

Formas de ondas pulsadas e a resposta de circuitos R-C



Objetivos

- Familiarizar-se com os termos específicos que definem uma forma de onda pulsada e aprender a calcular os diversos parâmetros como largura do pulso, tempos de subida e descida e inclinação.
- Calcular a taxa de repetição e o ciclo de trabalho de qualquer forma de onda pulsada.
- Conhecer os parâmetros que definem a resposta de um circuito R-C a uma entrada de onda quadrada.
- Entender como uma ponta de prova atenuadora de um osciloscópio é usada para melhorar a aparência de uma forma de onda pulsada na saída.

24.1 INTRODUÇÃO

Nossas análises até agora se limitaram a formas de onda alternadas, que variam de modo senoidal. Neste capítulo, apresentaremos a terminologia básica associada a formas de onda pulsadas e examinaremos a resposta de um circuito $R-C$ a uma onda quadrada. As formas de onda pulsadas são muito usadas na indústria eletroeletrônica. São muitos os instrumentos de medida, equipamentos de comunicação, computadores, sistemas de radar, entre outros, que empregam sinais pulsados para controlar operações, transmitir dados e exibir informações em diversos formatos.

A resposta dos circuitos que estudamos até agora a um sinal pulsado é muito diferente da resposta a um sinal senoidal. Na realidade, teremos de resgatar alguns conceitos e equações que estudamos no Capítulo 10 a respeito do comportamento de capacitores em circuitos de corrente contínua. O assunto tratado neste capítulo, que é de natureza meramente introdutória, foi elaborado para fornecer os conceitos fundamentais que lhe serão úteis quando as formas de onda pulsadas forem encontradas em aplicações específicas.

24.2 PULSOS IDEAIS E PULSOS REAIS

O **pulso ideal** mostrado na Figura 24.1 tem lados verticais, cantos bem definidos e é plano no topo; começa instantaneamente em t_1 e termina da mesma forma abrupta em t_2 .

A forma de onda do pulso que vemos na Figura 24.1 será usada em muitas das análises deste capítulo e provavelmente aparecerá nas investigações iniciais de sistemas que vão além dos objetivos deste livro. Uma vez que as respostas de um dispositivo, circuito ou sistema a pulsos ideais tenham sido bem compreendidas, poderemos analisar a resposta a um **pulso real** (ou **verdadeiro**, ou **prático**). Se tentássemos mostrar todas as diferenças entre um pulso ideal e um pulso real em uma única figura, provavelmente o resultado seria confuso e de difícil compreensão. Portanto, diversas formas de onda serão usadas para definir os parâmetros críticos.

Os elementos reativos de um circuito, ao se oporem às variações instantâneas na tensão (capacitor) e corrente (indutor), modificam a inclinação das duas bordas do

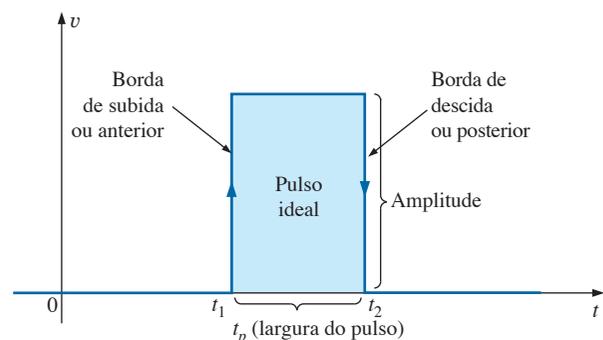


Figura 24.1 Forma de onda pulsada ideal.

pulso, como vemos na Figura 24.2. A *borda de subida* do pulso visto na Figura 24.2 é definida como a borda na qual o pulso aumenta do valor mais baixo para o mais alto.

A *borda de descida* é definida como aquela na qual o pulso diminui do valor mais alto para o mais baixo. Como a *borda de subida* é a que ocorre primeiro (é a mais próxima de $t = 0$ s), ela também é chamada de *borda anterior*. A *borda de descida* sempre vem após a *borda anterior*, e, portanto, é denominada *borda posterior*.

As duas bordas estão indicadas nas figuras 24.1 e 24.2.

Amplitude

Na maioria das aplicações, a **amplitude de um pulso** é definida como o valor de pico a pico. É claro que, se todas as formas de onda começam e retornam ao nível de zero volt, os valores de pico e de pico a pico serão iguais.

Para os propósitos deste livro, a *amplitude de um pulso* é o valor de pico a pico, conforme ilustram as figuras 24.1 e 24.2.

Largura de pulso

A *largura ou duração* (t_p) de um pulso é definida como a distância entre os pontos nos quais o valor do pulso é igual a 50 por cento da amplitude.

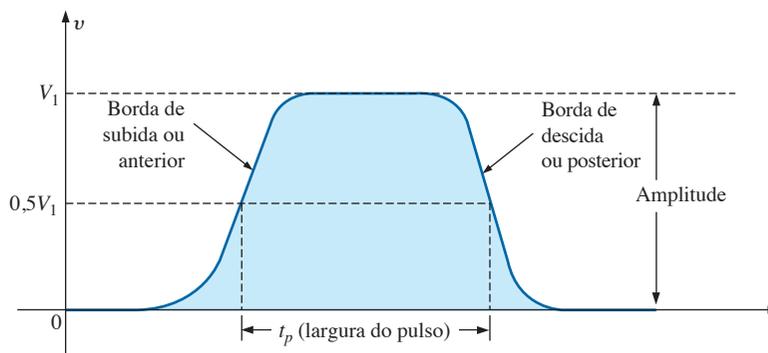


Figura 24.2 Forma de onda pulsada real.

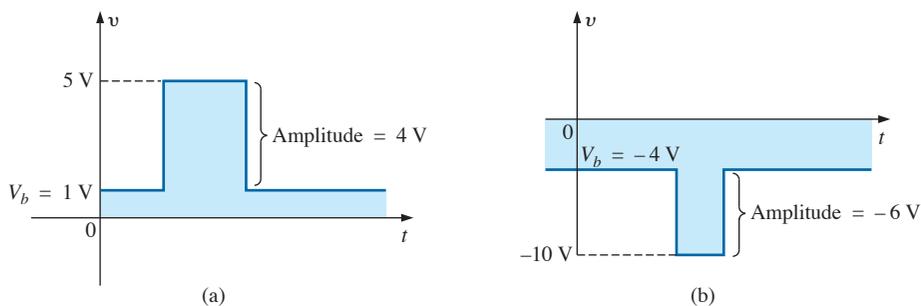


Figura 24.3 Definição do nível de base.

No caso de um pulso ideal, como o que vemos na Figura 24.1, a largura é a mesma para qualquer valor, enquanto no caso do pulso visto na Figura 24.2, t_p é um valor bastante específico.

Nível de base

O *nível de base de um pulso* (V_b) é definido como o nível a partir do qual o pulso começa.

A tensão no nível de base dos pulsos das figuras 24.1 e 24.2 é 0 V. Na Figura 24.3(a), o nível de base é 1 V, enquanto na Figura 24.3(b), é -4 V.

Pulsos positivos e pulsos negativos

Pulsos positivos são aqueles que aumentam positivamente a partir do nível de base; *pulsos negativos* são aqueles que aumentam negativamente a partir do nível de base.

O pulso da Figura 24.3(a) é positivo, enquanto o pulso da Figura 24.3(b) é negativo.

Ainda que o nível de base do pulso visto na Figura 24.4 seja negativo, o pulso é positivo (com amplitude de 10 V), visto que a tensão aumenta no sentido positivo a partir do nível de base.

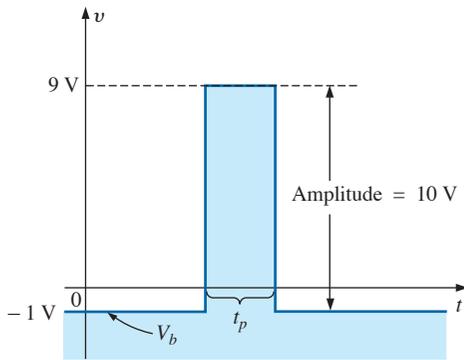


Figura 24.4 Pulso positivo.

Tempo de subida (t_r) e tempo de descida (t_f)

O tempo necessário para que a tensão do pulso mude de um nível para outro é um parâmetro importante. A *curvatura* no início e no final de cada transição do pulso (definidas na Figura 24.5) torna difícil determinar os pontos exatos de início e de término da borda de subida. Por essa razão,

os tempos de subida (rise time) e de descida (fall time) de um pulso são definidos no intervalo compreendido entre 10 e 90 por cento do valor máximo, conforme indica a Figura 24.5.

Observe que o tempo de subida não é necessariamente igual ao de descida.

Inclinação

A Figura 24.6 mostra uma distorção indesejável, porém comum, que ocorre normalmente devido a uma resposta deficiente em baixas frequências do sistema pelo qual o pulso passou. A queda no valor de pico é denominada **inclinação**. A inclinação percentual é definida por

$$\% \text{ inclinação} = \frac{V_1 - V_2}{V} \times 100\% \quad (24.1)$$

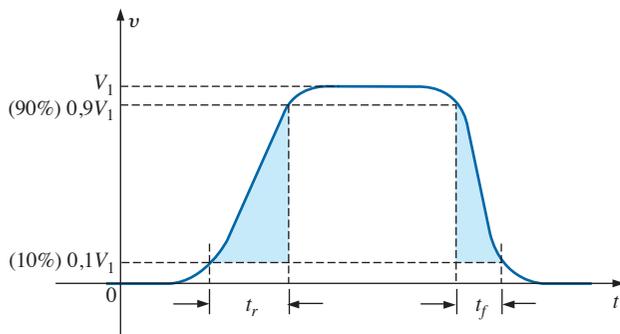


Figura 24.5 Definição dos tempos de subida (t_r) e descida (t_f).

onde V é o valor médio da amplitude, dado por

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (24.2)$$

Naturalmente, quanto menor a inclinação percentual, mais o pulso se aproxima da forma ideal. Devido ao arredondamento, pode ser difícil definir os valores de V_1 e V_2 . Nesse caso, pode ser necessário aproximar a parte inclinada do pulso de uma linha reta antes de determinar V_1 e V_2 .

Outras distorções, definidas na Figura 24.7, são o *pré-sinal* e o *sobressinal*, normalmente causadas pela resposta excessiva em altas frequências do sistema, e a *oscilação*, causada pela interação entre elementos capacitivos e indutivos do circuito na frequência ressonante ou natural.

EXEMPLO 24.1

Considerando o pulso visto na Figura 24.8, determine:

- se ele é positivo ou negativo.
- o nível de base.
- a largura do pulso.
- a amplitude máxima.
- a inclinação.

Soluções:

- positivo**
- $V_b = -4 \text{ V}$
- $t_p = (12 - 7) \text{ ms} = 5 \text{ ms}$
- $V_{\text{máx}} = 8 \text{ V} + 4 \text{ V} = 12 \text{ V}$

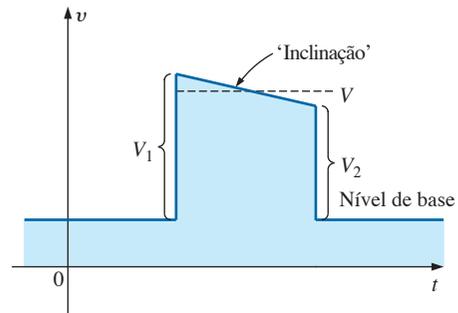


Figura 24.6 Definição de inclinação.

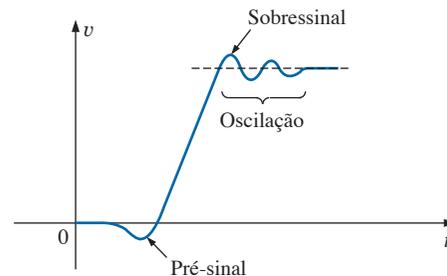


Figura 24.7 Definição de pré-sinal, sobressinal e oscilação.

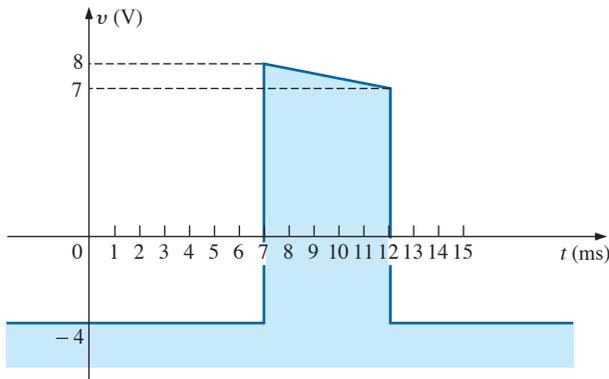


Figura 24.8 Exemplo 24.1.

e)

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} = \frac{12 \text{ V} + 11 \text{ V}}{2}$$

$$= \frac{23 \text{ V}}{2} = 11,5 \text{ V}$$

$$\% \text{ inclinação} = \frac{V_1 - V_2}{V} \times 100\%$$

$$= \frac{12 \text{ V} - 11 \text{ V}}{11,5 \text{ V}} \times 100\%$$

$$= 8,7\%$$

(Lembre-se de que V é definida pelo valor médio da amplitude.)

