

Apêndice 5.1

Tópicos importantes sobre osciloscópios convencionais (analógicos com tubo de raios catódicos)

1. Introdução

Este apêndice deve ser usado em conjunto com o roteiro da aula 05. São fornecidas aqui informações adicionais sobre osciloscópios convencionais (analógicos com tubo de raios catódicos), que ainda são muito utilizados, inclusive no laboratório onde as aulas de Eletricidade Básica são realizadas.

Conforme citado roteiro da experiência, o monitor de um osciloscópio, é normalmente, um retângulo de 10cmx8cm, subdividido em quadrículos que permitem a leitura dos sinais visualizados. No modo X-Y os eixos vertical e horizontal representam só tensões, enquanto que no modo Y-t a direção vertical representa tensões e a direção horizontal representa o tempo. As escalas de tensão e tempo são variáveis e controladas pelos seletores de amplificação e base de tempo, mostrados na Fig. 1.

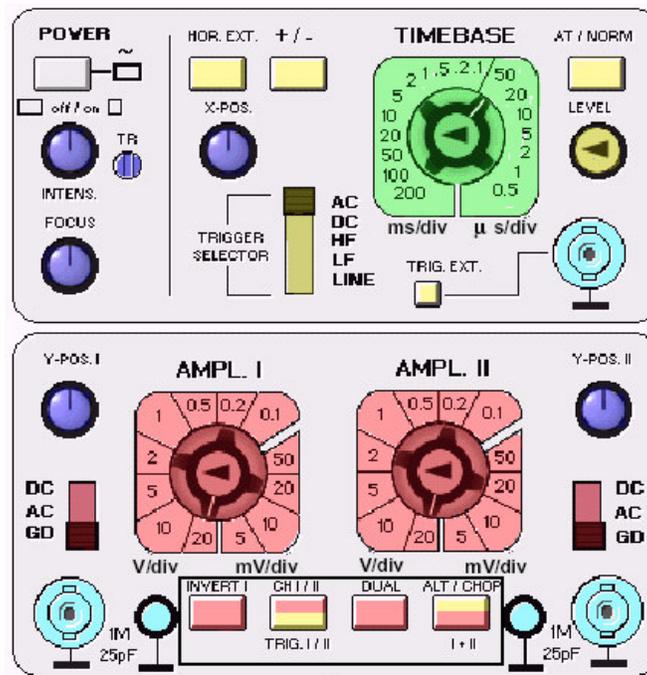


Fig. 1 – Detalhe dos Controles do Osciloscópio.

A relação entre o desvio espacial, X, e a correspondente tensão, V, é dada por:

$$V = S \cdot X$$

onde S representa a sensibilidade em Volt/divisão ou, seja, a escala.

O osciloscópio é basicamente constituído por duas partes:

- Tubo de raios catódicos com tela fosforescente.
- Circuitos eletrônicos de controle.

2. Tubo de Raios Catódicos com Tela Fosforescente

O tubo de raios catódicos é o elemento essencial do osciloscópio. Este consiste numa ampola de vidro fechada no interior da qual se encontram, sob vácuo (cerca de 10^{-3} mbar), os seguintes componentes:

- Canhão eletrônico
- Sistema de desvio magnético ou eletrostático
- Anteparo fosforescente em sulfureto de zinco.

A Fig. 2 mostra o diagrama simplificado do tubo de raios catódicos.

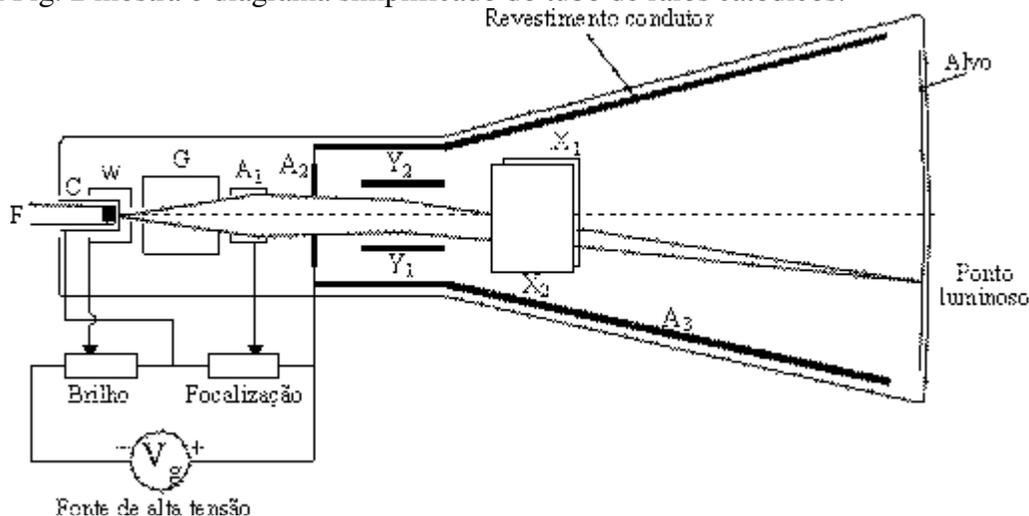


Fig. 2 – Diagrama simplificado do tubo de raios catódicos.

