

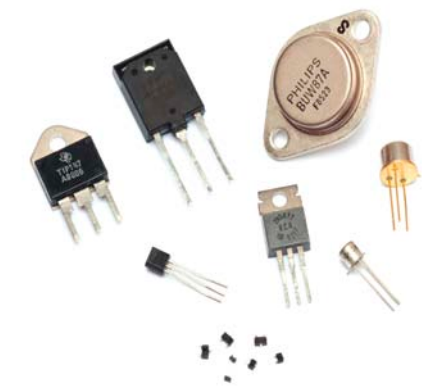
Sumário

10.4 Aplicações do DIAC e do TRIAC	292
10.4.1 Chave estática CA assíncrona	292
10.4.2 Chave estática CA síncrona	293
10.4.3 Controlador de luminosidade – <i>dimmer</i>	294
10.4.4 Luz automática	295
10.5 PUT	295
10.6 Circuito integrado TCA 785	298
10.7 IGBT	300
10.7.1 Corrente de cauda	302
10.7.2 Diodo em antiparalelo	302
10.7.3 IGBT ligado em paralelo	303

305 Capítulo II Optoeletrônica

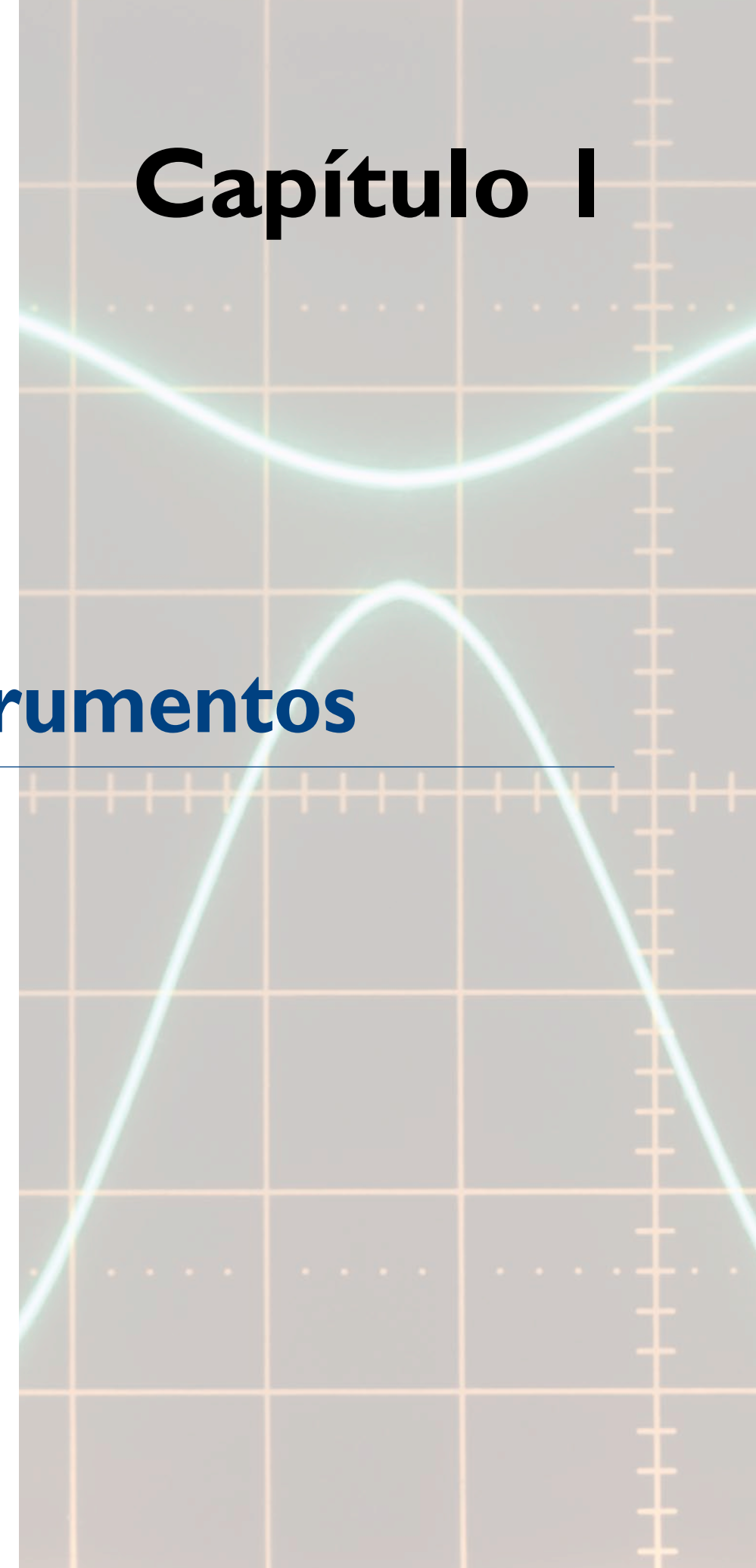
II.1 Sensores	307
II.1.1 Fotorresistor	307
II.1.2 Fotodiodo	308
II.1.3 Fototransistor	310
II.1.4 Célula solar	311
II.2 Emissores	313
II.3 Acoplador óptico	314
II.4 Interruptor óptico	318
II.5 Refletor óptico	318

321 Referências bibliográficas



Capítulo I

Instrumentos



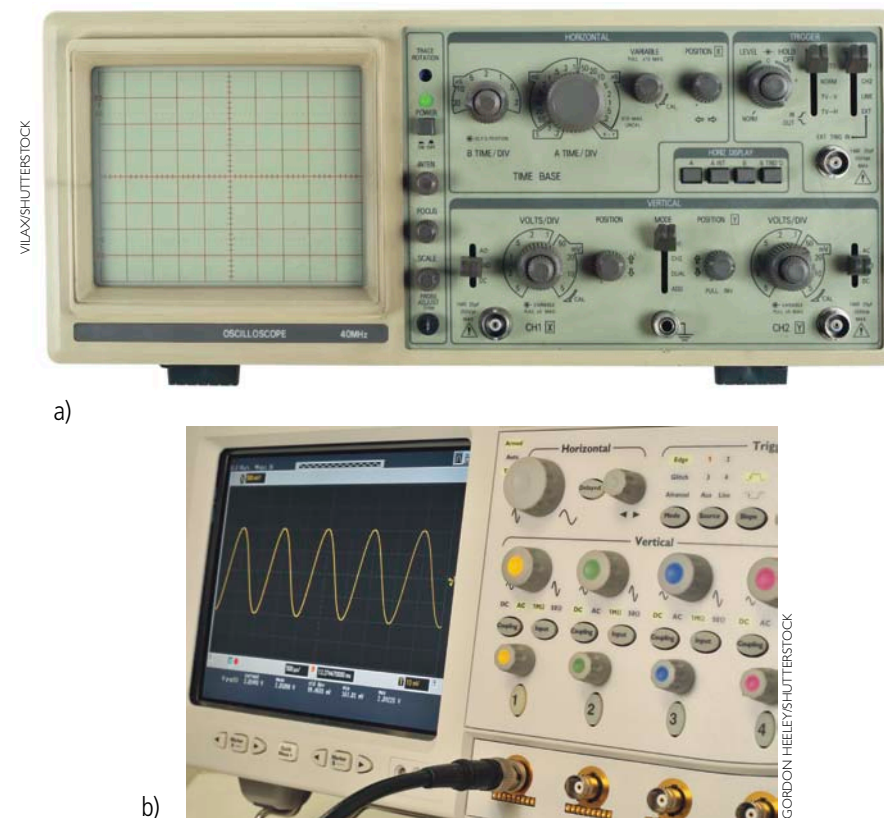
Neste capítulo, apresentaremos uma breve introdução sobre três instrumentos frequentemente utilizados nos cursos de eletrônica e na indústria: o osciloscópio, o gerador de funções e o multímetro. O primeiro é empregado para observar e medir as formas de onda de tensão; o segundo, para gerar diversas formas de onda de tensão; e o terceiro, de uso mais comum, para medir tensão, corrente e resistência, entre outras funções.

1.1 Osciloscópio analógico

O osciloscópio é um instrumento utilizado para visualizar a forma de onda dos sinais, possibilitando análises qualitativa e quantitativa dos componentes eletrônicos que geram as diversas formas de onda (figura 1.1).

Figura 1.1

(a) Osciloscópio analógico e (b) osciloscópio digital.



Existem diferentes modelos de osciloscópios. Vamos conhecer alguns de seus componentes e as respectivas funções. Os modelos mais simples são dotados de um tubo de raios catódicos (TRC) com uma tela transparente revestida de material fluorescente. Quando o feixe de elétrons incide em sua superfície, deixa uma impressão (um ponto luminoso) visível na parte externa da tela do tubo. A trajetória do feixe de elétrons pode ser alterada antes de atingir a tela fluorescente. O desvio ocorre em decorrência das tensões aplicadas entre placas colocadas horizontal e verticalmente, permitindo que a forma de onda seja visualizada.