EXEMPLO 24.2

Considerando o pulso visto na Figura 24.9, determine:

- a) se ele é positivo ou negativo
- b) o nível de base
- c) a inclinação
- d) a amplitude
- e) a largura (t_p);
- f) o tempo de subida (t_r) e o tempo de descida (t_f).

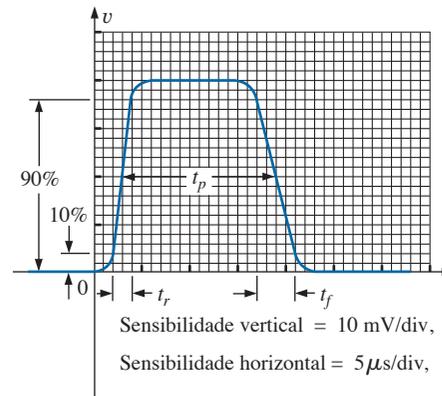


Figura 24.9 Exemplo 24.2.

Soluções:

- a) **positivo**
- b) $V_b = 0 \text{ V}$
- c) % inclinação = **0%**
- d) amplitude = (4 div.)(10 mV/div.) = **40 mV**
- e) $t_p = (3,2 \text{ div.})(5 \mu\text{s/div.}) = 16 \mu\text{s}$
- f) $t_r = (0,4 \text{ div.})(5 \mu\text{s/div.}) = 2 \mu\text{s}$
 $t_f = (0,8 \text{ div.})(5 \mu\text{s/div.}) = 4 \mu\text{s}$

24.3 TAXA DE REPETIÇÃO E CICLO DE TRABALHO

Uma sequência de pulsos como a que aparece na Figura 24.10 é denominada **trem de pulsos**. As alturas e larguras variáveis podem conter informações a serem decodificadas no receptor.

Quando todos os pulsos têm a mesma largura e se repetem a intervalos regulares, como mostram as figuras 24.11(a) e (b), temos um **trem de pulsos periódicos**.

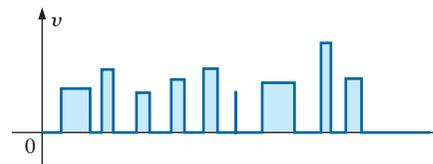


Figura 24.10 Trem de pulsos.

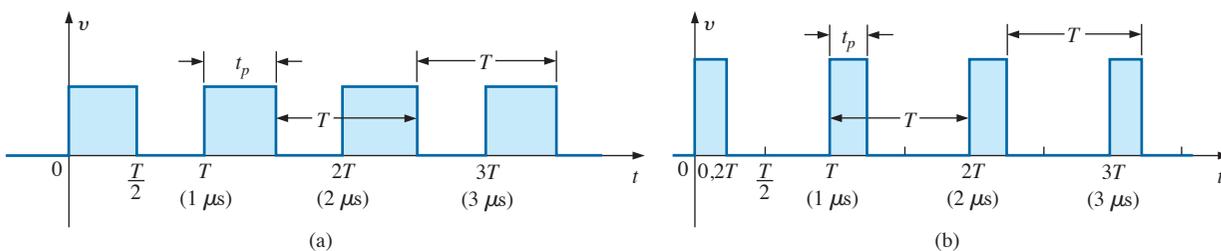


Figura 24.11 Trem de pulsos periódicos.

O período (T) de um trem de pulsos periódico é definido como a diferença de tempo entre pontos equivalentes de dois pulsos sucessivos, conforme mostram as figuras 24.11 (a) e (b).

A **frequência de repetição de pulsos (frp)**, ou **taxa de repetição de pulsos (trp)**, é definida por

$$\text{prf (ou prr)} = \frac{1}{T} \text{ Hz ou pulsos/s} \quad (24.3)$$

Aplicando a Equação 24.3 às formas de onda mostradas na Figura 24.11, obtemos o mesmo valor de frequência de repetição de pulsos, já que os períodos são iguais. O resultado revela claramente que

a frequência de repetição dos pulsos não depende da forma dos pulsos individuais.

A frequência de repetição de pulsos depende apenas do período de repetição dos pulsos. O parâmetro que expressa a fração desse intervalo durante o qual o pulso está presente é chamado de **ciclo de trabalho** e é definido da seguinte maneira:

$$\text{Ciclo de trabalho} = \frac{\text{largura de pulso}}{\text{período}} \times 100\%$$

ou
$$\text{Ciclo de trabalho} = \frac{t_p}{T} \times 100\% \quad (24.4)$$

Para a Figura 24.11(a) (uma forma de onda quadrada),

$$\text{Ciclo de trabalho} = \frac{0,5T}{T} \times 100\% = 50\%$$

e para a Figura 24.11(b),

$$\text{Ciclo de trabalho} = \frac{0,2T}{T} \times 100\% = 20\%$$

Os resultados acima mostram claramente que

o ciclo de trabalho fornece uma indicação percentual da fração do período total ocupada pelo pulso.

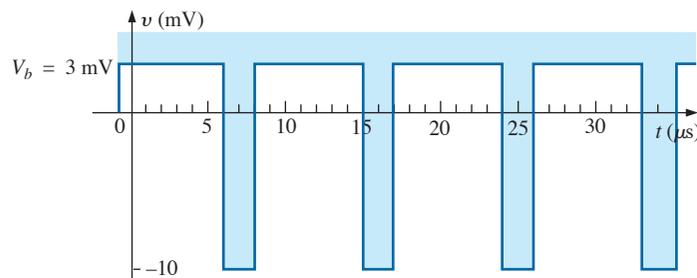


Figura 24.12 Exemplo 24.3.

EXEMPLO 24.3

Determine a frequência de repetição dos pulsos e o ciclo de trabalho para o trem de pulsos periódicos mostrados na Figura 24.12.

Solução:

$$T = (15 - 6) \mu\text{s} = 9 \mu\text{s}$$

$$\text{prf} = \frac{1}{T} = \frac{1}{9 \mu\text{s}} \cong 111,11 \text{ kHz}$$

$$\begin{aligned} \text{Ciclo de trabalho} &= \frac{t_p}{T} \times 100\% = \frac{(8 - 6) \mu\text{s}}{9 \mu\text{s}} \times 100\% \\ &= \frac{2}{9} \times 100\% \cong 22,22\% \end{aligned}$$

EXEMPLO 24.4

Determine a frequência de repetição dos pulsos e o ciclo de trabalho para o padrão do osciloscópio que aparece na Figura 24.13, com as sensibilidades indicadas.

Solução:

$$T = (3,2 \text{ div.})(1 \text{ ms/div.}) = 3,2 \text{ ms}$$

$$t_p = (0,8 \text{ div.})(1 \text{ ms/div.}) = 0,8 \text{ ms}$$

$$\text{prf} = \frac{1}{T} = \frac{1}{3,2 \text{ ms}} = 312,5 \text{ Hz}$$

$$\text{Ciclo de trabalho} = \frac{t_p}{T} \times 100\% = \frac{0,8 \text{ ms}}{3,2 \text{ ms}} \times 100\% = 25\%$$

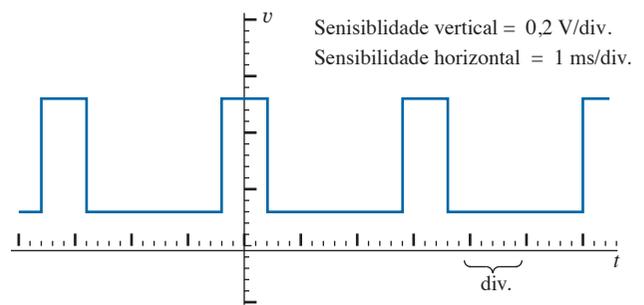


Figura 24.13 Exemplo 24.4.

EXEMPLO 24.5

Determine a taxa de repetição dos pulsos e o ciclo de trabalho para a forma de onda de disparo (*trigger*) vista na Figura 24.14.

Solução:

$$T = (2,6 \text{ div.})(10 \mu\text{s/div.}) = 26 \mu\text{s}$$

$$\text{prf} = \frac{1}{T} = \frac{1}{26 \mu\text{s}} = \mathbf{38,462 \text{ kHz}}$$

$$t_p \cong (0,2 \text{ div.})(10 \mu\text{s/div.}) = 2 \mu\text{s}$$

$$\text{Ciclo de trabalho} = \frac{t_p}{T} \times 100\% = \frac{2 \mu\text{s}}{26 \mu\text{s}} \times 100\% = \mathbf{7,69\%}$$

24.4 VALOR MÉDIO

Existem dois métodos para se determinar o valor médio de uma forma de onda pulsada. O primeiro é o procedimento descrito na Seção 13.7, que pode ser aplicado a qualquer forma de onda alternada. O segundo pode ser aplicado apenas à forma de onda pulsada, já que usa termos específicos desse tipo de onda; ou seja,

$$V_{\text{médio}} = (\text{ciclo de trabalho})(\text{valor de pico}) + (1 - \text{ciclo de trabalho})(V_b) \quad (24.5)$$

Na Equação 24.5, o valor de pico é o desvio máximo a partir da referência, ou zero volt, e o ciclo de trabalho é expresso na forma decimal. A Equação 24.5 não leva em conta os efeitos da inclinação e dos tempos de subida e de descida do pulso.

EXEMPLO 24.6

Determine o valor médio do trem de pulsos periódico visto na Figura 24.15.

Solução:

Usando o método visto na Seção 13.7,

$$G = \frac{\text{área sob a curva}}{T}$$

$$T = (12 - 2) \mu\text{s} = 10 \mu\text{s}$$

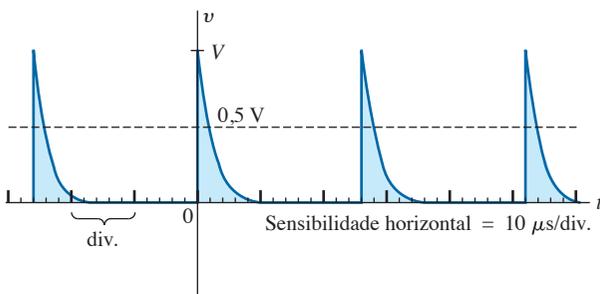


Figura 24.14 Exemplo 24.5.

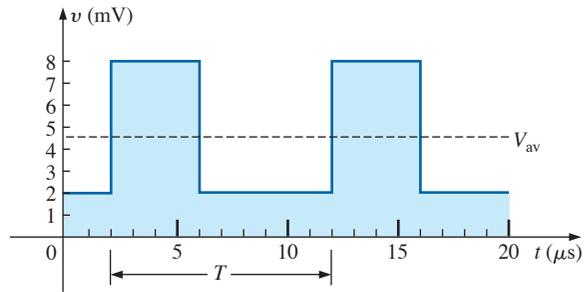


Figura 24.15 Exemplo 24.6.

$$G = \frac{(8 \text{ mV})(4 \mu\text{s}) + (2 \text{ mV})(6 \mu\text{s})}{10 \mu\text{s}}$$

$$= \frac{32 \times 10^{-9} + 22 \times 10^{-9}}{10 \times 10^{-6}}$$

$$= \frac{44 \times 10^{-9}}{10 \times 10^{-6}} = \mathbf{4,4 \text{ mV}}$$

Pela Equação 24.5,

$$V_b = +2 \text{ mV}$$

$$\text{Ciclo de trabalho} = \frac{t_p}{T} = \frac{(8 - 2) \mu\text{s}}{10 \mu\text{s}}$$

$$= \frac{4}{10} = 0,4 \quad (\text{forma decimal})$$

Valor de pico (referência de 0 V) = 8 mV

$$V_{\text{médio}} = (\text{ciclo de trabalho})(\text{valor de pico}) + (1 - \text{ciclo de trabalho})(V_b)$$

$$= (0,4)(8 \text{ mV}) + (1 - 0,4)(2 \text{ mV})$$

$$= 3,2 \text{ mV} + 1,2 \text{ mV} = \mathbf{4,4 \text{ mV}}$$

conforme obtido anteriormente.

EXEMPLO 24.7

Dado um trem de pulsos periódico com um ciclo de trabalho de 28 por cento, um valor de pico de 7 V e um nível de base de -3 V:

- Determine o valor médio.
- Plote a forma de onda.
- Verifique o resultado do item (a) usando o método da Seção 13.7.

