

Circuitos de corrente alternada em série-paralelo



Objetivos

- Desenvolver confiança na análise dos circuitos CA em série-paralelo.
- Adquirir habilidade no uso de calculadoras e métodos computacionais para auxiliar a análise dos circuitos CA em série-paralelo.
- Compreender a importância do aterramento apropriado na operação de qualquer sistema elétrico.

16.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, usaremos os conceitos fundamentais do capítulo anterior para desenvolver uma técnica para solucionar os **circuitos CA em série-paralelo**. Uma rápida revisão do Capítulo 7 pode ser útil antes de considerar esses circuitos, pois a metodologia usada aqui será semelhante à usada naquele capítulo. Os circuitos a serem discutidos terão apenas uma fonte de energia, seja ela uma fonte de tensão ou de corrente. Circuitos com mais de uma fonte de energia serão discutidos nos capítulos 17 e 18, usando métodos discutidos anteriormente para circuitos de corrente contínua.

De modo geral, quando trabalhar com circuitos de corrente alternada em série-paralelo, considere a seguinte metodologia:

1. *Redesenhe o circuito utilizando impedâncias em bloco para combinar elementos que estejam obviamente em série ou em paralelo, o que simplificará o circuito revelando claramente a estrutura fundamental do sistema.*
2. *Estude o problema e faça um rápido esboço mental de todo o procedimento a ser seguido. Isso pode resultar em uma grande economia de esforço e de tempo. Pode acontecer, em alguns casos, que não seja necessária uma análise mais profunda. A solução desejada pode ser conseguida com uma simples*

aplicação de uma lei fundamental usada em análise de circuitos.

3. *Após o procedimento geral ter sido determinado, normalmente é melhor considerar cada ramo separadamente antes de conectá-los em combinações mistas (em série-paralelo). Na maioria dos casos, trabalha-se no sentido inverso — das combinações em série e em paralelo no sentido da fonte, para determinar a impedância total do circuito. A corrente da fonte pode então ser determinada, e o caminho de volta para os elementos desconhecidos pode ser definido. À medida que se deslocar no sentido da fonte, você definirá os elementos que não foram perdidos no processo de redução. Isso o fará ganhar tempo quando tiver que se deslocar através do circuito no sentido inverso para encontrar o valor de grandezas específicas.*
4. *Quando chegar a uma solução, verifique se ela é razoável, considerando os valores da fonte de energia e dos elementos do circuito. Se não, tente resolver o circuito usando outro método ou refaça os cálculos cuidadosamente. Nesse momento, uma solução dada pelo computador pode ser bastante útil no processo de validação.*

16.2 EXEMPLOS ILUSTRATIVOS

EXEMPLO 16.1

Considerando o circuito visto na Figura 16.1:

- Calcule Z_T .
- Determine I_S .
- Calcule V_R e V_C .
- Determine I_C .
- Calcule a potência fornecida.
- Calcule o F_p do circuito.

Soluções:

a) Como sugerimos na introdução, o circuito foi redesenhado com impedâncias em bloco, como mostra a Figura 16.2. A impedância Z_1 é simplesmente o resistor R de $1\ \Omega$, e Z_2 é combinação de X_C e X_L em paralelo. O circuito agora revela claramente que é um circuito em série, sugerindo um caminho direto para o cálculo da impedância total e da corrente da fonte. Em muitos dos problemas desse tipo, deve-se trabalhar no sentido inverso até a fonte e encontrar a impedância total e a corrente da fonte. Quando as grandezas desconhecidas forem encontradas em termos dessas impedâncias equivalentes, os valores numéricos podem então ser substituídos para que se encontre o módulo e a fase das incógnitas. Em outras palavras, tente encontrar a solução desejada somente em termos de impedâncias parciais antes de substituir

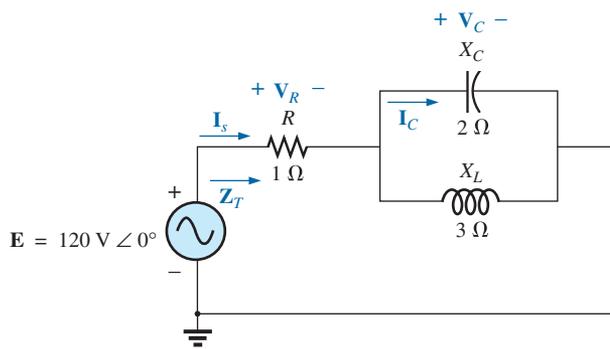


Figura 16.1 Exemplo 16.1.

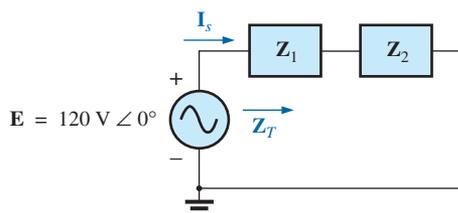


Figura 16.2 Circuito visto na Figura 16.1 após a definição das impedâncias em bloco.

os valores. Esse método normalmente tornará mais claro o caminho escolhido para a solução, enquanto proporciona economia de tempo e diminui a probabilidade de erros de cálculo. Note também na Figura 16.2 que todas as grandezas desconhecidas, exceto I_C , foram preservadas para determinar essas grandezas, significando que se pode usar a Figura 16.2 para determinar essas grandezas em vez de ter de retornar ao circuito mais complexo visto na Figura 16.1.

A impedância total é dada por:

$$Z_T = Z_1 + Z_2$$

com

$$\begin{aligned} Z_1 &= R \angle 0^\circ = 1\ \Omega \angle 0^\circ \\ Z_2 &= Z_C \parallel Z_L = \frac{(X_C \angle -90^\circ)(X_L \angle 90^\circ)}{-jX_C + jX_L} \\ &= \frac{(2\ \Omega \angle -90^\circ)(3\ \Omega \angle 90^\circ)}{-j2\ \Omega + j3\ \Omega} \\ &= \frac{6\ \Omega \angle 0^\circ}{j1} = \frac{6\ \Omega \angle 0^\circ}{1 \angle 90^\circ} = 6\ \Omega \angle -90^\circ \end{aligned}$$

e

$$Z_T = Z_1 + Z_2 = 1\ \Omega - j6\ \Omega = 6,08\ \Omega \angle -80,54^\circ$$

$$\begin{aligned} \text{b) } I_S &= \frac{E}{Z_T} = \frac{120\ \text{V} \angle 0^\circ}{6,08\ \Omega \angle -80,54^\circ} \\ &= 19,74\ \text{A} \angle 80,54^\circ \end{aligned}$$

c) Observando a Figura 16.2, concluímos que V_R e V_C podem ser calculadas usando a lei de Ohm:

$$V_R = I_S Z_1 = (19,74\ \text{A} \angle 80,54^\circ)(1\ \Omega \angle 0^\circ) = 19,74\ \text{V} \angle 80,54^\circ$$

$$V_C = I_S Z_2 = (19,74\ \text{A} \angle 80,54^\circ)(6\ \Omega \angle -90^\circ) = 118,44\ \text{V} \angle 9,46^\circ$$

d) Agora que V_C é conhecida, a corrente I_C também pode ser determinada usando a lei de Ohm:

$$I_C = \frac{V_C}{Z_C} = \frac{118,44\ \text{V} \angle -9,46^\circ}{2\ \Omega \angle -90^\circ} = 59,22\ \text{A} \angle 80,54^\circ$$

$$\text{e) } P_{\text{del}} = I_S^2 R = (19,74\ \text{A})^2 (1\ \Omega) = 389,67\ \text{W}$$

$$\text{f) } F_p = \cos \theta = \cos 80,54^\circ = 0,164\ \text{adiantado}$$

O fato de a impedância total possuir um ângulo de fase negativo (revelando que I_S está adiantada em relação a E) é uma indicação clara de que o circuito é de natureza capacitiva, tendo portanto um fator de fase adiantado. O fato de o circuito ser capacitivo pode ser determinado a

partir do circuito original, percebendo-se primeiramente que, para os elementos L - C em paralelo, a impedância menor é dominante, o que resulta em um circuito R - C .

EXEMPLO 16.2

Considerando o circuito visto na Figura 16.3:

- a) Se \mathbf{I} é $50 \text{ A} \angle 30^\circ$, calcule \mathbf{I}_1 usando a regra dos divisores de corrente.
- b) Repita o item (a) para \mathbf{I}_2 .
- c) Verifique a lei de Kirchhoff para corrente em um dos nós.

Soluções:

- a) Redesenhando o circuito como mostra a Figura 16.4, temos:

$$\mathbf{Z}_1 = R + jX_L = 3 \Omega + j4 \Omega = 5 \Omega \angle 53,13^\circ$$

$$\mathbf{Z}_2 = -jX_C = -j8 \Omega = 8 \Omega \angle -90^\circ$$

Usando a regra dos divisores de corrente, temos:

$$\mathbf{I}_1 = \frac{\mathbf{Z}_2 \mathbf{I}}{\mathbf{Z}_2 + \mathbf{Z}_1} = \frac{(8\Omega \angle -90^\circ)(50 \text{ A} \angle 30^\circ)}{(-j8\Omega) + (3\Omega + j4\Omega)} = \frac{400 \angle -60^\circ}{3 - j4}$$

$$= \frac{400 \angle -60^\circ}{5 \angle -53,13^\circ} = \mathbf{80 \text{ A} \angle -6,87^\circ}$$

- b)
$$\mathbf{I}_2 = \frac{\mathbf{Z}_1 \mathbf{I}}{\mathbf{Z}_2 + \mathbf{Z}_1} = \frac{(5\Omega \angle 53,13^\circ)(50 \text{ A} \angle 30^\circ)}{5\Omega \angle -53,13^\circ}$$

$$= \frac{250 \angle 83,13^\circ}{5 \angle -53,13^\circ}$$

$$= \mathbf{50 \text{ A} \angle 136,26^\circ}$$

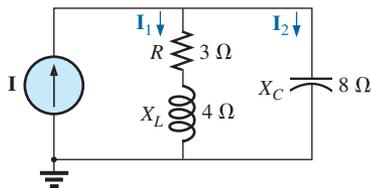


Figura 16.3 Exemplo 16.2.

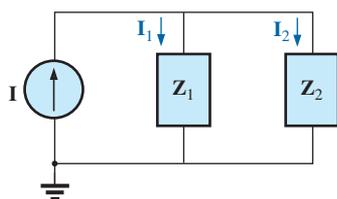


Figura 16.4 Circuito da Figura 16.3 após a definição das impedâncias em bloco.

- c) $\mathbf{I} = \mathbf{I}_1 + \mathbf{I}_2$

$$50 \text{ A} \angle 30^\circ = 80 \text{ A} \angle -6,87^\circ + 50 \text{ A} \angle 136,26^\circ$$

$$= (79,43 - j9,57) + (-36,12 + j34,57)$$

$$= 43,31 + j25,0$$

$$50 \text{ A} \angle 30^\circ = 50 \text{ A} \angle 30^\circ \quad (\text{verificada})$$

EXEMPLO 16.3

Considerando o circuito visto na Figura 16.5:

- a) Calcule a tensão \mathbf{V}_C usando a regra dos divisores de tensão.
- b) Calcule a corrente \mathbf{I}_s .

Soluções:

- a) O circuito pode ser redesenhado, como podemos ver na Figura 16.6, com:

$$\mathbf{Z}_1 = 5 \Omega = 5 \Omega \angle 0^\circ$$

$$\mathbf{Z}_2 = -j12 \Omega = 12 \Omega \angle -90^\circ$$

$$\mathbf{Z}_3 = +j8 \Omega = 8 \Omega \angle 90^\circ$$

Como queremos determinar \mathbf{V}_C , não combinaremos R e X_C em um único bloco de impedância. Note também que a Figura 16.6 revela claramente que \mathbf{E} é a tensão total na combinação de elementos em série \mathbf{Z}_1 e \mathbf{Z}_2 , o que permite o uso da regra dos divisores de tensão para calcular \mathbf{V}_C . Além disso, note que todas as correntes necessárias para determinar \mathbf{I}_s foram preservadas na

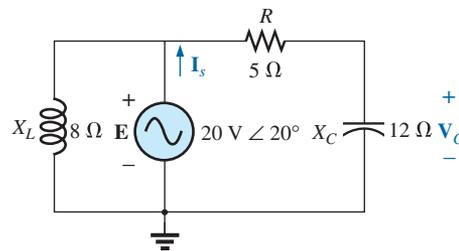


Figura 16.5 Exemplo 16.3.

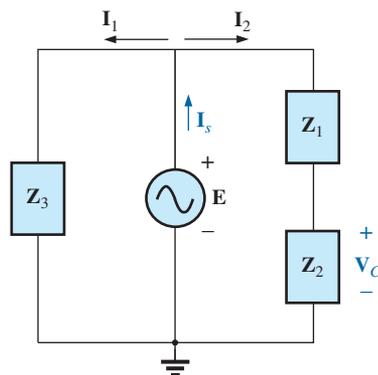


Figura 16.6 Circuito da Figura 16.5 após a definição das impedâncias em bloco.

Figura 16.6, mostrando que não é necessário retornar ao circuito da Figura 16.5 — tudo está definido no circuito da Figura 16.6.

$$V_c = \frac{Z_2 E}{Z_1 + Z_2} = \frac{(12\Omega \angle -90^\circ)(20V \angle 20^\circ)}{5\Omega - j12\Omega} = \frac{240V \angle -70^\circ}{13\Omega - 67,38^\circ} = 18,46V \angle -2,62^\circ$$

b) $I_1 = \frac{E}{Z_3} = \frac{20V \angle 20^\circ}{8\Omega \angle 90^\circ} = 2,5A \angle -70^\circ$

$$I_2 = \frac{E}{Z_1 + Z_2} = \frac{20V \angle 20^\circ}{13\Omega \angle -67,38^\circ} = 1,54A \angle 87,38^\circ$$

e

$$\begin{aligned} I_s &= I_1 + I_2 \\ &= 2,5A \angle -70^\circ + 1,54A \angle 87,38^\circ \\ &= (0,86 - j2,35) + (0,07 + j1,54) \\ I_s &= 0,93 - j0,81 = 1,23A \angle -41,05^\circ \end{aligned}$$

EXEMPLO 16.4

Dado o circuito visto na Figura 16.7:

- a) Calcule a corrente I_s .
- b) Determine a tensão V_{ab} .