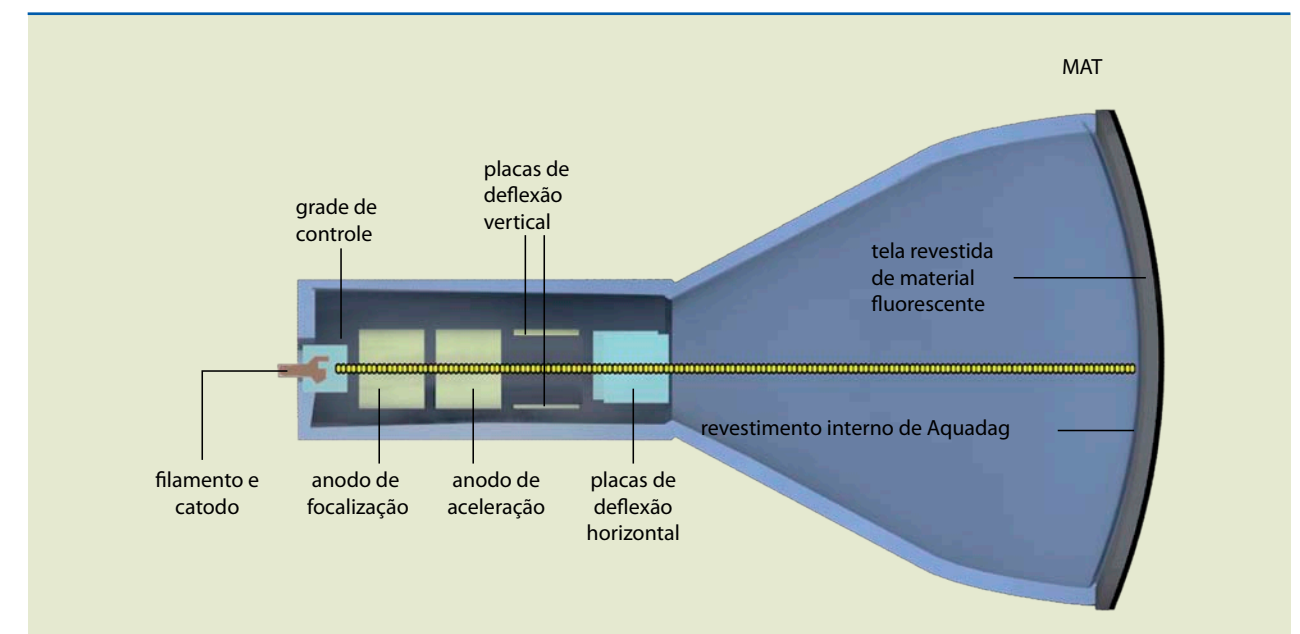
O material empregado para cobrir a tela do TRC é chamado de fósforo. Existem vários tipos de fósforo, um para cada aplicação. Por exemplo, o P1 é usado para observação visual de fenômenos de média velocidade e tem persistência de cerca de 15 ms depois de o feixe ser removido. Já o P7 é utilizado para observação de fenômenos lentos, com persistência de cerca de 10 s, ideal para uso em equipamentos de monitoração de pacientes em hospitais. O grande inconveniente é que a tela pode ser danificada caso o feixe de elétrons seja mantido em um mesmo ponto por muito tempo.

Ao redor do TRC existe uma blindagem magnética feita de uma liga especial de aço. Sua função é inibir a ação de campos magnéticos externos que possam distorcer o feixe de elétrons. É importante ressaltar que a deflexão do feixe de elétrons (desvio) pode ser efetuada com a aplicação de um campo elétrico por meio de placas ou um campo magnético gerado por bobinas indutoras. No caso do osciloscópio, a deflexão é eletrostática, ou seja, dá-se através de placas, pois bobinas são adequadas somente em baixas frequências. Por exemplo, nos tubos de TV, a frequência é da ordem de 15 kHz, enquanto, no osciloscópio, atinge centenas de MHz.

A figura 1.2 é uma representação esquemática do TRC e seus principais eletrodos de controle do feixe de elétrons.

Figura 1.2

Estrutura simplificada de um tubo de raios catódicos.



MAT (muito alta tensão) – É uma tensão aplicada na superfície do Aquadag. O circuito é fechado por meio dela.

Catodo – Fonte de emissão do feixe de elétrons. Consiste em um pequeno cilindro coberto por uma camada de material (óxido de terras raras) que emite elétrons ao ser aquecido.

Filamento – Está localizado no interior do catodo, mas isolado dele. Ao ser submetido a uma tensão, o filamento se aquece e emite calor. O catodo, por estar próximo, também se aquece, provocando a emissão do feixe de elétrons.

Grade de controle – Permite aumentar ou diminuir o fluxo de elétrons do catodo para o anodo.

Anodo de focalização – Eletrodo que funciona como uma lente, direcionando o feixe para a tela.

Anodo de aceleração – Ligado a uma tensão positiva, esse eletrodo tem a função de acelerar os elétrons em direção à tela, para que adquiram energia suficiente para produzir um ponto e gerar a fluorescência.

Placas de deflexão vertical (PDV) – Nelas é aplicada a tensão do sinal que se deseja ver na tela. O movimento do feixe de elétrons na vertical depende da polaridade e intensidade da tensão.

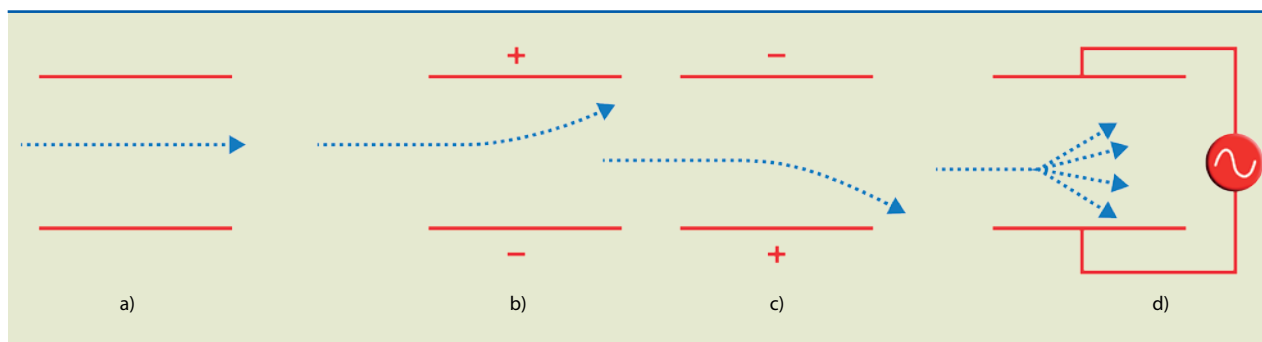
Placas de deflexão horizontal (PDH) – Nelas é aplicada a tensão de dente de serra. A finalidade dessas placas é manter constante a velocidade do feixe de elétrons e possibilitar que ele se desloque da esquerda para a direita na tela.

Aquadag – Material condutor à base de grafite que tem a função de coletar os elétrons emitidos pelos átomos da tela de fósforo (emissão secundária, que ocorre depois de os elétrons provenientes do catodo atingirem a tela).

Figura 1.3

PDV submetidas a tensões contínuas e alternada: (a) tensão nula, (b) placa superior positiva, (c) placa superior negativa e (d) tensão senoidal entre as placas.

Uma tensão aplicada entre as PDV provocará um movimento do feixe na vertical. A figura 1.3 mostra as PDV submetidas a várias condições de tensão, inclusive tensão nula.

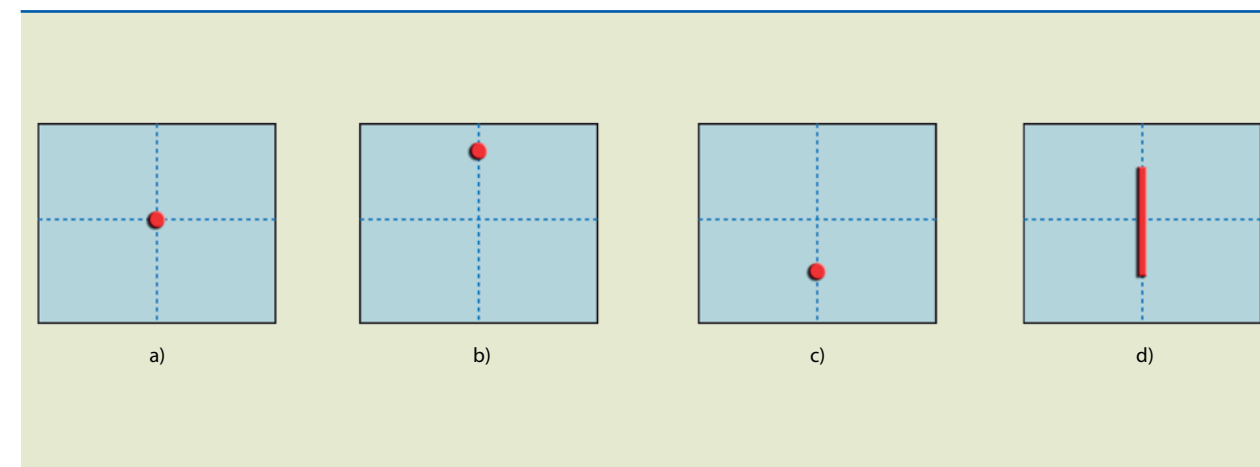


Se for aplicada uma tensão senoidal de frequência suficientemente alta entre as placas verticais, o ponto se deslocará rapidamente de baixo para cima e, por causa da rapidez do movimento e da persistência da luminosidade na tela, será visualizada uma linha contínua na vertical.

