Notas de Aula

Circuitos Elétricos

Potencial e Diferença de Potencial Elétrico

No modelo tradicional, um átomo é composto por cargas elétricas positivas (prótons), cargas elétricas negativas (elétrons) e cargas neutras, nem positivas nem negativas (nêutrons). Os prótons e nêutrons formam o núcleo do átomo e são menos móveis que os elétrons, que giram em torno do núcleo.

O átomo tende a ter uma carga elétrica nula, com a quantidade de prótons igual à quantidade de elétrons, já que a carga individual do próton e a do elétron são iguais, apenas de sinais contrários; se, entretanto, forem extraídos elétrons de um átomo, este será então um íon, com carga elétrica positiva (restam mais prótons do que elétrons), e se forem acrescentados elétrons a um átomo, este também se transformará em um íon, mas com carga elétrica negativa (o átomo terá mais elétrons do que prótons).

Esta situação não natural tende a ser revertida, se houverem condições para tal. Um íon positivo tentará capturar elétrons livres e um íon negativo tentará livrar-se de seus elétrons excedentes. Diz-se, então, que existe um "potencial" para a criação de uma corrente elétrica, ou seja, uma movimentação de elétrons.

Isto ocorre, por exemplo, em uma pilha ou bateria, chamados de acumuladores. Em um dos pólos existe um excesso de cargas negativas e no outro um excesso de cargas positivas. Internamente ao acumulador, os pólos estão separados eletricamente e não é possível que haja um balanceamento das cargas; se não houver nenhum circuito externo por onde os elétrons possam fluir do terminal negativo para o positivo, o acumulador permanece com um potencial negativo em um dos pólos e um potencial positivo no outro pólo e é a diferença entre esses potenciais que possibilita o fluxo dos elétrons quando um circuito for ligado entre os dois. Essa diferença de potencial elétrico é mais comumente chamada de "tensão elétrica".

Notas:

1) Tradicionalmente, chama-se de corrente elétrica o fluxo das cargas positivas. Normalmente, as cargas que se deslocam são as cargas negativas, ou os elétrons; entretanto, a movimentação de um elétron em um sentido tem o mesmo efeito que a movimentação fictícia de um próton no sentido oposto.

2) A unidade de medida da carga elétrica é o "coulomb" (símbolo: C). A carga elétrica de um elétron é de $-1{,}609 \times 10^{-19}$C e a carga elétrica de um próton é de $+1{,}609 \times 10^{-19}$C.

O potencial elétrico de um ponto A é representado por V_A e o potencial elétrico de um ponto B é representado por V_B. A diferença de potencial entre esses dois pontos, ou a tensão elétrica entre esses dois pontos, é representada simplesmente pela letra V:

$$\mathbf{V = V_A - V_B}$$

A unidade de potencial elétrico e, portanto, também a unidade de tensão elétrica, é o volt, cujo símbolo também é V. Assim, no acumulador do exemplo acima (suponhamos que seja uma bateria de automóvel), representamos:

V_A = 12V (terminal ou pólo positivo)
V_B = 0V (terminal ou pólo negativo)

$$V = V_A - V_B = 12 - 0 = 12V$$

A tensão elétrica traduz então a capacidade da carga realizar trabalho, ou seja, movimentar-se sob a ação de uma força F de origem elétrica por uma distância Δx.

O trabalho também pode ser definido como a variação da energia potencial entre os pontos **A** e **B**. Sendo essa energia de natureza elétrica, podemos chamá-la de "energia potencial elétrica":

$$\tau = W_A - W_B$$

W_A = energia potencial elétrica no ponto A
W_B = energia potencial elétrica no ponto B

Dividindo ambos todos os termos por **q**, a expressão anterior fica igual à anterior à esta:

$$\frac{\tau}{q} = \frac{W_A}{q} - \frac{W_B}{q}$$

Ao quociente **W/q** dá-se o nome de "potencial elétrico"; assim, $W_A / q = V_A$ e $W_B / q = V_B$:

$$\frac{\tau}{q} = V_A - V_B$$

Corrente Elétrica

Havendo uma diferença de potencial elétrico entre dois pontos, pode haver uma circulação de cargas elétricas. À quantidade de carga elétrica que se movimenta na unidade de tempo dá-se o nome de "intensidade de corrente elétrica" ou, simplesmente, "corrente elétrica":

$$I = \frac{Q}{\Delta t}$$

I = intensidade de corrente elétrica ou corrente elétrica
Q = carga elétrica (C)
Δt = intervalo de tempo (segundo)

A corrente elétrica é medida, portanto, em coulomb / segundo (C/s), no Sistema Internacional de unidades. À unidade **C/s** deu-se o nome de **ampère (A)**.

A corrente elétrica pode ser:

- Contínua e constante: quando flui somente em um sentido e sua intensidade não varia (aproximadamente, a corrente de baterias, pilhas, etc.)

- Contínua e variável: quando flui somente em um sentido, mas sua intensidade varia com o tempo

- Alternada: quando flui ora em um sentido e ora em outro sentido, variando, evidentemente, de intensidade. Este é o tipo de corrente entregue pela rede de distribuição de energia elétrica.

A forma da corrente é relativa à forma da tensão que a gera. Assim, uma fonte de tensão contínua gera uma corrente contínua e uma fonte de tensão alternada gera uma corrente alternada.

Resistência Elétrica

Ao aplicarmos uma diferença de potencial (tensão) entre dois pontos de um corpo, podemos obter desde uma corrente elétrica extremamente baixa até uma corrente extremamente elevada, dependendo das características desse corpo.

Nota-se, entretanto, que em vários materiais, ao aumentarmos o valor da tensão aplicada, a corrente elétrica aumenta proporcionalmente em relação à tensão. À constante de proporcionalidade entre a tensão aplicada e a corrente elétrica resultante deu-se o nome de "resistência elétrica":

$$\frac{V_1}{I_1} = \frac{V_2}{I_2} = \frac{V_3}{I_3} = \ldots\ldots = R$$

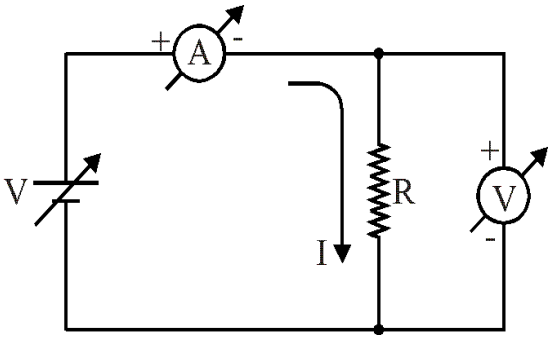
A resistência elétrica é, portanto, uma medida da maior ou menor facilidade com que a corrente elétrica pode atravessar um corpo.

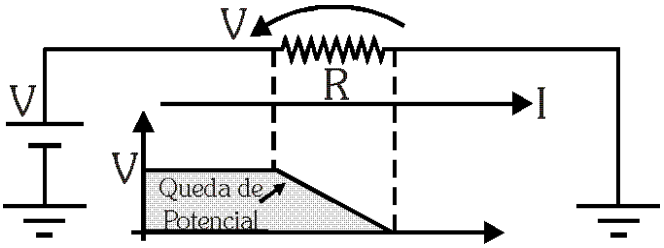
Sendo a tensão medida em volts (V) e a corrente medida em ampères (A), a unidade de medida da resistência elétrica será V/A, unidade a que se dá o nome de **ohm (Ω)**.

A relação $\frac{V}{I} = R$ ou **V = R . I** é chamada de 1ª **Lei de Ohm**.

Em 1829, o físico George Simon Ohm realizou uma experiência onde demonstrou que, num circuito elétrico, para o mesmo trecho de condutor, mantido à temperatura constante, é constante o quociente da diferença de potencial entre dois pontos pela intensidade de corrente elétrica que os atravessa, ou seja:

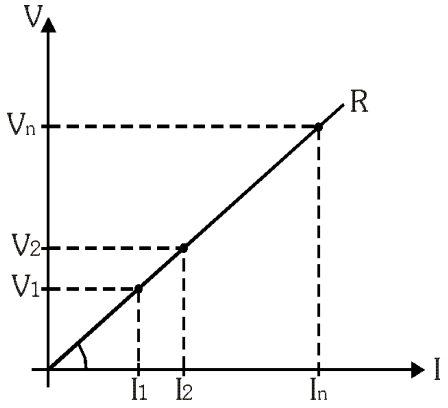
$$\frac{V_1}{I_1} = \frac{V_2}{I_2} = \ldots = \frac{V_n}{I_n} = R = cte.$$



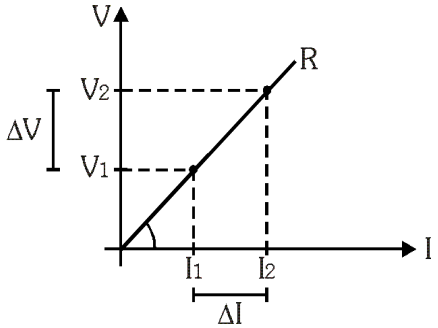


A resistência é um **bipolo passivo**, pois **consome** energia elétrica, provocando **queda de potencial** no circuito.

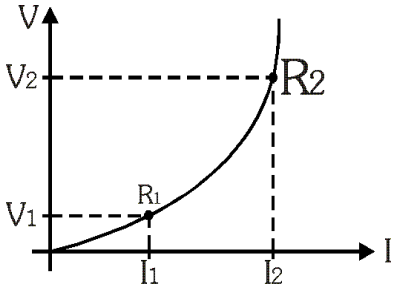
Genericamente, a 1a lei de Ohm pode ser assim representada:



Resistência Ôhmica



Resistência Não Ôhmica



$$R = \frac{V_1}{I_1} = \frac{V_2}{I_2} \quad \text{ou} \quad R = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V_2 - V_1}{I_2 - I_1} \qquad R_1 = \frac{V_1}{I_1} \neq R_2 = \frac{V_2}{I_2}$$

A resistência elétrica, em corrente contínua e constante, de um corpo, depende do material de que é constituído e de suas dimensões. Em corrente alternada, depende também da frequência com que a corrente se alterna.

Tomando-se um fio metálico e aplicando-se tensão entre suas extremidades, verifica-se que:

- quanto maior a área da seção transversal do fio, maior a corrente (e, portanto, menor a resistência elétrica), para uma mesma tensão e um mesmo comprimento do fio;

- quanto maior o comprimento do fio, menor a corrente (e, portanto, maior a resistência elétrica), para uma mesma tensão e uma mesma área da seção transversal do fio.

Como a resistência elétrica depende também do material de que é feito o fio, define-se, para cada material, a "resistividade elétrica" ρ e a resistência elétrica do fio pode ser calculada por:

$$R = \frac{\rho . L}{S}$$ chamada de 2ª **Lei de Ohm**.

A resistividade elétrica de cada material é dada, em unidades do S.I., em Ω.m. Como muitas vezes o comprimento é dado em metros e a área da seção transversal é dada em milímetros quadrados, é usual encontrar-se os valores de resistividade em $\Omega.mm^2/m$.

TABELA: Resistividades ρ de alguns materiais

Classificação	**Material – (T=20°C)**	**Resistividade - ρ [Ω.m]**
Metal	Prata	$1,6x10^{-8}$
	Cobre	$1,7x10^{-8}$
	Alumínio	$2,8x10^{-8}$
	Tungstênio	$5,0x10^{-8}$
Liga	Latão	$8,6x10^{-8}$
	Constantã	$50x10^{-8}$
	Níquel-cromo	$110x10^{-8}$
Carbono	Grafite	4000 a $8000x10^{-8}$
Isolante	Água pura	$2,5x10^{3}$
	Vidro	10^{10} a 10^{13}
	Porcelana	$3,0x10^{12}$
	Mica	10^{13} a 10^{15}
	Baquelite	$2,0x10^{14}$
	Borracha	10^{15} a 10^{16}
	Âmbar	10^{16} a 10^{17}

Às vezes é preferível trabalhar com o inverso da resistência elétrica, a **condutância**. Se a resistência elétrica de um corpo é a medida da dificuldade que o corpo oferece à passagem da corrente elétrica, a condutância é a medida da facilidade com que a corrente elétrica atravessa esse corpo. Representa-se por:

$$G = \frac{1}{R} \quad \text{ou} \quad G = \frac{I}{V}$$

Se a unidade de resistência é o Ω (ohm), a unidade de condutância é o mho ($1/\Omega$), também chamada de siemens (S).

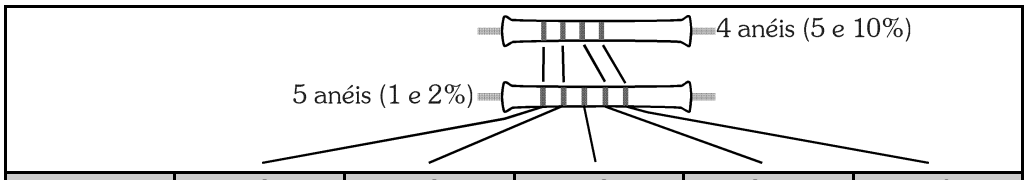
Da mesma forma, às vezes, é preferível trabalhar com o inverso da resistividade, a **condutividade elétrica**. Se a resistividade é a medida da dificuldade que o material oferece à passagem da corrente elétrica, a condutividade é a medida da facilidade com que a corrente elétrica atravessa o material. Representa-se por:

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

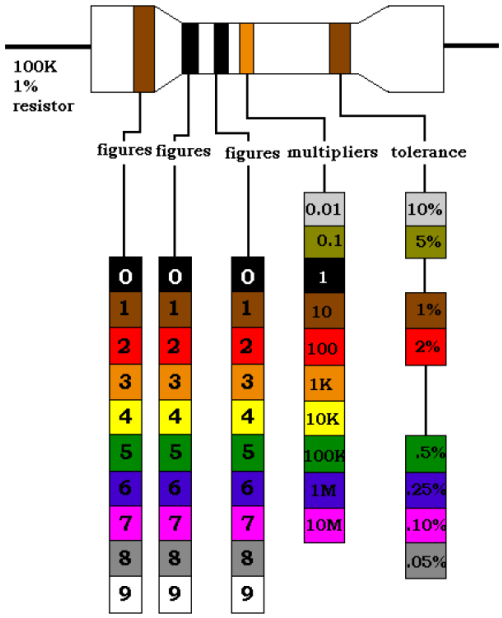
e sua unidade de medida é o inverso da unidade de medida da resistividade.

Nos circuitos elétricos e eletrônicos, quando se deseja limitar a corrente elétrica a um valor pré-determinado ou reduzir a tensão para outra parte do circuito, utilizam-se componentes com resistência elétrica definida. Esses componentes são chamados de **resistores** e sua representação no circuito elétrico é:

Código de Cores

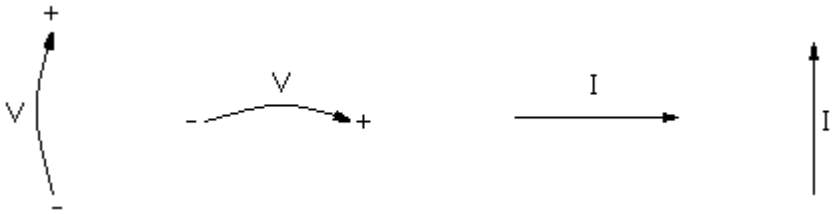


Cores	1º Dígito	2º Dígito	3º Dígito	Múltiplo	Tolerância
Preto		0	0	x 1	
Marrom	1	1	1	x 10	± 1 %
Vermelho	2	2	2	x 10^2	± 2 %
Laranja	3	3	3	x 10^3	
Amarelo	4	4	4	x 10^4	
Verde	5	5	5	x 10^5	
Azul	6	6	6	x 10^6	
Violeta	7	7	7	x 10^7	
Cinza	8	8	8		
Branco	9	9	9		
Ouro				x 10^{-1}	± 5 %
Prata				x 10^{-2}	± 10 %
Ausência					± 20 %



Nos primeiros circuitos a serem analisados, trabalharemos com fontes de tensão contínua e constante. Suas representações nos circuitos elétricos são:

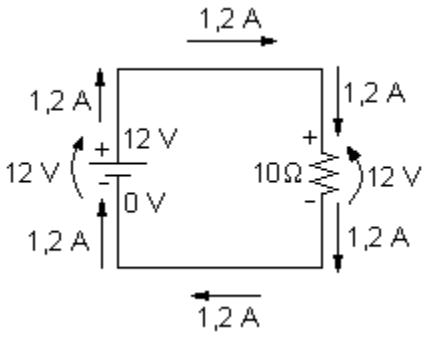
Representaremos a tensão entre dois pontos A e B com uma seta curva, apontando para o polo positivo, e a corrente elétrica com uma seta reta:



A corrente elétrica sempre “sai” do polo positivo do gerador, para o circuito. Após percorrer o circuito, a corrente elétrica “entra” pelo polo negativo do gerador. Esta convenção significa que a corrente elétrica é considerada como um fluxo de cargas positivas.

As ligações entre os componentes são representadas por retas, como se fossem fios de resistência elétrica nula. Assim, o potencial é o mesmo em todos os pontos dessa reta.

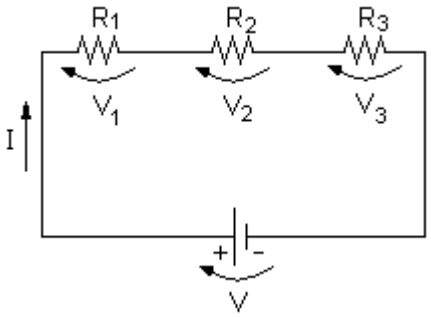
No exemplo abaixo, os potenciais nos terminais da fonte de tensão são transmitidos ao resistor:



Associação de Resistores

Associação Série

Considere o seguinte circuito:



Nota-se que uma única corrente I percorre todo o circuito, atravessando os três resistores, mas a tensão da fonte V divide-se entre eles, sendo:

$$V = V_1 + V_2 + V_3$$

Pela Lei de Ohm, podemos escrever:

$$V_1 = R_1 \,.\, I \qquad V_2 = R_2 \,.\, I \qquad V_3 = R_3 \,.\, I$$

Portanto,

$$V = R_1 \,.\, I + R_2 \,.\, I + R_3 \,.\, I$$

$$V = I \,.\, (R_1 + R_2 + R_3)$$

$$\frac{V}{I} = R_1 + R_2 + R_3$$

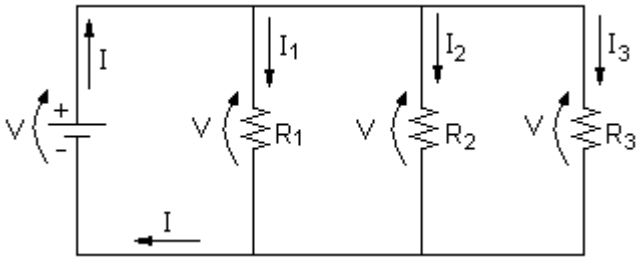
Mas, $\frac{V}{I} = R$

então, $R = R_1 + R_2 + R_3$ é chamada de "resistência equivalente da associação de resistores" (R_{eq}) ou, de forma mais geral, para **n** resistores associados em série:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + ... + R_n$$

Associação Paralelo

Consideremos agora um circuito com a seguinte disposição:



Neste caso, a tensão da fonte é aplicada sobre cada resistor, mas há uma divisão da corrente fornecida pela fonte, de forma que:

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

Pela Lei de Ohm, podemos escrever:

$$I_1 = \frac{V}{R_1} \qquad I_2 = \frac{V}{R_2} \qquad I_3 = \frac{V}{R_3}$$

Como a corrente total é a soma das correntes individuais:

$$I = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} + \frac{V}{R_3}$$

$$I = V \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right)$$

Se $V = R \cdot I$, então $I = \frac{V}{R}$,

Portanto, a resistência equivalente (R_{eq}) da associação paralelo vale:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

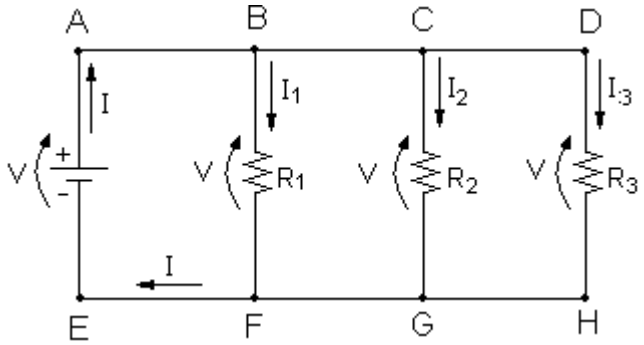
ou, de forma mais geral, para **n** resistores associados em paralelo:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + ... + \frac{1}{R_n}$$

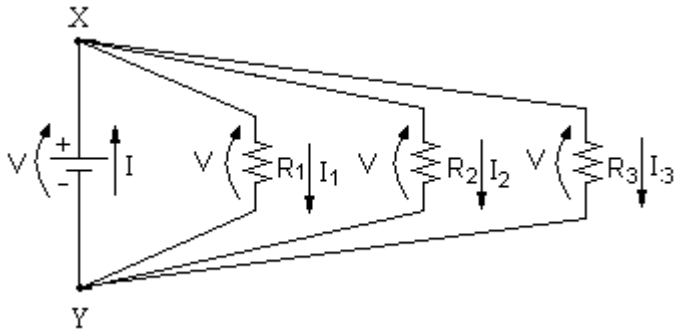
ou, como G = 1/R: $G_{eq} = G_1 + G_2 + G_3 + ... + G_n$

Uma forma prática para que se perceba se os resistores estão em série ou paralelo é analisar os pontos em que estão conectados.

Na associação paralelo, todos os resistores estão conectados entre os mesmos dois pontos:

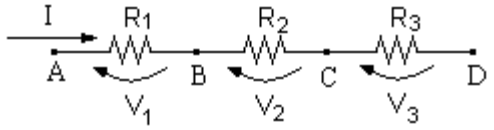


Os pontos A, B, C e D estão interligados, de forma que representam um único ponto. Da mesma forma, os pontos E, F, G e H também representam um único ponto. Representando por X o ponto referente a A, B, C e D e representando por Y o ponto referente a E, F, G e H, o circuito poderia ser assim desenhado:



e, portanto, todos os resistores que estejam em paralelo entre si estão conectados aos mesmos dois pontos.

Já na associação em série, os resistores estão conectados em pontos distintos, havendo somente um ponto em comum entre um deles e o seguinte:



Casos particulares:

1) Dois resistores em paralelo:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 \cdot R_2}$$

$$\therefore R_{eq} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \left(\frac{\text{produto}}{\text{soma}} \right)$$

2) **n** resistores de resistências **iguais** em paralelo

$$\frac{1}{R_{eq}} = \underbrace{\frac{1}{R} + \frac{1}{R} + \ldots + \frac{1}{R}}_{n}$$

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{n}{R}$$

$$\therefore R_{eq} = \frac{R}{n}$$

Potência Elétrica

Sabemos que a potência pode ser definida como a variação da energia na unidade de tempo ($P = \Delta W / \Delta t$) e definimos a tensão elétrica como sendo a variação da energia potencial elétrica por unidade de carga:

$$V = \frac{W_A - W_B}{q} = \frac{\Delta W}{q} \Rightarrow \quad \Delta W = V \cdot q$$

Dividindo ambos os membros por Δt, obtemos a potência elétrica:

$$P = \frac{\Delta W}{\Delta t} = V \cdot \frac{q}{\Delta t} \text{ ; mas } \quad I = \frac{q}{\Delta t}$$

Portanto:

$$P = V \cdot I$$

Como $V = R \cdot I \Rightarrow P = R \cdot I \cdot I \Rightarrow$ $\qquad P = R \cdot I^2$

ou, como $I = \frac{V}{R} \Rightarrow P = V \cdot \frac{V}{R} \Rightarrow$ $\qquad P = \frac{V^2}{R}$

A unidade de potência elétrica no Sistema Internacional de unidades é o watt (W). A unidade de energia elétrica nesse mesmo sistema é o joule (J).

Nota: outra unidade de energia elétrica muito utilizada é o kWh (quilowatt-hora). Sendo a potência definida como a variação da energia na unidade de tempo:

$$P = \frac{W}{\Delta t}$$

a energia elétrica (consumo) será então:

$$W = P \cdot \Delta t$$

Sendo a potência medida em kW (1 kW = 1000 W) e o intervalo de tempo considerado medido em horas, a unidade de energia pode ser dada por kW x hora.

Exemplo:

Um aparelho elétrico dissipa uma potência de 5000 watts durante 15 minutos. A energia consumida durante esse tempo será:

Δt = 15 min = 0,25 horas (15 / 60 = 0,25)

5000 W = 5 kW

W = 5 x 0,25 = 1,25 kWh

$$Custo = W\ (kWh) \cdot Tarifa(\frac{Reais}{kWh})$$

Materiais Isolantes e Condutores Elétricos

Dependendo da constituição de cada material, as cargas elétricas podem encontrar maior ou menor dificuldade para se movimentar nesse material. Quanto maior essa dificuldade, mais isolante é o material e quanto menor a dificuldade, mais condutor.

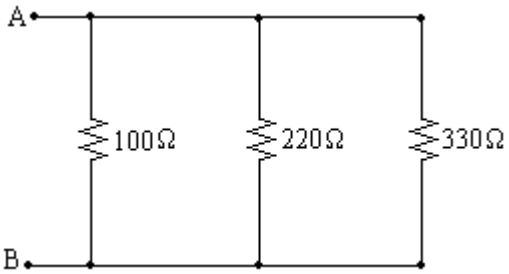
Geralmente, considera-se materiais como os metais como condutores e materiais como plásticos, óleo, ou o próprio ar como isolantes, mas essa não é uma divisão precisa: dependendo da diferença de potencial elétrico entre dois pontos, o material que separa esses pontos, mesmo sendo considerado isolante, pode permitir um fluxo de cargas elétricas. Um exemplo são as descargas atmosféricas, fluxo de cargas elétricas através do ar devido a uma altíssima diferença de potencial entre a nuvem e a terra.

Exercícios

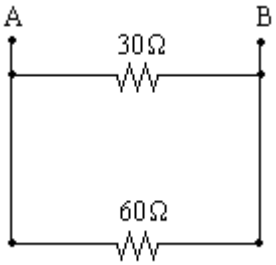
1 Qual a resistência equivalente entre os pontos A e B das associações abaixo?

a)

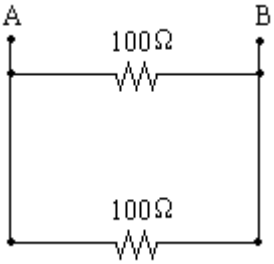
b)



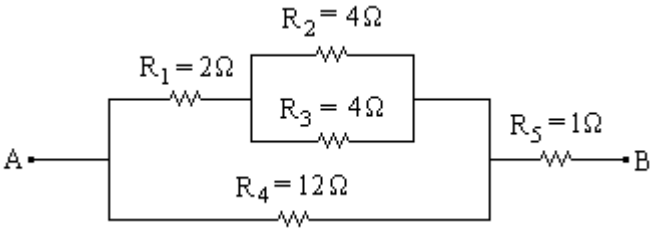
c)



d)



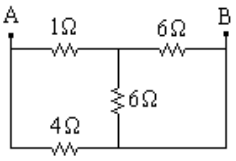
e)



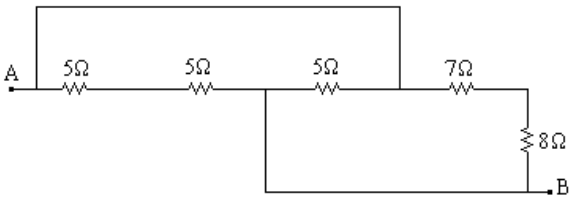
2 Duas resistências R_1 e R_2 associadas em série equivalem a 100Ω e associadas em paralelo equivalem a 24Ω. Determiná-las.

3 Determinar a resistência equivalente entre A e B:

a)



b)

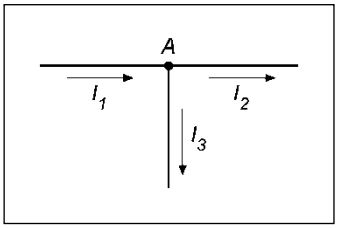


Leis de Kirchhoff

Lei de Kirchhoff para Correntes (LKC)

A primeira lei de Kirchhoff diz que "a soma das correntes que chegam em um nó é igual a soma das correntes que saem deste mesmo nó, ou seja, a soma algébrica das correntes em um nó é igual a zero".

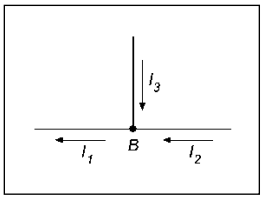
Analisando o nó A, a corrente I_1 entra no nó e as correntes I_2 e I_3, saem do nó.



Desta forma, temos a seguinte equação:

$+ I_1 - I_2 - I_3 = 0$ ⇐ Equação 1

Para o nó B, a análise é a mesma.



$+ I_2 + I_3 - I_1 = 0$

Multiplicando as correntes por -1, temos:
$- I_2 - I_3 + I_1 = 0$

Reordenando os termos:
$+ I_1 - I_2 - I_3 = 0$

Como se pode ver, as equações dos nós A e B são iguais, pois os nós fazem parte das mesmas malhas.

Em circuitos como este, não é necessária a análise dos dois nós. Basta a análise e a equação de apenas um nó.

Lei de Kirchhoff Tensão (LKT)

A Segunda Lei de Kirchhoff diz que "a soma das tensões no sentido horário é igual à soma das tensões no sentido anti-horário, ou seja, a soma algébrica das tensões em uma malha é igual a zero."

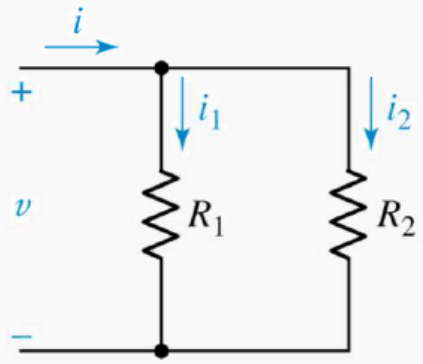
Divisor de Corrente

- Conexão paralela – mesma tensão

$$i_1 = \frac{v}{R_1} = \frac{(R_1 // R_2)i}{R_1} = \frac{i}{R_1}\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}$$

$$i_1 = i\frac{R_2}{R_1+R_2}$$

$$i_2 = i\frac{R_1}{R_1+R_2}$$



- Para n resistores em paralelo, a corrente pela resistência k

$$i_k = \frac{\frac{1}{R_k}}{\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\ldots+\frac{1}{R_n}}i$$

Divisor de Tensão

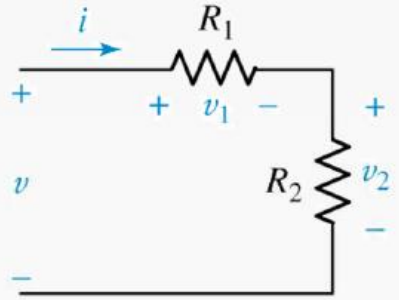
- Conexão série – mesma corrente

$$v \overset{\text{LKT}}{=} v_1+v_2 = R_1i+R_2i = (R_1+R_2)i$$

$$i = \frac{v}{R_1+R_2}$$

$$v_1 = R_1i = \frac{R_1}{R_1+R_2}v$$

$$v_2 = R_1i = \frac{R_2}{R_1+R_2}v$$

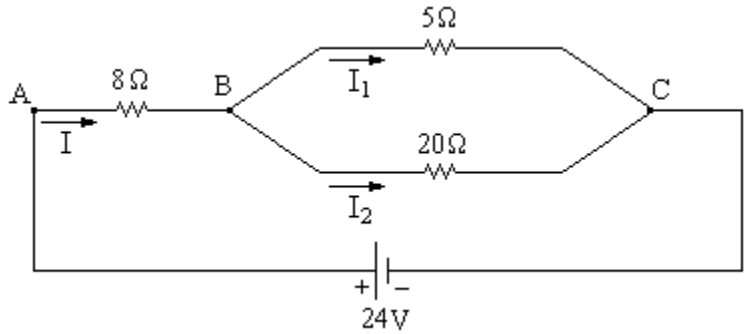


- Para n resistores em série, a tensão sob a resistência k

$$v_k = \frac{R_k}{R_1+R_2+\ldots+R_n}v$$

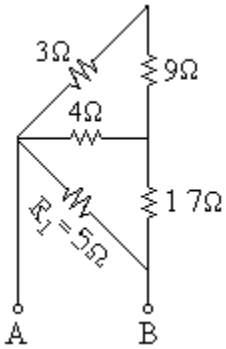
Exercícios

4 Determinar a corrente e a potência fornecida pela fonte e a corrente, tensão e potência dissipada em cada resistor:



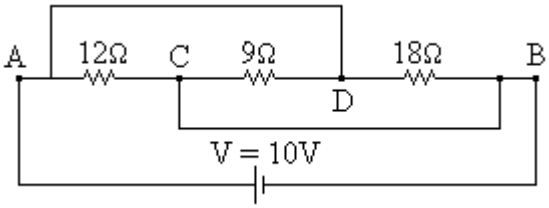
Resp.:
I = 2A P = 48W
V_{AB} = 16V V_{BC} = 8V
I_1 = 1,6A P_1 = 12,8W
I_2 = 0,4A P_2 = 3,2W
P (resistor de 8Ω) = 32W

5 Qual a resistência equivalente entre os pontos A e B abaixo? Qual a potência total entregue ao circuito e qual a potência dissipada em R_1 se uma fonte de 12V for ligada entre A e B?



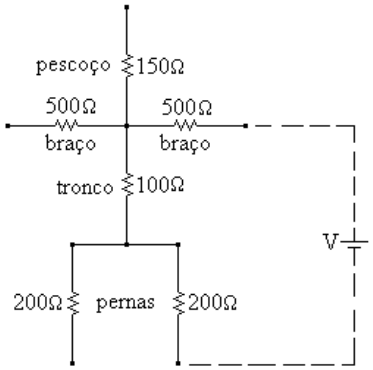
Resp.: R_{AB} = 4Ω P = 36W P_1 = 28,8W

6 Determinar a corrente fornecida pelo gerador ao circuito abaixo:



Resp.: 2,5A

7 (Provão) Os perigos do choque elétrico são por demais conhecidos. Entretanto, nem sempre é bem compreendido que o perigo real para o ser humano não está no valor da tensão, mas, sim, na intensidade do percurso da corrente elétrica pelo corpo. Um valor elevado de corrente, mesmo que em curto intervalo de tempo, já é suficiente para causar danos ao coração. A figura apresenta um modelo simplificado da distribuição resistiva do ser humano, quando submetido a uma tensão contínua V entre uma das mãos e um pé.
Considere que uma corrente acima de 5 mA provoca um leve desconforto, que acima de 50 mA pode provocar paralisia muscular, e que acima de 500 mA pode ocasionar a parada cardíaca.



a) verifique se há risco de parada cardíaca quando V = 300 volts, com a tensão V aplicada na forma descrita na figura.

b) para V = 300 volts, verifique se há risco de parada cardíaca quando a tensão estiver aplicada entre um pé e as duas mãos juntas.

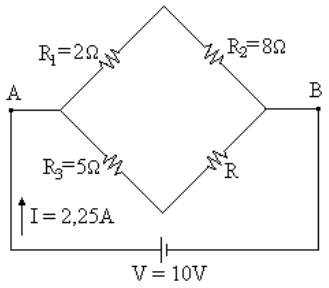
c) na situação mostrada na figura, com V = 500 V, calcule a resistência elétrica mínima de uma luva de borracha a ser usada para evitar até mesmo o leve desconforto.

Resp.:
a) não há risco de parada cardíaca (I = 375 mA)
b) há risco de parada cardíaca (I = 545,45 mA)
c) $R_{Luva} > 99{,}2\ k\Omega$

Atenção: este é somente um exemplo acadêmico. Não considere estes dados para situações reais.

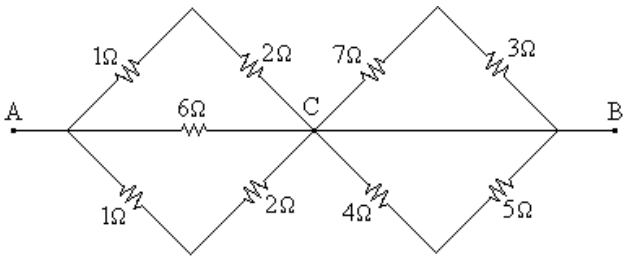
8 No circuito da figura, determinar:

a) a corrente em cada ramo
b) a resistência R
c) a potência total dissipada
d) a potência dissipada por R_2



Resp.:
a) 1A em $R_1 + R_2$ e 1,25A em $R_3 + R$
b) 3 ohms
c) 22,5W
d) 8W

9 Calcular a resistência equivalente entre os pontos A e B:



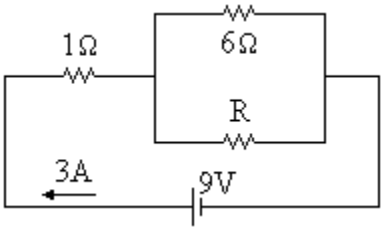
Resp.: 1,2 ohm

10 Um chuveiro elétrico de 220V dissipa uma potência de 2,2 kW.

a) Qual o custo de um banho com 10 minutos de duração, se a tarifa é de R$ 0,20 por kWh?
b) Desejando-se duplicar a variação de temperatura da água mantendo-se constante a sua vazão, qual deve ser a nova resistência do chuveiro?

Resp.: a) R$ 0,073 b) 11Ω

11 No circuito abaixo, a corrente fornecida pelo gerador tem a intensidade de 3A. Qual o valor da resistência R?

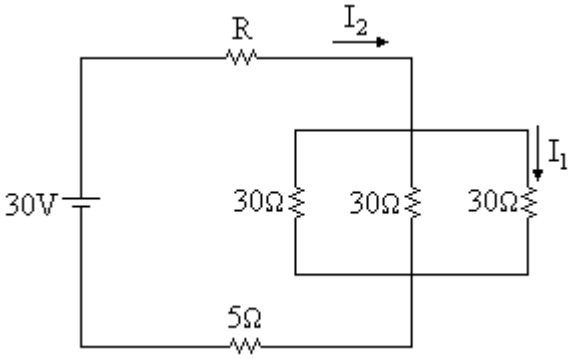


Resp.: 3Ω

12 No circuito da figura, calcular:

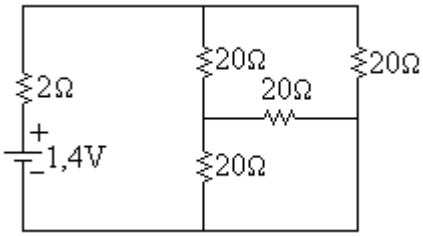
a) o valor da resistência R para que a corrente I_2 seja 2A;

b) a corrente I_1, supondo que I_2 seja 2A.



Resp.: a) zero b) 2/3 (A)

13 No circuito da figura, calcular a potência total dissipada por efeito Joule:

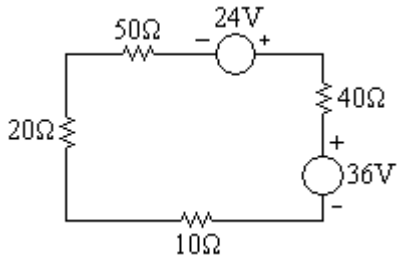


Resp.: 0,14W

Lei das Malhas

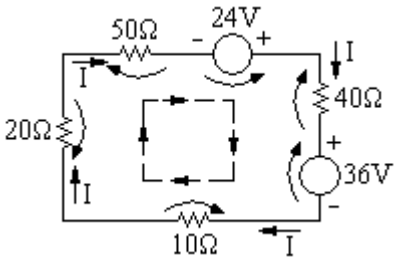
A soma das tensões, quando se percorre a malha em um sentido pré-convencionado, é nula.

Exemplo: Calcular a corrente que circula no circuito abaixo.



Solução

Adota-se um sentido qualquer para a corrente e indica-se as tensões em cada componente, sendo os sentidos das tensões nos resistores dadas pela “convenção de receptor” (tensão e corrente em “sentidos” contrários) e os sentidos das tensões das fontes dados pelas polaridades das próprias fontes (“convenção de gerador”). Adota-se um sentido de circulação da malha – adotemos sempre o sentido horário – e todas as tensões que concordarem com este sentido serão positivas e aquelas que não concordarem serão negativas:



$24 - 40.I - 36 - 10.I - 20.I - 50.I = 0$

$-12 - 120.I = 0$

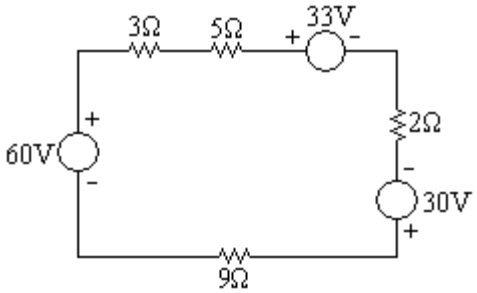
$120.I = -12$

$\boxed{I = -0{,}1A}$

(o sinal negativo da corrente indica que, na verdade, a corrente é no sentido oposto ao indicado).

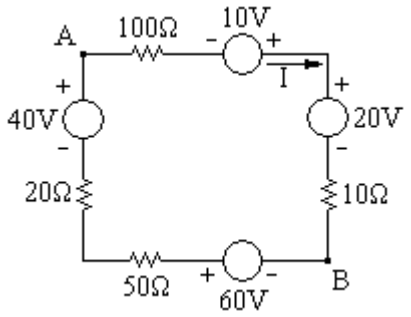
Exercícios

14 Qual a corrente que circulará no circuito abaixo?



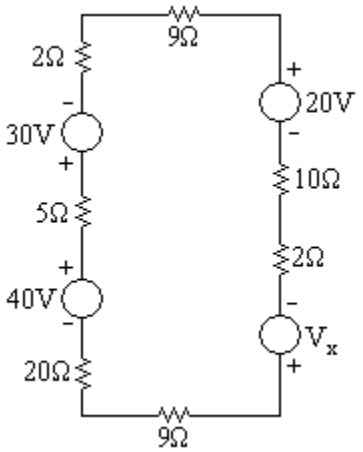
Resp.: 3A

15 Qual a tensão entre os pontos A e B?



Resp.: V_{AB} = 65V

16 Qual deve ser a tensão da fonte V_x para que a corrente no circuito seja nula?



Resp.: V_x = 10V

Análise das Correntes nos Ramos

Consideraremos agora o primeiro de uma série de métodos para resolver circuitos com duas ou mais fontes. Uma vez que tenhamos dominado este método, não existirá circuito linear de corrente contínua que não possamos resolver. São quatro passos, como indicado a seguir:

1. Associe uma corrente distinta de sentido arbitrário a cada ramo do circuito.
2. Indique as polaridades para cada resistor, de acordo com o sentido escolhido para a corrente.
3. Aplique a Lei de Kirchhoff para Tensões (LKT) em cada malha do circuito.
4. Aplique a Lei de Kirchhoff para Correntes (LKC) ao número mínimo de nós que inclua todas as correntes nos ramos do circuito.

Resolva as equações lineares simultâneas resultantes para as correntes de ramo escolhidas.

Exemplo:

1) Aplique o método das correntes nos ramos ao circuito abaixo:

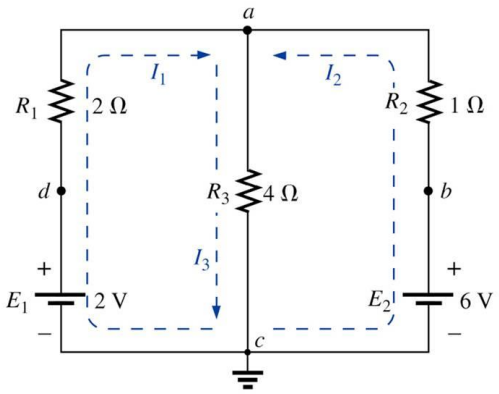
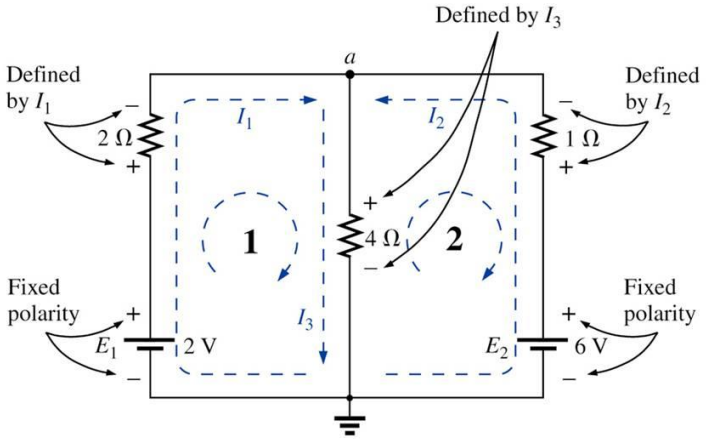


Figura 1

Passo 1: Como há três ramos distintos (cda, cba, ca) são escolhidas três correntes de sentido arbitrário (I1, I2 e I3) como indicado na Figura 1. Como I1 e I2 estão entrando no nó a, I3 está saindo desse nó.

Passo 2: As polaridades para cada resistor são identificadas de acordo com os sentidos postulados para as correntes, conforme Figura 2.



Passo 3: A LKT é aplicada em cada malha (1 e 2), no sentido horário

Texto retirado de: Introdução à Análise de Circuitos – 10ª. Edição – Robert L. Boylestad

Malha 1:

$$\Sigma_{\circlearrowleft} V = \overset{\text{Elevação potencial}}{+E_1} - \underset{\text{Queda de potencial}}{V_{R_1} - V_{R_3}} = 0$$

Malha 2:

$$\Sigma_{\circlearrowleft} V = \overset{\text{Elevação potencial}}{+V_{R_3} + V_{R_2}} - \underset{\text{Queda de potencial}}{E_2} = 0$$

Malha 1:

$$\Sigma_{\circlearrowleft} V = \underbrace{+2\text{ V}}_{\substack{\text{Potencial}\\ \text{da bateria}}} - \underbrace{(2\ \Omega)I_1}_{\substack{\text{Queda de}\\ \text{tensão}\\ \text{entre os}\\ \text{terminais}\\ \text{do resistor}\\ \text{de } 2\ \Omega}} - \underbrace{(4\ \Omega)I_3}_{\substack{\text{Queda de}\\ \text{tensão entre}\\ \text{os terminais}\\ \text{do resistor}\\ \text{de } 4\ \Omega}} = 0$$

Malha 2:

$$\Sigma_{\circlearrowleft} V = (4\ \Omega)\, I_3 + (1\ \Omega)\, I_2 - 6\text{ V} = 0$$

Passo 4: Aplicando a LKC para correntes ao nó a (em um circuito com dois nós, a lei é aplicada somente em um deles):

$$I_1 + I_2 = I_3$$

Solução 1: Há três equações e três incógnitas:

$$\begin{aligned} 2 - 2I_1 - 4I_3 &= 0 \\ 4I_3 + 1I_2 - 6 &= 0 \\ I_1 + \ \ I_2 \qquad &= I_3 \end{aligned} \qquad \text{Rearranjando:} \quad \begin{aligned} 2I_1 + 0 + 4I_3 &= 2 \\ 0 + I_2 + 4I_3 &= 6 \\ I_1 + I_2 - \ \ I_3 &= 0 \end{aligned}$$

Usando determinantes de terceira ordem:

$$I_1 = \frac{\begin{vmatrix} 2 & 0 & 4 \\ 6 & 1 & 4 \\ 0 & 1 & -1 \end{vmatrix}}{D = \begin{vmatrix} 2 & 0 & 4 \\ 0 & 1 & 4 \\ 1 & 1 & -1 \end{vmatrix}} = \mathbf{-1\ A}$$

Um sinal negativo associado a uma corrente de ramo indica apenas que a corrente real tem o sentido oposto ao escolhido

$$I_2 = \frac{\begin{vmatrix} 2 & 2 & 4 \\ 0 & 6 & 4 \\ 1 & 0 & -1 \end{vmatrix}}{D} = \mathbf{2\ A}$$

$$I_3 = \frac{\begin{vmatrix} 2 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & 6 \\ 1 & 1 & 0 \end{vmatrix}}{D} = \mathbf{1\ A}$$

Solução 2 : Em vez de utilizar um determinante de terceira ordem como na Solução 1, poderíamos reduzir as três equações para duas substituindo a terceira equação na primeira e na segunda:

$$\left.\begin{aligned} 2 - 2I_1 - 4\overbrace{(I_1 + I_2)}^{I_3} &= 0 \\ 4\overbrace{(I_1 + I_2)}^{I_3} + I_2 - 6 &= 0 \end{aligned}\right\} \quad \begin{aligned} 2 - 2I_1 - 4I_1 - 4I_2 &= 0 \\ 4I_1 + 4I_2 + I_2 - 6 &= 0 \end{aligned}$$

ou

$$\begin{aligned} -6I_1 - 4I_2 &= -2 \\ +4I_1 + 5I_2 &= +6 \end{aligned}$$

Texto retirado de: Introdução à Análise de Circuitos – 10ª. Edição – Robert L. Boylestad

Multiplicando a primeira equação por – 1, temos:

$$6I_1 + 4I_2 = +2$$
$$4I_1 + 5I_2 = +6$$

E usando determinantes:

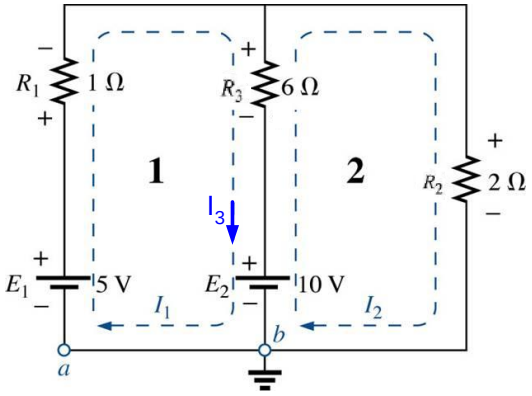
$$I_1 = \frac{\begin{vmatrix} 2 & 4 \\ 6 & 5 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 6 & 4 \\ 4 & 5 \end{vmatrix}} = \frac{10 - 24}{30 - 16} = \frac{-14}{14} = \mathbf{-1\,A}$$

$$I_2 = \frac{\begin{vmatrix} 6 & 2 \\ 4 & 6 \end{vmatrix}}{14} = \frac{36 - 8}{14} = \frac{28}{14} = 2\,\mathrm{A}$$

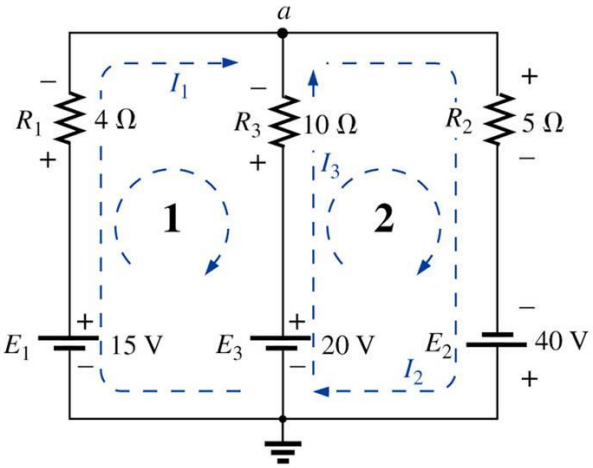
$$I_3 = I_1 + I_2 = -1 + 2 = 1\,\mathrm{A}$$

Exercícios

17 Aplique a análise das correntes nos ramos do circuito e calcule as correntes.



18 Aplicando a análise das correntes nos ramos, calcule as correntes.

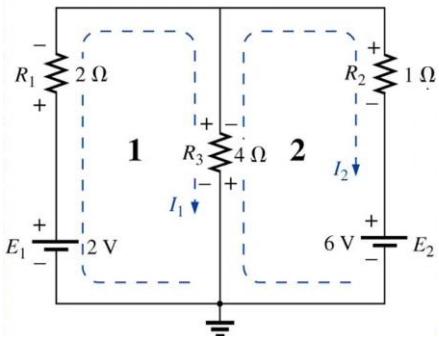


Texto retirado de: Introdução à Análise de Circuitos – 10ª. Edição – Robert L. Boylestad

Método das Malhas

O Segundo método a ser descrito é denominado método das malhas. Embora este método seja mais sofisticado que o método das correntes nos ramos, ele incorpora muito dos conceitos previamente ensinados. Essencialmente, o método das malhas simplesmente elimina a necessidade de substituir os resultados da LKT. Isso passa a ser feito implicitamente quando escrevemos as equações. A abordagem sistemática descrita a seguir deve ser seguida quando se aplicar este método.

