

Técnicas Experimentais em Física de Altas Energias

Elementos Básicos de Eletrônica

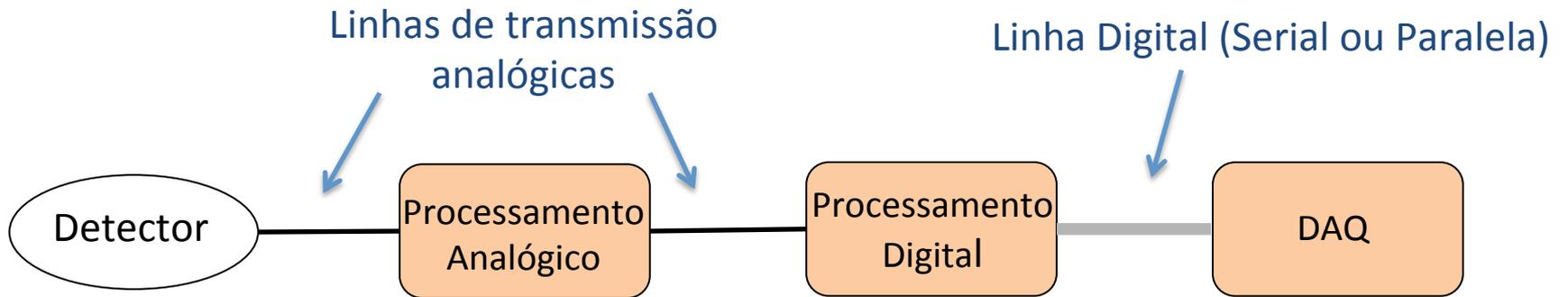
Síntese

- Fundamentos de eletrônica de tratamento de sinais.
- Abordagem resumida, com interesse prático.
- Não discutiremos os circuitos complexos ao nível de componentes eletrônicos.
- Instrumentação básica de bancada.

Bibliografía

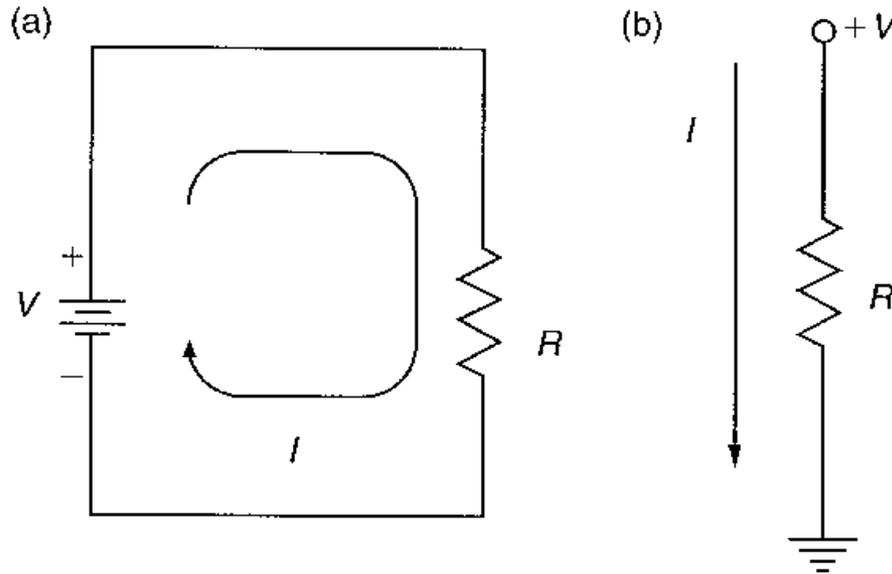
- W. R. Leo, Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments, Springer-Verlag. **Capítulo 13.**
- P. Horowitz, W. Hill, The Art of Electronics, Cambridge. **Capítulo 1.**
- A. C. Melissinos, J. Napolitano, Experiments in Modern Physics. **Capítulo 3.**

Cadeia Eletrônica Básica



- Eletricidade Básica
- Sinais Elétricos
- Linhas de transmissão

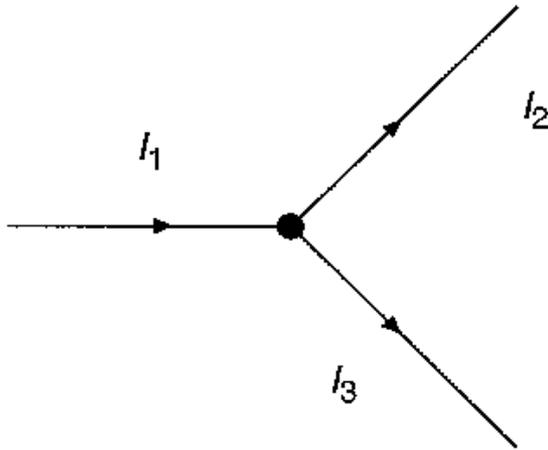
Vtagem, Resistência e Corrente – Lei das Tensões