Soluções:

- a) Redesenhando o circuito como o que é mostrado na Figura 16.8, obtemos:

$$\begin{aligned} Z_1 &= R_1 + jX_L = 3\Omega + j4\Omega = 5\Omega \angle 53,13^\circ \\ Z_2 &= R_2 - jX_C = 8\Omega - j6\Omega = 10\Omega \angle -36,87^\circ \end{aligned}$$

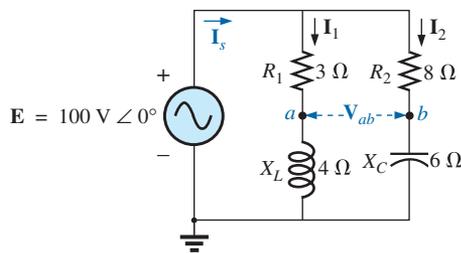


Figura 16.7 Exemplo 16.4.

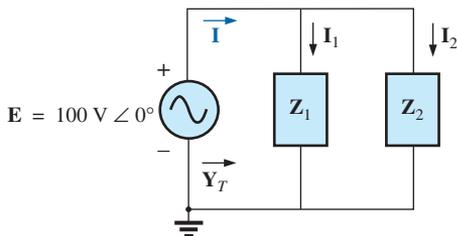


Figura 16.8 Circuito da Figura 16.7 após a definição das impedâncias em bloco.

Nesse caso, a tensão V_{ab} é perdida no circuito redesenhado, mas as correntes I_1 e I_2 permanecem explicitadas para determinar V_{ab} . A Figura 16.8 mostra claramente que a impedância total pode ser encontrada usando a equação para duas impedâncias em paralelo:

$$\begin{aligned} Z_T &= \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{(5\Omega \angle 53,13^\circ)(10\Omega \angle -36,87^\circ)}{(3\Omega + j4\Omega) + (8\Omega - j6\Omega)} \\ &= \frac{50\Omega \angle 16,26^\circ}{11 - j2} = \frac{50\Omega \angle 16,26^\circ}{11,18 \angle -10,30^\circ} \\ &= 4,472\Omega \angle 26,56^\circ \end{aligned}$$

e

$$I_s = \frac{E}{Z_T} = \frac{100V \angle 0^\circ}{4,472\Omega \angle 26,56^\circ} = 22,36A \angle -26,56^\circ$$

- b) Pela lei de Ohm,

$$I_1 = \frac{E}{Z_1} = \frac{100V \angle 0^\circ}{5\Omega \angle 53,13^\circ} = 20A \angle -53,13^\circ$$

$$I_2 = \frac{E}{Z_2} = \frac{100V \angle 0^\circ}{10\Omega \angle -36,87^\circ} = 10A \angle 36,87^\circ$$

Retornando à Figura 16.7, temos:

$$\begin{aligned} V_{R1} &= I_1 Z_{R1} = (20A \angle -53,13^\circ)(3\Omega \angle 0^\circ) \\ &= 60V \angle -53,13^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{R2} &= I_2 Z_{R2} = (10A \angle +36,87^\circ)(8\Omega \angle 0^\circ) \\ &= 80V \angle +36,87^\circ \end{aligned}$$

Em vez de usar os dois passos descritos, poderíamos ter determinado V_{R1} ou V_{R2} em uma única etapa, usando a regra dos divisores de tensão:

$$\begin{aligned} V_{R1} &= \frac{(3\Omega \angle 0^\circ)(100V \angle 0^\circ)}{3\Omega \angle 0^\circ + 4\Omega \angle 90^\circ} = \frac{300V \angle 0^\circ}{5 \angle 53,13^\circ} \\ &= 60V \angle -53,13^\circ \end{aligned}$$

Para encontrar V_{ab} temos de aplicar a lei de Kirchhoff para tensões à malha com os resistores de 3Ω e 8Ω (veja a Figura 16.9). Pela lei de Kirchhoff para tensões,

$$V_{ab} + V_{R1} - V_{R2} = 0$$

ou

$$\begin{aligned} V_{ab} &= V_{R2} - V_{R1} \\ &= 80V \angle 36,87^\circ - 60V \angle -53,13^\circ \\ &= (64 + j48) - (36 - j48) \\ &= 28 + j96 \\ V_{ab} &= 100V \angle 73,74^\circ \end{aligned}$$

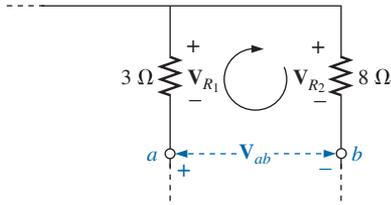


Figura 16.9 Determinação da tensão V_{ab} para o circuito visto na Figura 16.7.

EXEMPLO 16.5

O circuito mostrado na Figura 16.10 é frequentemente encontrado na análise de circuitos contendo transistores. O circuito equivalente ao transistor inclui uma fonte de corrente I e uma impedância de saída R_o . O resistor R_C é um resistor de polarização com a função de estabelecer condições CC específicas, e o resistor R_i representa a carga do estágio seguinte. O capacitor de acoplamento foi projetado para se comportar como um circuito aberto para a corrente contínua e ter uma impedância tão baixa quanto possível para as frequências de interesse, de modo a assegurar que V_L seja máxima. A faixa de frequência inclui, nesse exemplo, todo o espectro correspondente às ondas sonoras audíveis, de 100 Hz até 20 kHz. O objetivo nesse exemplo é demonstrar que, em toda essa faixa, o efeito do capacitor pode ser ignorado. Ele cumpre sua função de agente bloqueador de CC, mas permite a passagem de CA praticamente sem alterações.

- a) Determine V_L para o circuito visto na Figura 16.10 na frequência de 100 Hz.
- b) Repita o item (a) para uma frequência de 20 kHz.
- c) Compare os resultados dos itens (a) e (b).

Soluções:

- a) O circuito foi redesenhado com as impedâncias parciais mostradas na Figura 16.11:

$$Z_1 = 50 \text{ k}\Omega \angle 0^\circ \parallel 3,3 \text{ k}\Omega \angle 0^\circ = 3,096 \text{ k}\Omega \angle 0^\circ$$

$$Z_2 = R_i - jX_C$$

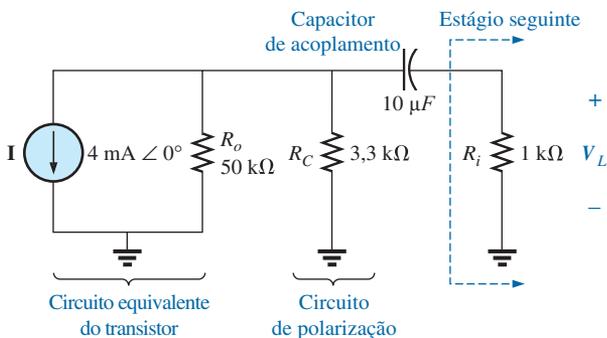


Figura 16.10 Amplificador transistorizado simples.

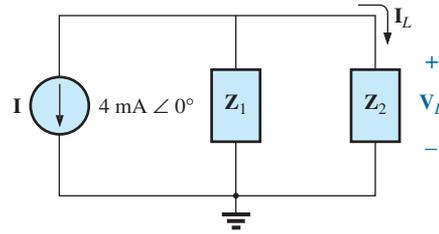


Figura 16.11 Circuito apresentado na Figura 16.10 após a definição das impedâncias em bloco.

$$\text{Para } f = 100 \text{ Hz, } X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

$$= \frac{1}{2\pi(100 \text{ Hz})(10 \mu\text{F})} = 159,16 \Omega$$

e $Z_2 = 1 \text{ k}\Omega - j159,16 \Omega$

Usando a regra dos divisores de corrente, temos:

$$I_L = \frac{-Z_1 I}{Z_1 + Z_2} = \frac{-(3,096 \text{ k}\Omega \angle 0^\circ)(4 \text{ mA} \angle 0^\circ)}{3,096 \text{ k}\Omega + 1 \text{ k}\Omega - j159,16 \Omega}$$

$$= \frac{-12,384 \text{ A} \angle 0^\circ}{4096 - j159,16} = \frac{-12,384 \text{ A} \angle 0^\circ}{4099 \angle -2,225^\circ}$$

$$= -3,02 \text{ mA} \angle 2,23^\circ = 3,02 \text{ mA} \angle 2,23^\circ + 180^\circ$$

$$= 3,02 \text{ mA} \angle 182,23^\circ$$

e $V_L = I_L Z_R$

$$= (3,02 \text{ mA} \angle 182,23^\circ)(1 \text{ k}\Omega \angle 0^\circ)$$

$$= 3,02 \text{ V} \angle 182,23^\circ$$

b) $\text{Para } f = 20 \text{ kHz, } X_C = \frac{1}{2\pi fC}$

$$= \frac{1}{2\pi(20 \text{ kHz})(10 \mu\text{F})} = 0,796 \Omega$$

Note a grande variação de X_C com a frequência. Obviamente, quanto maior a frequência, mais próxima de zero (curto-circuito) estará X_C para condições de corrente alternada. Temos:

$$Z_2 = 1 \text{ k}\Omega - j0,796 \Omega$$

Usando a regra dos divisores de corrente, temos:

$$I_L = \frac{-Z_1 I}{Z_1 + Z_2} = \frac{-(3,096 \text{ k}\Omega \angle 0^\circ)(4 \text{ mA} \angle 0^\circ)}{3,096 \text{ k}\Omega + 1 \text{ k}\Omega - j0,796 \Omega}$$

$$= \frac{-12,384 \text{ A} \angle 0^\circ}{4096 - j0,796 \Omega} = \frac{-12,384 \text{ A} \angle 0^\circ}{4096 \angle -0,011^\circ}$$

$$= -3,02 \text{ mA} \angle 0,011^\circ = 3,02 \text{ mA} \angle 0,011^\circ + 180^\circ$$

$$= 3,02 \text{ mA} \angle 180,011^\circ$$

e

$$V_L = I_L Z_R$$

$$= (3,02 \text{ mA} \angle 180,01^\circ)(1 \text{ k} \Omega \angle 0^\circ)$$

$$= 3,02 \text{ V} \angle 180,01^\circ$$

c) Os resultados indicam claramente que o capacitor interfere muito pouco na faixa de frequência de interesse. Além disso, observe que a maior parte da corrente da fonte chega até a carga em função dos parâmetros típicos empregados.

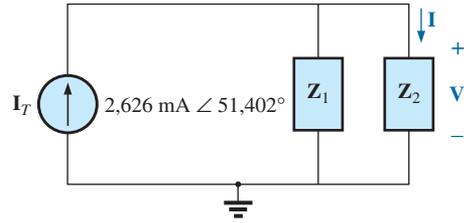


Figura 16.13 Circuito visto na Figura 16.12 após a definição das impedâncias parciais.

EXEMPLO 16.6

Dado o circuito visto na Figura 16.12:

- a) Determine a corrente **I**.
- b) Determine a tensão **V**.

Soluções:

a) As regras para fontes de corrente em paralelo são as mesmas para circuitos CA e CC. Ou seja, a fonte de corrente equivalente é a sua soma ou a sua diferença (fasorial). Portanto,

$$I_T = 6 \text{ mA} \angle 20^\circ - 4 \text{ mA} \angle 0^\circ$$

$$= 5,638 \text{ mA} + j2,052 \text{ mA} - 4 \text{ mA}$$

$$= 1,638 \text{ mA} + j2,052 \text{ mA}$$

$$= 2,626 \text{ mA} \angle 51,402^\circ$$

Redesenhando o circuito usando impedâncias em bloco, obtemos o circuito mostrado na Figura 16.13, onde:

$$Z_1 = 2 \text{ k} \Omega \angle 0^\circ + 6,8 \text{ k} \Omega \angle 0^\circ = 1,545 \text{ k} \Omega \angle 0^\circ$$

e

$$Z_2 = 10 \text{ k} \Omega - j20 \text{ k} \Omega = 22,361 \text{ k} \Omega \angle -63,435^\circ$$

Note que **I** e **V** ainda aparecem explicitamente na Figura 16.13.

Usando a regra dos divisores de corrente, temos:

$$I = \frac{Z_2 I_T}{Z_1 + Z_2} = \frac{(1,545 \text{ k} \Omega \angle 0^\circ)(2,626 \text{ mA} \angle 51,402^\circ)}{1,545 \text{ k} \Omega + 10 \text{ k} \Omega - j20 \text{ k} \Omega}$$

$$= \frac{4,057 \text{ A} \angle 51,402^\circ}{11,545 \times 10^3 - j20 \times 10^3} = \frac{4,057 \text{ A} \angle 51,402^\circ}{23,093 \times 10^3 \angle -60,004^\circ}$$

$$= 0,18 \text{ mA} \angle 111,41^\circ$$

b) $V = I Z_2$

$$= (0,176 \text{ mA} \angle 111,406^\circ)(22,36 \text{ k} \Omega \angle -63,435^\circ)$$

$$= 3,94 \text{ V} \angle 47,97^\circ$$

EXEMPLO 16.7

Considerando o circuito visto na Figura 16.14:

- a) Calcule **I**.
- b) Determine **I**₁, **I**₂ e **I**₃.
- c) Verifique a lei de Kirchhoff para corrente, demonstrando que:

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

d) Calcule a impedância total do circuito.