2.1 - Canhão Eletrônico

O canhão eletrônico é o dispositivo que produz e controla o feixe de elétrons que, mostrado na Fig. 3, pode ser subdividido em três partes principais:

a) - *Cátodo emissor de elétrons*

Este é constituído pelo filamento F que quando aquecido, pela passagem de corrente elétrica, promove a emissão de elétrons do cátodo C por efeito termiônico. Os raios catódicos são obtidos em vasos fechados a pressões inferiores a cerca de 10^{-3} mbar, encerrando dois eletrodos, aos quais se aplica um potencial suficientemente elevado. Estes raios são formados por elétrons e, por isso, podem ser manipulados por intermédio de

campos elétricos e magnéticos. Os elétrons, por terem uma pequena massa ($9,11 \times 10^{-31}$ kg), são muito sensíveis a pequenas ddp, justificando assim o seu uso na construção de osciloscópios.

A eficiência de produção de elétrons pode ser substancialmente aumentada quando é aplicado o fenômeno da emissão termiônica ao cátodo. Sabe-se que os metais incandescentes emitem espontaneamente elétrons, mesmos na ausência de um campo elétrico, os quais formam uma nuvem eletrônica em torno do corpo incandescente. Assim, quando se aquece o cátodo forma-se em torno deste uma nuvem eletrônica. Se ao cátodo for aplicada uma diferença de potencial, relativamente ao ânodo, o campo elétrico resultante arrastará os elétrons no sentido do ânodo, formando-se assim um feixe eletrônico (ou feixe de raios catódicos).

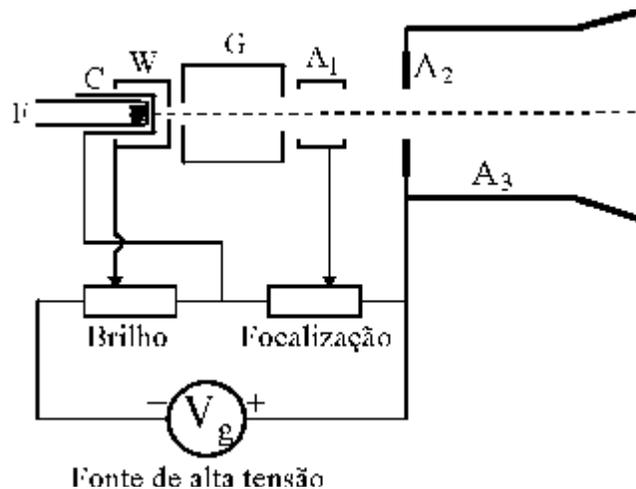


Fig. 3 – Diagrama do canhão de elétrons.

b) Grelha de Comando (cilindro de Wehnelt):

A grelha W quando é polarizada negativamente em relação ao eletrodo A2 (ânodo) forma e acelera o feixe de elétrons. A intensidade do feixe, brilho, é controlada através da ddp entre a grelha e o ânodo: quanto maior for a ddp maior é o número de elétrons no feixe, ou seja, mais brilhante é o feixe.

c) Sistema de aceleração e focagem:

Constituído pelos eletrodos G e A1, posicionados entre a grelha W e o ânodo, limitam a seção do feixe, ou seja, a focagem, por um ou mais diafragmas e imprimem-lhe ainda uma certa aceleração. O eletrodo G permite eliminar a interação entre os comandos de brilho e de focagem.

2.2 - Sistema de Deflexão

Como mostra a Fig. 2, o sistema de deflexão é constituído pelos eletrodos X1 e X2, dispostos segundo a horizontal, e pelos eletrodos Y1 e Y2, dispostos segundo a vertical. Se

os eletrodos estiverem todos ao mesmo potencial, o feixe de elétrons atravessa a região do espaço compreendida entre os dois pares de eletrodos e incide no centro do alvo fosforescente, onde se verá uma mancha luminosa. Quando se aplica uma ddp aos eletrodos, o feixe eletrônico é defletido. Como resultado, a mancha luminosa apresenta um deslocamento da sua posição sobre o alvo diretamente proporcional à ddp entre os dois pares de eletrodos:

$$\begin{aligned}x &= K_x V_x \\ y &= K_y V_y\end{aligned}$$

V_x e V_y são as ddp's aplicadas às placas. K_x e K_y são constantes de proporcionalidade que dependem da montagem. Se o osciloscópio for usado para observar a variação de uma ddp em função do tempo, esta tensão será aplicada às placas horizontais Y1Y2, provocando o deslocamento vertical do feixe. O deslocamento vertical será proporcional à ddp V_y aplicada. Às placas verticais X1X2, aplica-se uma ddp V_x , fornecida por um circuito eletrônico designado por BASE DE TEMPO.

