecânica	pascal	N/m^2	N
Massa específica	quilograma por metro cúbico	kg/m^3	Pa
Energia ou trabalho	joule	$\text{N} \cdot \text{m}$	
Potência	watt	J/s	J
Carga elétrica	coulomb	$\text{A} \cdot \text{s}$	W
Potencial elétrico	volt	W/A	C
Resistência elétrica	ohm	V/A	V
Condutância	siemens	A/V	Ω
Capacitância	farad	C/V	S
Fluxo magnético	weber	$\text{V} \cdot \text{s}$	F
Indutância	henry	Wb/A	Wb
			H

em termos das unidades fundamentais ou de outras unidades secundárias. São também mostrados os símbolos dessas unidades, caso existam.

Unidades fundamentais como o metro (m), o segundo (s) e o ampère (A) podem ser usadas para definir as unidades secundárias. Assim, por exemplo, a unidade de corrente, o coulomb (C), é definida como o produto da unidade de corrente pela unidade de tempo ($\text{A} \cdot \text{s}$). A unidade de energia, o joule (J), é definida como o produto da unidade de força pela unidade de tempo ($\text{N} \cdot \text{m}$).

Tabela 1.3-3 Prefixos do SI

MÚLTIPLO	PREFIXO	SÍMBOLO
10^{12}	tera	T
10^9	giga	G
10^6	mega	M
10^3	quilo	k
10^{-2}	centi	c
10^{-3}	mili	m
10^{-6}	micro	μ
10^{-9}	nano	n
10^{-12}	pico	p
10^{-15}	femto	f

A grande vantagem do SI é que utiliza um sistema decimal para relacionar unidades maiores ou menores à unidade básica. As potências de 10 são representadas pelos prefixos que aparecem na Tabela 1.3-3. Uma unidade de comprimento muito usada, por exemplo, é o centímetro (cm), que equivale a 0,01 m.

O prefixo nunca é escrito isoladamente; deve sempre ser seguido pelo símbolo de uma unidade. Assim, por exemplo, 2,5 kW equivalem a 2500 W e 12 mA correspondem a 0,012 A.

EXEMPLO 1.3-1 Unidades do SI

Uma massa de 150 gramas experimenta uma força de 100 newtons. Determine a energia gasta ou o trabalho executado para deslocar a massa de 10 centímetros. Determine também a potência envolvida se a massa completar o movimento em 1 milissegundo.

Solução

A energia é dada por

$$\text{energia} = \text{força} \times \text{distância} = 100 \times 0,1 = 10 \text{ J}$$

Observe que usamos a distância em metros. A potência é dada por

$$\text{potência} = \frac{\text{energia}}{\text{intervalo de tempo}}$$

onde o período de tempo é 10^{-3} s. Assim,

$$\text{potência} = \frac{10}{10^{-3}} = 10^4 \text{ W} = 10 \text{ kW}$$

EXERCÍCIO 1.3-1 Qual das três correntes $i_1 = 45 \mu\text{A}$, $i_2 = 0,03 \text{ mA}$ e $i_3 = 25 \times 10^{-4} \text{ A}$ é a maior?

Resposta: i_3 é a maior.

1.4 TENSÃO

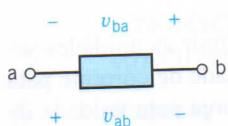


FIGURA 1.4-1 Tensão entre os terminais de um componente.

As variáveis básicas de um circuito elétrico são corrente e tensão. Essas variáveis descrevem a passagem de cargas pelos componentes de um circuito e a energia necessária para promover essa passagem. A Figura 1.4-1 mostra a notação que usamos para descrever uma tensão. A notação envolve dois aspectos: um valor (talvez representado pelo nome de uma variável) e um sentido. O valor de uma tensão pode ser positivo ou negativo. O sentido da tensão é dado pela polaridade (+, -). Por uma questão de linguagem, dizemos que existe uma tensão *entre os terminais* de um componente. Como mostra a Figura 1.4-1, há duas maneiras de indicar a tensão entre os terminais de um componente. A tensão v_{ba} é proporcional ao trabalho necessário para transportar uma carga positiva do terminal a para o terminal b. Por outro lado, a

tensão v_{ab} é proporcional ao trabalho necessário para transportar uma carga positiva do terminal b para o terminal a. A tensão v_{ab} também pode ser interpretada como “a tensão do terminal b em relação ao terminal a”. Analogamente, a tensão v_{ba} pode ser interpretada como “a tensão do terminal a em relação ao terminal b”. Também podemos dizer que v_{ba} é a queda de tensão do terminal a para o terminal b. As tensões v_{ab} e v_{ba} têm o mesmo valor absoluto e polaridades opostas. Isso significa que

$$v_{ab} = -v_{ba}$$

Quando estamos considerando a tensão v_{ba} , o terminal b é chamado de “terminal +” e o terminal a é chamado de “terminal -”. Por outro lado, quando estamos considerando a tensão v_{ab} , o terminal a é chamado de “terminal +” e o terminal b de “terminal -”.

A **tensão** entre os terminais de um componente é o trabalho (energia) necessário(a) para transportar uma unidade de carga positiva do terminal - para o terminal +. A unidade de tensão é o volt, V.

A tensão entre os terminais de um componente é dada por

$$v = \frac{dw}{dq}$$

(1.4-1)

onde v é a tensão, w é a energia (ou trabalho) e q é a carga. Uma carga de 1 coulomb fornece energia de 1 joule ao percorrer uma diferença de potencial de 1 volt.

1.5 POTÊNCIA E ENERGIA

É muito importante conhecer a potência e a energia fornecidas a um componente. Assim, por exemplo, a luz produzida por uma lâmpada elétrica pode ser expressa em termos de potência. Sabemos que uma lâmpada de 300 watts produz mais luz que uma lâmpada de 100 watts.

Potência é a taxa com a qual a energia é fornecida ou absorvida.