Soluções:

a) Redesenhando o circuito como mostra a Figura 16.15, obtemos um circuito estritamente paralelo, em que:

$$Z_1 = R_1 = 10 \Omega \angle 0^\circ$$

$$Z_2 = R_2 + jX_{L1} = 3 \Omega + j4 \Omega$$

$$Z_3 = R_3 + jX_{L2} - jX_C = 8 \Omega + j3 \Omega - j9 \Omega = 8 \Omega - j6 \Omega$$

A admitância total é:

$$Y_T = Y_1 + Y_2 + Y_3$$

$$= \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} = \frac{1}{10 \Omega} + \frac{1}{3 \Omega + j4 \Omega} + \frac{1}{8 \Omega - j6 \Omega}$$

$$= 0,1 \text{ S} + \frac{1}{5 \Omega \angle 53,13^\circ} + \frac{1}{10 \Omega \angle -36,87^\circ}$$

$$= 0,1 \text{ S} + 0,2 \text{ S} \angle -53,13^\circ + 0,1 \text{ S} \angle 36,87^\circ$$

$$= 0,1 \text{ S} + 0,12 \text{ S} - j0,16 \text{ S} + 0,08 \text{ S} + j0,06 \text{ S}$$

$$= 0,3 \text{ S} - j0,1 \text{ S} = 0,316 \text{ S} \angle -18,435^\circ$$

Calculadora. O exercício matemático anteriormente citado representa uma excelente oportunidade para de-

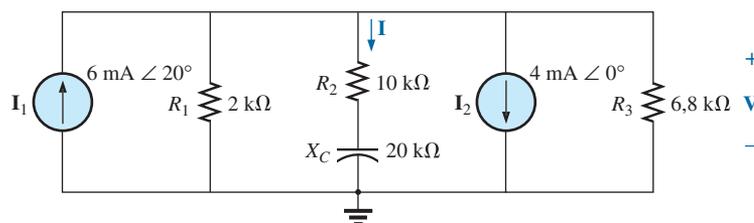


Figura 16.12 Exemplo 16.6.

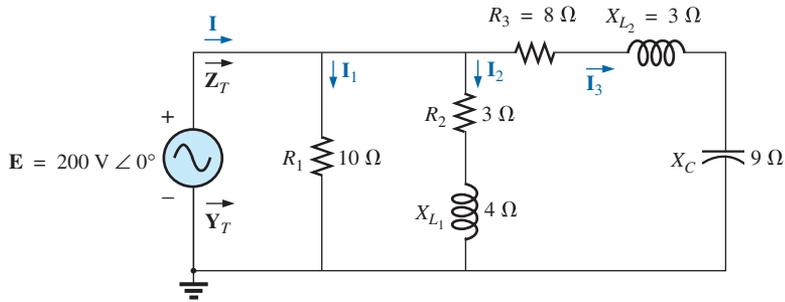


Figura 16.14 Exemplo 16.7.

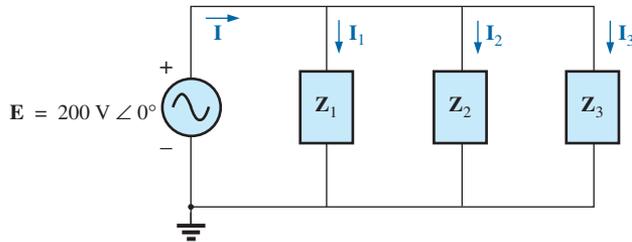


Figura 16.15 Circuito da Figura 16.14 após a definição das impedâncias parciais.

monstrar a capacidade das calculadoras atuais. Usando uma TI-89, a operação anterior estaria representada como mostra a Figura 16.16.

Lembre-se de usar o sinal negativo para o número complexo pela opção de subtração, e não pela seleção de sinal (-). A seleção de sinal é usada para ângulos negativos na forma polar.

Para fazer a conversão na forma polar, é preciso usar a sequência mostrada na Figura 16.17.

Conversão na forma polar:

A corrente **I** é dada por

$$\mathbf{I} = \mathbf{E}\mathbf{Y}_T = (200 \text{ V } \angle 0^\circ) (0,326 \text{ S } \angle -18,435^\circ)$$

$$= 63,2 \text{ A } \angle -18,44^\circ$$

b) Como a tensão é a mesma em ramos paralelos,

$$\mathbf{I}_1 = \frac{\mathbf{E}}{\mathbf{Z}_1} = \frac{200 \text{ V } \angle 0^\circ}{10 \Omega \angle 0^\circ} = 20 \text{ A } \angle 0^\circ$$

$$\mathbf{I}_2 = \frac{\mathbf{E}}{\mathbf{Z}_2} = \frac{200 \text{ V } \angle 0^\circ}{5 \Omega \angle 53,13^\circ} = 40 \text{ A } \angle -53,13^\circ$$

$$\mathbf{I}_3 = \frac{\mathbf{E}}{\mathbf{Z}_3} = \frac{200 \text{ V } \angle 0^\circ}{10 \Omega \angle -36,87^\circ} = 20 \text{ A } \angle +36,87^\circ$$

c) $\mathbf{I} = \mathbf{I}_1 + \mathbf{I}_2 + \mathbf{I}_3$

$$60 - j20 = 20 \angle 0^\circ + 40 \angle -53,13^\circ + 20 \angle +36,87^\circ$$

$$= (20 + j0) + (24 - j32) + (16 + j12)$$

$$60 - j20 = 60 - j20 \quad (\text{verificada})$$

d)
$$\mathbf{Z}_T = \frac{1}{\mathbf{Y}_T} = \frac{1}{0,316 \text{ S } \angle -18,435^\circ} = 3,17 \Omega \angle 18,44^\circ$$

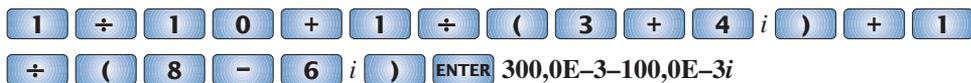


Figura 16.16 Determinação da admitância total para o circuito da Figura 16.14 por meio da calculadora TI-89.



Figura 16.17 Conversão da forma retangular da Figura 16.16 na forma polar.

EXEMPLO 16.8

Considerando o circuito visto na Figura 16.18:

- a) Calcule a impedância total Z_T .
- b) Calcule I .
- c) Determine o fator da potência total.
- d) Calcule I_1 e I_2 .
- e) Determine a potência média fornecida ao circuito.

Soluções:

- a) Redesenhando o circuito da forma que é mostrado na Figura 16.19, temos:

$$Z_1 = R_1 = 4 \Omega \angle 0^\circ$$

$$Z_2 = R_2 - jX_C = 9 \Omega - j7 \Omega = 11,40 \Omega \angle -37,87^\circ$$

$$Z_3 = R_3 + jX_L = 8 \Omega + j6 \Omega = 10 \Omega \angle +36,87^\circ$$

Observe que todas as grandezas desejadas foram mantidas no circuito redesenhado. A impedância total é:

$$Z_T = Z_1 + Z_{T1}$$

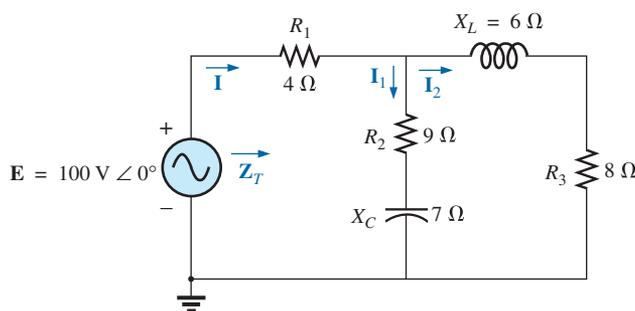


Figura 16.18 Exemplo 16.8.

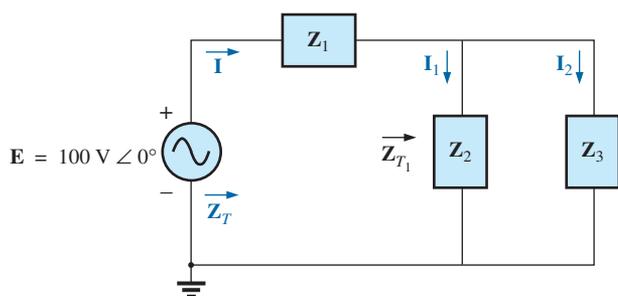


Figura 16.19 Circuito visto na Figura 16.18 após a definição das impedâncias parciais.

$$= Z_1 + \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3}$$

$$= 4\Omega + \frac{(11,40\Omega \angle -37,87^\circ)(10\Omega \angle 36,87^\circ)}{(9\Omega - j7\Omega) + (8\Omega + j6\Omega)}$$

$$= 4\Omega + \frac{114\Omega \angle -1,00^\circ}{17,03 \angle -3,37^\circ} = 4\Omega + 6,69\Omega \angle 2,37^\circ$$

$$= 4\Omega + 6,68\Omega + j0,28\Omega = 10,68\Omega + j0,28\Omega$$

$$Z_T = 10,68\Omega \angle 1,5^\circ$$

Calculadora. Outra oportunidade para demonstrar a versatilidade da calculadora! Entretanto, para realizar a operação anterior temos de conhecer as prioridades das operações matemáticas, como demonstra a Figura 16.20. Na maioria dos casos, as operações são realizadas na mesma ordem em que são feitas manualmente.

b)
$$I = \frac{E}{Z_T} = \frac{100 \text{ V} \angle 0^\circ}{10,684\Omega \angle 1,5^\circ} = 9,36 \text{ A} \angle -1,5^\circ$$

c)
$$F_p = \cos \theta_T = \frac{R}{Z_T} = \frac{10,68\Omega}{10,684\Omega} \cong 1$$

(essencialmente resistivo, o que é interessante, considerando a complexidade do circuito)

- d) Usando a regra dos divisores de corrente, temos:

$$I_2 = \frac{Z_2 I}{Z_2 + Z_3} = \frac{(11,40\Omega \angle -37,87^\circ)(9,36 \text{ A} \angle -1,5^\circ)}{(9\Omega - j7\Omega) + (8\Omega + j6\Omega)}$$

$$= \frac{106,7 \text{ A} \angle -39,37^\circ}{17 - j1} = \frac{106,7 \text{ A} \angle -39,37^\circ}{17,03 \angle -3,37^\circ}$$

$$I_2 = 6,27 \text{ A} \angle -36^\circ$$

Aplicando a lei de Kirchhoff para correntes (em vez de aplicar de novo a regra dos divisores de corrente), obtemos:

$$I_1 = I - I_2$$

ou

$$I = I_1 - I_2$$

$$= (9,36 \text{ A} \angle -1,5^\circ) - (6,27 \text{ A} \angle -36^\circ)$$

$$= (9,36 \text{ A} - j0,25 \text{ A}) - (5,07 \text{ A} - j3,69 \text{ A})$$

$$I_1 = 4,29 \text{ A} + j3,44 \text{ A} = 5,5 \text{ A} \angle 38,72^\circ$$

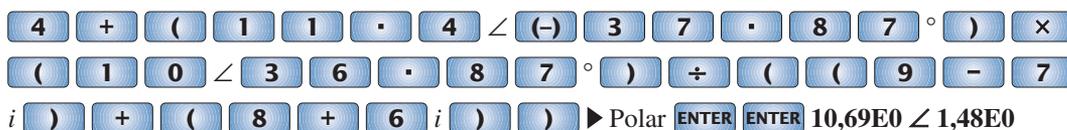


Figura 16.20 Cálculo da impedância total para o circuito da Figura 16.18 usando a calculadora TI-89.

e)
$$P_T = EI \cos \theta_T$$

$$= (100 \text{ V}) (9,36 \text{ A}) \cos 1,5^\circ$$

$$= (936) (0,99966)$$

$$P_T = \mathbf{935,68 \text{ W}}$$

16.3 CIRCUITOS EM CASCATA

Os circuitos em cascata foram discutidos em alguns detalhes no Capítulo 7. Essa seção simplesmente aplicará o primeiro método descrito na Seção 7.6 ao circuito em cascata CA senoidal geral visto na Figura 16.21. Deseja-se calcular a corrente I_6 .

As impedâncias Z_T , Z'_T e Z''_T e as correntes I_1 e I_3 são definidas na Figura 16.22. Temos:

e com

$$Z''_T = Z_5 + Z_6$$

$$Z'_T = Z_3 + Z_4 \parallel Z''_T$$

$$Z_T = Z_1 + Z_2 \parallel Z'_T$$

Então

$$I = \frac{E}{Z_T}$$

e

$$I_3 = \frac{Z_2 I}{Z_2 + Z'_T}$$

com

$$I_6 = \frac{Z_4 I_3}{Z_4 + Z''_T}$$

16.4 ATERRAMENTO

Embora normalmente tratado com pouca frequência na maioria dos cursos introdutórios de eletricidade ou eletrônica, o impacto da conexão de aterramento (GND) e como isso fornece uma medida de segurança para um projeto são tópicos muito importantes. *O potencial de aterramento é de zero volt em cada ponto de um circuito que tenha um símbolo de aterramento.* Como todos os pontos estão no mesmo potencial, todos eles podem ser conectados, mas, para que não haja confusão, a maioria fica isolada em um esquema grande. Em um esquema, os níveis de tensão são sempre fornecidos em relação ao nível de aterramento. Portanto, um sistema pode ser verificado rapidamente com a simples conexão do terminal preto do voltímetro à conexão de aterramento e com a colocação do terminal vermelho nos diversos pontos em que a tensão operacional típica é fornecida. Implicitamente, isso significa que essa parte do sistema está operando corretamente.

Existem vários tipos de aterramentos, com a aplicação determinando o uso de cada um. Um *fio terra* é aquele que está conectado diretamente ao solo por uma conexão de baixa impedância. Sob condições ambientais típicas, os potenciais de aterramento *local* são bastante uniformes, e podem ser definidos como iguais a zero volt. Essa uniformidade local deve-se a agentes condutivos suficientes no solo, como água e eletrólitos, para garantir que qualquer diferença de tensão na superfície seja igualada

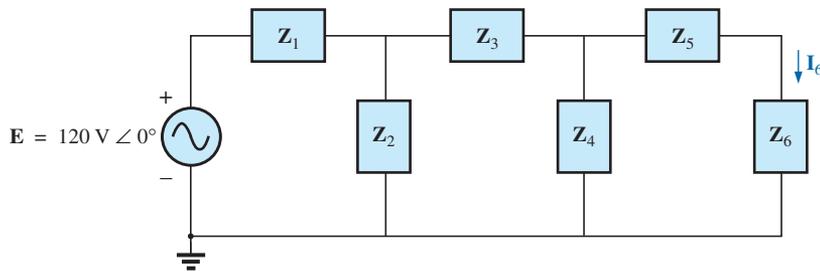


Figura 16.21 Circuito em cascata.