1. Associe uma corrente no sentido horário a cada malha fechada independente do circuito.
2. Indique as polaridades de cada resistor dentro de cada malha, de acordo com o sentido da corrente postulado para esta malha.
3. Aplique a LKT em todas as malhas no sentido horário.
   a) Se um resistor é percorrido por duas ou mais correntes, a corrente total que o atravessa é dada pela corrente de malha à qual a lei de Kirchhoff está sendo aplicada mais as correntes de outras malhas que o percorrem no mesmo sentido e menos as correntes que o atravessam no sentido oposto.
   b) A polaridade de uma fonte de tensão não é afetada pela escolha do sentido das correntes nas malhas.
4. Resolva as equações lineares para obter as correntes.



Passo 1: Duas Correntes de malha (I1 e I2) são associadas, no sentido horário.

Passo 2: Determinamos as polaridades no interior de cada malha, de acordo com os sentidos postulados para as correntes. Note que, nesse caso, as polaridades entre os terminais do resistor de 4 Ω são opostas para as duas correntes de malha.

Passo 3: Aplica-se a LKT a cada malha, no sentido horário. A tensão entre os terminais de cada resistor é determinada por V = I R , e para um resistor percorrido por mais de uma corrente, a corrente resultante é a da malha do ramo em questão mais ou menos as outras correntes de malha, de acordo com seus sentidos. Se as aplicações da LK forem sempre aplicadas no sentido horário, as correntes de malha serão sempre subtraídas daquela que está sendo analisada.

$$\text{malha 1: } +E_1 - V_1 - V_3 = 0$$

$$+2\text{ V} - (2\ \Omega)I_1 - \overbrace{(4\ \Omega)(\underbrace{I_1 - I_2}_{\text{Corrente total no resistor de } 4\ \Omega})}^{\text{Queda de tensão no resistor de } 4\ \Omega} = 0$$

Subtraímos, pois I_2 tem sentido oposto ao de I_1.

$$\text{malha 2: } -V_3 - V_2 - E_2 = 0$$

$$-(4\ \Omega)(I_2 - I_1) - (1\ \Omega)I_2 - 6\text{ V} = 0$$

Passo 4: As equações são então reescritas como segue:

Texto retirado de: Introdução à Análise de Circuitos – 10ª. Edição – Robert L. Boylestad

$$\begin{aligned} &\text{malha 1:} && +2 - 2I_1 - 4I_1 + 4I_2 = 0 \\ &\text{malha 2:} && -4I_2 + 4I_1 - 1I_2 - 6 = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{e} \quad &\text{malha 1:} && +2 - 6I_1 + 4I_2 = 0 \\ &\text{malha 2:} && -5I_2 + 4I_1 - 6 = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ou} \quad &\text{malha 1:} && -6I_1 + 4I_2 = -2 \\ &\text{malha 2:} && +4I_1 - 5I_2 = +6 \end{aligned}$$

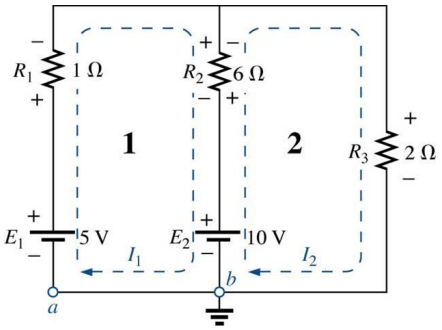
Aplicando determinantes, temos:

$$I1 = \frac{\begin{vmatrix} -2 & 4 \\ 6 & -5 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -6 & 4 \\ 4 & -5 \end{vmatrix}} = \frac{-14}{14} = -1[A] \quad \text{e} \quad I2 = \frac{\begin{vmatrix} -6 & -2 \\ 4 & 6 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -6 & 4 \\ 4 & -5 \end{vmatrix}} = \frac{-28}{14} = -2[A]$$

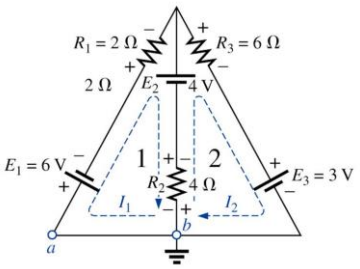
Ambos os sinais "-" indicam que o sentido da corrente real é oposto ao que foi arbitrado no início.

Exercícios

19 Determine a corrente que percorre cada ramo do circuito ao lado:



20 Determine a corrente que percorre cada ramo do circuito



Método das Malhas (ABORDAGEM PADRONIZADA)

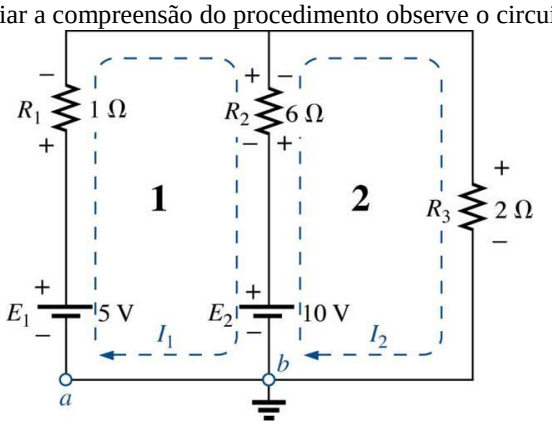
Agora que a base para o método das malhas foi estabelecida, examinaremos uma técnica para escrever as equações de malha mais rapidamente e com menos chances de cometer erros. Essas instruções são:

1. Suponha uma corrente de malha para cada malha independente, no sentido horário.
2. O número de equações necessárias é igual ao número de malhas independentes. A coluna 1 de cada equação é formada pela soma dos valores da resistência dos resistores pelos quais a corrente de malha de interesse passa, multiplicada por esta corrente.
3. Considere agora os termos comuns, que, são sempre subtraídos da primeira coluna. Um termo comum é simplesmente qualquer elemento resistivo percorrido por mais de uma corrente de malha.

Texto retirado de: Introdução à Análise de Circuitos – 10ª. Edição – Robert L. Boylestad

4. A coluna à direta da igualdade é a soma algébrica das tensões através das quais passa a corrente de manha de interesse. São associados sinais positivos às fontes de tensão com uma polaridade tal que a corrente de malha passe do terminal negativo para o positivo. E sinal negativo às fontes para os quais o inverso acontece.
5. Resolva as equações para obter as correntes de malha.

Para auxiliar a compreensão do procedimento observe o circuito



Observe que o sentido horário foi escolhido para todas as correntes de malha, as equações obtidas são:

$$-7I_1 + 6I_2 = 5$$
$$6I_1 - 8I_2 = -10$$

Que podem ser reescritas como:

$$7I_1 - 6I_2 = -5$$
$$8I_2 - 6I_1 = 10$$

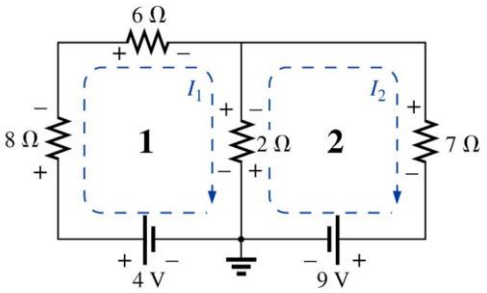
E expandidas como:

Col. 1	Col. 2	Col. 3
$(1 + 6)I_1 -$	$6I_2$	$= (5 - 10)$
$(2 + 6)I_2 -$	$6I_1$	$= 10$

Observe nas equações acima que a coluna 1 é composta por uma corrente de malha multiplicada pela soma dos resistores através dos quais passa esta mesma corrente de malha. A coluna 2 é o produto dos resistores comuns a uma corrente de malha pela outra corrente. Note que em cada equação está coluna é subtraída da coluna 1. A coluna 3 é a soma algébrica das fontes de tensão através das quais passa a corrente de malha que nos interessa.

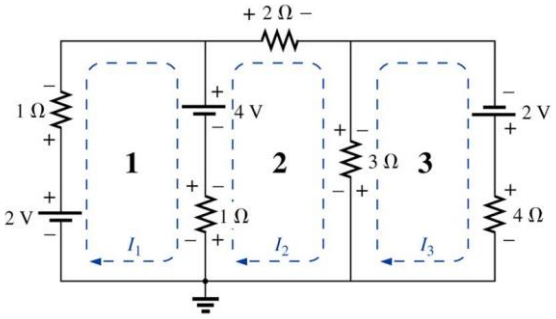
Exercícios

21 Escreva as Equações de malha para o circuito mostrado abaixo e determine a corrente através do resistor de 7Ω.

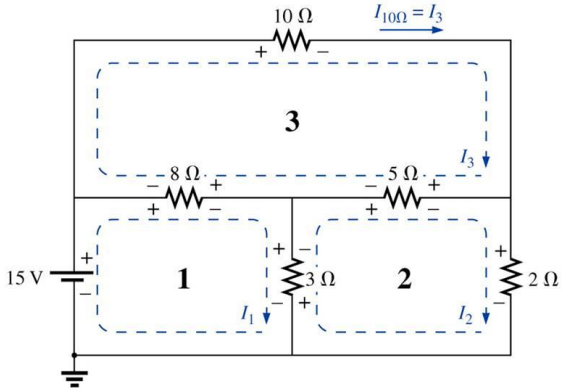


Texto retirado de: Introdução à Análise de Circuitos – 10ª. Edição – Robert L. Boylestad

22 Escreva as equações de malha para o circuito mostrado abaixo e determine as correntes dos resistores de 1Ω e 3Ω .



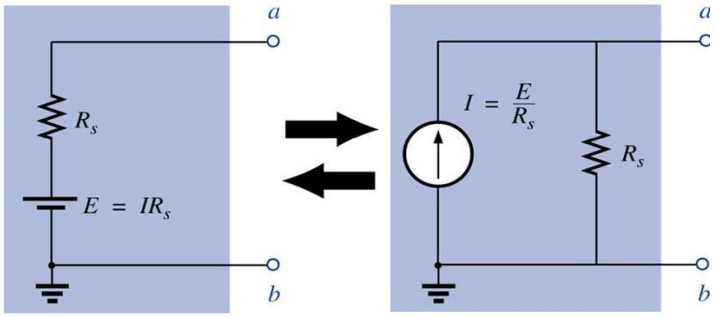
23 Determine as correntes nos resistores de 10Ω e 8Ω no circuito abaixo:



Conversões de Fontes

Todas as fontes – sejam de tensão ou corrente – possuem alguma resistência interna. Para a fonte de tensão, se RF = 0 Ω ou é tão pequena que pode ser ignorada, temos uma fonte de tensão "ideal". Para fonte de corrente, se RF = ∞ Ω ou é tão grande comparada aos outros elementos em paralelo que pode ser ignorada, temos uma fonte de corrente "ideal".

Se levarmos em conta a resistência interna de qualquer dos tipos de fonte, então cada uma delas pode ser convertida para o outro tipo.

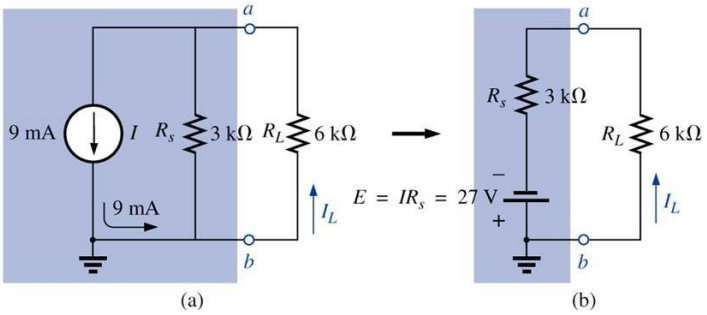


Conversões definem fontes que são equivalentes somente no que se refere aos seus terminais externos.

As características internas de cada tipo são bastante diferentes. Deseja-se a equivalência para assegurar que a carga aplicada às fontes recebam a mesma corrente, tensão e potência dos dois tipos de fonte, sem "saber" qual tipo está presente.

Texto retirado de: Introdução à Análise de Circuitos – 10ª. Edição – Robert L. Boylestad

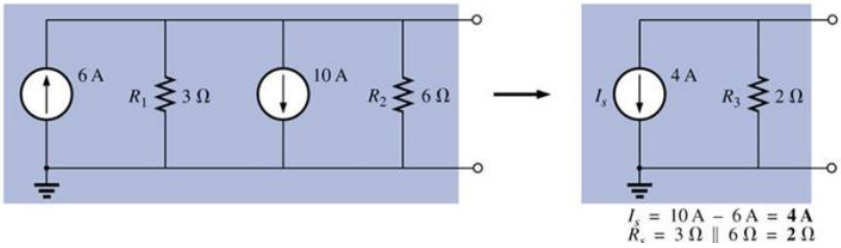
Exemplo:

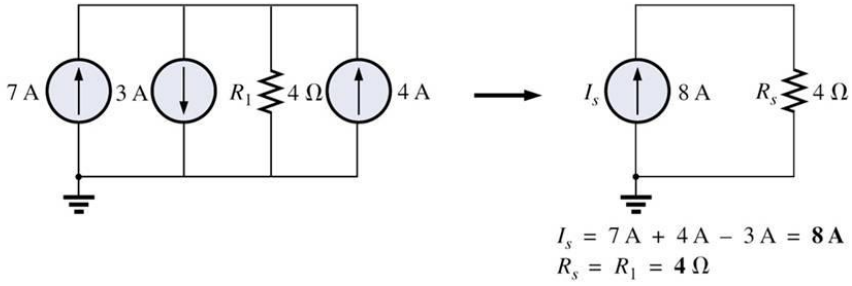


$$I_C = \frac{E}{R_F + R_C} = \frac{R_F \cdot I}{R_F + R_C}$$

Fontes de Correntes em Paralelo

Se duas ou mais fontes de corrente estão em paralelo, elas podem ser substituídas por uma única fonte resultante, com a corrente tendo intensidade e sentido da corrente da fonte resultante. Seguem exemplos:



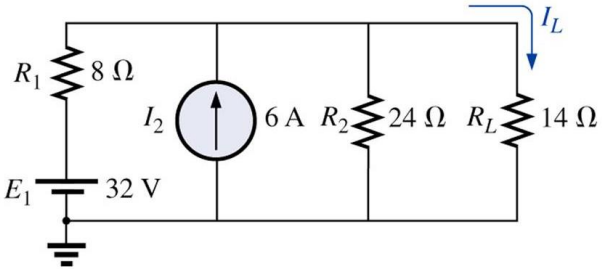


Fontes de Correntes em Série

Fontes de corrente de diferentes intensidades não podem ser ligadas em série.

Exercícios

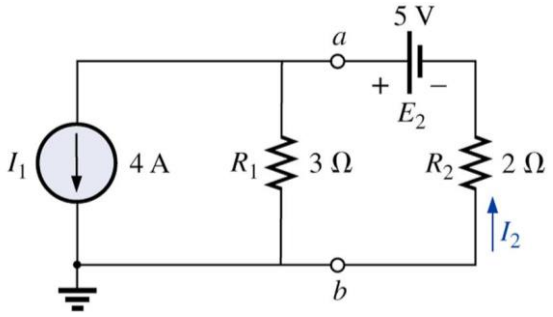
24 Reduza o circuito abaixo a uma única fonte e calcule a corrente em R_C (dica R_C=R_L).



Resp. I_{RC} = 3 [A]

Texto retirado de: Introdução à Análise de Circuitos – 10ª. Edição – Robert L. Boylestad

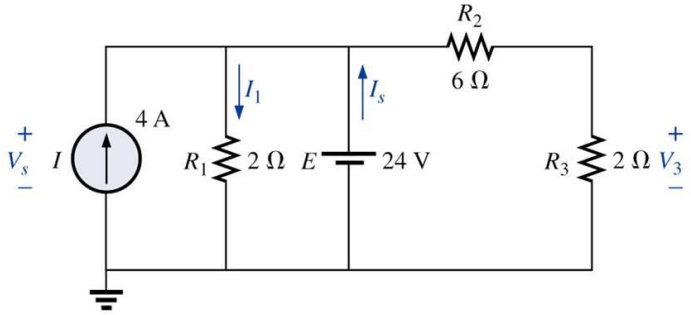
25 Reduza o circuito abaixo a uma única fonte e calcule a corrente R_C.



Resp. I_2 = 3,4 [A]

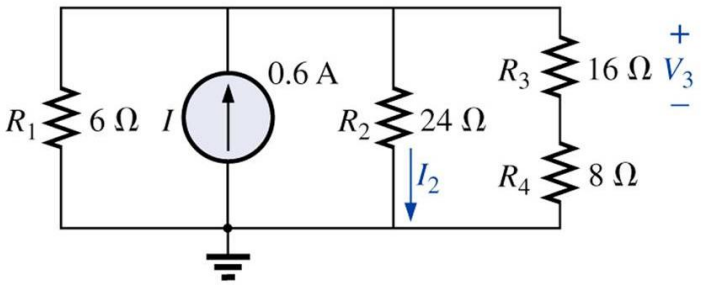
26 Para o circuito abaixo calcule:

a) Encontre as correntes I_1 e I_S.
b) Encontre as tensões V_S e V_{R3}.



Resp. I_2 = 12 [A], I_S = 11 [A], V_S = 24 [V], V_{R3} = 6 [V],

27 Encontre a tensão V_3 e a corrente I_2 para o circuito abaixo:



Texto retirado de: Introdução à Análise de Circuitos – 10ª. Edição – Robert L. Boylestad

Método dos Nós (abordagem padronizada)

Um exame minucioso revela que a tensão com subscrito associado ao nó ao qual a LKC é aplicada é multiplicada pela soma das condutâncias ligadas a esse nó. Observe também que as outras tensões nodais presentes na mesma equação são multiplicadas pelo negativo da condutância entre os dois nós. As fontes de corrente são representadas a direita da igualdade. Com sinal positivo se fornecer corrente ao nó e com sinal negativo se drenam corrente do nó. Essas condições podem ser generalizadas:

1. Escolha um nó de referência e associe um valor de tensão com subscrito aos (N–1) nós restantes do circuito.

2. O número necessário de equações para a solução é igual ao número das tensões com subscrito definido (N–1). A coluna 1 de cada equação é formada pela soma das condutâncias ligadas ao nó de interesse, multiplicada pela tensão com subscrito associada ao nó.

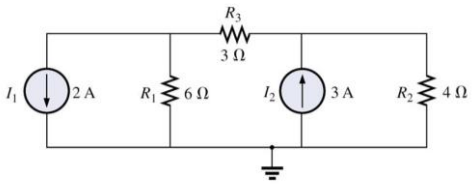
3. Temos de considerar agora os termos comuns, que, como vimos no exemplo anterior, são sempre subtraídos da primeira coluna. É possível haver mais de um termo comum se a tensão do nó de interesse possuir um elemento comum com mais de outra tensão nodal. Cada termo em comum é o produto da condutância em comum pela outra tensão nodal associada à mesma condutância.

4. A coluna à direita da igualdade é a soma algébrica das fontes de corrente conectadas ao nó de interesse. Uma fonte de corrente recebe o sinal positivo se fornecer a corrente a um nó, e o sinal negativo, se drenar corrente do nó.

5. Resolva as equações simultâneas resultantes para obter as tensões nodais desejadas.

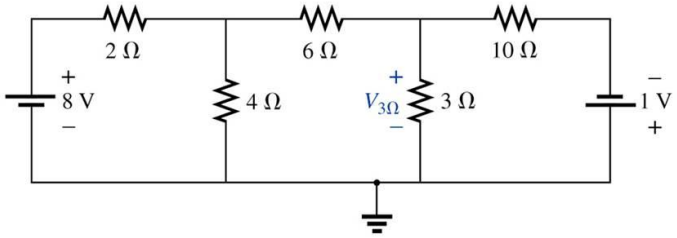
Exercícios

28 Escreva as equações nodais e os valores de tensão para o circuito abaixo:



Resp. $V_1 = -0{,}934$ [V] e $V_2 = 4{,}638$ [V]

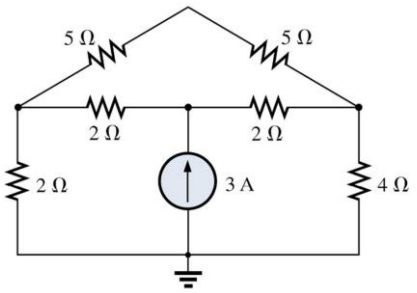
29 Determine a tensão entre os terminais do Resistor de 3 Ω, pelo método dos nós.



Resp. $V_{R3\Omega} = 1{,}1$ [V]

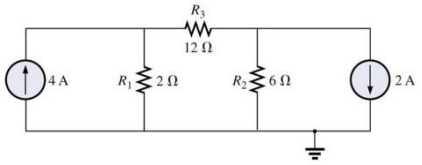
Texto retirado de: Introdução à Análise de Circuitos – 10ª. Edição – Robert L. Boylestad

30 Usando o método dos nós, determine a diferença de potencial entre os terminais do resistor de 4Ω.



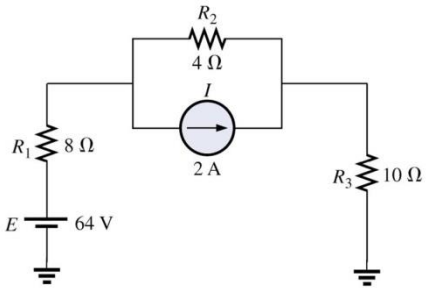
Resp. $V_{R4\Omega}$ = 4,645 [V]

31 Aplique o método dos nós ao circuito abaixo e encontre as correntes sobre os resistores.



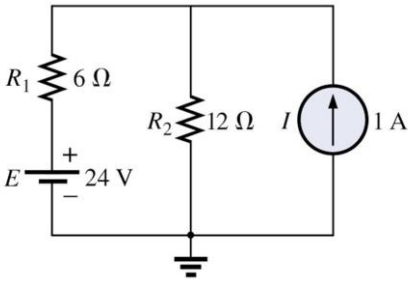
Resp. V_1 = 6 [V], V_2 = – 6 [V], I_{R1}= 3[A], I_{R2}= 1[A], I_{R3}= 1[A].

32 Aplique o método dos nós ao circuito abaixo e encontre as correntes sobre os resistores.



Resp. V_1 = 37,818 [V], V_2 = 32,727 [V], I_{R1}= 3,273 [A], I_{R2}= 1,273[A], I_{R3}= 3,273[A].

33 Aplique o método dos nós ao circuito abaixo e encontre as correntes sobre os resistores.



Resp. V_1 = 20 [V], I_{R1}= – 0,667 [A], I_{R2}= 1,667[A].

Texto retirado de: Introdução à Análise de Circuitos – 10ª. Edição – Robert L. Boylestad

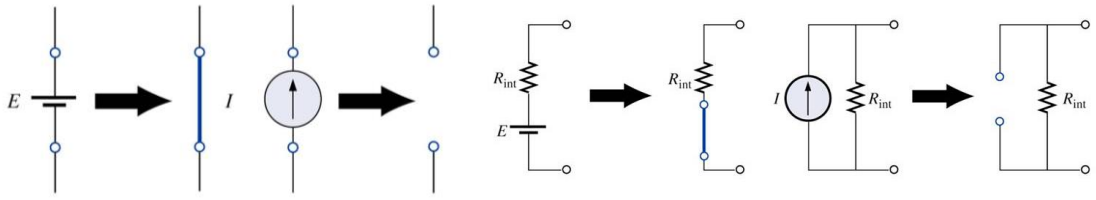
Teorema da Superposição

O teorema da superposição, assim como os métodos vistos anteriormente, pode ser usado para encontrar a solução para circuitos contendo uma ou mais fontes que não estejam em série ou paralelo. A vantagem mais evidente deste método é dispensar o uso de ferramentas matemáticas, como os determinantes, para calcular as tensões e correntes solicitadas. Em vez disso, o efeito de cada fonte é levado em conta separadamente e o valor da incógnita é obtido efetuando a soma algébrica desses efeitos individuais.

O enunciado do teorema da superposição é o seguinte:

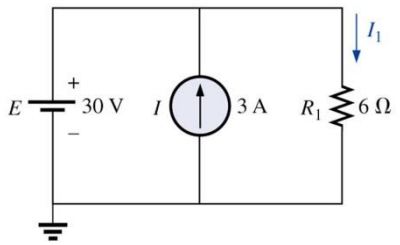
A corrente através de um elemento, ou a tensão entre seus terminais, em um circuito linear bilateral é igual à soma algébrica das correntes ou das tensões produzidas independentemente por cada uma das fontes.

Para considerar os efeitos de cada fonte independentemente, é necessário que estas sejam removidas e substituídas sem afetar o resultado final. Para remover uma fonte de tensão quando aplicamos este teorema, a diferença de potencial entre os terminais da fonte de tensão tem de ser estabelecida em zero (curto-circuito); a remoção de uma fonte de corrente requer que os seus terminais sejam abertos (circuito aberto). Qualquer resistência ou condutância interna associada a essas fontes tem de ser mantida no circuito.



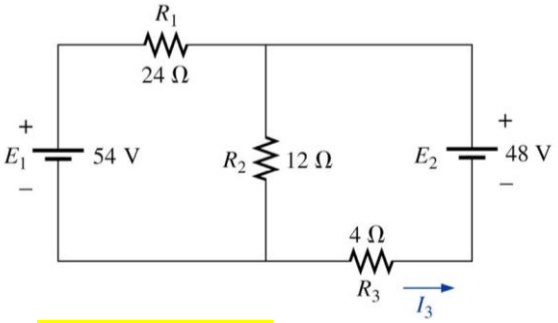
Exercícios

34 Usando o teorema da Superposição determine I1 para o circuito abaixo:



Resp. I_1 = 5[A]

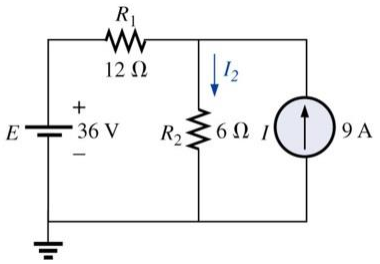
35 Usando o Teorema da Superposição, determine a corrente no resistor de 4Ω.



Resp. I_3 = 2,25[A] →

Texto retirado de: Introdução à Análise de Circuitos – 10ª. Edição – Robert L. Boylestad

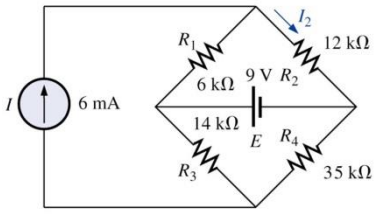
36 Usando o Teorema da Superposição, determine a corrente no resistor de 6Ω.



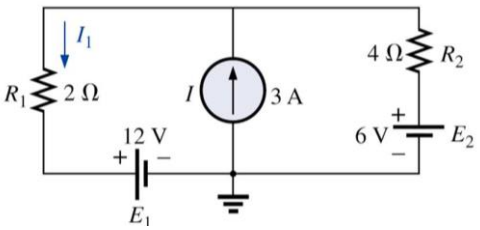
Resp. $I_2 = 8[A]\downarrow$

37 Usando o Teorema da Superposição, determine a corrente no resistor de 12 kΩ

Resp. $I_2 = 2{,}5$ mA



38 Usando o Teorema da Superposição, determine a corrente no resistor de 2 Ω

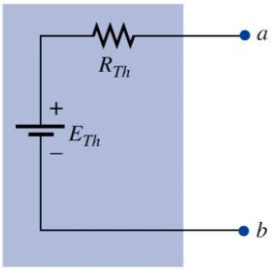


Resp. $I_1 = 1[A]\downarrow$

Teorema de Thévenin

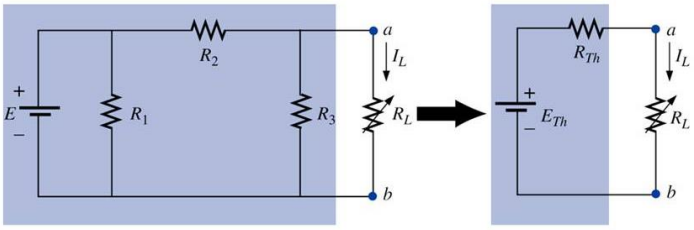
O Teorema de thévenin afirma que:

Qualquer circuito de corrente contínua linear bilateral de dois terminais pode ser substituído por um circuito equivalente constituído por uma fonte de tensão e um resistor em série.



O circuito equivalente de Thévenin fornece uma equivalência apenas nos terminais considerados. A seqüência de passos a seguir nos conduzirá aos valores corretos de Eth e Rth.

1. Remova a parte do circuito para a qual deseja obter um equivalente de Thévenin.
2. Assinale os terminais do circuito remanescente.
3. Calcule R_{Th}, colocando primeiro todas as fontes em zero (substituindo as fontes de tensão por curti-circuitos e as fontes de corrente por circuitos abertos) e em seguida determine a resistência equivalente entre os dois terminais escolhidos.
4. Calcule E_{Th} retornando primeiro todas as fontes às sua posições originais e em seguida determine a tensão entre os dois terminais escolhidos.
5. Desenhe o circuito equivalente de Thévenin e recoloque entre os terminais do circuito equivalente a parte que foi previamente removida.

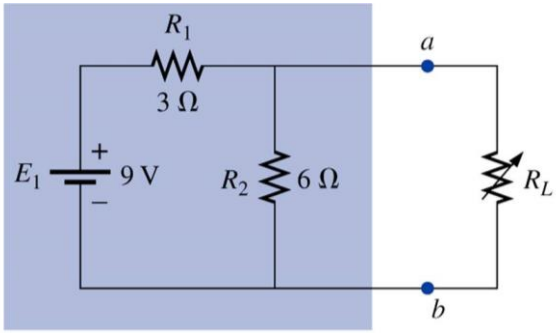


(a) (b)

Texto retirado de: Introdução à Análise de Circuitos – 10ª. Edição – Robert L. Boylestad

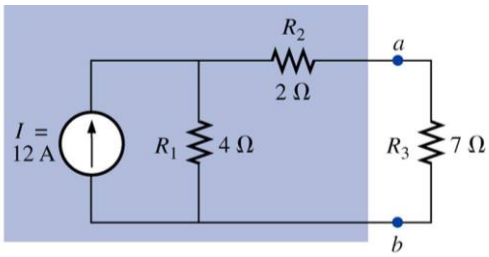
Exercícios

39 Determine o CKT equivalente de thévenin entre os terminais a e b. Em seguida determine a corrente RL, considerando que essa resistência tenha valores de 2Ω, 10Ω e 100Ω.

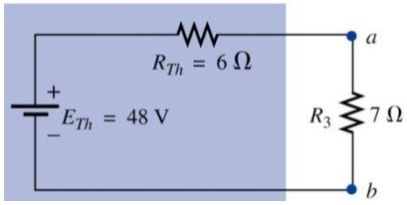


Resp. $I_{L2\Omega}$ = 1,5[A],
$I_{L10\Omega}$ = 0,5[A],
$I_{L100\Omega}$ = 0,059[A],

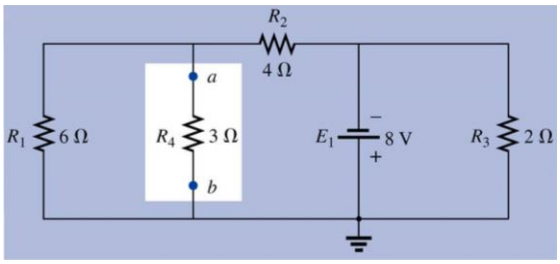
40 Determine o CKT equivalente de thévenin para o circuito abaixo:



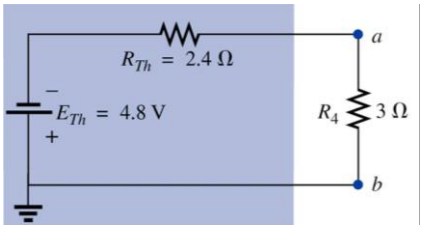
Resp.



41 Determine o CKT equivalente de thévenin para a parte sombreada (entre os terminais a e b). Observe neste exemplo que não há necessidade de que a parte do circuito a ser preservada esteja no 'final' do circuito.



Resp.

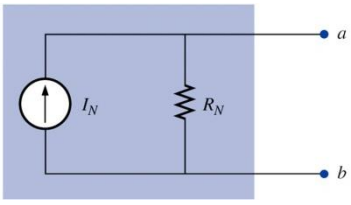


Teorema de Norton

Foi demonstrado anteriormente que qualquer fonte de tensão em série com uma resistência interna pode determinar-se uma fonte de corrente equivalente. O circuito com fonte de corrente equivalente ao circuito de Thévenin, conforme mostrado na figura abaixo, pode ser obtido com o auxílio do teorema de Norton.

O teorema de Norton afirma que:

Qualquer circuito de corrente contínua linear bilateral de dois terminais pode ser substituído por um circuito equivalente formado por uma fonte de corrente e um resistor em paralelo, conforme figura abaixo.



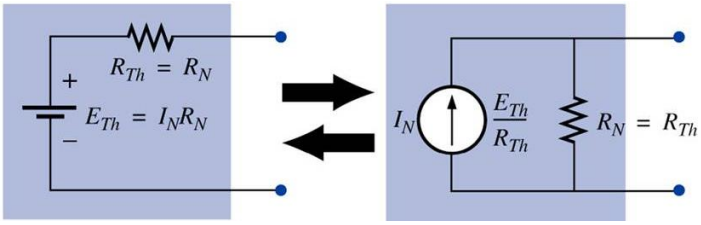
A discussão do teorema de thévenin com relação ao circuito equivalente também pode ser aplicada ao circuito equivalente de Norton. Os passos que conduzem aos valores apropriados de R_N e I_N são:

1. Remova a parte do circuito para a qual deseja obter o equivalente de Norton.
2. Assinale os dois terminais do circuito remanescente.
3. Para calcular R_N, repita os mesmo procedimentos para o calculo de R_{Th}.
4. Para calcular I_N , retorne todas as fontes às suas posições originais e em seguida determine a corrente de curto circuito entre os dois terminais assinalados.

Texto retirado de: Introdução à Análise de Circuitos – 10ª. Edição – Robert L. Boylestad

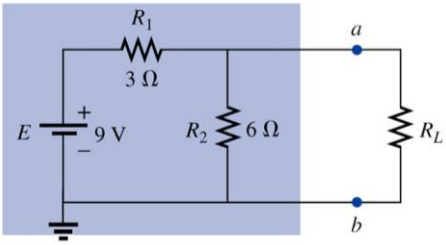
5. Desenhe o circuito equivalente de Norton e recoloque entre os terminais do circuito a parte que foi previamente removida.

Podemos também obter o circuito equivalente de Norton a partir do CKT equivalente de Thévenin e vice-versa utilizando as técnicas de transformação.

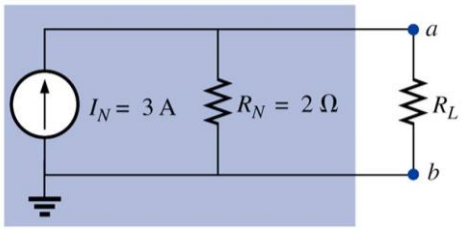


Exercícios

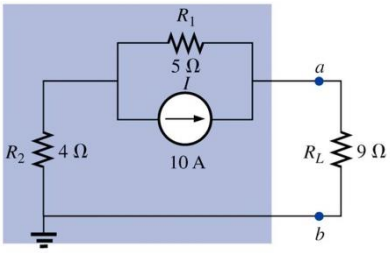
42 Determine o CKT equivalente de norton para a parte sombreada da figura abaixo.



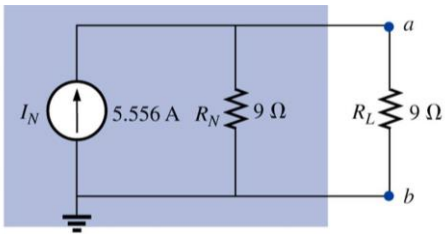
Resp.



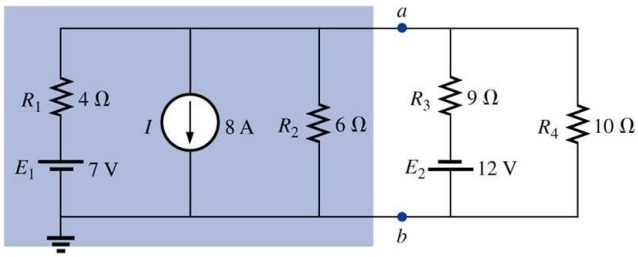
43 Determine o CKT equivalente de Norton para o circuito externo ao resistor de 9Ω.



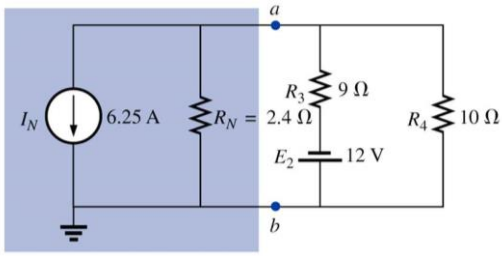
Resp.



44 Determine o CKT equivalente de Norton para a parte do circuito à esquerda dos pontos a e b.



Resp.

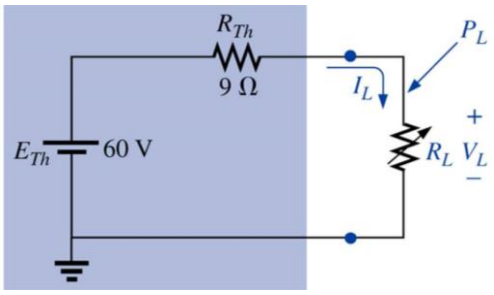


Teorema da máxima transferência de potência (MTP)

A potência transmitida a uma carga por um circuito de corrente contínua linear bilateral será máxima quando a resistência dessa carga for exatamente igual à resistência de thévenin do circuito ligado a essa carga. Ou seja, a potência fornecida à carga será máxima quando $R_L=R_{TH.}$

Texto retirado de: Introdução à Análise de Circuitos – 10ª. Edição – Robert L. Boylestad

Para exemplificar, vamos considerar um exemplo em que E_{Th} = 60 V e R_{Th} = 9Ω, como mostra a figura abaixo:



A potência fornecida a carga é:

$$I = \frac{E_{Th}}{R_{Th} + R_L}$$

$$P_L = I^2 R_L = \left(\frac{E_{Th}}{R_{Th} + R_L}\right)^2 R_L$$

$$P_L = \frac{E_{Th}^2 R_L}{(R_{Th} + R_L)^2}$$

Substituindo os valores:

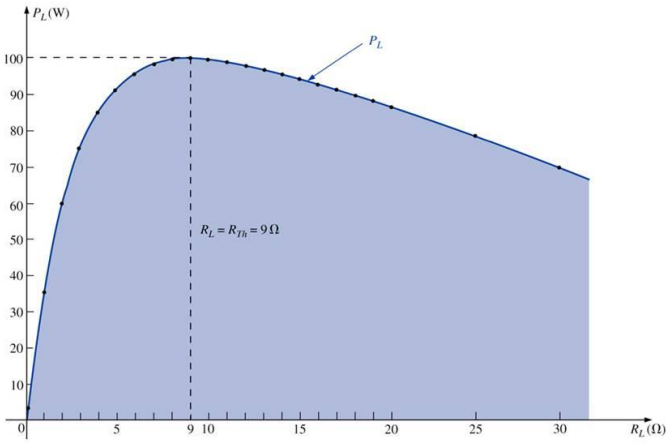
$$P_L = \frac{E_{Th}^2 R_L}{(R_{Th} + R_L)^2} = \frac{3600 R_L}{(9\ \Omega + R_L)^2}$$

$$I_L = \frac{E_{Th}}{R_{Th} + R_L} = \frac{60\ \text{V}}{9\ \Omega + R_L}$$

$$V_L = \frac{R_L(60\ \text{V})}{R_{Th} + R_L} = \frac{R_L(60\ \text{V})}{9\ \Omega + R_L}$$

Variando RL de 0,1Ω a 30 Ω temos:

R_L (Ω)	P_L (W)		I_L (A)		V_L (V)	
0,1	4,35		6,59		0,66	
0,2	8,51		6,52		1,30	
0,5	19,94		6,32		3,16	
1	36,00		6,00		6,00	
2	59,50		5,46		10,91	
3	75,00		5,00		15,00	
4	85,21		4,62		18,46	
5	91,84	Aumenta	4,29	Diminui	21,43	Aumenta
6	96,00		4,00		24,00	
7	98,44		3,75		26,25	
8	99,65		3,53		28,23	
9 (R_{Th})	100,00 (Máximo)		3,33 ($I_{máx}$/2)		30,00 (E_{Th}/2)	
10	99,72		3,16		31,58	
11	99,00		3,00		33,00	
12	97,96		2,86		34,29	
13	96,69		2,73		35,46	
14	95,27		2,61		36,52	
15	93,75		2,50		37,50	
16	92,16		2,40		38,40	
17	90,53	Diminui	2,31	Diminui	39,23	Aumenta
18	88,89		2,22		40,00	
19	87,24		2,14		40,71	
20	85,61		2,07		41,38	
25	77,86		1,77		44.12	
30	71,00		1,54		46,15	
40	59,98		1,22		48,98	
100	30,30		0,55		55,05	
500	6,95		0,12		58,94	
1000	3,54		0,06		59,47	



A eficiência de operação em corrente contínua de um sistema é definida como a razão entre a potência dissipada pela carga e a potência fornecida pela fonte, ou seja:

$$\eta\% = \frac{R_L}{R_{Th} + R_L} \times 100\%$$

T
E

0ª. Edição – Robert L.

Nas condições de MTP (R_L=R_{TH}), a potência fornecida para R_L é igual á:

$$I = \frac{E_{Th}}{R_{Th} + R_L} = \frac{E_{Th}}{2R_{Th}}$$

$$P_L = I^2 R_L = \left(\frac{E_{Th}}{2R_{Th}}\right)^2 R_{Th} = \frac{E_{Th}^2 R_{Th}}{4R_{Th}^2}$$

Utilizando Thévenin

$$\boxed{P_{L\,\text{máx}} = \frac{E_{Th}^2}{4R_{Th}}} \quad \text{(watts, W)}$$

Utilizando Norton

$$\boxed{P_{L\,\text{máx}} = \frac{I_N^2 R_N}{4}} \quad \text{(W)}$$

Referências bliográficas

1 - Apostila ELETRICIDADE FUNDAMENTAL - Prof. João J. A. de Paula

2- BOYLESTAD, Robert L. Introdução à análise de circuitos. São Paulo: Pearson, c2004.

Bibliografia Básica

BOYLESTAD, Robert L. Introdução à análise de circuitos. São Paulo: Pearson, c2004.

IRWIN, J. David. Introdução à análise de circuitos elétricos. Rio de Janeiro: LTC, 2005

ORSINI, Luiz de Queiroz ; CONSONNI, Denise. Curso de circuitos elétricos. São Paulo: Edgard Blücher, 2004. 2 v.

Bibliografia Complementar

BURIAN JUNIOR, Yaro; LYRA, Ana Cristina C. Circuitos elétricos. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2006.

EDMINISTER, Joseph A. Circuitos elétricos: resumo da teoria, 350 problemas resolvidos, 493 problemas propostos. São Paulo: McGraw-Hill : Pearson Education, 1991.

GUSSOW, Milton. Eletricidade básica. Porto Alegre: Bookman, 2009.

MARKUS, Otávio. Circuitos elétricos: corrente contínua e corrente alternada: teoria e exercícios. São Paulo: Érica, 2008.

NILSSON, James W. ; RIEDEL, Susan A. Circuitos elétricos. Rio de Janeiro: Pearson Education, 2008.

Texto retirado de: Introdução à Análise de Circuitos – 10ª. Edição – Robert L. Boylestad

Lista de Exercícios: Circuitos Elétricos

Exercício 45: Calcule a intensidade média da corrente para os casos a seguir:

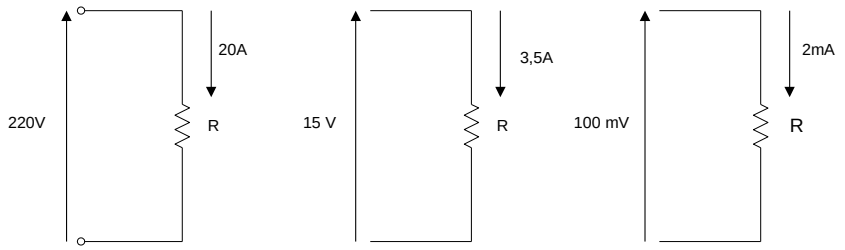
a) Q = 10[C], Δt = 20 [s]

b) Q = 50 [C]; Δt = 200 [s]

c) Q = 360 [C]; Δt = 0,5 hora

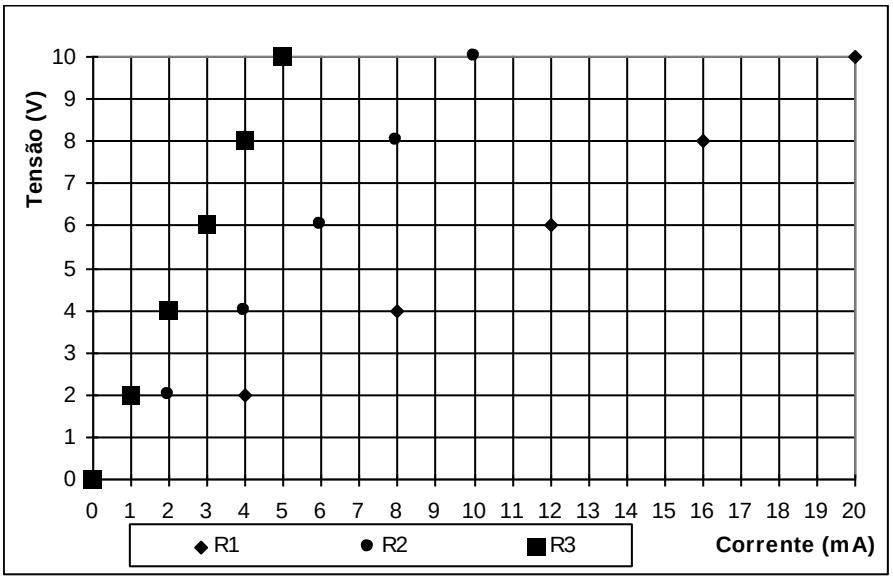
Resp: a) 0,5 [A]; 0,25 [A]; 0,2 [A]

Exercício 46: Dados os valores de tensão e corrente no resistor R, determinar o valor da resistência:



Resp: resistor 1) 11 [Ω]; resistor 2) 4,29 [Ω]; resistor 3) 50 [Ω]

Exercício 47: As curvas de três resistores R1, R2 e R3 a seguir foram obtidas experimentalmente. A partir dos dados de tensão e corrente, observados no gráfico, determine os valores de resistência dos resistores R1, R2 e R3.