Assim, temos a equação

$$p = \frac{dw}{dt}$$

(1.5-1)

onde p é a potência em watts, w é a energia em joules e t é o tempo em segundos. A potência associada à corrente em um componente é dada por

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = v \cdot i$$

(1.5-2)

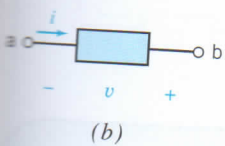
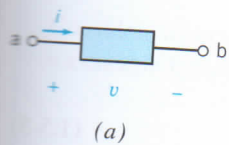


FIGURA 1.5-1 (a) A tensão e a corrente no componente estão de acordo com a convenção passiva. (b) A tensão e a corrente no componente não estão de acordo com a convenção passiva.

A Eq. 1.5-2 mostra que a potência é simplesmente o produto da tensão entre os terminais de um componente multiplicada pela corrente que atravessa o componente. A unidade de potência é o watt.

Duas variáveis elétricas são atribuídas a cada componente de um circuito: uma tensão e uma corrente. A Figura 1.5-1 mostra que existem duas formas diferentes de definir o sentido da corrente e a polaridade da tensão. Na Figura 1.5-1a, a corrente entra no componente pelo terminal + da tensão e sai pelo terminal -. Na Figura 1.5-1b, por outro lado, a corrente entra no componente pelo terminal - e sai pelo terminal +.

Considere primeiro a Figura 1.5-1a. Quando a corrente entra no componente pelo terminal + da tensão e sai pelo terminal -, dizemos que a tensão e a corrente “estão de acordo com a convenção passiva”. Na convenção passiva, a tensão movimenta uma carga positiva no sentido indicado pela corrente. Nesse caso, a potência calculada multiplicando a tensão entre os terminais do componente pela corrente que o atravessa

$$p = vi$$

é a potência **absorvida** pelo componente. (Essa potência também é chamada de “potência recebida pelo componente” e “potência dissipada pelo componente”.) A potência absorvida por um componente pode ser positiva ou negativa, dependendo dos valores da tensão e da corrente no componente.

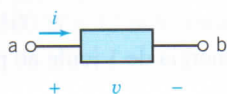
Considere agora a Figura 1.5-1b. Nesse caso, a convenção passiva não é adotada. Em vez disso, a corrente entra no componente pelo terminal - da tensão e sai pelo terminal +. Isso significa que a tensão movimenta uma carga positiva no sentido oposto ao indicado para a corrente. Assim, quando a tensão e a corrente em um componente não estão de acordo com a convenção passiva, a potência calculada multiplicando a tensão entre os terminais de um componente pela corrente que o atravessa é a potência **fornecida** pelo componente, que pode ser positiva ou negativa, dependendo dos valores da tensão e corrente no componente.

A potência absorvida por um componente e a potência fornecida pelo mesmo componente estão relacionadas por meio da equação

$$\text{potência absorvida} = - \text{potência fornecida}$$

Tabela 1.5-1 Potência Absorvida ou Fornecida por um Componente

POTÊNCIA ABSORVIDA POR UM COMPONENTE

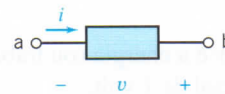


Como as direções de referência de v e i estão de acordo com a convenção passiva, a potência

$$p = vi$$

é a potência absorvida pelo componente.

POTÊNCIA FORNECIDA POR UM COMPONENTE



Como as direções de referência de v e i não estão de acordo com a convenção passiva, a potência

$$p = vi$$

é a potência fornecida pelo componente.

As regras da convenção passiva aparecem na Tabela 1.5-1. Quando a tensão e a corrente em um componente estão de acordo com a convenção passiva, a energia absorvida pelo componente pode ser calculada a partir da Eq. 1.5-1 escrevendo a equação na forma

$$dw = p \, dt \quad (1.5-3)$$

Integrando ambos os membros, obtemos:

$$w = \int_{-\infty}^t p \, d\tau \quad (1.5-4)$$

Se o componente recebe potência apenas para $t \geq t_0$ e se $t_0 = 0$, temos:

$$w = \int_0^t p \, d\tau \quad (1.5-5)$$

EXEMPLO 1.5-1 Potência e Energia Elétrica

Considere o componente da Figura 1.5-1a e suponha que $v = 4 \text{ V}$ e $i = 10 \text{ A}$. Determine a potência absorvida pelo componente e a energia absorvida em um intervalo de 10 s.

Solução

A potência absorvida pelo componente é

$$p = vi = 4 \cdot 10 = 40 \text{ W}$$

A energia absorvida pelo componente é

$$w = \int_0^{10} p \, dt = \int_0^{10} 40 \, dt = 40 \cdot 10 = 400 \text{ J}$$

EXEMPLO 1.5-2 Potência Elétrica e a Convenção Passiva

Considere o componente da Figura 1.5-2. Como a corrente i e a tensão v_{ab} estão de acordo com a convenção passiva, a potência *absorvida* pelo componente é dada por

$$\text{potência absorvida} = i \cdot v_{ab} = 2 \cdot (-4) = -8 \text{ W}$$

Como a corrente i e a tensão v_{ba} não estão de acordo com a convenção passiva, a potência *fornecida* pelo componente é dada por

$$\text{potência fornecida} = i \cdot v_{ba} = 2 \cdot (4) = 8 \text{ W}$$

Como era de se esperar,

$$\text{potência absorvida} = - \text{potência fornecida}$$

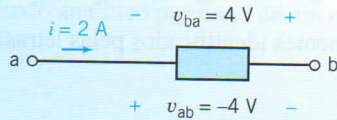


FIGURA 1.5-2 O componente do Exemplo 1.5-2.

Vamos agora considerar um exemplo no qual a convenção passiva não é usada. Nesse caso, $p = vi$ é a potência fornecida pelo componente.