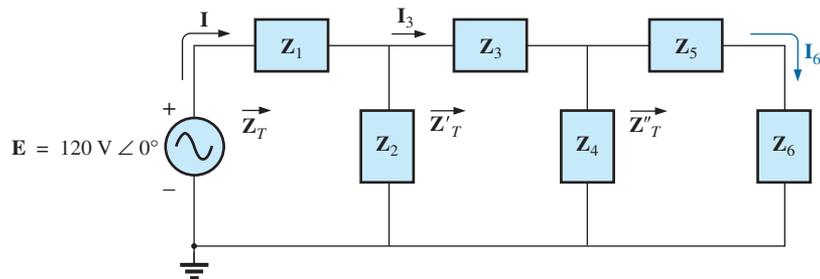


Figura 16.22 Definição do método de análise de circuitos em cascata.

por um fluxo de carga entre os dois pontos. Porém, entre longas distâncias na superfície da Terra, pode haver mudanças significativas no nível de potencial. Toda residência possui um fio terra, normalmente estabelecido por uma haste condutora longa enterrada e conectada ao quadro de alimentação. O código elétrico requer uma conexão direta do fio terra aos canos de água fria de uma casa, por motivos de segurança. Um fio energizado que toca o cano de água fria drena corrente suficiente, devido à conexão terra de baixa impedância, para disparar o disjuntor. Caso contrário, as pessoas no banheiro poderiam receber uma descarga quando tocassem na torneira de água fria, correndo o risco de sofrerem lesões corporais. Como a água é um agente condutor, qualquer área da casa com água, como banheiros e cozinha, deve ser particularmente considerada. A maior parte dos sistemas elétricos está conectada ao terra principalmente por motivos de segurança. Todas as linhas de alimentação em um laboratório, em locais industriais ou na residência são conectadas ao fio terra.

Um segundo tipo é chamado de *terra do chassi*, que pode ser *flutuante* ou conectado diretamente ao fio terra. Um terra do chassi simplesmente estipula que o chassi tem um potencial de referência para todos os pontos do circuito. Se o chassi não estiver conectado a um potencial aterrado (0 V), diz-se que ele é *flutuante*, e pode ter qualquer outra tensão de referência à qual as outras tensões são comparadas. Por exemplo, se o chassi estiver situado em 120 V, todas as tensões medidas no circuito serão referenciadas a esse nível. Portanto, uma leitura de 32 V entre um ponto na rede e o terra do chassi na realidade representa 152 V em relação ao potencial do fio terra (solo). Contudo, a maior parte dos sistemas de alta tensão não é deixada flutuando, devido à perda do fator de segurança. Por exemplo, se alguém encostasse no chassi de um aparelho e estivesse pisando sobre um aterramento adequado, todos os 120 V seriam descarregados por esse indivíduo.

O aterramento pode ser particularmente importante quando se trabalha com diversas partes de equipamento de medição no laboratório. Por exemplo, a fonte e o osciloscópio da Figura 16.23(a) estão conectados diretamente a um fio terra através do terminal negativo de cada um. Se o osciloscópio estiver conectado conforme mostra a Figura 16.23(a) para medir a tensão V_{R_1} , haverá uma situação perigosa. Os terras de cada parte do equipamento estão conectados pelo fio terra, e eles efetivamente colocam o resistor em curto. Como o resistor é o principal elemento de controle de corrente no circuito, a corrente subirá a um nível muito alto e possivelmente danificará os instrumentos ou causará efeitos colaterais perigosos. Nesse caso, a fonte ou o osciloscópio deverão ser usados no modo flutuante, ou os resistores deverão ser ligados como mostra a Figura 16.23(b). Nesse caso, os terras possuem um ponto comum e não afetam a estrutura do circuito.

O Código Nacional de Eletricidade dos Estados Unidos exige que a linha energizada (ou *alimentadora*) que transporta corrente a uma carga seja *preta*, e a linha (chamada *neutra*) que transporta a corrente de volta à fonte seja *branca*. Condutores de três fios possuem um fio terra que deve ser *verde* ou estar *desencapado*, o que garante um aterramento comum, mas que não é projetado para transportar corrente. Os componentes de um cabo de três fios e uma tomada de parede podem ser vistos na Figura 16.24. Observe que, tanto no cabo quanto na tomada, a conexão com o fio energizado é menor que a perna de retorno, e a conexão do aterramento é parcialmente circular.

O diagrama completo de fiação para uma tomada doméstica aparece na Figura 16.25. Observe que a corrente pelo fio terra é zero e que tanto o fio de retorno quanto o fio terra estão conectados ao solo. A corrente total para as cargas flui pelas linhas do alimentador e do retorno.

A importância do fio terra em um sistema de três fios pode ser demonstrada pela torradeira da Figura 16.26, com

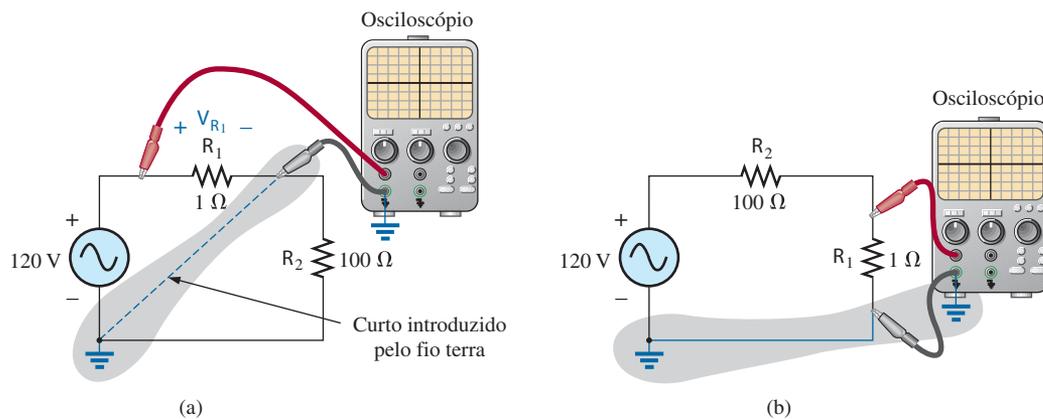


Figura 16.23 Demonstração do efeito do terra do osciloscópio na medição da tensão no resistor R_1 .

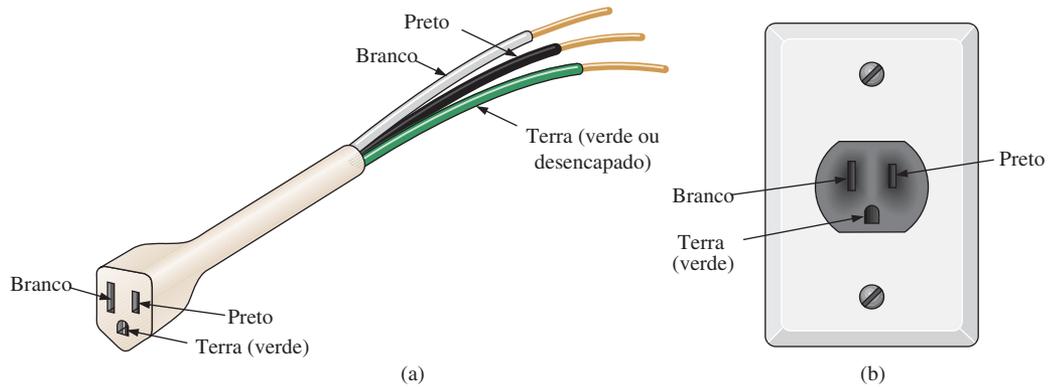


Figura 16.24 Conectores de três fios: (a) cabo de extensão; (b) tomada doméstica.

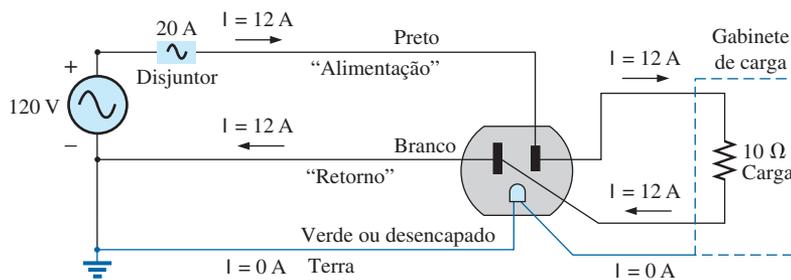


Figura 16.25 Diagrama completo de fiação para uma tomada doméstica com uma carga de $10\ \Omega$.

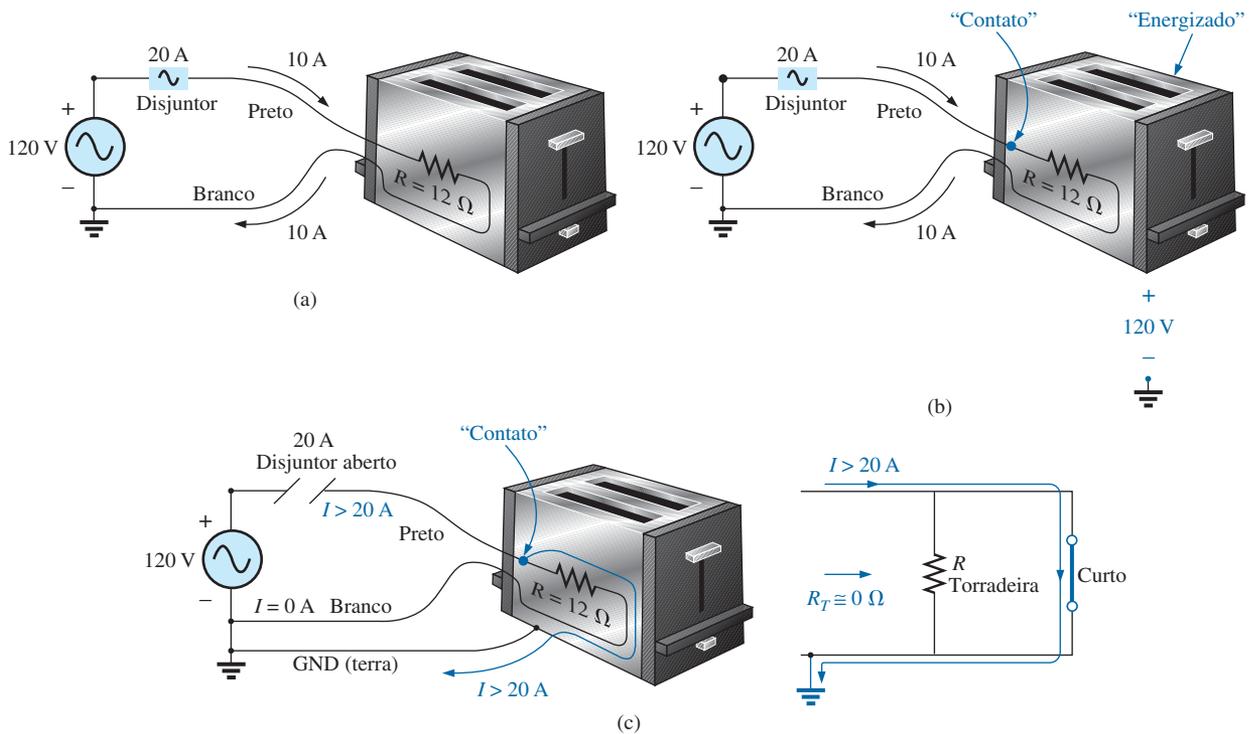


Figura 16.26 Demonstração da importância de um aparelho devidamente aterrado: (a) não aterrado; (b) não aterrado e com contato indesejável; (c) aterrado com contato indesejável.

potência de 1200 W a 120 V. Pela equação da potência, $P = EI$, a corrente drenada sob condições de operação normais é $I = P/E = 1200 \text{ W}/120 \text{ V} = 10 \text{ A}$. Se uma linha de dois fios fosse usada, como mostra a Figura 16.26(a), o disjuntor de 20 A estaria adequado a uma corrente de 10 A, e o sistema funcionaria normalmente. Porém, se o uso contínuo do alimentador desgastasse o isolamento fazendo com que tocasse o gabinete metálico da torradeira, encontraríamos a situação representada na Figura 16.26(b). O gabinete ficaria energizado, mas o disjuntor não desarmaria, pois a corrente ainda estaria em 10 A. Existiria uma situação perigosa, porque qualquer um que tocasse a torradeira iria sentir toda a tensão entre os 120 V e o solo. Se o fio terra estivesse ligado ao chassi, como mostra a Figura 16.26(c), seria criado um caminho de baixa resistência entre o ponto do curto-circuito e o terra, e a corrente saltaria para níveis muito altos. O disjuntor desarmaria e o usuário saberia que existe um problema na instalação.

Embora essa discussão não aborde todas as possíveis áreas de preocupação com o aterramento apropriado, nem introduza todas as nuances associadas ao efeito do aterramento no desempenho de um sistema, nesse ponto você deve entender a importância do impacto do aterramento.

16.5 APLICAÇÕES

A grande maioria das aplicações que aparece ao longo deste livro é de sistemas com configurações em série-paralelo. As duas aplicações que se seguem também apresentam combinações em série-paralelo de elementos e sistemas que realizam importantes tarefas do dia a dia. A tomada com interruptor de corrente por falha no aterramento (ICFA) usa um sistema de controle com chaves de proteção em série e bobinas sensoras em paralelo, enquanto o circuito equivalente ideal para um cabo coaxial usa uma combinação em série-paralelo de indutores e capacitores.

ICFA (Interruptor de Corrente por Falha no Aterramento)

O Código Nacional de Eletricidade dos Estados Unidos, considerado a ‘bíblia’ do assunto por todos os eletricitistas, recomenda agora que tomadas com interruptores de corrente por falha no aterramento (ICFA) sejam usadas em todas as áreas úmidas nas quais há riscos de se sofrer lesões sérias, como banheiros, piscinas, marinas, entre outras. Tais tomadas se parecem com uma tomada comum, exceto por terem um botão de rearme e um botão de teste na região central da tomada, conforme mostra a Figura 16.27(a). A principal diferença entre esse tipo de tomada e uma tomada comum é que a primeira desliga a alimentação mais rapidamente do que um disjuntor que

está mais afastado. Você ainda pode sentir um choque elétrico usando uma tomada ICFA, mas a corrente é interrompida tão rapidamente (em poucos milissegundos) que uma pessoa saudável não sofreria sérias lesões decorrentes da corrente elétrica. Todas as vezes em que houver dúvida em relação à aplicação desse tipo de tomada, lembre-se de que o custo é compensado pela maior segurança oferecida.