A ddp aplicada pelo circuito da base de tempo atuará sobre o feixe deslocando-o na horizontal, da esquerda para a direita, com uma velocidade constante designada por velocidade de varrimento. Na tela obter-se-á a imagem da função $y(x)=V_y(t)$. Neste modo de funcionamento diz-se que osciloscópio funciona em MODO Y-T. Se em vez de aplicarmos a tensão de varrimento às placas verticais, aplicarmos uma outra ddp V_y , obteremos na tela a imagem da função $V_y=V_y(V_x)$. Neste último caso diz-se que o osciloscópio funciona no modo X-Y.

2.3 - Anteparo fosforescente

O anteparo fosforescente converte a energia do feixe de elétrons em luz visível, permitindo assim a observação do ponto de incidência do feixe no alvo. Além da emissão de luz, o alvo emite também elétrons secundários que são atraídos pelo revestimento condutor do tubo, fechando assim o circuito elétrico. Os elétrons secundários ao acumularem-se sobre a superfície da tela dão origem ao fenômeno bem conhecido de eletricidade estática.

A eficiência da luminosidade do alvo depende essencialmente de três fatores: a concentração do dopante fosforescente do alvo, da energia cinética e da intensidade do feixe eletrônico. A concentração de dopante é estabelecida pelo fabricante do aparelho. A energia do feixe de elétrons depende da geometria e potenciais do canhão eletrônico e do dispositivo de pós-aceleração. A intensidade do feixe pode ser ajustada através do comando de brilho que permite controlar o número de elétrons emitidos pelo cátodo.

A persistência da fosforescência do alvo é muito pequena de modo a ser possível observar sinais muito rápidos. Mas como nem o olho nem o cérebro humano têm capacidade de analisar acontecimentos tão rápidos, a visualização dos traços na tela é conseguida através de passagens sucessivas do feixe eletrônico pelos mesmos pontos, cujo sincronismo é controlado pelo circuito da base de tempo. A sobreposição sucessiva do varrimento do feixe eletrônico sobre o alvo fosforescente origina um traço estável no monitor, como mostra a Fig. 4.

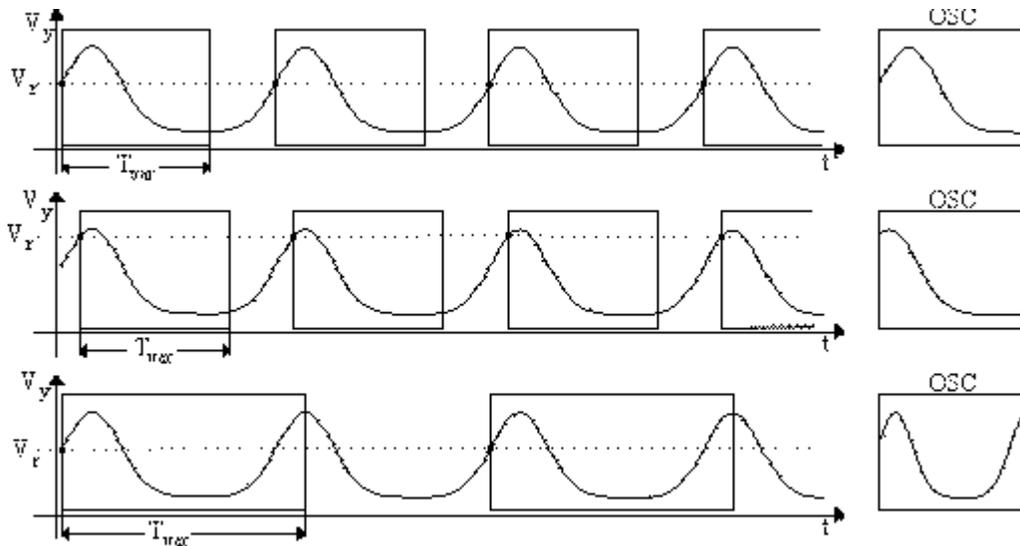


Fig. 4 – Persistência do sinal na tela do osciloscópio.

3 - CIRCUITOS ELETRÔNICOS

O osciloscópio é um aparelho que mede diferenças de potencial, devendo portanto ter uma resistência interna elevada, tal como é exigido a qualquer voltímetro. Na maioria dos osciloscópios essa resistência é de 1 Mohm, podendo ser aumentada para 10 Mohm com o auxílio de uma ponta de prova.

O esquema de blocos representado na Fig. 5 apresenta os componentes eletrônicos principais de um osciloscópio onde se destacam:

- Circuito de entrada;
- Seletor de ganho do módulo de amplificação;
- Seletor de modo de entrada;
- Seletor de modo de funcionamento;
- Seletor da fonte do trigger;
- Filtro;
- Circuito da base de tempo: base de tempo;

3.1 - Circuito de Entrada

Os sinais são aplicados ao osciloscópio através das entradas Y e TRIGGER EXT que apresentam uma resistência interna de entrada de 1 Mohm. Normalmente, os osciloscópios dispõem de duas entradas, mas também se encontram aparelhos com quatro entradas. Junto de cada entrada Y encontra-se o seletor do tipo de acoplamento ao módulo de amplificação com o qual se seleciona a escala do monitor. A Fig. 6 apresenta o esquema do circuito de entrada onde se pode ver o seletor de comutação entre os vários tipos de acoplamento. O comutador permite selecionar o tipo de acoplamento: AC, DC, ou GND. O amplificador de ganho variável controla a escala de monitorização dos sinais.