A figura 1.4 apresenta as imagens observadas na tela frontal em quatro situações: quando a tensão aplicada nas PDV é nula, quando a placa superior é positiva, quando a placa superior é negativa e com a tensão senoidal de frequência suficientemente alta. É importante notar que o tamanho do traço está relacionado à amplitude da tensão: quanto maior a tensão, maior o tamanho do traço na vertical. Portanto, é possível medir o valor da tensão.

Figura 1.4

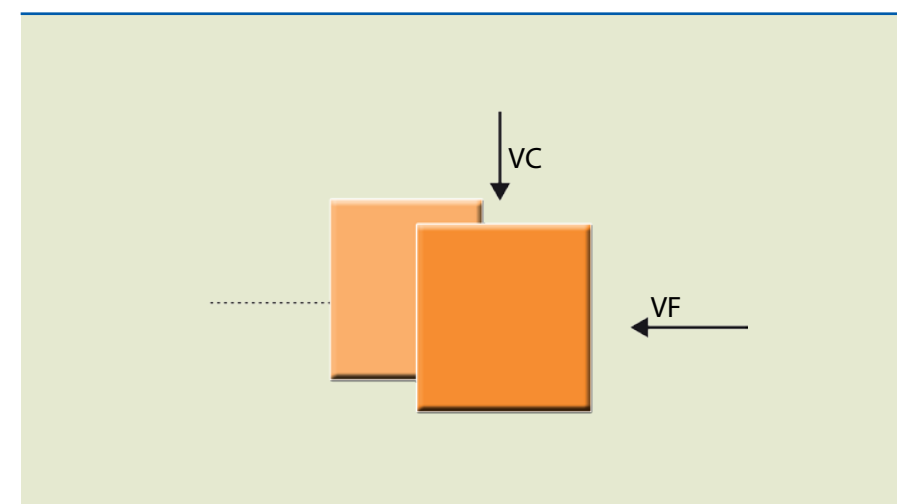
Vista frontal da tela do osciloscópio: (a) tensão nula entre as PDV, (b) placa superior positiva, (c) placa superior negativa e (d) tensão senoidal.



O mesmo raciocínio utilizado na análise das PDV vale para as PDH, isto é, aplicando uma tensão entre essas placas, o feixe se deslocará na horizontal. A figura 1.5 mostra as placas vistas de cima e de frente.

Figura 1.5

Vista de cima (VC) e vista frontal (VF) das PDH.



Na figura 1.6, observam-se as várias trajetórias dos feixes (imagens superiores) e as possibilidades para a tensão aplicada nas PDH (imagens inferiores).



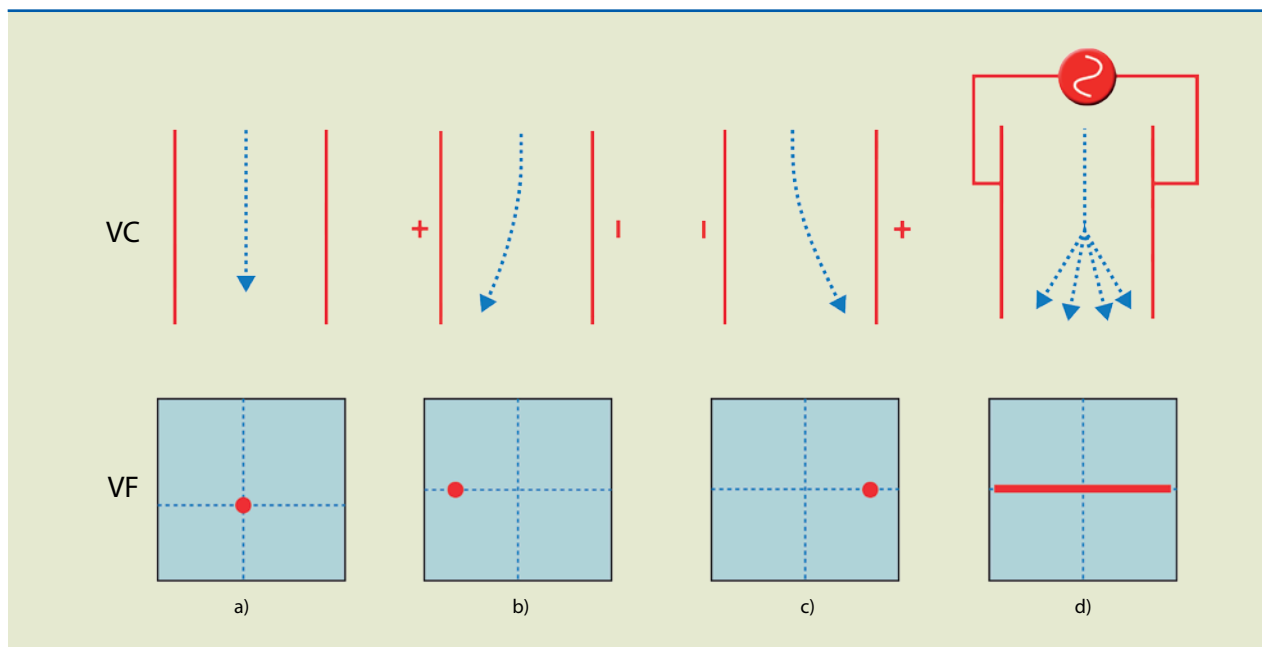


Figura 1.6

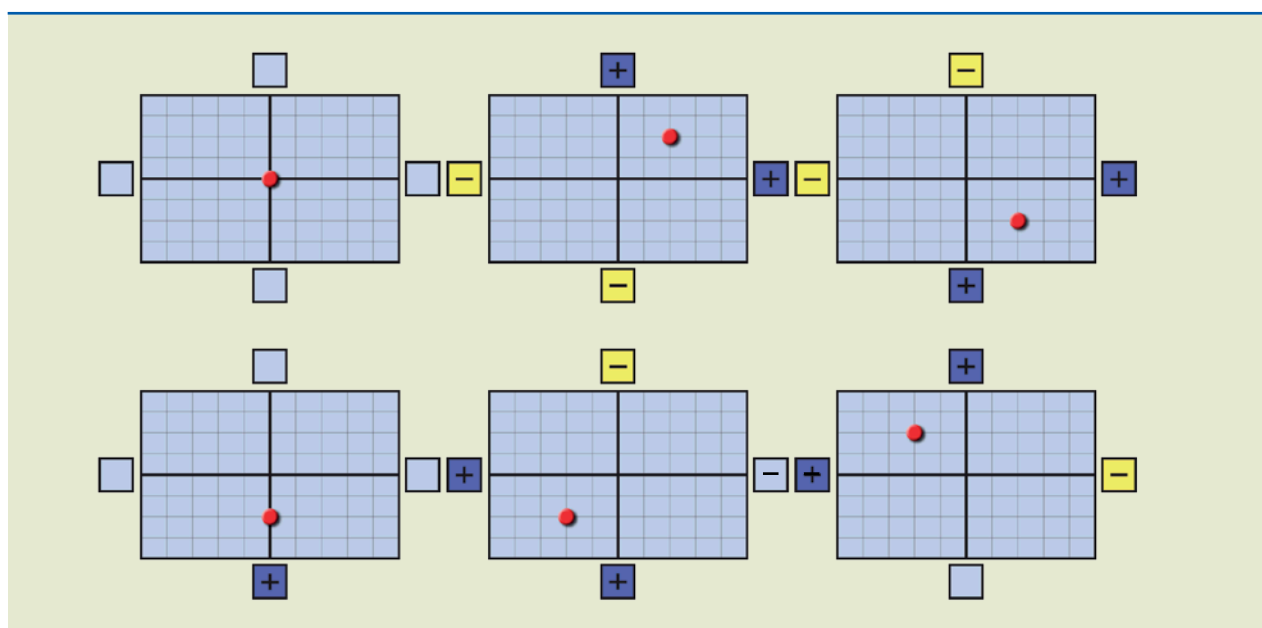
Vista de cima e vista frontal quando as PDH são submetidas a tensões contínuas e alternadas: (a) tensão nula, (b) placa esquerda positiva, (c) placa esquerda negativa e (d) tensão senoidal.

Figura 1.7

Tela frontal mostrando o ponto de incidência do feixe de elétrons para diferentes combinações de tensões aplicadas nas PDV e PDH.