Soluções:

a) Pela Equação 24.5,

$$V_{\text{médio}} = (\text{ciclo de trabalho})(\text{valor de pico}) + (1 - \text{ciclo de trabalho})(V_b)$$

$$= (0,28)(7 \text{ V}) + (1 - 0,28)(-3 \text{ V})$$

$$= 1,96 \text{ V} + (-2,16 \text{ V})$$

$$= \mathbf{-0,2 \text{ V}}$$

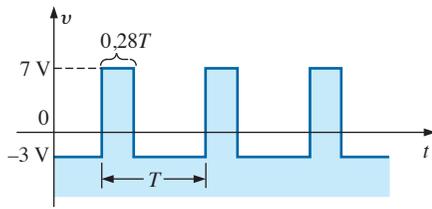


Figura 24.16 Solução do item (b) do Exemplo 24.7.

b) Veja a Figura 24.16.

$$c) G = \frac{(7 \text{ V})(0,28T) - (3 \text{ V})(0,72T)}{T}$$

$$= 1,96 \text{ V} - 2,16 \text{ V} = -0,2 \text{ V}$$

conforme obtido no item (a).

Instrumentação

O valor médio (valor CC) de qualquer forma de onda pode ser facilmente determinado usando-se o osciloscópio. Se a chave seletora do osciloscópio for colocada na posição AC, a componente CC da onda de entrada será bloqueada por um capacitor interno e, dessa forma, não alcançará a tela. Podemos ajustar os controles de modo a obter a forma de onda vista na Figura 24.17(a). Se a chave de modo for então colocada na posição DC, o deslocamento vertical (positivo ou negativo) da forma de onda revelará o valor do nível médio ou CC do sinal de entrada, como mostra a Figura 24.17(b).

24.5 TRANSITÓRIOS EM CIRCUITOS R-C

No Capítulo 10 foi desenvolvida a solução geral para o comportamento transitório de um circuito R-C com ou sem valores iniciais de tensão. Repetimos a seguir, por conveniência, a expressão da tensão no capacitor.

$$v_C = V_f + (V_i - V_f)e^{-t/RC} \quad (24.6)$$

Lembre-se de que V_i é a tensão no capacitor no início da fase transitória, como mostra a Figura 24.18. A tensão V_f é a tensão no capacitor durante o estado estacionário (repouso) que corresponde ao final da fase transitória. A duração da fase transitória é aproximadamente 5τ , onde τ é a constante de tempo do circuito, dada pelo produto RC.

No caso em que a tensão inicial for zero, a equação anterior se reduzirá à forma a seguir, onde em geral V_f representa a tensão aplicada:

$$v_C = V_f(1 - e^{-t/RC}) \quad V_i = 0 \text{ V} \quad (24.7)$$

Para o caso da forma de onda mostrada na Figura 24.19, $V_i = -2 \text{ V}$, $V_f = +5 \text{ V}$ e

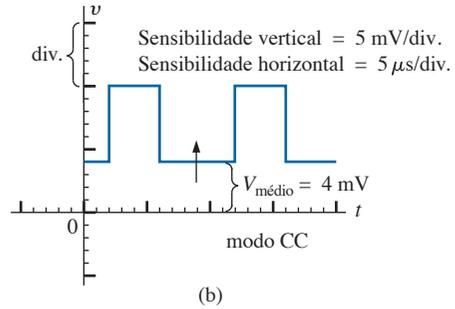
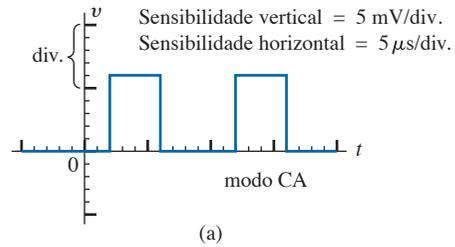


Figura 24.17 Determinação do valor médio de uma forma de onda pulsada usando-se um osciloscópio.

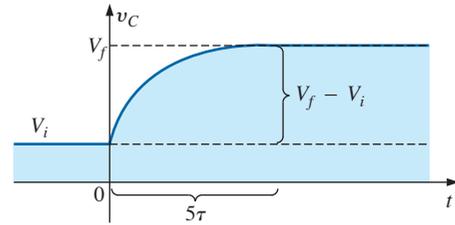


Figura 24.18 Definição dos parâmetros da Equação 24.6.

$$v_C = V_i + (V_f - V_i)(1 - e^{-t/RC})$$

$$= -2 \text{ V} + [5 \text{ V} - (-2 \text{ V})](1 - e^{-t/RC})$$

$$v_C = -2 \text{ V} + 7 \text{ V}(1 - e^{-t/RC})$$

Para o caso em que $t = \tau = RC$,

$$v_C = -2 \text{ V} + 7 \text{ V}(1 - e^{-1}) = -2 \text{ V} + 7 \text{ V}(1 - 0,368)$$

$$= -2 \text{ V} + 7 \text{ V}(0,632)$$

$$v_C = 2,424 \text{ V}$$

conforme comprovado pela Figura 24.19.

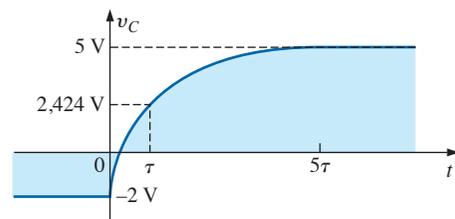


Figura 24.19 Exemplo do uso da Equação 24.6.

EXEMPLO 24.8

O capacitor visto na Figura 24.20 tem uma carga inicial de 2 V antes do fechamento da chave. A chave é então fechada.

- a) Determine a expressão matemática para v_C .
- b) Determine a expressão matemática para i_C .
- c) Esboce as formas de onda de v_C e i_C .

Soluções:

a) $V_i = 2 \text{ V}$

V_f (após 5τ) = $E = 8 \text{ V}$

$\tau = RC = (100 \text{ k}\Omega)(1 \text{ mF}) = 100 \text{ ms}$

Pela Equação 24.6,

$$v_C = V_f + (V_i - V_f)e^{-t/RC}$$

$$= 8 \text{ V} + (2 \text{ V} - 8 \text{ V})e^{-t/\tau}$$

e $v_C = 8 \text{ V} - 6 \text{ V}e^{-t/\tau}$

- b) Quando a chave é fechada, a tensão no capacitor não pode mudar instantaneamente e, portanto, $V_R = E - V_i = 8 \text{ V} - 2 \text{ V} = 6 \text{ V}$. A corrente muda instantaneamente de zero para um valor dado pela lei de Ohm:

$$I_{R_{\text{máx}}} = \frac{V_R}{R} = \frac{6 \text{ V}}{100 \text{ k}\Omega} = 0,06 \text{ mA}$$

Em seguida, a corrente cai para zero com a mesma constante de tempo calculada no item (a), e

$i_C = 0,06 \text{ mA}e^{-t/\tau}$

- c) Veja a Figura 24.21.

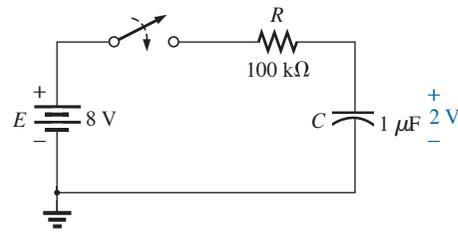


Figura 24.20 Exemplo 24.8.

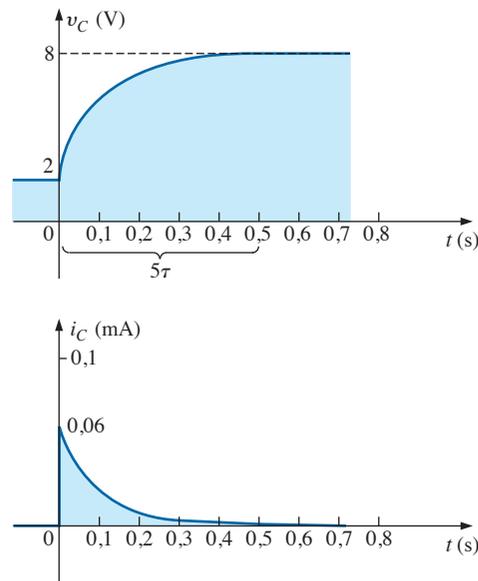


Figura 24.21 v_C e i_C para o circuito visto na Figura 24.20.

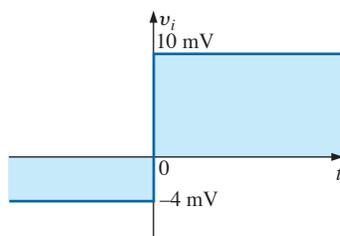
EXEMPLO 24.9

Trace o gráfico de v_C em função de tempo para a entrada em degrau mostrada na Figura 24.22. Considere que a tensão de -4 mV foi aplicada ao circuito por um período de tempo maior do que cinco constantes de tempo. Então, determine quando $v_C = 0 \text{ V}$ se a tensão muda de nível em $t = 0 \text{ s}$.

Solução:

$V_i = -4 \text{ mV}$ $V_f = 10 \text{ mV}$

$\tau = RC = (1 \text{ k}\Omega)(0,01 \text{ }\mu\text{F}) = 10 \text{ }\mu\text{s}$



Pela Equação 24.6,

$$v_C = V_f + (V_i - V_f)e^{-t/RC}$$

$$= 10 \text{ mV} + (-4 \text{ mV} - 10 \text{ mV})e^{-t/10\mu\text{s}}$$

e $v_C = 10 \text{ mV} - 14 \text{ mV} e^{-t/10\mu\text{s}}$

A forma de onda aparece na Figura 24.23.

Fazendo $v_C = 0 \text{ V}$ na equação anterior, temos

$$v_C = 0 \text{ V} = 10 \text{ mV} - 14 \text{ mV} e^{-t/10\mu\text{s}}$$

e $\frac{10 \text{ mV}}{14 \text{ mV}} = e^{-t/10\mu\text{s}}$

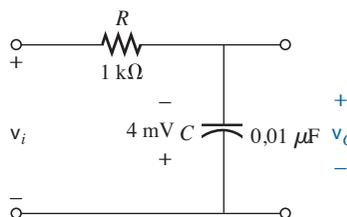


Figura 24.22 Exemplo 24.9.

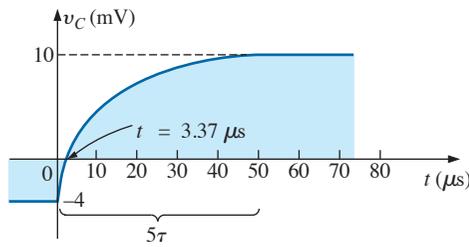


Figura 24.23 v_C para o circuito visto na Figura 24.22.

ou $0,714 = e^{-t/10\mu s}$
 mas $\log_e 0,714 = \log_e(e^{-t/10\mu s}) = \frac{-t}{10\mu s}$
 $t = -(10\mu s)\log_e 0,714 = -(10\mu s)(-0,377)$
 $= 3,37\mu s$

conforme indica a Figura 24.23.

24.6 RESPOSTA DE UM CIRCUITO R-C A UMA ONDA QUADRADA

A **onda quadrada** vista na Figura 24.24 é um caso particular de forma de onda pulsada. Ela apresenta um ciclo de trabalho de 50 por cento e um valor médio de zero volt, como mostram os cálculos a seguir:

$$\text{Ciclo de trabalho} = \frac{t_p}{T} \times 100\% = \frac{T/2}{T} \times 100\% = 50\%$$

$$V_{\text{médica}} = \frac{(V_1)(T/2) + (-V_1)(T/2)}{T} = \frac{0}{T} = 0 \text{ V}$$

A aplicação de uma tensão contínua V_1 em série com a onda quadrada mostrada na Figura 24.24 pode elevar o valor do nível de base de $-V_1$ para 0 volt e o valor médio de 0 para V_1 volts.

Se uma onda quadrada, tal como a que vemos na Figura 24.25, for aplicada a um circuito R-C, como o que é mostrado na Figura 24.26, o período da onda quadrada poderá ter efeito significativo na forma de onda resultante para v_C .

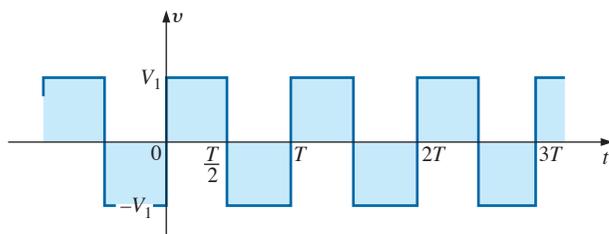


Figura 24.24 Onda quadrada periódica.

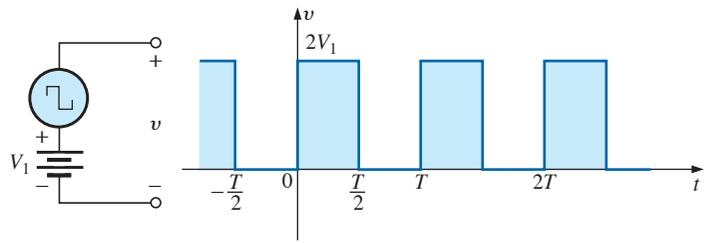


Figura 24.25 Aumento do nível de base de uma onda quadrada para 0 V.