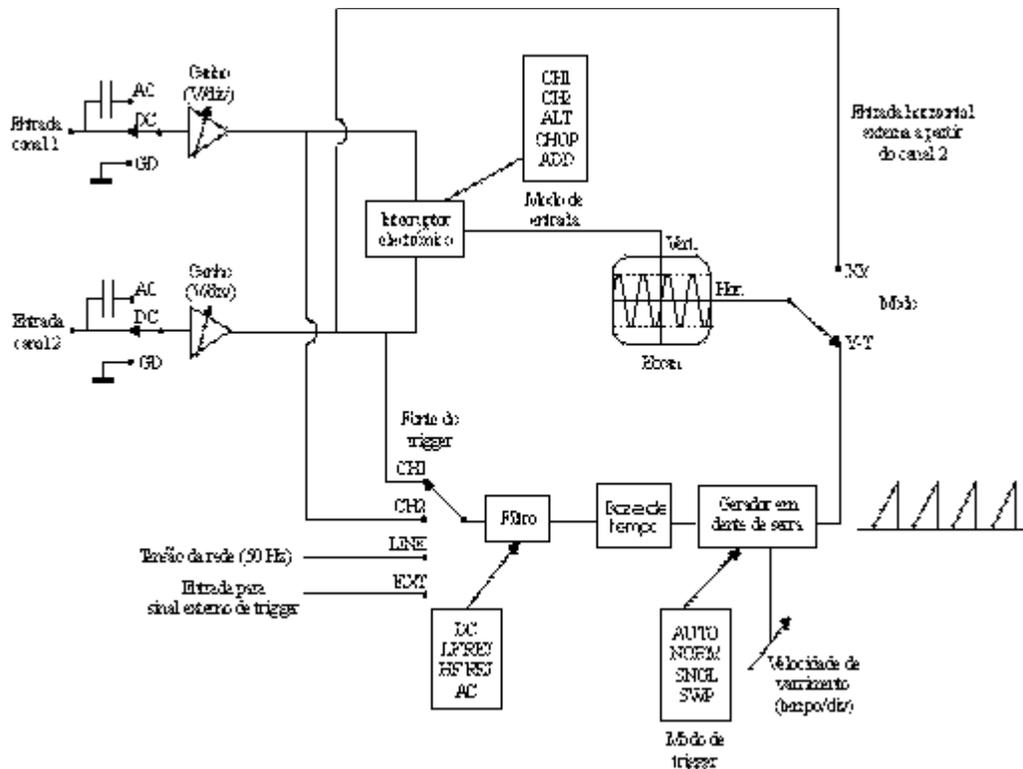


Fig. 5 – Diagrama de blocos dos circuitos eletrônicos do osciloscópio.

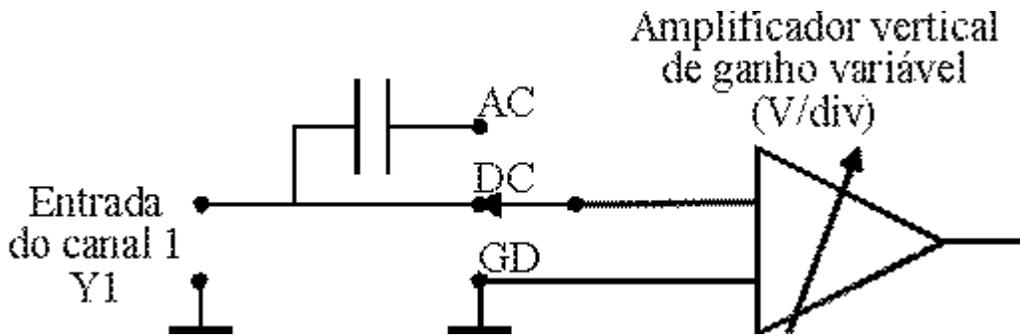


Fig. 6 - Esquema do circuito de entrada.

O acoplamento pode ser :

- DC (acoplamento contínuo) – O sinal na entrada é aplicado diretamente ao circuito de amplificação.
- AC (acoplamento filtrado) - Só a componente variável no tempo do sinal é aplicada ao amplificador, a componente contínua é filtrada pelo capacitor C.
- GND - O sinal presente na entrada é curto-circuitado com a massa. Esta posição do comutador é usada sempre que se pretende ajustar o nível de tensão zero, também designado por linha de base.

A Fig. 7 apresenta a visualização de um sinal V_y nos modos AC, DC e GND, respectivamente.