EXEMPLO 1.5-3 Potência, Energia e a Convenção Passiva

Considere o circuito da Figura 1.5-3 com $v = 8e^{-t}$ V e $i = 20e^{-t}$ A para $t \geq 0$. Determine a potência fornecida pelo componente e a energia fornecida pelo componente durante o primeiro segundo de operação. Suponha que v e i sejam nulos para $t < 0$.

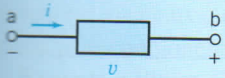


FIGURA 1.5-3 Um componente com a corrente entrando pelo terminal definido como negativo.

Solução

A potência fornecida é

$$p = vi = (8e^{-t})(20e^{-t}) = 160e^{-2t} \text{ W}$$

O componente está fornecendo energia à carga que o atravessa.

A energia fornecida durante o primeiro segundo é

$$\begin{aligned} w &= \int_0^1 p \, dt = \int_0^1 (160e^{-2t}) \, dt \\ &= 160 \left. \frac{e^{-2t}}{-2} \right|_0^1 = \frac{160}{-2} (e^{-2} - 1) = 80(1 - e^{-2}) = 69,2 \text{ J} \end{aligned}$$

EXEMPLO 1.5-4 Energia de um Relâmpago

A corrente média em um relâmpago típico é 2×10^4 A e a duração típica de um relâmpago é 0,1 s (Williams, 1988). A tensão entre as nuvens e o solo é 5×10^8 V. Determine a carga total transferida para a terra e a energia liberada.

Solução

A carga total é

$$Q = \int_0^{0,1} i(t) dt = \int_0^{0,1} 2 \times 10^4 dt = 2 \times 10^3 \text{ C}$$

A energia total liberada é

$$w = \int_0^{0,1} i(t) \times v(t) dt = \int_0^{0,1} (2 \times 10^4)(5 \times 10^8) dt = 10^{12} \text{ J} = 1 \text{ TJ}$$

EXERCÍCIO 1.5-1 A Figura E 1.5-1 mostra quatro componentes identificados pelas letras A, B, C e D.

- (a) Que componentes fornecem 12 W?
- (b) Que componentes absorvem 12 W?
- (c) Qual é o valor da potência recebida pelo componente B?
- (d) Qual é o valor da potência fornecida pelo componente B?
- (e) Qual é o valor da potência fornecida pelo componente D?

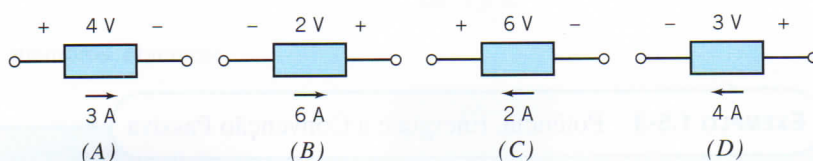


FIGURA E 1.5-1

Respostas: (a) B e C; (b) A e D; (c) -12 W; (d) 12 W; (e) -12 W

1.6 ANÁLISE E PROJETO DE CIRCUITOS

A análise e projeto de circuitos elétricos são as principais atividades descritas neste livro e são as habilidades básicas de um engenheiro eletricitista. *Análise* de um circuito é o estudo metódico do circuito com o objetivo de determinar o valor absoluto e o sentido de uma ou mais variáveis do circuito, como corrente ou tensão.

O processo de análise começa com a formulação do problema e em geral inclui um modelo do circuito. A última tarefa é verificar se a solução proposta está realmente correta. Em geral, o engenheiro primeiro verifica o que é conhecido e que princípios deve usar para determinar o valor absoluto e o sentido da variável desconhecida.

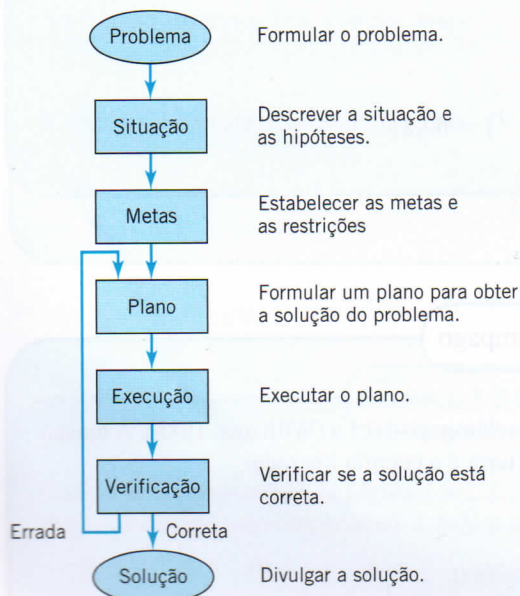


FIGURA 1.6-1 O método de solução de problemas.

O método de solução de problemas que será usado neste livro está representado de maneira esquemática na Figura 1.6-1. Na maioria dos casos, o problema já está formulado e o processo de análise envolve os cinco passos seguintes da Figura 1.6-1. Primeiro, descrevemos a situação e as hipóteses. Também formulamos ou escolhemos o modelo de circuito que será usado. Em segundo lugar, estabelecemos as metas e restrições e normalmente definimos a variável do circuito a ser determinada. O terceiro passo consiste em formular um plano para obter a solução do problema. Essa formulação, na maioria dos casos, envolve a escolha dos princípios e técnicas a serem empregados na solução. O quarto passo consiste em executar o plano que foi definido no terceiro passo. O passo final é verificar se a solução obtida está correta. Em caso afirmativo, divulgamos a solução registrando-a por escrito ou apresentando-a oralmente. Se o passo de verificação mostra que a solução está errada, voltamos ao terceiro passo, formulamos um plano melhor e executamos novamente os passos 4 e 5.

Vamos ilustrar esse método analítico por meio de um exemplo. No Exemplo 1.6-1, usamos os passos da Figura 1.6-1 para resolver um problema específico.