1.2 Composição de movimentos

Se for aplicada tensão ao mesmo tempo nas PDV e PDH, haverá uma composição de movimentos. Como resultado, o feixe de elétrons se deslocará de acordo com a intensidade e polaridade das tensões aplicadas, como exemplificado na figura 1.7.

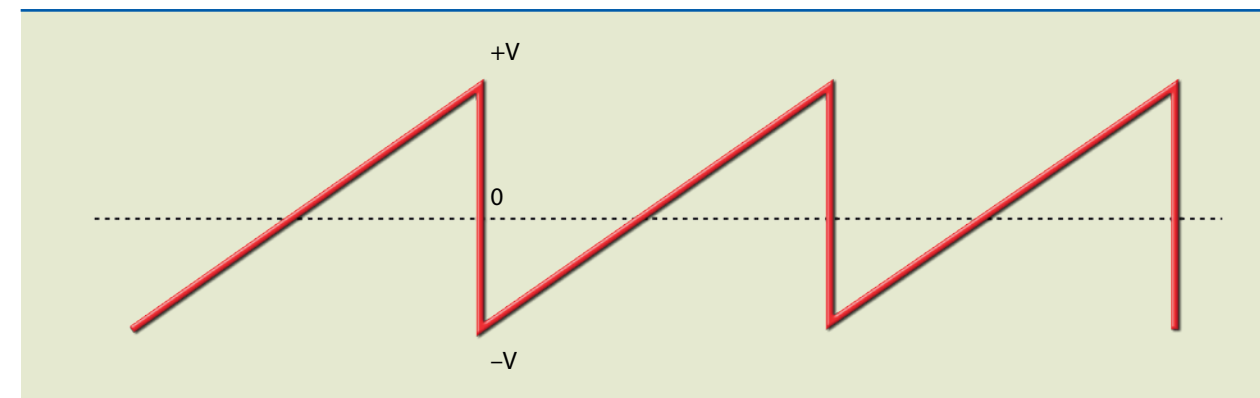


1.3 Tensão dente de serra

Uma tensão dente de serra (DS), indicada na figura 1.8, cresce linearmente com o tempo, sendo usada como base de tempo para deslocar linearmente o feixe de elétrons na horizontal.

Figura 1.8

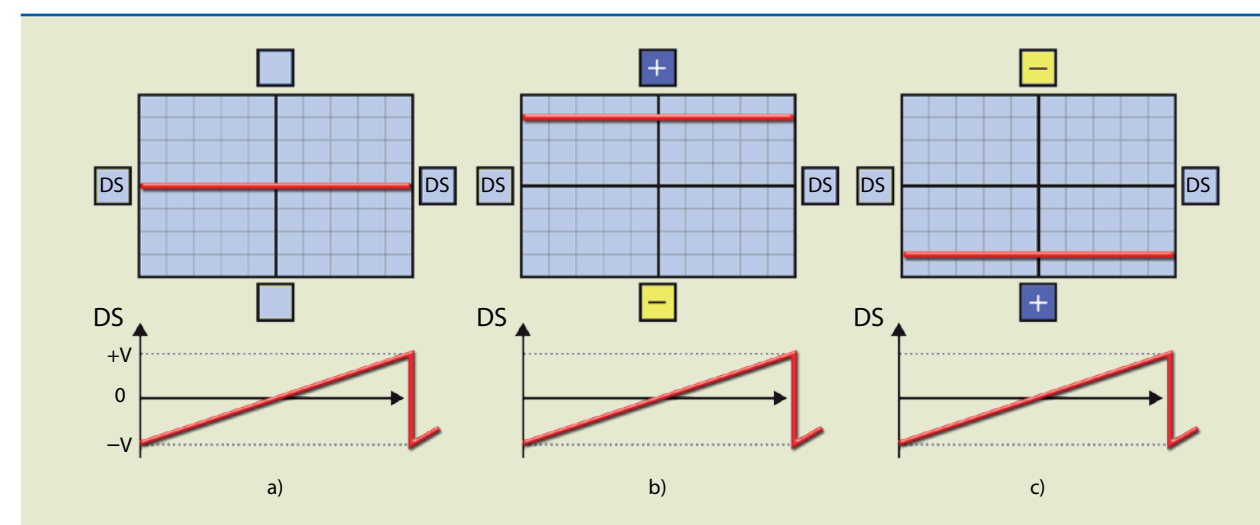
Tensão dente de serra (DS).



Caso seja aplicada entre as PDH uma tensão dente de serra de frequência suficientemente alta, aparecerá, por causa da persistência do material químico depositado na superfície da tela, uma linha contínua na horizontal. Se a tensão entre as PDV for nula, o feixe estará centralizado (figura 1.9a). Caso a placa superior seja positiva em relação à inferior, o feixe será atraído para cima (figura 1.9b). Se a placa superior for negativa em relação à inferior, o feixe se deslocará para baixo (figura 1.9c).

Figura 1.9

Tela frontal com tensão dente de serra aplicada nas PDH: (a) tensão nula nas PDV, (b) tensão positiva nas PDV e (c) tensão negativa nas PDV.



Se um osciloscópio estiver calibrado, é possível medir a tensão observando o deslocamento do feixe na tela. Levemos em conta os exemplos da figura 1.9. Supondo que o **ganho** esteja calibrado em 2 V/divisão, no primeiro caso, sem tensão (referência 0 V), o traço permanecerá no meio. No segundo exemplo, como o feixe subiu três divisões, a tensão medida é $2 \text{ (V/div)} \cdot 3 \text{ (div)} = 6 \text{ V}$ (em relação à referência adotada). No terceiro caso, adotando a mesma referência, como o deslocamento foi três divisões para baixo, o valor é o mesmo, mas negativo: -6 V .

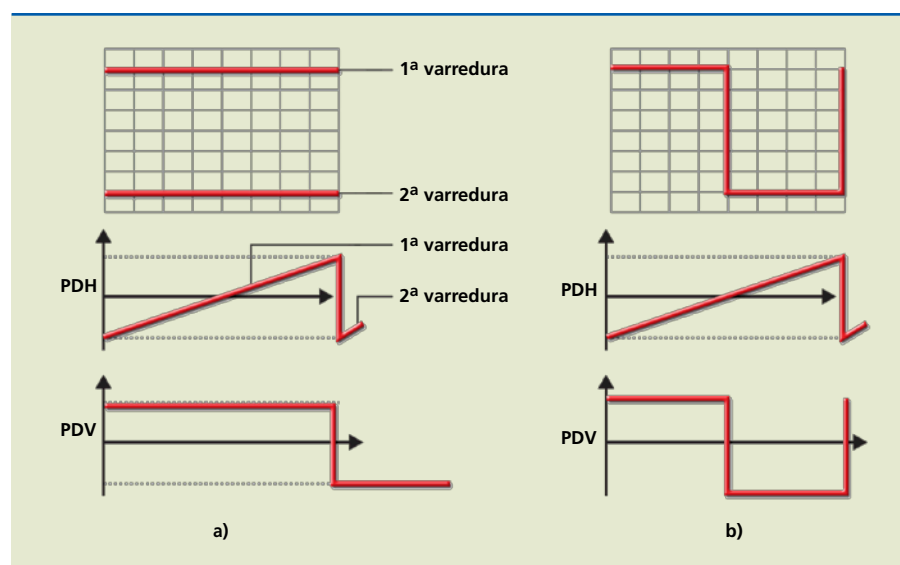
Ganho, no caso do osciloscópio, refere-se à amplitude do sinal visto na tela.



Se fosse aplicada uma tensão quadrada (+6 V/-6 V) de mesma frequência do dente de serra, o que seria observado na tela do osciloscópio? E se o dente de serra tivesse a frequência reduzida pela metade? As figuras 1.10a e 1.10b mostram essas possibilidades.

Figura 1.10

Tensão dente de serra aplicada nas PDH com (a) tensão quadrada de mesma frequência nas PDV e (b) tensão quadrada de frequência duas vezes maior nas PDV.



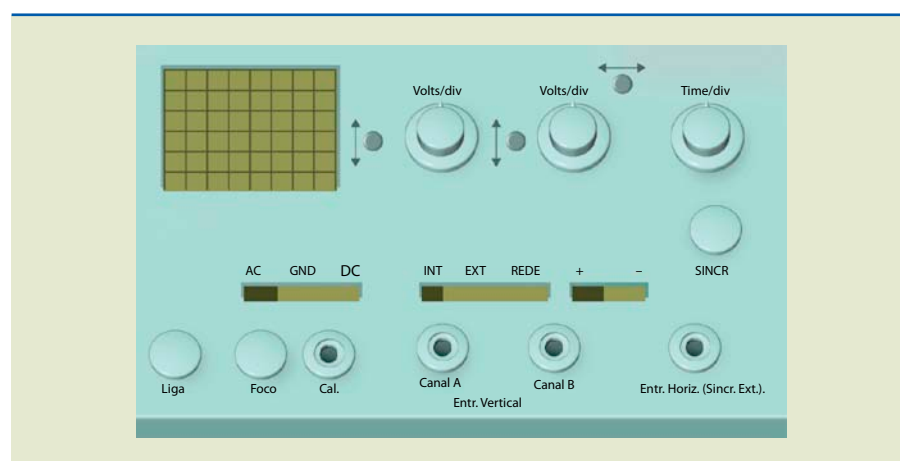
Podemos concluir que, para visualizar determinada forma de onda na tela do osciloscópio, a frequência da forma de onda deve ser maior que a do dente de serra. Na prática, para isso, ajustamos a frequência do dente de serra (base de tempo) até aparecer na tela mais de um ciclo da forma de onda.