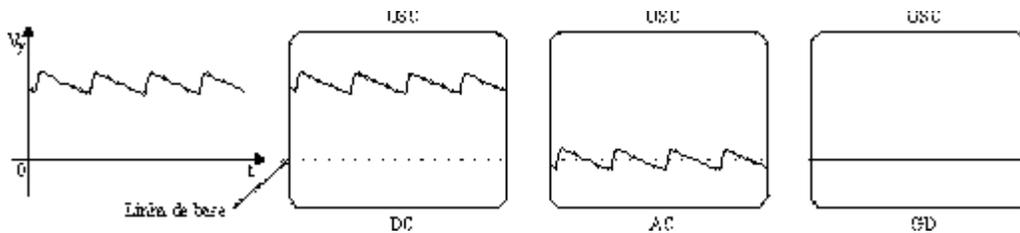


Fig. 7 – Sinal V_y nos modos AC, DC e GND.

3.2 - Ganho do Módulo de Amplificação

Junto de cada entrada encontra-se também o regulador de ganho do amplificador vertical que regula a escala de tensões na tela. Habitualmente as escalas de tensão variam entre 5 mV/div a 20 V/div, podendo ser selecionada de acordo com a amplitude do sinal em observação. Como o número total de divisões na tela do osciloscópio é igual a 8, é possível observar ddp até um máximo de 160 V, pico a pico. No entanto, quando necessário, é possível a medição de ddp de amplitudes maiores, bastando para tal atenuar o sinal por um fator conhecido. As pontas de prova permitem, geralmente, atenuações do sinal por um fator de 10, 100 ou 1000, o que nos permite medir ddps bastante elevadas.

Na escala de 5 mV/div. a ddp é aplicada diretamente à entrada de um amplificador de ganho 1400. Em todas as outras escalas o sinal é primeiramente atenuado por um ou vários circuitos de atenuação de modo que à entrada do amplificador a amplitude do sinal apresente uma amplitude menor ou igual a 5 mV/div. Os atenuadores utilizados são divisores de tensão resistivos. Como se pode ver na Fig. 8, nas escalas 50 mV/div, 0,5 V/div. e 5 V/div. a ligação é efetuada através dos atenuadores A1, A2 e A3. Uma atenuação suplementar, por um fator de 2 ou 4, pode ser obtida com a inserção dos atenuadores B1 e B2. A aplicação simultânea dos atenuadores A e B permite obter atenuações que variam entre 1/2 e 1/4000, a que correspondem 12 escalas entre 5 mV/div. e 20 V/div. A utilização de atenuadores é um expediente que permite medir uma larga gama de tensões apenas com um único amplificador.

Para medir uma ddp basta multiplicar o número de divisões que o sinal abrange na escala vertical, relativamente à linha de base, pelo valor do ganho selecionado. Por exemplo, se um sinal apresenta uma amplitude de 5 divisões na tela e a escala utilizada é 0,1 V/div., a amplitude do sinal em volts vale:

$$(5 \text{ div}) \times (0,1\text{V/div}) = 0,5\text{V}.$$

3.3 - Seleção do modo de entrada

Este comutador (ou conjunto), mostrado na Fig. 01, já mostrada no início deste apêndice, permite selecionar o modo de amostragem dos vários canais de entrada do osciloscópio:

- CH1 - mostra apenas o canal 1
- CH2 - mostra apenas o canal 2
- ALT - mostra alternadamente varrimentos completos de cada um dos canais. Para que a alternância não seja perceptível o varrimento deve apresentar um período

inferior a $1/n$ da persistência da retina do olho humano, onde n é o número de canais amostrados. Para dois canais, por exemplo, um período de 50 Hz é suficiente.

- CHOP - a apresentação dos dois canais é efetuada num único varrimento completo do feixe de elétrons por partilha de tempo. A comutação efetua-se a elevada frequência (100 kHz) de forma a garantir que a distância entre traços consecutivos seja inferior ao diâmetro da mancha luminosa. Deste modo a seqüência de pequenos traços é percebida como uma linha contínua. No entanto, se a frequência de varrimento for superior a 1 kHz, pode observar-se um traço descontínuo.
- ADD - os sinais presentes nos canais 1 e 2 são somados e mostrados.