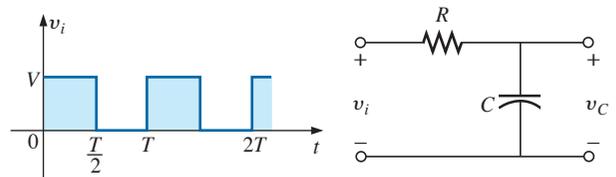


Figura 24.26 Aplicação de um trem de pulsos de onda quadrada periódica a um circuito R-C.

Nas análises que se seguem, consideraremos que o regime estacionário é atingido após um período de cinco constantes de tempo. Assim, as formas de onda no capacitor podem ser separadas em três tipos: $T/2 > 5\tau$; $T/2 = 5\tau$ e $T/2 < 5\tau$.

$T/2 > 5\tau$

A condição $T/2 > 5\tau$, ou $T > 10\tau$, estabelece uma situação na qual o capacitor pode ser carregado até o valor de estado estacionário antes de $t = T/2$. As formas de onda correspondentes de v_C e i_C aparecem na Figura 24.27. Observe que v_C se parece muito com a tensão aplicada e que i_C não passa de uma série de picos muito estreitos. Observe também que quando a tensão aplicada V_i cai de V para 0 na borda de descida, o capacitor se descarrega rapidamente de v_C para zero volt. Basicamente, quando $V_i = 0$, o capacitor e o resistor estão em paralelo, sendo que o capacitor se descarrega através de R com uma constante de tempo igual à da fase de carga, mas com uma corrente em sentido contrário ao dela.

$T/2 = 5\tau$

Quando a frequência da onda quadrada é tal que $T/2 = 5\tau$, ou seja, quando $T = 10\tau$, a tensão v_C atinge o valor final exatamente antes de iniciar a fase de descarga, como mostra a Figura 24.28. A forma de onda da tensão v_C não parece mais com uma onda quadrada, tendo na realidade características de uma onda triangular. O aumento na constante de tempo resultou em uma forma de onda v_C mais arredondada, tendo a corrente i_C aumentado substancialmente na largura, mostrando um período de carga mais longo.

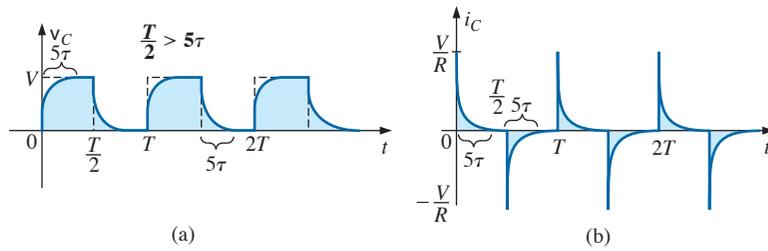


Figura 24.27 v_C e i_C para $T/2 > 5\tau$.

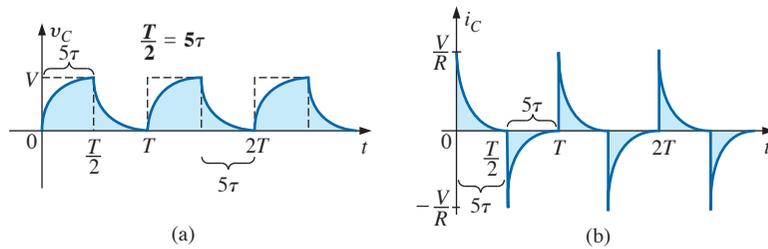


Figura 24.28 v_C e i_C para $T/2 = 5\tau$.

$T/2 < 5\tau$

Se $T/2 < 5\tau$, ou seja, $T < 10\tau$, a tensão v_C não alcança o seu valor final durante o primeiro pulso (veja a Figura 24.29), e o ciclo de descarga não retorna para zero volt. Na realidade, o valor inicial de cada pulso subsequente varia até que o regime estacionário seja alcançado. Na maioria dos casos, considerar que o regime estacionário se estabeleça após cinco ciclos da forma de onda aplicada é uma boa aproximação.

À medida que a frequência aumentar e o período diminuir, ocorrerá uma resposta cada vez mais plana para v_C até resultar no tipo de forma de onda mostrada na Figura 24.30. Essa figura nos leva a uma importante conclusão em relação à curva de resposta de v_C :

No regime estacionário, o valor médio de v_C é igual ao valor médio da onda quadrada aplicada.

Observe nas figuras 24.29 e 24.30 que a forma de onda de v_C aproxima-se do valor médio de $V/2$.

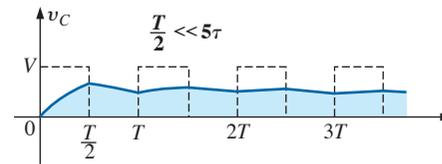


Figura 24.30 v_C para $T/2 \ll 5\tau$ ou $T \ll 10\tau$.

EXEMPLO 24.10

A onda quadrada de frequência 1.000 Hz, mostrada na Figura 24.31, é aplicada ao circuito R - C da mesma figura.

- a) Compare a largura dos pulsos da onda quadrada com a constante de tempo do circuito.
- b) Esboce o gráfico de v_C .
- c) Esboce o gráfico de i_C .

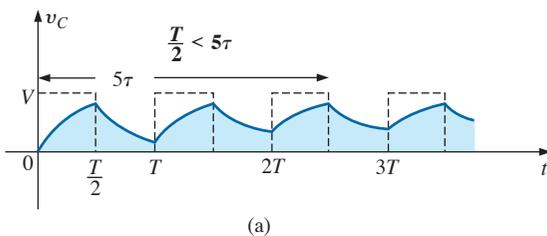
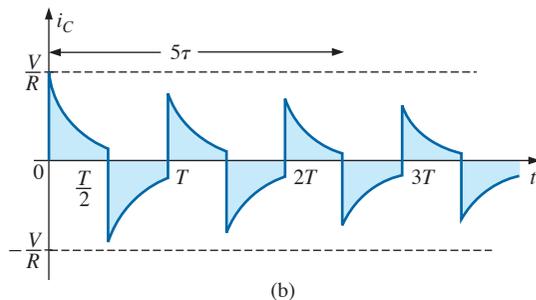


Figura 24.29 v_C e i_C para $T/2 < 5\tau$.



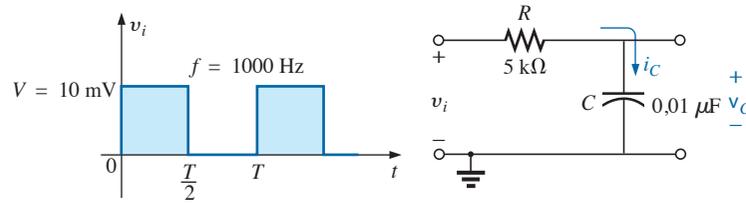


Figura 24.31 Exemplo 24.10.

Soluções:

a) $T = \frac{1}{f} = \frac{1}{1000} = 1 \text{ ms}$

$t_p = \frac{T}{2} = 0,5 \text{ ms}$

$\tau = RC = (5 \times 10^3 \Omega)(0,01 \times 10^{-6} \text{ F}) = 0,05 \text{ ms}$

$\frac{t_p}{\tau} = \frac{0,5 \text{ ms}}{0,05 \text{ ms}} = 10 \text{ e}$

$t_p = 10\tau = \frac{T}{2}$

O resultado mostra que v_C atinge o valor final depois de decorrido um intervalo igual à metade da largura dos pulsos.

b) Na fase de carga, $V_i = 0 \text{ V}$ e $V_f = 10 \text{ mV}$, e

$$v_C = V_f + (V_i - V_f)e^{-t/RC}$$

$$= 10 \text{ mV} + (0 - 10 \text{ mV})e^{-t/\tau}$$

e $v_C = 10 \text{ mV}(1 - e^{-t/\tau})$

Na fase de descarga, $V_i = 10 \text{ mV}$ e $V_f = 0$, e

$$v_C = V_f + (V_i - V_f)e^{-t/\tau}$$

$$= 0 \text{ V} + (10 \text{ mV} - 0 \text{ V})e^{-t/\tau}$$

e $v_C = 10 \text{ mV}e^{-t/\tau}$

A forma de onda de v_C aparece na Figura 24.32.

c) Na fase de carga em $t = 0 \text{ s}$, $V_R = V$ e $I_{R,\text{máx}} = V/R = 10 \text{ mV}/5 \text{ k}\Omega = 2 \mu\text{A}$, e

$$i_C = I_{\text{máx}}e^{-t/\tau} = 2 \mu\text{A}e^{-t/\tau}$$

Durante a fase de descarga, a corrente é descrita pela mesma equação, mas com o sinal oposto, como mostra a Figura 24.33.

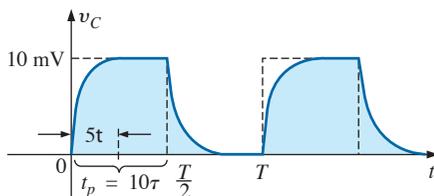


Figura 24.32 v_C para o circuito R-C visto na Figura 24.31.

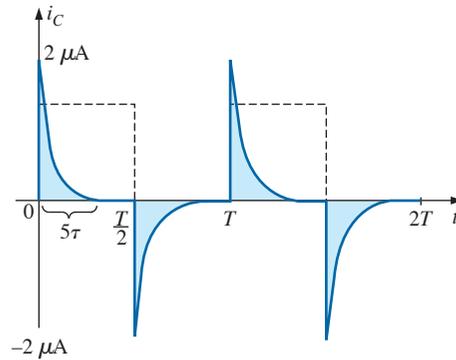


Figura 24.33 i_C para o circuito R-C visto na Figura 24.31.

EXEMPLO 24.11

Repita o Exemplo 24.10 para $f = 10 \text{ kHz}$.

Solução:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{10 \text{ kHz}} = 0,1 \text{ ms}$$

e $\frac{T}{2} = 0,05 \text{ ms}$

com $\tau = t_p = \frac{T}{2} = 0,05 \text{ ms}$

Em outras palavras, a largura dos pulsos é exatamente igual à constante de tempo do circuito. A tensão v_C não alcança o valor final antes que o primeiro pulso da onda quadrada retorne para zero.

No intervalo de $t = 0$ a $T/2$, $V_i = 0 \text{ V}$ e $V_f = 10 \text{ mV}$, e:

$$v_C = 10 \text{ mV}(1 - e^{-t/\tau})$$

Como vimos do Capítulo 10, em $t = \tau$ a tensão $v_C = 63,2$ por cento do valor final. Fazendo $t = \tau$ na equação acima, temos

$$v_C = (10 \text{ mV})(1 - e^{-1}) = (10 \text{ mV})(1 - 0,368)$$

$$= (10 \text{ mV})(0,632) = 6,32 \text{ mV}$$

conforme mostra a Figura 24.34.

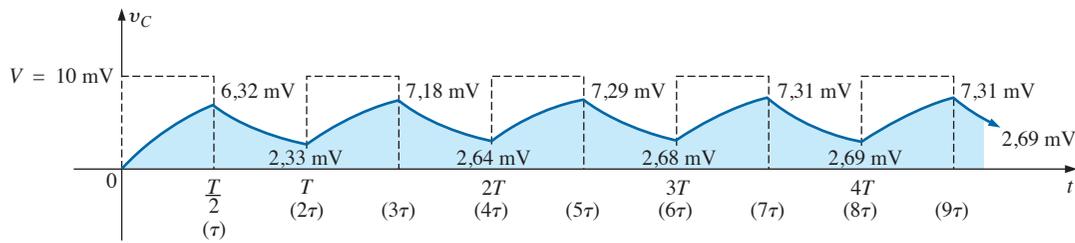


Figura 24.34 Resposta de v_C para $t_p = \tau = T/2$.

Na fase de descarga, entre $t = T/2$ e T , $V_i = 6,32 \text{ mV}$ e $v_f = 0 \text{ V}$, e

$$\begin{aligned} v_C &= V_f + (V_i - V_f)e^{-t/\tau} \\ &= 0 \text{ V} + (6,32 \text{ mV} - 0 \text{ V})e^{-t/\tau} \\ v_C &= 6,32 \text{ mV}e^{-t/\tau} \end{aligned}$$

onde agora t é medido a partir de $t = T/2$ na Figura 24.34. Em outras palavras, fazemos $t = 0 \text{ s}$ no início de cada um dos intervalos da Figura 24.34. Assim, por exemplo, para calcular o valor de v_C em $t = T$, fazemos $t = \tau$ na equação acima, e não $t = 2\tau$, como parece sugerir a Figura 24.34.

Substituindo $t = \tau$, temos

$$\begin{aligned} v_C &= (6,32 \text{ mV})(e^{-1}) = (6,32 \text{ mV})(0,368) \\ &= 2,33 \text{ mV} \end{aligned}$$

conforme mostra a Figura 24.34.