1.4 Osciloscópio padrão

Vamos conhecer outras particularidades do osciloscópio analógico padrão. Esse equipamento apresenta, na maioria das vezes, um painel frontal semelhante ao da figura 1.11 (osciloscópio de dois canais); a posição dos botões no painel de controle pode ser diferente, dependendo do fabricante. Antes de tudo, é preciso saber identificar as funções dos botões no painel de controle frontal e como se estabiliza a imagem da forma de onda na tela.

Figura 1.11

Tela frontal do osciloscópio analógico padrão.



Os principais controles do osciloscópio são:

Chave Liga – Liga/desliga o osciloscópio e possibilita o ajuste de intensidade de brilho.

Chave AC/GND/DC – Na posição AC, insere internamente um capacitor, impedindo a passagem de tensões contínuas; deve ser usada para medir a ondulação (*ripple*) de uma tensão. Na posição GND, aterriza o amplificador vertical, estabelecendo o zero de referência. Na posição DC, deixa passar o sinal e a componente contínua deve ser utilizada quando se deseja observar um sinal de valor médio. A figura 1.12 mostra as três condições.

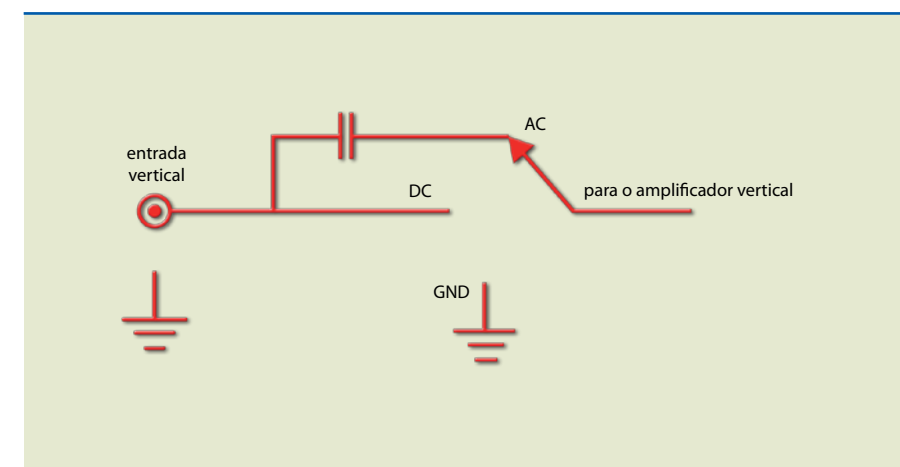


Figura 1.12

Chave seletora de entrada.

Volts/div – Permite alterar a sensibilidade na vertical, associando cada divisão na vertical a um valor em volts. Por exemplo, 1 V/div significa que, se o sinal ocupar uma divisão, é porque a tensão aplicada entre as placas verticais é 1 V.

Controle de posição vertical (Y pos) – Desloca o traço na vertical.

Controle de posição horizontal (X pos) – Desloca o feixe horizontalmente.

Time/div – Varredura ou base de tempo. Gradua, em segundos, cada divisão da tela na horizontal. Essencialmente, muda a frequência do dente de serra. Por exemplo, o valor 1 ms/div significa que, se um ciclo do sinal ocupar uma divisão na horizontal, seu período será de 1 ms.

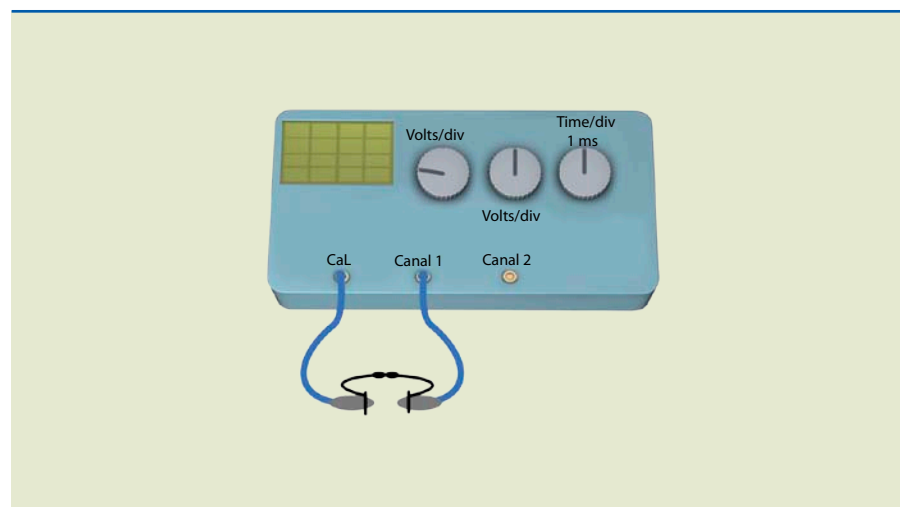
Chave INT/EXT/REDE – Na posição INT, permite a utilização do sincronismo interno. Na posição EXT, dá acesso à entrada de sincronismo externo. Na posição REDE, sincroniza a varredura com a rede elétrica.

Chave +/- – Permite selecionar a polaridade de sincronismo da forma de onda na tela.

Nível de sincronismo (SINCR) – Permite o ajuste de sincronismo, ou seja, dá estabilidade para a forma de onda, mantendo a onda parada na tela.



Figura 1.13
Saída calibrada, ligada ao canal 1.



Na figura 1.13, a saída calibrada está ligada ao canal 1 por pontas de prova, pelas quais o osciloscópio recebe a informação do meio exterior (o sinal). As pontas podem ser atenuadas ou não. Ponta atenuada significa que um sinal de $10 V_{pp}$ é dividido por 10 e, portanto, efetivamente o osciloscópio recebe $1 V_{pp}$. Então, ao ler esse valor na tela do osciloscópio, é necessário multiplicá-lo por 10. Na ponta de prova sem atenuação, o valor que aparece na tela é igual ao valor medido.

As pontas de prova com atenuação possuem uma chave que pode estar na posição x1 ou x10. Além disso, existe outro ajuste na ponta de prova, que é o capacitor de compensação, explicado a seguir.

É muito comum o uso apenas do múltiplo da unidade nos casos em que ela está claramente subentendida (nesse caso, o ohm). A intenção do emprego neste livro é proporcionar ao leitor uma visão ampla do que se encontra na prática.

De maneira geral, o circuito da figura 1.14a representa a ponta de prova com a impedância de entrada (R_2) do osciloscópio (que normalmente é $1 M - M\Omega$) e a resistência de atenuação (R_1 , que vale $9 M$ se a impedância de entrada for $1 M$). C_2 representa a capacitância parasitária, que é decorrente da fiação.

Na figura 1.14b observa-se o circuito com compensação. Sem nenhuma compensação, a forma de uma onda quadrada apresenta uma distorção que pode ocorrer por sobretensão (*overshoot*) ou subtensão (*undershoot*). A compensação é feita por um capacitor variável colocado na ponta de prova para que resulte em uma forma de onda perfeitamente quadrada. A figura 1.14c representa as formas de onda.

Para que a compensação resulte em uma forma de onda quadrada perfeita na tela do osciloscópio, a relação entre os componentes da figura 1.14b é dada por:

$$C_1 = \frac{R_2}{R_1} \cdot C_2 \quad (1.1)$$

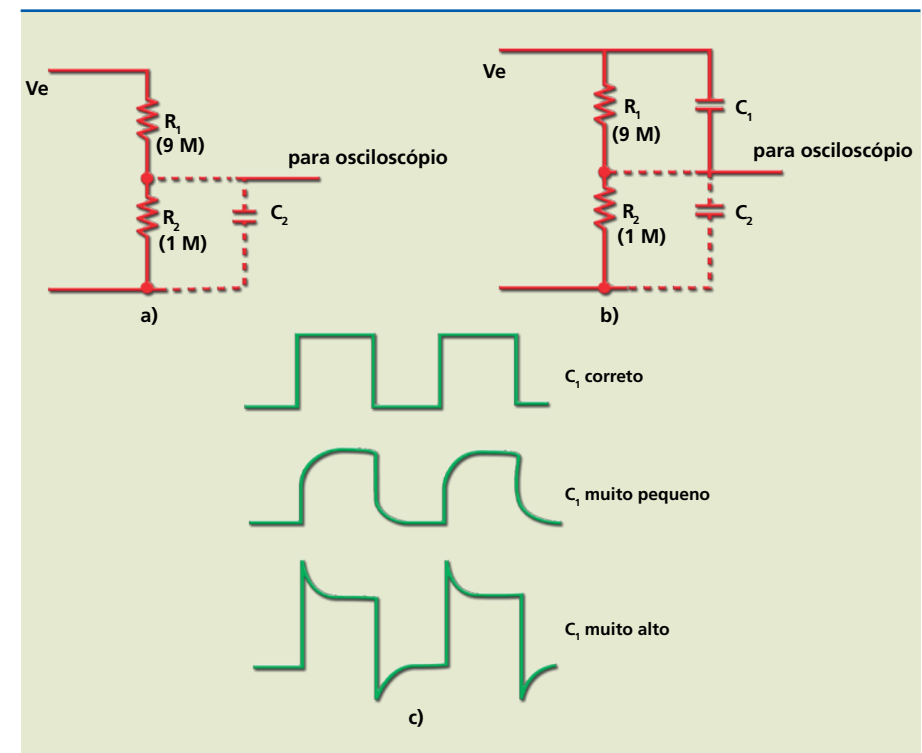


Figura 1.14
Circuito de entrada do osciloscópio: (a) sem capacitor de compensação, (b) com capacitor de compensação e (c) formas de onda com compensação e sem compensação. Os valores das resistências estão em megaohm.