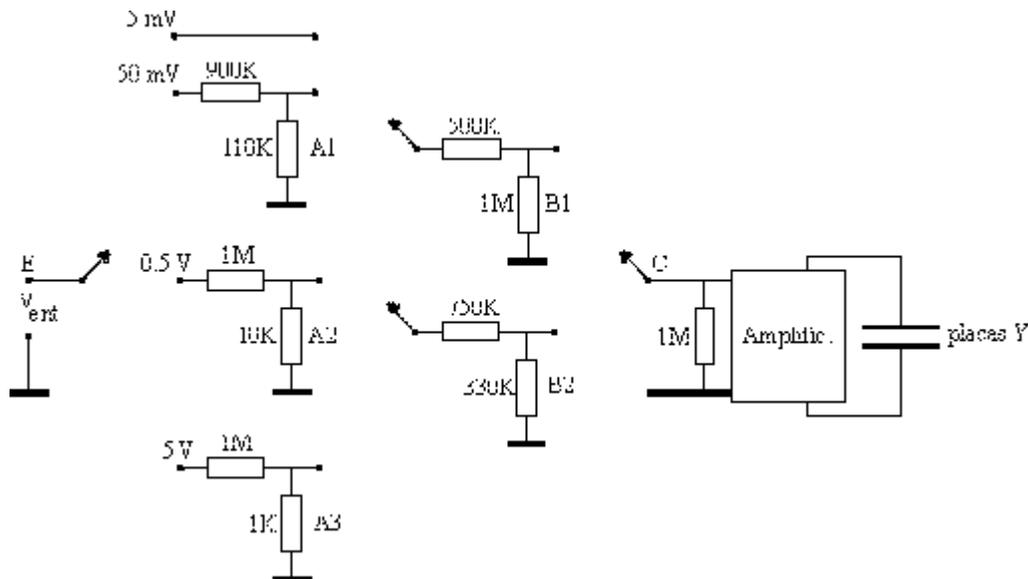


Fig. 8 – Representação dos atenuadores.

3.4 - Seleção do Modo de Funcionamento

Existe um comutador que permite selecionar o sinal que é aplicado às placas verticais do tubo de raios catódicos: o sinal do tipo de dente de serra da base de tempo (explicado na próxima seção), ou o sinal presente na entrada 2 (CH2).

a) MODO X-T

Neste modo de funcionamento observamos no monitor os sinais presentes nas entradas CH1 e/ou CH2 em função do tempo. Este efeito é conseguido aplicando uma onda do tipo dente de serra às placas verticais do tubo de raios catódicos. Deste modo o feixe de elétrons movimenta-se da esquerda para a direita do monitor com um velocidade constante, monitorando "instantaneamente" a tensão aplicada às placas verticais. A escala temporal do monitor é determinada pelo declive da onda em dente de serra que pode ser ajustado pelo seletor da BASE DE TEMPO do painel de comandos do osciloscópio. Tipicamente encontram-se osciloscópios com escalas temporais que variam entre cerca de $0,5 \mu\text{s}/\text{div}$ e $200\text{ms}/\text{div}$.

b) Modo X-Y

Neste modo de funcionamento observamos no monitor o sinal do canal CH1 em função do sinal do canal CH2. O circuito da base de tempo é desligado, logo o sincronismo de amostragem da figura monitorizada depende do tipo de sinais usados. Se os sinais amostrados forem periódicos o traço resultante descreve uma figura fechada, em geral complexa e instável. No caso particular de sinais sinusoidais em que a razão entre as frequências é um inteiro ou uma fração racional formam-se as conhecidas figuras de Lissajous. Estas figuras apresentam uma forma característica que depende da razão entre as frequências e da diferença de fase inicial das duas ondas. Esta característica pode ser usada para efetuar medidas de frequência de sinais com base num sinal de frequência conhecida.

3.5 – Base de Tempo

A análise de sinais desconhecidos com o osciloscópio é sempre dada em função de outra tensão de características conhecidas. Normalmente aplica-se a tensão conhecida às placas de deflexão horizontal que geralmente é uma função linear no tempo. Essa função tem a forma de um dente de serra, como se pode ver na figura que se segue, e origina um movimento horizontal do feixe eletrônico que proporciona uma base de tempo.

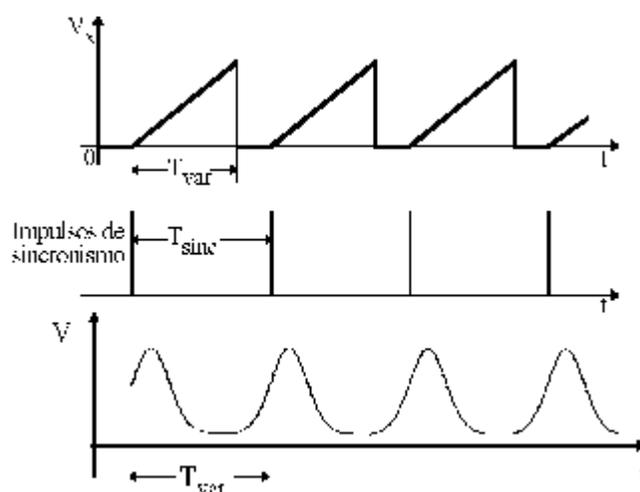


Fig. 09 - Tensão em dente de serra aplicada às placas verticais do tubo de raios catódicos e impulsos de sincronismo.

O movimento do feixe inicia-se quando o circuito de trigger aplica um impulso de sincronização à entrada do circuito da base de tempo. O feixe desloca-se da esquerda para a direita, sendo o período de varrimento, T_{var} , dado pelo tempo de subida do dente de serra. Atingido o extremo direito da tela a grelha de Wehnelt é sujeita a uma tensão mais negativa que o cátodo, impedindo os elétrons de atingirem o alvo fosforescente. Simultaneamente, a tensão de varrimento desce rapidamente a zero, desviando assim o feixe para o extremo esquerdo da tela. O varrimento seguinte inicia-se quando o circuito da base de tempo receber outro impulso de sincronismo.