O potencial elétrico está ligado à idéia de energia potencial elétrica, e a energia é conservada. Pela lei das tensões (segunda lei de Kirchoff), em um circuito fechado, a soma das tensões geradas menos as das tensões consumidas deve resultar um valor nulo.

$$V = RI$$

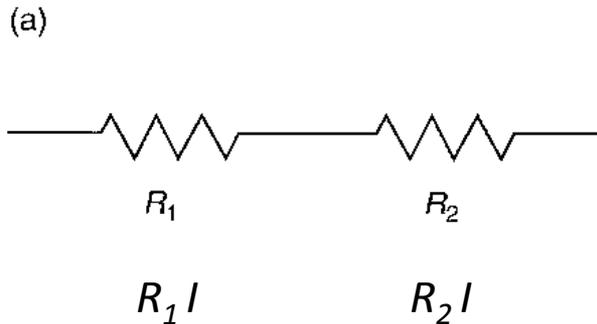
Voltagem, Resistência e Corrente – Lei das Correntes



Corrente Elétrica é apenas o fluxo de cargas elétricas ($I = dq/dt$), e a carga é conservada. A lei das correntes (primeira lei de Kirchoff) diz que a soma de correntes que chegam a uma junção deve ser igual à soma das correntes que saem dela.

$$I_1 = I_2 + I_3$$

Resistência

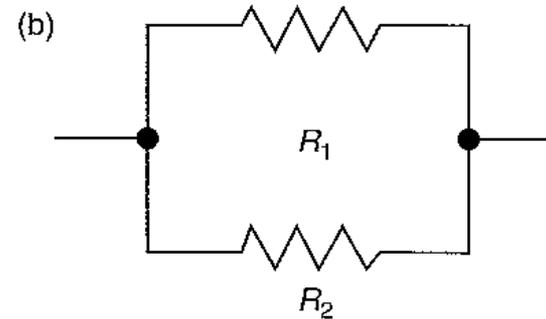


$$V = R_1 I + R_2 I$$

$$R I = R_1 I + R_2 I$$

\therefore

$$R = R_1 + R_2$$



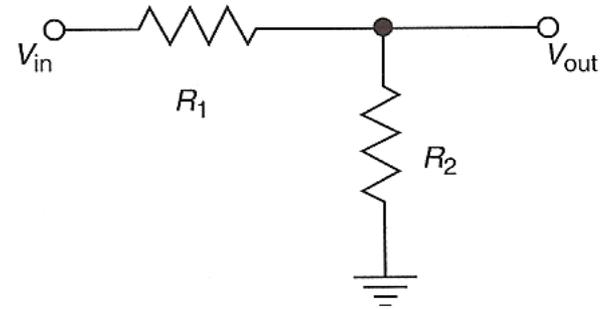
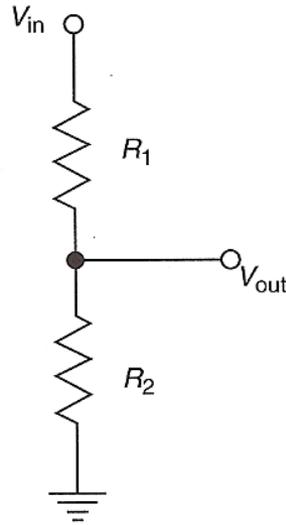
$$V = R_1 I_1 = R_2 I_2$$

$$R I = R_1 I_1 = R_2 I_2$$

mas como $I = I_1 + I_2$

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

Simple divisor de tensão



$$V_{in} = I(R_1 + R_2)$$

$$V_{out} = I(R_2)$$

\therefore

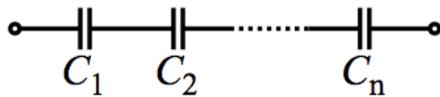
$$V_{out} = V_{in} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Capacitores e Circuitos de Corrente Alternada

Capacitores: Armazenam carga, mas não permitem que os portadores de carga o atravessem. A capacitância é dada por:

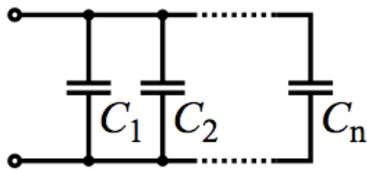
$$C \equiv \frac{q}{V}$$

Associação em série

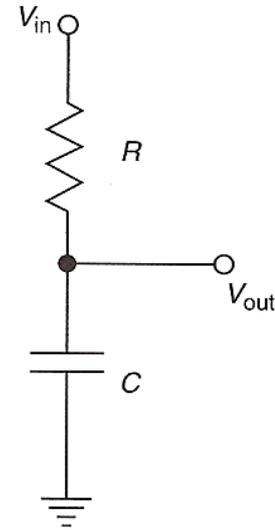


$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

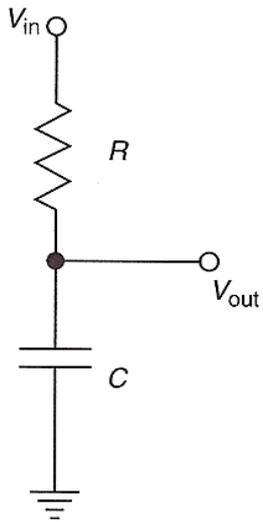
Associação em paralelo



$$C = C_1 + C_2$$



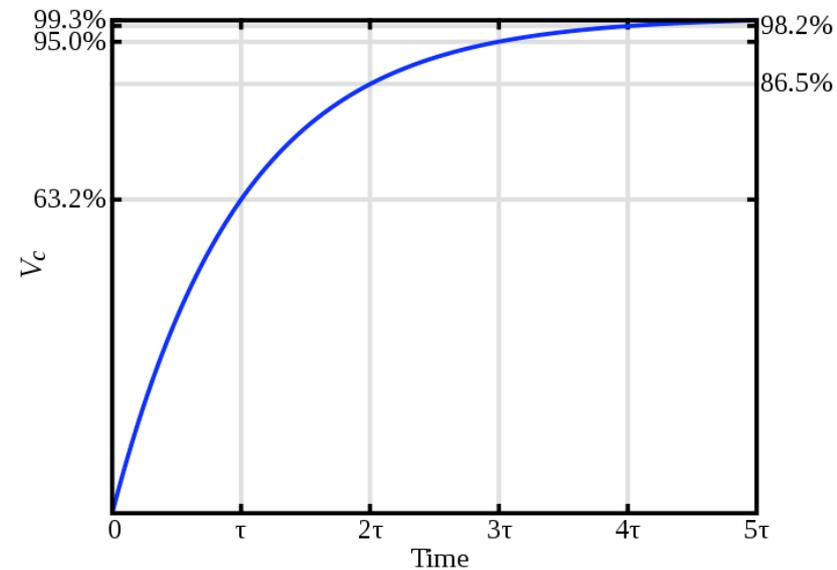
Capacitores e Circuitos de Corrente Alternada



$$V_{in}(t) = 0 \quad \text{para } t \leq 0$$

$$V_{in}(t) = V \quad \text{para } t > 0$$

$$\begin{aligned} V_{in} &= V_{out} + IR = V_{out} + R \frac{dq}{dt} \\ &= V_{out} + RC \frac{dV_{out}}{dt} \end{aligned}$$



$$V_{out}(t) = V_{in} [1 - e^{-t/RC}]$$

$$\tau = RC$$

Circuitos de Corrente Alternada (AC)

- Funções dependentes do tempo sempre podem ser expressas em termos de senos e cossenos usando transformadas de Fourier.
- É conveniente usar a representação complexa:

$$V(t) = V_0 e^{i\omega t}$$

onde a parte real da função é a tensão que medimos no laboratório.

- Utilizamos o conceito de “impedância”, Z , que é a generalização da resistência para circuitos AC.

Para resistores $Z = R$

Para capacitores, sendo $V = V_0 e^{i\omega t} = q/C$ e $I = dq/dt = i\omega C \times V_0 e^{i\omega t}$

$$Z(\omega) = \frac{V(\omega, t)}{I(\omega, t)} = \frac{1}{i\omega C}$$

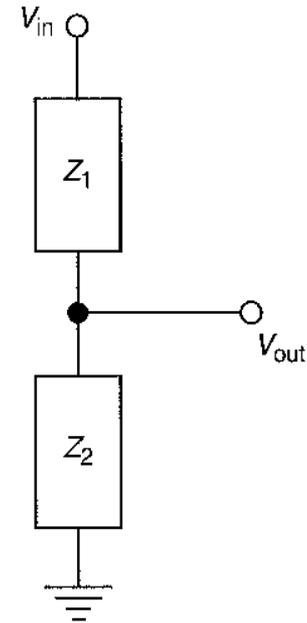
Circuitos de Corrente Alternada (AC)

- O conceito de divisor de tensão pode ser generalizado para incluir circuitos AC e componentes reativos como capacitores por

$$V_{out}(\omega, t) = V_{in}(\omega, t) \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} = V_{in}(\omega, t) g e^{i\phi}$$