O seu funcionamento básico é mais bem ilustrado pelo circuito visto na Figura 16.27(b). O circuito de proteção separa a fonte de alimentação da tomada propriamente dita. Note, no circuito mostrado na Figura 16.27 (b), a importância da conexão do circuito de proteção ao terra central da residência (cano d’água, barramento de terra, entre outros, conectado ao painel principal). Em geral, a tomada é aterrada na mesma conexão. Basicamente, o circuito mostrado na Figura 16.27(b) monitora a corrente que entra (I_i) e a corrente que sai (I_o), proporcionando uma conexão direta à tomada quando essas correntes forem iguais. Se ocorrer uma falha, como a que acontece quando alguém fica de pé sobre uma linha ‘viva’ em um piso molhado, a corrente de retorno será menor que a corrente de entrada (alguns miliamperes já são suficientes). O circuito de proteção ‘perceberá’ essa diferença, estabelecendo um circuito aberto na linha e desligando a alimentação da tomada.

Na Figura 16.28(a) podem-se ver os fios de fase e de retorno passando pelas bobinas sensoras. As duas bobinas sensoras são conectadas separadamente na placa de circuito impresso. Existem duas chaves de controle por pulso, uma na fase e outra no retorno, para estabelecer um circuito aberto sob condições anormais de operação. Os dois contatos vistos na Figura 16.28(a) são os que proporcionam condução para a tomada. Quando ocorre uma falha, outro conjunto similar de contatos na caixa se desloca, proporcionando a condição desejada de circuito aberto. A separação é gerada por um solenoide, visto na Figura 16.28(b). Quando o solenoide é energizado, em função de uma condição de falha, ele puxa o êmbolo em sua direção, comprimindo a mola. Ao mesmo tempo, as fendas na peça inferior de plástico (conectada diretamente ao êmbolo) deslocam-se para baixo, provocando uma desconexão pelo movimento da estrutura inserida nas fendas. O botão de teste, localizado abaixo do botão de rearme, é conectado a uma barra de metal sobre a unidade vista na Figura 16.28(c). Quando pressionado, insere um resistor de alto valor entre a fase e o terra para ‘desbalancear’ a linha e gerar uma condição de falha. Quando o botão é liberado, o resistor é separado da linha e a condição de desbalanceamento é removida. Na realidade, o resistor é conectado diretamente na extremidade da barra e se move para baixo com a pressão sobre a barra, como mostra a Figura 16.28(d). Note, na Figura 16.28(c), como a conexão

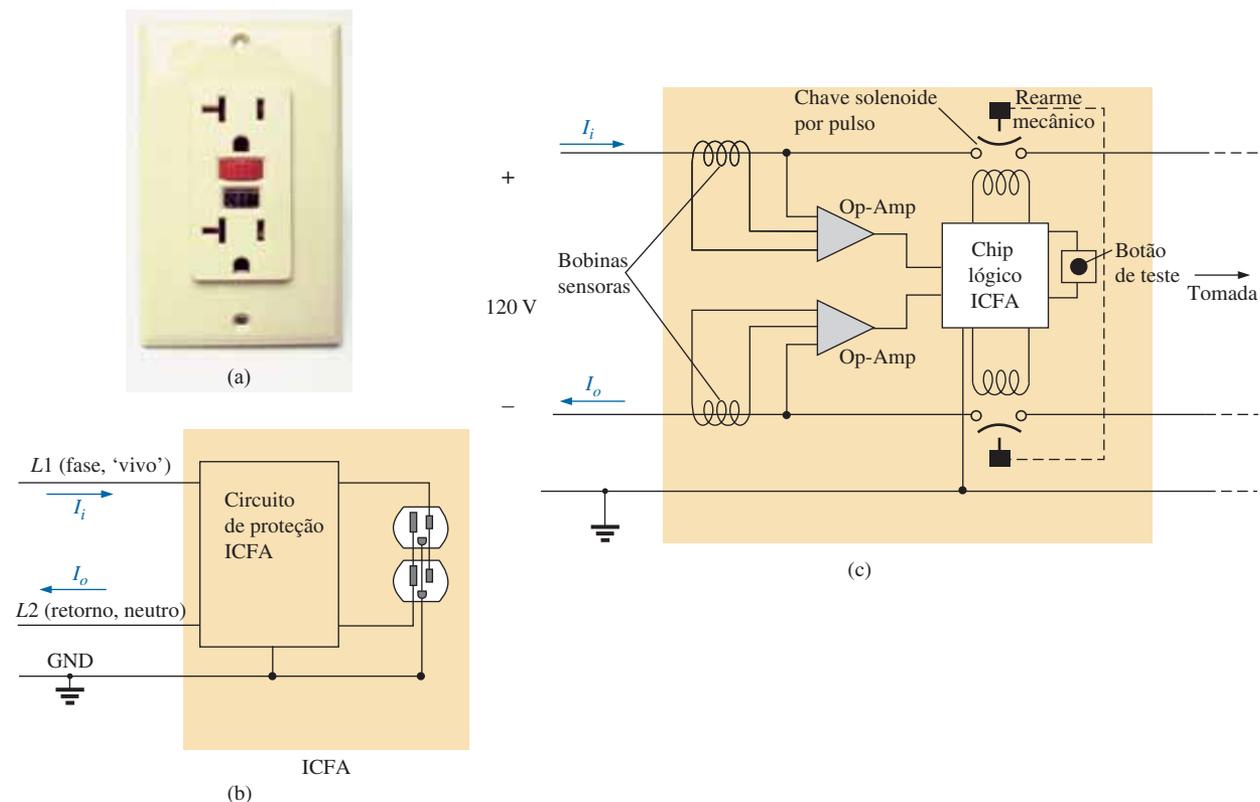


Figura 16.27 Tomada com proteção contra falha no aterramento: (a) aparência de uma unidade montada na parede; (b) funcionamento básico; (c) esquema.

metálica do terra passa ao longo de toda a unidade e como ela está conectada ao terminal terra do conector macho da tomada. Note também como ela está separada do restante do circuito por uma estrutura plástica. Embora essa unidade pareça simples externamente e tenha um tamanho relativamente pequeno, ela tem um projeto adequado e contém uma grande quantidade de tecnologia e inovação.

Antes de finalizar o assunto, observe o chip lógico no centro da Figura 16.28(a) e os capacitores e resistores de diversos tamanhos. Note também os quatro diodos na parte superior esquerda da placa de circuito impresso usados como a ponte retificadora que faz o processo de conversão CA-CC. O transistor é o componente com encapsulamento preto e com a aparência de meio círculo. Ele faz parte do circuito de acionamento para controle do solenoide. Devido às dimensões dessa unidade serem relativamente pequenas, não houve espaço para fornecer potência suficiente para abrir o circuito rapidamente. Como consequência, foi usado um circuito de pulso para controlar o movimento do solenoide de controle. Em outras palavras, o solenoide recebe um pulso por um curto período de tempo para fazer com que o êmbolo seja liberado. Se o projeto usasse um sistema que mantivesse o circuito aberto continuamente, a necessidade de potência seria maior, assim como o ta-

manho da bobina. Uma pequena bobina pode receber um pulso com a potência desejada durante um curto período de tempo sem que ocorra nenhum dano significativo.

Conforme mencionado anteriormente, em caso de dúvida instale uma tomada ICFA. Ela oferece uma medida de segurança — a um custo bastante razoável — que não pode ser ignorada.

16.6 ANÁLISE COMPUTACIONAL

PSpice

Circuito CA em ponte. Usaremos o Exemplo 16.4 para demonstrar o poder da opção **VPRINT** que está na biblioteca **SPECIAL**. Essa opção permite que se determine diretamente a magnitude e o ângulo de qualquer tensão em um circuito CA. De modo semelhante, a opção **IPRINT** faz o mesmo para correntes CA. No Exemplo 16.4, as tensões alternadas em R_1 e R_2 foram determinadas primeiro, e, em seguida, foi aplicada a lei de Kirchhoff para tensões, a fim de determinar a tensão entre dois pontos conhecidos. Como o PSpice foi projetado principalmente para determinar a tensão de um ponto em relação ao terra, o circuito visto na Figura 16.7 é inserido, conforme mostra a Figura 16.29, para permitir um cálculo direto da tensão em R_1 e R_2 .

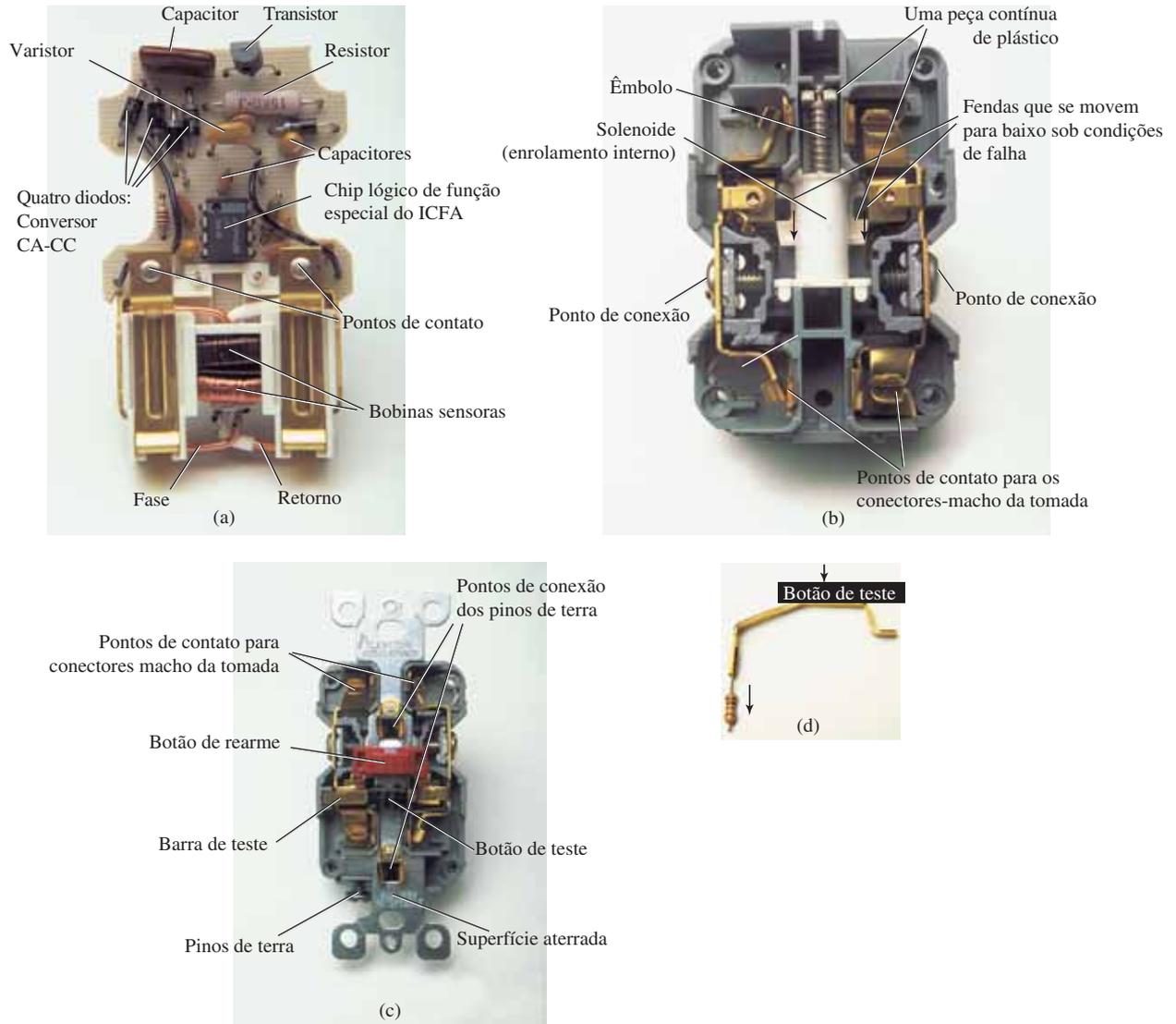


Figura 16.28 Construção de uma tomada com proteção contra falha de aterramento: (a) bobinas sensoras; (b) solenoide de controle (vista da parte inferior); (c) aterramento (vista da parte superior); (d) barra de teste.

A fonte e os componentes do circuito são inseridos usando um procedimento que foi demonstrado diversas vezes em capítulos anteriores. Embora a análise **AC Sweep** seja realizada nesse exemplo, a fonte também tem de transmitir um nível **AC**. Felizmente, isso é o mesmo que **VAMPL**, como mostra a Figura 16.29, e é apresentado na descrição da fonte através de um duplo clique no símbolo da fonte para abrir a caixa de diálogo **Property Editor**. A coluna **AC** é selecionada e o valor 100 V deve ser inserido no campo logo abaixo. Em seguida, selecione **Display** e **Name and Value**. Clique em **OK** seguido de **Apply**, e feche a caixa de diálogo. O resultado é o parâmetro **AC = 100 V** acrescentado à descrição da fonte no diagrama e no sistema. Usando os valores de reatância mostrados na Figura 16.7, os valores de *L* e *C* foram determinados a par-

tir de uma frequência de 1 kHz. A tensão em *R*₁ e *R*₂ pode ser determinada por meio do comando **Trace** da mesma forma que foi descrito no capítulo anterior, ou com a opção **VPRINT**. Os dois métodos serão discutidos nessa seção porque têm aplicação em qualquer circuito CA.