O tempo de varrimento, e portanto a escala da base de tempo, é determinada pelo tempo T_{var} . Este valor pode ser ajustado através de um seletor, chamado TIME BASE, que permite a seleção de valores entre 200 ms e 0,5 μ seg, dependendo da qualidade dos aparelhos.

3.6 - Varrimento e Trigger (Disparo)

O passeio horizontal da mancha luminosa à velocidade constante, no MODO X-Y, designa-se por varrimento e inicia-se no lado esquerdo da tela e termina no lado direito.

Mas quando e como se deve iniciar o varrimento? Se o varrimento se repetir sem interrupção, só por mero acaso se obteria a sincronização das freqüências de varrimento e do sinal. Consequentemente os ciclos consecutivos de varrimento não se sobreporiam coerentemente, surgindo na tela uma imagem desordenada e incompreensível, como se pode ver no exemplo da Fig. 10.

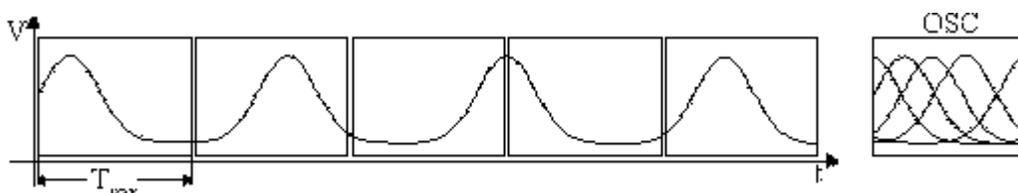


Fig. 10 – Varrimento.

O trigger designa um circuito eletrônico que produz um sinal de disparo sempre que o sinal presente na sua entrada, sinal de trigger, satisfaz certas condições. O sinal de disparo é aplicado ao circuito da BASE DE TEMPO, marcando o início de um varrimento. O sinal de trigger pode ser um dos sinais em análise ou um outro sinal externo, dependendo do modo de trigger selecionado. As condições que o sinal de trigger deve satisfazer incluem o declive e a amplitude e podem ser ajustados manualmente. Deste modo é possível selecionar um ponto preciso do sinal de trigger para iniciar o varrimento, produzindo-se na tela do osciloscópio um traço estável.

Como a freqüência dos sinais normalmente observados no osciloscópio é relativamente alta, o varrimento horizontal deve ser automático e rápido. A persistência das imagens na retina do olho humano é, em geral, muito maior que o intervalo de tempo entre duas passagens sucessivas do ponto luminoso. Por isso, não nos é possível observar o deslocamento da mancha luminosa, vendo-se apenas um traço brilhante contínuo sobre a tela. Só com freqüências de varrimento menores que 4 Hz ou 5 Hz é possível observar o movimento da mancha sobre a tela.

O trigger designa um circuito eletrônico de sincronização entre o varrimento da base de tempo e o sinal a medir. Este circuito sobrepõe as imagens consecutivas do sinal de forma para permitir uma visualização cômoda deste. O sincronismo é obtido a partir da comparação de uma tensão de referência V_r , regulável e constante (designada por nível de trigger ou trigger level) com o valor e inclinação do sinal a medir V_y . Quando o valor da tensão do sinal iguala o nível de trigger, o circuito de trigger aplica à entrada do circuito da base de tempo um impulso que assinala o início do varrimento. O circuito de sincronização produz o disparo sempre numa das fases ascendente ou descendente do sinal.

A ação da tensão de varrimento V_x cessa quando o feixe de elétrons atinge o lado direito da tela. Durante o intervalo de tempo em que a ddp V_x retorna a 0 V, a grelha G é sujeita a uma tensão mais negativa que o cátodo de forma a impedir os elétrons de atingirem o alvo, não se observando assim o traço de retorno. O varrimento subsequente inicia-se no instante seguinte em que a tensão do sinal transitar pelo nível de trigger segundo a inclinação selecionada.

Existem dois tipos de sincronização que se designam por TRIGGER AUTO e TRIGGER NORMAL:

TRIGGER AUTO - o varrimento processa-se permanentemente em intervalos regulares, mesmo quando não exista nenhum sinal nas entradas. Selecionando na base de tempo um intervalo de varrimento lento (digamos maior que 500 ms/div) é possível ver a mancha luminosa deslocar-se horizontalmente através da tela. Para varrimentos mais rápidos tem-se a percepção de uma linha contínua devido à persistência das imagens na retina do olho humano (cerca de 40 ms). Nos modelos mais simples de osciloscópios este tipo de trigger obtém-se selecionando a posição AT (AUTO) do controle de trigger.

TRIGGER NORMAL - o varrimento inicia-se desde que exista um sinal de entrada compatível com o nível de trigger selecionado. Neste tipo de trigger não há visualização na tela quando não existe nenhum sinal nas entradas ou sincronismo, além de que exige a regulação freqüente do nível de trigger quando se observam diversas ddp. Existem 2 modos básicos de operação do TRIGGER, o modo EXTERNAL e o modo INTERNAL.