$g \rightarrow$ ganho do circuito $|V_{out}| / |V_{in}|$

$\phi \rightarrow$ deslocamento de fase entre V_{out} e V_{in}

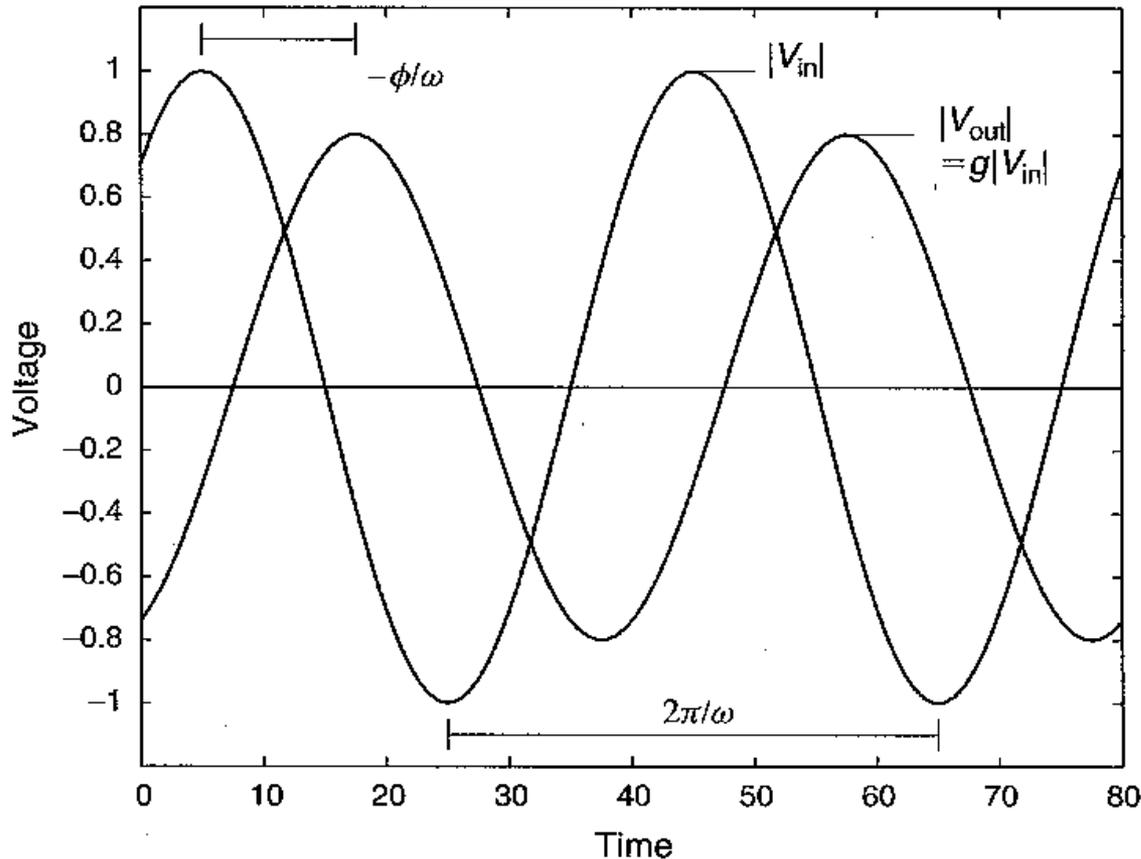


Circuitos de Corrente Alternada (AC)

Se $V_{in} = V_0 e^{i\omega t}$, visto que a tensão medida é a parte real da expressão complexa,

$$V_{in} = V_0 \cos(\omega t)$$

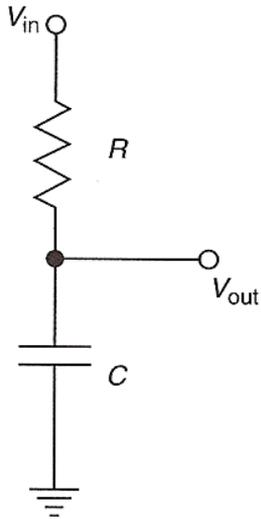
$$V_{out} = g V_0 \cos(\omega t + \phi)$$



Máximo de V_{out} em relação a V_{in} :

$$t = -\frac{\phi}{2\pi} \times T = -\frac{\phi}{\omega}$$

Circuitos de Corrente Alternada (AC)



$$V_{out} = V_{in} \frac{\frac{1}{i\omega C}}{R + \frac{1}{i\omega C}} = V_{in} \frac{1}{1 + i\omega RC}$$

ou seja

que traz

e

$$g = (1 + \omega^2 R^2 C^2)^{-1/2}$$

$$\omega = 0 \Rightarrow g = 1$$

$$\omega \rightarrow \infty \Rightarrow g \rightarrow 0$$

mas sabendo que $z = |z|e^{i\phi}$ e $z^* = |z|e^{-i\phi}$

onde a fase de z é $\phi = \tan^{-1} \left[\frac{\text{Im}(z)}{\text{Re}(z)} \right]$

$$\frac{1}{1 + i\omega RC} = \frac{1 - i\omega RC}{1 + \omega^2 R^2 C^2} = \frac{1}{(1 + \omega^2 R^2 C^2)^{1/2}} e^{i\phi}$$

$$\phi = -\tan^{-1}(\omega RC)$$

assim

$$\text{se } \omega = 0 \Rightarrow \phi = 0$$

$$\text{e se } \omega \rightarrow \infty \Rightarrow \phi \rightarrow -90^\circ$$