EXEMPLO 1.6-1 O Método Formal de Solução de Problemas

Um pesquisador em um laboratório supõe que um componente de um circuito está absorvendo potência e usa um voltímetro e um amperímetro para medir a tensão e a corrente, como mostra a Figura 1.6-2. As medidas revelam que a tensão é $v = +12$ V e a corrente é $i = -2$ A. Verifique se a suposição do pesquisador está correta.

Descreva a Situação e as Hipóteses. Especificamente falando, o componente *está* absorvendo potência. O valor da potência absorvida pelo componente pode ser positivo, nulo ou negativo. Quando dizemos que alguém “supõe que um componente está absorvendo potência”, estamos querendo dizer que alguém supõe que a potência absorvida pelo componente é positiva.

Os medidores são ideais e foram ligados ao componente de forma a medir a tensão v e a corrente i . Os valores da tensão e da corrente são dados pelas leituras dos medidores.

Estabeleça as Metas. Calcule a potência absorvida pelo componente para verificar se o seu valor é positivo.

Formule um Plano. Verifique se a tensão e a corrente no componente estão de acordo com a convenção passiva. Se a resposta for afirmativa, a potência absorvida pelo componente será dada por $p = vi$; se a resposta for negativa, a potência absorvida pelo componente será dada por $p = -vi$.

Execute o Plano. De acordo com a Tabela 1.5-1, a tensão e a corrente no componente estão de acordo com a convenção passiva. A potência absorvida pelo componente é, portanto,

$$p = vi = 12 \cdot (-2) = -24 \text{ W}$$

Como o valor da potência absorvida não é positivo, a suposição do pesquisador está errada.

Verifique se a Solução Está Correta. Vamos inverter a posição das pontas de prova do amperímetro, como na Figura 1.6-3. Agora o amperímetro está medindo a corrente i_1 e não a corrente i e, portanto, $i_1 = 2$ A e $v = 12$ V. Como i_1 e v não estão de acordo com a convenção passiva, $p = i_1 \cdot v = 24$ W é a potência fornecida pelo componente. Fornecer 24 W equivale a absorver -24 W, o que mostra que a solução está correta.

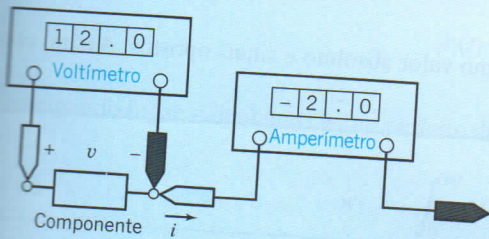


FIGURA 1.6-2 Um componente com um voltímetro e um amperímetro.

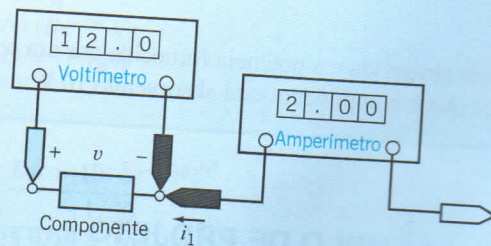


FIGURA 1.6-3 O circuito da Figura 1.6-2 com a posição das pontas de prova do amperímetro invertida.

Projeto é uma atividade criativa na qual um indivíduo procura atingir um objetivo usando os recursos disponíveis. Projeto de circuitos elétricos é o processo de produzir a descrição de um circuito que atenda a uma série de especificações e restrições. O projeto de um circuito pode ser dividido em três fases: análise, síntese e avaliação. A primeira fase é a de diagnóstico, formulação e preparação e termina com uma compreensão do problema e uma definição de metas específicas a serem atingidas. A segunda fase envolve a busca de soluções exequíveis. A terceira consiste em verificar se as soluções obtidas atendem aos objetivos desejados.

e escolher entre essas soluções a mais adequada. Nesse processo, está implícito um ciclo no qual a solução é revista e aperfeiçoada por meio de uma nova análise. As três fases fazem parte de uma estratégia para planejar, organizar e aperfeiçoar projetos.

Projeto é o processo de criar um circuito que atenda a uma série de objetivos.

O processo de solução de problemas ilustrado na Figura 1.6-1 é usado nos Exemplos de Projeto incluídos em cada capítulo deste livro.

1.7 COMO PODEMOS TESTAR...?

Os engenheiros são frequentemente encarregados de verificar se a solução de um problema está correta. As soluções de problemas de projeto, por exemplo, devem ser verificadas para confirmar que todas as especificações estão sendo atendidas. Além disso, os resultados obtidos com o auxílio de computadores devem ser revistos para evitar possíveis erros na digitação dos dados, assim como as afirmações dos vendedores a respeito dos seus produtos devem ser confirmadas.

Os estudantes de engenharia muitas vezes também precisam verificar se os resultados que obtiveram estão corretos. Às vezes falta muito pouco tempo para terminar um exame e é importante poder identificar rapidamente as questões que precisam ser refeitas.

Este livro inclui alguns exemplos que ilustram técnicas úteis para verificar se as soluções dos problemas discutidos no capítulo estão corretas. No final de cada capítulo, são propostos alguns problemas que oferecem ao aluno a oportunidade de aplicar essas técnicas.

EXEMPLO 1.7-1 Como Podemos Testar a Potência e a Convenção Passiva?

De acordo com o relatório de uma experiência de laboratório, os valores medidos de v e i no componente da Figura 1.7-1 são -5 V e 2 A , respectivamente. O relatório também afirma que a potência absorvida pelo componente é 10 W . **Como podemos verificar** se o valor da potência absorvida pelo componente está correto?

Solução

O componente do circuito absorve -10 W ou $+10\text{ W}$? A tensão e a corrente mostradas na Figura 1.7-1 não estão de acordo com a convenção passiva. Como visto na Tabela 1.5-1, o produto da tensão pela corrente nesse caso é a potência fornecida pelo componente, e não a potência absorvida pelo componente.