Resp: R1 = 500[Ω]; R2 = 1[kΩ]; R3 = 2[kΩ];

Texto retirado de: Introdução à Análise de Circuitos – 10ª. Edição – Robert L. Boylestad

Exercício 48: Determine os valores das resistências dos resistores R1, R2, R3, R4 e R5 através de seu respectivo código de cores. Determine também, a partir das respectivas tolerâncias, os valores mínimo e máximo de resistência que cada resistor pode assumir.

Resistor	1ª faixa	2ª faixa	3ª faixa	4 faixa	Valor	Tol.	Mínimo	Máximo
R1	amarelo	violeta	vermelho	ouro				
R2	marrom	preto	vermelho	prata				
R3	Vermelho	vermelho	laranja	ouro				
R4	branco	Cinza	marrom	nenhuma				
R5	verde	Preto	preto	prata				

Exercício 49: Em um fio de alumínio com diâmetro de 1,5 [mm] circula uma corrente de 1 [A] quando submetido a uma tensão de 30 [V]. Qual é o comprimento do fio e a sua condutância?

Dado: $\rho_{(Alumínio)} = 2{,}8x10^{-8}$ [Ω.m]

Resp.: l ≅ 1892 [m]; g = 33,33 [mS]

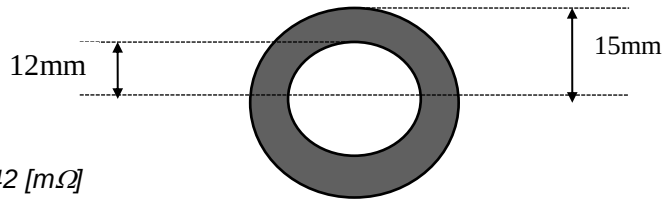
Exercício 50: Em um fio de seção circular de alumínio com comprimento de 200 [m] circula uma corrente de 0,5 [A] quando submetido a uma tensão de 2 [V]. Qual é a área de seção transversal do fio e a sua condutância?

Dado: $\rho_{(Alumínio)} = 2{,}8x10^{-8}$ [Ω.m]

Resp.: $1{,}4x10^{-6}$ [m^2] ou 1,4[mm^2]; g = 0,25 [S]

Exercício 51: Calcule a resistência de um fio de cobre de 500 [m] de comprimento e área de seção transversal conforme a figura abaixo, (somente a área em cinza):

Dado: $\rho_{(Cobre)} = 1{,}7x10^{-8}$ [Ω.m]



Resp:R ≅ 33,42 [mΩ]

Exercício 52: Um condutor de 10 [m] de comprimento, de seção quadrangular de lado igual a 2[mm] e uma resistividade (ρ) de $45x10^{-2}$ [Ω.mm^2/m], é percorrido por uma corrente elétrica de 500 [mA]. Determine a tensão aplicada no condutor.

Resp: V ≅ 0,56 [V]

Texto retirado de: Introdução à Análise de Circuitos – 10ª. Edição – Robert L. Boylestad

Exercício 53: Existem, no mercado, dois tipos de lâmpadas elétricas incandescentes, cujas especificações são:

• Lâmpada 1: 100 W - 127 V

• Lâmpada 2: 100 W - 110 V

a) Calcule, em percentagem, quanto de potência uma Lâmpada 2 consome a mais que uma Lâmpada 1, quando ambas são submetidas à tensão de 127 V.

b) Determine o valor, em R$ (reais), correspondente ao excesso de consumo anual com o emprego exclusivo da Lâmpada 2, supondo que:

• existem 25 milhões de domicílios no Brasil atendidos pela tensão 127 V;

• cada domicílio emprega em média 5 lâmpadas de 100 W;

• as lâmpadas permanecem acesas em média durante 15% do tempo;

• a tarifa é única e de R$ 0,25 / kWh;

• o gasto adicional da perda de vida útil da Lâmpada 2, quando submetida à tensão de 127 V, não precisa ser aqui considerado.

Caso você não tenha resolvido o item "a", considere 35 W como sendo o excedente de potência consumido pela Lâmpada 2, em relação à potência consumida pela Lâmpada 1 ao operar em 127 V.

c) Ao abrir seu jornal, você se deparou com a propaganda de um fabricante de lâmpadas incandescentes que apregoava a superioridade das Lâmpadas 2 de sua linha de produção. Ele ressaltava apenas um aspecto: que o nível de iluminação de suas lâmpadas era maior que o das Lâmpadas 1, quando ligadas em 127 V.

Análise esta propaganda quanto ao seu teor (conteúdo).

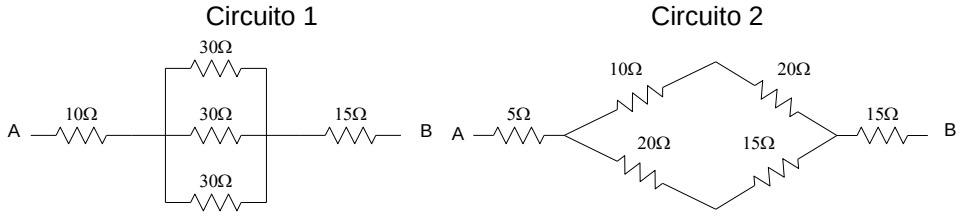
Resp: a) 33,3% *b) R$1,4375 bilhões*

c) A vantagem que o fabricante apregoa é verdadeira. Entretanto, existem duas desvantagens que não foram apregoadas pelo fabricante:

- *o consumo desse tipo de lâmpada é maior;*
- *seu tempo de vida útil é menor.*

(MEC - Exame Nacional de Cursos – 2000)

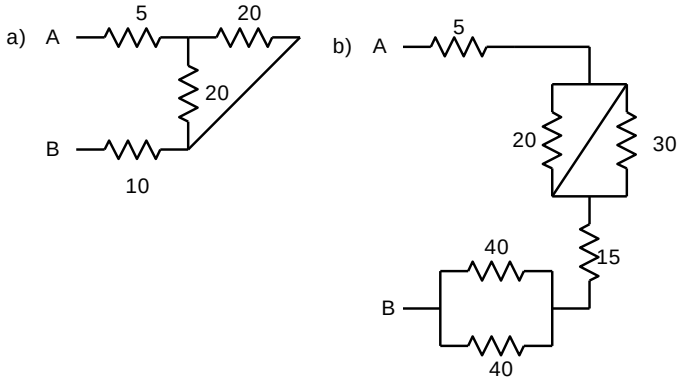
Exercício 54 : Determine a resistência total entre os pontos A e B.



Resp: circuito 1 – R_{AB} =35 [Ω] ; circuito 2 - R_{AB} =36,15 [Ω]

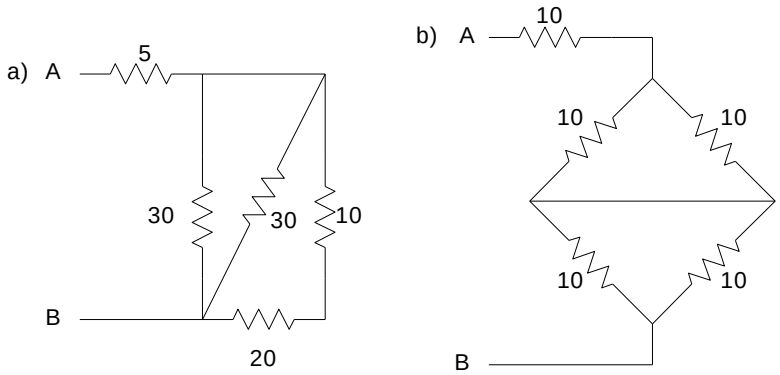
Texto retirado de: Introdução à Análise de Circuitos – 10ª. Edição – Robert L. Boylestad

Exercício 55: Determine a resistência total entre os pontos A e B (R_{AB}) para os dois circuitos a seguir. Os valores estão em Ω.



Resp: a) R_{AB} =25 [Ω] ; b) R_{AB} =40 [Ω]

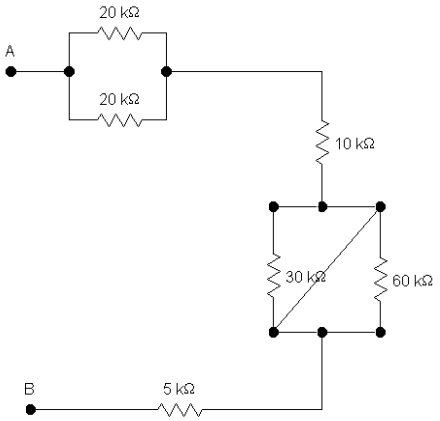
Exercício 56: Calcule a resistência total entre os pontos A e B dos circuitos a seguir. Os valores estão em Ω.



Resp: a) R_{AB} =15 [Ω] ; b) R_{AB} = 20 [Ω]

Exercício 57: Para o circuito a seguir, determine:

a) A resistência total entre os pontos A e B

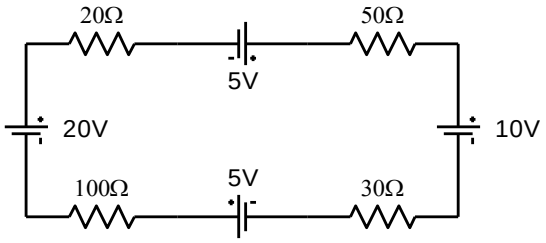


Texto retirado de: Introdução à Análise de Circuitos – 10ª. Edição – Robert L. Boylestad

b) Se ligarmos uma fonte de tensão de 50 V a este circuito, qual será a potência dissipada pela resistência total do circuito?

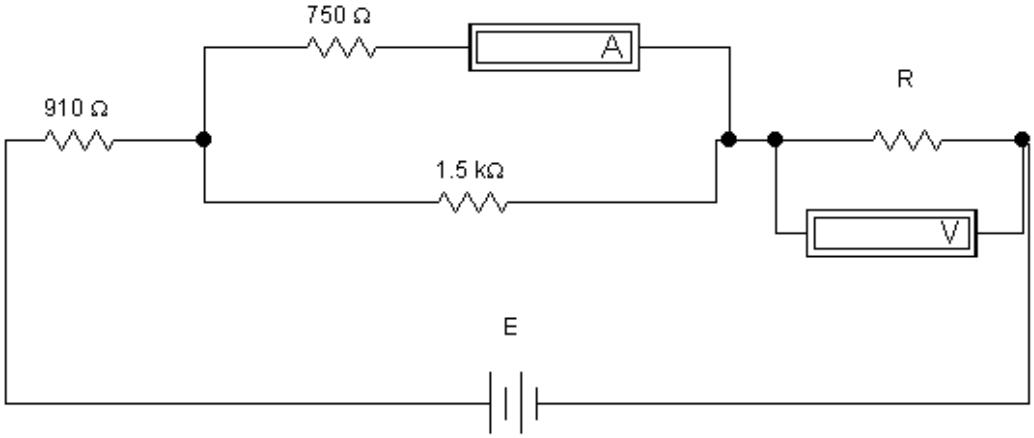
Resp: a) R_{AB} =25 [kΩ]; b) 100 [mW]

Exercício 58: Determine o valor e o sentido da corrente para o circuito a seguir.



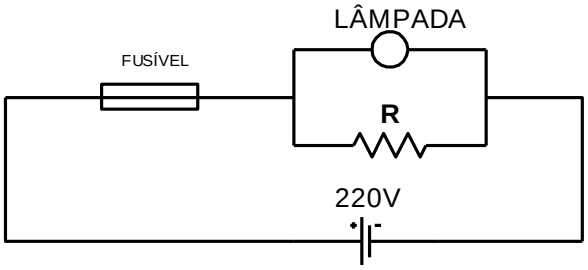
Resp: I = 0,1 [A] no sentido horário

Exercício 59: No circuito abaixo, a leitura do amperímetro é de 6 mA e do voltímetro é de 3,51 V. Calcule o valor da Resistência **R** e da tensão na fonte **E**.



Resp: R = 390 [Ω]; E=16,2[V]

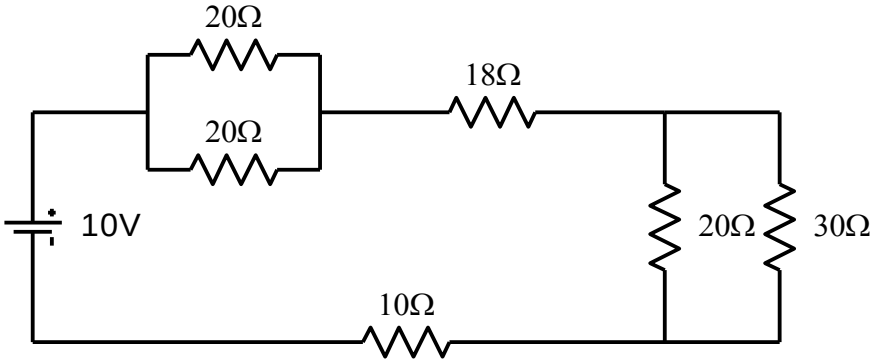
Exercício 60: Calcule o menor valor da resistência R que pode ser colocado em paralelo com uma lâmpada de 220V/150W, sem que o fusível de 4A, indicado na figura, possa queimar.



Resp: R ≥ 66,3 [Ω]

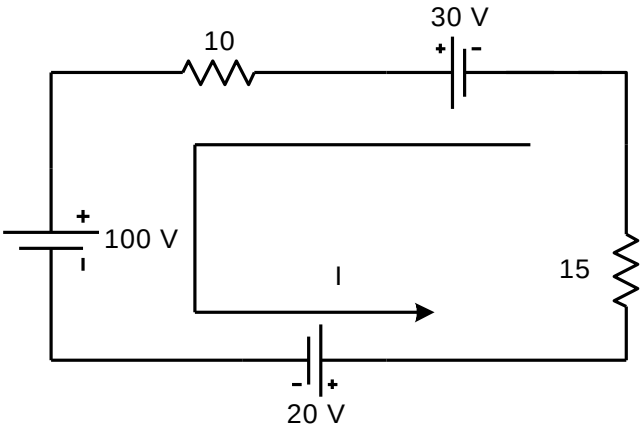
Texto retirado de: Introdução à Análise de Circuitos – 10ª. Edição – Robert L. Boylestad

Exercício 61: Para o circuito a seguir, determine a resistência equivalente e a corrente total do circuito. Determine também a queda de tensão sobre o resistor de 10 [Ω].



Resp: R_{eq} = 50 [Ω]; V_R=2 [V]

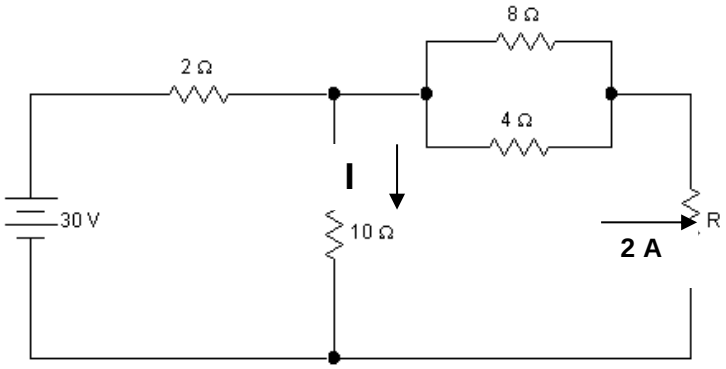
Exercício 62: No circuito seguinte calcule o valor de I e verifique se o sentido adotado para a corrente está correto. Considere que os valores dos resistores estão em Ω.



Resp: I =2 [A]. O sentido da corrente está incorreto. O sentido correto é o horário.

Exercício 63: No circuito a seguir, determine:

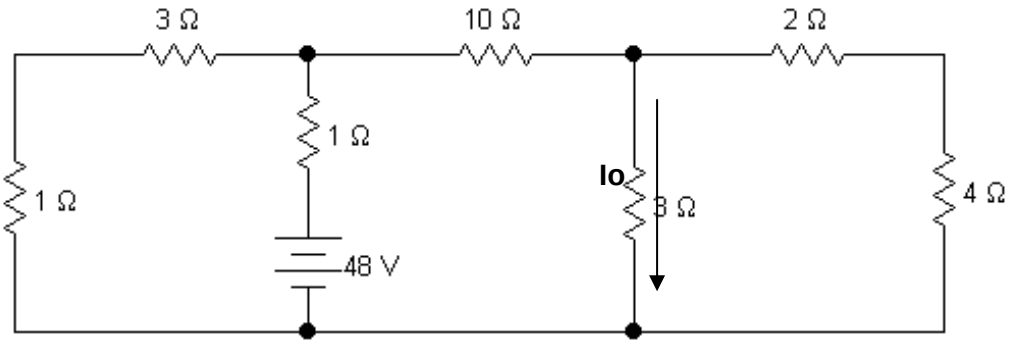
a) O valor da corrente elétrica **I** (corrente que flui pelos terminais do resistor de 10Ω)
b) O valor da resistência **R**



Resp: I = 2[A]; R = 4 [Ω]

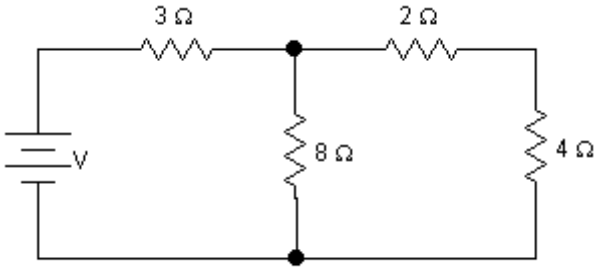
Texto retirado de: Introdução à Análise de Circuitos – 10ª. Edição – Robert L. Boylestad

Exercício 64: Determine o valor da corrente Io no circuito abaixo:



Resp: Io = 2[A]

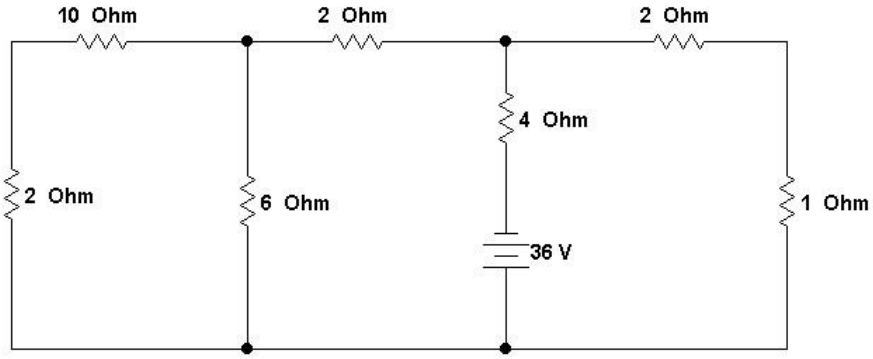
Exercício 65: Sabendo-se que a potência dissipada pelo resistor de 4 Ω no circuito abaixo é de 64 W, determine o valor da tensão na fonte.



Resp: V = 45[V]

Exercício 66: Para o circuito a seguir, determine:

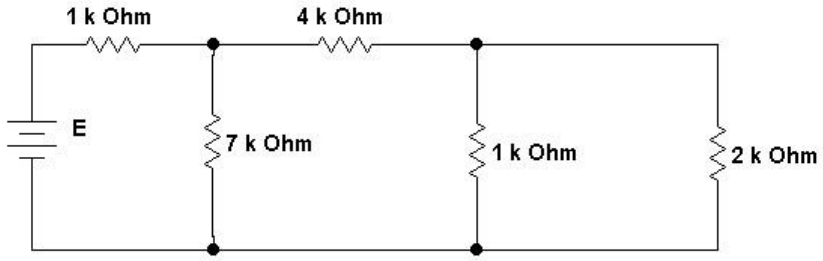
a) A corrente sobre o resistor de 1 [Ω]
b) A tensão sobre o resistor de 6 [Ω]



Resp: I_{R1} = 4[A]; V_{R2} = 8 [V]

Texto retirado de: Introdução à Análise de Circuitos – 10ª. Edição – Robert L. Boylestad

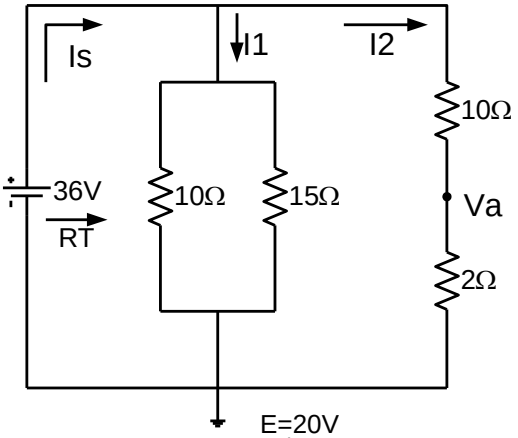
Exercício 67: Determine o valor da tensão da fonte, sabendo que, para o circuito abaixo, a tensão no resistor de 2[kΩ] é igual a 2[V].



Resp: 19[V]

Exercício 68: Para o circuito a seguir, determine:

a) A resistência total do circuito RT
b) O valor das correntes Is, I1 e I2
c) O valor da tensão Va

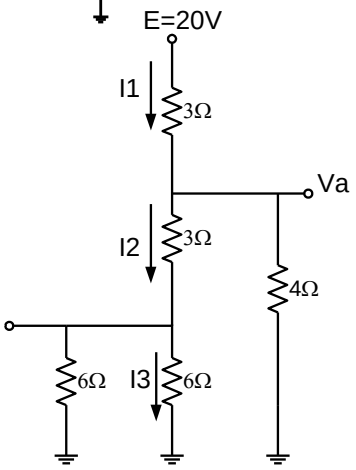


Resp: a) 4[Ω]; b) Is=9[A], I1=6[A], I2=3[A]
c) 6[V]

(Introdução à análise de circuitos – Boylestad, R. L.; 10ª edição - Pearson/ Prentice Hall)

Exercício 69: Determine para o circuito a seguir:

a) Os valores das correntes I1, I2 e I3
b) Os valores das tensões Va e Vb



Resp: a) I1=3,70[A], I2=1,48[A], I3=0,74[A]
b) Va=8,89[V], Vb=4,45[V]

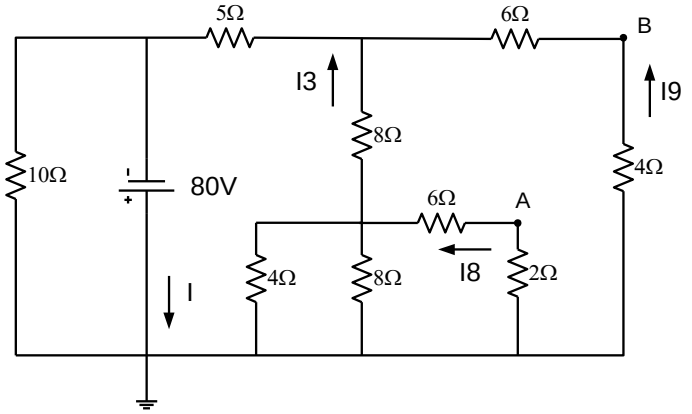
(Introdução à análise de circuitos – Boylestad, R. L.; 10ª edição - Pearson/ Prentice Hall)

Exercício 70: Calcule para o circuito a seguir:

a) Os valores da correntes I, I3, I8 e I9
b) A tensão V_{AB}

Resp: a) I=16[A], I3=4[A], I8=1[A], I9=4[A] b)VAB=14[V]

Texto retirado de: Introdução à Análise de Circuitos – 10ª. Edição – Robert L. Boylestad

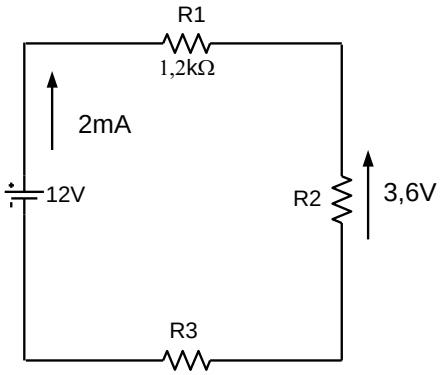


Exercício 71: Um circuito é formado por uma fonte de tensão contínua de 12V e uma associação de 3 resistores em série. Sabendo que R_1 = 1,2kΩ, V_{R2} = 3,6V e I_{Total} = 2mA. Calcule:

a) O valor do resistor R_2;

b) O valor do resistor R_3;

c) A resistência total do circuito;

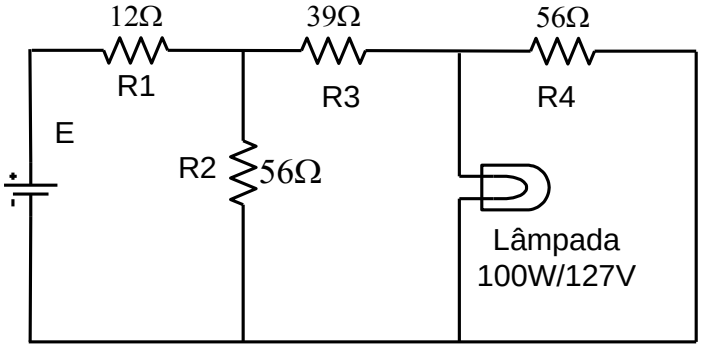


Resp: a) R2=1,8[kΩ]; R3=[3kΩ]; Req=6[kΩ]

Exercício 72: Um motor elétrico de corrente contínua, cuja potência é 2500W e a tensão 220V, está funcionando de acordo com suas características nominais há 7,5 horas. Determine o valor da corrente elétrica que circula através do motor e a energia elétrica consumida neste período.

Resp: I=11,36[A]; Energia=18,75[kW]

Exercício 73: Qual deve ser a tensão da fonte para que a lâmpada do circuito abaixo funcione de acordo com seus valores nominais?

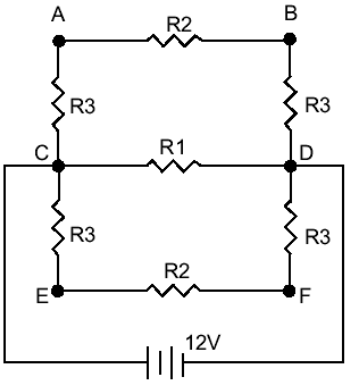


Resp: E=335,57 [V]

Texto retirado de: Introdução à Análise de Circuitos – 10ª. Edição – Robert L. Boylestad

Exercício 74: Um dispositivo muito útil nos carros modernos é o desembaçador de vidro traseiro. Ele é composto por condutores pintados sobre o vidro, usando tinta resistiva. A figura abaixo mostra o desenho do vidro traseiro com as dimensões da rede e, ao lado, o circuito equivalente. Ignore a resistência da fiação que liga a bateria aos pontos C e D. Para cumprir uma exigência do projeto, é necessário que os segmentos AB , CD , EF , CA , CE , DB , DF dissipem a mesma potência por unidade de comprimento. Considerando essa dissipação igual a 1 W/cm, calcule:

a) o valor do resistor R1; *Resp: 1,44[Ω]*
b) os valores dos resistores R2 e R3; *Resp: 0,64[Ω]*
c) a resistência equivalente entre os pontos C e D. *Resp: 0,36[Ω]*



(MEC - Exame Nacional de Cursos – 2003)

Exercício 30: Um chuveiro elétrico de uma residência alimentada com tensão de 220 V opera em duas posições: *inverno* (4.400 W) e *verão* (2.200 W). Considere que a carga desse chuveiro elétrico seja representada por uma resistência pura. Sabendo que a potência em uma carga é igual ao produto da tensão pela corrente ($P = V \times I$), que a relação entre tensão e corrente em uma carga resistiva é igual ao próprio valor da resistência ($R = V/I$) e que a energia em uma carga de potência constante é dada pelo produto da potência pelo tempo ($E = P \times t$), assinale a alternativa abaixo que é verdadeira. (1,0 ponto)

(A) é adequado o uso de um disjuntor de 15 A para proteger o circuito desse chuveiro;
(B) a resistência do chuveiro na posição *inverno* é maior que a resistência na posição *verão*;
(C) a quantidade de energia gasta em um banho de 10 minutos independe da posição da chave do chuveiro: *inverno* ou *verão*;
(D) a potência do chuveiro na posição *inverno,* se ele fosse instalado em uma residência alimentada em 110V, seria de 1.100 W;
(E) a potência independe do valor da resistência, visto que é dada pelo produto da tensão pela corrente.

Resp: letra D

(MEC - ENADE – 2008)

Texto retirado de: Introdução à Análise de Circuitos – 10ª. Edição – Robert L. Boylestad

PROBLEMAS

SEÇÃO 3.2 Resistência: Fios Circulares

1. Converta para mils:
   a. 0,5 polegada
   b. 0,01 polegada
   c. 0,004 polegada
   d. 1 polegada
   e. 0,02 pé
   f. 0,01 cm
2. Calcule a área em mils circulares (CM) de fios com os seguintes diâmetros:
   a. 0,050 polegada
   b. 0,016 polegada
   c. 0,30 polegada
   d. 0,1 cm
   e. 0,003 pé
   f. 0,0042 m
3. A área em mils circulares é
   a. 1600 CM
   b. 900 CM
   c. 40.000 CM
   d. 625 CM
   e. 7,75 CM
   f. 81 CM
   Qual o diâmetro de cada fio, em polegadas?
4. Qual a resistência de um fio de cobre de 200 pés de comprimento e 0,01 polegada de diâmetro ($T = 20$ °C)?
5. Encontre a resistência de um fio de cobre com 50 jardas de comprimento e 0,0045 polegada de diâmetro ($T = 20$ °C).
6. a. Qual a área em mils circulares de um condutor de alumínio com 80 pés de comprimento e resistência de 2,5 Ω?
   b. Qual o seu diâmetro em polegadas?
7. Pretende-se fabricar um resistor de 2,2 Ω com fio de nicromo. Se o fio disponível tem 1/32 polegada de diâmetro, qual o comprimento de fio necessário?
8. a. Qual a área em mils circulares de um fio de cobre que possui resistência 2,5 Ω e tem 300 pés de comprimento ($T = 20$ °C)?
   b. Sem realizar nenhum cálculo, determine se a área de um fio de alumínio será maior ou menor que a do fio de cobre. Explique.
   c. Repita (b) para um fio de prata.
9. Na Fig. 3.42 são mostradas três peças feitas de diferentes materiais.
   a. Sem realizar nenhum cálculo, determine qual das três peças deverá ter maior resistência. Explique como chegou a essa conclusão.
   b. Calcule a resistência de cada peça e compare com o resultado de (a) ($T = 20$ °C).

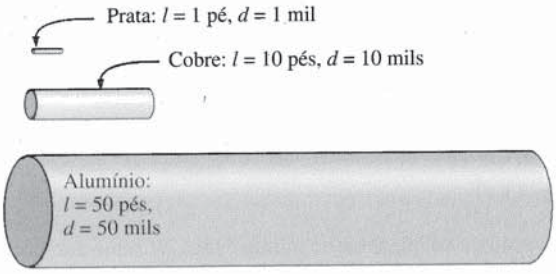


Fig. 3.42 *Problema 9.*

10. Um fio de 1000 pés de comprimento tem uma resistência de 0,5 kΩ e uma área de 94 CM. De que material é feito o fio ($T = 20$ °C)?
*11. a. Qual a resistência de uma barra de cobre com as dimensões mostradas na Fig. 3.43 ($T = 20$ °C)?
   b. Repita (a) para o alumínio e compare os resultados.
   c. Sem realizar nenhum cálculo, determine se a resistência da barra (de alumínio ou cobre) irá aumentar ou diminuir com o aumento em seu comprimento. Explique sua resposta.
   d. Repita (c) para um aumento da seção reta.

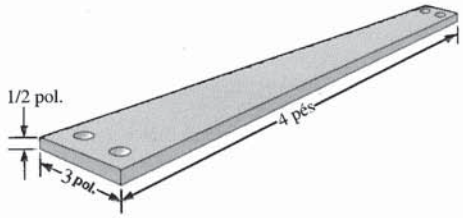


Fig. 3.43 *Problema 11.*

12. Determine a resistência de um condutor de cobre se a sua seção reta é reduzida por um fator 4 e seu comprimento é duplicado. A resistência original era 0,2 Ω. A temperatura permanece constante.
*13. Qual o novo valor de resistência de um fio de cobre se seu comprimento aumenta de 200 pés para 100 jardas, a área muda de 40.000 CM para 0,04 pé² e a resistência original era 518,5 mΩ?

SEÇÃO 3.3 Tabelas de Fios

14. a. Usando a Tabela 3.2, encontre a resistência de 450 pés dos fios #11 e #14 AWG.
   b. Compare as resistências dos dois fios.
   c. Compare as seções retas dos dois fios.
15. a. Usando a Tabela 3.2, encontre a resistência de 1800 pés dos fios #8 e #18 AWG.
   b. Compare as resistências dos dois fios.
   c. Compare as seções retas dos dois fios.
16. a. Para o sistema da Fig. 3.44, a resistência de cada linha não pode exceder 0,006 Ω e a corrente máxima consumida pelo receptor é 110 A. Que fio (AWG) deve ser usado?
   b. Repita o item (a) para uma resistência máxima de 0,003 Ω, d = 30 pés e uma corrente máxima de 110 A.

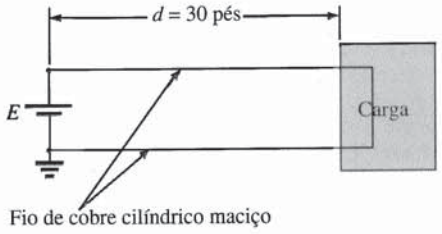


Fig. 3.44 *Problema 16.*

*17. a. A partir da Tabela 3.2, determine a corrente máxima permitida (A/CM) para um fio #0000 AWG.
   b. Converta o resultado do item (a) para A/polegada².
   c. Usando o resultado do item (b), determine a seção reta necessária para transportar uma corrente de 5000 A.

SEÇÃO 3.4 Resistência: Unidades Métricas

18. Usando unidades métricas, determine o comprimento de um fio de cobre que possui resistência 0,2 Ω e diâmetro 1/10 polegada.
19. Repita o Problema 11 usando unidades métricas; em outras palavras, converta as dimensões fornecidas para unidades métricas antes de determinar a resistência.
20. Se a resistência de uma amostra de óxido de estanho é 100 Ω, qual a espessura da camada de óxido?
21. Determine a largura de um resistor de carbono com uma resistência laminar igual a 150 Ω, se seu comprimento é 1/2 polegada e sua resistência é 500 Ω.

*22. Deduza o fator de conversão entre ρ(CM·Ω/pé) e ρ(Ω·cm)
   a. Obtendo o valor de ρ para o fio da Fig. 3.45 em CM·Ω/pé.
   b. Obtendo o valor de ρ para o mesmo fio em Ω·cm, depois de fazer as conversões necessárias.
   c. Usando a equação $\rho_2 = k\rho_1$ para determinar o fator de conversão k se ρ_1 é a solução da parte (a) e ρ_2 é a solução da parte (b).

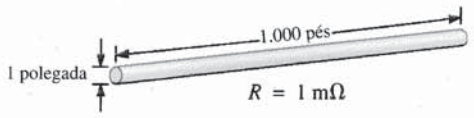


Fig. 3.45 *Problema 22.*

SEÇÃO 3.5 Efeitos de Temperatura

23. A resistência de um fio de cobre é 2 Ω a 10 °C. Qual a sua resistência a 60 °C?
24. A resistência de uma barra de alumínio é 0,02 Ω a 0 °C. Qual a sua resistência a 100 °C?
25. A resistência de um fio de cobre é 4 Ω a 70 °F. Qual sua resistência a 32 °F?
26. A resistência de fio de cobre é 0,76 Ω a 30 °C. Qual sua resistência a −40 °C?
27. Se a resistência de um fio de cobre é 0,04 Ω a −30 °C, qual sua resistência a 0 °C?
*28. a. A resistência de um fio de cobre é 0,002 Ω à temperatura ambiente (68 °F). Qual a sua resistência a 32 °F (ponto de solidificação da água) e a 212 °F (ponto de ebulição da água)?
   b. Utilizando os dados do item (a), determine a variação da resistência para cada variação de 10° na temperatura, no intervalo entre a temperatura ambiente e 212 °F.
29. a. A resistência de um fio de cobre é 0,92 Ω a 4 °C. Em que temperatura (°C) ela será de 1,06 Ω?
   b. Em que temperatura ela será de 0,15 Ω?
*30. a. Se a resistência de 1000 pés de um fio de cobre é 10 Ω à temperatura ambiente (20 °C), qual será sua resistência a 50 K (Kelvins)? Utilize a Eq. 3.6.
   b. Repita o item (a) para uma temperatura de 38,65 K. Comente os resultados obtidos observando a curva da Fig. 3.14.
   c. Qual é a temperatura do zero absoluto em graus Fahrenheit?
31. a. Confirme o valor de α_{20} para o cobre na Tabela 3.6 substituindo o valor da temperatura absoluta inferida na Eq. 3.7.
   b. Usando a Eq. (3.8), encontre a temperatura na qual a resistência de um condutor de cobre será de 1 Ω, supondo que era de 0,8 Ω a 20 °C.
32. Usando a Eq. (3.8), encontre a resistência de um fio de cobre a 16 °C, sabendo que sua resistência a 20 °C é 0,4 Ω.
*33. Determine a resistência de uma mola de 1000 pés feita de fio de cobre #12 colocada no deserto à temperatura de 115 °F.
34. Um resistor de fio de 22 Ω possui um PPM de +200 para o intervalo de −10 °C a +75 °C. Determine sua resistência a 65 °C.
35. Determine o PPM do resistor de carbono de 10 Ω da Fig. 3.21 usando o valor de resistência determinado a 90 °C.

SEÇÃO 3.6 Supercondutores

36. Visite uma biblioteca e procure uma tabela com as temperaturas críticas de vários materiais. Encontre pelo menos cinco materiais cujas temperaturas críticas não foram mencionadas neste livro. Escolha alguns materiais com temperaturas críticas relativamente altas.
37. Encontre pelo menos um artigo sobre aplicações da supercondutividade no setor comercial e escreva um pequeno resumo, incluindo todos os fatos e números interessantes.
*38. Usando um valor de densidade de corrente de 1 MA/cm², necessário para fabricação de circuitos integrados, qual seria a corrente em um fio doméstico #12? Compare o resultado com o limite permitido da Tabela 3.2.
*39. Faça uma pesquisa sobre o detetor de campo magnético SQUID e descreva seu modo básico de operação, além de uma ou duas aplicações.

SEÇÃO 3.7 Tipos de Resistores

40. a. Qual a diferença aproximada entre as dimensões de um resistor de carbono de 1 W e outro de 2 W?
   b. Qual é, aproximadamente, a diferença entre as dimensões de um resistor de carbono de 1/2 W e outro de 2 W?
41. Se o resistor de 10 kΩ da Fig. 3.21 tem uma resistência de exatamente 10 kΩ à temperatura ambiente, qual a sua resistência aproximada a −30 °C e a 100 °C (ponto de ebulição da água)?
42. Repita o Problema 41 para uma temperatura de 120 °F.
43. Se a resistência entre os terminais externos de um potenciômetro linear é 10 kΩ, qual a resistência entre o contato deslizante (móvel) e um dos terminais externos, se a resistência entre o contato deslizante e o outro terminal externo é 3,5 kΩ?
44. Se o cursor de um potenciômetro linear se deslocou de um quarto do seu deslocamento máximo, qual a resistência entre o cursor e cada um dos terminais se a resistência total é 25 kΩ?
*45. Desenhe as conexões necessárias para estabelecer uma resistência de 4 kΩ entre o contato deslizante e um dos terminais externos de um potenciômetro de 10 kΩ, mantendo ao mesmo tempo zero ohms entre o outro terminal externo e o contato móvel.

SEÇÃO 3.8 Código de Cores e Valores dos Resistores

46. Determine os valores máximo e mínimo de resistência que os resistores com as faixas coloridas abaixo podem apresentar sem exceder a tolerância especificada pelo fabricante.

	1.ª faixa	2.ª faixa	3.ª faixa	4.ª faixa
a.	verde	azul	laranja	dourado
b.	vermelho	vermelho	marrom	prateado
c.	marrom	preto	preto	—

47. Encontre o código de cores para os seguintes resistores com tolerância de 10%:
   a. 220 Ω
   b. 4.700 Ω
   c. 68 kΩ
   d. 9,1 MΩ
48. Há uma superposição entre resistores com 20% de tolerância? Para responder a esta pergunta, determine o intervalo de tolerância para um resistor de 10 Ω de 20% e um resistor de 20 Ω de 20% e verifique se os dois intervalos de tolerância se superpõem.
49. Repita o Problema 48 para resistores de 10% de tolerância com resistências de 10 Ω e 20 Ω.

SEÇÃO 3.9 Condutância

50. Encontre a condutância de cada um dos resistores abaixo:
   a. 0,086 Ω
   b. 4 kΩ
   c. 2,2 MΩ
51. Encontre a condutância de um fio #18 AWG cujo comprimento é 1000 pés, supondo que ele é feito de
   a. cobre
   b. alumínio
   c. ferro
*52. A condutância de um fio é 100 S. Se a seção reta do fio é aumentada em 2/3 e seu comprimento reduzido do mesmo fator, encontre a nova condutância do fio, sabendo que a temperatura permaneceu constante.

SEÇÃO 3.10 Medidores de Resistência

53. Como você pode verificar o estado de um fusível utilizando um medidor de resistência?
54. Como você pode determinar os estados de "ligado" e "desligado" de uma chave usando um medidor de resistência?
55. Como você pode usar um medidor de resistência para verificar o estado de uma lâmpada incandescente?

SEÇÃO 3.11 Termistores

*56. a. Determine a resistência de um termistor com as características da Fig. 3.36 a −50 °C, 50 °C e 200 °C. Note que a escala é logarítmica. Se necessário, consulte uma referência onde exista uma escala logarítmica expandida.
b. O termistor tem um coeficiente de temperatura positivo ou negativo?
c. O coeficiente é um valor fixo para o intervalo de −100 °C a 400 °C? Por quê?
d. Qual a taxa de variação aproximada de ρ com a temperatura a 100 °C?

SEÇÃO 3.12 Célula Fotocondutora

*57. a. Usando as características da Fig. 3.38, determine a resistência de uma célula fotocondutora a 10 e 100 pés-velas. Como no Problema 56, note que a escala é logarítmica.
b. A célula tem um coeficiente de iluminação positivo ou negativo?
c. O coeficiente tem um valor fixo para o intervalo de 0,1 a 1000 pés-velas? Por quê?
d. Qual a taxa de variação aproximada de R com a iluminação a 10 pés-velas?

SEÇÃO 3.13 Varistores

58. a. Observando a Fig. 3.40(a), determine a tensão entre os terminais do dispositivo para correntes de 0,5; 1; 3 e 5 mA.
b. Qual a variação total da tensão para o intervalo indicado de correntes?
c. Compare a razão entre os valores de corrente máxima e mínima acima com a razão correspondente dos valores de tensão.

GLOSSÁRIO

Célula fotocondutora Dispositivo semicondutor de dois terminais cuja resistência depende da intensidade da luz incidente em sua superfície exposta.

Código de Cores Sistema que utiliza faixas coloridas para indicar valores de resistência e tolerância dos resistores.

Coeficiente de temperatura da resistência negativo Valor que revela que a resistência do material irá diminuir com um aumento na temperatura.

Condutância (G) Uma indicação da facilidade com que uma corrente elétrica pode ser estabelecida em um material. É medida em siemens (S).

Coeficiente de temperatura da resistência positivo Valor que revela que a resistência do material irá aumentar com um aumento na temperatura.

Efeito Cooper O "emparelhamento" de elétrons enquanto se deslocam através de um meio.

Efeito Meissner Expulsão das linhas de campo magnético do interior de um material quando este se torna supercondutor.

Medidor de Resistência (Ohmímetro) Instrumento usado para medir valores de resistência.

Mil Circular (CM) A área da seção reta de um fio com um diâmetro de um mil.

Ohm (Ω) A unidade de medida de resistência.

Potenciômetro Dispositivo de três terminais através do qual podem ser variados os níveis de potencial de modo linear ou não-linear.

PPM/°C Sensibilidade à temperatura de um resistor em partes por milhão por graus Celsius.

Reostato Elemento cuja resistência entre os terminais pode ser variada de modo linear ou não-linear.

Resistência Uma medida da oposição à passagem de cargas elétricas através de um material.

Resistência laminar Definida por ρ/d, para filmes finos e projeto de circuitos integrados.

Resistividade (ρ) Constante de proporcionalidade entre a resistência de um material e suas dimensões físicas.

SQUID Dispositivo supercondutor de interferência quântica (*S*uperconducting *QU*antum *I*nterference *D*evice)

Supercondutor Condutor de carga elétrica que possui, para efeitos práticos, resistência zero.

Temperatura absoluta inferida Temperatura correspondente ao ponto em que uma aproximação linear para a curva de variação da resistência com a temperatura intercepta o eixo das temperaturas.

Termistor Dispositivo semicondutor de dois terminais cuja resistência é sensível à temperatura.

Varistor Resistor não-linear, com resistência dependente da tensão a ele aplicada, utilizado para suprimir transientes de alta tensão.

Zero absoluto Temperatura na qual não há vibração das moléculas: −273,15 °C.*

*Supondo válida a teoria cinética clássica. De acordo com a teoria quântica, aceita atualmente, mesmo a esta temperatura existem vibrações, chamadas *vibrações de ponto zero*. A existência destas vibrações causa efeitos mensuráveis. Ver, por exemplo, E. A. Power, *Introductory Quantum Electrodynamics*, Longmans, Londres, 1964, p. 31. (*N.T.*)

PROBLEMAS

SEÇÃO 4.1 A Lei de Ohm

1. Qual a queda de tensão entre os terminais de um resistor de 6 Ω se ele é percorrido por uma corrente de 2,5 A?
2. Qual a corrente em um resistor de 72 Ω se a ddp entre seus terminais é 12 V?
3. A tensão a ser aplicada aos terminais de um resistor é 6 V. Qual deve ser o valor da sua resistência se queremos limitar a corrente no circuito a 1,5 mA?
4. Qual a corrente solicitada pelo motor de arranque de um carro ao dar a partida? A fem da bateria é 12 V, e a resistência do motor de arranque é 0,056 Ω.
5. Se a corrente que percorre um resistor de 0,02 MΩ é 3,6 μA, qual a queda de tensão através desse resistor?
6. A leitura de um voltímetro é 62 V. Se a sua resistência interna vale 15 kΩ, calcule a corrente que o atravessa.
7. Um refrigerador operando em 120 V solicita 2,2 A. Qual o valor da sua resistência?
8. Um relógio elétrico está ligado a uma rede residencial de 120 V. Se a resistência interna é 7,5 kΩ, qual a corrente que percorre o relógio?
9. Uma máquina de lavar opera em 120 V e é percorrida por uma corrente de 4,2 A. Qual a sua resistência interna?
10. A corrente em um ferro de soldar é 0,76 A. Se a tensão aplicada é 120 V, qual a resistência do ferro?
11. A corrente de entrada em um transistor é 20 μA. Se a tensão aplicada na entrada é 24 mV, determine a resistência de entrada do transistor.
12. A resistência interna de um gerador de cc é 0,5 Ω. Determine a queda na tensão de saída se ele é percorrido por uma corrente de 15 A.

*13. a. Se um aquecedor elétrico, quando ligado a uma fonte de 120 V, é percorrido por uma corrente de 9,5 A, qual a sua resistência interna?
b. Utilizando as relações básicas do Cap. 2, calcule a quantidade de energia que é convertida em calor em uma hora.

SEÇÃO 4.2 Gráficos V-I

14. Trace as curvas características para um resistor de 100 Ω e um de 0,5 Ω, em um gráfico como o da Fig. 4.6. Se quiser, faça uma cópia da figura.
15. Faça um esboço da característica V-I para um componente cuja resistência interna vale 20 Ω entre 0 V e 10 V e 2 Ω para tensões mais elevadas. Utilize os eixos da Fig. 4.6. Se quiser, faça uma cópia da figura.
16. Trace as curvas características V-I de um resistor linear de 2 kΩ e de outro de 50 kΩ utilizando um gráfico como o da Fig. 4.6. A escala horizontal deve ir de 0 V a 20 V e o eixo vertical deve ser graduado em mA. Se quiser, faça uma cópia da figura.
17. Se a corrente que percorre um resistor sofrer uma variação de 400 mA, qual a variação na ddp entre seus terminais? A resistência do resistor é 2 kΩ.