TRIGGER INTERNAL - o sincronismo do trigger é efetuado com um dos sinais presentes nas entradas do osciloscópio. Nos osciloscópios de dois canais, o sincronismo obtém-se a partir da tensão aplicada ao canal 1 ou 2, conforme a posição do interruptor TRIG estando em I ou II, respectivamente. Neste último caso é possível um sinal num canal utilizando o outro como sinal de sincronização, bastando selecionar MONO e TRIG II para se obter esse efeito.

TRIGGER EXTERNAL - neste modo o sinal de sincronização é aplicado numa entrada própria para esse fim. Este modo é usado quando, por exemplo, o sinal que se pretende mostrar contém ruído que se pretende eliminar e se dispõe de outro sinal com freqüência igual. A maioria dos modelos de osciloscópio permitem a escolha de outras fontes para o sinal de sincronização, nomeada TV e LINE. No modo LINE o trigger é comandado pela freqüência de alimentação da rede pública de eletricidade. No modo TV o sinal de sincronismo interno (I ou II) é filtrado por um filtro passa-baixa (cerca de 500 Hz) de forma a facilitar a visualização do sinal de televisão. Alguns modelos de osciloscópios mais complexos apresentam um seletor adicional TRIG SEL que permite selecionar os modos AC, DC, LF e HF que filtram as componentes alternada, contínua, de baixa e alta freqüências do sinal de sincronização, respectivamente.

Como acabamos de ver, o osciloscópio é um instrumento que nos permite observar comodamente sinais rápidos no tempo, mas têm de ser periódicos para que a sincronização seja possível. Por exemplo, o ruído térmico que está sempre presente em qualquer circuito elétrico, é um sinal aleatório com o qual o osciloscópio jamais se sincronizará.

3.7 – Filtro

Este circuito dispõe de vários filtros elétricos que permitem manipular o sinal de trigger de modo que este esteja em condições de ser aplicado ao circuito da base de tempo.

4 – PONTAS DE PROVA

As pontas de prova realizam a “interface” entre o osciloscópio e o circuito elétrico no qual desejamos medir alguma diferença de potencial. É muito importante se utilizar as sondas projetadas para se trabalhar especificamente com determinado tipo de osciloscópio. As sondas não devem introduzir ruídos que possam vir a perturbar o sinal a ser medido.

4.1 – Tipos de Sonda

Existem diversos tipos de sonda de tensão. Dentre elas, podemos destacar:

- Sondas diretas;
- Sondas com atenuação

Um ilustrativo das sondas é mostrado na Fig. 11.

a) Sondas diretas

As sondas diretas são cabos com um par de garras do tipo “jacaré” e com um conector do tipo BNC na outra extremidade para se realizar a conexão no osciloscópio. Através das garras jacaré se realiza a medida desejada de diferença de potencial no circuito a ser estudado ou testado.

b) Sondas com atenuação

Este tipo de sonda utiliza um atenuador passivo, com atenuações típicas de 10X e 100X. Por convenção, os fatores de atenuação vem impressos na sonda com o sinal X logo após o fator de divisão, ao contrário dos fatores de amplificação, onde o sinal X aparece antes (X10 ou X100). Algumas sondas apresentam uma chave comutadora, onde o usuário poderá escolher a atenuação desejada (1X ou 10X).

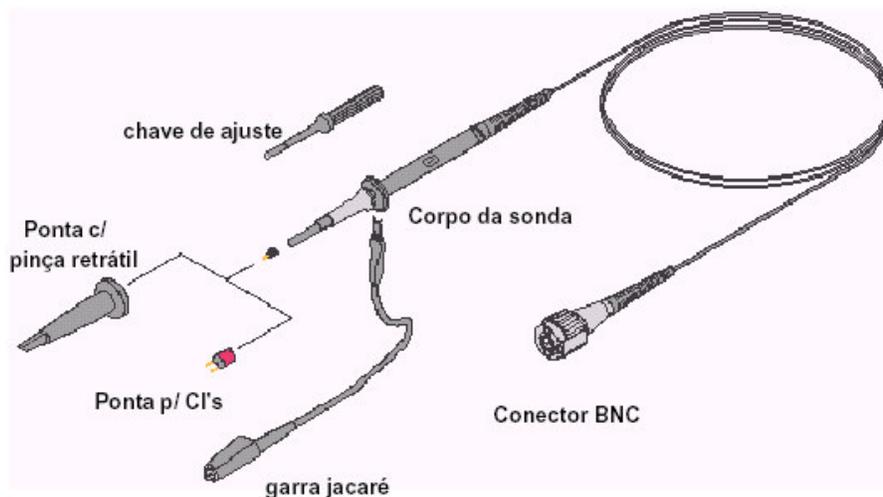


Fig. 11 – Exemplo de sonda para medida com osciloscópio.