A opção **VPRINT** está na parte inferior dentro da biblioteca **SPECIAL**, na caixa de diálogo **Place Part**. Uma vez selecionada, o símbolo de uma impressora aparecerá na tela junto ao cursor, podendo ser colocado próximo ao ponto de interesse. Uma vez que o símbolo da impressora foi colocado no lugar certo, um duplo clique sobre o mesmo resulta na caixa de diálogo **Property Editor**. Rolando da esquerda para a direita, digite a palavra **ok** nos campos abaixo de **AC**, **MAG** e **PHASE**. Ao ativar cada um desses itens, o botão **Display** deve ser selecionado e a opção

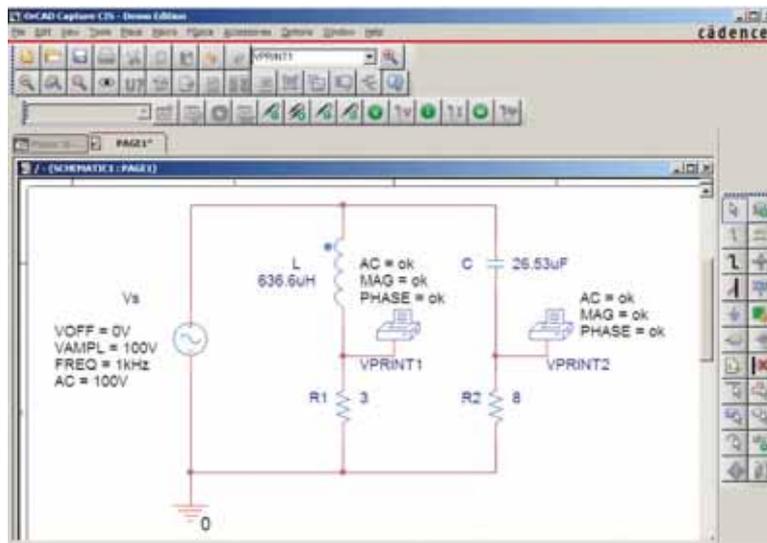


Figura 16.29 Determinação da tensão sobre R_1 e R_2 usando a opção **VPRINT** na análise com o PSpice.

Name and Value deve ser escolhida, seguida do botão **OK**. Quando todos os dados forem colocados, escolha **Apply** e feche a caixa de diálogo. O resultado pode ser visto na Figura 16.29 para as duas aplicações da opção **VPRINT**. Se preferir, os rótulos **VPRINT1** e **VPRINT2** podem ser usados para fazer distinção entre as duas quando os dados de saída forem analisados. Isso é feito retornando à caixa de diálogo **Property Editor** para cada uma através de um duplo clique no símbolo de cada impressora, e selecionando **Value** seguido de **Display** e **Value Only**. Não se esqueça de selecionar **Apply** após cada mudança na caixa de diálogo **Property Editor**. Agora, está tudo pronto para a simulação.

A simulação é iniciada selecionando o ícone **New Simulation Profile** e digitando **PSpice 16-1** no campo **Name**. Em seguida, selecione **Create** para obter a caixa de diálogo **Simulation Settings**. Dessa vez, queremos analisar o circuito em uma frequência de 1 kHz, mas não estamos interessados em gráficos em função do tempo. Assim, a opção **AC Sweep/Noise** deve ser selecionada em **Analysis type** na seção **Analysis**. Uma região denominada **AC Sweep Type** aparecerá solicitando o parâmetro **Start Frequency**. Como estamos interessados na resposta para uma única frequência, **Start Frequency** e **End Frequency** serão iguais: 1 kHz. Como precisamos apenas de um ponto na análise, **Point/Decade** deve ser 1. Clique em **OK** e, em seguida, selecione o ícone **Run PSpice**. A tela **SCHEMATIC1** aparecerá e a tensão em R_1 pode ser determinada selecionando **Trace** seguido de **Add Trace** e então **V(R1:1)**. O resultado pode ser visto na parte de baixo da Figura 16.30 com apenas um ponto plotado em 1 kHz. Como fixamos a frequência de interesse em 1 kHz, esse é o único valor de frequência com uma resposta. O valor

da tensão em R_1 é 60 V, que é igual à solução manual do Exemplo 16.4. O ângulo de fase associado com a tensão pode ser determinado pela sequência **Plot-Add Plot to Window-Trace-Add Trace-P()**, a partir da lista **Functions or Macros**, e então **V(R1:1)** para obter **P(V(R1:1))** no campo **Trace Expression**. Clique em **OK** e o gráfico resultante mostrará que o ângulo de fase está um pouco abaixo de -50° , que é certamente um valor muito próximo de $-53,13^\circ$ obtido no Exemplo 16.4.

A opção **VPRINT** apresentada oferece outro método para analisar a tensão em um circuito. Quando a janela **SCHEMATIC1** aparece após a simulação, ela deve ser fechada usando o **X**, e **PSpice** deve ser selecionado na barra de menu superior da tela resultante. Aparecerá uma lista com a opção **View Output File**. A seleção dessa opção resultará em uma longa lista de dados relativos à construção do circuito e dos resultados obtidos na simulação. A Figura 16.31 mostra parte do arquivo de saída que lista a magnitude e o ângulo de fase resultantes para as tensões definidas em **VPRINT1** e **VPRINT2**. Note que a tensão em R_1 , definida por **VPRINT1**, é 60 V com um ângulo de fase de $-53,13^\circ$. A tensão em R_2 , conforme definida por **VPRINT2**, é 80 V com um ângulo de fase de $36,87^\circ$. Os dois resultados são idênticos às soluções do Exemplo 16.4. Portanto, das próximas vezes em que a opção **VPRINT** for usada, os resultados deverão ser procurados no arquivo de saída.

Agora, determinaremos a tensão entre os dois ramos, do ponto *a* ao ponto *b*. Retorne a **SCHEMATIC1**, e selecione **Trace** seguido de **Add Trace** para obter a lista **Simulation Output Variables**. Em seguida, aplicando a lei de Kirchhoff para tensões em torno da malha fechada, vemos que a tensão desejada é **V(R1:1)-V(R2:1)** que,

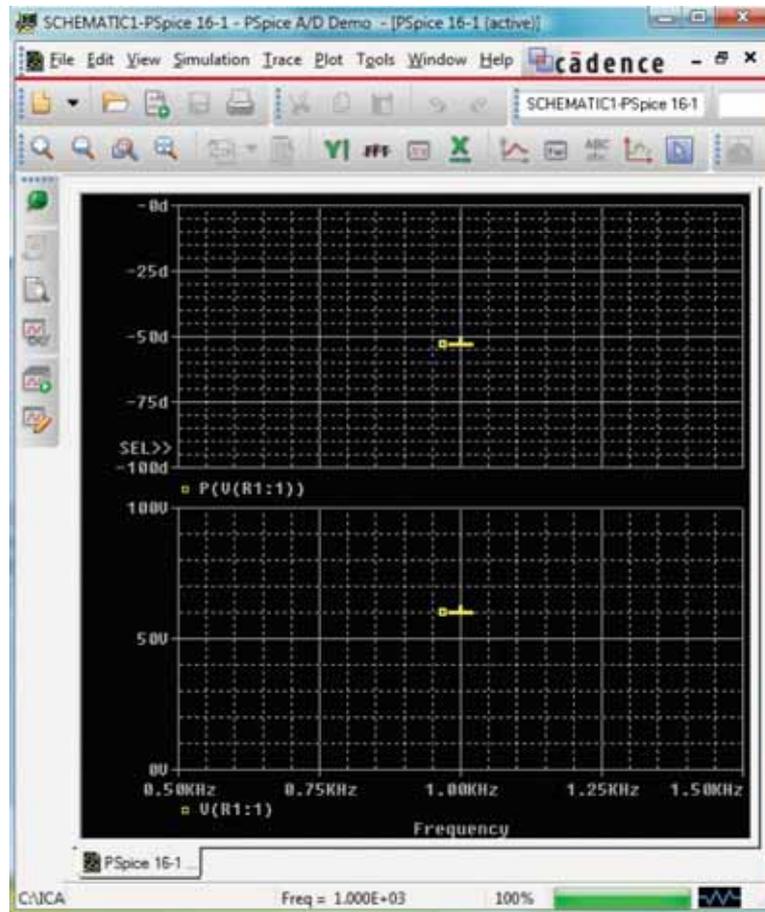


Figura 16.30 Magnitude e ângulo de fase resultantes para a tensão V_{R_1} do circuito visto na Figura 16.29.

```

** Profile: "SCHEMATIC1-PSpice 16-1"
[ C:\NCA12\PSpice\pspice 16-1-pspicefiles\schematic1\pspice 16-1.sim ]

**** AC ANALYSIS TEMPERATURE = 27.000 DEG C
*****
FREQ VM(N00879) VP(N00879)
1.000E+03 6.000E+01 -5.313E+01

**** AC ANALYSIS TEMPERATURE = 27.000 DEG C
*****
FREQ VM(N00875) VP(N00875)
1.000E+03 8.000E+01 3.687E+01
    
```

Figura 16.31 Resposta de VPRINT1 (V_{R_1}) e VPRINT2 (V_{R_2}) para o circuito visto na Figura 16.29.

seguida do botão **OK**, resulta em um ponto plotado na tela que é visto na parte de baixo da Figura 16.32. Note que é exatamente 100 V, conforme obtido na solução manual. O ângulo de fase pode então ser determinado através de **Plot-Add Plot to Window-Trace-Add trace**, criando a expressão $P(V(R1:1)-V(R2:1))$. Lembre-se de que a expressão pode ser gerada com as listas de **Output Variables** e **Functions**, mas também pode ser simplesmente digitada a partir do teclado. Entretanto, sempre garanta que

a quantidade de parênteses abertos seja igual à quantidade de parênteses fechados. Clique em **OK** e a solução com um valor próximo de -105° aparecerá. Uma leitura mais precisa pode ser obtida pelo uso de **Plot-Axis Settings-Y Axis-User Defined** e pela alteração da escala para -100° a -110° . O resultado é mostrado na parte superior da tela que é vista na Figura 16.32, com um ângulo próximo de $-106,5^\circ$ ou $73,5^\circ$, que está muito próximo da solução teórica, que é $73,74^\circ$.

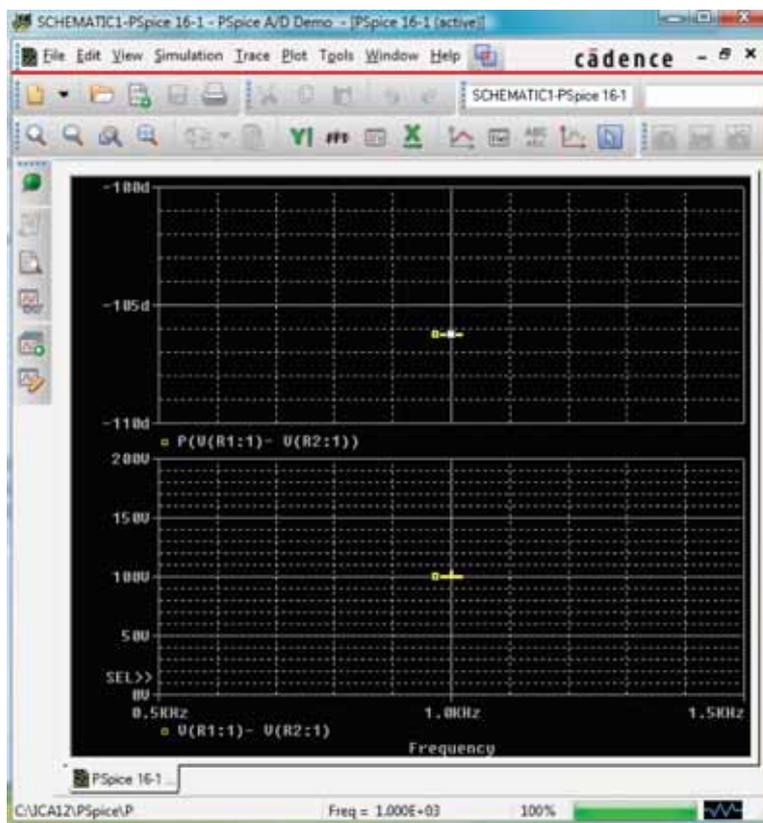


Figura 16.32 Resposta do PSpice para a tensão entre os dois pontos superiores dos resistores R_1 e R_2 .

Finalmente, a última maneira de determinar a tensão na ponte, conforme desejamos, é substituir a opção **VPRINT2** por **GND** nesse ponto, conforme mostra a Figura 16.33. Não se esqueça de remover o **GND** original do circuito. Agora, a tensão gerada a partir do ponto superior de R_1 em relação a **GND** será a tensão desejada. Repetindo toda a simulação, teremos o gráfico mostrado na Figura 16.34 com os mesmos resultados apresentados na Figura 16.32. Entretanto, note que mesmo que as duas figuras pareçam iguais, os valores expressos na parte inferior esquerda de cada gráfico são diferentes.

Multisim

Usaremos agora o Multisim para determinar a tensão no último componente do circuito em cascata visto na Figura 16.35. Os desenvolvimentos matemáticos realizados neste capítulo certamente sugerirão que essa análise seria um exercício prolongado caso a álgebra complexa fosse usada, e um erro (um único sinal ou um ângulo incorreto) seria suficiente para invalidar os resultados. Entretanto, leva-se apenas alguns minutos para ‘desenhar’ o circuito na tela e apenas alguns segundos para gerar os resultados — resultados que geralmente podem ser considerados certos se todos os parâmetros forem inseridos corretamente.

Os resultados computacionais representam certamente uma excelente maneira de verificar a solução manual.

Nosso primeiro método será usar um osciloscópio para medir a amplitude e o ângulo de fase da tensão de saída, conforme mostra a Figura 16.35. Os ajustes feitos no osciloscópio incluem **Time base** de $20 \mu\text{s}/\text{div}$, pois o período de um sinal de 10 kHz é $100 \mu\text{s}$. O canal **A** foi ajustado em $10 \text{ V}/\text{div}$. de maneira que toda a tensão de 20 V do sinal aplicado tenha um valor de pico compreendido entre duas divisões na tela do osciloscópio. Note na Figura 16.35 que **Channel A** está conectado diretamente na fonte **Vs** e na entrada **Trigger** para a sincronização. Esperando que a tensão de saída tenha uma amplitude menor, a sensibilidade vertical de **Channel B** é ajustada em $1 \text{ V}/\text{div}$. A análise é iniciada colocando a chave **Simulation** na posição **1**. É importante entender que

quando a simulação é iniciada, os circuitos com elementos reativos levam algum tempo para estabilizar e para a resposta alcançar a condição de regime permanente. Portanto, é prudente deixar o sistema em execução durante um tempo antes de selecionar Single no osciloscópio para obter a forma de onda estável para análise.