*18. a. Utilizando os eixos da Fig. 4.10, faça um esboço da curva característica de um componente cuja resistência interna vale 500 Ω entre 0 V e 1 V, passando a valer 50 Ω entre 1 V e 2 V. Para tensões mais elevadas, o valor desta resistência é −20 Ω. O resultado é uma curva característica muito semelhante à do componente eletrônico conhecido como *diodo túnel*.
b. Utilizando a curva característica construída no item **a**, determine a corrente quando as tensões aplicadas forem 0,7 V, 1,5 V e 2,5 V.

SEÇÃO 4.3 Potência

19. Se um resistor dissipa 420 J em 7 min, qual a potência dissipada?
20. A potência dissipada por um componente é 40 watts. Quanto tempo será necessário para que sejam dissipados 640 J?

21. a. Quantos joules uma pequena lâmpada de 2 W dissipa em 8 h?
b. Qual o valor da energia calculada no item **a** em quilowatts-hora?
22. A taxa de escoamento de carga através de um resistor de 10 Ω é 300 coulombs por minuto. Qual a potência dissipada pelo resistor?
23. Durante quanto tempo um resistor deve ser percorrido por uma corrente estacionária de 2 A para que ele dissipe uma quantidade de energia igual a 12 J? A ddp entre os terminais do resistor é 3 V.
24. Qual a potência entregue por uma bateria de 6 V se a taxa de escoamento de cargas é 48 C/min?
25. A corrente que percorre um resistor de 4 Ω é 7 mA. Qual a potência dissipada pelo resistor?
26. A queda de tensão entre os terminais de um resistor de 3 Ω é 9 mV. Qual a potência dissipada pelo resistor?
27. Se a potência dissipada por um resistor de 4 Ω é 64 W, qual a corrente que atravessa o resistor?
28. A resistência de um resistor de 0,5 W é 1000 Ω. Qual a maior intensidade de corrente que pode percorrer este resistor com segurança?
29. Um resistor de 2,2 kΩ no interior de um aparelho de som estéreo dissipa 42 mW. Qual a ddp entre os terminais do resistor?
30. Uma bateria de corrente contínua pode fornecer 45 mA mantendo uma tensão de 9 V. Qual a potência gerada pela bateria?
31. Qual o valor da resistência de uma lâmpada de filamento de 100 W ligada a uma rede de 120 V quando ela está aquecida?
32. Uma lavadora automática solicita uma corrente de 3,75 A. Se a sua potência é 450 W, qual a sua resistência interna e a tensão em que opera?
33. Uma calculadora consome 0,4 mW quando está em pleno funcionamento. Sabendo-se que ela utiliza uma bateria interna de 3 V,
a. Qual a corrente solicitada pela calculadora?
b. Se a calculadora é projetada para operar 500 horas com a mesma bateria, qual é o número de ampères-horas desta bateria?
34. Um resistor de 20 kΩ foi projetado para dissipar 100 W. Qual a maior corrente que pode percorrê-lo e qual a maior ddp que pode ser aplicada aos seus terminais?

*35. a. Construa o gráfico da potência em função da corrente para um resistor de 100 Ω. Utilize uma escala de 0 a 1 W, com divisões de 0,1 W para a potência e uma escala de 0 a 100 mA com divisões de 10 mA.
b. A curva obtida é linear?
c. Utilizando o gráfico obtido, determine a corrente quando a potência dissipada for 500 mW.

*36. Uma televisão portátil em preto e branco alimentada por uma bateria de 9 V consome 0,455 A.
a. Qual a potência da televisão?
b. Qual a resistência interna da televisão?
c. Qual a quantidade de energia consumida durante 6 horas de operação?

*37. a. Se a rede de energia elétrica fornece a uma residência 120 V e 100 A, qual a maior potência que pode ser consumida pelo usuário?
b. Os moradores da casa podem operar ao mesmo tempo, dentro dos limites de segurança, os aparelhos a seguir?
Um motor de 5 hp
Uma secadora de roupas de 3000 W
Um fogão elétrico de 2400 W
Um ferro de passar roupas a vapor de 1000 W

SEÇÃO 4.5 Eficiência

38. Qual a eficiência de um motor com uma saída de 0,5 hp se a potência de entrada é 450 W?
39. A eficiência declarada pelo fabricante de uma serra elétrica é 68,5%. Se a potência necessária para cortar uma tábua é 1,8 hp, qual a corrente solicitada pela serra a uma fonte de 120 V?
40. Qual a eficiência do motor de uma secadora que entrega 1 hp quando a corrente e a tensão na entrada são 4 A e 220 V, respectivamente?

41. Um aparelho estéreo ligado a uma rede de 120 V solicita 2,4 A. Se a potência sonora de saída é 50 W,
    a. Quanta potência é perdida em forma de calor no interior do sistema?
    b. Qual a eficiência do sistema?
42. Um motor elétrico opera a 220 V com 87% de eficiência. Se a potência de saída é 3,6 hp, qual a corrente solicitada pelo motor?
43. Um motor é projetado para entregar 2 hp.
    a. Se a sua eficiência é 90% e a tensão aplicada é 110 V, quantos watts o motor consome da fonte de alimentação?
    b. Qual a corrente de entrada?
    c. Qual seria a corrente de entrada se a eficiência do motor fosse apenas 7%?
44. A eficiência de um motor elétrico que opera um elevador é 90%. Se a tensão na entrada é 220 V, qual a corrente solicitada pelo motor quando a potência entregue é 15 hp?
45. Uma correia transportadora é operada por um motor de 2 hp. Se a eficiência do motor é 87% enquanto a da correia, devido a deslizamentos, é 75%, qual a eficiência do sistema como um todo?
46. Se dois sistemas em "cascata" têm cada um uma eficiência de 80%, qual a energia na saída, se a energia de entrada é 60 J?
47. A eficiência total de dois sistemas acoplados é 72%. Se a eficiência de um deles é 0,9, qual a eficiência percentual do outro?
*48. Se as potências totais de entrada e saída em dois sistemas em cascata são 400 W e 128 W, respectivamente, qual a eficiência de cada sistema se um deles tem o dobro da eficiência do outro?
49. a. Qual a eficiência total de um sistema formado por três subsistemas interligados cujas eficiências são 98%, 87% e 21%?
    b. Se o subsistema menos eficiente fosse substituído por outro com 90% de eficiência, qual seria o aumento percentual na eficiência total?
50. a. Efetue as seguintes conversões:
    1 Wh para joules
    1 kWh para joules
    b. Discuta, com base nos resultados no item (a), quando é mais apropriado usar cada uma destas unidades.

SEÇÃO 4.6 Energia

51. Um resistor de 10 Ω está ligado a uma bateria de 15 V.
    a. Quanta energia, em joules, ele dissipa em 1 min?
    b. Se o intervalo de tempo considerado for 2 min, a energia dissipada aumentará? E a potência dissipada?
52. Calcule a energia necessária em kWh para manter um motor de230 W funcionando 12 horas por semana durante 5 meses.
53. Durante quanto tempo um aquecedor de 1500 W deve ficar ligado para consumir 10 kWh de energia?
54. Qual o custo da utilização de um rádio de 30 W durante 3 horas, se a tarifa é de 8 centavos por kWh?
55. a. Um sistema elétrico converte 500 kWh em calor funcionando durante 10 horas. Qual a potência do sistema?
    b. Se a ddp na entrada do sistema é 208 V, qual a corrente fornecida pela fonte?
    c. Se a eficiência do sistema é 82%, quanta energia é perdida ou armazenada em 10 horas?
56. a. Se a tarifa de energia elétrica fosse 9 centavos por kWh, durante quanto tempo poderíamos manter ligada uma televisão de 250 W para gastar o equivalente a 1 real?
    b. Repita o cálculo do item anterior para o caso de um secadora de 4,8 kW.
    c. Compare os resultados dos itens (a) e (b) e comente a respeito do efeito da potência de um aparelho sobre o custo relativo de sua utilização.
57. Qual o custo total de utilização dos eletrodomésticos a seguir, supondo que o kWh custa 9 centavos:
    Aparelho de ar condicionado de 860 W durante 24 horas
    Secadora de 4800 W durante 30 min
    Máquina de lavar roupa de 400 W durante 1 hora
    Máquina de lavar louça de 1200 W durante 45 min
*58. Supondo uma tarifa de 9 centavos por kWh, qual o custo da utilização dos seguintes aparelhos:
    Som estéreo de 110 W durante 4 horas
    Projetor de 1200 W durante 20 min
    Gravador de áudio de 60 W durante 1,5 horas
    Televisor em cores de 150 W durante 3 horas e 45 minutos

SEÇÃO 4.8 Análise Computacional

PSpice (DOS)

59. Escreva um arquivo de entrada para um circuito como o da Fig. 4.26, com $E = 400$ mV e $R = 0{,}04$ MΩ. Use os comandos apropriados para gastar o mínimo possível de papel com o arquivo de saída.
60. Escreva um arquivo de entrada para um circuito como o da Fig. 4.26, invertendo a polaridade da bateria. Utilize $E = 0{,}02$ V e $R = 240$ Ω. Como no exercício anterior, utilize os comandos apropriados para reduzir ao mínimo a quantidade necessária de papel para imprimir o arquivo de saída.

PSpice (Windows)

61. Repita o Problema 59 utilizando o programa PSpice (Windows).
62. Repita o Problema 60 utilizando o programa PSpice (Windows).

Linguagens de Programação (C++, BASIC, PASCAL etc.)

63. Construa um programa que calcule o custo da utilização de cinco aparelhos diferentes durante intervalos de tempo variados, supondo uma tarifa de 9 centavos por quilowatt-hora.
64. Construa um programa que solicite como dados de entrada I, R e t e calcule V, P e W. Imprima os resultados com as unidades apropriadas.

GLOSSÁRIO

Arquivo de entrada Arquivo que contém as instruções para o computador que definem o sistema a ser analisado e as operações a serem efetuadas.

Arquivo de saída Arquivo que exibe os resultados da execução de um programa pelo computador.

Diodo Um dispositivo semicondutor que permite a passagem de corrente somente em um sentido quando opera entre certos limites especificados.

Disjuntor Dispositivo de proteção destinado a evitar que a corrente em um circuito exceda valores seguros. Quando um disjuntor desarma, pode ser colocado novamente em condições de operação através de uma tecla ou botão.

Eficiência (η) Razão entre as potências de saída e de entrada de um sistema. O seu conhecimento nos permite avaliar o desempenho do sistema como conversor de energia.

Energia (W) Grandeza cuja variação corresponde à realização de um trabalho. Sua unidade no SI é o joule (J), que é equivalente ao watt-segundo (Ws).

Fusível Componente descartável cuja única função é evitar que a corrente em um circuito exceda valores seguros.

hp (horsepower) Unidade de potência equivalente a 746 watts.

Lei de Ohm Lei que descreve o comportamento de certos materiais, chamados ôhmicos, afirmando que, para estes materiais, a resistên-

cia é independente do valor e da polaridade da tensão aplicada. Não confundir com a definição de resistência ($R = V/I$).

Medidor de potência Instrumento que determina o valor da potência dissipada por um elemento de um circuito através da medida da corrente que o percorre e da ddp entre os seus terminais.

Medidor de quilowatts-hora Instrumento destinado a medir o consumo residencial ou industrial de energia elétrica.

Potência Trabalho realizado ou energia consumida por unidade de tempo. Sua unidade no SI é o watt (W), que equivale a 1 joule/segundo (J/s).

PROBLEMAS

SEÇÃO 5.2 Circuitos em Série

1. Calcule a resistência total (ou equivalente) e a corrente I para cada um dos circuitos da Fig. 5.70.

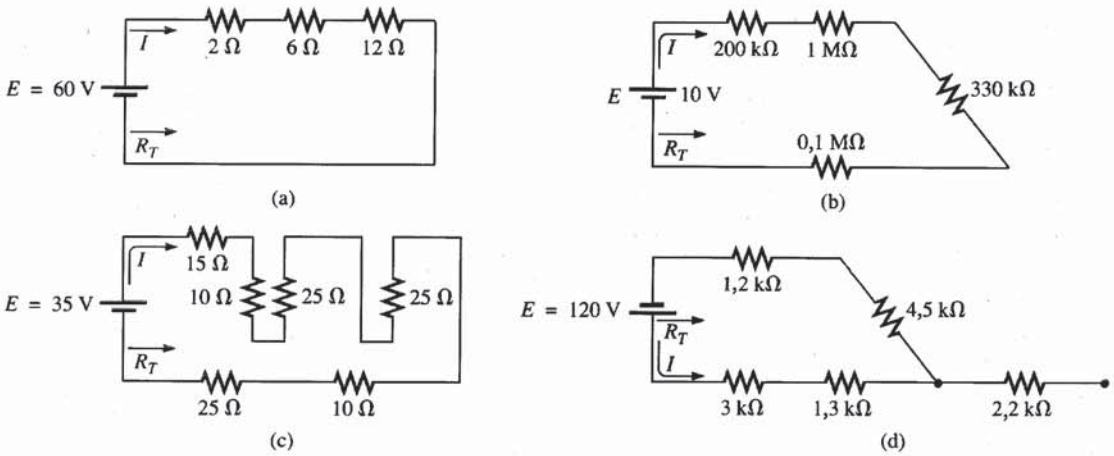


Fig. 5.70 *Problema 1.*

2. Nos circuitos que aparecem na Fig. 5.71 foi fornecido o valor da resistência total. Encontre, em cada um deles, a resistência desconhecida e a corrente I.

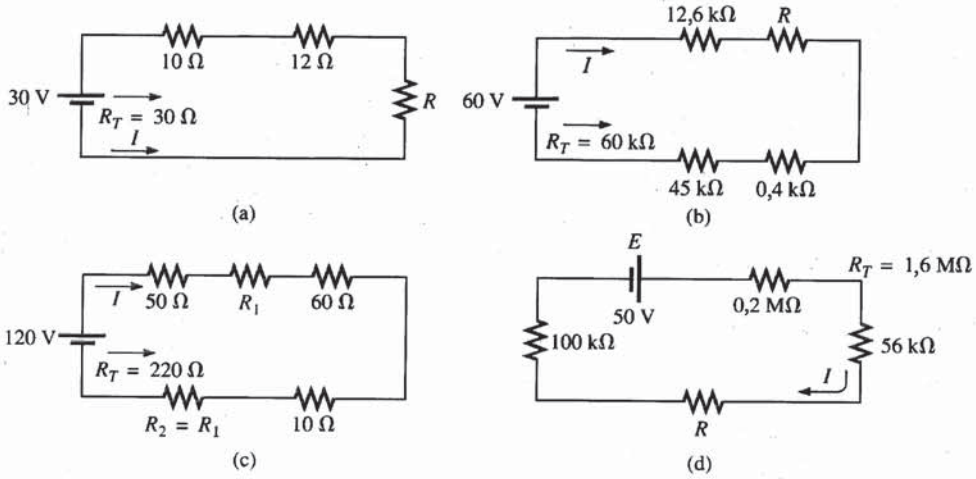


Fig. 5.71 *Problema 2.*

3. Calcule a tensão aplicada E necessária para que a corrente em cada um dos circuitos da Fig. 5.72 seja a indicada.

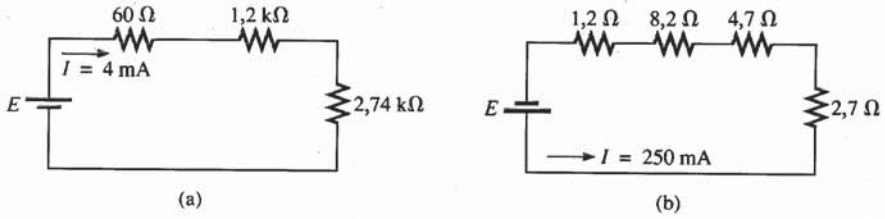


Fig. 5.72 *Problema 3.*

*4. Determine, em cada um dos circuitos que aparecem na Fig. 5.73, a corrente I, a tensão da fonte E, a resistência desconhecida e a ddp entre os terminais de cada elemento.

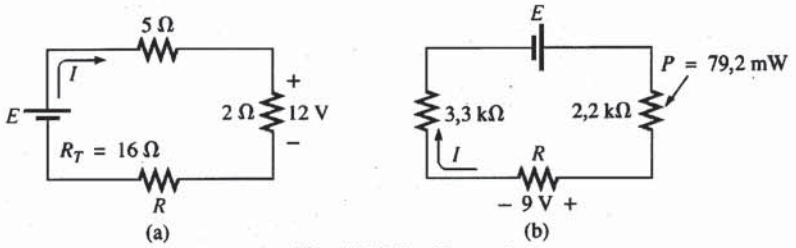


Fig. 5.73 *Problema 4.*

SEÇÃO 5.3 Fontes de Tensão em Série

5. Determine a intensidade e o sentido da corrente I nos dois circuitos da Fig. 5.74. Antes de calcular a corrente, modifique cada um dos circuitos, para que contenha somente uma bateria.

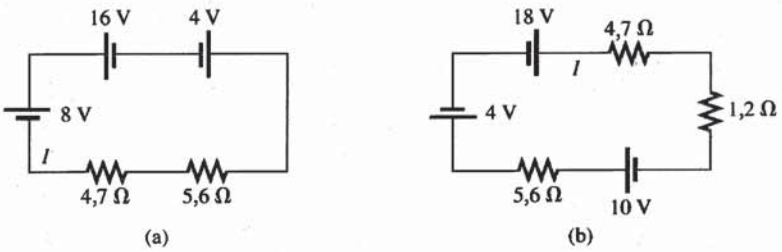


Fig. 5.74 *Problema 5.*

*6. Calcule a tensão E e a resistência R nos circuitos da Fig. 5.75. Indique o sentido da corrente resultante.

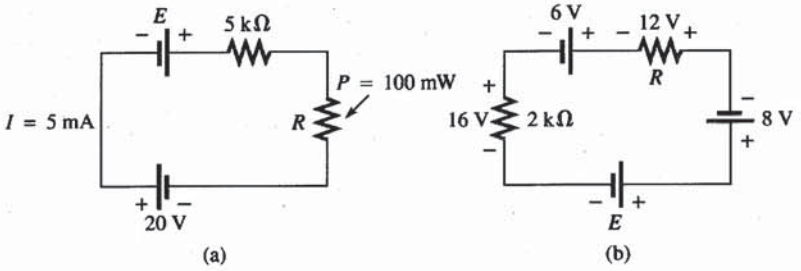


Fig. 5.75 *Problema 6.*

SEÇÃO 5.4 Lei de Kirchhoff para Tensões

7. Nos circuitos da Fig. 5.76, calcule o valor e a polaridade de V_{ab}. Cada uma das "caixas" pode conter uma carga, uma fonte de potência ou uma combinação das duas.

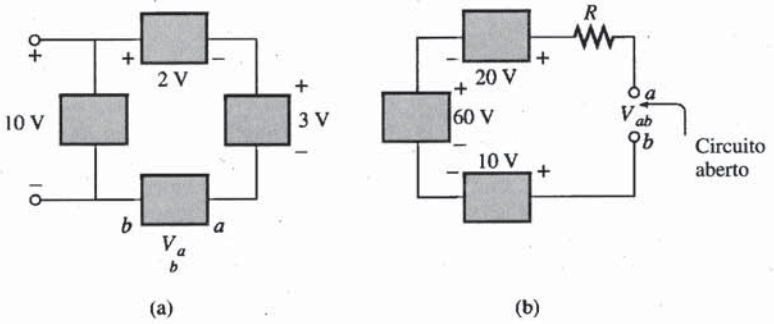


Fig. 5.76 *Problema 7.*

8. Embora os circuitos que aparecem na Fig. 5.77 não sejam circuitos em série, determine as tensões desconhecidas utilizando a lei de Kirchhoff para tensões.

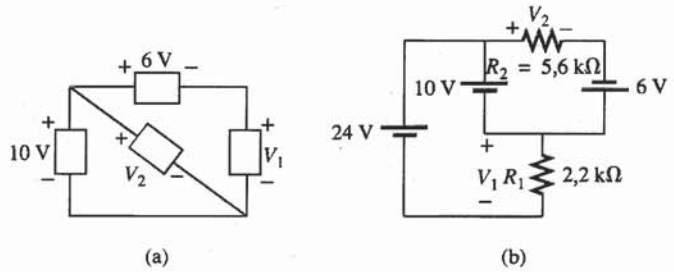


Fig. 5.77 *Problema 8.*

9. Calcule, no circuito da Fig. 5.78, a corrente I e a ddp V_1.

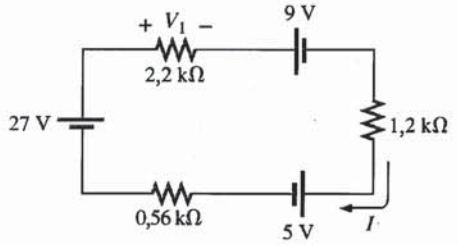


Fig. 5.78 *Problema 9.*

10. Para o circuito da Fig. 5.79:

a. Calcule a resistência total, a corrente e as quedas de tensão nos três resistores.

b. Verifique se os valores obtidos confirmam a lei de Kirchhoff para tensões.

c. Calcule a potência dissipada em cada resistor, verificando se a potência fornecida pela fonte é igual à potência total dissipada.

d. Se você dispuser de resistores de 1/2, 1 e 2 W, qual a menor especificação de potência que pode ser usada para os resistores deste circuito?

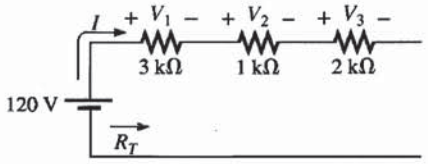


Fig. 5.79 *Problema 10.*

11. Repita os cálculos do Problema 10 para o circuito da Fig. 5.80.

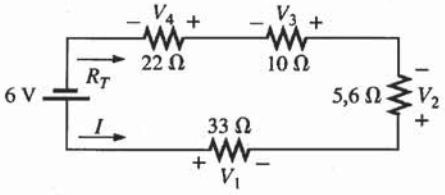


Fig. 5.80 *Problema 11.*

***12.** Utilizando as informações fornecidas, calcule as grandezas desconhecidas nos circuitos da Fig. 5.81.

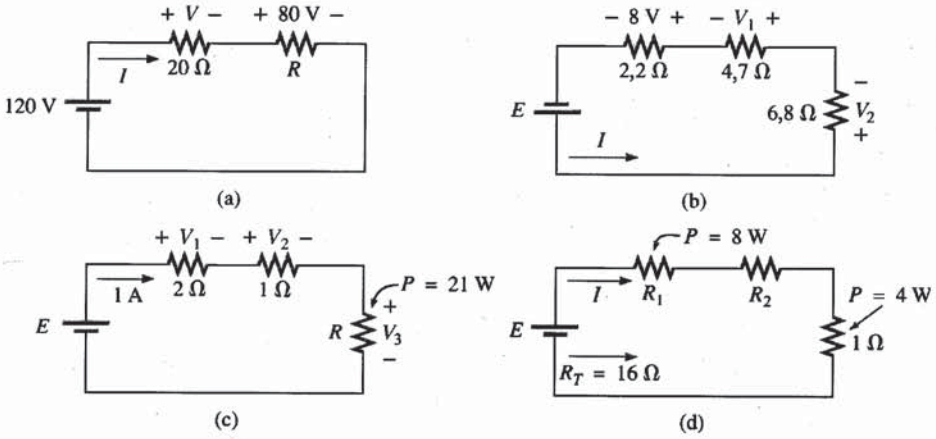


Fig. 5.81 *Problema 12.*

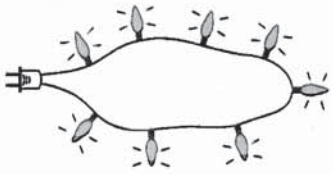


Fig. 5.82 *Problema 13.*

13. Oito lâmpadas para árvore de Natal são ligadas em série, como na Fig. 5.82.

a. Se o conjunto for ligado a uma fonte de 120 V, qual a corrente que percorrerá o circuito, sabendo-se que a resistência interna de cada lâmpada é 28 1/8 Ω?

b. Calcule a potência fornecida a cada lâmpada.

c. Calcule a ddp entre os terminais de cada lâmpada.

d. Se uma das lâmpadas queimar (ou seja, seu filamento se romper), o que acontecerá com as outras lâmpadas?

*14. Determine a resistência desconhecida no circuito da Fig. 5.83, de acordo com os dados fornecidos.

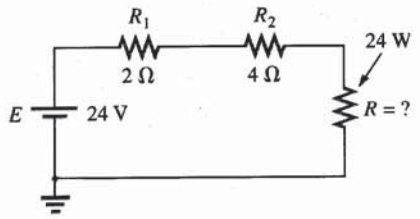


Fig. 5.83 *Problema 14.*

SEÇÃO 5.6 Regra do Divisor de Tensão

15. Utilizando a regra dos divisores de tensão, encontre V_{ab} (incluindo a polaridade) nos circuitos da Fig. 5.84.

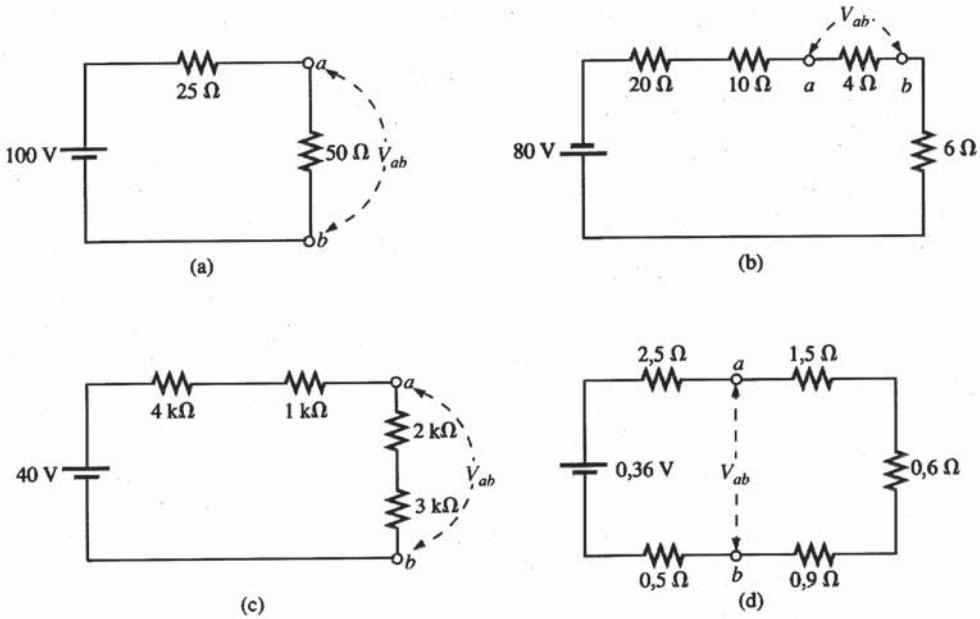


Fig. 5.84 *Problema 15.*

16. Considere os circuitos da Fig. 5.85. Encontre, em cada um deles, o valor da resistência desconhecida utilizando a regra dos divisores de tensão e os dados fornecidos.

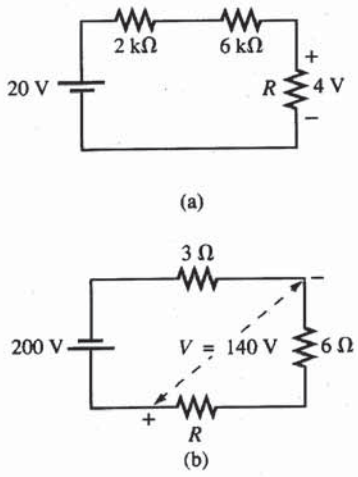


Fig. 5.85 *Problema 16.*

17. Com referência à Fig. 5.86:
   a. Calcule V_2 simplesmente observando que $R_2 = 3R_1$.
   b. Calcule V_1.

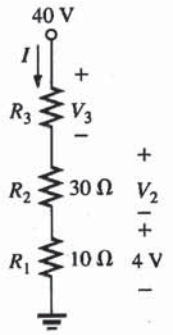


Fig. 5.86 *Problema 17.*

   c. Determine R_3 por inspeção, observando apenas os valores relativos de V_3 e V_2 ou V_1.
   d. Calcule a corrente I drenada pela fonte.
   e. Calcule a resistência R_3 utilizando a definição de resistência e compare com o resultado do item (c).

18. Utilizando as informações dadas na Fig. 5.87, calcule as resistências R_1 e R_3.

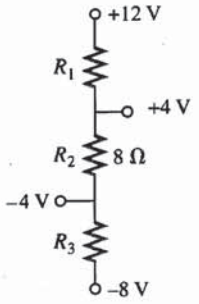


Fig. 5.87 *Problema 18.*

19. **a.** Projete um circuito divisor de tensão que torne possível a utilização de uma lâmpada de 8 V e 50 mA em um automóvel que utiliza uma bateria de 12 V.

b. Se estiverem à disposição resistores de 1/4 W, 1/2 W e 1 W, qual a menor especificação de potência que poderá ser usada?

20. Determine os valores de R_1, R_2, R_3 e R_4 para o divisor de tensão ilustrado na Fig. 5.88 se a corrente fornecida pela fonte é 16 mA.

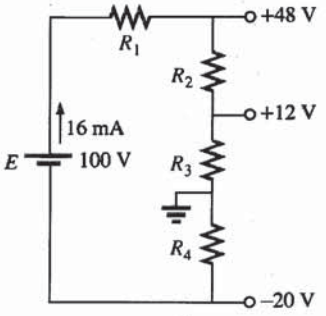


Fig. 5.88 *Problema 20.*

21. Complete o projeto do divisor de tensão da Fig. 5.89 de modo que $V_{R_1} = (1/5)V_{R_2}$ para $I = 4$ mA.

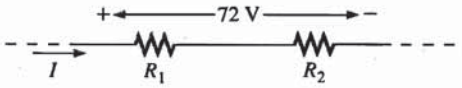


Fig. 5.89 *Problema 21.*

22. Calcule a ddp entre os terminais de cada resistor na Fig. 5.90 se $R_1 = 2R_3$ e $R_2 = 7R_3$.

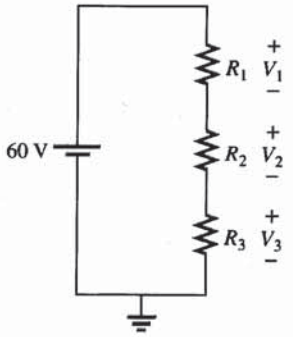


Fig. 5.90 *Problema 22.*

23. **a.** Calcule o valor das resistências no circuito da Fig. 5.91 sabendo que $V_{R_2} = 3V_{R_1}$ e $V_{R_3} = 4V_{R_2}$.

b. Se a corrente I fosse 10 μA, quais seriam os valores de R_1, R_2 e R_3? Compare com os resultados do item (a).

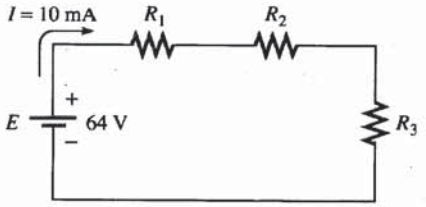


Fig. 5.91 *Problema 23.*

SEÇÃO 5.7 Notação

24. Nos circuitos ilustrados na Fig. 5.92, determine as tensões V_a, V_b e V_{ab}.

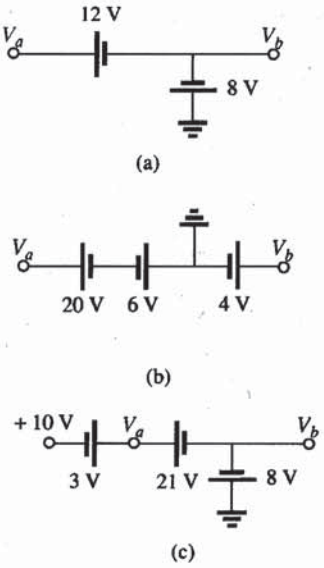


Fig. 5.92 *Problema 24.*

25. Determine o valor e o sentido da corrente I, assim como o valor e a polaridade da tensão V, nos circuitos da Fig. 5.93.

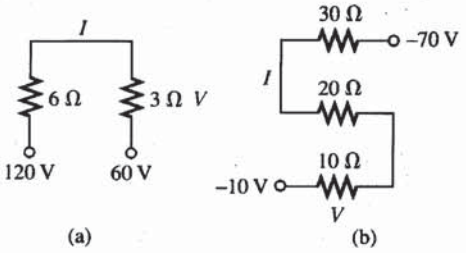


Fig. 5.93 *Problema 25.*

26. Determine as tensões V_a e V_1 para os circuitos da Fig. 5.94.

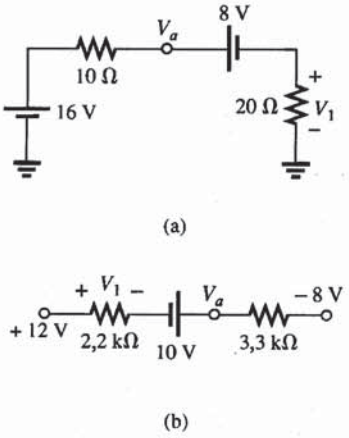


Fig. 5.94 *Problema 26.*

*27. No circuito da Fig. 5.95, determine as tensões:
a. V_a, V_b, V_c, V_d e V_e
b. V_{ab}, V_{dc}, V_{cb}
c. V_{ac}, V_{db}

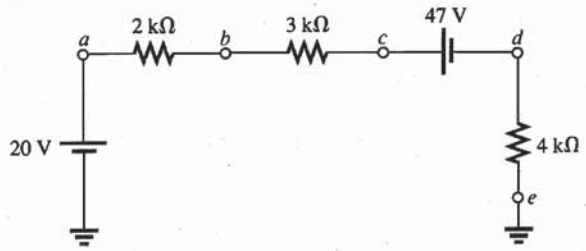


Fig. 5.95 *Problema 27.*

*28. No circuito da Fig. 5.96, determine as tensões:
a. V_a, V_b, V_c e V_d
b. V_{ab}, V_{cb}, V_{cd}
c. V_{ab} e V_{ca}

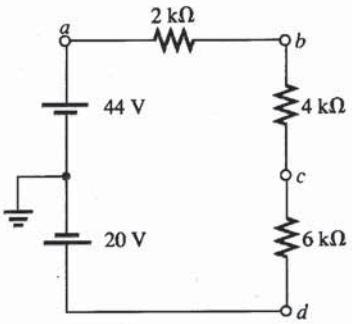


Fig. 5.96 *Problema 28.*

*29. Determine, no circuito integrado da Fig. 5.97, V_0, V_4, V_7, V_{10}, V_{20}, V_{30}, V_{67}, V_{56} e I (módulo e sentido).

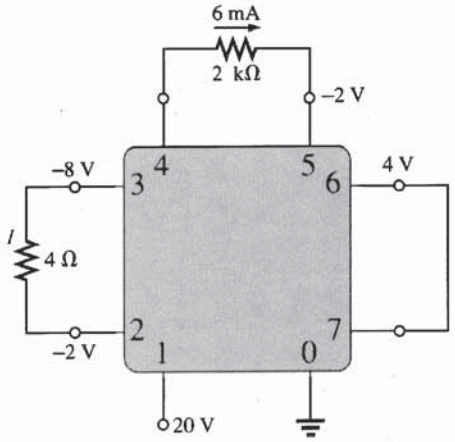


Fig. 5.97 *Problema 29.*

*30. No circuito integrado da Fig. 5.98, calcule V_0, V_{03}, V_2, V_{23}, V_{12} e I_i.

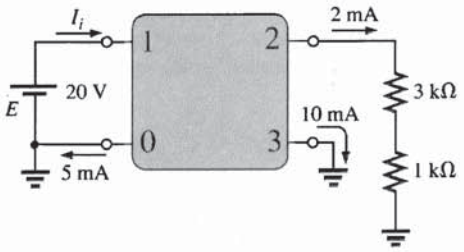


Fig. 5.98 *Problema 30.*

SEÇÃO 5.8 Resistência Interna de Fontes de Tensão

31. Calcule a resistência interna de uma bateria cuja tensão de saída, sem carga, é 60 V, sabendo que ela fornece uma corrente de 2 A quando conectada a uma carga de 28 Ω.
32. Ache a tensão V_C e a dissipação de potência na resistência interna no circuito da Fig. 5.99.
33. Calcule a resistência interna de uma bateria cuja tensão de saída sem carga é 6 V e que, quando ligada a uma resistência de 1/2 kΩ, fornece 10 mA de corrente.

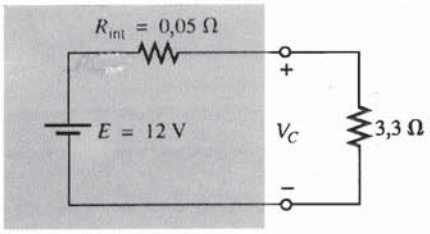


Fig. 5.99 *Problema 32.*

SEÇÃO 5.9 Regulação de Tensão

34. Determine a regulação de tensão para a bateria do Problema 31.
35. Calcule a regulação de tensão para a fonte da Fig. 5.99.

SEÇÃO 5.11 Análise Computacional

PSpice (DOS)

36. Escreva um arquivo de entrada para obter as tensões e a corrente no circuito da Fig. 5.79.
37. Escreva um arquivo de entrada para obter as tensões entre os terminais dos resistores da Fig. 5.96.

PSpice (Windows)

38. Utilizando um diagrama esquemático, calcule a corrente I e a tensão entre os terminais dos resistores do circuito da Fig. 5.70(a).
39. Utilizando um diagrama esquemático, calcule V_{ab} no circuito da Fig. 5.84(d).

Linguagens de Programação (C++, BASIC, PASCAL etc.)

40. Escreva um programa para calcular a resistência equivalente de um número qualquer de resistores em série.

41. Escreva um programa que aplique a regra dos divisores de tensão a um circuito com uma fonte e dois resistores em série. A regra deve ser aplicada a cada um dos resistores.
42. Escreva um programa que construa uma tabela para a corrente e a potência dissipada no resistor R_C do circuito na Fig. 5.100, com R_C variando de 1 Ω até 20 Ω. O programa deve também exibir o valor de R_C que torna máxima a potência dissipada neste resistor.

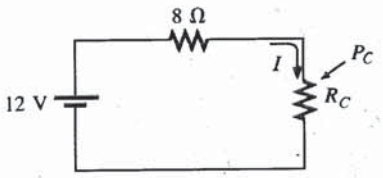


Fig. 5.100 *Problema 42.*

GLOSSÁRIO

Circuito Combinação de um certo número de componentes ligados entre si de modo que exista pelo menos um caminho fechado para a corrente.

Circuito em série Configuração na qual os componentes têm somente um ponto em comum e cada terminal não está ligado a um terceiro componente através do qual exista escoamento de cargas.

Lei de Kirchhoff para tensões A soma algébrica das quedas de tensão em uma malha fechada é nula.

Ramo Parte de um circuito constituída apenas por elementos em série.

Malha fechada Qualquer caminho contínuo que deixa um ponto em um sentido e retorna ao mesmo ponto vindo do sentido oposto, sem deixar o circuito.

Regra dos divisores de tensão Método através do qual podemos calcular as tensões em um circuito sem precisar obter primeiro a corrente.

Regulação de tensão (*RT*) Valor, normalmente expresso em forma de porcentagem, que indica a variação na tensão de saída de uma fonte causada por variações da carga.

Resistência interna Resistência inerente a qualquer fonte de energia elétrica.

Sentido convencional da corrente Sentido da corrente elétrica em um circuito, tomado por definição como o sentido contrário ao do movimento dos elétrons.

Sentido eletrônico Sentido do movimento dos elétrons em um circuito.

```
Chapter 6 - Two Parallel Resistors

****     CIRCUIT DESCRIPTION

******************************************************************************

VE 1 0 27V
R1 1 0 9
R2 1 0 18
.DC VE 20 30 1
.PRINT DC I(R1) I(R2)
.OPTIONS NOPAGE
.END
```

```
****     DC TRANSFER CURVES                    TEMPERATURE =   27.000 DEG C

 VE          I(R1)        I(R2)

  2.000E+01   2.222E+00   1.111E+00
  2.100E+01   2.333E+00   1.167E+00
  2.200E+01   2.444E+00   1.222E+00
  2.300E+01   2.556E+00   1.278E+00
  2.400E+01   2.667E+00   1.333E+00
  2.500E+01   2.778E+00   1.389E+00
  2.600E+01   2.889E+00   1.444E+00
  2.700E+01   3.000E+00   1.500E+00
  2.800E+01   3.111E+00   1.556E+00
  2.900E+01   3.222E+00   1.611E+00
  3.000E+01   3.333E+00   1.667E+00
```

Fig. 6.59 *Arquivos de entrada e de saída para o circuito da Fig. 6.57, com E variando de 20 a 30 V.*

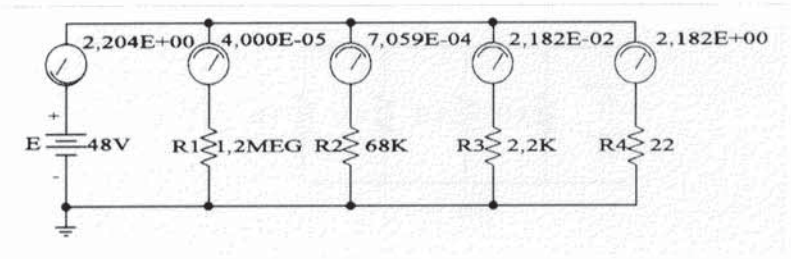


Fig. 6.60 *Aplicação do PSpice (Windows) a um circuito em paralelo com uma grande faixa de variação para os valores das resistências.*

notação de ponto flutuante podem acomodar números desde de 20 μA até 2,182 A. Além disso, note a rapidez com que a corrente aumenta quando a resistência diminui. A faixa de valores das resistências sugere, simplesmente por observação do circuito, que a resistência total terá um valor muito próximo ao da menor resistência (22 Ω). Como a corrente fornecida pela fonte é 2,204 A, a resistência equivalente será $R_T = E/I_F = 48$ V/2,204 A = 21,78 Ω, o que confirma a análise acima.

PROBLEMAS

SEÇÃO 6.2 Elementos em Paralelo

1. Para cada uma das configurações da Fig. 6.61, determine quais dos elementos estão em série e quais estão em paralelo.
2. Para o circuito da Fig. 6.62:
   a. Quais os elementos em paralelo?
   b. Quais os elementos em série?
   c. Quais os ramos em paralelo?

SEÇÃO 6.3 Condutância e Resistência Totais

3. Ache a condutância e a resistência totais para os circuitos da Fig. 6.63.
4. Na Fig. 6.64 especificamos os valores das condutâncias totais dos circuitos. Encontre as resistências desconhecidas.
5. Na Fig. 6.65 fornecemos a resistência total de cada circuito. Calcule os valores da resistência desconhecida.

*6. Calcule as resistências desconhecidas na Fig. 6.66, sabendo que $R_2 = 5R_1$ e $R_3 = R_3\ (1/2)R_1$.

*7. Determine o valor de R_1 no circuito da Fig. 6.67.

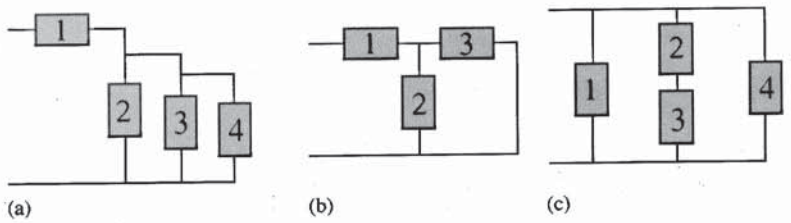


Fig. 6.61 *Problema 1.*

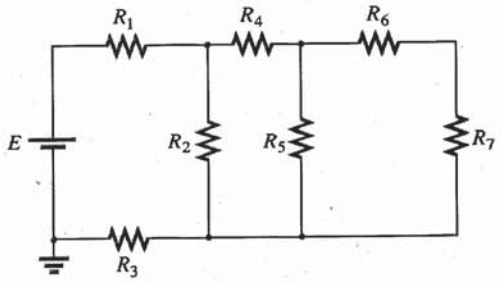


Fig. 6.62 *Problema 2.*

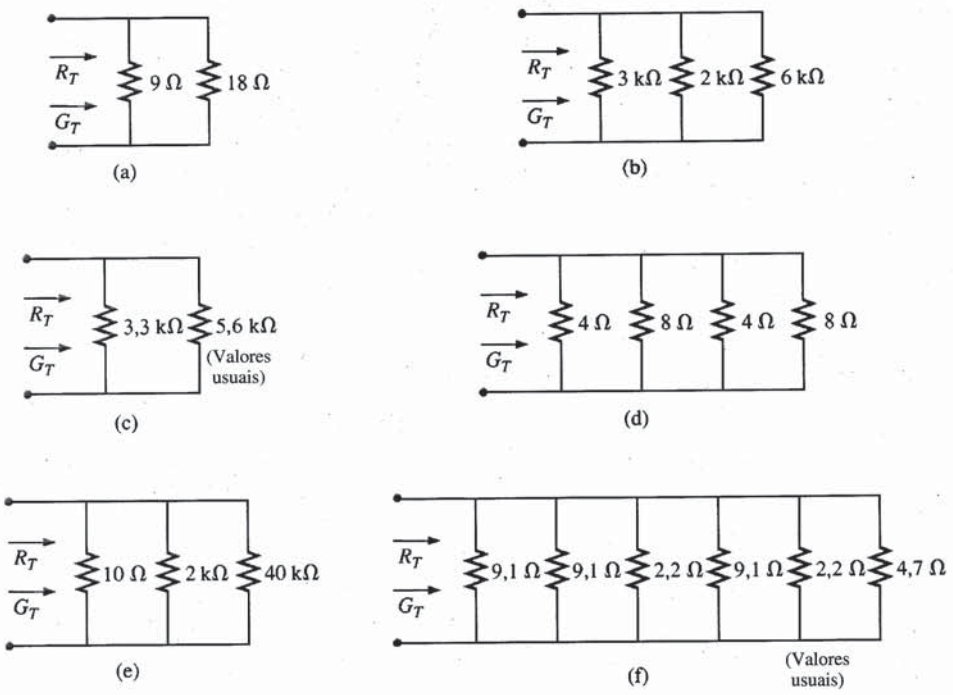


Fig. 6.63 *Problema 3.*

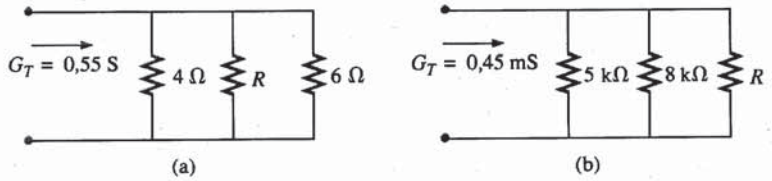


Fig. 6.64 *Problema 4.*

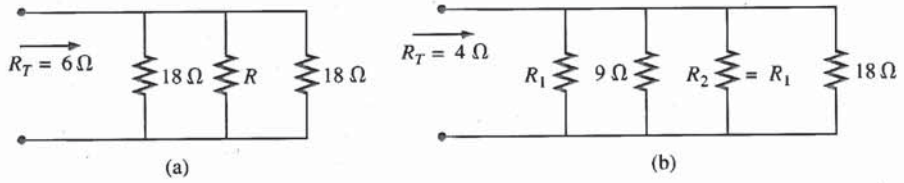


Fig. 6.65 *Problema 5.*

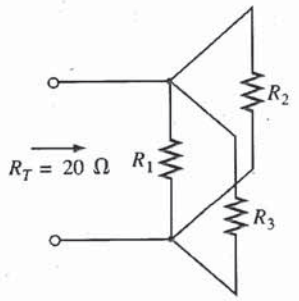


Fig. 6.66 *Problema 6.*

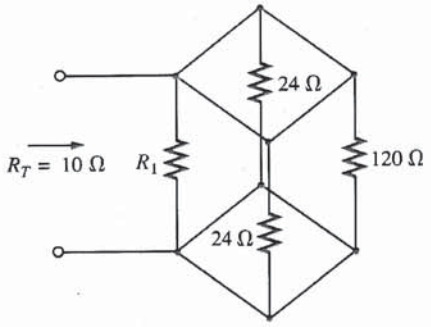


Fig. 6.67 *Problema 7.*

SEÇÃO 6.4 Circuitos em Paralelo

8. No circuito da Fig. 6.68:

a. Calcule a condutância e a resistência totais.

b. Determine I_F e a corrente em cada um dos ramos em paralelo.

c. Verifique que a soma das correntes nos ramos é igual à corrente entregue pela fonte.

d. Calcule a potência dissipada em cada resistor e verifique se a potência entregue pela fonte é igual à potência dissipada total.

e. Se você dispõe de resistores de 0,5 W, 1 W, 2 W e 50 W, que valor mínimo escolheria para cada resistor?