No intervalo seguinte, $V_i = 2,33 \text{ mV}$ e $V_f = 10 \text{ mV}$, e

$$\begin{aligned} v_C &= V_f + (V_i - V_f)e^{-t/\tau} \\ &= 10 \text{ mV} + (2,33 \text{ mV} - 10 \text{ mV})e^{-t/\tau} \\ v_C &= 10 \text{ mV} - 7,67 \text{ mV}e^{-t/\tau} \end{aligned}$$

Em $t = \tau$ (pois $t = T = 2\tau$ é considerado $t = 0 \text{ s}$ para esse intervalo),

$$\begin{aligned} v_C &= 10 \text{ mV} - 7,67 \text{ mV}e^{-1} \\ &= 10 \text{ mV} - 2,82 \text{ mV} \\ v_C &= 7,18 \text{ mV} \end{aligned}$$

conforme mostra a Figura 24.34.

No intervalo em que o capacitor está descarregando, $V_i = 7,18 \text{ mV}$ e $V_f = 0 \text{ V}$, e

$$\begin{aligned} v_C &= V_f + (V_i - V_f)e^{-t/\tau} \\ &= 0 \text{ V} + (7,18 \text{ mV} - 0)e^{-t/\tau} \\ v_C &= 7,18 \text{ mV}e^{-t/\tau} \end{aligned}$$

Em $t = \tau$ (medido a partir de 3τ na Figura 24.34),

$$\begin{aligned} v_C &= (7,18 \text{ mV})(e^{-1}) = (7,18 \text{ mV})(0,368) \\ &= 2,64 \text{ mV} \end{aligned}$$

conforme mostra a Figura 24.34.

Continuando o processo é possível gerar a forma de onda completa de v_C que aparece na Figura 24.34. Observe que as repetições ocorrem após $t = 8\tau$ e a forma de onda alcança o estado estacionário em um período de tempo menor do que 10τ , que corresponde a menos de 5 ciclos da onda quadrada aplicada.

Observando os detalhes da forma de onda, verificamos que os níveis máximo e mínimo de v_C aumentam gradualmente até o estado estacionário ser alcançado. Como a forma de onda exponencial entre $t = 4T$ e $t = 5T$ tem constantes de tempo iguais, o valor médio de v_C pode ser determinado a partir dos valores finais de v_C , $7,31 \text{ mV}$ e $2,69 \text{ mV}$, da seguinte forma:

$$V_{\text{av}} = \frac{7,31 \text{ mV} + 2,69 \text{ mV}}{2} = \frac{10 \text{ mV}}{2} = 5 \text{ mV}$$

que é igual ao valor médio da onda quadrada aplicada, como já foi dito anteriormente nessa seção.

Podemos usar os resultados vistos na Figura 24.34 para plotar i_C . Em qualquer instante de tempo,

$$v_i = v_R + v_C \quad \text{ou} \quad v_R = v_i - v_C$$

$$e \quad i_R = i_C = \frac{v_i - v_C}{R}$$

Em $t = 0^+$, $v_C = 0 \text{ V}$, e

$$i_R = \frac{v_i - v_C}{R} = \frac{10 \text{ mV} - 0}{5 \text{ k}\Omega} = 2 \mu\text{A}$$

conforme mostra a Figura 24.35.

À medida que o capacitor vai se carregando, a corrente i_C diminui a uma taxa expressa por

$$i_C = 2 \mu\text{A}e^{-t/\tau}$$

Em $t = \tau$,

$$\begin{aligned} i_C &= (2 \mu\text{A})(e^{-\tau/\tau}) = (2 \mu\text{A})(e^{-1}) \\ &= (2 \mu\text{A})(0,368) \\ &= 0,736 \mu\text{A} \end{aligned}$$

conforme mostra a Figura 24.35.

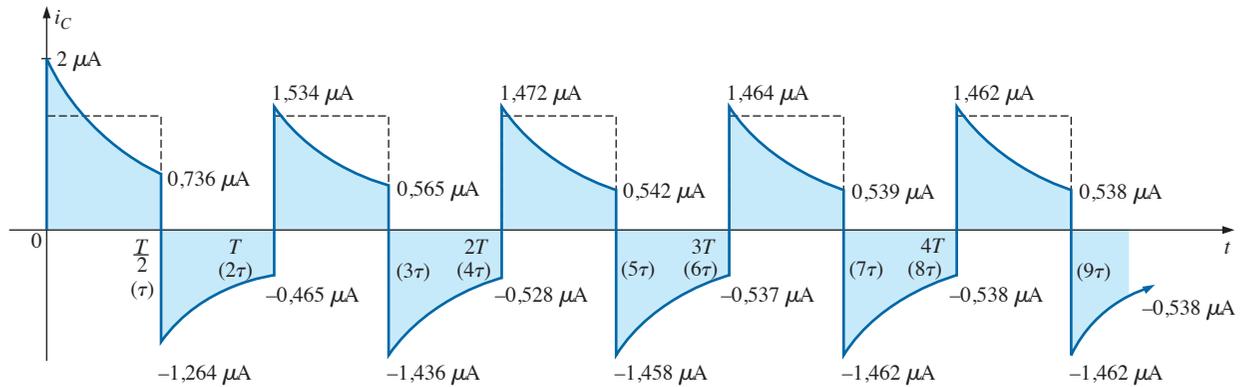


Figura 24.35 Resposta de i_C para $t_p = \tau = T/2$.

No caso da borda posterior do primeiro pulso, a tensão no capacitor não pode variar instantaneamente, resultando no valor de corrente, mostrado a seguir, quando v_i cai para zero:

$$i_C = i_R = \frac{v_i - v_C}{R} = \frac{0 - 6,32 \text{ mV}}{5 \text{ k}\Omega} = -1,264 \mu\text{A}$$

conforme ilustra a Figura 24.35. A partir desse momento, a corrente passa a diminuir de acordo com a equação:

$$i_C = -1,264 \mu\text{A} e^{-t/\tau}$$

e em $t = \tau$ (ou seja, em $t = 2\tau$ na Figura 24.35),

$$\begin{aligned} i_C &= (-1,264 \mu\text{A})(e^{-\tau/\tau}) = (-1,264 \mu\text{A})(e^{-1}) \\ &= (-1,264 \mu\text{A})(0,368) = -0,465 \mu\text{A} \end{aligned}$$

conforme mostra a Figura 24.35.

Em $t = T$ ($t = 2\tau$), $v_C = 2,33 \text{ mV}$, e v_i retorna para 10 mV, resultando em

$$\begin{aligned} i_C = i_R &= \frac{v_i - v_C}{R} = \frac{10 \text{ mV} - 2,33 \text{ mV}}{5 \text{ k}\Omega} \\ &= 1,534 \mu\text{A} \end{aligned}$$

A equação usada para determinar a diminuição da corrente agora é

$$i_C = 1,534 \mu\text{A} e^{-t/\tau}$$

e em $t = \tau$ (ou seja, em $t = 3\tau$ na Figura 24.35),

$$i_C = (1,534 \mu\text{A})(0,368) = 0,565 \mu\text{A}$$

O processo continua até que o estado estacionário seja alcançado no mesmo instante em que foi alcançado por v_C . Observe na Figura 24.35 que a corrente máxima diminui na direção do estado estacionário, enquanto a corrente no

sentido oposto fica mais negativa. É também importante observar que a forma de onda atual torna-se simétrica em relação ao eixo horizontal quando o regime estacionário é atingido. O resultado é que a corrente média ao longo de um ciclo é zero, como deve acontecer nos circuitos R-C em série. Lembre-se do estudo do Capítulo 10, no qual o capacitor no regime estacionário CC pode ser substituído por um circuito aberto e, portanto, $I_C = 0 \text{ A}$.

Embora nos dois exemplos anteriores tenhamos iniciado nossa análise com o capacitor descarregado, nada impede que utilizemos o mesmo método para resolver problemas em que o capacitor possui uma carga inicial. Para isso, basta substituir V_i pela tensão inicial do capacitor na Equação 24.6 e proceder como exposto anteriormente.

24.7 PONTA DE PROVA ATENUADORA COMPENSADA

A **ponta de prova atenuadora** $\times 10$ usada nos osciloscópios é projetada para reduzir a amplitude da tensão de entrada do osciloscópio por um fator de 10. Se a impedância de entrada do osciloscópio for $1 \text{ M}\Omega$, a ponta de prova $\times 10$ deverá ter uma resistência interna de $9 \text{ M}\Omega$, conforme mostra a Figura 24.36.

Aplicando a regra dos divisores de tensão,

$$V_{\text{osc}} = \frac{(1 \text{ M}\Omega)(V_i)}{1 \text{ M}\Omega + 9 \text{ M}\Omega} = \frac{1}{10} V_i$$

Além da resistência de entrada, os osciloscópios também possuem alguma capacitância de entrada e a ponta de prova introduz uma capacitância adicional em paralelo com a do osciloscópio, como mostra a Figura 24.37. A capacitância da ponta de prova é da ordem de 10 pF para cabos de 1 m de comprimento e 15 pF para cabos de 3 m de comprimento. A capacitância total de entrada é, por-

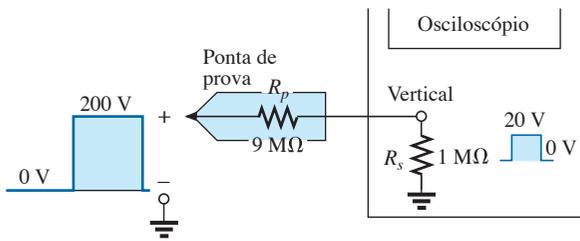


Figura 24.36 Ponta atenuadora × 10.

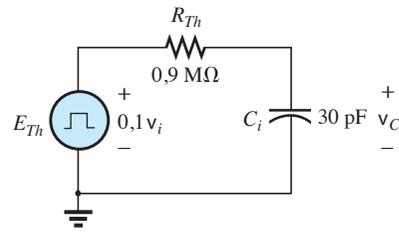


Figura 24.39 Circuito equivalente de Thévenin para C_i , conforme o circuito visto na Figura 24.38.

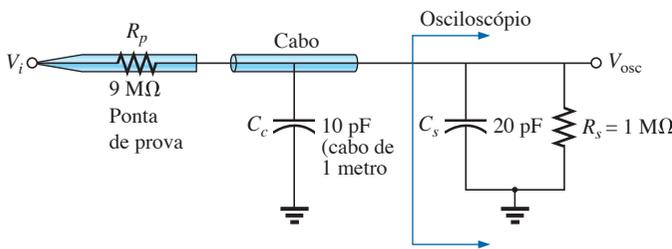


Figura 24.37 Elementos capacitivos presentes em uma ponta de prova atenuadora.

tanto, a soma dos dois elementos capacitivos, resultando no circuito equivalente visto na Figura 24.38.

Para analisar o circuito, determinemos o circuito equivalente de Thévenin do ponto de vista do capacitor C_i :

$$E_{Th} = \frac{(1 \text{ M}\Omega)(V_i)}{1 \text{ M}\Omega + 9 \text{ M}\Omega} = \frac{1}{10}V_i$$

e $R_{Th} = 9 \text{ M}\Omega \parallel 1 \text{ M}\Omega = 0,9 \text{ M}\Omega$

O circuito equivalente de Thévenin é mostrado na Figura 24.39.

Para $v_i = 200 \text{ V}$ (valor máximo),

$$E_{Th} = 0,1v_i = 20 \text{ V (valor máximo)}$$

e para calcular v_C , $V_f = 20 \text{ V}$ e $V_i = 0 \text{ V}$, com

$$\tau = RC = (0,9 \times 10^6 \text{ W})(30 \times 10^{-12} \text{ F}) = 27 \mu\text{s}$$

Para uma frequência de 5 kHz,

$$T = \frac{1}{f} = 0,2 \text{ ms} \quad \text{e} \quad \frac{T}{2} = 0,1 \text{ ms} = 100 \mu\text{s}$$

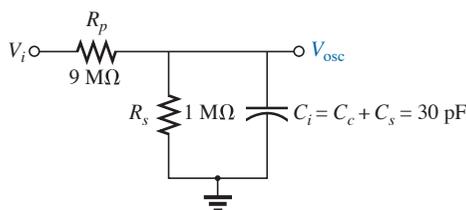


Figura 24.38 Circuito equivalente ao mostrado na Figura 24.37.

com $5\tau = 135 \mu\text{s} > 100 \mu\text{s}$, como mostra a Figura 24.40, que produz claramente uma considerável distorção do sinal de entrada.

Para corrigir esse problema, um capacitor variável frequentemente é acrescentado em paralelo com a resistência da ponta de prova, o que resulta em uma **ponta de prova atenuadora compensada**, como a que é mostrada na Figura 24.41. No Capítulo 22 foi demonstrado que uma onda quadrada pode ser gerada por uma soma de senoides de várias frequências e amplitudes. Se projetarmos um circuito como o que vemos na Figura 24.42 de tal forma que V_{osc} seja igual a $0,1v_i$ para qualquer frequência, a onda quadrada será atenuada sem distorção e V_{osc} terá a mesma forma que v_i .