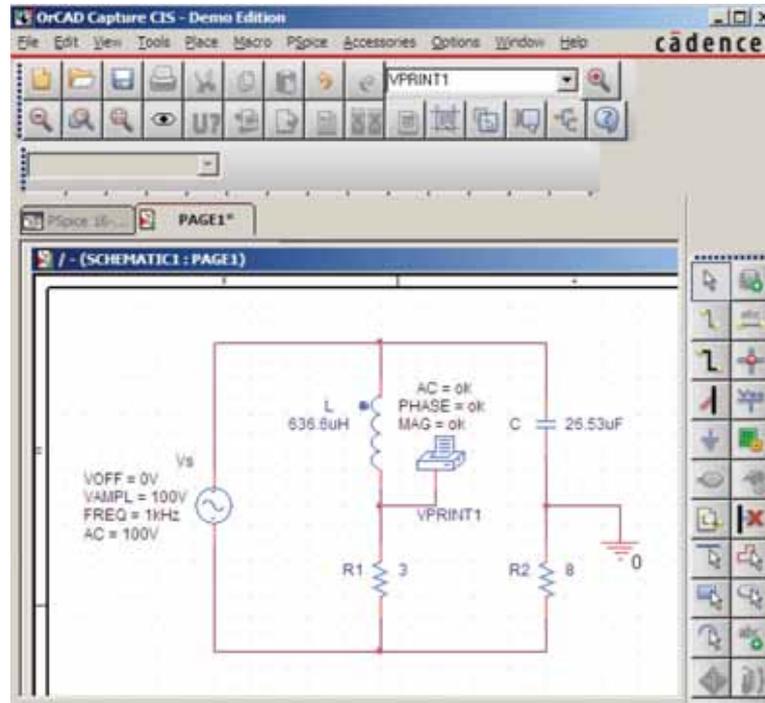


Figura 16.33 Determinação da tensão entre os dois pontos superiores dos resistores R_1 e R_2 movendo a conexão de terra mostrada na Figura 16.29 para a posição de VPRINT2.

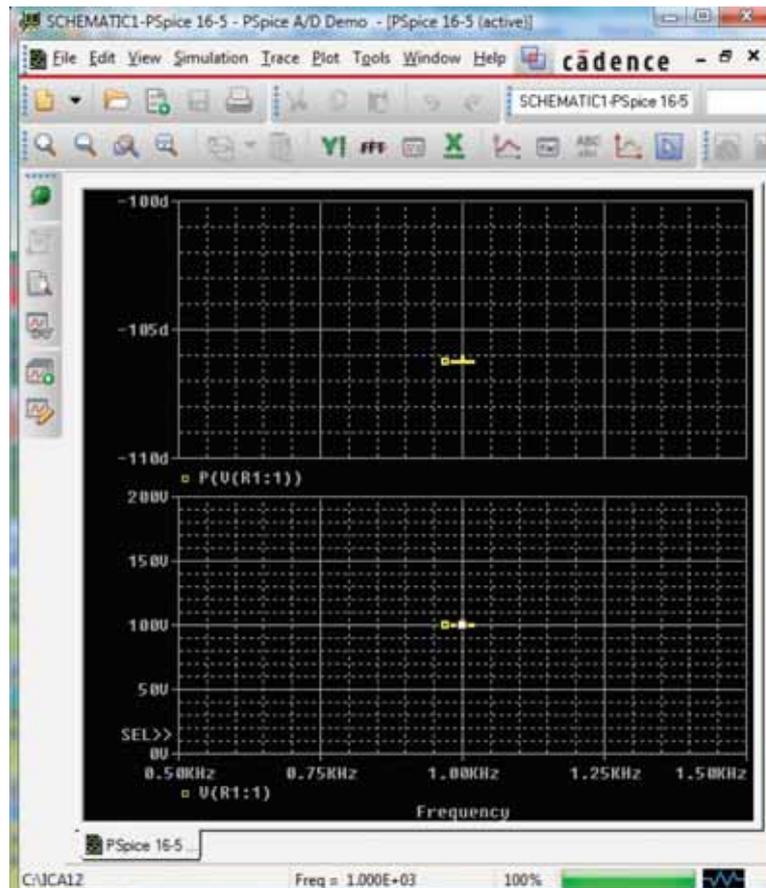


Figura 16.34 Resposta do PSpice à simulação do circuito visto na Figura 16.33.

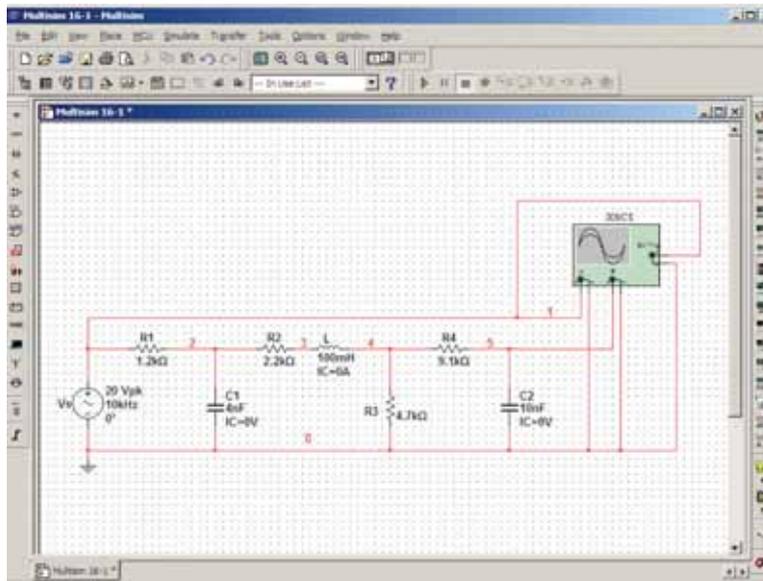


Figura 16.35 Uso do osciloscópio do Multisim para determinar a tensão sobre o capacitor C_2 .

Os gráficos resultantes vistos na Figura 16.36 mostram claramente que a tensão aplicada tem uma amplitude de 20 V e um período de 100 μs (5 div., sendo 20 $\mu\text{s}/\text{div.}$). Os cursores, situados à esquerda e à direita da tela, estão prontos para serem usados. Observando a tela do monitor e clicando na pequena seta vermelha (com o número 1) situada na parte superior da tela do osciloscópio, podemos arrastá-la para qualquer posição no eixo horizontal. À medida que movemos o cursor, a magnitude de cada forma de onda aparece no campo **T1** abaixo da tela do osciloscópio.

Comparando as inclinações positivas na passagem com zero, podemos ver que a tensão aplicada está adiantada em um ângulo maior que 90° em relação à tensão de saída. Posicionando o cursor no ponto em que a tensão de saída no canal B passa pelo zero com uma inclinação positiva, não encontramos exatamente 0 V, mas 0,01 V certamente está muito próximo em 39,8 μs (**T1**).

Sabendo que a tensão aplicada passa pela origem em 0 μs , podemos calcular o ângulo de fase da seguinte maneira:

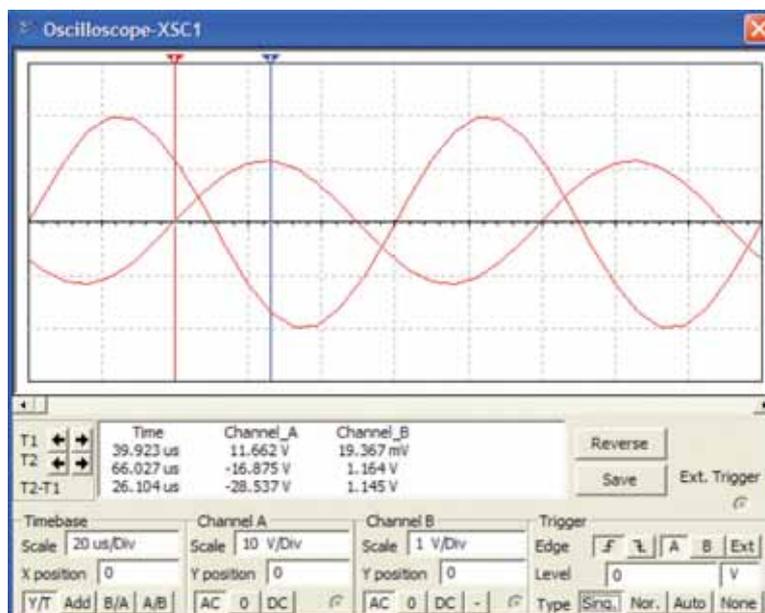


Figura 16.36 Uso do Multisim para mostrar as tensões aplicadas sobre o capacitor C_2 para o circuito visto na Figura 16.35

$$\frac{39,8\mu\text{s}}{100\mu\text{s}} = \frac{\theta}{360^\circ}$$

$$\theta = 143,28^\circ$$

que resulta em uma tensão de saída com um ângulo associado de $-143,28^\circ$. O segundo cursor está na borda direita da tela e tem a cor azul. Selecionando e arrastando esse cursor até o pico da tensão de saída, temos 1,16 V em 66,33 μs (T2). O resultado total dessa medida é:

$$V_{C2} = 1,16\text{ V} \angle -143,28^\circ$$

Nosso segundo método será usar a opção **AC Analysis** no menu **Simulate**. Primeiro, entenda que, quando estávamos usando o osciloscópio, conforme descrito anteriormente, não houve necessidade de passar por uma sequência de caixas de diálogo para escolher a análise desejada. Tudo o que foi necessário fazer foi simular, usando a chave ou a sequência **Simulate Run** — o osciloscópio estava lá para medir a tensão de saída. O método de **AC Analysis** requer que, primeiramente, você retorne à caixa de diálogo **AC_VOLTAGE** e defina a magnitude de **AC Analysis** em 20 V. Depois, que use a sequência **Simulate-Analyses-AC Analysis** para obter a caixa de diálogo **AC Analysis**, na qual **Start frequency** e **Stop frequency** serão ajustados em 10 kHz e **Selected variable for Analysis** em **V(5)**. A seleção de **Simulate** resultará em um gráfico magnitude-fase com pequenos indicadores Δ em 10 kHz.

Nesse ponto, é difícil ter uma boa leitura da magnitude da tensão. Entretanto, isso é facilmente corrigido selecionando primeiro um dos gráficos e acrescentando a

grade com **Show Grid**, e exibindo a legenda para cada um com **Show Legend**. Lembre-se sempre de que a maioria das caixas de diálogo, como aquelas associadas a **Legend** e **Cursor**, podem ser movidas simplesmente selecionando a barra de cabeçalho azul e movendo para a posição desejada. Se agora selecionarmos o gráfico de **Magnitude** e dermos um clique do botão direito do mouse, aparecerá uma listagem de opções. A seleção de **Properties** e depois **Left Axis** permitirá mudar a faixa e a escala do eixo esquerdo. Se escolhermos **Min 1** e **Max 2** seguido por **OK**, o resultado aparecerá entre os dois valores mais próximos do 1. Retornando à caixa de diálogo **Graph Properties** e selecionando **Left Axis**, podemos escolher **Linear** com um intervalo de **Min** = 1,05 e **Max** = 1,35, e **Total Ticks** pode ser 6, **Minor Ticks** 1 e **Precision** 2 (centésimos na escala vertical). O resultado mostra claramente que estamos próximos de 1,6 V em magnitude. Uma precisão adicional pode ser obtida com **Show Cursors**, para obter a caixa de diálogo **AC Analysis** para **V(5)**. Movendo um cursor para **x1** = 10 kHz, encontramos **y1** = 1.1946 V, com um grau de precisão muito alto, conforme mostra a Figura 16.37. Se selecionarmos a curva **Phase(deg)** e usarmos o controle de cursor, veremos que, em **x1** = 10 kHz, **y1** = $142,147^\circ$, que é um valor muito próximo do que foi obtido anteriormente.

Portanto, em resumo, temos dois métodos para obter uma tensão alternada em um circuito — um por meio de instrumentos e o outro por meio de métodos computacionais. Ambos são válidos, embora, como esperado, o método computacional tenha um nível de precisão maior.

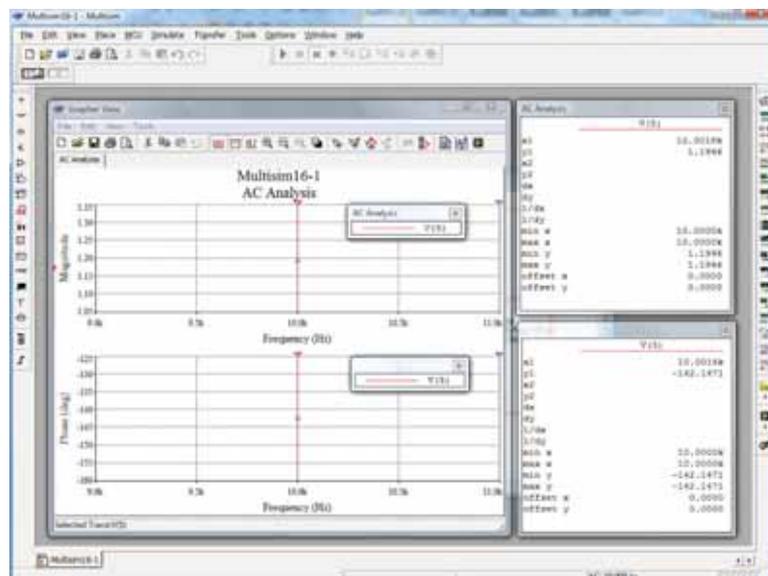


Figura 16.37 Uso da opção **AC Analysis** do Multisim para determinar a magnitude e o ângulo de fase da tensão V_{C2} para o circuito visto na Figura 16.35.