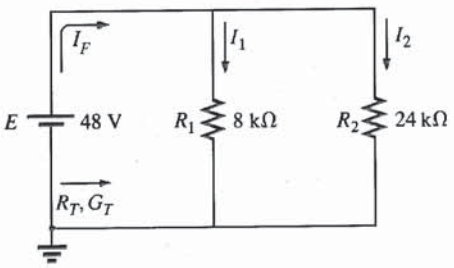


Fig. 6.68 *Problema 8.*

9. Repita o Problema 8 para o caso do circuito da Fig. 6.69.

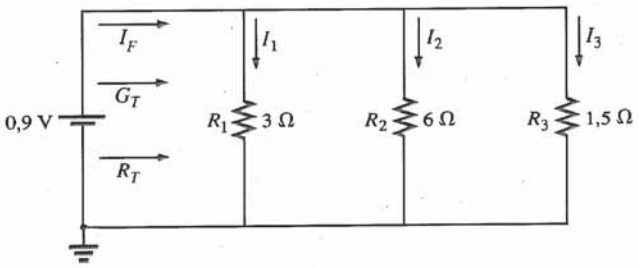


Fig. 6.69 *Problemas 9 e 37.*

10. Repita o Problema 8 para o circuito da Fig. 6.70, que foi construído utilizando valores usuais para as resistências.

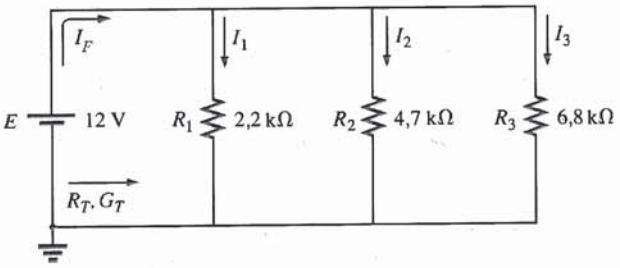


Fig. 6.70 *Problema 10.*

11. Um circuito de lâmpadas para árvore de Natal consiste em oito lâmpadas em paralelo, como vemos na Fig. 6.71.

Fig. 6.71 *Problema 11.*

a. Se o circuito for ligado a uma fonte de 120 V e a resistência de cada lâmpada for 1,8 kΩ, qual a corrente que percorre cada lâmpada?

b. Determine a resistência total do circuito.

c. Calcule a potência entregue a cada lâmpada.

d. Se uma das lâmpadas queimar, qual será o efeito sobre as outras lâmpadas?

e. Compare a configuração em paralelo da Fig. 6.71 com a configuração em série da Fig. 5.82. Quais as vantagens e desvantagens relativas da ligação em paralelo quando comparada com a ligação em série?

12. Na Fig. 6.72 vemos um trecho de um circuito residencial.

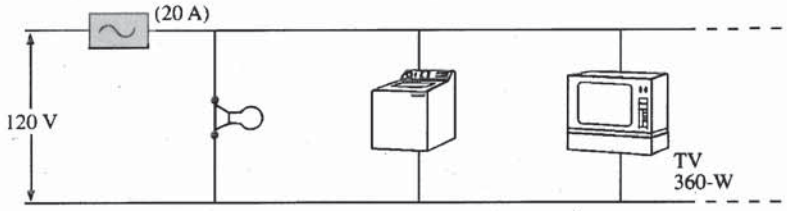


Fig. 6.72 *Problemas 12 e 39.*

a. Qual a corrente em cada um dos ramos em paralelo?
b. Qual a corrente total solicitada a partir da fonte? O disjuntor de 20 A abrirá?
c. Qual a resistência equivalente do sistema?
d. Determine a potência entregue pela fonte e compare-a com a potência total consumida pelas cargas.

13. Determine as correntes I_1 e I_F nos circuitos da Fig. 6.73.

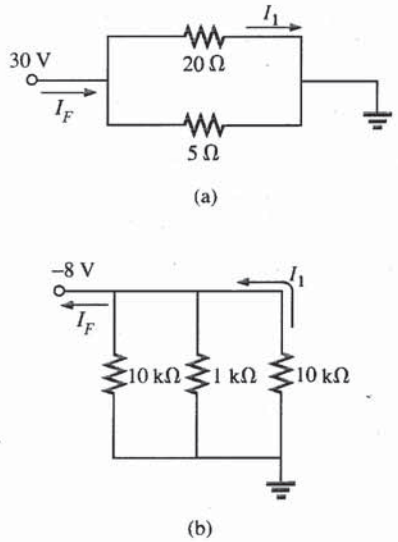


Fig. 6.73 *Problema 13.*

14. Determine o valor de R_1 no circuito da Fig. 6.74.

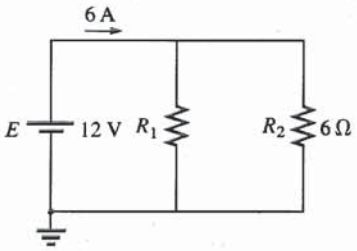


Fig. 6.74 *Problema 14.*

***15.** Determine a potência entregue pela fonte de corrente contínua na Fig. 6.75.

***16.** No circuito da Fig. 6.76:
a. Calcule I_1.
b. Calcule a potência dissipada no resistor de 4 Ω.
c. Calcule I_2.

***17.** Para o circuito da Fig. 6.77:
a. Calcule a corrente I.
b. Determine a voltagem V.
c. Calcule a corrente entregue pela fonte I_F.

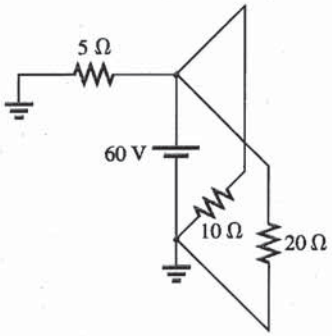


Fig. 6.75 *Problemas 15 e 38.*

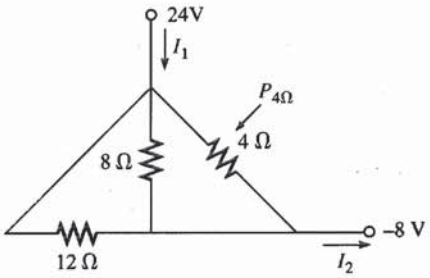


Fig. 6.76 *Problema 16.*

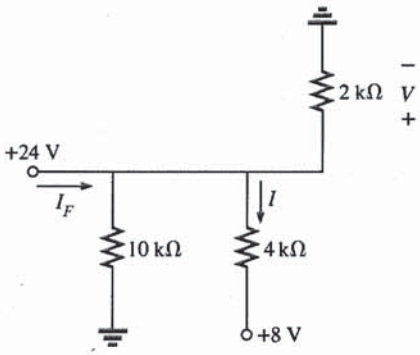


Fig. 6.77 *Problema 17.*

SEÇÃO 6.5 Lei de Kirchhoff para a Corrente

18. Calcule todas as correntes desconhecidas (módulo e sentido) nos circuitos da Fig. 6.78.

***19.** Utilizando a LKC, calcule as correntes desconhecidas no circuito da Fig. 6.79.

20. No circuito da Fig. 6.80, calcule as resistências R_1 e R_3, a resistência equivalente R_T e a tensão da fonte E.

***21.** Calcule as quantidades desconhecidas nos circuitos da Fig. 6.81.

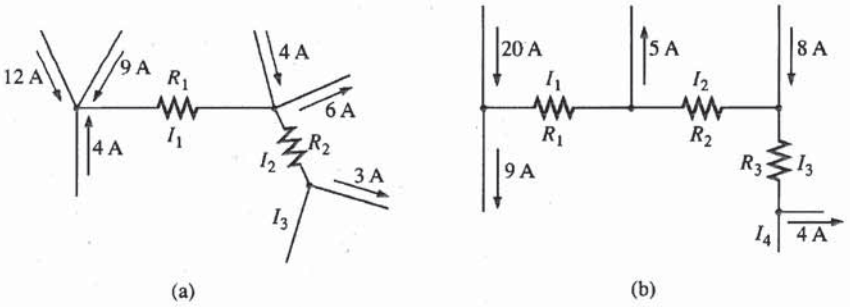


Fig. 6.78 *Problemas 18 e 40.*

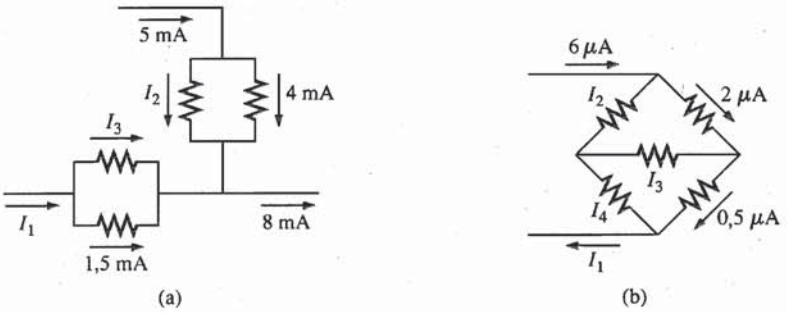


Fig. 6.79 *Problema 19.*

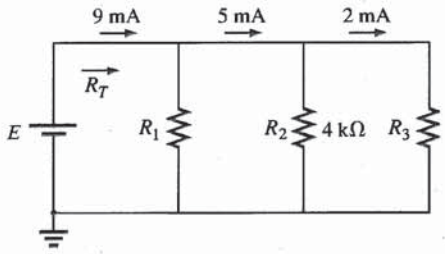


Fig. 6.80 *Problema 20.*

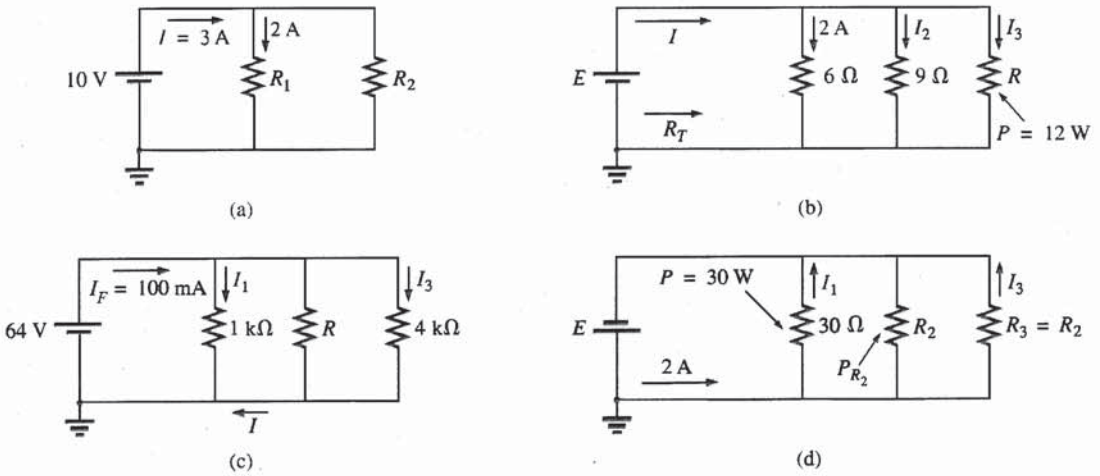


Fig. 6.81 *Problema 21.*

SEÇÃO 6.6 Regra do Divisor de Corrente

22. No circuito da Fig. 6.82, determine a corrente em cada ramo utilizando somente a razão entre os valores da resistência. Após isto, calcule a corrente total I_T.

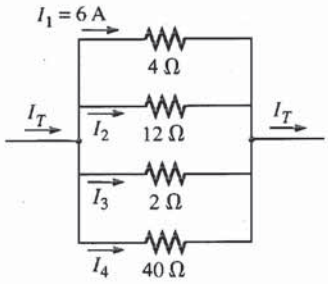


Fig. 6.82 *Problema 22.*

23. Utilizando a regra do divisor de corrente, calcule as correntes desconhecidas no circuito da Fig. 6.83.

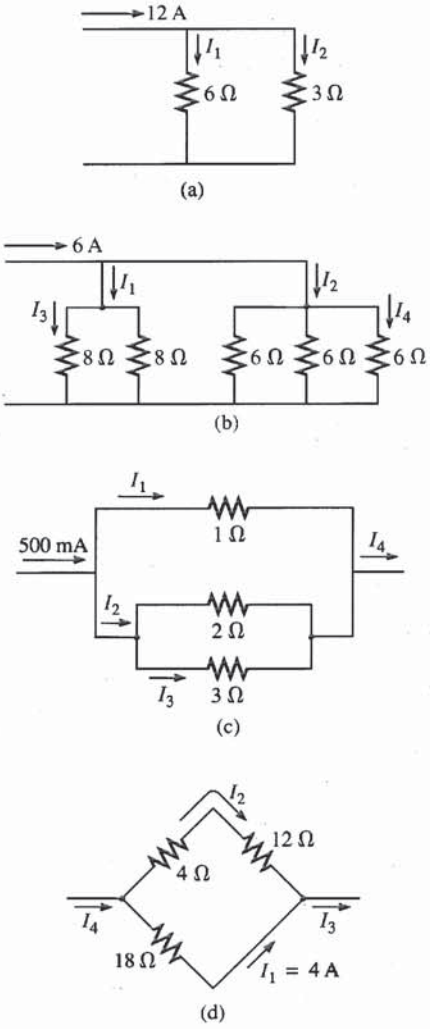


Fig. 6.83 *Problema 23.*

***24.** Os itens (a), (b) e (c) deste problema devem ser feitos mentalmente. O objetivo é obter uma solução sem efetuar uma longa série de cálculos. No circuito da Fig. 6.84:

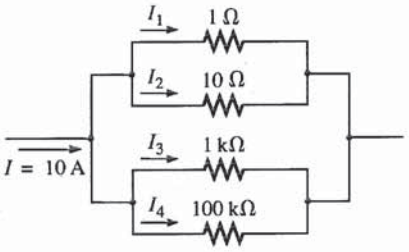


Fig. 6.84 *Problema 24.*

a. Qual o valor aproximado de I_1, levando em conta o valor das resistências?
b. Qual o valor das razões I_1/I_2 e I_3/I_4?
c. Qual o valor das razões I_2/I_3 e I_1/I_4?
d. Calcule I_1 e compare com o resultado do item (a).
e. Calcule I_4 e a razão I_1/I_4. Compare com o resultado do item (c).

25. Calcule as quantidades desconhecidas nos circuitos da Fig. 6.85.

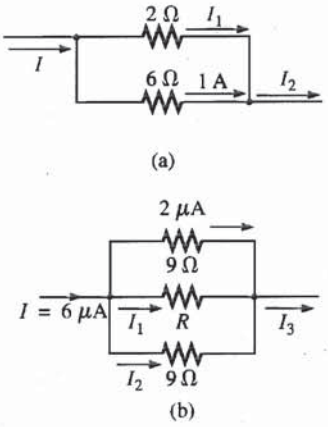


Fig. 6.85 *Problema 25.*

***26.** Calcule o valor da resistência R no circuito da Fig. 6.86, tal que $I_1 = 3I_2$.

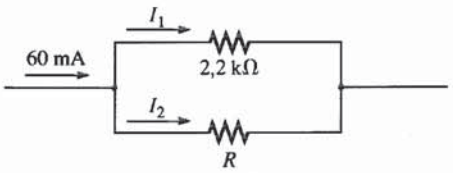


Fig. 6.86 *Problema 26.*

***27.** Calcule as quantidades desconhecidas na Fig. 6.87 sabendo que $I_2 = 4I_1$ e $I_3 = 3I_2$.

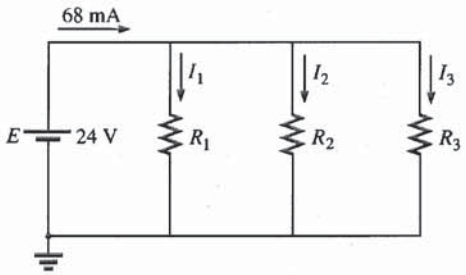


Fig. 6.87 *Problema 27.*

SEÇÃO 6.7 Fontes de Tensão em Paralelo

28. Supondo as fontes idênticas, determine I_1 e I_2 no circuito da Fig. 6.88.

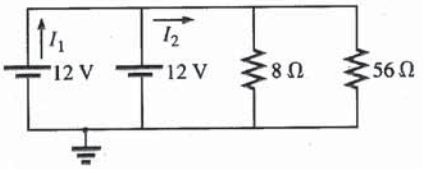


Fig. 6.88 *Problema 28.*

29. Determine I e R no circuito da Fig. 6.89, supondo as fontes idênticas.

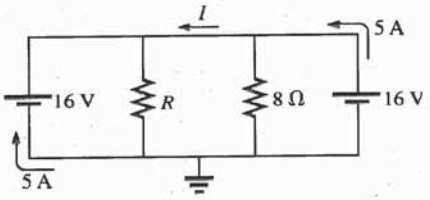


Fig. 6.89 *Problema 29.*

SEÇÃO 6.8 Circuitos Abertos e Curtos-Circuitos

30. No circuito da Fig. 6.90:
- **a.** Determine I_F e V_L.
- **b.** Determine I_F se R_L for "curto-circuitado".
- **c.** Determine V_L se R_L for substituído por um circuito aberto.

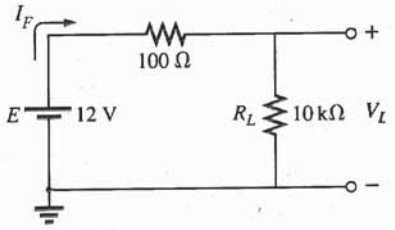


Fig. 6.90 *Problema 30.*

31. No circuito da Fig. 6.91:
- **a.** Qual a tensão no circuito aberto V_L?
- **b.** Se o resistor de 2,2 kΩ é substituído por um curto, qual o novo valor de V_L?
- **c.** Se o circuito for aberto no resistor de 4,7 kΩ, qual o novo valor de V_L?

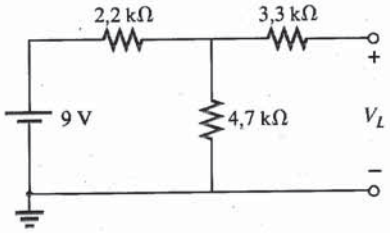


Fig. 6.91 *Problema 31.*

***32.** No circuito da Fig. 6.92, determine:
- **a.** As correntes de curto-circuito I_1 e I_2.
- **b.** As tensões V_1 e V_2.
- **c.** A corrente da fonte I_F.

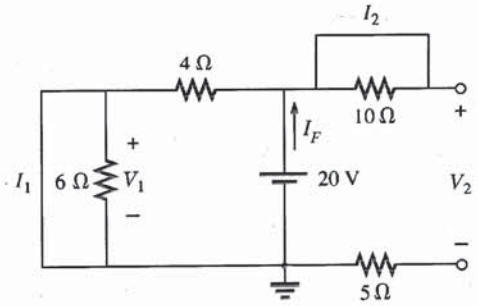


Fig. 6.92 *Problema 32.*

SEÇÃO 6.9 Efeito da Ligação de um Voltímetro

33. No circuito da Fig. 6.93:
- **a.** Determine V_2.
- **b.** Qual a leitura de um MMD de resistência interna 11 MΩ, se o utilizarmos para medir V_2?
- **c.** Repita o item (b), supondo agora um medidor analógico na escala de 10 V, sendo a sua razão Ω/V = 20.000. Compare o resultado com o do item (b). Qual a razão da diferença?
- **d.** Repita o item (c) com R_1 = 100 kΩ e R_2 = 200 kΩ.
- **e.** Que conclusões, com base nos resultados acima, você obtém acerca do uso de um voltímetro?

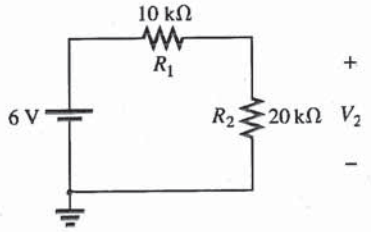


Fig. 6.93 *Problemas 33 e 42.*

SEÇÃO 6.10 Técnicas para Pesquisar Defeitos

34. Com base nos dados da Fig. 6.94, diga se o circuito está operando corretamente. Em caso negativo, tente descobrir por quê.

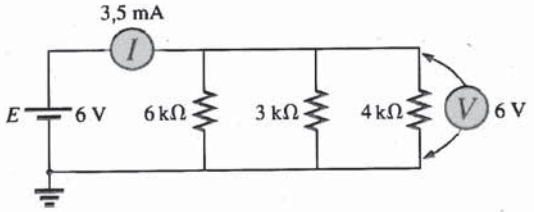


Fig. 6.94 *Problema 34.*

35. No circuito da Fig. 6.95, a leitura V_a = 8,8 V está correta? Em caso negativo, qual dos componentes está conectado de modo incorreto?

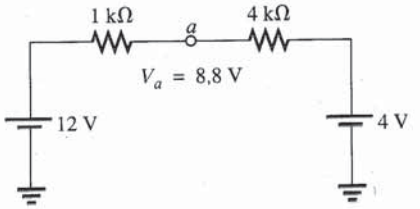


Fig. 6.95 *Problema 35.*

36. **a.** A tensão V_a no circuito da Fig. 6.96 é **−1 V**. Se ela passar subitamente para 20 V, o que pode ter acontecido ao circuito? Localize a área onde está o problema.

b. Se V_a for 6 V em vez de −1 V, tente explicar o que está errado com o circuito.

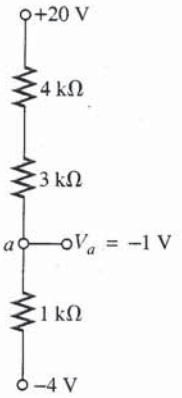


Fig. 6.96 *Problema 36.*

SEÇÃO 6.11 Análise Computacional

PSpice (DOS)

37. Escreva um arquivo de entrada para calcular a corrente através de cada resistor da Fig. 6.69.

38. Escreva um arquivo de entrada para calcular a corrente fornecida pela fonte e a corrente em cada resistor da Fig. 6.75.

PSpice (Windows)

39. Utilizando um esquema, calcule todas as correntes no circuito da Fig. 6.72.

40. Utilizando um esquema, calcule as quantidades desconhecidas na Fig. 6.78.

Linguagens de Programação (C++, BASIC, PASCAL etc.)

41. Escreva um programa que calcule a resistência e a condutância totais de qualquer número de elementos em paralelo.

42. Escreva um programa que faça uma tabela da tensão V_2 na Fig. 6.93, medida por um medidor analógico de resistência interna 200 kΩ, à medida que R_2 varia de 10 kΩ a 200 kΩ, em intervalos de 10 kΩ.

GLOSSÁRIO

Circuito aberto Ausência de ligação direta entre dois pontos de um circuito.

Curto-circuito Ligação direta entre dois pontos, de resistência muito baixa, que pode alterar significativamente o comportamento de um elemento ou sistema.

Circuito paralelo Configuração em que os elementos têm dois pontos em comum.

Lei de Kirchhoff para a corrente A soma algébrica para as correntes que entram e saem de um nó é nula.

Nó Encontro de dois ou mais ramos.

Razão Ohm/volt Razão utilizada para determinar a sensibilidade à corrente e a resistência interna de um medidor.

Regra do divisor de corrente Método para obter as correntes que percorrem elementos em paralelo sem determinar primeiro a ddp entre seus terminais.

to-circuito ou um circuito aberto. Se, por exemplo, não existirem os resistores R_5 e R_6, isto é, se o circuito tiver apenas duas malhas, basta entrar com valores de R_5 e R_6 muito elevados em comparação com as resistências dos outros elementos do circuito; deste modo eles se comportarão como circuitos abertos para efeito de análise. Esta situação é ilustrada na Fig. 7.60, onde supomos uma fonte negativa de 60 V. Os valores das correntes são negativos porque o sentido definido no programa é oposto do real. A corrente I_6 é praticamente zero, como deveria ser no caso de R_5 e R_6 não existirem. Se apenas R_1, R_3, R_5 ou R_6 estivesse faltando, deveríamos inserir um curto-circuito equivalente. Se estivesse faltando R_2 ou R_4, deveria ser inserido um circuito aberto equivalente.

```
Enter R1: 10
Enter R2: 220
Enter R3: 12
Enter R4: 100
Enter R5: 1e30
Enter R6: 1e30
Enter E: -60

The total resistance is 84.216866 ohms.
The source current is -0.712446 Amperes.
I3 equals -0.472103 Amperes.
I6 equals -2.360515e-29 Amperes.
```

Fig. 7.60 *Resultado do programa em C++ para o circuito em cascata da Fig. 7.57 sem os resistores R_5 e R_6.*

PROBLEMAS

SEÇÃO 7.2 Exemplos Descritivos

1. Nos circuitos a seguir (Fig. 7.61), quais os elementos que estão em série e quais os que estão em paralelo? Em outras palavras, quais os elementos que são percorridos pela mesma corrente (série) e quais os que estão submetidos à mesma ddp (paralelo)? Restrinja a análise a elementos isolados, não incluindo nenhuma combinação de elementos.
2. Determine R_T para os circuitos da Fig. 7.62.

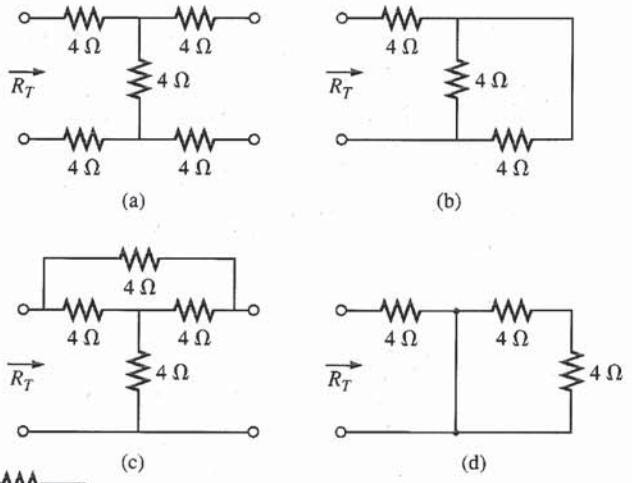


Fig. 7.62 *Problema 2.*

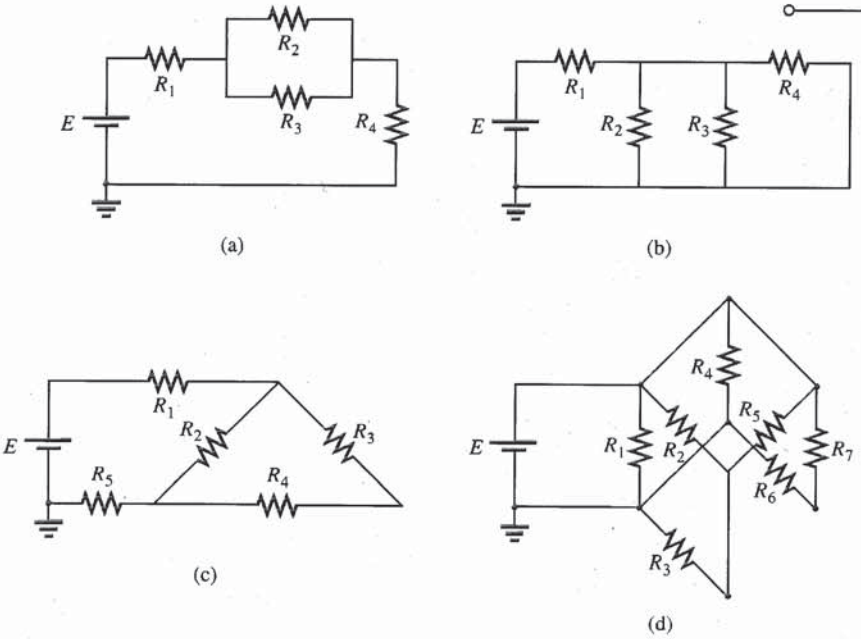


Fig. 7.61 *Problema 1.*

3. Considere o circuito da Fig. 7.63.
a. Temos $I = I_3 = I_6$? Justifique sua resposta.
b. Se $I = 5$ A e $I_1 = 2$ A, calcule I_2.
c. A igualdade $I_1 + I_2 = I_4 + I_3$ é verdadeira? Justifique.
d. Se $V_1 = 6$ V e $E = 10$ V, calcule V_2.
e. Se $R_1 = 3\ \Omega$, $R_2 = 2\ \Omega$, $R_3 = 4\ \Omega$ e $R_4 = 1\ \Omega$, calcule a resistência total.
f. Se as resistências dos resistores são as fornecidas no item (e) e $E = 10$ V, qual o valor de I em ampères?
g. Utilizando os valores dados em (e) e (f), calcule a potência fornecida pela bateria E e dissipada pelos resistores R_1 e R_2.

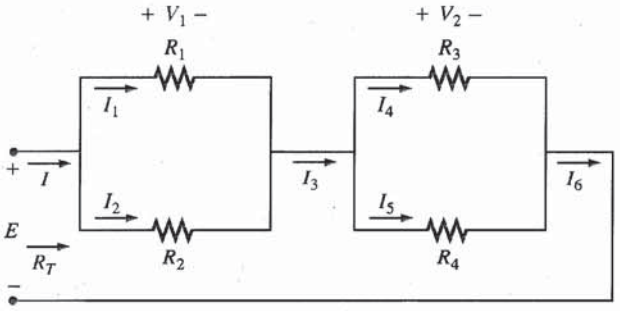


Fig. 7.63 *Problema 3.*

4. Calcule, no circuito da Fig. 7.64:
a. R_T.
b. I e I_1.
c. V_3.

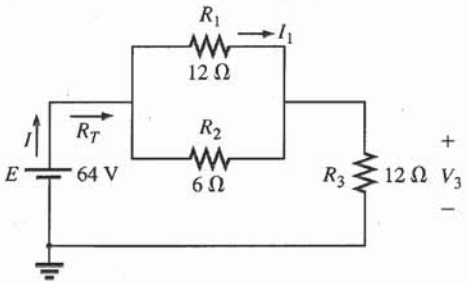


Fig. 7.64 *Problema 4.*

5. Obtenha, considerando o circuito da Fig. 7.65:
a. R_T.
b. I_F, I_1 e I_2.
c. V_a.

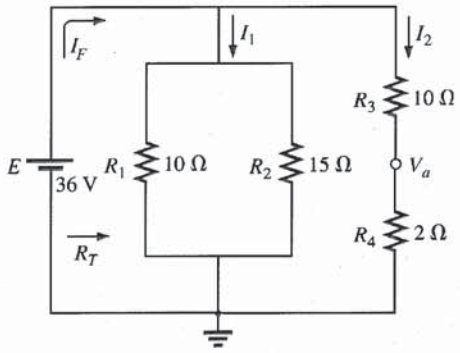


Fig. 7.65 *Problema 5.*

6. Determine, no circuito da Fig. 7.66, as correntes I_1 e I_2.

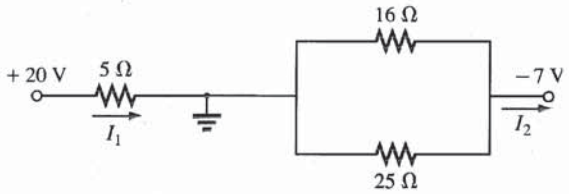


Fig. 7.66 *Problema 6.*

7. **a.** Ache a intensidade e o sentido das correntes I, I_1, I_2 e I_3 no circuito da Fig. 7.67.
b. Indique os sentidos das correntes na mesma figura.

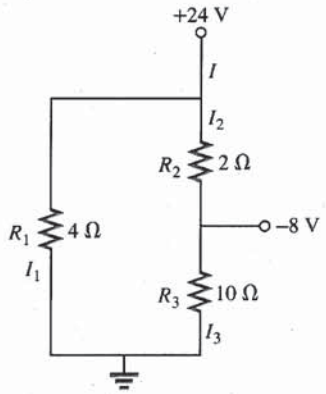


Fig. 7.67 *Problema 7.*

***8.** Para o circuito da Fig. 7.68:
a. Determine as correntes I_5, I_1, I_3 e I_4.
b. Calcule V_a e V_{bc}.

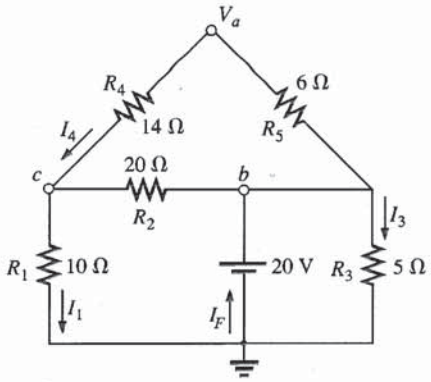


Fig. 7.68 *Problema 8.*

9. Determine, no circuito da Fig. 7.69:
a. A corrente I_1.
b. As correntes I_2 e I_3.
c. As tensões V_a e V_b.

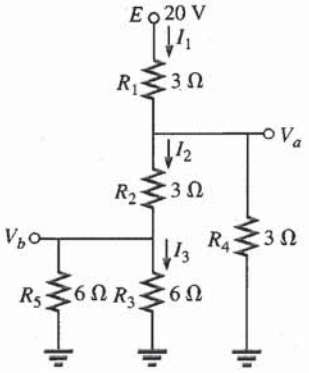


Fig. 7.69 *Problema 9.*

10. Calcule, no circuito da Fig. 7.70:
a. As correntes I e I_6.
b. As tensões V_1 e V_5.
c. A potência fornecida ao resistor de 6 kΩ.

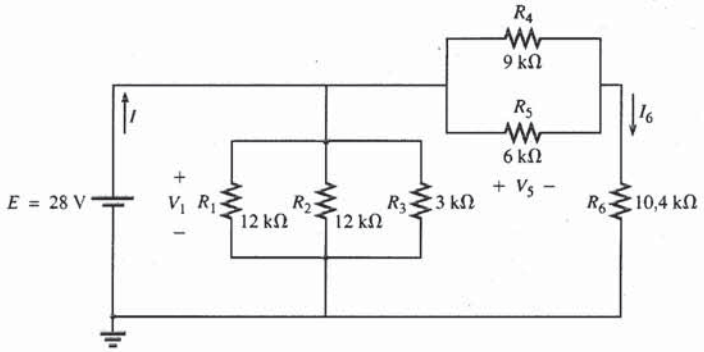


Fig. 7.70 *Problema 10.*

***11.** Calcule, para o circuito em série-paralelo da Fig. 7.71:
a. A corrente I.
b. As correntes I_3 e I_9.
c. A corrente I_8.
d. A ddp V_{ab}.

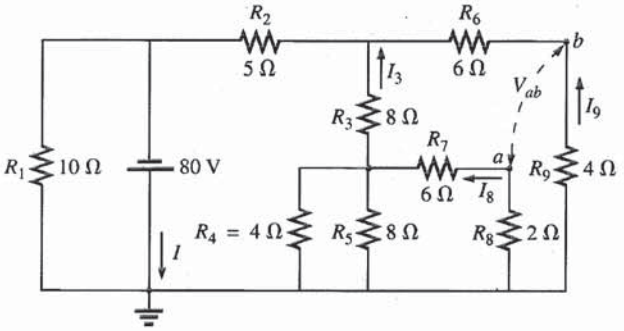


Fig. 7.71 *Problema 11.*

***12.** Determine os valores estáticos de tensão e corrente para o circuito com um transistor da Fig. 7.72, levando em conta que V_{BE} = 0,7 V, V_E = 2 V, e $I_C = I_E$. Em outras palavras,
a. Determine I_E e I_C.
b. Calcule I_B.
c. Determine V_B e V_C.
d. Calcule V_{CE} e V_{BC}.

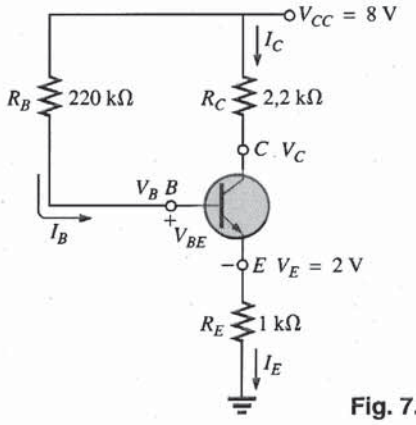


Fig. 7.72 *Problema 12.*

***13.** Na Fig. 7.73 vemos o circuito de polarização básico para o *transistor de efeito de campo* (FET, *field-effect transistor*), um componente muito usado hoje em dia em equipamentos eletrônicos. (*Polarização* significa simplesmente a aplicação de tensões contínuas para estabelecer um conjunto particular de condições de operação.) Mesmo que você não esteja familiarizado com o FET, você poderá realizar, utilizando somente as leis básicas introduzidas neste capítulo e as informações fornecidas pela figura, a seguinte análise:
a. Determinar as tensões V_G e V_F.
b. Calcular as correntes I_1, I_2, I_D e I_F.
c. Determinar V_{DF}.
d. Calcular V_{DG}.

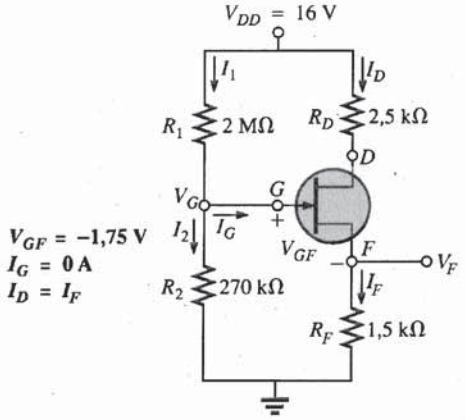


Fig. 7.73 *Problema 13.*

***14.** Determine, para o circuito da Fig. 7.74:
a. R_T.
b. V_a.
c. V_1.
d. V_2.
e. I (dando também o seu sentido).

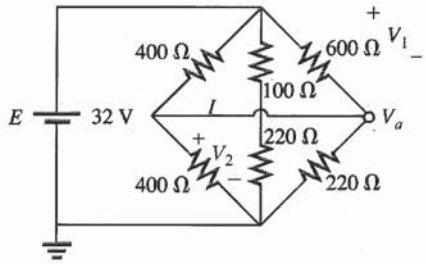


Fig. 7.74 *Problema 14.*

15. No circuito da Fig. 7.75:
a. Determine a corrente I.
b. Encontre V.

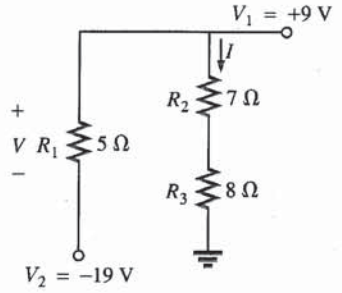


Fig. 7.75 *Problema 15.*

***16.** Calcule a corrente I e as tensões V_a, V_b e V_{ab} para o circuito da Fig. 7.76.

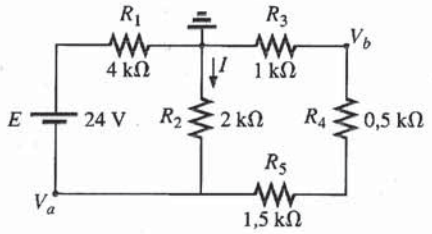


Fig. 7.76 *Problema 16.*

17. Na configuração da Fig. 7.77:
a. Encontre as correntes I_2, I_6 e I_8.
b. Calcule as tensões V_4 e V_8.

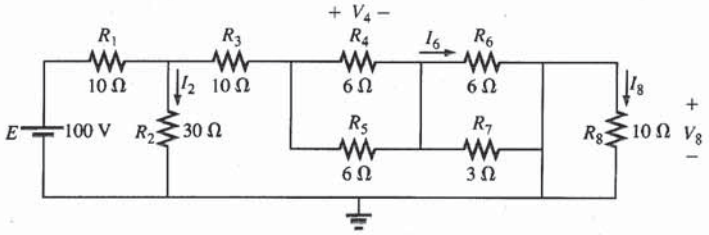


Fig. 7.77 *Problema 17.*

18. Determine V e I para o circuito da Fig. 7.78.

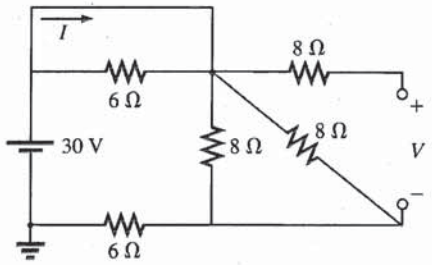


Fig. 7.78 *Problema 18.*

***19.** No circuito da Fig. 7.79:
a. Determine R_T combinando as resistências entre si.
b. Calcule V_1 e V_4.
c. Calcule I_3, dando o seu sentido.
d. Determine I_F encontrando a corrente que percorre cada um dos componentes e aplicando em seguida a lei de Kirchhoff para correntes. Calcule R_T usando $R_T = E/I_F$ e compare o resultado com o do item (a).

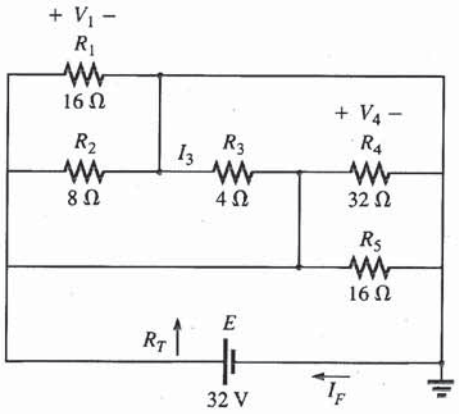


Fig. 7.79 *Problema 19.*

20. Determine no circuito da Fig. 7.80:
a. A tensão V_{ab}. (*Sugestão:* Use a lei de Kirchhoff para tensões.)
b. A corrente I.

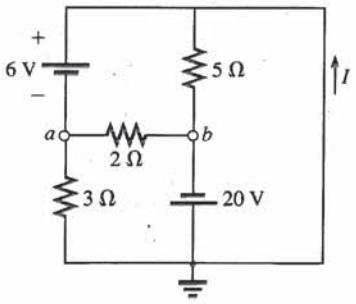


Fig. 7.80 *Problema 20.*

***21.** Para o circuito da Fig. 7.81:
a. Calcule a corrente I.
b. Obtenha a tensão de circuito aberto V.

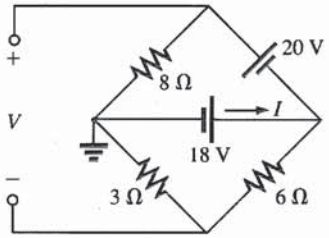


Fig. 7.81 *Problema 21.*

*22. Calcule a resistência R_3 no circuito da Fig. 7.82, se a corrente que atravessa esta resistência é 2 A.

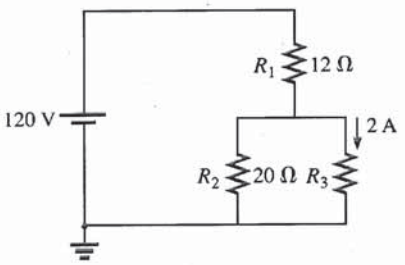


Fig. 7.82 *Problema 22.*

*23. Se todos os resistores no cubo da Fig. 7.83 são de 10 Ω, qual é a resistência total do circuito? (*Sugestão*: faça algumas hipóteses básicas a respeito da forma como a corrente se distribui pelas resistências que compõem o cubo.)

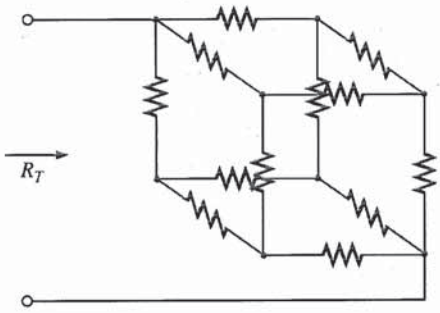


Fig. 7.83 *Problema 23.*

*24. Na Fig. 7.84 a leitura do voltímetro é $V = 27$ V:
a. O circuito funciona corretamente?
b. Em caso negativo, qual a possível causa da leitura incorreta?

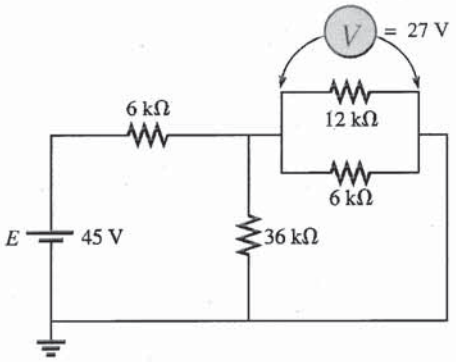


Fig. 7.84 *Problema 24.*

SEÇÃO 7.3 Circuitos em Cascata

25. Determine, para o circuito em cascata da Fig. 7.85:
a. A corrente I.
b. A corrente I_7.
c. As tensões V_3, V_5 e V_7.
d. A potência entregue a R_7, comparando-a com a potência entregue pela fonte de 240 V.

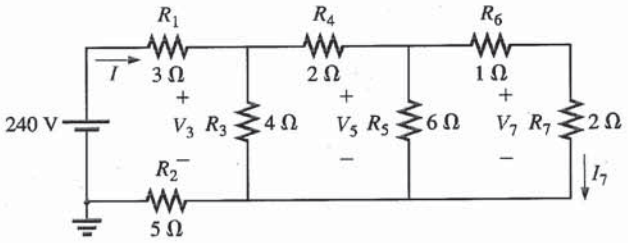


Fig. 7.85 *Problema 25.*

26. No circuito em cascata da Fig. 7.86:
a. Determine R_T.
b. Calcule I.
c. Calcule I_8.

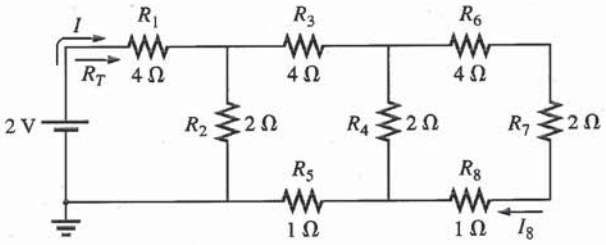


Fig. 7.86 *Problema 26.*

*27. Determine a potência fornecida à carga de 10 Ω da Fig. 7.87.

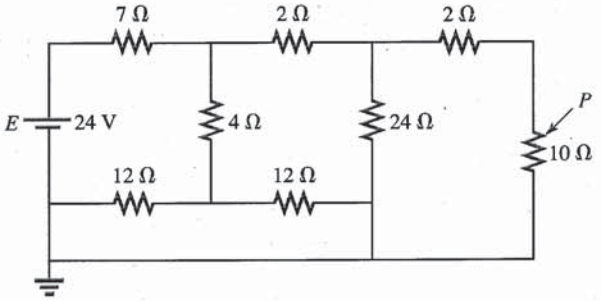


Fig. 7.87 *Problema 27.*

*28. Para a configuração de cascatas múltiplas da Fig. 7.88:
a. Determine I.
b. Calcule I_4.

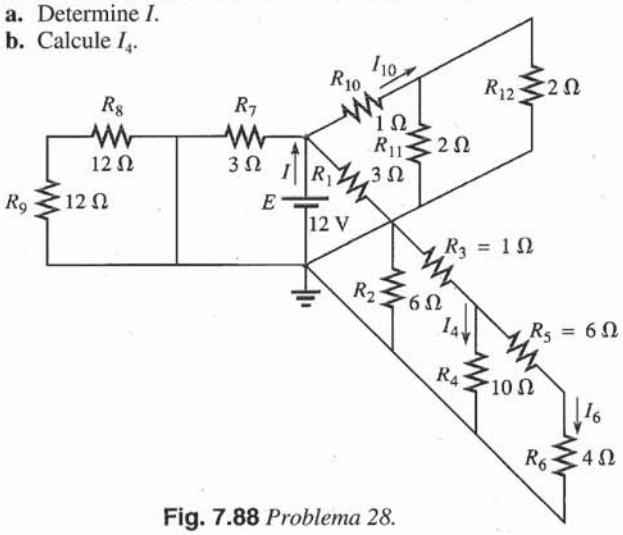


Fig. 7.88 *Problema 28.*

c. Obtenha I_6.
d. Encontre I_{10}.

SEÇÃO 7.4 Fonte com Divisor de Tensão (Com Carga e Sem Carga)

29. Dada a fonte com divisor de tensão da Fig. 7.89:
a. Calcule a tensão da fonte E.
b. Determine os resistores de carga R_{C_1} e R_{C_2}.
c. Determine os resistores do divisor de tensão R_1, R_2 e R_3.

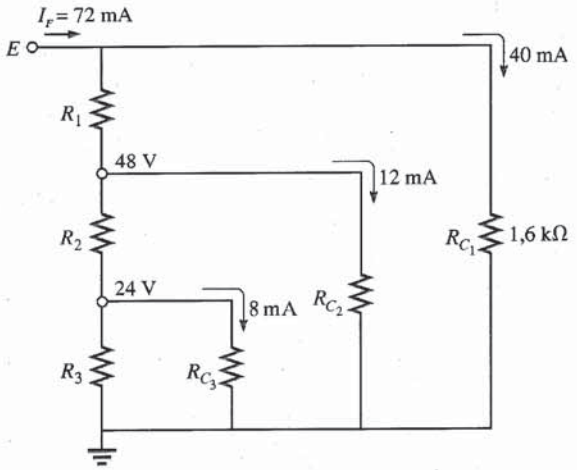


Fig. 7.89 *Problema 29.*

***30.** Determine os resistores da fonte com divisor de tensão para o circuito da Fig. 7.90. Calcule também a dissipação de potência necessária para cada resistor, comparando os valores entre si.