Aplicando a regra dos divisores de tensão ao circuito visto na Figura 24.42, temos

$$V_{osc} = \frac{Z_s V_i}{Z_s + Z_p} \tag{24.8}$$

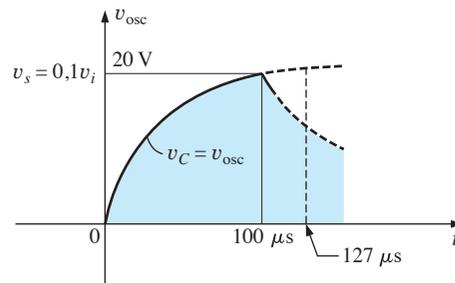


Figura 24.40 Padrão na tela de um osciloscópio da Figura 24.38 para $v_i = 200 \text{ V}$ de valor máximo.



Figura 24.41 Ponta de prova atenuadora compensada 10:1. (Cortesia de Tektronix, Inc.)

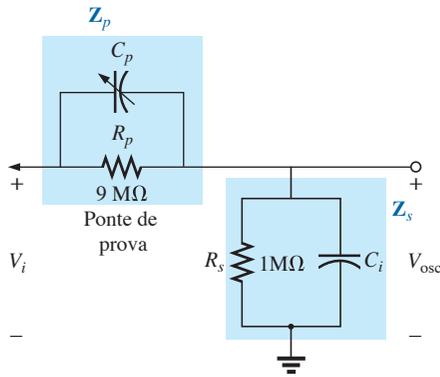


Figura 24.42 Ponta de prova atenuadora compensada e impedância de entrada de um osciloscópio, incluindo a capacitância do cabo.

Se os parâmetros forem escolhidos ou ajustados de tal maneira que

$$R_p C_p = R_s C_s \quad (24.9)$$

os ângulos de fase Z_s e Z_p serão iguais e a Equação 24.8 ficará reduzida à equação

$$V_{osc} = \frac{R_s V_i}{R_s + R_p} \quad (24.10)$$

que não depende da frequência, já que a parte reativa da resposta foi cancelada.

Na prática, simplesmente ajustamos a capacitância da ponta de prova até que os cantos de uma onda quadrada usada como padrão fiquem bem definidos. Se a calibração não for feita, pode acontecer de um sinal arredondado ter o aspecto de uma onda quadrada, pois considerou-se uma onda quadrada no ponto de medição.

Se o valor da capacitância da ponta de prova for excessivo, haverá um efeito de sobressinal; porém, se for insuficiente, os pulsos continuarão a ter forma arredondada.

24.8 APLICAÇÕES

Controle remoto de TV

O controle remoto de TV, em muitos aspectos, é similar ao controle remoto de portão de garagem ou ao transmissor do alarme do carro, nos quais não há nenhuma conexão visível entre o transmissor e o receptor, e cada transmissor está ‘conectado’ ao seu receptor por um código especial. A principal diferença entre o controle remoto de TV e os outros é que o primeiro usa uma frequência na faixa do infravermelho, enquanto os outros usam uma frequência de rádio muito mais baixa.

O controle remoto de TV, visto na Figura 24.43(a), foi desmontado para mostrar separadamente o teclado e a placa do circuito interno da unidade que são vistos na Figura 24.43(b). As três partes do controle remoto, mostradas na Figura 24.43(b), foram posicionadas de maneira a podermos visualizar o encaixe da cobertura externa, cujos furos coincidem com as diversas teclas em uma membrana que, quando pressionada, entra em contato com a face mostrada da placa de circuito impresso. Note que nessa placa existe uma região escura que coincide com a posição de cada tecla da membrana. A parte posterior da membrana de teclas é mostrada na Figura 24.43(c), na qual vemos contatos macios revestidos de carbono que farão contato elétrico com os contatos de carbono na placa de circuito impresso quando as teclas forem pressionadas. Uma foto ampliada de um dos contatos (S31) visto na Figura 24.43(c) é mostrada na Figura 24.43(d) para ilustrar a separação entre os circuitos e o formato do contato usado para garantir a continuidade quando uma tecla for pressionada.

Todas as conexões estabelecidas quando uma tecla é pressionada passam por um CI relativamente grande, que é um codificador de teclado matricial situado na parte posterior da placa de circuito impresso. Podemos vê-lo na Figura 24.44. No caso do contato S31, visto na Figura 24.43(d), três conexões da matriz, que aparecem na Figura 24.43(b), são conectadas quando a tecla correspondente (número 5) é pressionada. O codificador reage a essa combinação e envia um sinal apropriado em infravermelho para a saída a partir de um LED infravermelho que aparece na extremidade do controle remoto, conforme mostram as figuras 24.43(b) e 24.44. O segundo LED menor (junto ao LED infravermelho) que aparece na parte superior da figura 24.43(b) pisca durante a transmissão. Uma vez inseridas as baterias, o circuito eletrônico CMOS, que controla a operação do controle remoto, estará *sempre energizado*. Isso só é possível graças ao baixo consumo de energia dos circuitos com tecnologia CMOS. O botão *power* (PWR) é usado apenas para ligar o aparelho de TV e ativar o receptor.

O sinal enviado pela maioria dos controles remotos é um dos dois tipos mostrados na Figura 24.45. Nos dois casos, existe um pulso de início para começar a sequência de pulsos do sinal e informar ao receptor que o sinal codificado está chegando. Na Figura 24.45(a), um sinal codificado em binário de 4 bits é transmitido usando pulsos em posições específicas para representar os ‘uns’ e usando a ausência de um pulso para representar os ‘zeros’. Esse sinal codificado pode então ser interpretado pela unidade receptora que realiza a operação decodificada. Na Figura 24.45(b), o sinal é controlado por frequência. Cada tecla tem uma frequência diferente associada a ela. O resultado

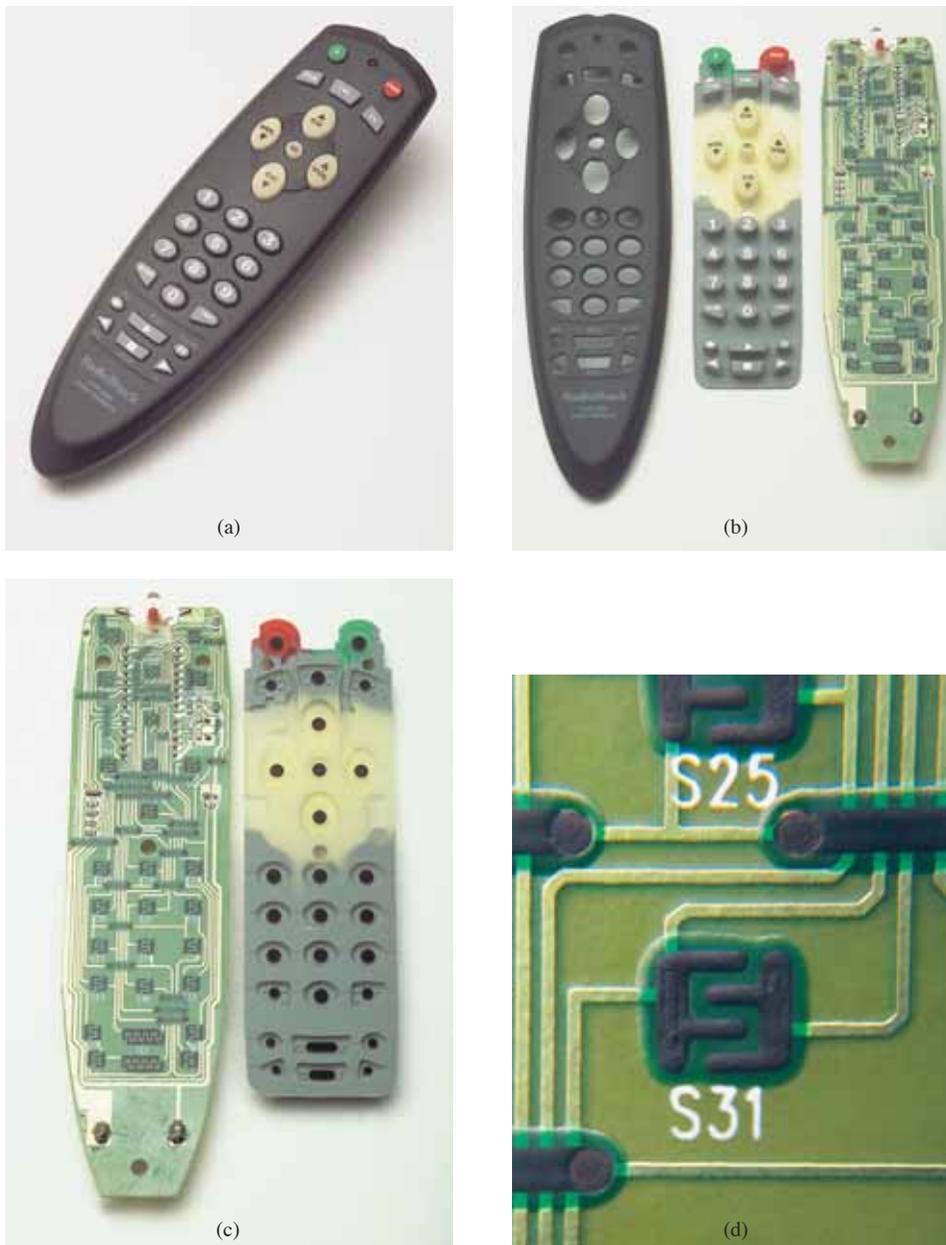


Figura 24.43 Controle remoto de TV: (a) aparência externa; (b) constituição interna; (c) teclado com contatos de carbono; (d) foto ampliada do contato S31.

é que cada tecla tem uma frequência de transmissão específica. Como cada receptor de TV responde a um trem de pulsos diferente, o controle remoto tem de ser codificado para o aparelho de TV que se deseja controlar. Existem controles remotos com *programação fixa* que só podem ser usados em um aparelho de TV. Existem também controles remotos *inteligentes* que são programados internamente com diversos códigos. Controles remotos desse tipo só precisam ser ‘informados’ a respeito de qual aparelho de TV se deseja controlar usando um sistema de código de três dígitos, e eles, então, adaptam-se ao aparelho de

TV. Controles remotos que têm a capacidade de *aprender* códigos são aqueles que podem armazenar internamente o código de controles remotos antigos para uso posterior. Nesse caso, um controle remoto é posicionado em frente ao outro e a informação é transferida de um para o outro quando os dois são energizados. Existem controles remotos que são uma combinação desses dois tipos.

O controle remoto mostrado na Figura 24.43 usa quatro pilhas AAA em série, resultando em tensão final de 6 V. Ele tem um oscilador próprio local a cristal separado do CI conforme se pode ver pelos componentes discretos

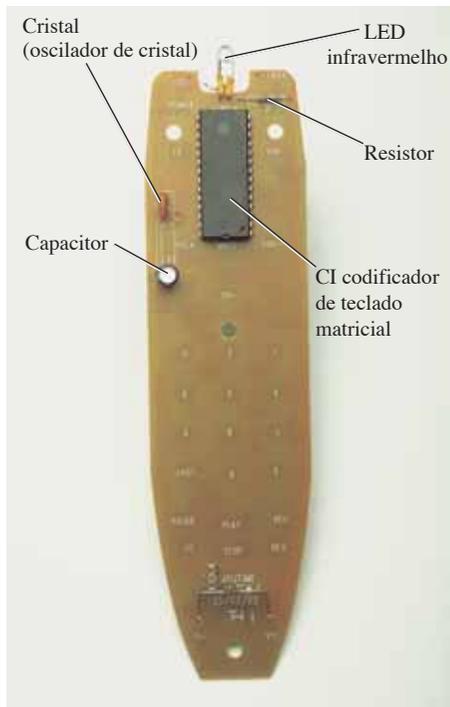


Figura 24.44 Parte posterior do controle remoto de TV visto na Figura 24.43.

localizados na parte superior direita e na parte central à esquerda na placa de circuito impresso vista na Figura 24.43(c). O cristal, que é um componente relativamente grande, comparado aos outros componentes, aparece no outro lado da placa logo acima do capacitor eletrolítico que vemos na Figura 24.44. É de responsabilidade do oscilador gerar o sinal necessário para uma operação adequada do

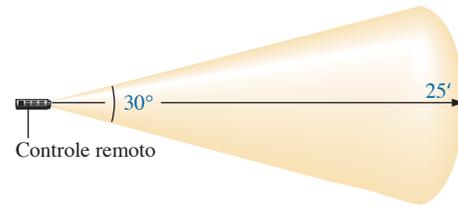


Figura 24.46 Ângulo de cobertura do controle remoto visto na Figura 24.43.

CI. Note, na Figura 24.43(b), como os componentes têm um perfil baixo e, diferentemente disso, como é grande o capacitor eletrolítico do outro lado da placa de circuito impresso vista na Figura 24.44. As especificações da unidade em questão fornecem um alcance de 7,62 m com um ângulo de cobertura de 30°, conforme mostra a Figura 24.46. O ângulo de cobertura de uma unidade pode ser testado com facilidade apontando-o diretamente para o aparelho de TV e em seguida movendo-o em qualquer direção até que o televisor não capte mais o sinal.