Assim, a potência fornecida pelo componente é

$$p = vi = (-5)(2) = -10\text{ W}$$

A potência absorvida e a potência fornecida por um componente têm o mesmo valor absoluto e sinais opostos. Assim, confirmamos que o componente está absorvendo 10 W .

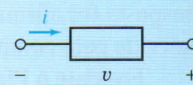


FIGURA 1.7-1 Componente de um circuito com a tensão e a corrente indicadas.

1.8 EXEMPLO DE PROJETO

CONTROLADOR DO MOTOR DE UM FOGUETE

Um pequeno foguete experimental usa o circuito de dois componentes da Figura 1.8-1 para controlar a alimentação do motor desde o instante da decolagem, em $t = 0$, até o combustível acabar, um minuto depois. Durante esse período de um minuto, o componente 1 deve fornecer uma energia de 40 mJ . O componente 1 é uma bateria a ser escolhida.

Sabe-se que $i(t) = De^{-t/60}\text{ mA}$ para $t \geq 0$ e que a tensão entre os terminais do segundo componente é $v_2(t) = Be^{-t/60}\text{ V}$ para $t \geq 0$. O valor absoluto máximo da corrente, D , é limitado a 1 mA . Determine os valores das constantes D e B e descreva a bateria.

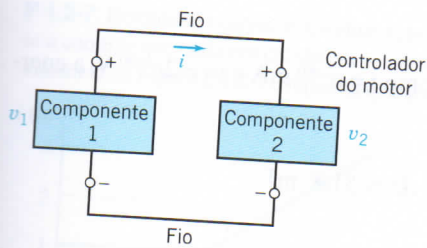


FIGURA 1.8-1 Circuito de controle do motor de um foguete.

Descreva a Situação e as Hipóteses

1. A corrente entra pelo terminal positivo do segundo componente.
2. A corrente sai pelo terminal positivo do primeiro componente.
3. Os fios são ideais e não têm efeito sobre o circuito (não absorvem energia).
4. O modelo do circuito, que aparece na Figura 1.8-1, supõe que a tensão é a mesma entre os terminais dos dois componentes, ou seja, que $v_1 = v_2$.
5. A tensão na bateria é $v_1 = Be^{-t/60}$ V, onde B é a tensão inicial da bateria, que se descarrega exponencialmente ao fornecer energia ao controlador.
6. O circuito funciona entre os instantes $t = 0$ e $t = 60$ s.
7. A corrente é limitada de tal forma que $D \leq 1$ mA.

Estabeleça as Metas

Calcular a energia fornecida pelo primeiro componente durante o período de um minuto e escolher os valores das constantes D e B . Descrever a bateria escolhida.

Formule um Plano

Primeiro, calcular $v_1(t)$ e $i(t)$ e determinar a potência, $p_1(t)$, fornecida pelo primeiro componente. Em seguida, usando $p_1(t)$, calcular a energia fornecida durante o período de 60 s.

META	EQUAÇÃO	NECESSIDADE	INFORMAÇÃO
A energia w_1 para os primeiros 60 s	$w_1 = \int_0^{60} p_1(t) dt$	$p_1(t)$	v_1 e i conhecidas, exceto pelas constantes D e B

Execute o Plano

Para começar, calculamos $p_1(t)$:

$$p_1(t) = iv_1 = (De^{-t/60} \times 10^{-3} \text{ A}) (Be^{-t/60} \text{ V}) \\ = DBe^{-t/30} \times 10^{-3} \text{ W} = DBe^{-t/30} \text{ mW}$$

Em segundo lugar, calculamos w_1 no período de 60 s:

$$w_1 = \int_0^{60} (DBe^{-t/30} \times 10^{-3}) dt = \frac{DB \times 10^{-3} e^{-t/30}}{-1/30} \Big|_0^{60} \\ = -30DB \times 10^{-3} (e^{-2} - 1) = 25,9DB \times 10^{-3} \text{ J}$$

Como queremos que $w_1 \geq 40$ mJ,

$$40 \leq 25,9DB$$

Em seguida, escolhemos o valor limite, $D = 1$, para obter

$$B \geq \frac{40}{(25,9)(1)} = 1,54 \text{ V}$$

Assim, escolhemos uma bateria de 2 V, sabendo que, neste caso, o valor absoluto da corrente será menor que 1 mA.

Verifique se a Solução Está Correta

Devemos verificar se a potência fornecida pela bateria de 2 V é pelo menos 4 mJ. Como $i = e^{-t/60}$ mA e $v_2 = 2e^{-t/60}$ V, a energia fornecida pela bateria é

$$w = \int_0^{60} (2e^{-t/60})(e^{-t/60} \times 10^{-3}) dt = \int_0^{60} 2e^{-t/30} \times 10^{-3} dt = 51,8 \text{ mJ}$$

Assim, a solução está correta e podemos implementá-la encomendando uma bateria de 2 V.

1.9 RESUMO

- A carga é uma propriedade intrínseca da matéria responsável por fenômenos elétricos. A corrente em um componente de um circuito é a taxa de variação com o tempo da carga que passa pelo componente. A tensão entre os terminais do componente indica a energia disponível para fazer com que a carga atravesse o componente.
- Dadas a corrente, i , e a tensão, v , em um componente de um circuito, a potência, p , e a energia, w , são dadas por

$$p = v \cdot i \quad \text{e} \quad w = \int_0^t p d\tau$$

- A Tabela 1.5-1 ilustra o uso da convenção passiva para calcular a potência fornecida ou recebida por um componente de um circuito.
- As unidades do SI (Tabela 1.3-1) são hoje adotadas universalmente pelos engenheiros e cientistas. O uso de prefixos decimais (Tabela 1.3-3) facilita a indicação de valores muito grandes ou muito pequenos das grandezas elétricas.