Indutores

- Armazena energia em um campo magnético.
- Como os capacitores, é de importância quando a corrente muda com o tempo, e a resposta depende da frequência.
- A indutância é definida por

$$L = \frac{N\Phi}{I} \quad \text{onde } N \text{ é o número de espiras,}$$

Φ o fluxo magnético e I a corrente

- Se a corrente I que circula na bobina muda com o tempo, então o campo muda e, portanto, cria uma voltagem que se opõe a essa mudança. Esta queda de tensão é dada por

$$V = \frac{d(N\Phi)}{dt} = L \frac{dI}{dt}$$

- Fazendo $V = IZ$, onde Z é a impedância do indutor, e $I = I_0 e^{i\omega t}$, então $V = i\omega LI$ ou

$$Z = i\omega L$$



Indutores e Capacitores

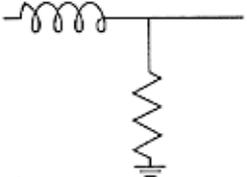
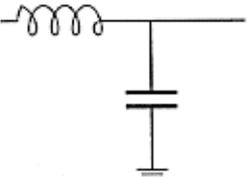
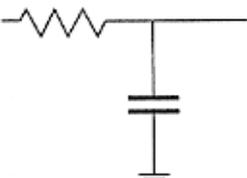
Os indutores são, em grande extensão, o oposto dos capacitores:

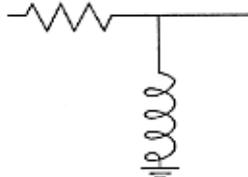
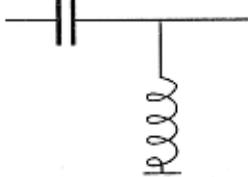
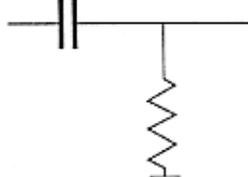
- Comportam-se como um curto circuito à baixas frequências;
- Comportam-se como um fio sem condução, circuito aberto, à altas frequências.

$$Z_L = i\omega L \qquad Z_C(\omega) = \frac{1}{i\omega C}$$

Filtros de Frequência

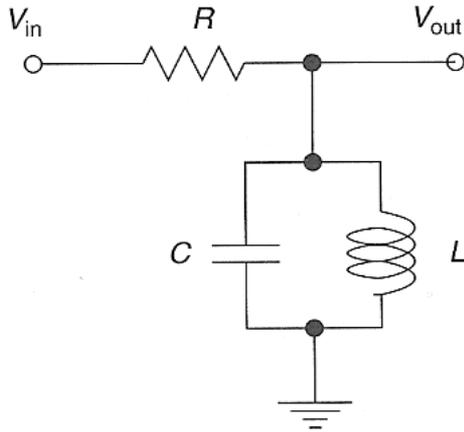
- São circuitos RC, RL, LC ou RLC usados para eliminar ruídos ou formatar sinais elétricos.
- O truque consiste em eliminar sinais de frequências acima (passa-baixa) ou abaixo (passa-alta) de um certo valor.

Circuit	Type
	Low pass
	Low pass
	Low pass

Circuit	Type
	High pass
	High pass
	High pass

Filtros de Frequência

- Quando é necessário filtrar ruídos em torno de uma faixa de frequências, usa-se o “filtro passa-banda”.



$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{Z_{LC}}{Z_R + Z_{LC}}, \text{ onde } Z_R = R$$

$$Z_{LC} = (Z_L^{-1} + Z_C^{-1})^{-1}$$

$$Z_C = \frac{1}{i\omega C}, Z_L = i\omega L$$

- O ganho é, portanto

$$g = \left| \frac{V_{out}}{V_{in}} \right| = \frac{1}{\left[1 + \frac{R^2}{\omega^2 L^2} (1 - \omega^2 LC)^2 \right]^{1/2}}$$