24.9 ANÁLISE COMPUTACIONAL

PSpice

Resposta R-C. Nossa análise começa com uma verificação dos resultados do Exemplo 24.10, no qual analisamos a resposta de um circuito R-C em série que aparece no esquema visto na Figura 24.47. A fonte é uma daquelas usadas nos capítulos 10 e 11 para fazer o papel de uma chave em série com uma fonte CC. Os atributos definidos para a forma de onda do pulso são repetidos por conveniência na Figura 24.48. Lembre-se de que o tempo

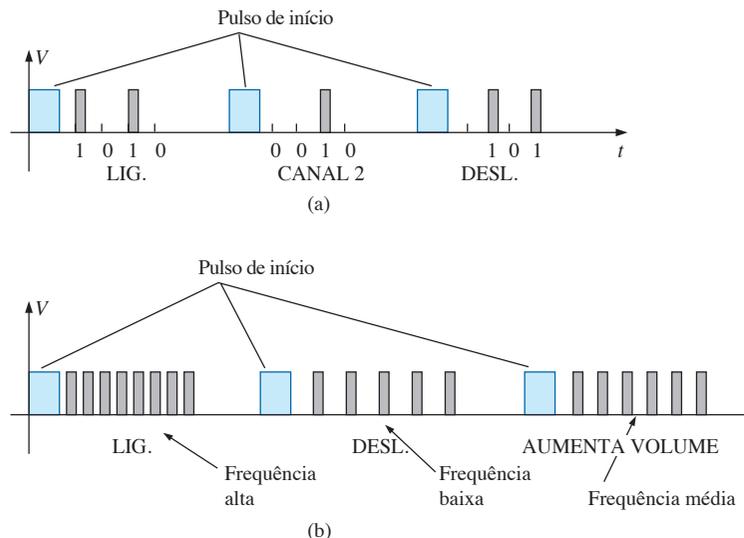


Figura 24.45 Transmissão de sinal: (a) trem de pulsos; (b) variação de frequência.

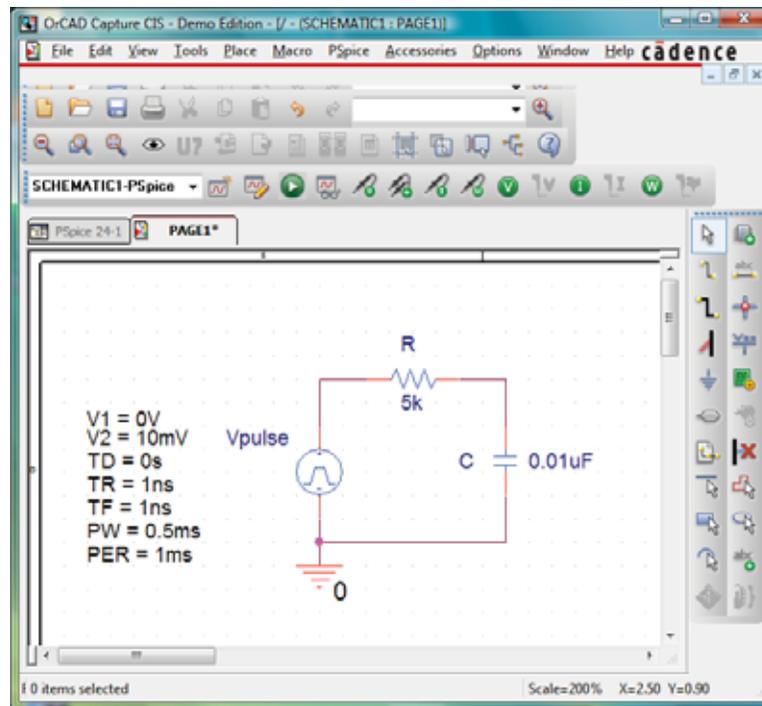


Figura 24.47 Uso do PSpice para verificar os resultados do Exemplo 24.10.

PW foi ajustado de modo a ser longo o suficiente para que todo o período transitório pudesse ser examinado. Nessa análise, a largura do pulso é ajustada para permitir a visualização do comportamento transitório de um circuito R - C entre variações de níveis da tensão aplicada. Inicialmente, **PW** é ajustado com um valor que é dez vezes a constante de tempo do circuito, de modo que a resposta completa ao transitório possa ocorrer entre as mudanças de tensão. A constante de tempo do circuito é $\tau = RC = (5 \text{ k}\Omega)(0,01 \text{ }\mu\text{F}) = 0,05 \text{ ms}$, resultando em **PW** de 0,5 ms, conforme mostra a Figura 24.47. Para ter uma aparência de onda quadrada, foi escolhido um período que é o dobro da largura do pulso, ou 1 ms, como mostrado na listagem de parâmetros de **VPulse**.

Na caixa de diálogo **Simulation Settings**, a opção **Time Domain(Transient)** é selecionada porque desejamos uma resposta em função do tempo. O parâmetro **Run to time** é ajustado em 2 ms de maneira que dois ciclos completos possam ser visualizados. **Start saving data**

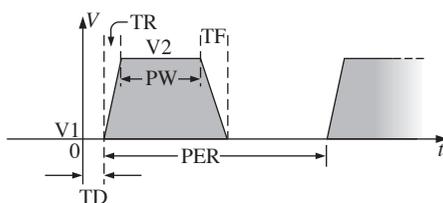


Figura 24.48 Definição dos parâmetros de **VPulse** no PSpice.

after foi mantido no valor default de 0 s e **Maximum step size** foi ajustado em $2 \text{ ms}/1.000 = 2 \text{ }\mu\text{s}$. Após a simulação, a sequência **Trace-Add Trace-I(C)-OK** produz o gráfico que é visto na parte inferior da Figura 24.49. Note que a corrente máxima é $2 \text{ }\mu\text{A}$, conforme determinado por $I_{\text{Cmáx}} = 10 \text{ mV}/5 \text{ k}\Omega$, e a resposta transitória completa aparece dentro do período de cada pulso. Note também que a corrente apresenta valores abaixo do eixo horizontal, revelando uma mudança no sentido quando a tensão aplicada passa de 10 mV para 0 V. Pela sequência **Plot-Add Plot to Window-Trace-Add Trace-V(Vpulse:)-OK-Trace-Add Trace-V(C:1)-OK**, os gráficos da tensão aplicada e da tensão no capacitor podem ser mostrados na parte superior da Figura 24.49. Primeiro selecionamos o gráfico visto na parte superior da Figura 24.49, em que aparece a identificação **SEL>>**, e então ativamos o botão **Toggle cursor**. Agora podemos clicar com o botão esquerdo do mouse em **V(C:1)** na parte inferior direita do gráfico e posicionar o cursor no gráfico com um clique no botão esquerdo do mouse. Ao posicionar o cursor em cinco constantes de tempo, vemos que a tensão transitória alcançou 10 mV. Posicionando o cursor ativado pelo botão direito do mouse em dez constantes de tempo, vemos que V_C tem uma tensão de praticamente 10 mV.

Ajustando $t_p = \tau = T/2$. Agora os parâmetros da fonte serão modificados alterando-se a frequência da forma de onda do pulso para 10 kHz com um período de 0,1 ms e

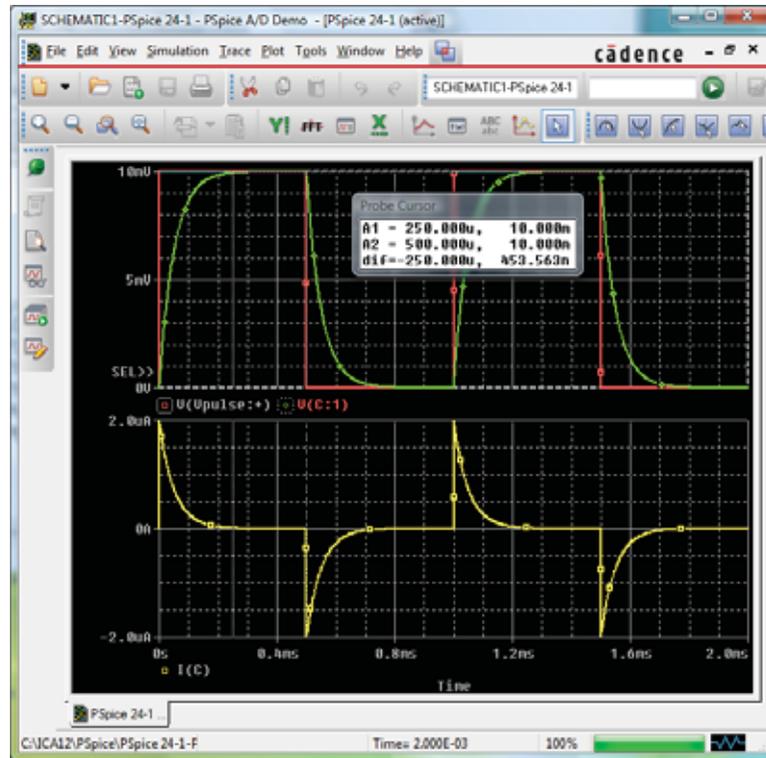


Figura 24.49 Gráfico de v_{pulsos} , v_C e i_C para o circuito visto na Figura 24.47.

uma largura de pulso de 0,05 ms. No caso de **Vpulse**, as mudanças são **PW** = 0,05 ms e **PER** = 0,1 ms. A constante de tempo do circuito continua a mesma, 0,05 ms, assim temos uma situação na qual a largura do pulso é igual a uma

constante de tempo do circuito. O resultado é que decorrerá o tempo de alguns pulsos para que a tensão no capacitor alcance o seu valor final de 10 mV. Na caixa de diálogo **Simulation Settings**, o parâmetro **Run to time** é alterado

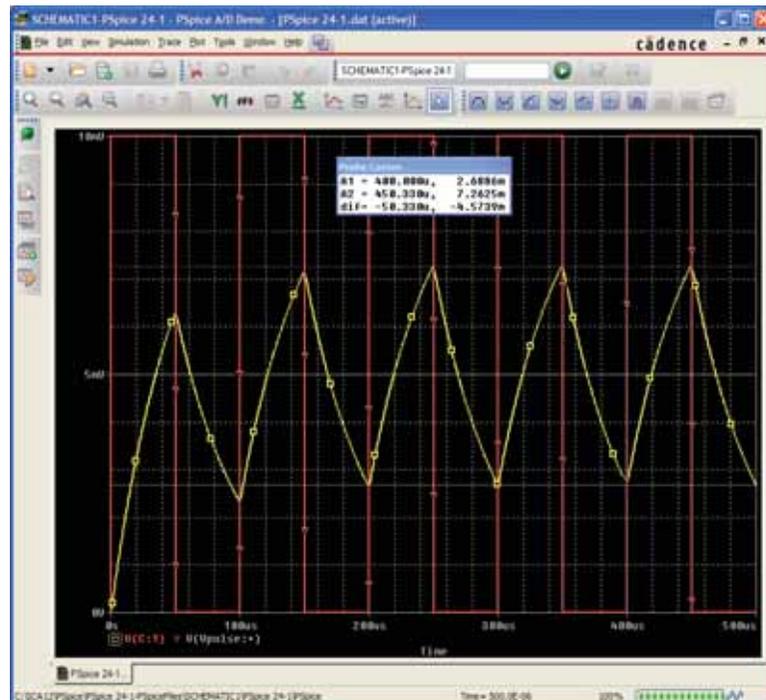


Figura 24.50 Gráfico de v_C para o circuito visto na Figura 24.47 com $t_p = \tau = T/2$.

para $0,5 \text{ ms} = 500 \mu\text{s}$, que corresponde a cinco ciclos da tensão aplicada. **Maximum step size** é alterado para $500 \text{ ms}/1.000 = 500 \text{ ns} = 0,5 \text{ ms}$. Na janela **SCHEMATIC1**, a sequência **Trace-Add Trace-V(C:1)-OK** é usada para se obter o gráfico da tensão transitória no capacitor, enquanto a sequência **Trace-Add Trace-V(Vpulse:)-OK** coloca o gráfico da tensão aplicada na mesma tela. Note nos gráficos obtidos, vistos na Figura 24.50, que a tensão cresce a partir

de 0 V até atingir o estado estacionário depois de decorridos $400 \mu\text{s}$. Em $400 \mu\text{s}$, o cursor esquerdo (**A1**) foi usado para determinar o ponto mínimo, resultando em $2,69 \text{ mV}$ — algo bem próximo do resultado obtido manualmente no Exemplo 24.11, que é $2,69 \text{ mV}$. Em $450 \mu\text{s}$, o cursor ativado pelo botão direito do mouse (**A2**) fornece um valor de $7,26 \text{ mV}$, que também está muito próximo do valor calculado, que é $7,31 \text{ mV}$.