PROBLEMAS

Seção 1.2 Circuito Elétrico e Corrente Elétrica

P 1.2-1 A carga total que entra em um componente de um circuito é $q(t) = 1,25(1 - e^{-5t})$ para $t \geq 0$ e $q(t) = 0$ para $t < 0$. Determine a corrente no componente para $t \geq 0$.

Resposta: $i(t) = 6,25e^{-5t}$ A

P 1.2-2 A corrente em um componente de um circuito é $i(t) = 4(1 - e^{-5t})$ A para $t \geq 0$ e $i = 0$ para $t < 0$. Determine a carga total que entra no componente para $t \geq 0$.

Sugestão: $q(0) = \int_{-\infty}^0 i(\tau) d\tau = \int_{-\infty}^0 0 d\tau = 0$

Resposta: $q(t) = 4t + 0,8e^{-5t} - 0,8$ C para $t \geq 0$

P 1.2-3 A corrente em um componente de um circuito é $i(t) = 4 \sin 5t$ A para $t \geq 0$ e $i(t) = 0$ para $t < 0$. Determine a carga total que entra no componente para $t \geq 0$.

Sugestão: $q(0) = \int_{-\infty}^0 i(\tau) d\tau = \int_{-\infty}^0 0 d\tau = 0$

P 1.2-4 A corrente em um componente de um circuito é

$$i(t) = \begin{cases} 0 & t < 2 \\ 2 & 2 < t < 4 \\ -1 & 4 < t < 8 \\ 0 & 8 < t \end{cases}$$

onde as correntes estão em ampères e o tempo em segundos. Determine a carga total que entra no componente para $t \geq 0$.

Resposta:

$$q(t) = \begin{cases} 0 & t < 2 \\ 2t - 4 & 2 < t < 4 \\ 8 - t & 4 < t < 8 \\ 0 & 8 < t \end{cases} \quad \text{onde a unidade de carga é o coulomb.}$$

P 1.2-5 A carga total $q(t)$, em coulombs, que entra em um componente é dada por

$$q(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 2t & 0 \leq t \leq 2 \\ 3 + e^{-2(t-2)} & t > 2 \end{cases}$$

Determine a corrente $i(t)$ e plote a corrente em função do tempo para $t \geq 0$.

P 1.2-6 Um banho eletroquímico, como mostra a Figura P 1.2-6, é usado para depositar uma fina camada de prata em objetos como pratos e talheres. Uma corrente de 450 A circula durante 20 minutos e cada coulomb deposita 1,118 mg de prata. Qual é o peso, em gramas, da prata depositada?

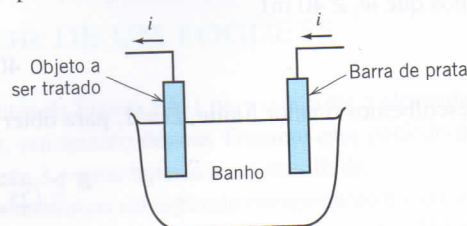


FIGURA P 1.2-6 Banho eletroquímico.

P 1.2-7 Determine a carga, $q(t)$, e plote a carga em função do tempo se a corrente que entra em um dos terminais de um componente é a mostrada na Figura P 1.2-7. Suponha que $q(t) = 0$ para $t < 0$.

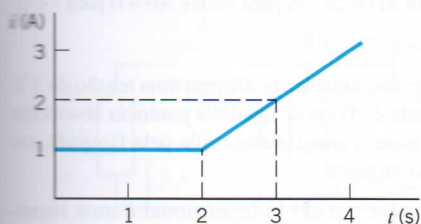


FIGURA P 1.2-7

Seção 1.3 Sistemas de Unidades

P 1.3-1 Uma corrente constante de $3,2 \mu\text{A}$ atravessa um componente. Qual é a carga que atravessa o componente no primeiro milissegundo?

Resposta: $3,2 \text{ nC}$

P 1.3-2 Uma carga de 45 nC atravessa um componente de um circuito durante um intervalo de 5 ms . Determine a corrente média que atravessa o componente nesse intervalo.

Resposta: $9 \mu\text{A}$

P 1.3-3 Dez bilhões de elétrons por segundo atravessam um componente de um circuito. Qual é a corrente neste componente?

Resposta: $1,602 \text{ nA}$

P 1.3-4 A carga que atravessa um fio está plotada em função do tempo na Figura P 1.3-4. Plote a corrente no fio em função do tempo.

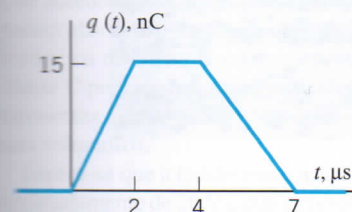


FIGURA P 1.3-4

P 1.3-5 A corrente em um componente de um circuito está plotada em função do tempo na Figura P 1.3-5. Plote a carga que atravessa o fio em função do tempo para $t > 0$.

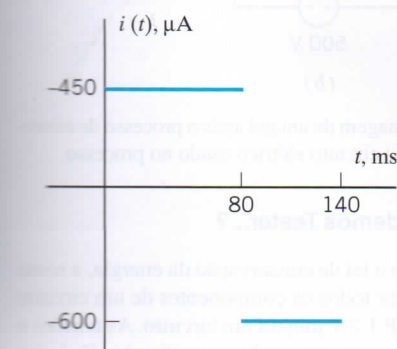


FIGURA P 1.3-5

P 1.3-6 A corrente em um componente de um circuito está plotada em função do tempo na Figura P 1.3-6. Determine a carga total que atravessa o componente entre 300 e $1200 \mu\text{s}$.

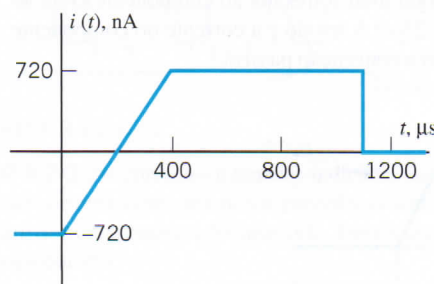


FIGURA P 1.3-6

Seção 1.5 Potência e Energia

P 1.5-1 A Figura P 1.5-1 mostra quatro componentes, A, B, C e D.