PROBLEMAS

Seção 16.2 Exemplos ilustrativos

- Dado o circuito com elementos em série e em paralelo vistos na Figura 16.38, resolva os itens a seguir.
 - Calcule Z_T .
 - Determine I_s .
 - Determine I_1 .
 - Calcule I_2 .
 - Calcule V_L .
- Dado o circuito visto na Figura 16.39:
 - Determine a impedância total Z_T .
 - Determine a corrente I_s .
 - Calcule I_C usando a regra dos divisores de corrente.
 - Calcule V_L usando a regra dos divisores de tensão.

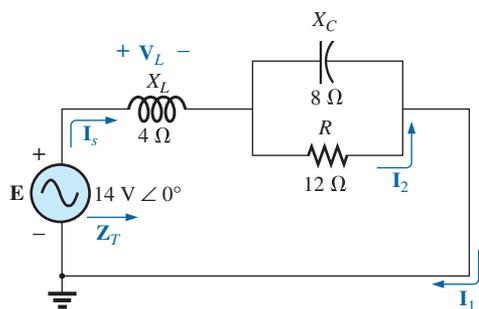


Figura 16.38 Problema 1.

- Dado o circuito visto na Figura 16.40:
 - Determine a impedância total Z_T .
 - Determine a corrente I_s .
 - Calcule I_2 usando a regra do divisor de corrente.
 - Calcule V_C usando a regra do divisor de tensão.
 - Calcule a potência média fornecida ao circuito.
- Dado o circuito mostrado na Figura 16.41:
 - Determine a impedância total Z_T .
 - Calcule a tensão V_2 e a corrente I_L .
 - Calcule o fator de potência do circuito.
- Dado o circuito visto na Figura 16.42:
 - Calcule a corrente I .
 - Calcule a tensão V_C .
 - Calcule a potência média fornecida ao circuito.

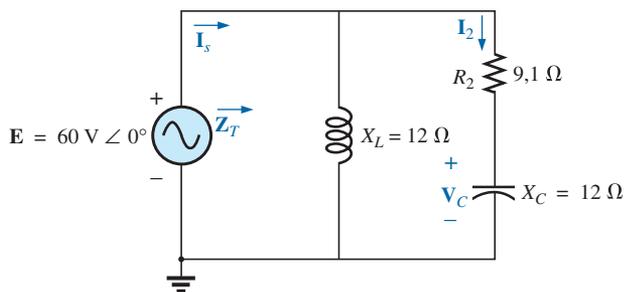


Figura 16.40 Problema 3.

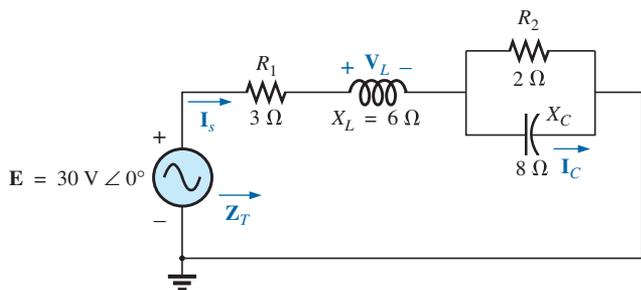


Figura 16.39 Problemas 2 e 15.

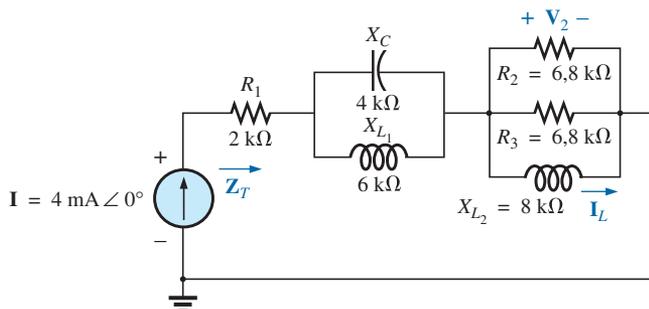


Figura 16.41 Problema 4.

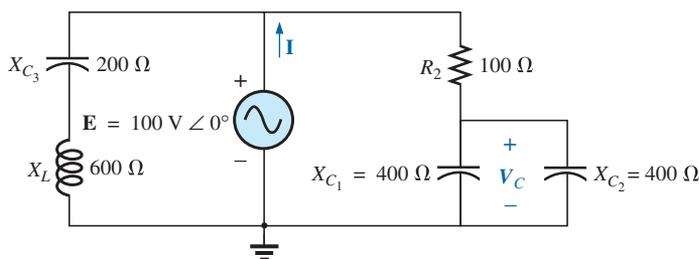


Figura 16.42 Problema 5.

- *6. Dado o circuito visto na Figura 16.43, faça o que se pede.
- Calcule a corrente I_1 .
 - Calcule a tensão V_c usando a regra dos divisores de tensão.
 - Calcule a tensão V_{ab} .
- *7. Dado o circuito da Figura 16.44, resolva os itens a seguir.
- Calcule a corrente I_1 .

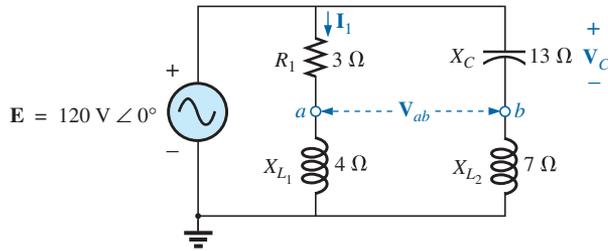


Figura 16.43 Problema 6.

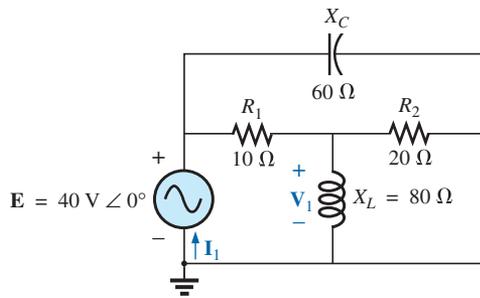


Figura 16.44 Problema 7 e 16.

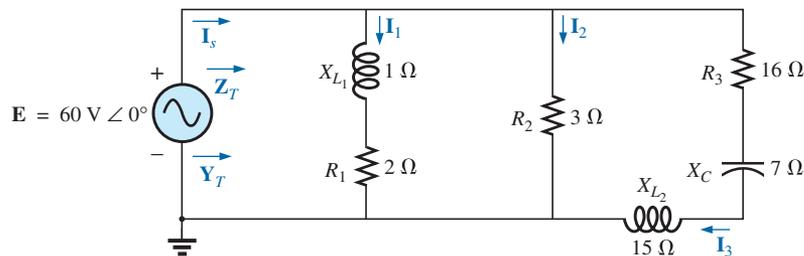


Figura 16.45 Problemas 8.

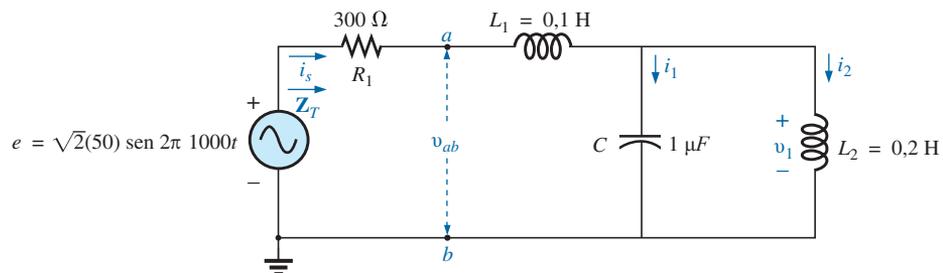


Figura 16.46 Problema 9.

- Calcule a tensão V_1 .
 - Calcule a potência média fornecida ao circuito.
8. Dado o circuito visto na Figura 16.45:
- Determine a impedância total Z_T e a admitância total Y_T .
 - Determine as correntes I_1 , I_2 e I_3 .
 - Verifique a lei de Kirchhoff para correntes demonstrando que $I_s = I_1 + I_2 + I_3$.
 - Determine o fator de potência do circuito e indique se ele é atrasado ou adiantado.
- *9. Dado o circuito mostrado na Figura 16.46, faça o que se pede.
- Calcule a impedância total Z_T .
 - Calcule a corrente da fonte I_s em forma fasorial.
 - Calcule as correntes I_1 e I_2 em forma fasorial.
 - Calcule as tensões V_1 e V_{ab} em forma fasorial.
 - Calcule a potência média fornecida ao circuito.
 - Determine o fator de potência do circuito e indique se ele é adiantado ou atrasado.
- *10. Dado o circuito da Figura 16.47, calcule:
- a impedância total Z_T ;
 - a tensão V_1 em forma fasorial;
 - a corrente I_1 em forma fasorial;
 - a tensão V_2 em forma fasorial;
 - a tensão da fonte V_s em forma fasorial.
11. Dado o circuito da Figura 16.48, calcule:
- a impedância total Z_T ;
 - a tensão V_1 no resistor de 2 Ω usando a regra dos divisores de tensão;
 - a corrente I_1 usando a lei de Ohm;
 - a corrente I_s .

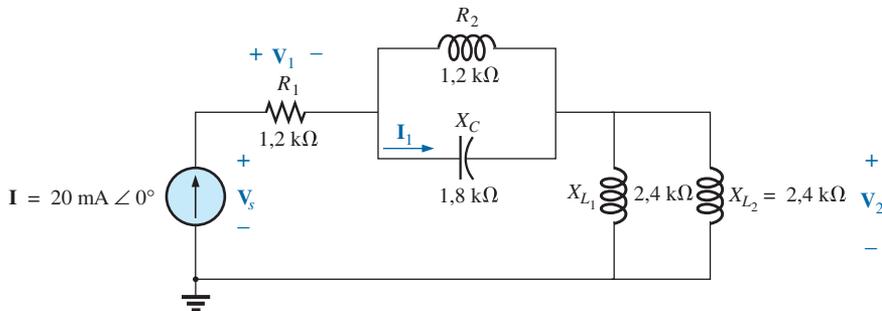


Figura 16.47 Problema 10.

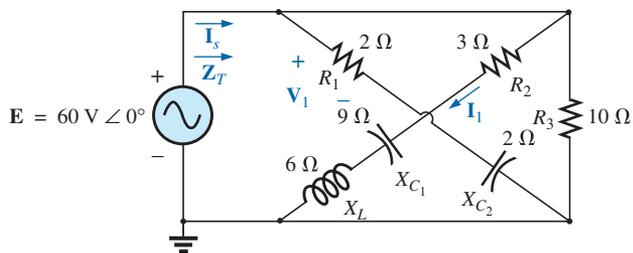


Figura 16.48 Problemas 11 e 17.

Seção 16.3 Circuitos em cascata

12. Determine a corrente I_s para o circuito visto na Figura 16.49. Note o efeito de um elemento reativo sobre o resultado dos cálculos.

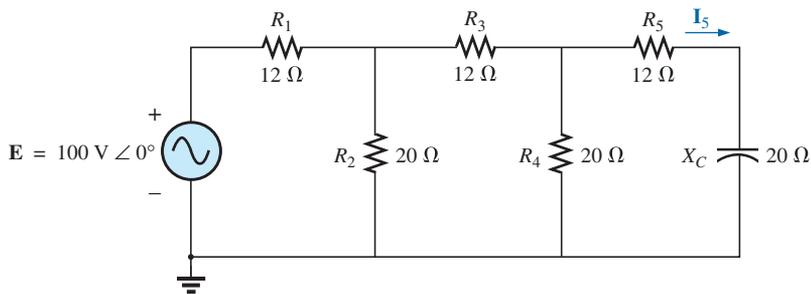


Figura 16.49 Problema 12.

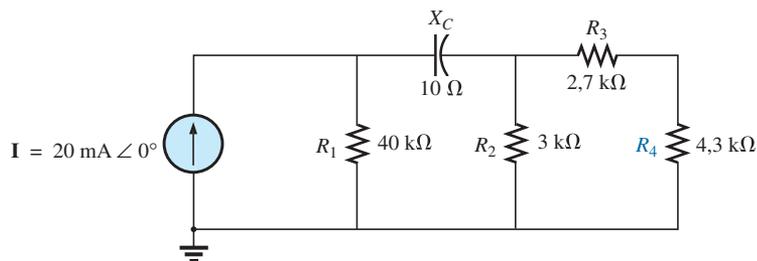


Figura 16.50 Problema 13.

- 13. Determine a potência média fornecida a R_4 no circuito mostrado na Figura 16.50.
- 14. Determine a corrente I_1 para o circuito visto na Figura 16.51.

Seção 16.6 Análise computacional

PSpice ou Multisim

Para os problemas 15 a 18, use uma frequência de 1 KHz para determinar os valores de indutância e de capacitância necessários para os arquivos de entrada. Escreva o arquivo de entrada para cada caso.

- *15. Repita o Problema 2 usando o PSpice ou o Multisim.
- *16. Repita o Problema 7, itens (a) e (b), usando o PSpice ou o Multisim.
- *17. Repita o Problema 11 usando o PSpice ou o Multisim.
- *18. Repita o Problema 14 usando o PSpice ou o Multisim.

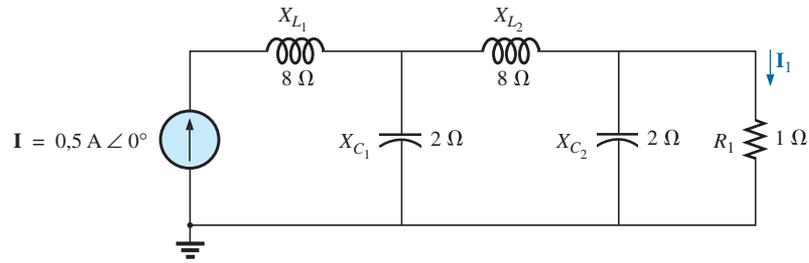


Figura 16.51 Problemas 14 e 18.

GLOSSÁRIO

Circuito CA em série-paralelo: Combinação de ramos em série e em paralelo no mesmo circuito. Cada ramo pode conter um número qualquer de elementos cuja impedância depende da frequência aplicada.

Circuito em cascata: Combinação repetida de elementos em série e em paralelo que se assemelha a uma escada.