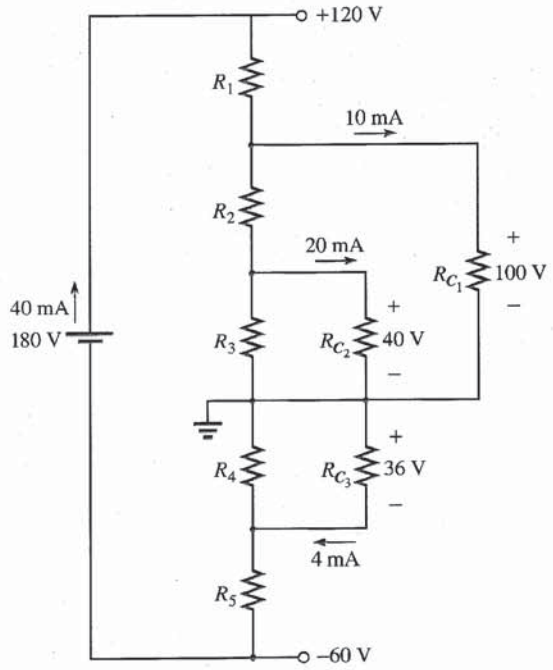


Fig. 7.90 *Problema 30.*

SEÇÃO 7.5 Ligação de uma Carga a um Potenciômetro

***31.** Para o sistema da Fig. 7.91:
a. O projeto parece ser aceitável, à primeira vista?
b. Na ausência da carga de 10 kΩ, quais são os valores de R_1 e R_2 de modo que a ddp entre os terminais de R_2 seja 3 V?
c. Determine os valores de R_1 e R_2 quando a carga é conectada e compare com o resultado do item (b).

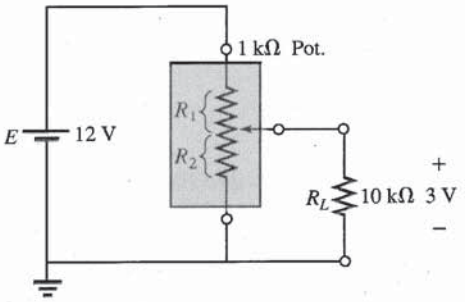


Fig. 7.91 *Problema 31.*

***32.** Para o potenciômetro da Fig. 7.92:
a. Quais são, na ausência de cargas, as tensões V_{ab} e V_{bc}?
b. Se forem conectadas as cargas na figura, quais os novos valores de V_{ab} e V_{bc}?
c. Qual a potência dissipada pelo potenciômetro com as cargas indicadas na figura?
d. Qual a potência dissipada pelo potenciômetro na ausência de carga? Compare com o resultado do item (c).

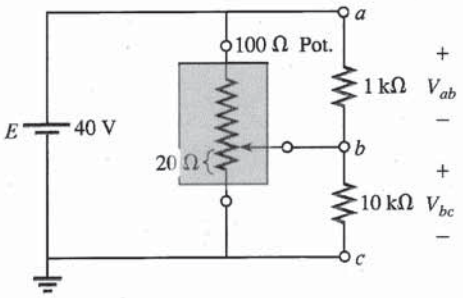


Fig. 7.92 *Problema 32.*

SEÇÃO 7.6 Projeto de Amperímetros, Voltímetros e Ohmímetros

33. Um galvanômetro de d'Arsonval é especificado como sendo de 1 mA, 100 Ω.
a. Qual é a sensibilidade de corrente?
b. Projete um amperímetro para 20 A utilizando este galvanômetro. Desenhe o circuito com o valor dos componentes.

34. Utilizando um galvanômetro de d'Arsonval de 50 μA, 1000 Ω, projete um miliamperímetro com escalas de 25, 50 e 100 mA. Desenhe o circuito com o valor dos componentes.

35. As especificações de um galvanômetro de d'Arsonval são 50 μA, 1000 Ω.

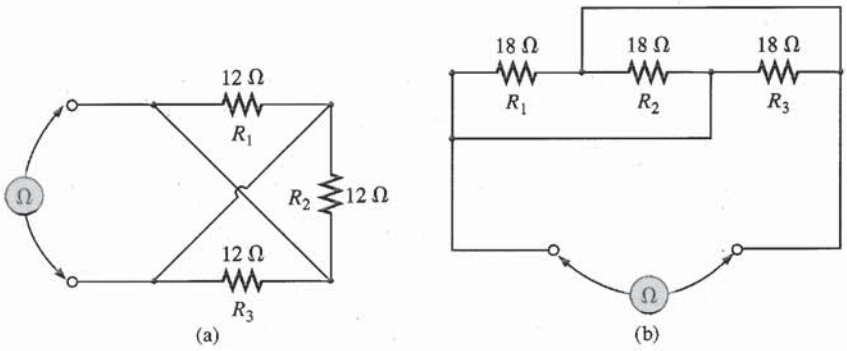


Fig. 7.93 *Problema 40.*

a. Projete, desenhando os circuitos com os valores dos componentes um voltímetro de 15 V.
b. Qual a razão Ω/V para este voltímetro?

36. Projete, utilizando um galvanômetro de d'Arsonval de 1 mA, 100 Ω, um voltímetro com escalas de 5, 50 e 500 V. Desenhe o circuito com os valores dos componentes.

37. Um medidor digital tem uma resistência interna de 10 MΩ na escala de 0,5 V. Se você quisesse construir um voltímetro analógico, utilizando um galvanômetro de d'Arsonval, com a mesma resistência interna na mesma escala de voltagem, qual deveria ser a sensibilidade de corrente?

***38.** a. Projete um ohmímetro em série utilizando um galvanômetro de 100 μA, 1000 Ω, um ajuste de zero com valor máximo igual a 2 kΩ, uma bateria de 3 V e um resistor em série cujo valor deve ser determinado.
b. Calcule a resistência necessária no caso de deflexões de 3/4 da escala, 1/2 da escala e 1/4 da escala.
c. Utilizando os resultados do item (b), desenhe a escala a ser utilizada com este ohmímetro.

39. Descreva a estrutura e o modo de operação de um megohmímetro.

***40.** Quais as leituras do ohmímetro nas configurações da Fig. 7.93?

SEÇÃO 7.8 Análise Computacional

PSpice (DOS)

41. Escreva o arquivo de entrada para o circuito da Fig. 7.8, solicitando os valores de I_1, I_3 e I_6.

42. Escreva o arquivo de entrada para o circuito da Fig. 7.18 de modo a obter V_1, V_2 e I.

PSpice (Windows)

43. Utilizando um diagrama esquemático, determine V_1, V_3, V_{ab} e I_F para o circuito da Fig. 7.16.

44. Determine, utilizando um diagrama esquemático, I_F, I_5 e V_7 para o circuito da Fig. 7.22.

Linguagens de Programação (C++, BASIC, PASCAL etc.)

45. Escreva um programa para obter a solução completa para o circuito da Fig. 7.6, isto é, dados todos os parâmetros, calcule a corrente, tensão e potência associadas a cada elemento.

46. Escreva um programa para calcular todas as grandezas pedidas no Exemplo 7.8, dados os parâmetros do circuito.

GLOSSÁRIO

Circuito em cascata Circuito que consiste em uma série de combinações em série-paralelo e que tem a aparência de uma escada.

Circuito em série-paralelo Circuito que consiste em uma combinação de ramos em série e em paralelo.

Galvanômetro de d'Arsonval Bobina com núcleo de ferro montada em rolamentos entre os pólos de um ímã permanente. Um ponteiro ligado ao núcleo móvel indica a intensidade da corrente que passa pela bobina.

Megohmímetro Instrumento destinado a medir resistências muito altas, na faixa dos megohms.

Ohmímetro em série Instrumento para medir resistências no qual o galvanômetro é ligado em série com a resistência desconhecida.

Transistor Componente eletrônico semicondutor com três terminais, que pode ser usado para amplificação ou chaveamento.

```
10 REM ***** PROGRAM 8-1 *****
20 REM ********************************************
30 REM Program to evaluate the loop currents for a
40 REM 2-loop network.
50 REM ********************************************
60 REM
100 PRINT "For a 2-loop network"
110 PRINT "enter the following data:"
120 PRINT
130 INPUT "R1="; R1
140 INPUT "R2="; R2
150 INPUT "R3="; R3
160 INPUT "Voltage, E1="; E1
170 INPUT "Voltage, E2="; E2
180 PRINT
190 REM Calculate I1 and I2
200 D = R1 * R2 + R1 * R3 + R2 * R3
210 I1 = (E1 * (R2 + R3) - E2 * R3) / D
220 I2 = (-E2 * (R1 + R3) + E1 * R3) / D
230 PRINT "The loop currents are:"
240 PRINT "I1="; I1; "A"
250 PRINT "I2="; I2; "A"
260 END
```

Input: 130–170; Calc.: 190–220; Output: 230–250

```
For a 2-loop network
enter the following data:

R1=? 2
R2=? 1
R3=? 4
Voltage, E1=? 2
Voltage, E2=? 6

The loop currents are:
I1=-1 A
I2=-2 A
Ok

RUN
For a 2-loop network
enter the following data:

R1=? 1E3
R2=? 2.2E3
R3=? 3.3E3
Voltage, E1=? -5.4
Voltage, E2=? 8.6

The loop currents are:
I1=-4.551724E-03 A
I2=-4.294671E-03 A
```

Fig. 8.89 *Programa em BASIC para calcular as correntes de malha no circuito da Fig. 8.88.*

ver um programa em BASIC do que obter uma solução usando o PSpice. Na verdade, esta questão pode ser abordada a partir de vários pontos de vista. O importante, porém, é que o leitor conheça as vantagens e desvantagens de trabalhar com um programa já pronto ou com uma linguagem de programação.

O primeiro exemplo da Fig. 8.89 emprega os mesmo valores do Exemplo 8.11, enquanto o segundo utiliza resistores na faixa de kilohm e uma fonte inversa.

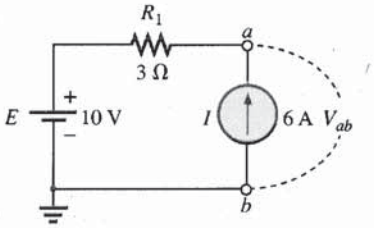


Fig. 8.90 *Problema 1.*

PROBLEMAS

SEÇÃO 8.2 Fontes de Corrente

1. Encontre a tensão V_{ab} (incluindo a polaridade) entre os terminais da fonte de corrente ideal da Fig. 8.90.
2. **a.** Determine V para a fonte de corrente da Fig. 8.91(a) com uma resistência interna de 10 kΩ.
   b. A fonte do item (a) pode ser substituída pela fonte de corrente ideal da Fig. 8.91(b), já que a resistência interna da fonte é muito maior que a da carga. Determine a tensão V na Fig.

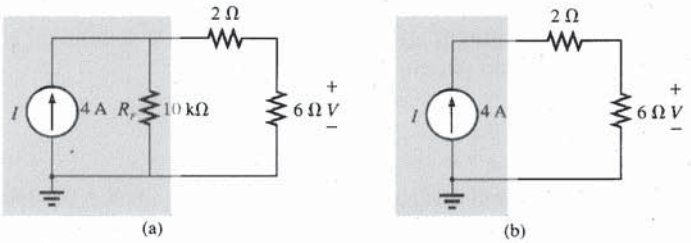


Fig. 8.91 *Problema 2.*

8.91(b) e compare-a com a obtida no item (a). O uso da fonte de corrente ideal é uma boa aproximação?

3. Para o circuito da Fig. 8.92:
a. Encontre as correntes I_1 e I_F.
b. Encontre as tensões V_F e V_3.

4. Encontre a tensão V_3 e a corrente I_2 para o circuito da Fig. 8.93.

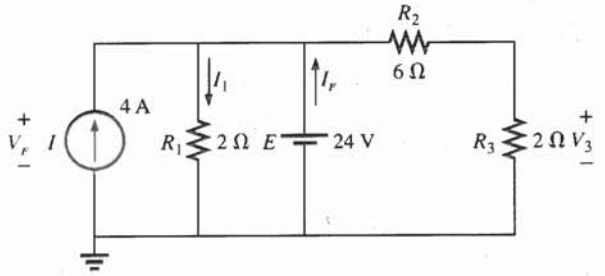


Fig. 8.92 *Problema 3.*

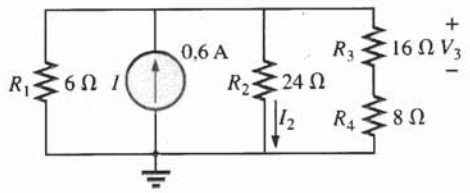


Fig. 8.93 *Problema 4.*

SEÇÃO 8.3 Conversões de Fonte

5. Converta as fontes de tensão da Fig. 8.94 para fontes de corrente.

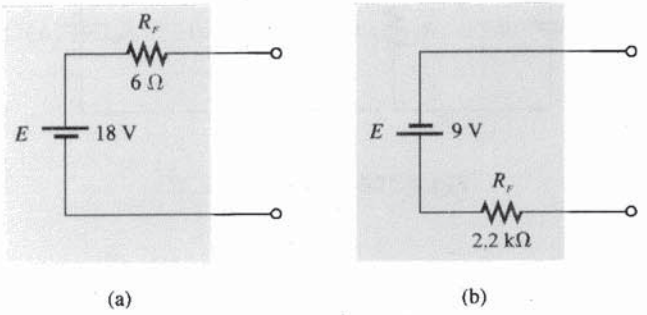


Fig. 8.94 *Problema 5.*

6. Converta as fontes de corrente da Fig. 8.95 para fontes de tensão.

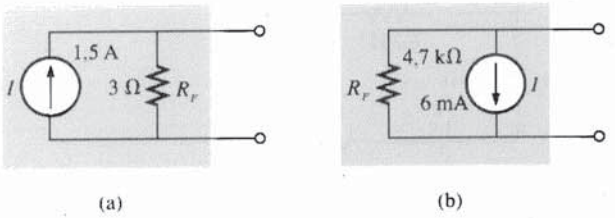


Fig. 8.95 *Problema 6.*

7. Para o circuito da Fig. 8.96:

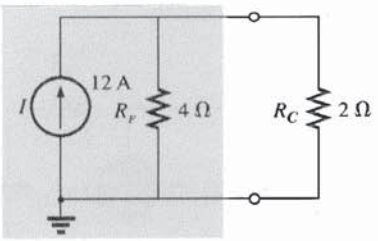


Fig. 8.96 *Problema 7.*

a. Encontre a corrente no resistor de 2 Ω.
b. Converta a fonte de corrente e o resistor de 4 Ω para uma fonte de tensão e calcule novamente a corrente no resistor de 2 Ω. Compare os resultados.

8. Para a configuração da Fig. 8.97:

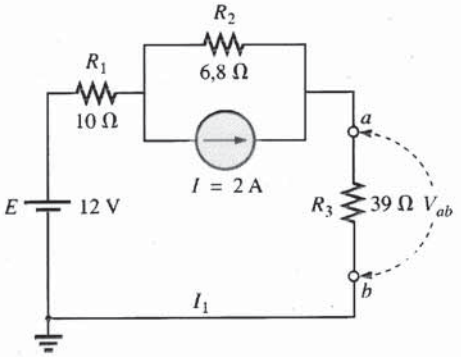


Fig. 8.97 *Problema 8.*

a. Converta a fonte de corrente e o resistor de 6,8 Ω para uma fonte de tensão.
b. Encontre a intensidade e o sentido da corrente I_1.
c. Encontre a tensão V_{ab}, incluindo a polaridade.

SEÇÃO 8.4 Fontes de Corrente em Paralelo

9. Encontre a tensão V_2 e a corrente I_1 para o circuito da Fig. 8.98.

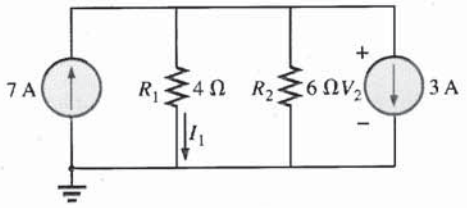


Fig. 8.98 *Problema 9.*

10. a. Converta as fontes de tensão da Fig. 8.99 para fontes de corrente.

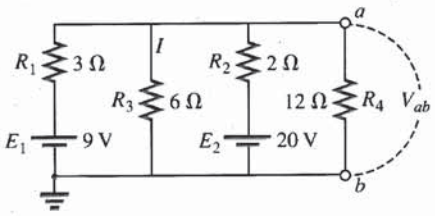


Fig. 8.99 *Problema 10.*

b. Encontre a tensão V_{ab}, incluindo a polaridade.
c. Encontre a intensidade e o sentido da corrente I.

11. Para o circuito da Fig. 8.100:

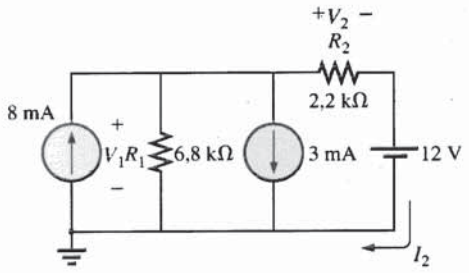


Fig. 8.100 *Problema 11.*

a. Converta a fonte de tensão para uma fonte de corrente.
b. Reduza o circuito a uma única fonte de corrente e determine a tensão V_1.
c. Usando os resultados da letra (b), determine V_2.
d. Calcule a corrente I_2.

SEÇÃO 8.6 Análise das Correntes nos Ramos

12. Usando a análise das correntes nos ramos, encontre a intensidade e o sentido das correntes nos resistores dos circuitos da Fig. 8.101.

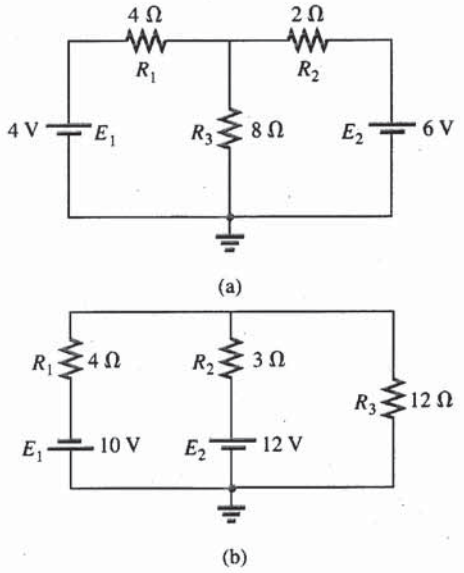


Fig. 8.101 *Problemas 12, 17, 25, 54 e 57.*

***13.** Usando a análise das correntes nos ramos, encontre as correntes nos resistores dos circuitos da Fig. 8.102. Todos os resistores possuem valores comerciais.

***14.** Para os circuitos da Fig. 8.103, determine a corrente I_2 usando a análise das correntes nos ramos e encontre a tensão V_{ab}.

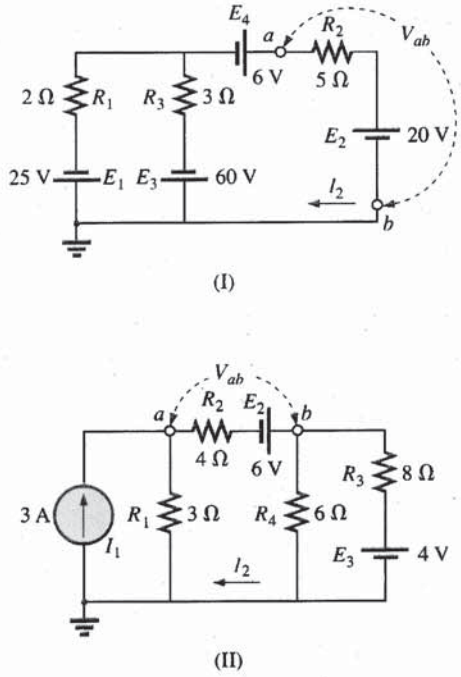


Fig. 8.103 *Problemas 14, 19 e 27.*

***15.** Para o circuito da Fig. 8.104:

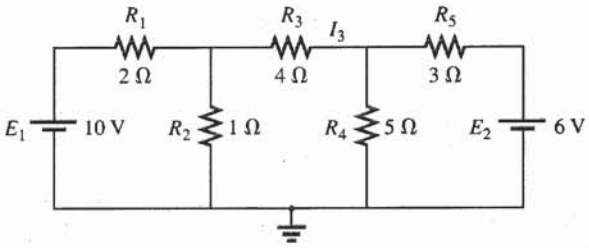


Fig. 8.104 *Problemas 15 e 28.*

a. Escreva as equações necessárias para obter as correntes nos ramos.

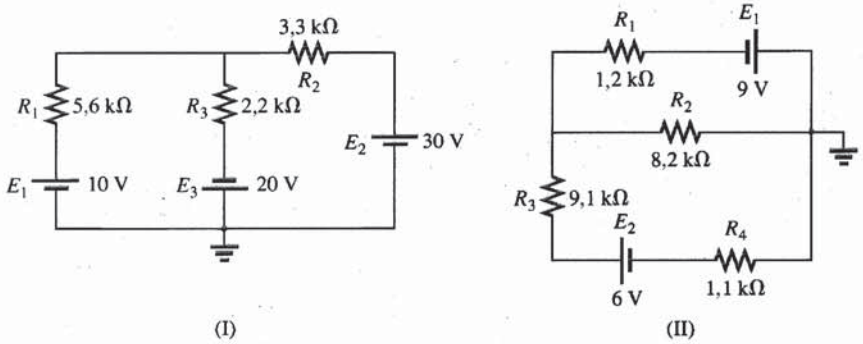


Fig. 8.102 *Problemas 13, 18 e 26.*

b. Utilizando a lei de Kirchhoff para correntes, reduza o conjunto a três equações.
c. Reescreva as equações em um formato que possa ser resolvido usando determinantes de terceira ordem.
d. Obtenha no resistor R_3.

***16.** Para o circuito com um transistor da Fig. 8.105:

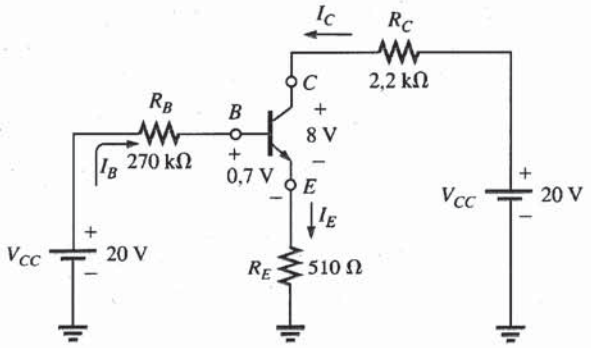


Fig. 8.105 *Problema 16.*

a. Encontre as correntes I_B, I_C e I_E sabendo que $V_{BE} = 0{,}7$ V e $V_{CE} = 8$ V.
b. Encontre as tensões V_B, V_C e V_E em relação à terra.
c. Qual a relação entre a corrente de saída I_C e a corrente de entrada I_B? [*Nota:* Na análise de transistores, esta relação é chamada de beta estático do transistor (β_{dc}).]

SEÇÃO 8.7 Método das Malhas (Abordagem Geral)

17. Encontre as correntes nos resistores dos circuitos da Fig. 8.101.
18. Encontre as correntes nos resistores dos circuitos da Fig. 8.102.
19. Encontre as correntes de malha e a tensão V_{ab} para cada circuito da Fig. 8.103. Use correntes de malha no sentido horário.
20. **a.** Encontre a corrente I_3 para o circuito da Fig. 8.104 usando a análise de malhas.
b. Com base nos resultados da letra (a), como você pode comparar a aplicação do método das malhas com o método das correntes nos ramos?

***21.** Usando o método das malhas, determine a corrente no resistor de 5 Ω para cada circuito da Fig. 8.106 e em seguida determine a voltagem V_a.

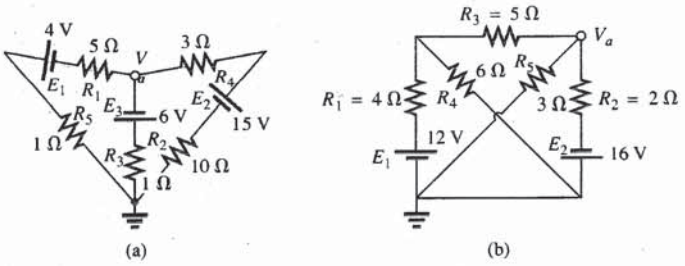


Fig. 8.106 *Problemas 21 e 29.*

***22.** Escreva as equações de malha para cada um dos circuitos da Fig. 8.107 e, usando determinantes, encontre as correntes de malha em cada circuito. Use correntes de malha no sentido horário.

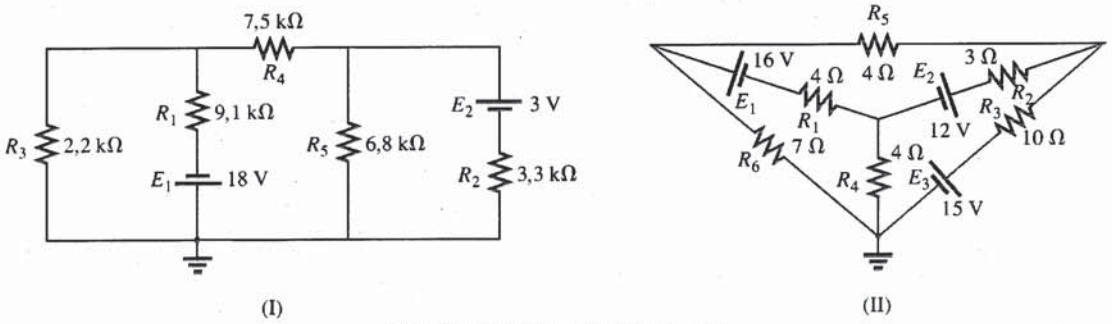


Fig. 8.107 *Problemas 22, 30 e 55.*

***23.** Escreva as equações de malha para cada um dos circuitos da Fig. 8.108 e, usando determinantes, obtenha as correntes de malha em cada circuito.

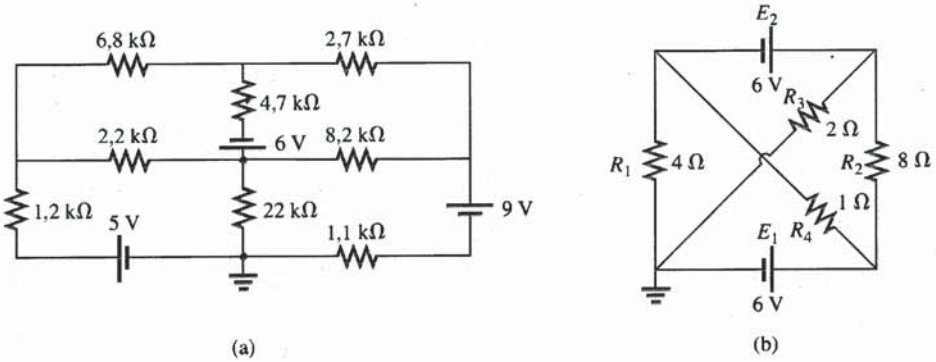


Fig. 8.108 *Problemas 23, 31 e 58.*

*24. Usando a abordagem da supermalha, encontre as correntes em todos os elementos dos circuitos da Fig. 8.109.

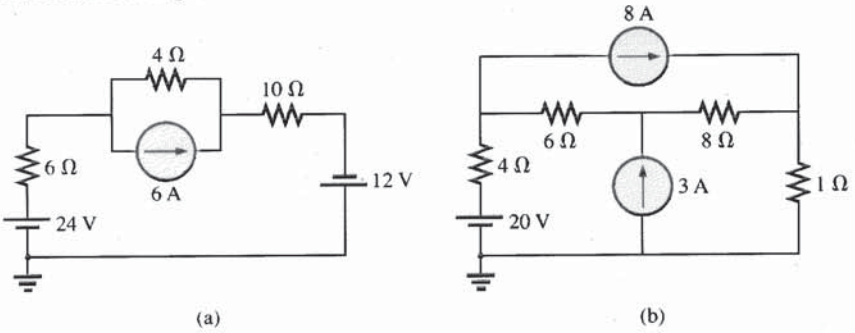


Fig. 8.109 *Problema 24.*

SEÇÃO 8.8 Método das Malhas (Abordagem Padronizada)

25. Usando a abordagem padronizada, escreva as equações de malha para os circuitos da Fig. 8.101. Existe simetria? Usando determinantes, calcule as correntes de malha.

26. **a.** Usando a abordagem padronizada, escreva as equações de malha para os circuitos da Fig. 8.102.
    b. Usando determinantes, calcule as correntes de malha.
    c. Determine a intensidade e o sentido das correntes em todos os resistores.

27. **a.** Usando a abordagem padronizada, escreva as equações de malha para os circuitos da Fig. 8.103.
    b. Usando determinantes, obtenha as correntes de malha.
    c. Determine a intensidade e o sentido das correntes em todos os resistores.

28. Determine a corrente I_3 para o circuito da Fig. 8.104 usando o método das malhas e compare com a solução do Problema 15.

29. Usando o método das malhas, determine $I_{5\Omega}$ e V_a para o circuito da Fig. 8.106(b).

30. Usando o método das malhas, determine as correntes de malha para os circuitos da Fig. 8.107.

31. Usando o método das malhas, determine as correntes de malha para os circuitos da Fig. 8.108.

SEÇÃO 8.9 Método dos Nós (Abordagem Geral)

32. Escreva as equações de nó para os circuitos da Fig. 8.110 e, usando determinantes, calcule as tensões nodais. Existe simetria?

33. **a.** Escreva as equações nodais para os circuitos da Fig. 8.111.
    b. Usando determinantes, obtenha as tensões nodais.
    c. Determine as intensidades e as polaridades das tensões entre os terminais de todos os resistores.

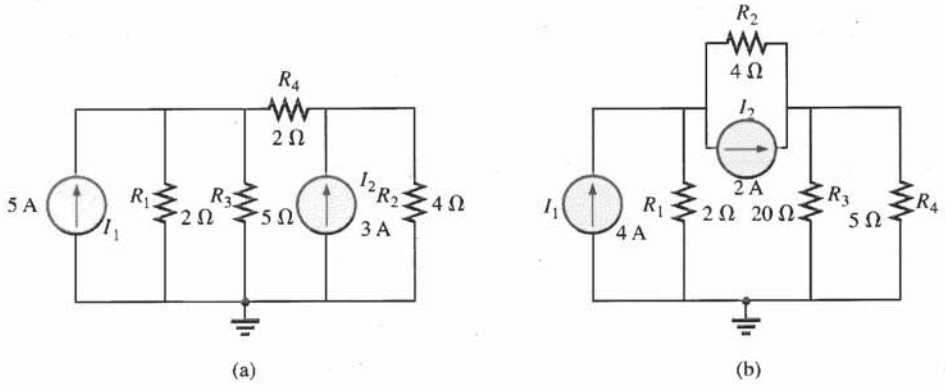


Fig. 8.110 *Problemas 32 e 38.*

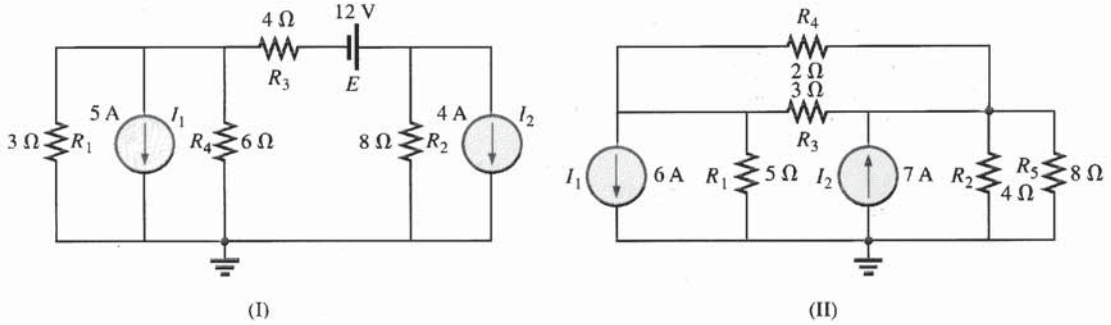


Fig. 8.111 *Problemas 33, 39 e 56.*

34. **a.** Escreva as equações nodais para os circuitos da Fig. 8.107.
b. Usando determinantes, obtenha as tensões nodais.
c. Determine as intensidades e as polaridades das tensões entre os terminais de todos os resistores.

***35.** Para os circuitos da Fig. 8.112, escreva as equações nodais e obtenha as tensões correspondentes.

SEÇÃO 8.10 Método dos Nós (Abordagem Padronizada)

38. Usando a abordagem padronizada, escreva as equações nodais para os circuitos da Fig. 8.110. Existe simetria? Usando determinantes, calcule as tensões nodais.

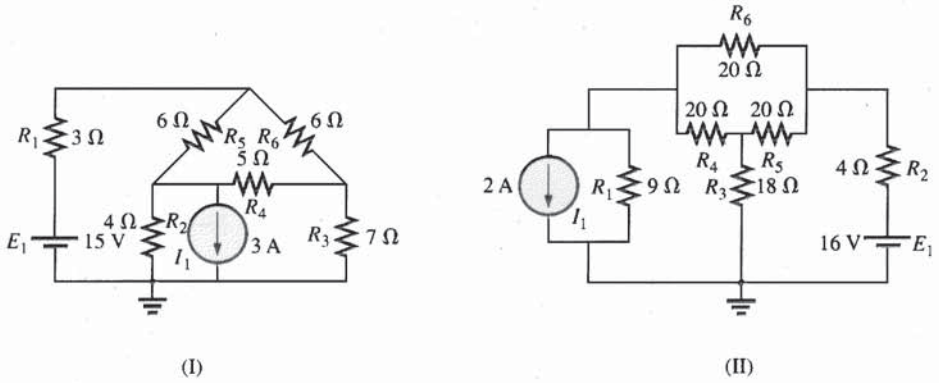


Fig. 8.112 *Problemas 35 e 40.*

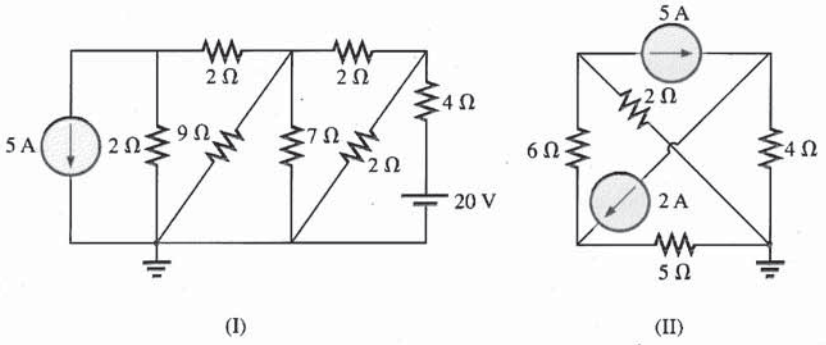


Fig. 8.113 *Problemas 36 e 41.*

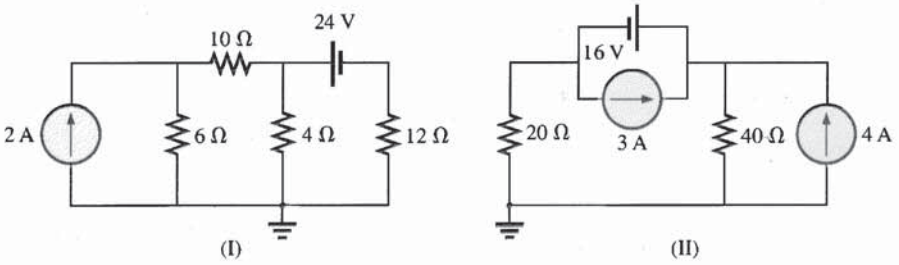


Fig. 8.114 *Problemas 37 e 59.*

36. **a.** Determine as tensões nodais para os circuitos da Fig. 8.113.
b. Encontre a tensão entre os terminais de todas as fontes de corrente.

***37.** Usando a abordagem do supernó, determine as tensões nodais para os circuitos da Fig. 8.114.

39. **a.** Escreva as equações nodais para os circuitos da Fig. 8.111.
b. Encontre as tensões nodais.
c. Encontre as intensidades e polaridades das tensões entre os terminais de todos os resistores.

40. **a.** Escreva as equações nodais para os circuitos da Fig. 8.112.

b. Resolva-as para obter as tensões nodais.
c. Encontre a intensidade e polaridade das tensões entre os terminais de todos os resistores.

41. Determine as tensões nodais para os circuitos da Fig. 8.113 e em seguida determine as tensões entre os terminais de todas as fontes de corrente.

SEÇÃO 8.11 Circuitos em Ponte

42. Para o circuito em ponte da Fig. 8.115:
a. Escreva as equações de malha usando a abordagem padronizada.
b. Determine a corrente em R_5.
c. O circuito está equilibrado?
d. A Eq. 8.4 é satisfeita?

43. Para o circuito da Fig. 8.115:

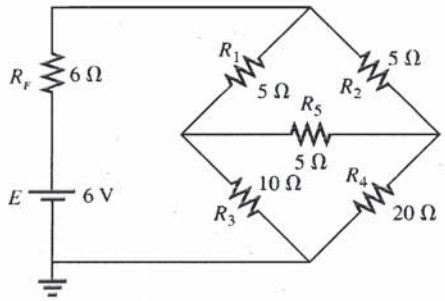


Fig. 8.115 *Problemas 42 e 43.*

a. Escreva as equações nodais usando a abordagem padronizada.
b. Determine a corrente em R_5.
c. O circuito está equilibrado?
d. A Eq. 8.4 é satisfeita?

44. Para o circuito em ponte da Fig. 8.116:
a. Escreva as equações de malha usando a abordagem padronizada.
b. Determine a corrente em R_5.
c. O circuito está equilibrado?
d. A Eq. 8.4 é satisfeita?

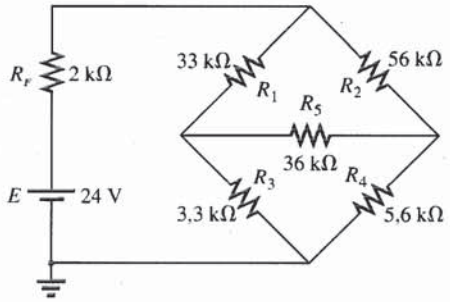


Fig. 8.116 *Problemas 44 e 45.*

45. Para o circuito em ponte da Fig. 8.116:
a. Escreva as equações de nó usando a abordagem padronizada.
b. Determine a corrente em R_5.
c. O circuito está equilibrado?
d. A Eq. 8.4 é satisfeita?

46. Escreva as equações nodais para a configuração em ponte da Fig. 8.117. Use a abordagem padronizada.

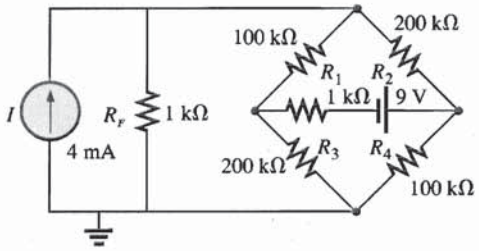


Fig. 8.117 *Problema 46.*

***47.** Determine a corrente na resistência interna da fonte, R_F, para os dois circuitos da Fig. 8.118, usando o método das malhas ou o método dos nós. Explique as razões da sua escolha.

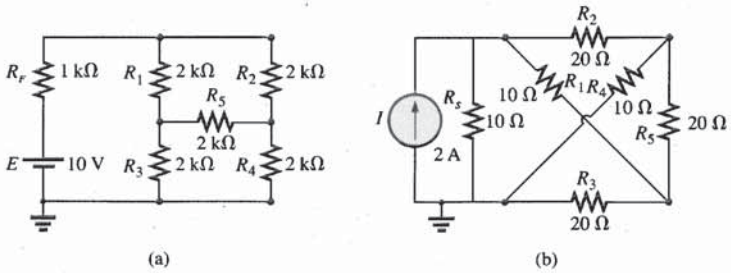


Fig. 8.118 *Problema 47.*

SEÇÃO 8.12 Conversões Y-Δ (T-π) e Δ-Y (π-T)

48. Usando uma conversão Δ-Y ou Y-Δ, encontre a corrente I nos circuitos da Fig. 8.119.

***49.** Repita o Problema 48 para os circuitos da Fig. 8.120.

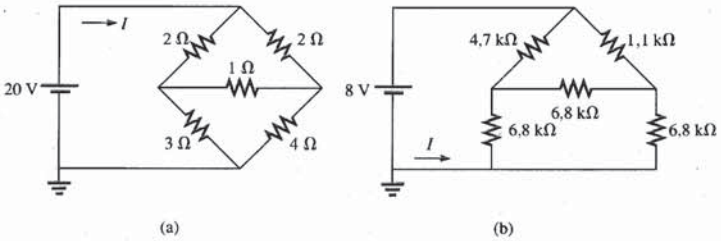
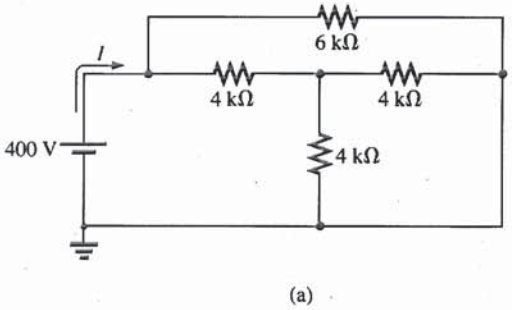


Fig. 8.119 *Problema 48.*



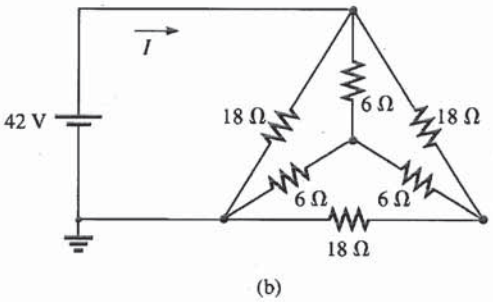


Fig. 8.120 *Problema 49.*

*50. Determine a corrente I para o circuito da Fig. 8.121.

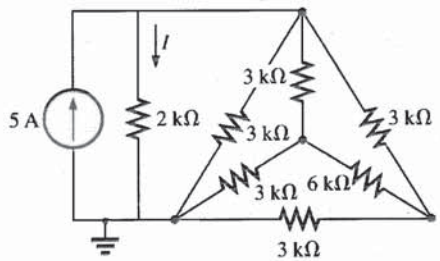


Fig. 8.121 *Problema 50.*

*51. **a.** Substitua a configuração T da Fig. 8.122 (composta de resistores de 6 kΩ) por uma configuração π.

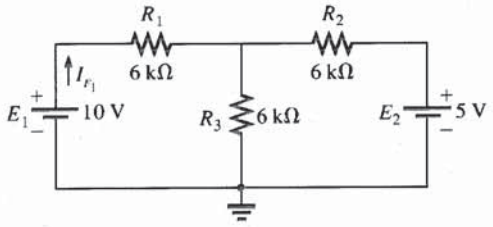


Fig. 8.122 *Problema 51.*

b. Obtenha a corrente fornecida pela fonte, I_{F_1}.

*52. **a.** Substitua a configuração π da Fig. 8.123 (composta de resistores de 3 kΩ) por uma configuração T.

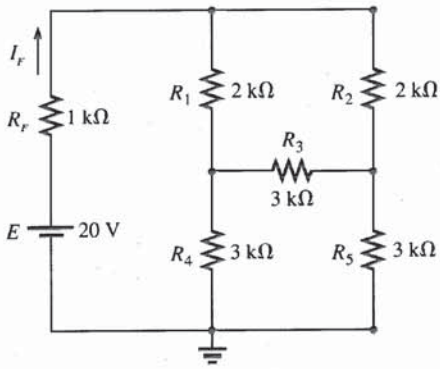


Fig. 8.123 *Problema 52.*

b. Obtenha a corrente I_F.

*53. Usando conversões Δ-Y ou Y-Δ, determine a resistência total do circuito da Fig. 8.124.

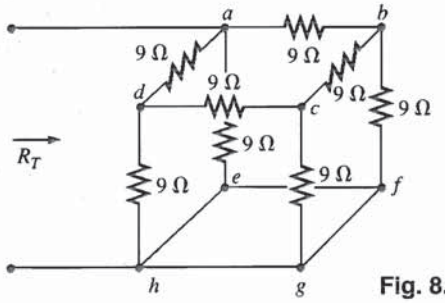


Fig. 8.124 *Problema 53.*

SEÇÃO 8.13 Análise Computacional

PSpice (DOS)

54. Escreva um arquivo de entrada do PSpice para o circuito da Fig. 101(b) de modo a obter as três correntes de ramo.
55. Escreva um arquivo de entrada do PSpice para o circuito da Fig. 8.107(I) para obter a tensão V_{R_4} e a corrente I_{R_2}.
56. Escreva um arquivo de entrada do PSpice para o circuito da Fig. 111(II) de modo a obter V_{R_4}.

PSpice (Windows)

57. Usando um diagrama esquemático, encontre as correntes em todos os elementos da Fig. 8.101.
*58. Usando um diagrama esquemático, encontre as correntes de malha para o circuito da Fig. 8.108(a).
*59. Usando um diagrama esquemático, determine as tensões nodais para o circuito da Fig. 8.114(II).

Linguagens de Programação (C++, BASIC, PASCAL etc.)

60. Dadas duas equações simultâneas, escreva um programa para determinar os valores das incógnitas.
*61. Escreva um programa para calcular as duas correntes de malha do circuito da Fig. 8.25 (quaisquer que sejam os valores dos componentes) usando o método das malhas e determinantes.
*62. Escreva um programa para calcular as tensões nodais do circuito da Fig. 8.42 (quaisquer que sejam os valores dos componentes) usando o método dos nós e determinantes.

GLOSSÁRIO

Circuito em Ponte Circuito cuja aparência lembra um losango e no qual não existem dois elementos em série ou paralelo.

Configuração Delta (Δ) ou Pi (π) Circuito formado por três ramos, que possui a aparência da letra grega delta (Δ) ou da letra grega pi (π).

Configuração Ípsilon (Y) ou Tê (T) Circuito formado por três ramos, que possui a aparência da letra Y ou da letra T.

Corrente de Malha Corrente que associamos a cada malha distinta de um circuito que pode, individualmente ou em combinação com outras correntes de malha, definir todas as correntes nos ramos do circuito.

Fontes de Corrente Fontes que fornecem uma corrente fixa a um circuito e cuja tensão entre os terminais depende do circuito ao qual estão conectadas.

Método das Correntes nos Ramos Técnica para determinar as correntes nos ramos de um circuito com mais de uma malha.

Método das Malhas Técnica para determinar as correntes de malha de um circuito que resulta em um número reduzido de equações, quando comparado com o método das correntes dos ramos.

Método dos Determinantes Técnica matemática para encontrar as soluções de duas ou mais equações lineares simultâneas.

Método dos Nós Técnica para determinar as tensões nodais de um circuito.

Nó Uma junção de dois ou mais ramos em um circuito.

```
For the network of Fig. 9.122
enter the following data:

R1=? 6
R2=? 3
R3=? 8
RL=? 10
Supply voltage, E=? 48
and supply current,  I=? 2

Using Thevenin's Theorem:
Rth= 10 ohms
and Eth= 20 volts

       RL        IL          VL          PL          PD          n%
       2         1.666667    3.333333    5.555556    33.33333    16.66667
       4         1.428572    5.714286    8.163265    28.57143    28.57143
       6         1.25        7.5         9.375       25          37.5
       8         1.111111    8.888889    9.876544    22.22222    44.44445
Rth=   10        1           10          10          20          50
       12        .9090909    10.90909    9.917356    18.18182    54.54546
       14        .8333333    11.66667    9.722221    16.66667    58.33333
       16        .7692308    12.30769    9.467456    15.38462    61.53847
       18        .7142858    12.85714    9.183674    14.28572    64.28571
       20        .6666667    13.33333    8.888889    13.33333    66.66666
```

Fig. 9.123 *Arquivos de entrada e de saída em BASIC para o circuito da Fig. 9.122. (continuação)*

uma tabela de valores dos parâmetros de saída que vai de $R_{Th}/5$ até $2R_{Th}$ em incrementos de $R_{Th}/5$ (linha 330). Como R_{Th} vale 10 Ω, a faixa de variação de R_C vai de 2 Ω a 20 Ω em intervalos de 2 Ω. As linhas de 130 a 180 solicitam os parâmetros do circuito, enquanto as linhas de 200 a 210 calculam R_{Th}. A determinação de E_{Th} é feita da linha 220 à linha 260 utilizando o teorema da superposição; a impressão de E_{Th} e R_{Th} é feita da linha 270 até a linha 290. As linhas 310 e 320 criam um cabeçalho para a listagem, com o comando TAB simplesmente especificando a margem esquerda do texto e os espaços entre as colunas. A faixa de variação de R_C é especificada na linha 330, e todos os cálculos necessários são efetuados nas linhas de 340 a 360. A linha 390 especifica que se R_C foi igual a R_{Th} o comentário "R_{Th} =" deverá ser introduzido no início da linha correspondente, como vemos na figura. As linhas 400 e 410 efetuam a impressão dos valores de todas as grandezas, enquanto a linha 420 envia o programa de volta à linha 330 para repetir os cálculos com o valor seguinte de R_C.

Note que obtemos a potência máxima quando $R_C = R_{Th} = 10$ Ω, e nestas condições temos uma eficiência de 50%. PF simboliza a potência fornecida pela fonte, enquanto PL simboliza a potência recebida pela carga.