- Qual dos componentes fornece 30 mW ?
- Qual dos componentes absorve $0,03 \text{ W}$?
- Qual é o valor da potência recebida pelo componente B?
- Qual é o valor da potência fornecida pelo componente B?
- Qual é o valor da potência fornecida pelo componente C?

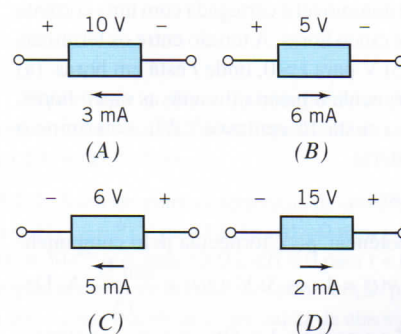


FIGURA P 1.5-1

P 1.5-2 Um forno elétrico é atravessado por uma corrente constante de 10 A que entra no terminal positivo com uma tensão de 110 V . O forno é usado durante 2 horas. (a) Determine a carga em coulombs que atravessa o forno. (b) Determine a potência absorvida pelo forno. (c) Se a energia elétrica custa 12 centavos o quilowatt-hora, determine o custo da energia elétrica usada para alimentar o forno durante 2 horas.

P 1.5-3 Um aparelho de som portátil usa quatro pilhas tipo AA para fornecer 6 V aos circuitos do aparelho. As quatro pilhas alcalinas armazenam uma energia máxima de $200 \text{ watts-segundos}$. Se o aparelho de som consome uma corrente constante de 10 mA , por quanto tempo o aparelho pode funcionar sem que seja necessário trocar as pilhas?

P 1.5-4 A corrente e a tensão em um componente de um circuito variam da forma mostrada na Figura P 1.5-4. Faça um gráfico da potência fornecida ao componente em função do tempo para $t > 0$. Qual é a energia total fornecida ao componente entre os instantes $t = 0$ e $t = 25$ s? A tensão e a corrente no componente estão de acordo com a convenção passiva.

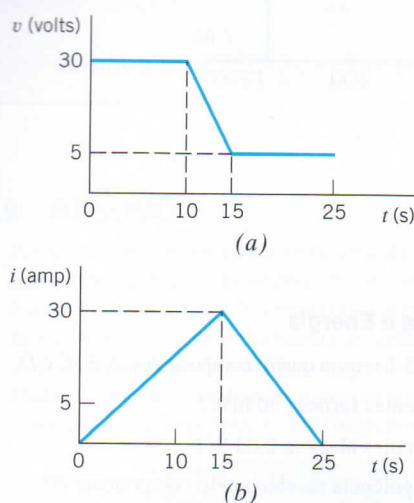


FIGURA P 1.5-4 (a) Tensão $v(t)$ e (b) corrente $i(t)$ em um componente.

P 1.5-5 Uma bateria de automóvel é carregada com uma corrente constante de 2 A durante cinco horas. A tensão entre os terminais da bateria é $v = 11 + 0,5t$ V para $t > 0$, onde t está em horas. (a) Determine a energia fornecida à bateria durante as cinco horas. (b) Se a energia elétrica custa 15 centavos/kWh, determine o custo para carregar a bateria.

Resposta: (b) 1,84 centavo

P 1.5-6 Determine a potência, $p(t)$, fornecida pelo componente da Figura P 1.5-6 se $v(t) = 4 \cos 3t$ V e $i(t) = \frac{\sin 3t}{12}$ A. De-

termine $p(t)$ para $t = 0,5$ s e para $t = 1$ s. Observe que a potência fornecida por este componente é positiva em certos instantes e negativa em outros.

Sugestão: $(\sin at)(\cos bt) = \frac{1}{2}(\sin(a+b)t + \sin(a-b)t)$

Resposta:

$$p(t) = \frac{1}{6} \sin 6t \text{ W}, p(0,5) = 0,0235 \text{ W}, p(1) = -0,0466 \text{ W}$$

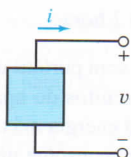


FIGURA P 1.5-6 Um componente.

P 1.5-7 Determine a potência, $p(t)$, fornecida pelo componente da Figura P 1.5-6 para $v(t) = 8 \sin 3t$ V e $i(t) = 2 \sin 3t$ A.

Sugestão: $(\sin at)(\sin bt) = \frac{1}{2}(\cos(a-b)t - \cos(a+b)t)$

Resposta: $p(t) = 8 - 8 \cos 6t$ W

P 1.5-8 Determine a potência, $p(t)$, fornecida pelo componente da Figura P 1.5-6. A tensão no componente é dada por $v(t) = 4(1 - e^{-2t})$ V para $t \geq 0$ e $v(t) = 0$ para $t < 0$. A corrente no componente é dada por $i(t) = 2e^{-2t}$ A para $t \geq 0$ e $i(t) = 0$ para $t < 0$.

Resposta: $p(t) = 8(1 - e^{-2t})e^{-2t}$ W

P 1.5-9 As pilhas de uma lanterna produzem uma tensão de 3 V e a corrente na lâmpada é 200 mA. Qual é a potência absorvida pela lâmpada? Determine a energia absorvida pela lâmpada em um intervalo de cinco minutos.

P 1.5-10 A eletroforese em gel bidimensional é uma técnica usada pelos biólogos para separar as proteínas contidas em uma amostra de tecido. A Figura P 1.5-10a mostra a imagem de um gel típico.