onde fica claro que

$g \rightarrow 0$ tanto para $\omega \ll R/L$ quanto para $\omega \gg 1/RC$

$g = 1$ para $\omega = 1/\sqrt{LC}$

Sinais Analógicos e Digitais

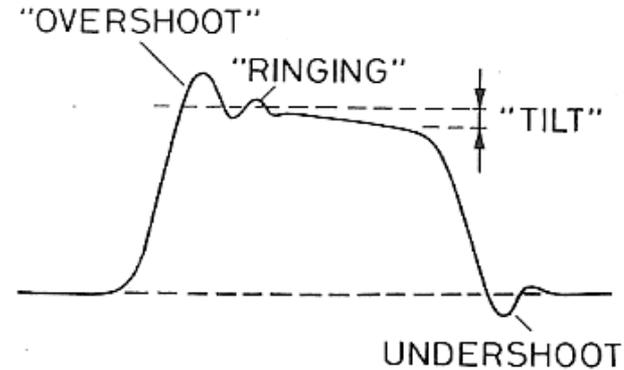
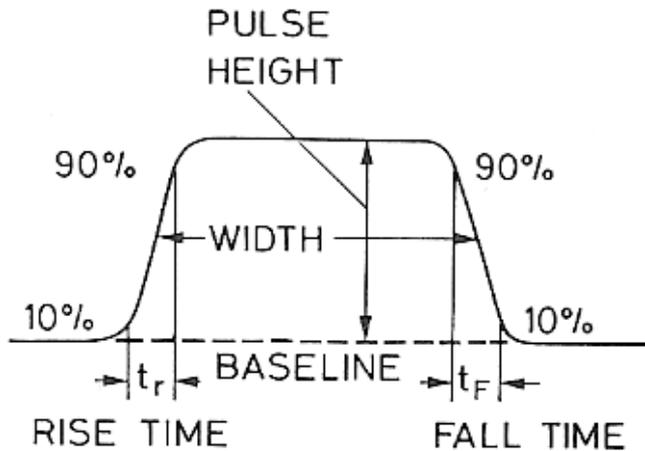
Sinais Analógicos

- Variação contínua em uma ou mais de suas características, como amplitude e ou forma do pulso.
- Relação fixa com alguma informação física de interesse, como a energia de uma partícula, fluxo de partículas ou tempo de chegada a um detector.

Sinais Digitais ou Lógicos

- Podem assumir apenas valores discretos.
- A informação através deles é quantizada por natureza.
- Por exemplo um detector Geiger responde apenas com dois valores possíveis: presença ou não de partículas.
- Qualquer número finito de estado cabe nesta definição, mas é mais comum os sinais lógicos serem limitados a apenas dois estados.

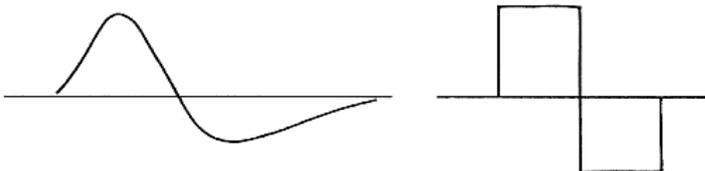
Terminologia



UNIPOLAR



BIPOLAR



Sinais rápidos:

- Rise time $< \approx$ ns.

Sinais lentos:

- Rise time $> \approx$ 100 ns.

Largura de Banda – Domínio de Frequência

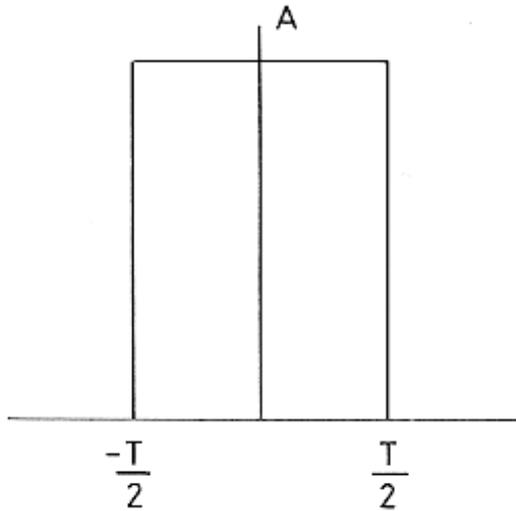
Da análise de Fourier, é sabido que um pulso pode ser decomposto em uma superposição de várias formas senoidais. Sendo $f(t)$ a forma do pulso podemos decompô-lo na forma

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} g(\omega) \exp(i\omega t) d\omega$$

onde $g(\omega)$ é a transformada de Fourier ou espectro de frequência do pulso. Podemos explicitá-la invertendo a equação

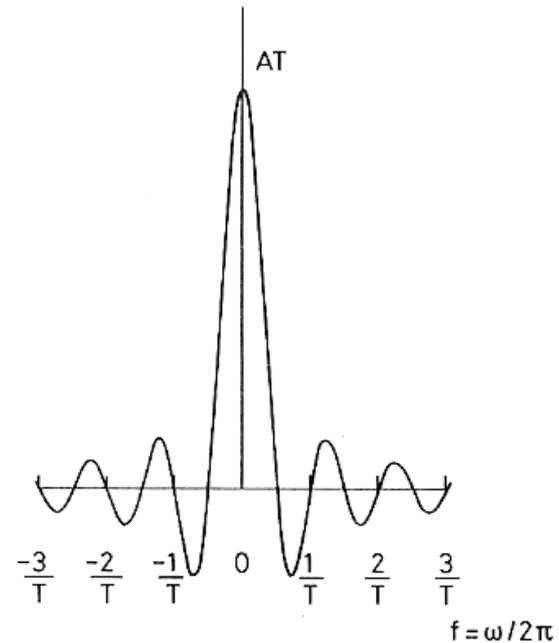
$$g(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \exp(-i\omega t) dt$$