PROBLEMAS

Seção 24.2 Pulsos ideais e pulsos reais

- Determine, para a forma de onda pulsada vista na Figura 24.51:
 - se os pulsos são positivos ou negativos
 - o nível de base
 - a largura dos pulsos
 - a amplitude dos pulsos
 - a inclinação percentual dos pulsos
 - frp
 - ciclo de trabalho
- Repita o Problema 1 para a forma de onda pulsada vista na Figura 24.52.
- Repita o Problema 1 para a forma de onda pulsada da Figura 24.53.

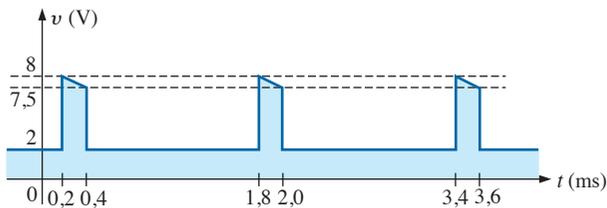


Figura 24.51 Problemas 1, 8 e 12.

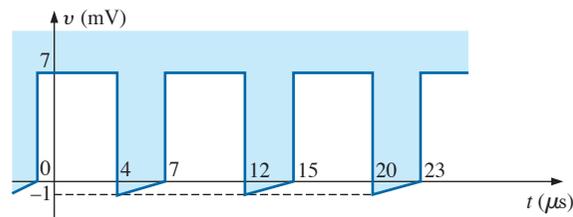


Figura 24.52 Problemas 2 e 9.

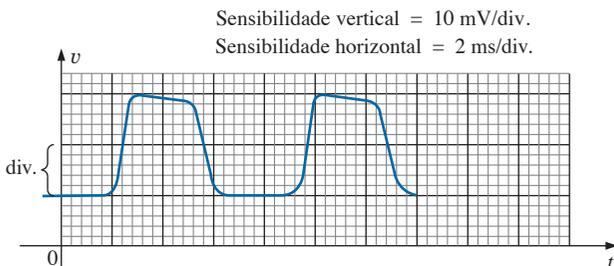


Figura 24.53 Problemas 3, 4, 10 e 13.

- Determine os tempos de subida e de descida para a forma de onda vista na Figura 24.53.
- Desenhe a forma de onda de um pulso positivo com um nível de referência de -5 mV , uma largura de pulso de $2 \mu\text{s}$, uma amplitude de 15 mV , uma inclinação de 10 por cento, um período de $10 \mu\text{s}$ e bordas verticais.
- Para a forma de onda vista na Figura 24.54, obtida pela aproximação da forma de onda original por segmentos de reta:
 - Determine o tempo de subida dos pulsos.
 - Determine o tempo de descida dos pulsos.
 - Determine a largura dos pulsos.
 - Calcule a frequência.
- Para a forma de onda vista na Figura 24.55:
 - Determine o período.
 - Calcule a frequência.
 - Determine o valor máximo e o valor mínimo.

Seção 24.3 Taxa de repetição e ciclo de trabalho

- Determine a frequência de repetição dos pulsos e o ciclo de trabalho para a forma de onda vista na Figura 24.51.
- Determine a frequência de repetição dos pulsos e o ciclo de trabalho para a forma de onda vista na Figura 24.52.
- Determine a frequência de repetição dos pulsos e o ciclo de trabalho para a forma de onda vista na Figura 24.53.

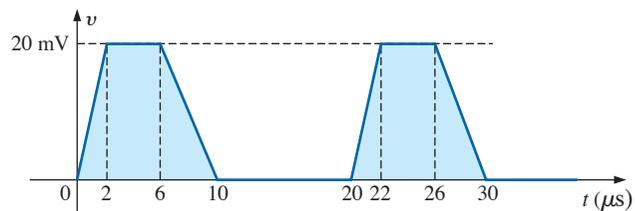


Figura 24.54 Problemas 6 e 14.

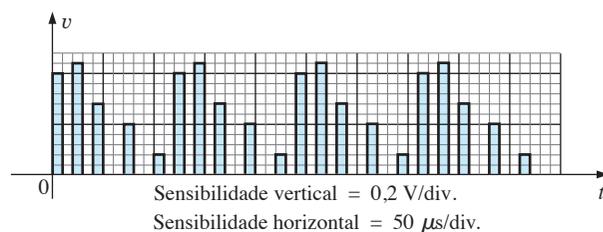


Figura 24.55 Problemas 7 e 15.

Seção 24.4 Valor médio

11. Para a forma de onda vista na Figura 24.56, determine:
 - a) o período
 - b) a largura
 - c) a frequência de repetição dos pulsos
 - d) o valor médio
 - e) o valor eficaz
12. Determine o valor médio da forma de onda periódica vista na Figura 24.51.
13. Determine, com a maior precisão possível, o valor médio da forma de onda vista na Figura 24.53.
14. Determine o valor médio da forma de onda vista na Figura 24.54.
15. Determine o valor médio do trem de pulsos periódico visto na Figura 24.55.

Seção 24.5 Transitórios em circuitos R-C

16. A tensão inicial no capacitor visto na Figura 24.57 é 5 V, com a polaridade indicada na figura. A chave é fechada em $t = 0$ s.
 - a) Determine a expressão matemática para v_C .
 - b) Faça o gráfico de v_C em função do tempo t .
 - c) Determine a expressão matemática para a corrente i_C .
 - d) Faça o gráfico de i_C em função do tempo t .
17. Para a tensão de entrada v_i mostrada na Figura 24.58, plote a forma de onda de saída v_o . Considere que o estado estacionário foi estabelecido em $v_i = 8$ V.

18. A chave mostrada na Figura 24.59 é mantida na posição 1 até que se tenha atingido o regime estacionário. Em seguida, é deslocada (em $t = 0$ s) para a posição 2. Plote a forma de onda da tensão v_C .
19. Plote a forma de onda i_C do Problema 18.

Seção 24.6 Resposta de um circuito R-C a uma onda quadrada

20. Plote a forma de onda de v_C para o circuito visto na Figura 24.60 se a onda quadrada que aparece na mesma figura tiver uma frequência de
 - a) 500 Hz.
 - b) 100 Hz.
 - c) 5.000 Hz.
21. Plote a corrente i_C para as três frequências do Problema 20.
22. Plote a resposta v_C do circuito mostrado na Figura 24.60 para a entrada de onda quadrada da Figura 24.61.
23. Se o capacitor, visto na Figura 24.60, estiver carregado inicialmente tendo uma tensão de 20 V, plote a tensão v_C para o mesmo sinal de entrada v_i visto na Figura 24.60, com uma frequência de 500 Hz.
24. Repita o Problema 23 se a tensão inicial do capacitor for -10 V.

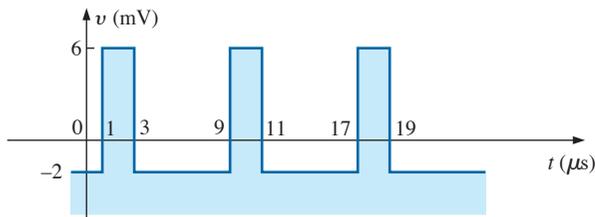


Figura 24.56 Problema 11.

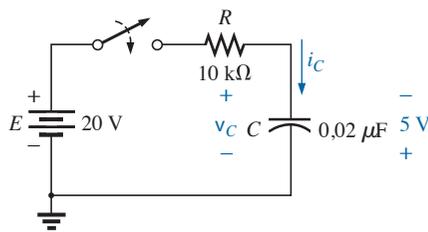


Figura 24.57 Problema 16.

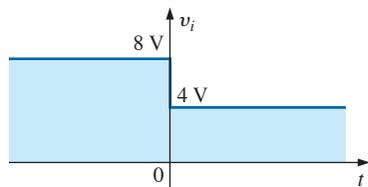


Figura 24.58 Problema 17.

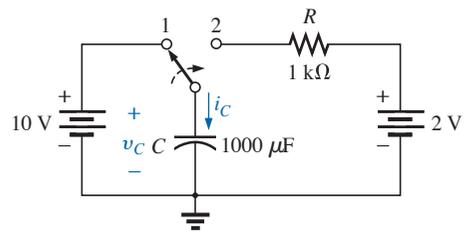
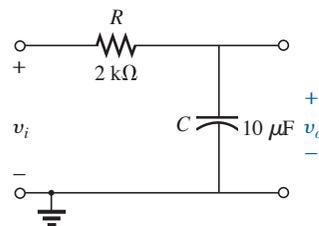


Figura 24.59 Problemas 18 e 19.



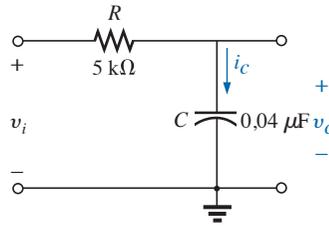
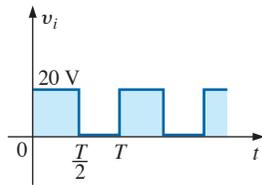


Figura 24.60 Problemas 20, 21, 23, 24, 27 e 28.

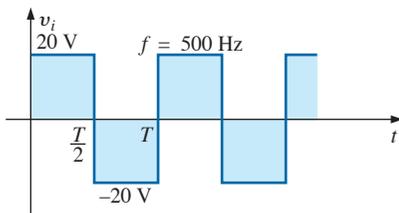


Figura 24.61 Problema 22.

Seção 24.7 Ponta de prova atenuadora compensada

- 25. Dado o circuito visto na Figura 24.42 com $R_p = 9 \text{ M}\Omega$ e $R_s = 1 \text{ M}\Omega$, determine V_{osc} em forma polar se $C_p = 3 \text{ pF}$, $C_s = 18 \text{ pF}$, $C_c = 9 \text{ pF}$ e $v_i = \sqrt{2}(100)\text{sen } 2\pi 10.000t$. Ou seja, determine Z_s e Z_p e substitua os dois valores na Equação 24.10. É verdade que os ângulos de fase de Z_s e Z_p são iguais quando $R_p C_p = R_s C_s$?
- 26. Repita o Problema 25 para $\omega = 10^5 \text{ rad/s}$.

Seção 24.9 Análise computacional

PSpice

- 27. Usando o schematics, obtenha as formas de onda de v_C e i_C para o circuito visto na Figura 24.60 para uma frequência de 1 kHz.
- *28. Usando o schematics, plote as formas de onda de v_b , v_C e i_C no mesmo gráfico para o circuito visto na Figura 24.60, que opera com uma frequência de 2 kHz.
- *29. Usando o schematics, obtenha as formas de onda que aparecem na tela do osciloscópio mostrada na Figura 24.37 com um pulso de entrada de 20 V e uma frequência de 5 kHz.
- *30. Coloque um capacitor em paralelo com R_p no circuito visto na Figura 24.37 de modo que v_{osc} fique em fase com v_i . Usando o schematics, obtenha a forma de onda mostrada na Figura 24.37 com um pulso de entrada de 20 V e uma frequência de 5 kHz.

GLOSSÁRIO

- Amplitude de um pulso:** O valor pico a pico de um pulso.
- Ciclo de trabalho:** Parâmetro que expressa a fração do período durante a qual um pulso está presente.
- Frequência (taxa) de repetição de pulsos:** Frequência de um trem de pulsos periódico.
- Inclinação:** A queda no valor máximo de um pulso durante sua largura de pulso.
- Largura de pulso:** (t_p) Medida de tempo entre os pontos nos quais o valor do pulso é igual a 50 por cento da amplitude.
- Nível de referência:** Nível no qual o pulso começa.
- Onda quadrada:** Forma de onda periódica composta por pulsos ideais com um ciclo de trabalho de 50 por cento.
- Ponta de prova atenuadora compensada:** Ponta de prova que atenua o valor da tensão aplicada ao canal vertical de um osciloscópio compensando os efeitos da capacitância de entrada para não modificar a forma de onda dessa tensão.
- Ponta de prova atenuadora:** Ponta de prova de osciloscópio que reduz o valor da tensão aplicada ao canal vertical.

- Pulso ideal:** Pulso no qual as bordas são verticais e que não apresenta inclinação.
- Pulso negativo:** Pulso no qual o valor instantâneo aumenta negativamente a partir do nível de referência.
- Pulso positivo:** Pulso no qual o valor instantâneo aumenta positivamente a partir do nível de referência.
- Pulso real (verdadeiro, prático):** Pulso no qual as bordas anterior e posterior não são verticais, juntamente com outros efeitos de distorções como inclinação, oscilação ou sobressinal.
- Tempo de descida (t_f):** Tempo necessário para que o valor instantâneo da borda posterior de um pulso varie de 90 para 10 por cento da amplitude.
- Tempo de subida (t_r):** Tempo necessário para que o valor instantâneo da borda anterior de um pulso varie de 10 para 90 por cento da amplitude.
- Trem de pulsos periódico:** Trem de pulsos que se repete após certo intervalo de tempo.
- Trem de pulsos:** Sequência de pulsos, nem todos necessariamente com a mesma amplitude e com a mesma largura.