PROBLEMAS

SEÇÃO 9.2 Teorema da Superposição

1. **a.** Utilizando o teorema da superposição, calcule as correntes nos resistores do circuito da Fig. 9.124.
   b. Calcule as potências fornecidas pelas duas fontes a R_1.
   c. Utilizando o valor da corrente total que atravessa R_1, calcule a potência total dissipada por R_1.
   d. Podemos aplicar a superposição para calcular esta potência? Explique.
2. Calcule a corrente I no resistor de 10 Ω, usando o teorema da superposição, para os circuitos na Fig. 9.125.

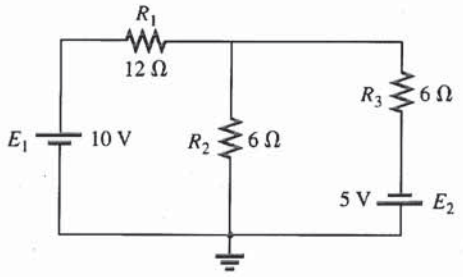


Fig. 9.124 *Problema 1.*

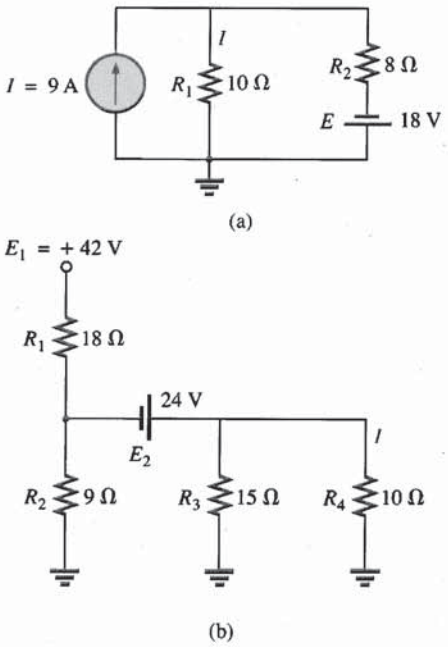


Fig. 9.125 *Problemas 2, 37 e 44.*

*3. Obtenha, utilizando o teorema da superposição, a corrente em R_1 nos circuitos da Fig. 9.126.

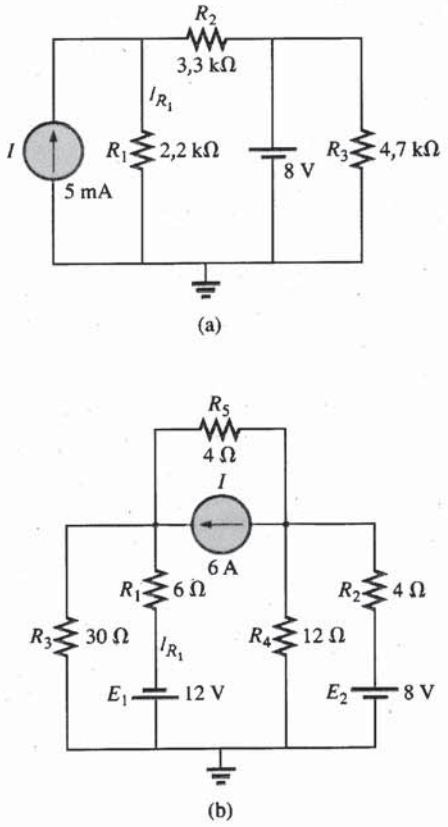


Fig. 9.126 *Problema 3.*

4. Calcule a tensão V_2 no circuito da Fig. 9.127, usando o teorema da superposição.

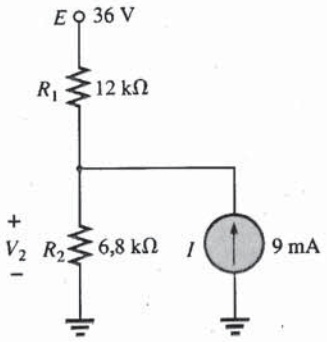


Fig. 9.127 *Problemas 4 e 40.*

SEÇÃO 9.3 Teorema de Thévenin

5. **a.** Desenhe o circuito equivalente de Thévenin para o circuito externo ao resistor R da Fig. 9.128.
b. Calcule a corrente em R para R igual a 2,30 e 100 Ω.

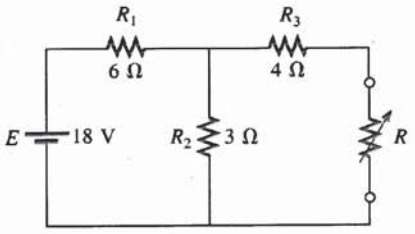


Fig. 9.128 *Problema 5.*

6. **a.** Desenhe o circuito equivalente de Thévenin para o circuito externo ao resistor R nos circuitos da Fig. 9.129.
b. Calcule a potência fornecida a R para R igual a 2 Ω e 100 Ω.

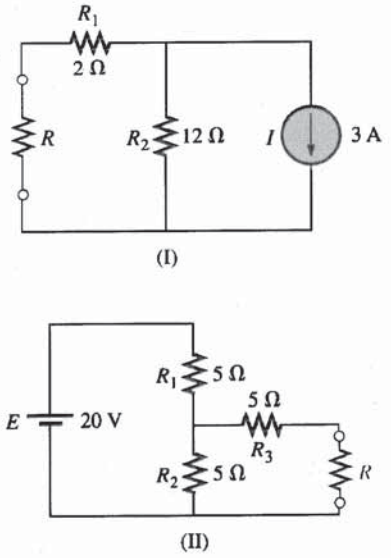


Fig. 9.129 *Problemas 6, 13, 19 e 38.*

7. Desenhe o circuito equivalente de Thévenin para o circuito externo ao resistor R nos circuitos da Fig. 9.130.

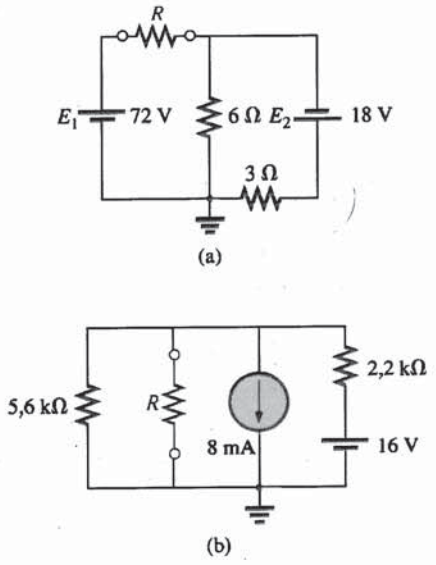


Fig. 9.130 *Problemas 7, 14 e 20.*

*8. Desenhe o circuito equivalente de Thévenin para o circuito externo ao resistor R nos circuitos da Fig. 9.131.

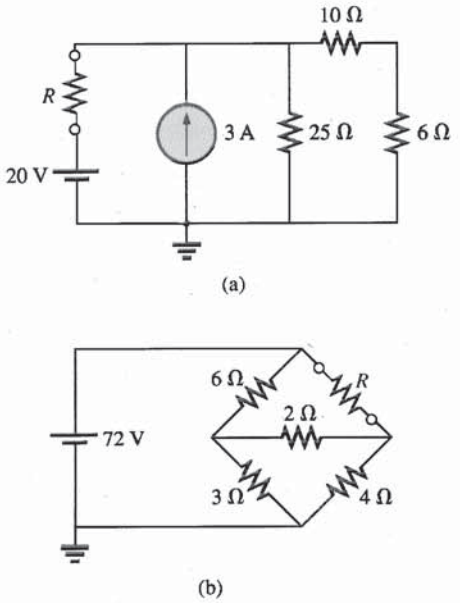


Fig. 9.131 *Problemas 8, 15, 21, 39, 41, 42 e 45.*

*9. Desenhe o circuito equivalente de Thévenin para as partes dos circuitos da Fig. 9.132 externas aos pontos a e b.

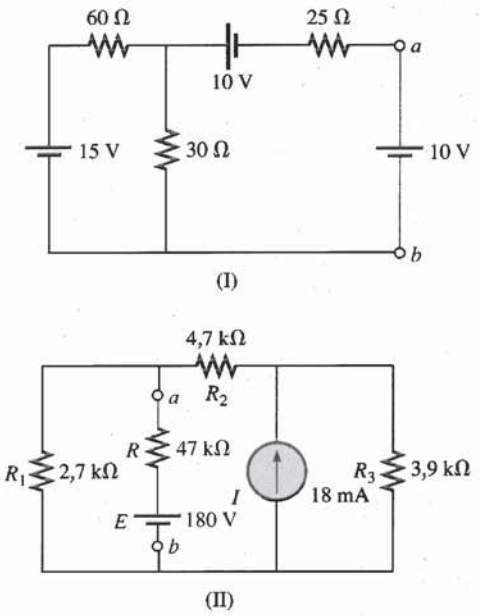


Fig. 9.132 *Problemas 9 e 16.*

*10. Desenhe o circuito equivalente de Thévenin para o circuito externo ao resistor R nos circuitos da Fig. 9.133.

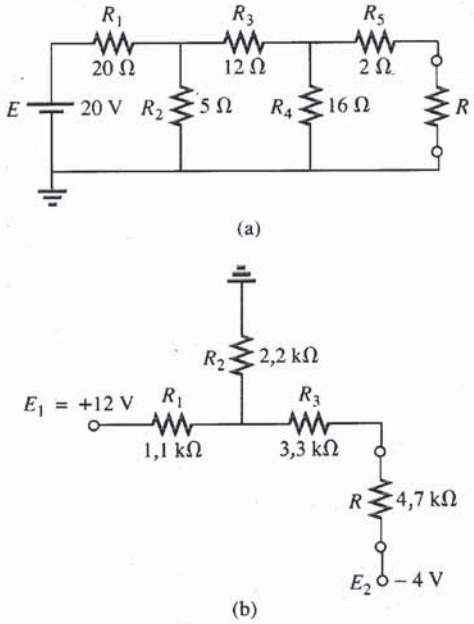


Fig. 9.133 *Problemas 10 e 17.*

*11. Desenhe o circuito equivalente de Thévenin para a parte do circuito externa ao resistor de carga R_C da Fig. 9.134.

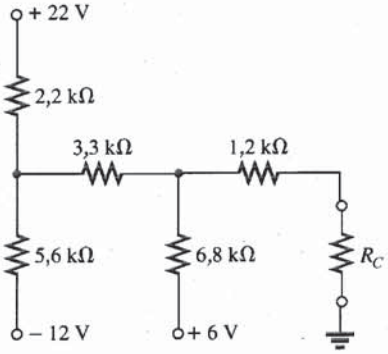


Fig. 9.134 *Problema 11.*

*12. Para o circuito com um transistor da Fig. 9.135,

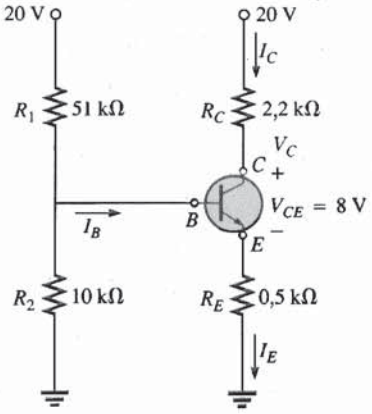


Fig. 9.135 *Problema 12.*

a. Desenhe o circuito equivalente de Thévenin para a parte do circuito à esquerda do terminal da base (B).
b. Sabendo que $I_C = I_E$ e $V_{CE} = 8$ V, calcule I_E.
c. Usando os resultados das partes (a) e (b), calcule a corrente de base I_B para $V_{BE} = 0{,}7$ V.
d. Qual o valor da tensão V_C?

SEÇÃO 9.4 Teorema de Norton

13. Desenhe o circuito equivalente de Norton para o circuito externo ao resistor R nos circuitos da Fig. 9.129.
14. a. Encontre o equivalente de Norton para o circuito externo ao resistor R nos circuitos da Fig. 9.130.
    b. Faça a conversão para o circuito equivalente de Thévenin e compare os valores assim obtidos de E_{Th} e R_{Th} com os encontrados no Problema 7.
15. Desenhe o circuito equivalente de Thévenin para a parte do circuito externa ao resistor R nos circuitos da Fig. 9.131.
16. a Desenhe o circuito equivalente de Thévenin para a parte do circuito externa ao resistor R nos circuitos da Fig. 9.132.
    b. Faça a conversão para o circuito equivalente de Thévenin e compare os valores assim obtidos de E_{Th} e R_{Th} com os encontrados no Problema 9.
17. Desenhe o circuito equivalente de Norton para a parte do circuito externa ao resistor R nos circuitos da Fig. 9.133.
18. Desenhe o circuito equivalente de Norton para as partes dos circuitos da Fig. 9.136 externas ao ramo *ab*.

SEÇÃO 9.5 Teorema da Transferência Máxima de Potência

19. a. Encontre, para os circuitos da Fig. 9.129, o valor de R que torna máxima a potência dissipada em R.
    b. Calcule o valor desta potência para cada circuito.
20. a. Encontre, nos circuitos da Fig. 9.130, o valor de R que torna máxima a potência dissipada em R.
    b. Calcule o valor desta potência para cada circuito.
21. Para os circuitos da Fig. 9.131, encontre o valor de R que torna máxima a potência dissipada em R e o valor desta potência.

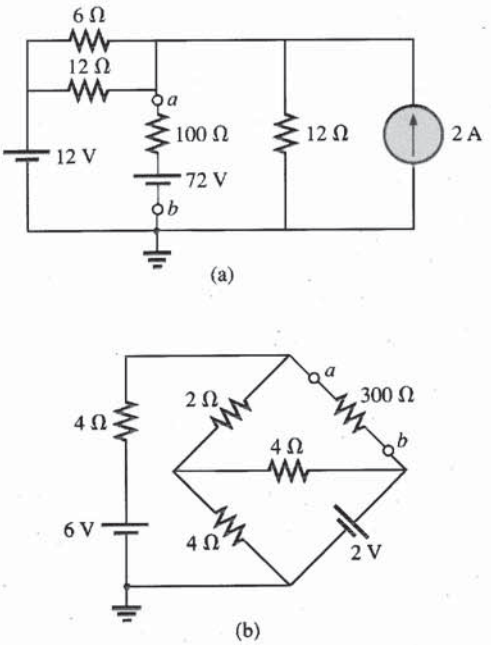


Fig. 9.136 *Problemas 18 e 43.*

22. a. No circuito da Fig. 9.137, calcule o valor de R que torna máxima a potência dissipada em R.
    b. Determine o valor desta potência.
    c. Trace um gráfico da potência dissipada em R em função de R para R igual a ¼, ½, ¾, 1, 1 ¼, 1 ½, 1 ¾ e 2 vezes o valor obtido no item (a).

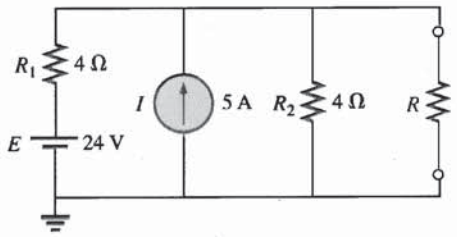


Fig. 9.137 *Problemas 22 e 46.*

*23. Determine a resistência R_1 na Fig. 9.138 para que a potência dissipada em R_4 seja máxima. Pense!

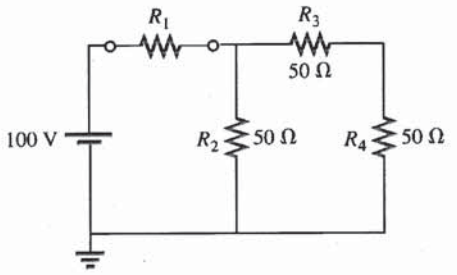


Fig. 9.138 *Problema 23.*

*24. a. Qual o valor de R_2 na Fig. 9.139 para que a potência dissipada em R_4 seja máxima?
    b. É possível fazer alguma afirmativa geral acerca de situações como as descritas neste problema e no anterior?

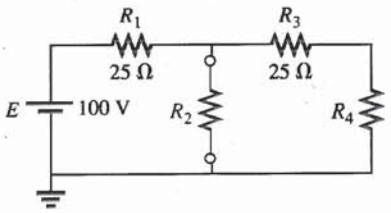


Fig. 9.139 *Problema 24.*

25*. Determine o valor de R no circuito da Fig. 9.140 que torna máxima a potência fornecida ao resistor de 100 Ω.

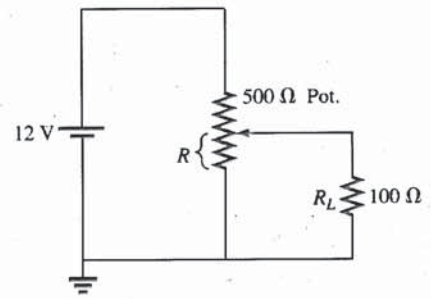


Fig. 9.140 *Problema 25.*

SEÇÃO 9.6 Teorema de Millman

26. Calcule, usando o teorema de Millman, a tensão entre os terminais de R_C e a corrente que o atravessa, no circuito da Fig. 9.141.

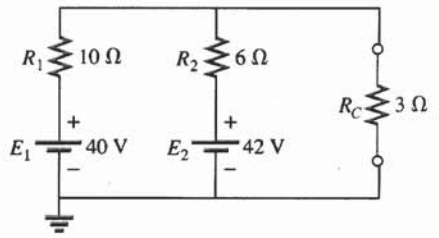


Fig. 9.141 *Problema 26.*

27. Repita o Problema 26 para o circuito da Fig. 9.142.

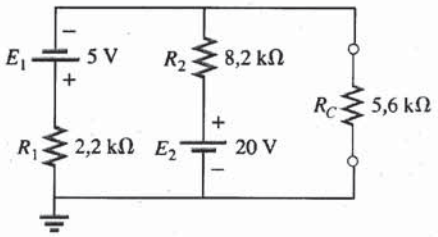


Fig. 9.142 *Problema 27.*

28. Repita o Problema 26 para o circuito da Fig. 9.143.

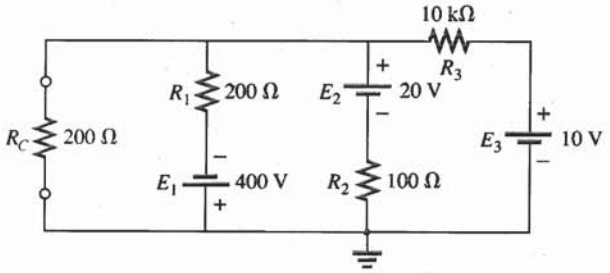


Fig. 9.143 *Problema 28.*

29. Utilizando o dual do teorema de Millman, calcule a corrente no resistor R_C na Fig. 9.144 e a ddp entre seus terminais.

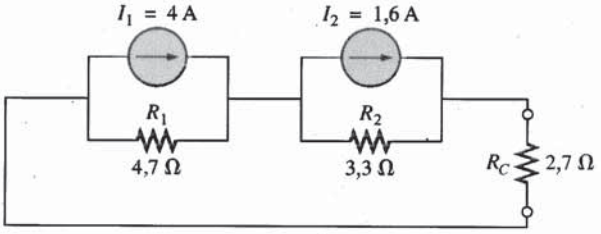


Fig. 9.144 *Problema 29.*

***30.** Refaça o Problema 29 para o circuito da Fig. 9.145.

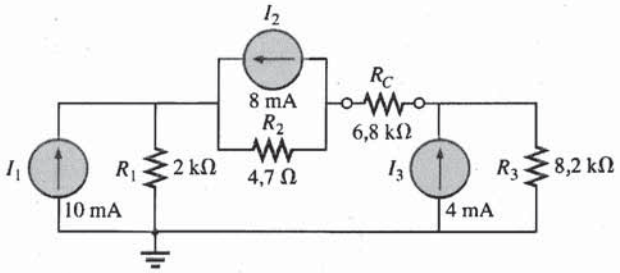


Fig. 9.145 *Problema 30.*

SEÇÃO 9.7 Teorema da Substituição

31. Usando o teorema da substituição, desenhe três ramos equivalentes ao ramo *ab* do circuito da Fig. 9.146.

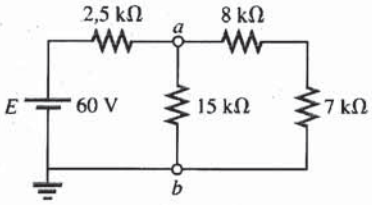


Fig. 9.146 *Problema 31.*

32. Repita o Problema 31 para o circuito da Fig. 9.147.

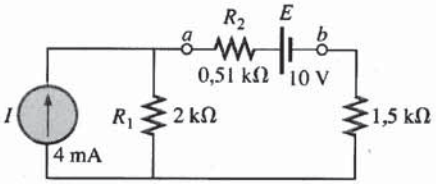


Fig. 9.147 *Problema 32.*

***33.** Repita o Problema 31 para o circuito da Fig. 9.148. Cuidado!

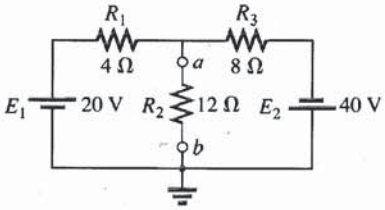


Fig. 9.148 *Problema 33.*

SEÇÃO 9.8 Teorema da Reciprocidade

34. **a.** Determine a corrente I no circuito da Fig. 9.149(a).
b. Repita o item (a) para o circuito da Fig. 9.149(b).
c. Suas respostas são compatíveis com o teorema da reciprocidade?

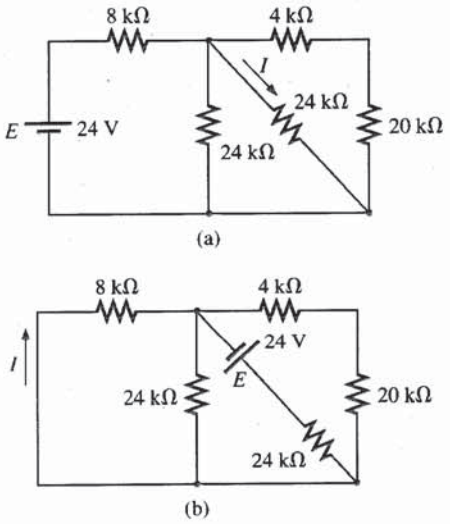


Fig. 9.149 *Problema 34.*

35. Repita o Problema 34 para os circuitos da Fig. 9.150.

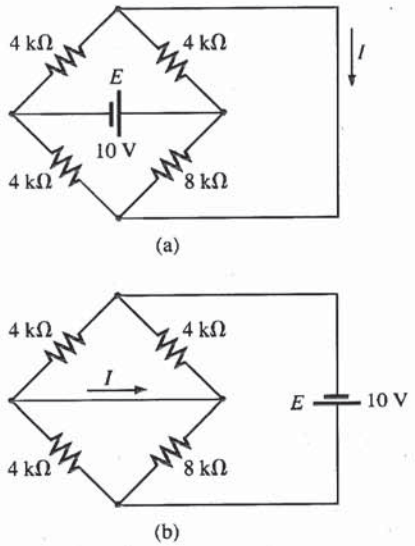


Fig. 9.150 *Problema 35.*

36. **a.** Determine a tensão V para o circuito da Fig. 9.151(a).
b. Repita o item (a) para o circuito da Fig. 9.151(b).
c. Suas soluções concordam com o dual do teorema da reciprocidade?

SEÇÃO 9.9 Análise Computacional

PSpice (DOS)

37. Escreva o arquivo de entrada necessário para calcular a corrente I e as correntes parciais que a constituem no circuito da Fig. 9.125(b), usando o teorema da superposição.

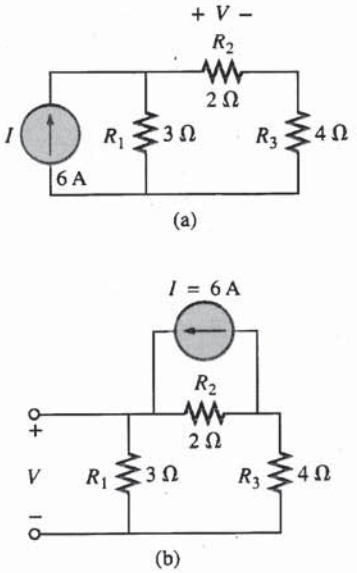


Fig. 9.151 *Problema 36.*

38. Escreva o arquivo de entrada necessário para determinar o circuito equivalente de Thévenin para a parte do circuito da Fig. 9.192(II) externa ao resistor R.
39. Escreva o arquivo de entrada necessário para determinar o circuito equivalente de Norton do circuito externo ao resistor R na Fig. 9.131(a).

PSpice (Windows)

40. Determine, utilizando um esquema, a tensão V_2 e as tensões parciais que para ela contribuem no circuito da Fig. 9.127.
41. Utilizando um esquema, determine o circuito equivalente de Thévenin para o circuito da Fig. 9.131(b).
***42.** **a.** Utilizando um esquema, obtenha o gráfico da potência fornecida ao resistor R da Fig. 9.131(a), para R variando de 1 a 50 Ω.
b. Determine, a partir do gráfico, o valor de R que torna máxima a potência dissipada por R e o valor desta potência.
c. Compare os resultados da parte (a) com a solução numérica
d. Construa o gráfico V_R e I_R em função de R e determine seus valores quando a potência fornecida a R é máxima.
***43.** Substitua o resistor de 300 Ω da Fig. 9.131(b) por um resistor variável e faça um gráfico da potência dissipada por ele em função do seu valor. Determine a faixa de valores para a resistência por tentativa e erro em vez de resolver o circuito analiticamente. Use os resultados para determinar o circuito equivalente de Norton. A corrente de Norton pode ser obtida a partir da máxima potência transferida para a carga.

Linguagens de Programação (C++ , BASIC, PASCAL etc.)

44. Escreva um programa para determinar a corrente no resistor de 10 Ω da Fig. 9.125(a) (para quaisquer valores dos componentes) utilizando o teorema de superposição.
45. Escreva um programa para resolver o Problema 8, circuito (b), para quaisquer valores dos componentes.
***46.** Escreva um programa para resolver o Problema 22 e montar uma tabela da potência dissipada em R para os valores enumerados no item (c).

GLOSSÁRIO

.PROBE Comando do PSpice para obter arquivos de saída contendo gráficos e valores que não seriam obtidos de outro modo.

Teorema de Millman Método que emprega conversões de fonte para determinar variáveis desconhecidas em circuitos com várias malhas.

Teorema de Norton Teorema que permite reduzir qualquer circuito de corrente contínua linear de dois terminais a uma fonte de corrente e um resistor em paralelo.

Teorema da reciprocidade Teorema segundo o qual, em circuitos com uma única fonte, a corrente em qualquer ramo é igual à corrente no ramo onde a fonte estava originalmente, se esta mesma fonte for transferida para o ramo em que a corrente foi medida inicialmente.

Teorema da substituição Teorema segundo o qual se a corrente que atravessa qualquer ramo de um circuito de corrente contínua bilateral e a ddp entre os terminais deste ramo são conhecidas, podemos substituí-lo por qualquer combinação de elementos que mantenha inalteradas a corrente e a ddp.

Teorema da superposição Teorema aplicável a circuitos lineares, segundo o qual podemos considerar os efeitos de cada fonte de modo independente. A tensão e a corrente resultantes são obtidas através da soma algébrica das correntes e das tensões produzidas individualmente pelas fontes.

Teorema da transferência máxima de potência Teorema usado para determinar a resistência de uma carga para que a potência fornecida a esta mesma carga seja máxima.

Teorema de Thévenin Teorema que permite a redução de qualquer circuito de corrente contínua linear de dois terminais a uma fonte de tensão e um resistor em série.

Apêndice I

RESPOSTAS DE ALGUNS PROBLEMAS SELECIONADOS COM NUMERAÇÃO ÍMPAR

Capítulo 1

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

Capítulo 2

3. **(a)** 18 mN **(b)** 2 mN
(c) 180 μN
7. **(a)** 72 mN
(b) $Q_1 = 20\ \mu$C, $Q_2 = 40\ \mu$C
9. 3,1 A
11. 90 C
13. 0,5 A
15. 1,194 A > 1 A (sim)
17. **(a)** 1,248 milhões
(b) 0,936 milhões. A opção (a).
19. 252 J
21. 4 C
23. 3,533 V
25. 5 A
27. 25 h
29. 0,773 h
31. a de 60 Ah pode fornecer 50% mais corrente.
33. 545,45 mA, 129,6 kJ
43. 600 C

Capítulo 3

1. **(a)** 500 mils **(b)** 10 mils
(c) 4 mils **(d)** 1000 mils
(e) 240 mils **(f)** 3,937 mils
3. **(a)** 0,04 in. **(b)** 0,03 in.
(c) 0,2 in. **(d)** 0,025 in.
(e) 0,00278 in. **(f)** 0,009 in.
5. 73,33 Ω
7. 3,581 ft
9. **(a)** $R_{\text{prata}} > R_{\text{cobre}} > R_{\text{alumínio}}$
(b) prata 9,9 Ω,
cobre 1,037 Ω,
alumínio 0,34 Ω
11. **(a)** 21,71 $\mu\Omega$ **(b)** 35,59 $\mu\Omega$
(c) aumenta **(d)** diminui
13. 942,28 mΩ
15. **(a)** #8:1,1308 Ω, #18:11,493 Ω
(b) #18:#8 = 10,164:1 ≅ 10:1,
#18:#8 = 1:10,164 ≅ 1:10
17. **(a)** 1,087 mA/CM
(b) 1,384 kA/in.^{2}
(c) 3,6127 in.^{2}
19. **(a)** 21,71 $\mu\Omega$ **(b)** 35,59 $\mu\Omega$
21. 0,15 in.
23. 2,409 Ω
25. 3,67 Ω
27. 0,046 Ω
29. **(a)** 40,29°C **(b)** −195,61°C
31. **(a)** $\alpha_{20} \cong 0{,}00393$
(b) 83,61°C
33. 1,751 Ω
35. 142,86
41. −30°C:10,2 kΩ,
100°C:10,15 kΩ
43. 6,5 kΩ
47. **(a)** Vermelho Vermelho Marrom Prateado
(b) Amarelo Violeta Vermelho Prateado
(c) Azul Cinza Laranja Prateado
(d) Branco Marrom Verde Prateado
49. sim
51. **(a)** 0,1566 S **(b)** 0,0955 S
(c) 0,0219 S
57. **(a)** 10 fc:3 kΩ, 100 fc:0,4 kΩ
(b) neg. (c) não-escalas logarítmicas
(d) −321,43 Ω/fc

Capítulo 4

1. 15 V
3. 4 kΩ
5. 72 mV
7. 54,55 Ω
9. 28,571 Ω
11. 1,2 kΩ
13. **(a)** 12,632 Ω **(b)** 4,1 MJ
17. 800 V
19. 1 W
21. **(a)** 57.600 J
(b) 16×10^{-3} kWh
23. 2 s
25. 196 μW
27. 4 A
29. 9,61 V
31. 0,833 A, 144,06 Ω
33. **(a)** 0,133 mA **(b)** 66,5 mAh
35. **(c)** ≅ 70,7 mA
37. **(a)** 12 kW
(b) 10.130 W < 12.000 W (sim)
39. 16,34 A
41. **(a)** 238 W **(b)** 17,36%
43. **(a)** 1657,78 W
(b) 15,07 A
(c) 19,38 A
45. 65,25%
47. 80%
49. **(a)** 17,9%
(b) 76,73%, 328,66% de aumento
51. **(a)** 1350 J
P **(b)** *W* dobra, *P* permanece a mesma
53. 6,67 h
55. **(a)** 50 kW **(b)** 240,38 A
(c) 90 kWh
57. $2,19

Capítulo 5

1. **(a)** 20 Ω, 3 A
(b) 1,63 MΩ, 6,135 μA
(c) 110 Ω, 318,2 mA
(d) 10 kΩ, 12 mA

3. (a) 16 V (b) 4,2 V
5. (a) 0,388 A (CW)
(b) 2,087 A (CCW)
7. (a) 5 V (b) 70 V
9. 3,28 mA, 7,22 V
11. (a) 70,6 Ω, 85 mA (CCW),
$V_1 = 2{,}8045$ V,
$V_2 = 0{,}4760$ V,
$V_3 = 0{,}850$ V,
$V_4 = 1{,}870$ V
(b)–(c) $P_1 = 0{,}2384$ W,
$P_2 = 0{,}0405$ W,
$P_3 = 0{,}0723$ W,
$P_4 = 0{,}1590$ W
(d) $\frac{1}{2}$ W (todos)
13. (a) 225 Ω, 0,533 A
(b) 8 W
(c) 15 V
15. Todos $V_{\substack{ab \\ +-}}$
(a) 66,67 V (b) −8 V
(c) 20 V (d) 0,18 V
17. (a) 12 V (b) 24 V
(c) 60 Ω (d) 0,4 A
(e) 60 Ω
19. (a) $R_s = 80\ \Omega$
(b) 0,2 W < $\frac{1}{4}$ W
21. $R_1 = 3$ kΩ, $R_2 = 15$ kΩ
23. (a) $R_1 = 0{,}4$ kΩ, $R_2 = 1{,}2$ kΩ,
$R_3 = 4{,}8$ kΩ
(b) $R_1 = 0{,}4$ MΩ,
$R_2 = 1{,}2$ MΩ,
$R_3 = 4{,}8$ MΩ
25. (a) I (sentido horário) = 6,667 A,
$V = 20$ V
(b) I (sentido horário) = 1 A,
$V = 10$ V
27. (a) 20 V, 26 V, 35 V,
−12 V, 0 V
(b) −6 V, −47 V, 9 V
(c) −15 V, −38 V
29. $V_0 = 0$ V, $V_4 = 10$ V,
$V_7 = 4$ V, $V_{10} = 20$ V,
$V_{23} = 6$ V, $V_{30} = -8$ V,
$V_{67} = 0$ V, $V_{56} = -6$ V,
I(para cima) = 1,5 A
31. 2 Ω
33. 100 Ω
35. 1,52%

Capítulo 6

1. (a) 2, 3, 4 (b) 2, 3 (c) 1, 4
3. (a) 6 Ω, 0,1667 S
(b) 1 kΩ, 1 mS
(c) 2,076 kΩ, 0,4817 mS
(d) 1,333 Ω, 0,75 S
(e) 9,948 Ω, 100,525 mS
(f) 0,6889 Ω, 1,4516 S
5. (a) 18 Ω (b) $R_1 = R_2 = 24\ \Omega$
7. 120 Ω
9. (a) 0,8571 Ω, 1,1667 S
(b) $I_s = 1{,}05$ A, $I_1 = 0{,}3$ A,
$I_2 = 0{,}15$ A, $I_3 = 0{,}6$ A
(d) $P_1 = 0{,}27$ W,
$P_2 = 0{,}135$ W,
$P_3 = 0{,}54$ W,
$P_{\text{del.}} = 0{,}945$ W
(e) $R_1, R_2 = \frac{1}{2}$ W, $R_3 = 1$ W
11. (a) 66,67 mA (b) 225 Ω
(c) 8 W
13. (a) $I_s = 7{,}5$ A, $I_1 = 1{,}5$ A
(b) $I_s = 9{,}6$ mA, $I_1 = 0{,}8$ mA
15. 1260 W
17. (a) 4 mA (b) 24 V
(c) 18,4 mA
19. (a) $I_1 = 3$ mA, $I_2 = 1$ mA,
$I_3 = 1{,}5$ mA
(b) $I_2 = 4\ \mu$A, $I_3 = 1{,}5\ \mu$A,
$I_4 = 5{,}5\ \mu$A, $I_1 = 6\ \mu$A
21. (a) $R_1 = 5\ \Omega$, $R_2 = 10\ \Omega$
(b) $E = 12$ V, $I_2 = 1{,}333$ A,
$I_3 = 1$ A, $R_3 = 12\ \Omega$,
$I = 4{,}333$ A
(c) $I_1 = 64$ mA, $I_3 = 16$ mA,
$I_2 = 20$ mA, $R = 3{,}2$ kΩ,
$I = 36$ mA
(d) $E = 30$ V, $I_1 = 1$ A,
$I_2 = I_3 = 0{,}5$ A,
$R_2 = R_3 = 60\ \Omega$,
$P_{R_2} = 15$ W
23. (a) $I_1 = 4$ A, $I_2 = 8$ A
(b) $I_1 = 2$ A, $I_2 = 4$ A,
$I_3 = 1$ A, $I_4 = 1{,}333$ A
(c) $I_1 = 272{,}73$ mA,
$I_2 = 227{,}27$ mA,
$I_3 = 90{,}91$ mA,
$I_4 = 500$ mA
(d) $I_2 = 4{,}5$ A, $I_3 = 8{,}5$ A,
$I_4 = 8{,}5$ A
25. (a) $I = 4$ A, $I_2 = 4$ A,
$I_1 = 3$ A
27. $R_1 = 6$ kΩ, $R_2 = 1{,}5$ kΩ,
$R_3 = 0{,}5$ kΩ
29. $I = 3$ A, $R = 2\ \Omega$
31. (a) 6,13 V
(b) 9 V
(c) 9 V
33. (a) 4 V (b) 3,997 V
(c) 3,871 V (d) 3 V
(e) R_m deve ser a maior possível
35. Não! A polaridade da fonte de 4V está invertida.

Capítulo 7

1. (a) em série: E, R_1, e R_4,
em paralelo: R_2 e R_3
(b) em série: E e R_1,
em paralelo: R_2 e R_3
(c) em série: E, R_1, e R_5;
R_3 e R_4
em paralelo: nenhum elemento
(d) em série: R_6 e R_7,
em paralelo: E, R_1, e R_4;
R_2 e R_5
3. (a) sim (LKC) (b) 3 A
(c) sim (LKC) (d) 4 V
(e) 2 Ω (f) 5 A
(g) $P_1 = 12$ W, $P_2 = 18$ W,
$P_{\text{def.}} = 50$ W
5. (a) 4 Ω
(b) $I_s = 9$ A, $I_1 = 6$ A, $I_2 = 3$ A
(c) 6 V
7. $I_1 = 6$ A, $I_2 = 16$ A, $I_3 = 0{,}8$ A,
$I = 22$ A
9. (a) 4 A
(b) $I_2 = 1{,}333$ A, $I_3 = 0{,}6665$ A
(c) $V_a = 8$ V, $V_b = 4$ V
11. (a) 5 Ω, 16 A
(b) $I_{R_2} = 8$ A, $I_3 = I_9 = 4$ A
(c) $I_8 = 1$ A (d) 14 V
13. (a) $V_G = 1{,}9$ V, $V_s = 3{,}65$ V
(b) $I_1 = I_2 = 7{,}05\ \mu$A,
$I_D = 2{,}433$ mA
(c) 6,268 V
(d) 8,02 V
15. (a) 0,6 A
(b) 28 V
17. (a) $I_2 = 1{,}667$ A, $I_6 = 1{,}111$ A,
$I_8 = 0$ A
19. (a) 1,882 Ω
(b) $V_1 = V_4 = 32$ V
(c) 8 A ←
(d) 1,882 Ω
21. (a) 6,75 A
(b) 32 V
23. 8,333 Ω
25. (a) 24 A
(b) 8 A
(c) $V_3 = 48$ V, $V_5 = 24$ V,
$V_7 = 16$ V
(d) $P(R_7) = 128$ W,
$P(E) = 5760$ W
27. 4,44 W
29. (a) 64 V
(b) $R_{L_2} = 4$ kΩ,
$R_{L_3} = 3$ kΩ
(c) $R_1 = 0{,}5$ kΩ,
$R_2 = 1{,}2$ kΩ,
$R_3 = 2$ kΩ
31. (a) sim (b) $R_1 = 750\ \Omega$,
$R_2 = 250\ \Omega$
(c) $R_1 = 745\ \Omega$, $R_2 = 255\ \Omega$
33. (a) 1 mA (b) $R_{\text{derivação}} = 5$ mΩ
35. (a) $R_s = 300$ kΩ,
(b) 20.000
37. 0,05 μA

Capítulo 8

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

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

Capítulo 9

1. (a) Sentido horário: $I_{R_1} = \frac{5}{6}$ A, $I_{R_2} = 0$ A,
Sentido horário: $I_{R_3} = \frac{5}{6}$ A
(b) E_1: 5,33 W, E_2: 0,333 W
(c) 8,333 W (d) não
3. (a) para baixo: 4,4545 mA
(b) para baixo: 3,11 A
5. (a) 6 Ω, 6 V
(b) 2 Ω: 0,75 A,
30 Ω: 0,1667 A,
100 Ω: 0,0566 A
7. (I) 2 Ω, 84 V (II) 1,579 kΩ, −1,149 V
9. (I) 45 Ω, −5 V (II) 2,055 kΩ, 16,772 V
11. 4,041 kΩ, 9,733 V
13. (I): 14 Ω, 2,571 A,
(II): 7,5 Ω, 1,333 A
15. (a) 9,756 Ω, 0,95 A
(b) 2 Ω, 30 A
17. (a) 10 Ω, 0,2 A
(b) 4,033 kΩ, 2,9758 mA
19. (I) (a) 14 Ω
(b) 23,14 W
(II) (a) 7,5 Ω
(b) 3,33 W
21. (a) 9,756 Ω, 2,2 W
(b) 2 Ω, 450 W
23. 0 Ω
25. 500 Ω
27. 39,3 μA, 220 mV
29. 2,25 A, 6,075 V
35. (a) 0,357 mA (b) 0,357 mA
(c) sim

Capítulo 10

1. 9×10^3 N/C
3. 70 μF
5. 50 V/m
7. 8×10^3 V/m
9. 937,5 pF
11. mica
13. (a) 10^6 V/m (b) 4,96 μC
(c) 0,0248 μF
15. 29.035 V
17. (a) 0,5 s (b) $20(1 - e^{-t/0,5})$
(c) 1τ: 12,64 V, 3τ: 19 V,
5τ: 19,87 V
(d) $i_C = 0{,}2 \times 10^{-3} e^{-t/0,5}$
$v_R = 20e^{-t/0,5}$
19. (a) 5,5 ms
(b) $100(1 - e^{-t/(5,5\times10^{-3})})$
(c) 1τ: 63,21 V, 3τ: 95,02 V,
5τ: 99,33 V
(d)
$i_C = 18{,}18 \times 10^{-3} e^{-t/(5,5\times10^{-3})}$
$v_R = 60e^{-t/(5,5\times10^{-3})}$
21. (a) 10 ms
(b) $50(1 - e^{-t/(10\times10^{-3})})$
(c) $10 \times 10^{-3} e^{-t/(10\times10^{-3})}$
(d) $v_C \cong 50$ V, $i_C = 0$ A
(e) $v_C = 50e^{-t/(4\times10^{-3})}$
$i_C = -25 \times 10^{-3} e^{-t/(4\times10^{-3})}$
23. (a) $80(1 - e^{-t/(1\times10^{-6})})$
(b) $0{,}8 \times 10^{-3} e^{-t/(1\times10^{-6})}$
(c) $v_C = 80e^{-t/(4,9\times10^{-6})}$
$i_C = 0{,}163 \times 10^{-3} e^{-t/(4,9\times10^{-6})}$

25. **(a)** 10 μs **(b)** 3 kA **(c)** sim
27. **(a)** $v_C = 52\text{ V} - 40\text{ V}\,e^{-t/123{,}8\text{ms}}$
$i_C = 2{,}198\text{ mA}\,e^{-t/123{,}8\text{ms}}$
29. 1,386 μs
31. $R = 54{,}567\text{ k}\Omega$
33. **(a)** $v_C = 60(1 - e^{-t/0{,}2\text{s}})$,
0,5 s: 55,07 V, 1 s: 59,596 V
$i_C = 60 \times 10^{-3}\,e^{-t/0{,}2\text{s}}$
0,5 s: 4,93 mA,
1 s: 0,404 mA
$v_{R_1} = 60\,e^{-t/0{,}2\text{s}}$
0,5 s: 4,93 V, 1 s: 0,404 V
(b) $t = 0{,}405$ s; mais 1,387 s
35. **(a)** 19,634 V
(b) 2,31 s
(c) 1,155 s
37. **(a)** $v_C = 3{,}275(1 - e^{-t/52{,}68\text{ms}})$
$i_C = 1{,}216 \times 10^{-3}\,e^{-t/52{,}68\text{ms}}$
39. **(a)** $v_C = 27{,}2 - 25{,}2\,e^{-t/18{,}26\text{ms}}$
$i_C = 3{,}04\text{ mA}\,e^{-t/18{,}26\text{ms}}$
41. 0–4 ms: 0,3 mA,
4–6 ms: 0,9 mA,
6–7 ms: 3 mA,
7–10 ms: 0 mA,
10–13 ms: −3,2 mA,
13–15 ms: 1,8 mA
43. 0–4 ms: 0 V,
4–6 ms: −8 V,
6–16 ms: 20 V,
16–18 ms: 0 V,
18–20 ms: −12 V,
20–25 ms: 0 V
45. $V_1 = 10$ V, $Q_1 = 60\ \mu$C,
$V_2 = 6{,}67$ V, $Q_2 = 40\ \mu$C,
$V_3 = 3{,}33$ V, $Q_3 = 40\ \mu$C
47. **(a)** 56,54 V
(b) 42,405 V
(c) 14,135 V
(d) 43,46 V
(e) 433,44 ms
49. 8640 pJ
51. **(a)** 5 J
(b) 0,1 C
(c) 200 A
(d) 10 kW
(e) 10 s

Capítulo 11

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

Capítulo 12

1. 4,25 V
3. 14 espiras
5. 15,65 μH
7. **(a)** 2,5 V **(b)** 0,3 V
(c) 200 V
9. 0–3 ms: 0 V, 3–8 ms: 1,6 V,
8–13 ms: −1,6 V,
13–14 ms: 0 V,
14–15 ms: 8 V,
15–16 ms: −8 V,
16–17 ms: 0 V
11. 0–5 μs: 4 mA, 10 μs: −8 mA,
12 μs: 4 mA, 12–16 μs: 4 mA,
24 μs: 0 mA
13. **(a)** 2,27 μs
(b) $5{,}45 \times 10^{-3}(1 - e^{-t/2{,}27\mu\text{s}})$
(c) $v_L = 12e^{-t/2{,}27\mu\text{s}}$
$v_R = 12(1 - e^{-t/2{,}27\mu\text{s}})$
(d) i_L: $1\tau = 3{,}45$ mA,
$3\tau = 5{,}179$ mA,
$5\tau = 5{,}413$ mA,
v_L: $1\tau = 4{,}415$ V,
$3\tau = 0{,}598$ V,
$5\tau = 0{,}081$ V
15. **(a)** $i_L = 0{,}882 \times 10^{-3}\,(1 - e^{-t/0{,}735\mu\text{s}})$,
$v_L = 6e^{-t/0{,}735\mu\text{s}}$
(b) $i_L = 0{,}882 \times 10^{-3}e^{-t/0{,}333\mu\text{s}}$
$v_L = -13{,}23e^{-t/0{,}333\mu\text{s}}$
17. **(a)** $i_L = 1{,}765\text{ mA} - 4{,}765\text{ mA}\,e^{-t/588{,}24\mu\text{s}}$
$v_L = 16{,}2\text{ V}\,e^{-t/588{,}24\mu\text{s}}$
19. **(a)** $i_L = -0{,}692\text{ mA} - 2{,}308\text{ mA}\,e^{-t/19{,}23\mu\text{s}}$
$v_L = 24\text{ V}\,e^{-t/19{,}23\mu\text{s}}$
21. 25,68 μs
23. **(a)** $i_L = 3{,}638 \times 10^{-3}\,(1 - e^{-t/6{,}676\mu\text{s}})$,
$v_L = 5{,}45\,e^{-t/6{,}676\mu\text{s}}$
(b) 2,825 mA, 1,2186 V
(c) $i_L = 2{,}825 \times 10^{-3}e^{-t/2{,}128\mu\text{s}}$
$v_L = -13{,}27\,e^{-t/2{,}128\mu\text{s}}$
25. **(a)** 0,243 V
(b) 29,47 V
(c) 18,96 V
(d) 2,025 ms
27. **(a)** 20 V
(b) 12 μA
(c) 5,376 μs
(d) 0,366 V
29. $i_L = -3{,}478\text{ mA} - 7{,}432\text{ mA}\,e^{-t/173{,}9\mu\text{s}}$
$v_L = 51{,}28\text{ V}\,e^{-t/173{,}9\mu\text{s}}$
31. **(a)** 8 H
(b) 4 H
33. L: 4 H, 2 H
R: 5,7 kΩ, 9,1 kΩ
35. $V_1 = 16$ V, $V_2 = 0$ V,
$I_1 = 4$ mA
37. $V_1 = 10$ V
$I_1 = 2$ A
$I_2 = 1{,}33$ A
39. $W_C = 360\ \mu$J
$W_L = 12$ J