A figura 1.15 mostra o aspecto de uma ponta de prova.



Figura 1.15
Ponta de prova.

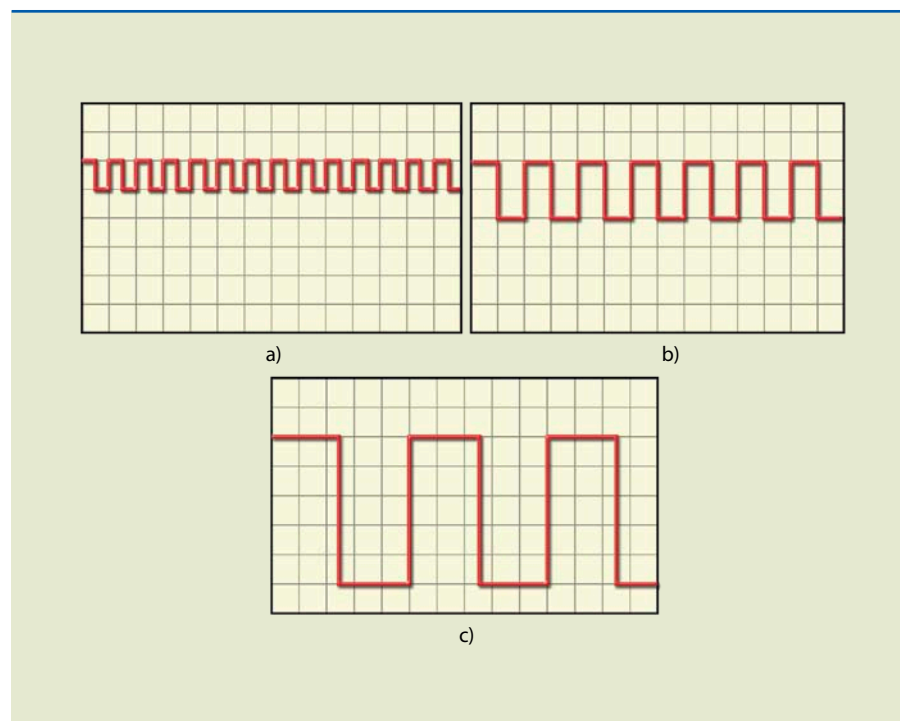
Entradas verticais – Conectores que permitem entrar com um sinal no amplificador vertical antes de ser aplicado nas PDV. No caso de osciloscópio duplo canal, são duas entradas. Por exemplo, ligando o sinal calibrado ($1 V_{pp}/1 kHz$) ao canal 1 e ajustando Volts/div = $1 V/div$ e Time/div = $1 ms/div$, aparecerá na tela do osciloscópio a forma de onda da figura 1.16a. Caso os ajustes sejam Volts/div = $0,5 V/div$ e Time/div = $0,5 ms/div$, a mesma onda quadrada aparecerá como na



figura 1.16b. Na figura 1.16c, os ajustes considerados foram Volts/div = 0,2 V/div e Time/div = 0,2 ms/div.

Figura 1.16

Sinal quadrado de 1 V_{pp} / 1 kHz:
 (a) 1 V/div e 1 ms/div,
 (b) 0,5 V/div e 0,5 ms/div e
 (c) 0,2 V/div e 0,2 ms/div.



Qual das três imagens é mais adequada para visualização? Com certeza a da tela representada na figura 1.16c, pois apresenta mais precisão. Portanto, as escolhas do ganho vertical e da base de tempo são dois fatores importantes para boa visualização da imagem.

1.5 Medição de tensão contínua

Uma tensão contínua aparece na tela do osciloscópio como uma linha contínua. Para medir seu valor, conta-se na tela o número de divisões, a partir da referência zero, e multiplica-se esse número por volts/divisão:

$$\text{medida} = n^{\circ} \text{ de divisões} \cdot \frac{\text{volts}}{\text{divisão}}$$

Para realizar a medição, deve-se obter a linha contínua ajustando a base de tempo em 1 ms/div, manter a entrada em GND e deslocar o traço para uma posição adequada – na primeira linha, por exemplo.

Escolha um ganho vertical compatível com o valor a ser medido. Em geral, a tela tem oito divisões. Portanto, a máxima tensão que pode ser medida se o ganho vertical for 1 V/div será 8 V; qualquer valor acima de 8 V fará com que o traço saia da tela (levando em conta que o zero está na primeira linha). Evite utilizar um valor muito pequeno, pois fica difícil ler o número de divisões.

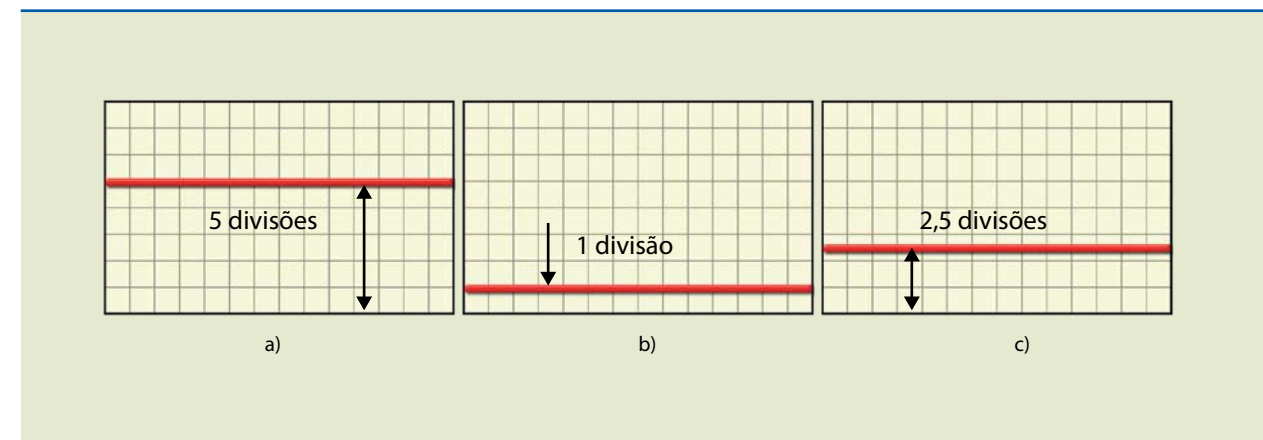


Figura 1.17

Medindo 5 V:
 (a) 5 V/div,
 (b) 1 V/div e
 (c) 2,5 V/div.

De acordo com a figura 1.17, para obter a máxima precisão, deve-se escolher o menor V/div possível que permita o surgimento do traço na tela (figura 1.17a).

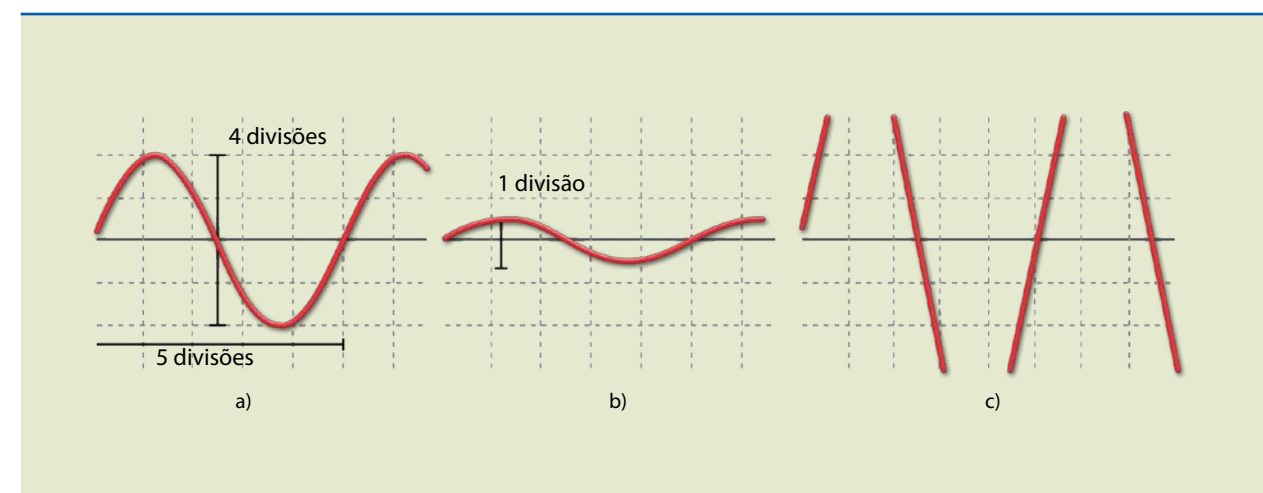
1.6 Medição de tensão alternada

A tensão alternada apresenta duas variáveis básicas que podem ser mensuradas: a tensão de pico a pico e o período.