Largura de Banda – Domínio de Frequência



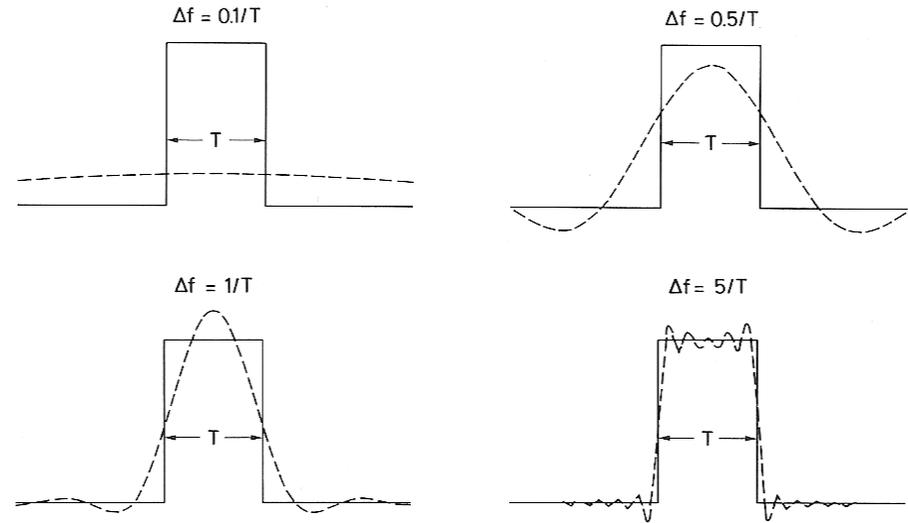
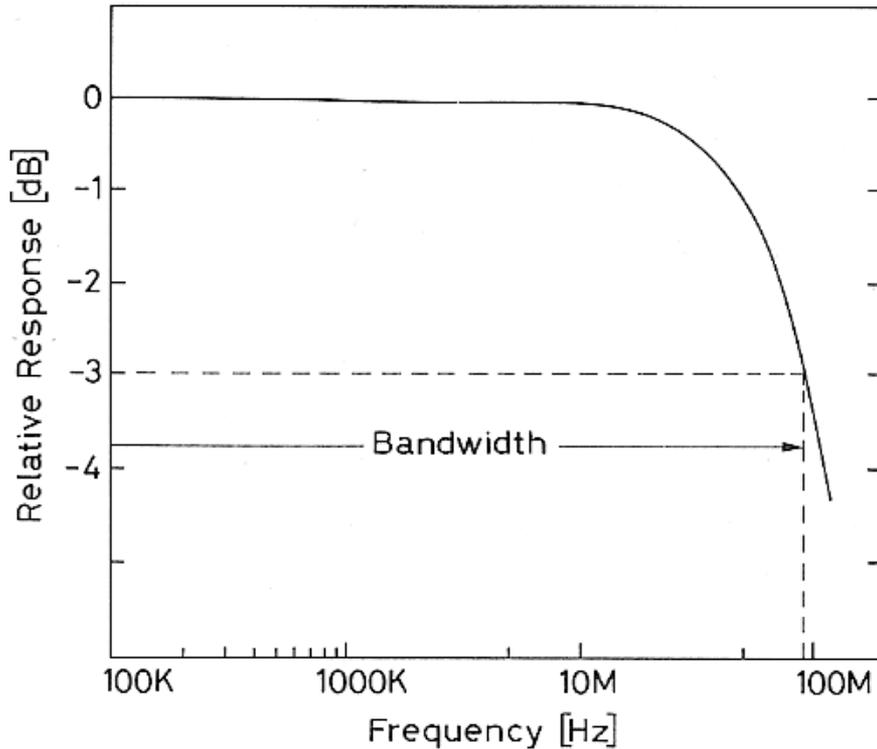
$$f(t) = A \quad |t| < T/2$$

$$f(t) = 0 \quad |t| > T/2$$



$$g(\omega) = \frac{AT}{\sqrt{2\pi}} \frac{\text{sen}(\omega T/2)}{(\omega T/2)}$$

Largura de Banda – Domínio de Frequência



A **largura de banda** de um circuito, é delimitada pelos pontos no qual a resposta cai em 3 db.

Transmissão de Sinais

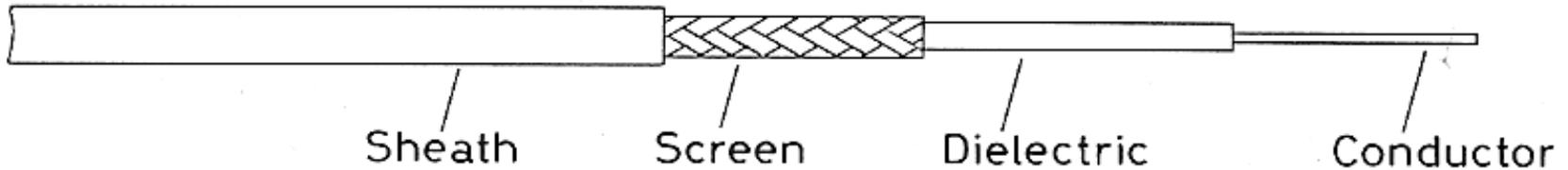
O processamento de um sinal devido, por exemplo, a um detector requer o transporte do sinal de um ponto a outro preservando a informação.