Capítulo 13

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

Capítulo 14

3. **(a)** 3770 cos $377t$
(b) 452,4 cos $(754t + 20°)$

(c) $4440{,}63 \cos(157t - 20°)$
(d) $200 \cos t$
5. (a) $210 \operatorname{sen} 754t$
(b) $14{,}8 \operatorname{sen}(400t - 120°)$
(c) $42 \times 10^{-3} \operatorname{sen}(\omega t + 88°)$
(d) $28 \operatorname{sen}(\omega t + 180°)$
7. (a) 1,592 H (b) 2,654 H
(c) 0,8414 H
9. (a) $100 \operatorname{sen}(\omega t + 90°)$
(b) $8 \operatorname{sen}(\omega t + 150°)$
(c) $120 \operatorname{sen}(\omega t - 120°)$
(d) $60 \operatorname{sen}(\omega t + 190°)$
11. (a) $1 \operatorname{sen}(\omega t - 90°)$
(b) $0{,}6 \operatorname{sen}(\omega t - 70°)$
(c) $0{,}8 \operatorname{sen}(\omega t + 10°)$
(d) $1{,}6 \operatorname{sen}(377t + 130°)$
13. (a) $\infty\ \Omega$ (b) $530{,}79\ \Omega$
(c) $265{,}39\ \Omega$ (d) $17{,}693\ \Omega$
(e) $1{,}327\ \Omega$
15. (a) 9,31 Hz (b) 4,66 Hz
(c) 18,62 Hz (d) 1,59 Hz
17. (a) $6 \times 10^{-3} \operatorname{sen}(200t + 90°)$
(b) $33{,}96 \times 10^{-3} \operatorname{sen}(377t + 90°)$
(c) $44{,}94 \times 10^{-3} \operatorname{sen}(374t + 300°)$
(d) $56 \times 10^{-3} \operatorname{sen}(\omega t + 160°)$
19. (a) $1334 \operatorname{sen}(300t - 90°)$
(b) $37{,}17 \operatorname{sen}(377t - 90°)$
(c) $127{,}2 \operatorname{sen} 754t$
(d) $100 \operatorname{sen}(1600t - 170°)$
21. (a) C (b) $L = 254{,}78$ mH
(c) $R = 5\ \Omega$
25. 318,47 mH
27. 5,067 nF
29. (a) 0 W (b) 0 W
(c) 122,5 W
31. 192 W
33. $40 \operatorname{sen}(\omega t - 50°)$
35. (a) $2 \operatorname{sen}(157t - 60°)$
(b) 318,47 mH (c) 0 W
37. (a) $i_1 = 2{,}828 \operatorname{sen}(10^4 t + 150°)$,
$i_2 = 11{,}312 \operatorname{sen}(10^4 t + 150°)$
(b) $i_F = 14{,}14 \operatorname{sen}(10^4 t + 150°)$
39. (a) $5 \angle 36{,}87°$
(b) $2{,}83 \angle 45°$
(c) $16{,}38 \angle 77{,}66°$
(d) $806{,}23 \angle 82{,}87°$
(e) $1077{,}03 \angle 21{,}80°$
(f) $0{,}00658 \angle 81{,}25°$
(g) $11{,}78 \angle -49{,}82°$
(h) $8{,}94 \angle 153{,}43°$
(i) $61{,}85 \angle -104{,}04°$
(j) $101{,}53 \angle -39{,}81°$
(k) $4326{,}66 \angle 123{,}69°$
(l) $25{,}495 \times 10^{-3} \angle -78{,}69°$
41. (a) $15{,}033 \angle 86{,}19°$
(b) $60{,}208 \angle 4{,}76°$
(c) $0{,}30 \angle 88{,}09°$
(d) $2002{,}5 \angle -87{,}14°$
(e) $86{,}182 \angle 93{,}73°$
(f) $38{,}694 \angle -94°$
43. (a) $11{,}8 + j\,7$
(b) $151{,}9 + j\,49{,}9$
(c) $4{,}72 \times 10^{-6} + j\,71$
(d) $5{,}2 + j\,1{,}6$
(e) $209{,}3 + j\,311$
(f) $-21{,}2 + j\,12$
(g) $7{,}03 + j\,9{,}93$
(h) $95{,}698 + j\,22{,}768$
45. (a) $6 \angle -50°$
(b) $0{,}2 \times 10^{-3} \angle 140°$
(c) $109 \angle -230°$
(d) $76{,}471 \angle -80°$
(e) $4 \angle 0°$
(f) $0{,}71 \angle -16{,}49°$
(g) $4{,}21 \times 10^{-3} \angle 161{,}1°$
(h) $18{,}191 \angle -50{,}91°$
47. (a) $x = 4$, $y = 3$
(b) $x = 4$
(c) $x = 3$, $y = 6$ ou $x = 6$,
$y = 3$
(d) 30°
49. (a) $56{,}569 \operatorname{sen}(377t + 20°)$
(b) $169{,}68 \operatorname{sen} 377t$
(c)
$11{,}314 \times 10^{-3} \operatorname{sen}(377t + 120°)$
(d) $7{,}07 \operatorname{sen}(377t + 90°)$
(e) $1696{,}8 \operatorname{sen}(377t - 120°)$
(f) $6000 \operatorname{sen}(377t - 180°)$
51. $i_1 = 2{,}537 \times 10^{-5} \operatorname{sen}(\omega t + 96{,}79°)$
53. $i_F = 18 \times 10^{-3} \operatorname{sen} 377t$

Capítulo 15

1. (a) $6{,}8\ \Omega \angle 0°$
(b) $754\ \Omega \angle 90°$
(c) $15{,}7\ \Omega \angle 90°$
(d) $265{,}25\ \Omega \angle -90°$
(e) $318{,}47\ \Omega \angle -90°$
(f) $200\ \Omega \angle 0°$
3. (a) $88 \times 10^{-3} \operatorname{sen} \omega t$
(b) $9{,}045 \operatorname{sen}(377t + 150°)$
(c) $2547{,}02 \operatorname{sen}(157t - 50°)$
5. (a) $4{,}24\ \Omega \angle -45°$
(b) $3{,}04\ \text{k}\Omega \angle 80{,}54°$
(c) $1617{,}56\ \Omega \angle 88{,}33°$
7. (a) $10\ \Omega \angle 36{,}87°$
(c) $\mathbf{I} = 10\ \text{A} \angle -36{,}87°$,
$\mathbf{V}_R = 80\ \text{V} \angle -36{,}87°$,
$\mathbf{V}_L = 60\ \text{V} \angle 53{,}13°$
(f) 800 W (g) 0,8 atrasado
9. (a) $1660{,}27\ \Omega \angle -73{,}56°$
(b) $8{,}517\ \text{mA} \angle 73{,}56°$
(c) $\mathbf{V}_R = 4{,}003\ \text{V} \angle 73{,}56°$,
$\mathbf{V}_L = 13{,}562\ \text{V} \angle -16{,}44°$
(d) 34,09 mW, 0,283 adiantado
11. (a) $3{,}16\ \text{k}\Omega \angle 18{,}43°$
(c) $3{,}18\ \mu\text{F}$, 6,37 H
(d) $\mathbf{I} = 1{,}3424\ \text{mA} \angle 41{,}57°$,
$\mathbf{V}_R = 4{,}027\ \text{V} \angle 41{,}57°$,
$\mathbf{V}_L = 2{,}6848\ \text{V} \angle 131{,}57°$,
$\mathbf{V}_C = 1{,}3424\ \text{V} \angle -48{,}43°$
(g) 5,406 mW
(h) 0,9487 atrasado
13. (a) 40 mH (b) $220\ \Omega$
15. (a) $\mathbf{V}_1 = 37{,}97\ \text{V} \angle -51{,}57°$,
$\mathbf{V}_2 = 113{,}92\ \text{V} \angle 38{,}43°$
(b) $\mathbf{V}_1 = 55{,}80\ \text{V} \angle 26{,}55°$,
$\mathbf{V}_2 = 12{,}56\ \text{V} \angle -63{,}45°$
17. (a) $\mathbf{I} = 39\ \text{mA} \angle 126{,}65°$,
$\mathbf{V}_R = 1{,}17\ \text{V} \angle 126{,}65°$,
$\mathbf{V}_C = 25{,}86\ \text{V} \angle 36{,}65°$
(b) 0,058 adiantado
(c) 45,63 mW
(g) $\mathbf{Z}_T = 30\ \Omega - j\,512{,}2\ \Omega$
19. $\mathbf{Z}_T = 3{,}2\ \Omega + j\,2{,}4\ \Omega$
25. (a) $\mathbf{Z}_T = 3\ \Omega + j\,8\ \Omega$,
$\mathbf{Y}_T = 41{,}1\ \text{mS} - j\,109{,}5\ \text{mS}$
(b) $\mathbf{Z}_T = 60\ \Omega - j\,70\ \Omega$,
$\mathbf{Y}_T = 7{,}1\ \text{mS} + j\,8{,}3\ \text{mS}$
(c) $\mathbf{Z}_T = 200\ \Omega - j\,100\ \Omega$,
$\mathbf{Y}_T = 4\ \text{mS} + j\,2\ \text{mS}$
27. (a) $\mathbf{Y}_T = 538{,}52\ \text{mS} \angle -21{,}8°$
(c) $\mathbf{E} = 3{,}71\ \text{V} \angle 21{,}8°$,
$\mathbf{I}_R = 1{,}855\ \text{A} \angle 21{,}8°$,
$\mathbf{I}_L = 0{,}742\ \text{A} \angle -68{,}2°$
(f) 6,88 W
(g) 0,928 atrasado
(h) $e = 5{,}25 \operatorname{sen}(377t + 21{,}8°)$,
$i_R = 2{,}62 \operatorname{sen}(377t + 21{,}8°)$,
$i_L = 1{,}049 \operatorname{sen}(377t - 68{,}2°)$,
$i_s = 2{,}828 \operatorname{sen} 377t$
29. (a) $\mathbf{Y}_T = 129{,}96\ \text{mS} \angle -50{,}31°$
(c) $\mathbf{I}_s = 7{,}8\ \text{A} \angle -50{,}31°$,
$\mathbf{I}_R = 5\ \text{A} \angle 0°$
$\mathbf{I}_L = 6\ \text{A} \angle -90°$
(f) 300 W
(g) 0,638 atrasado
(h) $e = 84{,}84 \operatorname{sen} 377t$,
$i_R = 7{,}07 \operatorname{sen} 377t$,
$i_L = 8{,}484 \operatorname{sen}(377t - 90°)$,
$i_s = 11{,}03 \operatorname{sen}(377t - 50{,}31°)$
31. (a) $\mathbf{Y}_T = 0{,}416\ \text{mS} \angle 36{,}897°$
(c) $L = 10{,}61$ H, $C = 1{,}326\ \mu\text{F}$
(d) $\mathbf{E} = 8{,}498\ \text{V} \angle -56{,}897°$,
$\mathbf{I}_R = 2{,}833\ \text{mA} \angle -56{,}897°$,
$\mathbf{I}_L = 2{,}125\ \text{mA} \angle -146{,}897°$,
$\mathbf{I}_C = 4{,}249\ \text{mA} \angle 33{,}103°$
(g) 24,078 mW
(h) 0,8 adiantado
(i)
$e = 12{,}016 \operatorname{sen}(377t - 56{,}897°)$,
$i_R = 4 \operatorname{sen}(377t - 56{,}897°)$,
$i_L = 3 \operatorname{sen}(377t - 146{,}897°)$,
$i_C = 6 \operatorname{sen}(377t + 33{,}103°)$
33. (a) $\mathbf{I}_1 = 18{,}09\ \text{A} \angle 65{,}241°$,
$\mathbf{I}_2 = 8{,}528\ \text{A} \angle -24{,}759°$
(b) $\mathbf{I}_1 = 11{,}161\ \text{A} \angle 0{,}255°$,
$\mathbf{I}_2 = 6{,}656\ \text{A} \angle 153{,}690°$
39. (a) $R_p = 94{,}73\ \Omega$,
$X_p = 52{,}1\ \Omega$ (C)
(b) $R_p = 4\ \text{k}\Omega$,
$X_p = 4\ \text{k}\Omega$ (C)
41. (a) $\mathbf{E} = 176{,}68\ \text{V} \angle 36{,}44°$,
$\mathbf{I}_R = 0{,}803\ \text{A} \angle 36{,}44°$,
$\mathbf{I}_L = 2{,}813\ \text{A} \angle -53{,}56°$

(b) 0,804 atrasado
(c) 141,86 W
(f) $\mathbf{I}_C = 1{,}11\ \text{A} \angle 126{,}43°$
(g) $\mathbf{Z}_T = 142{,}15\ \Omega + j\ 104{,}96\ \Omega$

43. $R = 4\ \Omega$, $X_L = 3{,}774\ \Omega$

Capítulo 16

1. (a) $1{,}2\ \Omega \angle 90°$
(b) $10\ \text{A} \angle -90°$
(c) $10\ \text{A} \angle -90°$
(d) $\mathbf{I}_2 = 6\ \text{A} \angle -90°$, $\mathbf{I}_3 = 4\ \text{A} \angle -90°$
(e) $60\ \text{V} \angle 0°$

3. (a) $\mathbf{Z}_T = 3{,}87\ \Omega \angle -11{,}817°$, $\mathbf{Y}_T = 0{,}258\ \text{S} \angle 11{,}817°$
(b) $15{,}504\ \text{A} \angle 41{,}817°$
(c) $3{,}985\ \text{A} \angle 82{,}826°$
(d) $47{,}809\ \text{V} \angle -7{,}174°$
(e) 910,71 W

5. (a) $0{,}375\ \text{A} \angle 25{,}346°$
(b) $70{,}711\ \text{V} \angle -45°$
(c) 33,9 W

7. (a) $1{,}423\ \text{A} \angle 18{,}259°$
(b) $26{,}574\ \text{V} \angle 4{,}763°$
(c) 54,074 W

9. (a) $\mathbf{Y}_T = 0{,}099\ \text{S} \angle -9{,}709°$
(b) $\mathbf{V}_1 = 20{,}4\ \text{V} \angle 30°$, $\mathbf{V}_2 = 10{,}887\ \text{V} \angle 58{,}124°$
(c) $1{,}933\ \text{A} \angle 11{,}109°$

11. $33{,}201\ \text{A} \angle 38{,}89°$

13. 139,71 mW

Capítulo 17

3. (a) $\mathbf{Z} = 21{,}93\ \Omega \angle -46{,}85°$, $\mathbf{E} = 10{,}97\ \text{V} \angle 13{,}15°$
(b) $\mathbf{Z} = 5{,}15\ \Omega \angle 59{,}04°$, $\mathbf{E} = 10{,}3\ \text{V} \angle 179{,}04°$

5. (a) $5{,}15\ \text{A} \angle -24{,}5°$
(b) $0{,}442\ \text{A} \angle 143{,}48°$

7. (a) $13{,}07\ \text{A} \angle -33{,}71°$
(b) $48{,}33\ \text{A} \angle -77{,}57°$

9. $-3{,}165 \times 10^{-3}\ \mathbf{V} \angle 137{,}29°$

11. $\mathbf{I}_{1k\Omega} = 10\ \text{mA} \angle 0°$
$\mathbf{I}_{2k\Omega} = 1{,}667\ \text{mA} \angle 0°$

13. $\mathbf{I}_L = 1{,}378\ \text{mA} \angle -56{,}31°$

15. (a) $\mathbf{V}_1 = 19{,}86\ \text{V} \angle 43{,}8°$, $\mathbf{V}_2 = 8{,}94\ \text{V} \angle 106{,}9°$
(b) $\mathbf{V}_1 = 19{,}78\ \text{V} \angle 132{,}48°$, $\mathbf{V}_2 = 13{,}37\ \text{V} \angle 98{,}78°$

17. $\mathbf{V}_1 = 220\ \text{V} \angle 0°$
$\mathbf{V}_2 = 96{,}664\ \text{V} \angle -12{,}426°$
$\mathbf{V}_3 = 100\ \text{V} \angle 90°$

19. (à esquerda) $\mathbf{V}_1 = 14{,}62\ \text{V} \angle -5{,}86°$
(em cima) $\mathbf{V}_2 = 35{,}03\ \text{V} \angle -37{,}69°$
(à direita) $\mathbf{V}_3 = 32{,}4\ \text{V} \angle -73{,}34°$
(no meio) $\mathbf{V}_4 = 5{,}677\ \text{V} \angle 23{,}53°$

21. $2{,}253\ \text{V} \angle 17{,}628°$

23. $-10{,}667\ \text{V} \angle 0°$

25. $-2451{,}92\mathbf{E}_i$

27. (a) Não
(b) $1{,}76\ \text{mA} \angle -71{,}54°$
(c) $7{,}03\ \text{V} \angle -18{,}46°$

29. Sim

31. $R_x = R_2R_3/R_1$
$L_x = R_2L_3/R_1$

33. (a) $11{,}57\ \text{A} \angle -67{,}13°$
(b) $36{,}9\ \text{A} \angle 23{,}87°$

Capítulo 18

1. (a) $6{,}095\ \text{A} \angle -32{,}115°$
(b) $3{,}77\ \text{A} \angle -93{,}8°$

3. $i = 0{,}5\ \text{A} + 1{,}581\ \text{sen}(\omega t - 26{,}565°)$

5. $6{,}261\ \text{mA} \angle -63{,}43°$

7. $-22{,}09\ \text{V} \angle 6{,}34°$

9. $19{,}62\ \text{V} \angle 53°$

11. $\mathbf{V}_s = 10\ \text{V} \angle 0°$

13. (a) $\mathbf{Z}_{Th} = 21{,}312\ \Omega \angle 32{,}196°$
$\mathbf{E}_{Th} = 2{,}131\ \text{V} \angle 32{,}196°$
(b) $\mathbf{Z}_{Th} = 6{,}813\ \Omega \angle -54{,}228°$
$\mathbf{E}_{Th} = 57{,}954\ \text{V} \angle 11{,}099°$

15. (a) $\mathbf{Z}_{Th} = 4\ \Omega \angle 90°$
$\mathbf{E}_{Th} = 4\ \text{V} + 10\ \text{V} \angle 0°$
(b) $\mathbf{I} = 0{,}5\text{A} + 1{,}118\ \text{A} \angle -26{,}565°$

17. (a) $\mathbf{Z}_{Th} = 4{,}472\ \text{k}\Omega \angle -26{,}565°$
$\mathbf{E}_{Th} = 31{,}31\ \text{V} \angle -26{,}565°$
(b) $\mathbf{I} = 6{,}26\ \text{mA} \angle 63{,}435°$

19. $\mathbf{Z}_{Th} = 4{,}44\ \text{k}\Omega \angle -0{,}031°$
$\mathbf{E}_{Th} = -444{,}45 \times 10^3\mathbf{I} \angle 0{,}255°$

21. $\mathbf{Z}_{Th} = 5{,}099\ \text{k}\Omega \angle -11{,}31°$
$\mathbf{E}_{Th} = -50\ \text{V} \angle 0°$

23. $\mathbf{Z}_{Th} = -39{,}215\ \Omega \angle 0°$
$\mathbf{E}_{Th} = 20\ \text{V} \angle 53°$

25. $\mathbf{Z}_{Th} = 607{,}42\ \Omega \angle 0°$
$\mathbf{E}_{Th} = 1{,}62\ \text{V} \angle 0°$

27. (a) $\mathbf{Z}_N = 21{,}312\ \Omega \angle 32{,}196°$, $\mathbf{I}_N = 0{,}1\ \text{A} \angle 0°$
(b) $\mathbf{Z}_N = 6{,}813\ \Omega \angle -54{,}228°$, $\mathbf{I}_N = 8{,}506\ \text{A} \angle 65{,}324°$

29. (a) $\mathbf{Z}_N = 9{,}66\ \Omega \angle 14{,}93°$, $\mathbf{I}_N = 2{,}15\ \text{A} \angle -42{,}87°$
(b) $\mathbf{Z}_N = 4{,}37\ \Omega \angle 55{,}67°$, $\mathbf{I}_N = 22{,}83\ \text{A} \angle -34{,}65°$

31. (a) $\mathbf{Z}_N = 9\ \Omega \angle 0°$, $\mathbf{I}_N = 1{,}333\ \text{A} + 2{,}667\ \text{A} \angle 0°$
(b) $12\ \text{V} + 2{,}65\ \text{V} \angle -83{,}66°$

33. $\mathbf{Z}_N = 5{,}1\ \text{k}\Omega \angle -11{,}31°$, $\mathbf{I}_N = -1{,}961 \times 10^{-3}\ \mathbf{V} \angle 11{,}31°$

35. $\mathbf{Z}_N = 5{,}1\ \text{k}\Omega \angle -11{,}31°$, $\mathbf{I}_N = 9{,}81\ \text{mA} \angle 11{,}31°$

37. $\mathbf{Z}_N = 6{,}63\ \text{k}\Omega \angle 0°$
$\mathbf{I}_N = 0{,}792\ \text{mA} \angle 0°$

39. (a) $\mathbf{Z}_c = 8{,}32\ \Omega \angle 3{,}18°$, 1198,2 W
(b) $\mathbf{Z}_c = 1{,}562\ \Omega \angle -14{,}47°$, 1,614 W

41. 40 kΩ, 25 W

43. (a) 9 Ω (b) 20 W

45. (a) 1,414 kΩ (b) 0,518 W

49. $25{,}77\ \text{mA} \angle 104{,}4°$

Capítulo 19

1. (a) 120 W
(b) $Q_T = 0$ VAR, $S_T = 120$ VA
(c) 0,5 A
(d) $I_1 = \frac{1}{6}$ A, $I_2 = \frac{1}{3}$ A

3. (a) 400 W, −400 VAR(C), 565,69 VA, 0,7071 adiantado
(c) $5{,}66\ \text{A} \angle 135°$

5. (a) 500 W, −200 VAR(C), 538,52 VA
(b) 0,928 adiantado
(d) $10{,}776\ \text{A} \angle 21{,}875°$

7. (a) R: 200 W, L,C: 0 W
(b) R: 0 VAR, C: 80 VAR, L: 100 VAR
(c) R: 200 VA, C: 80 VA, L: 100 VA
(d) 200 W, 20 VAR(L), 200,998 VA, 0,995 (atrasado)
(f) $10{,}05\ \text{A} \angle -5{,}73°$

9. (a) R: 38,99 W, L: 0 W, C: 0 W
(b) R: 0 VAR, L: 126,74 VAR, C: 46,92 VAR
(c) R: 38,99 VA, L: 126,74 VA, C: 46,92 VA
(d) 38,99 W, 79,82 VAR(L), 88,83 VA, 0,439 (atrasado)
(f) 0,31 J
(g) $W_L = 0{,}32$ J, $W_C = 0{,}12$ J

11. (a) $\mathbf{Z} = 2{,}30\ \Omega + j\ 1{,}73\ \Omega$
(b) 4000 W

13. (a) 900 W, 0 VAR, 900 VA, 1
(b) $9\ \text{A} \angle 0°$
(d) $\mathbf{Z}_1$: $R = 0\ \Omega$, $X_C = 20\ \Omega$
$\mathbf{Z}_2$: $R = 2{,}83\ \Omega$, $X = 0\ \Omega$
$\mathbf{Z}_3$: $R = 5{,}66\ \Omega$, $X_L = 4{,}717\ \Omega$

15. (a) 1100 W, 2366,26 VAR, 2609,44 VA, 0,4215 (adiantado)
(b) $521{,}89\ \text{V} \angle -65{,}07°$
(c) $\mathbf{Z}_1$: $R = 1743{,}38\ \Omega$, $X_C = 1307{,}53\ \Omega$
$\mathbf{Z}_2$: $R = 43{,}59\ \Omega$, $X_C = 99{,}88\ \Omega$

17. (a) 7,81 kVA
(b) 0,640 (atrasado)
(c) 65,08 A
(d) 1105 μF
(e) 41,67 A

19. (a) 128,14 W
(b) a–b: 42,69 W, b–c: 64,03 W, a–c: 106,72 W, a–d: 106,72 W, c–d: 0 W, d–e: 0 W, f–e: 21,34 W

21. (a) 5 Ω, 132,03 mH
(b) 10 Ω
(c) 15 Ω, 262,39 mH

Capítulo 20

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

(b) $\omega_s = 3535{,}53$ rad/s, $f_s = 562{,}7$ Hz
(c) $\omega_s = 21.880$ rad/s, $f_s = 3482{,}31$ Hz

3. (a) $X_L = 40\ \Omega$
(b) $I = 10$ mA
(c) $V_R = 20$ mV, $V_L = 400$ mV, $V_C = 400$ mV
(d) $Q_s = 20$ (alto)
(e) $L = 1{,}27$ mH, $C = 0{,}796\ \mu$F
(f) $BP = 250$ Hz
(g) $f_2 = 5{,}125$ kHz, $f_1 = 4{,}875$ kHz

5. (a) $BP = 400$ Hz
(b) $f_2 = 6200$ Hz, $f_1 = 5800$ Hz
(c) $X_L = X_C = 45\ \Omega$
(d) $P_{FC} = 375$ mW

7. (a) $Q_s = 10$
(b) $X_L = 20\ \Omega$
(c) $L = 1{,}59$ mH, $C = 3{,}98\ \mu$F
(d) $f_2 = 2100$ Hz, $f_1 = 1900$ Hz

9. $L = 13{,}26$ mH, $C = 27{,}07$ nF
$f_2 = 8460$ Hz, $f_1 = 8340$ Hz

11. (a) $f_s = 1$ MHz
(b) $BP = 160$ kHz
(c) $R = 720\ \Omega$, $L = 0{,}7162$ mH, $C = 35{,}37$ pF
(d) $R_l = 56{,}25\ \Omega$

13. (a) $f_p = 159{,}155$ kHz
(b) $V_C = 4$ V
(c) $I_L = I_C = 40$ mA
(d) $Q_p = 20$

15. (a) $f_s = 11.253{,}95$ Hz
(b) $Q_l = 1{,}77$ (não)
(c) $f_p = 9.280{,}24$ Hz, $f_m = 10.794{,}41$ Hz
(d) $X_L = 5{,}83\ \Omega$, $X_C = 8{,}57\ \Omega$
(e) $Z_{T_p} = 12{,}5\ \Omega$
(f) $V_C = 25$ mV
(g) $Q_p = 1{,}46$, $BP = 6{,}356$ kHz
(h) $I_C = 2{,}92$ mA, $I_L = 3{,}54$ mA

17. (a) $X_C = 30\ \Omega$
(b) $Z_{T_P} = 225\ \Omega$
(c) $\mathbf{I}_C = 0{,}6\text{ A}\angle 90°$, $\mathbf{I}_L \cong 0{,}6\text{ A}\angle -86{,}19°$
(d) $L = 0{,}239$ mH, $C = 265{,}26$ nF
(e) $Q_p = 7{,}5$, $BP = 2{,}67$ kHz

19. (a) $f_s = 7{,}118$ kHz, $f_p = 6{,}647$ kHz, $f_m = 7$ kHz
(b) $X_L = 20{,}88\ \Omega$, $X_C = 23{,}94\ \Omega$
(c) $Z_{T_P} = 55{,}56\ \Omega$
(d) $Q_p = 2{,}32$, $BP = 2{,}865$ kHz
(e) $I_L = 99{,}28$ mA, $I_C = 92{,}73$ mA
(f) $V_C = 2{,}22$ V

21. (a) $f_p = 3558{,}81$ Hz
(b) $V_C = 138{,}2$ V
(c) $P = 691$ mW
(d) $BP = 575{,}86$ Hz

23. (a) $X_L = 98{,}54\ \Omega$
(b) $Q_l = 8{,}21$
(c) $f_p = 8{,}05$ kHz
(d) $V_C = 4{,}83$ V
(e) $f_2 = 8{,}55$ kHz, $f_1 = 7{,}55$ kHz

25. $R_s = 3{,}244\ \text{k}\Omega$, $C = 31{,}66$ nF

27. (a) $f_p = 251{,}65$ kHz
(b) $Z_{T_p} = 4{,}444\ \text{k}\Omega$
(c) $Q_p = 14{,}05$
(d) $BP = 17{,}91$ kHz
(e) 20 nF: $f_p = 194{,}93$ kHz, $Z_{T_p} = 49{,}94\ \Omega$, $Q_p = 2{,}04$, $BP = 95{,}55$ kHz
(f) 1 nf: $f_p = 251{,}65$ kHz, $Z_{T_p} = 13{,}33\ \text{k}\Omega$, $Q_p = 21{,}08$, $BP = 11{,}94$ kHz
(g) Circuito; $L/C = 100 \times 10^3$
parte (e): $L/C = 1 \times 10^3$
parte (f): $L/C = 400 \times 10^3$
(h) sim, $L/C \uparrow$, $BP \downarrow$

Capítulo 21

1. (a) esquerda: 1,54 kHz, direita: 5,623 kHz
(b) em cima: 0,2153 V, em baixo: 0,5248 V

3. (a) 1000 (b) 10^{12}
(c) 1585 (d) 1,096
(e) 10^{10} (f) 1513,56
(g) 10,023 (h) 1.258.925,41

5. 1,681

7. −0,301

9. (a) 1,845
(b) 18,45

11. 13,01

13. 38,49

15. 24,08 dB_s

19. (a) $0{,}1f_c$: 0,995, $0{,}5f_c$: 0,894, f_c: 0,707, $2f_c$: 0,447, $10f_c$: 0,0995
(b) $0{,}1f_c$: −5,71°, $0{,}5f_c$: −26,57°, f_c: −45°, $2f_c$: −63,43°, $10f_c$: −84,29°

21. $C = 0{,}265\ \mu$F, 250 Hz: $A_v = 0{,}895$, $\theta = -26{,}54°$, 1000 Hz: $A_v = 0{,}4475$, $\theta = -63{,}41°$

23. (a) $f_c = 3{,}617$ kHz, f_c: $A_v = 0{,}707$, $\theta = 45°$, $2f_c$: $A_v = 0{,}894$, $\theta = 26{,}57°$, $0{,}5f_c$: $A_v = 0{,}447$, $\theta = 63{,}43°$, $10f_c$: $A_v = 0{,}995$, $\theta = 5{,}71°$, $\frac{1}{10}f_c$: $A_v = 0{,}0995$, $\theta = 84{,}29°$

25. $R = 795{,}77\ \Omega \rightarrow 797\ \Omega$, f_c: $A_v = 0{,}707$, $\theta = 45°$, 1 kHz: $A_v = 0{,}458$, $\theta = 63{,}4°$, 4 kHz: $A_v \cong 0{,}9$, $\theta = 26{,}53°$

27. (a) $f_{c_1} = 795{,}77$ Hz, $f_{c_2} = 1989{,}44$ Hz, f_{c_1}: $V_o = 0{,}656V_i$, f_{c_2}: $V_o = 0{,}656V_i$, $f_{\text{centro}} = 1392{,}60$ Hz: $V_o = 0{,}711V_i$, 500 Hz: $V_o = 0{,}516V_i$, 4 kHz: $V_o = 0{,}437V_i$
(b) $BP \cong 2{,}9$ kHz, $f_{\text{centro}} = 1{,}94$ kHz

29. (a) $f_s = 100{,}658$ kHz
(b) $Q_s = 18{,}39$, $BP = 5473{,}52$ Hz
(c) f_s: $A_v = 0{,}93$, $f_1 = 97.921{,}24$ Hz, $f_2 = 103.394{,}76$ Hz, $f = 95$ kHz: $A_v = 0{,}392$, $f = 105$ kHz: $A_v = 0{,}5$
(d) $f = f_s$, $V_o = 0{,}93$ V, $f = f_1 = f_2$, $V_o = 0{,}658$ V

31. (a) $Q_s = 12{,}195$
(b) $BP = 410$ Hz, $f_2 = 5205$ Hz, $f_1 = 4795$ Hz
(c) f_s: $V_o = 0{,}024V_i$
(d) não será modificada

33. (a) $f_p = 726{,}44$ kHz (atenuação) $f = 2{,}013$ MHz (transmissão)

35. (a–b) $f_c = 6772{,}55$ Hz
(c) f_c: −3 dB, $\frac{1}{2}f_c$: −6,7 dB, $2f_c$: −0,969 dB, $\frac{1}{10}f_c$: −20,04 dB, $10f_c$: −0,043 dB
(d) f_c: 0,707, $\frac{1}{2}f_c$: 0,4472, $2f_c$: 0,894
(e) f_c: 45°, $\frac{1}{2}f_c$: 63,43°, $2f_c$: 26,57°

37. (a–b) $f_c = 13{,}26$ kHz
(c) f_c: −3 dB, $\frac{1}{2}f_c$: −0,97 dB, $2f_c$: −6,99 dB, $\frac{1}{10}f_c$: −0,043 dB, $10f_c$: −20,04 dB
(d) f_c: 0,707, $\frac{1}{2}f_c$: 0,894, $2f_c$: 0,447
(e) f_c: −45°, $\frac{1}{2}f_c$: −26,57°, $2f_c$: −63,43°

39. (a) $f_1 = 663{,}15$ Hz, $f_c = 468{,}1$ Hz, $0 < f < f_c$: +6 dB/oitava, $f > f_c$: −3,03 dB
(b) f_1: 45°, f_c: 54,78°, $\frac{1}{2}f_1$: 63,43°, $2f_1$: 84,29°

41. (a) $f_1 = 19.894{,}37$ Hz, $f_c = 1.989{,}44$ Hz, $0 < f < f_c$: 0 dB, $f_c < f < f_1$: −6 dB/oitava, $f > f_1$: −20 dB
(b) f_c: −39,29°, 10 kHz: −52,06°, f_1: −39,29°

43. (a) $f_1 = 964{,}58$ Hz, $f_c = 7.334{,}33$ Hz, $0 < f < f_1$: −17,62 dB, $f_1 < f < f_c$: +6 dB/oitava, $f > f_c$: 0 dB
(b) f_1: 39,35°, 1,3 kHz: 43,38°, f_c: 39,35°

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

Capítulo 22

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

Capítulo 23

1. **(a)** 120,1 V **(b)** 120,1 V
(c) 12,01 A **(d)** 12,01 A
3. **(a)** 120,1 V **(b)** 120,1 V
(c) 16,98 A **(d)** 16,98 A
5. **(a)** $\theta_2 = -120°$, $\theta_3 = 120°$
(b) $\mathbf{V}_{an} = 120\text{ V}\ \angle 0°$,
$\mathbf{V}_{bn} = 120\text{ V}\ \angle -120°$,
$\mathbf{V}_{cn} = 120\text{ V}\ \angle 120°$
(c) $\mathbf{I}_{an} = 8\text{ A}\ \angle -53{,}13°$,
$\mathbf{I}_{bn} = 8\text{ A}\ \angle -173{,}13°$,
$\mathbf{I}_{cn} = 8\text{ A}\ \angle 66{,}87°$
(e) 8 A **(f)** 207,85 V
7. $V_\phi = 127$ V, $I_\phi = 8{,}98$ A,
$I_L = 8{,}98$ A
9. **(a)** $\mathbf{E}_{AN} = 12{,}7\text{ kV}\ \angle -30°$,
$\mathbf{E}_{BN} = 12{,}7\text{ kV}\ \angle -150°$,
$\mathbf{E}_{CN} = 12{,}7\text{ kV}\ \angle 90°$
(b) $\mathbf{I}_{an} = 11{,}285\text{ A}\ \angle -97{,}54°$,
$\mathbf{I}_{bn} = 11{,}285\text{ A}\ \angle -217{,}54°$,
$\mathbf{I}_{cn} = 11{,}285\text{ A}\ \angle 22{,}46°$
(c) $\mathbf{I}_L = \mathbf{I}_\phi$
(d) $\mathbf{V}_{an} = 12.154{,}28\text{ V}\ \angle -29{,}34°$,
$\mathbf{V}_{bn} = 12.154{,}28\text{ V}\ \angle -149{,}34°$,
$\mathbf{V}_{cn} = 12.154{,}28\text{ V}\ \angle 90{,}66°$
11. **(a)** 120,1 V **(b)** 208 V
(c) 13,364 A **(d)** 23,15 A
13. **(a)** $\theta_2 = -120°$, $\theta_3 = +120°$
(b) $\mathbf{V}_{ab} = 208\text{ V}\ \angle 0°$,
$\mathbf{V}_{bc} = 208\text{ V}\ \angle -120°$,
$\mathbf{V}_{ca} = 208\text{ V}\ \angle 120°$
(d) $\mathbf{I}_{ab} = 9{,}455\text{ A}\ \angle 0°$,
$\mathbf{I}_{bc} = 9{,}455\text{ A}\ \angle -120°$,
$\mathbf{I}_{ca} = 9{,}455\text{ A}\ \angle 120°$
(e) 16,376 A **(f)** 120,1 V
15. **(a)** $\theta_2 = -120°$, $\theta_3 = 120°$
(b) $\mathbf{V}_{ab} = 208\text{ V}\ \angle 0°$,
$\mathbf{V}_{bc} = 208\text{ V}\ \angle -120°$,
$\mathbf{V}_{ca} = 208\text{ V}\ \angle 120°$
(d) $\mathbf{I}_{ab} = 86{,}67\text{ A}\ \angle -36{,}87°$,
$\mathbf{I}_{bc} = 86{,}67\text{ A}\ \angle -156{,}87°$,
$\mathbf{I}_{ca} = 86{,}67\text{ A}\ \angle 83{,}13°$
(e) 150,11 A **(f)** 120,1 V
17. **(a)** $\mathbf{I}_{ab} = 15{,}325\text{ A}\ \angle -73{,}30°$,
$\mathbf{I}_{bc} = 15{,}325\text{ A}\ \angle -193{,}30°$,
$\mathbf{I}_{ca} = 15{,}325\text{ A}\ \angle 46{,}7°$
(b) $\mathbf{I}_{Aa} = 26{,}54\text{ A}\ \angle -103{,}31°$,
$\mathbf{I}_{Bb} = 26{,}54\text{ A}\ \angle 136{,}68°$,
$\mathbf{I}_{Cc} = 26{,}54\text{ A}\ \angle 16{,}69°$
(c) $\mathbf{E}_{AB} = 17.013{,}6\text{ V}\ \angle -0{,}59°$,
$\mathbf{E}_{BC} = 17.013{,}77\text{ V}\ \angle -120{,}59°$,
$\mathbf{E}_{CA} = 17.013{,}87\text{ V}\ \angle 119{,}41°$
19. **(a)** 208 V **(b)** 120,09 V
(c) 7,076 A **(d)** 7,076 A
21. $V_\phi = 69{,}28$ V, $I_\phi = 2{,}89$ A,
$I_L = 2{,}89$ A
23. $V_\phi = 69{,}28$ V, $I_\phi = 5{,}77$ A,
$I_L = 5{,}77$ A
25. **(a)** 440 V **(b)** 440 V
(c) 29,33 A **(d)** 50,8 A
27. **(a)** $\theta_2 = -120°$, $\theta_3 = +120°$
(b) $\mathbf{V}_{ab} = 100\text{ V}\ \angle 0°$,
$\mathbf{V}_{bc} = 100\text{ V}\ \angle -120°$,
$\mathbf{V}_{ca} = 100\text{ V}\ \angle 120°$
(d) $\mathbf{I}_{ab} = 5\text{ A}\ \angle 0°$,
$\mathbf{I}_{bc} = 5\text{ A}\ \angle -120°$,
$\mathbf{I}_{ca} = 5\text{ A}\ \angle 120°$
(e) 8,66 A
29. **(a)** $\theta_2 = -120°$, $\theta_3 = 120°$
(b) $\mathbf{V}_{ab} = 100\text{ V}\ \angle 0°$,
$\mathbf{V}_{bc} = 100\text{ V}\ \angle -120°$,
$\mathbf{V}_{ca} = 100\text{ V}\ \angle 120°$
(d) $\mathbf{I}_{ab} = 7{,}072\text{ A}\ \angle 45°$,
$\mathbf{I}_{bc} = 7{,}072\text{ A}\ \angle -75°$,
$\mathbf{I}_{ca} = 7{,}072\text{ A}\ \angle 165°$
(e) 12,25 A
31. 2160 W, 0 VAR, 2160 VA,
$F_p = 1$
33. 7210,67 W, 7210,67 VAR(*C*),
10.197,42 VA, 0,707 adiantado
35. 7,263 kW, 7,263 kVAR,
10,272 kVA, 0,707 atrasado
37. 287,93 W, 575,86 VAR(*L*),
643,83 VA, 0,4472 atrasado
39. 900 W, 1200 VAR(*L*), 1500 VA,
0,6 atrasado
41. $\mathbf{Z}_\phi = 12{,}98\ \Omega - j\ 17{,}31\ \Omega$
43. **(a)** 9237,6 V **(b)** 80 A
(c) 1276,8 kW
(d) 0,576 atrasado
(e) $\mathbf{I}_{Aa} = 80\text{ A}\ \angle -54{,}83°$
(f) $\mathbf{V}_{an} = 7773{,}45\text{ V}\angle -4{,}87°$
(g) $\mathbf{Z}_\phi = 62{,}52\ \Omega + j\ 74{,}38\ \Omega$
(h) F_p (de todo o sistema) = 0,576,
F_p (da carga) = 0,643 (ambos atrasados)
(i) 93,98%
45. **(b)** $P_T = 5899{,}64$ W,
$P_{\text{medidor}} = 1966{,}55$ W
49. **(a)** 120,09 V
(b) $I_{an} = 8{,}492$ A, $I_{bn} = 7{,}076$ A,
$I_{cn} = 42{,}465$ A
(c) 4928,5 W, 4928,53 VAR(*L*),
6969,99 VA, 0,7071 atrasado
(d) $\mathbf{I}_{an} = 8{,}492\text{ A}\ \angle -75°$
$\mathbf{I}_{bn} = 7{,}076\text{ A}\ \angle -195°$
$\mathbf{I}_{cn} = 42{,}465\text{ A}\ \angle 45°$
(e) $\mathbf{I}_N = 34{,}712\text{ A}\ \angle -42{,}972°$

Capítulo 24

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

(e) $v_L = 16{,}64\ \text{sen}(400t + 56{,}31°) + 8\ \text{sen}(800t + 36{,}87°)$
(f) 13,055 V (g) 75,481 W

13. (a) $i = 1{,}2\ \text{sen}(400t + 53{,}13°)$
(b) 0,848 A
(c) $v_R = 18\ \text{sen}(400t + 53{,}13°)$
(d) 12,73 V
(e) $v_C = 18 + 23{,}98\ \text{sen}(400t - 36{,}87°)$
(f) 24,73 V (g) 10,79 W

15. $v_o = 2{,}257 \times 10^{-3}\ \text{sen}(377t + 93{,}66°) + 1{,}923 \times 10^{-3}\ \text{sen}(754t + 1{,}64°)$

17. $i_T = 30 + 30{,}27\ \text{sen}(20t + 7{,}59°) + 0{,}5\ \text{sen}(40t - 30°)$

Capítulo 25

1. (a) 0,2 H
(b) $e_p = 1{,}6$ V, $e_s = 5{,}12$ V
(c) $e_p = 15$ V, $e_s = 24$ V

3. (a) 158,02 mH
(b) $e_p = 24$ V, $e_s = 1{,}8$ V
(c) $e_p = 15$ V, $e_s = 24$ V

5. 1,354 H

7. $\mathbf{I}_1(R_1 + jX_{L_1}) + \mathbf{I}_2(jX_m) = \mathbf{E}_1$
$\mathbf{I}_1(jX_m) + \mathbf{I}_2(jX_{L_2} + R_L) = 0$

9. (a) 3,125 V (b) 391,02 μWb

11. 56,31 Hz

13. 400 Ω

15. 12.000t

17. (a) 20 Ω
(b) 40 Ω
(d) 0,351 A ∠−6,71°
(e) 28,1 V ∠−6,71°
(g) 30 V

19. (a) $\mathbf{Z}_p = 280{,}71\ \Omega\ \angle -85{,}91°$
(b) $\mathbf{I}_p = 0{,}427\ \text{A}\ \angle 85{,}91°$
(c) $\mathbf{V}_{R_e} = 8{,}54\ \text{V}\ \angle 85{,}91°$
$\mathbf{V}_{X_e} = 17{,}08\ \text{V}\ \angle 175{,}91°$
$\mathbf{V}_{X_C} = 136{,}64\ \text{V}\ \angle -4{,}09°$

21. $\mathbf{Z}_i = 7980\ \Omega\ \angle 89{,}98°$

23. (a) 20 (b) 83,33 A (c) 4,167 A
(d) $a = \frac{1}{20}$, $I_s = 4{,}167$ A, $I_p = 83{,}33$ A

25. (a) 25 V ∠0°, 5 A ∠0°
(b) 80 Ω ∠0° (c) 20 Ω ∠0°

27. (a) $\mathbf{E}_2 = 40\ \text{V}\ \angle 60°$, $\mathbf{I}_2 = 3{,}33\ \text{A}\ \angle 60°$, $\mathbf{E}_3 = 30\ \text{V}\ \angle 60°$, $\mathbf{I}_3 = 3\ \text{A}\ \angle 60°$
(b) $R_1 = 64{,}52\ \Omega$

29. $[\mathbf{Z}_1 + \mathbf{X}_{L_1}]\mathbf{I}_1 - \mathbf{Z}_{M_{12}}\mathbf{I}_2 + \mathbf{Z}_{M_{13}}\mathbf{I}_3 = \mathbf{E}_1$,
$\mathbf{Z}_{M_{12}}\mathbf{I}_1 - [\mathbf{Z}_2 + \mathbf{Z}_3 + \mathbf{X}_{L_2}]\mathbf{I}_2 + \mathbf{Z}_2\mathbf{I}_3 = 0$,
$\mathbf{Z}_{M_{13}}\mathbf{I}_1 - \mathbf{Z}_2\mathbf{I}_2 + [\mathbf{Z}_2 + \mathbf{Z}_4 + \mathbf{X}_{L_3}]\mathbf{I}_3 = 0$

Capítulo 26

1. $Z_i = 986{,}84\ \Omega$

3. (a) $I_{i_1} = 10\ \mu\text{A}$
(b) $Z_{i_2} = 4{,}5\ \text{k}\Omega$
(c) $E_{i_3} = 6{,}9$ V

5. $Z_o = 44{,}59\ \text{k}\Omega$

7. $Z_o = 10\ \text{k}\Omega$

9. (a) $\mathbf{A}_v = -392{,}98$
(b) $\mathbf{A}_{v_T} = -320{,}21$

11. (a) $\mathbf{A}_{v_{NL}} = -2398{,}8$
(b) $\mathbf{E}_i = 50$ mV
(c) $\mathbf{Z}_i = 1\ \text{k}\Omega$

13. (a) $\mathbf{A}_G = 6{,}067 \times 10^4$
(b) $\mathbf{A}_{G_T} = 4{,}94 \times 10^4$

15. (a) $\mathbf{A}_{v_T} = 1500$
(b) $\mathbf{A}_{i_T} = 187{,}5$
(c) $\mathbf{A}_{i_1} = 15$, $\mathbf{A}_{i_2} = 12{,}5$
(d) $\mathbf{A}_{i_T} = 187{,}5$

17. (a) $\mathbf{z}_{11} = (\mathbf{Z}_1\mathbf{Z}_2 + \mathbf{Z}_1\mathbf{Z}_3)/(\mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2 + \mathbf{Z}_3)$,
$\mathbf{z}_{12} = \mathbf{Z}_1\mathbf{Z}_3/(\mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2 + \mathbf{Z}_3)$,
$\mathbf{z}_{21} = \mathbf{z}_{12}$,
$\mathbf{z}_{22} = (\mathbf{Z}_1\mathbf{Z}_3 + \mathbf{Z}_2\mathbf{Z}_3)/(\mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2 + \mathbf{Z}_3)$

19. (a) $\mathbf{y}_{11} = (\mathbf{Y}_1\mathbf{Y}_2 + \mathbf{Y}_1\mathbf{Y}_3)/(\mathbf{Y}_1 + \mathbf{Y}_2 + \mathbf{Y}_3)$,
$\mathbf{y}_{12} = -\mathbf{Y}_1\mathbf{Y}_2/(\mathbf{Y}_1 + \mathbf{Y}_2 + \mathbf{Y}_3)$,
$\mathbf{y}_{21} = \mathbf{y}_{12}$,
$\mathbf{y}_{22} = (\mathbf{Y}_1\mathbf{Y}_2 + \mathbf{Y}_2\mathbf{Y}_3)/(\mathbf{Y}_1 + \mathbf{Y}_2 + \mathbf{Y}_3)$

21. $\mathbf{h}_{11} = \mathbf{Z}_1\mathbf{Z}_2/(\mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2)$,
$\mathbf{h}_{21} = -\mathbf{Z}_1/(\mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2)$,
$\mathbf{h}_{12} = \mathbf{Z}_1/(\mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2)$,
$\mathbf{h}_{22} = (\mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2 + \mathbf{Z}_3)/(\mathbf{Z}_1\mathbf{Z}_3 + \mathbf{Z}_2\mathbf{Z}_3)$

23. $\mathbf{h}_{11} = (\mathbf{Y}_1 + \mathbf{Y}_2 + \mathbf{Y}_3)/(\mathbf{Y}_1\mathbf{Y}_2 + \mathbf{Y}_1\mathbf{Y}_3)$,
$\mathbf{h}_{21} = -\mathbf{Y}_2/(\mathbf{Y}_2 + \mathbf{Y}_3)$,
$\mathbf{h}_{12} = \mathbf{Y}_2/(\mathbf{Y}_2 + \mathbf{Y}_3)$,
$\mathbf{h}_{22} = \mathbf{Y}_2\mathbf{Y}_3/(\mathbf{Y}_2 + \mathbf{Y}_3)$

25. (a) 47,62 (b) −99

27. $\mathbf{Z}_i = 9.219{,}5\ \Omega\ \angle -139{,}4°$,
$\mathbf{Z}_o = 29{,}07\ \text{k}\Omega\ \angle -86{,}05°$

29. $\mathbf{h}_{11} = 2{,}5\ \text{k}\Omega$, $\mathbf{h}_{12} = 0{,}5$,
$\mathbf{h}_{21} = -0{,}75$, $\mathbf{h}_{22} = 0{,}25$ mS