O procedimento para medir a tensão alternada é semelhante ao utilizado para medir a tensão contínua, ou seja, escolher adequadamente o ganho vertical (V/div) e a base de tempo (ms/div). A figura 1.18 mostra uma tensão senoidal de 10 V_p (20 V_{pp}) e frequência de 1 kHz para diferentes ajustes do ganho vertical. Em todos os casos a base de tempo está fixada em 0,2 ms/div e o ganho vertical varia em 5 V/div (figura 1.18a), 20 V/div (figura 1.18b) e 2 V/div (figura 1.18c). Claramente o melhor ajuste do ganho vertical é o primeiro, em que o sinal ocupa a maior parte da tela sem perder informação.

Figura 1.18

Três representações medindo uma tensão senoidal de 20 V_{pp}/1 kHz com ganho vertical ajustado em: (a) 5 V/div, (b) 20 V/div e (c) 2 V/div.



Para a medida do período, ou seja, o inverso da frequência, a escolha da base de tempo é fundamental. Na figura 1.19, em todos os casos o ganho vertical está fixado em 5 V/div e a base de tempo varia em 0,2 ms/div, 2 ms/div e 50 μs/div.



Observe que a figura 1.19a permite melhor visualização para efetuar medidas de tempo e tensão.

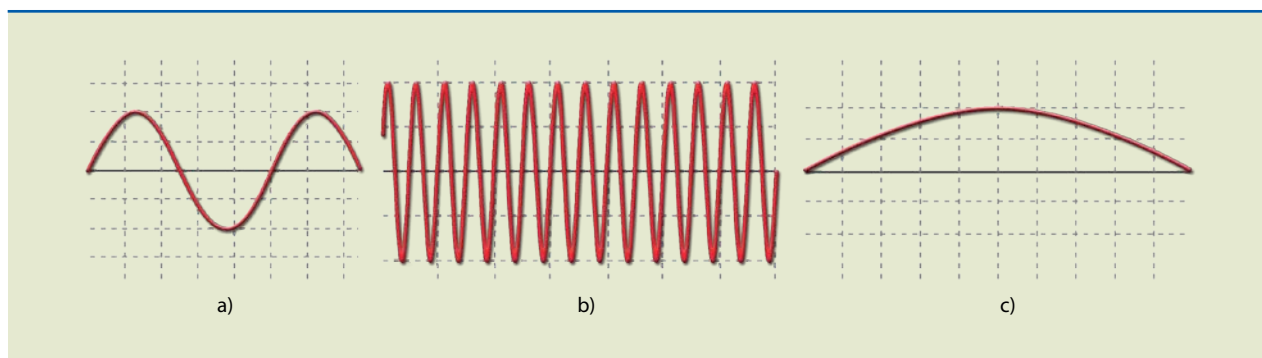


Figura 1.19

Três representações medindo período de senoide de 1 kHz com ganho horizontal ajustado em: (a) 0,2 ms/div, (b) 2 ms/div e (c) 50 μs/div.

1.7 Gerador de funções

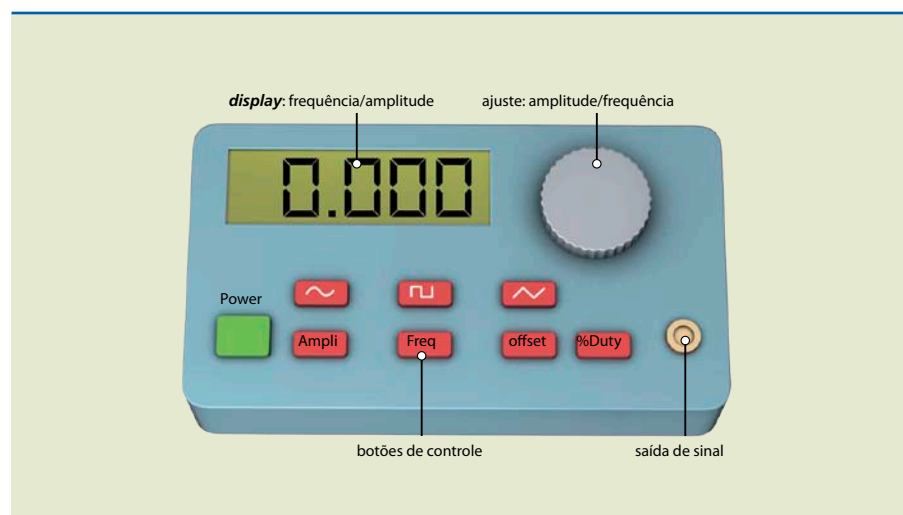
É um instrumento utilizado para gerar sinais elétricos de diversas formas de onda (senoidal, quadrada, triangular) de diferentes frequências (normalmente, de 1 Hz a 10 MHz) e amplitudes variadas.

As ondas quadradas e triangulares permitem adicionar um ciclo de trabalho e também uma tensão CC (*offset*).

Em geral o painel do gerador de funções tem um frequencímetro digital (figura 1.20), que permite visualizar o valor da frequência que está sendo ajustada. O sinal sai do gerador de funções através de um cabo com conector BNC igual ao usado no osciloscópio.

Figura 1.20

Aspecto geral de um gerador de funções.



1.7.1 Ciclo de trabalho

O ciclo de trabalho ou *duty cycle* (DC) é definido apenas para as ondas quadrada e triangular.

No caso de onda quadrada, é definido como:

$$DC\% = \frac{T_H}{T} \cdot 100 \quad (1.2)$$

em que T_H é a duração do tempo alto e T o período.

A figura 1.21 mostra exemplos de valores de ciclo de trabalho de uma onda quadrada.

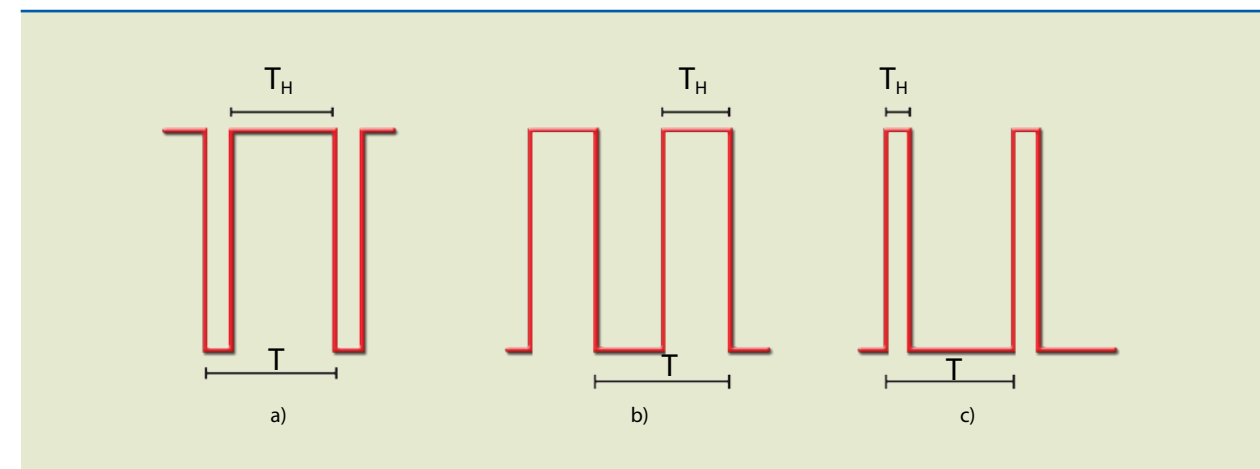


Figura 1.21

Ciclo de trabalho de uma onda quadrada em: (a) 80%, (b) 50% e (c) 20%.

Para a onda triangular, o ciclo de trabalho é definido como:

$$DC\% = \frac{T_+}{T} \cdot 100 \quad (1.3)$$

em que T_+ é o tempo que a onda fica com inclinação positiva e T o período da onda triangular.

A figura 1.22 apresenta exemplos de valores de ciclo de trabalho de uma onda triangular.