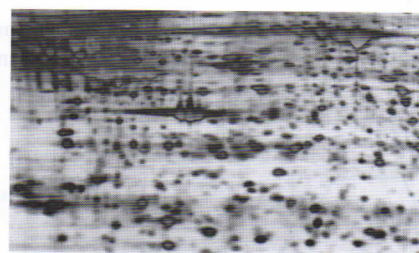
O método de preparação do gel utiliza o circuito elétrico ilustrado na Figura 1.5-10b. A amostra consiste em um gel e um papel-filtro que contém proteínas ionizadas. Uma fonte de tensão aplica uma tensão constante elevada, da ordem de 500 V, às extremidades da amostra. A tensão faz com que as proteínas ionizadas migrem, com diferentes velocidades, do papel de filtro para o gel. A corrente na amostra é dada por

$$i(t) = 2 + 30e^{-at} \text{ mA}$$

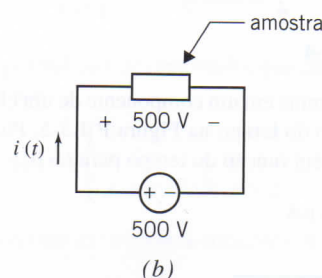
onde t é o tempo decorrido desde o início do processo, em horas, e o valor da constante a é

$$a = 0,85 \text{ h}^{-1}$$

Determine a energia fornecida pela fonte de tensão durante as primeiras três horas do processo.



(a)



(b)

FIGURA P 1.5-10 (a) Imagem de um gel após o processo de eletroforese bidimensional e (b) circuito elétrico usado no processo.

Seção 1.7 Como Podemos Testar...?

P 1.7-1 De acordo com a lei de conservação da energia, a soma da potência absorvida por todos os componentes de um circuito deve ser nula. A Figura P 1.7-1 mostra um circuito. As tensões e correntes em todos os componentes estão especificadas. Todas as tensões e correntes estão corretas? Justifique sua resposta.

Sugestão: Calcule as potências absorvidas por todos os componentes. Some essas potências. Se a soma for zero, isso significa que a lei de conservação da energia está sendo respeitada e

as tensões e correntes estão provavelmente corretas. Se a soma não for zero, isso significa que nem todas as tensões e correntes estão corretas.

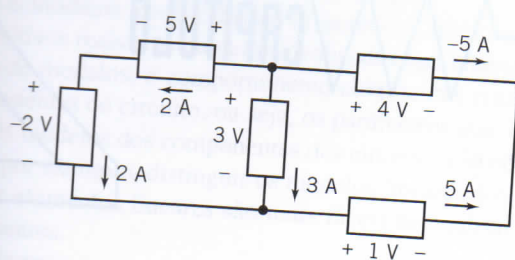


FIGURA P 1.7-1

P 1.7-2 De acordo com a lei de conservação da energia, a soma da potência absorvida por todos os componentes de um circuito deve ser zero. A Figura P 1.7-2 mostra um circuito. As tensões e correntes em todos os componentes estão especificadas. Todas estas tensões e correntes estão corretas? Justifique sua resposta.

Sugestão: Calcule as potências absorvidas por todos os componentes. Some essas potências. Se a soma for zero, isso significa que a lei de conservação da energia está sendo respeitada e as tensões e correntes estão provavelmente corretas. Se a soma não for zero, isso significa que nem todas as tensões e correntes estão corretas.

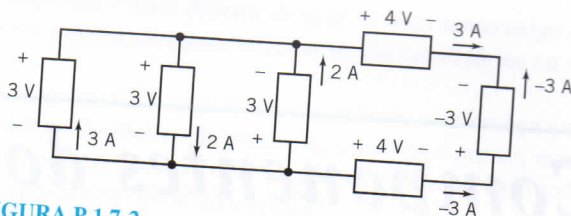


FIGURA P 1.7-2

P 1.7-3 As correntes e tensões indicadas na Figura P 1.7-3 estão corretas, com uma única exceção: o sentido da corrente em um dos componentes foi invertido. Determine o sentido que não está correto.

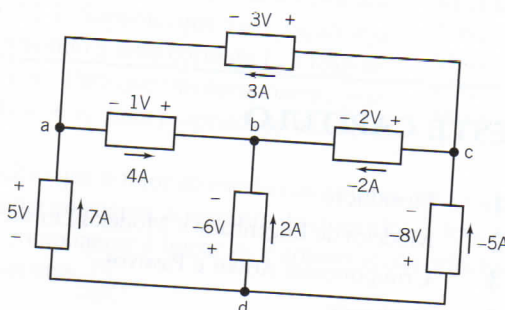


FIGURA P 1.7-3

Problemas de Projeto

PP 1-1 Um certo componente está disponível no mercado em três classes, de acordo com a potência de trabalho. Os componentes da classe A podem absorver continuamente uma potência de 1/2 W sem ser danificados; os da classe B podem absorver uma potência de 1/4 W; os da classe C podem absorver uma potência de 1/8 W. Normalmente, os componentes que podem absorver uma potência maior são mais caros e mais volumosos.

Espera-se que a tensão entre os terminais de um componente seja aproximadamente de 20 V e que a corrente no componente seja aproximadamente 8 mA. A precisão dessas estimativas é da ordem de 25%. A tensão e a corrente estão de acordo com a convenção passiva.

Especifique a classe do componente. A segurança é o mais importante, mas você não deve especificar um componente que seja mais caro que o necessário.

PP 1-2 A tensão entre os terminais de um componente de um circuito é $v(t) = 20(1 - e^{-8t})$ V para $t \geq 0$ e $v(t) = 0$ para $t < 0$. A corrente no elemento é $i(t) = 30e^{-8t}$ mA para $t \geq 0$ e $i(t) = 0$ para $t < 0$. A corrente e a tensão no componente estão de acordo com a convenção passiva. Especifique a potência que o componente deve ser capaz de absorver sem ser danificado.

Sugestão: Use o MATLAB, ou um programa semelhante, para plotar a potência em função do tempo.