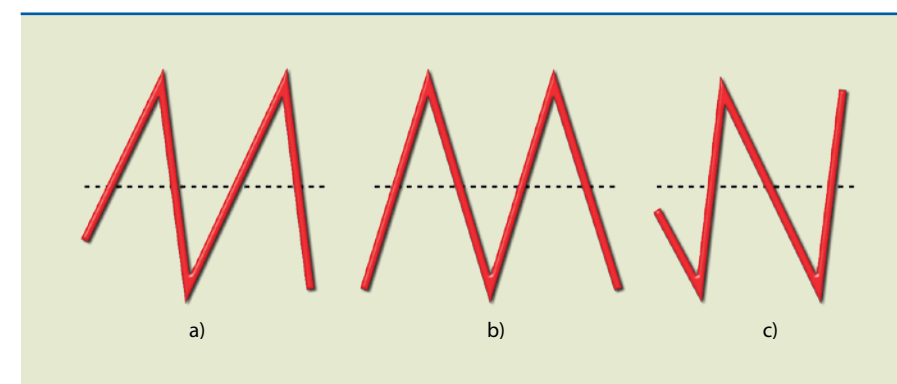


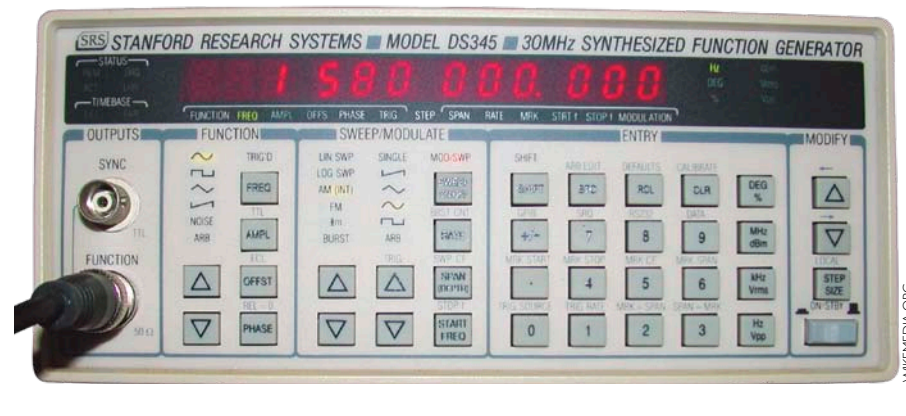
Figura 1.22

Ciclo de trabalho de uma onda triangular em: (a) 80%, (b) 50% e (c) 20%.



O painel frontal de um gerador de funções se assemelha ao da figura 1.23.

Figura 1.23
Gerador de funções comercial.

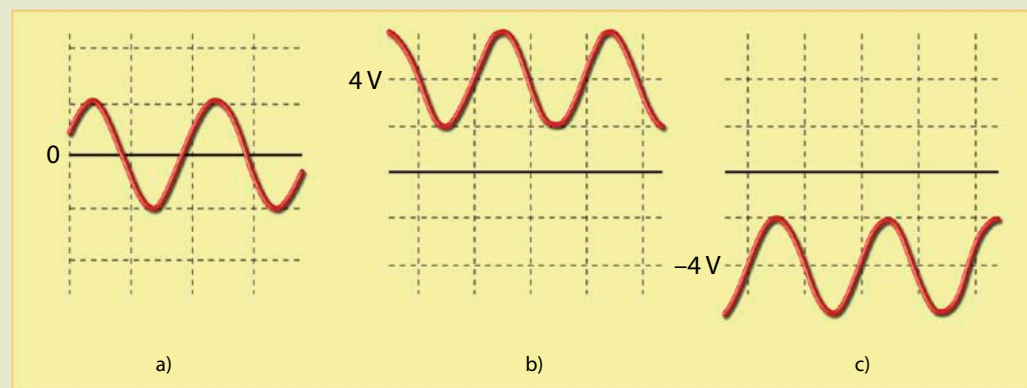


1.8 Offset de tensão

Figura 1.24

Onda senoidal
(a) sem *offset*,
(b) com 4V de *offset* e
(c) com -4V de *offset*.

Se a uma tensão alternada for adicionada uma tensão CC, ela passa a ter um *offset* (deslocamento), que pode ser positivo ou negativo. A figura 1.24 mostra as três situações possíveis: sinal sem *offset* (0 V), com *offset* positivo (4 V) e com *offset* negativo (-4 V).



1.9 Multímetro

O multímetro é um dos instrumentos mais usados em eletrônica, podendo ser digital ou analógico. A figura 1.25a mostra o painel frontal de um multímetro analógico e a figura 1.25b, o de um multímetro digital.

O multímetro analógico tem um ponteiro que se desloca sobre um painel com escalas graduadas que permitem a leitura do valor mensurado. No multímetro digital a leitura do valor medido aparece em um *display* digital.

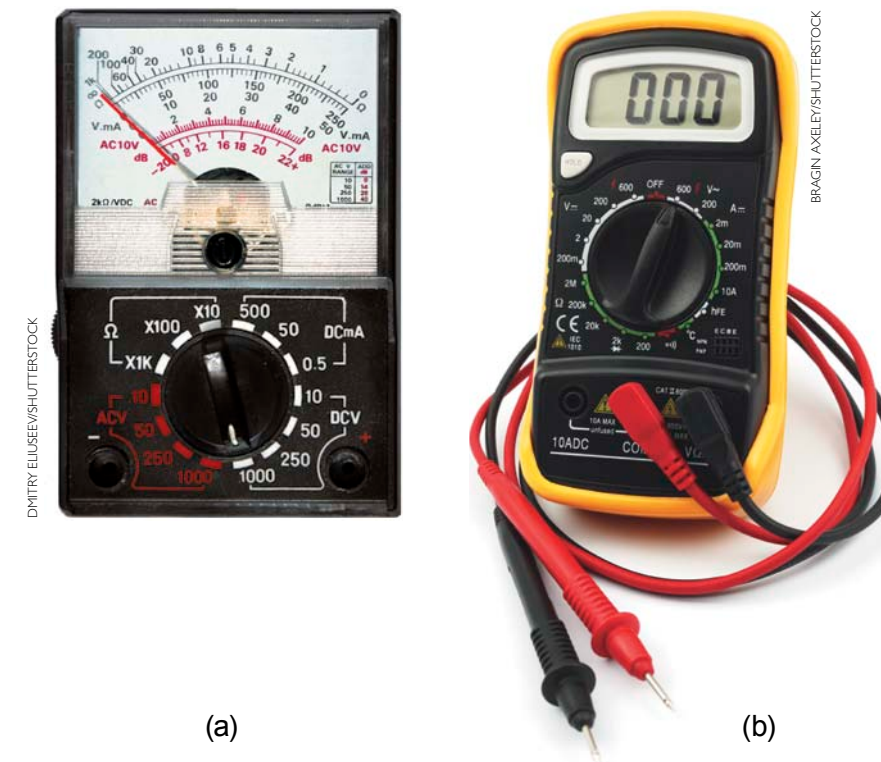


Figura 1.25
(a) Multímetro analógico e (b) multímetro digital.

Em geral, os multímetros analógicos são usados para medir as três principais grandezas – tensão, corrente e resistência elétrica –, assim como para efetuar testes em transistores. Nos primórdios da indústria eletrônica, os multímetros analógicos eram amplamente utilizados, pois o preço dos digitais era elevado. Atualmente os digitais são mais robustos e baratos que os analógicos.

Os multímetros digitais permitem realizar as mesmas medidas dos analógicos e também: capacitância, indutância, frequência, temperatura, entre outras. Os multímetros digitais apresentam impedância de entrada da ordem de 10 M Ω , bem maior que a maioria dos analógicos (a impedância depende da escala usada).

1.9.1 Instrumentos True RMS

Os instrumentos digitais possuem outro recurso que os analógicos não têm: a possibilidade de medida do valor eficaz de tensões não senoidais. Os instrumentos **Não True RMS** medem apenas o valor eficaz de uma tensão alternada puramente senoidal (sem distorção); se o sinal apresentar distorção, a medida será incorreta. Um instrumento **True RMS** mede o valor eficaz de qualquer forma de onda. A tabela 1.1 mostra uma comparação entre as leituras realizadas por esses instrumentos. Observe que existem dois tipos de instrumentos True RMS, um com acoplamento CA e o outro com acoplamento CA + CC (quando a tensão CA tem nível CC).



Sinal de entrada		True RMS		Não True RMS
		Acoplamento CA + CC	Acoplamento CA	
Senoide pura		verdadeiro	verdadeiro	verdadeiro
Retificada completa		verdadeiro	56,5% abaixo	57,9% abaixo
Retificada meia onda		verdadeiro	22,9% abaixo	22,2% abaixo
Quadrada		verdadeiro	verdadeiro	11,0% abaixo
Triangular		verdadeiro	verdadeiro	4,0% abaixo

Tabela 1.1

Comparação entre instrumentos Não True RMS e True RMS.

Como se vê na tabela 1.1, apenas para uma senoide pura as leituras são coincidentes. Nos outros casos, há uma diferença quando o instrumento usado é Não True RMS.

Semicondutores

Capítulo 2