Um pulso é geralmente constituído de um espectro contínuo de frequências de 0 a infinito, o que significa que o cabo que interconecta os dois pontos deveria ser capaz de transportar esse espectro uniformemente e coerentemente na distância requerida.

Na prática, o espectro de Fourier de um pulso retangular de largura T está na maior parte contida na região $\Delta f \approx 1/T$ e a informação pode ser reproduzida se apenas essa região é mantida.

Se por um lado o projeto e construção dos módulos eletrônicos ficam por conta de engenheiros e das companhias responsáveis, a interconexão entre eles depende das experimentações e, por isso, por conta dos físicos. Logo é extremamente importante que eles entendam como os sinais são transmitidos de forma a entender os problemas que possam surgir devido a esse processo.

Cabos Coaxiais



O condutor externo carrega a corrente de retorno e é normalmente feito de uma malha de fios, o dielétrico é de polietileno, plástico ou teflon. O cabo todo é envolvido por uma camada de plástico.

Uma vantagem deste tipo de construção é que o condutor externo, além de servir de retorno de corrente, também blinda o fio central contra o efeito de campos eletromagnéticos.

Table 13.1. Some common coaxial cable types and their characteristics (data from *LeCroy catalog* [13.1])

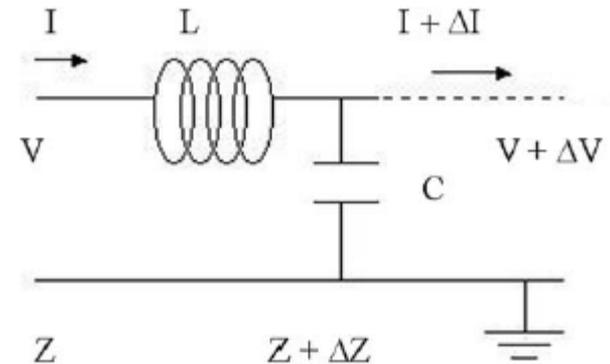
Type [RG]	Delay [ns/m]	Diameter [cm]	Capacitance [pF/m]	Max. operating voltage [kV]	Remarks
50 Ω , single braided cables:					
58U	5.14	0.307	93.5	1.9	Standard cable for fast NIM electronics
58A/U	5.14	0.305	96.8	1.9	
58C/U	5.06	0.295	93.5	1.9	
174/U	5.14	0.152	98.4	1.5	Miniature cable for fast NIM electronics
213/U	5.06	0.724	96.8	5.0	Formerly RG-8A/U
215/U	5.06	0.724	96.8	5.0	Same as 213/U but with armor; formerly RG-10A/U
218/U	5.06	1.73	96.8	11.0	Large, low attenuation cable formerly RG-17A/U
219/U	5.06	1.73	96.8	11.0	Same as 218/U but with armor; formerly RG-18A/U
220/U	5.06	2.31	96.8	14.0	Very large, low attenuation formerly RG-19A/U
221/U	5.06	2.31	96.8	14.0	Same as above but with armor; formerly RG-20A/U
50 μ , double braided cables:					
55B/U	5.06	0.295	93.5	1.9	Small size, flexible cable
221/U	5.06	0.470	93.5	3.0	Small size, microwave cable; formerly RG-5B/U
214/U	5.06	0.724	98.4	5.0	Formerly RG-9BU
217/U	5.06	0.940	96.8	7.0	Power transmission cable; formerly RG 14A/U
224/U	5.06	0.940	96.8	7.0	Same as 217/U but with armor; formerly RG-74A/U
223/U	5.06	0.295	93.5	1.0	formerly RG-55A/U
High voltage cables:					
59/U	5.14	0.381	68.9	2.3	$Z = 73 \Omega$, standard HV cable for detectors
59B/U	5.14	0.381	67.3	2.3	$Z = 75 \Omega$

Características dos Cabos Coaxiais

Devido à sua configuração os cabos coaxiais possuem capacitância e indutância intrínsecas. Pela teoria eletromagnética pode-se mostrar que

$$L \approx \frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) [\text{H/m}] = 0,2K_m \ln\left(\frac{b}{a}\right) [\mu\text{H/m}]$$

$$C \approx \frac{2\pi\epsilon}{\ln(b/a)} [\text{F/m}] = \frac{55,6K_e}{\ln(b/a)} [\text{pF/m}]$$



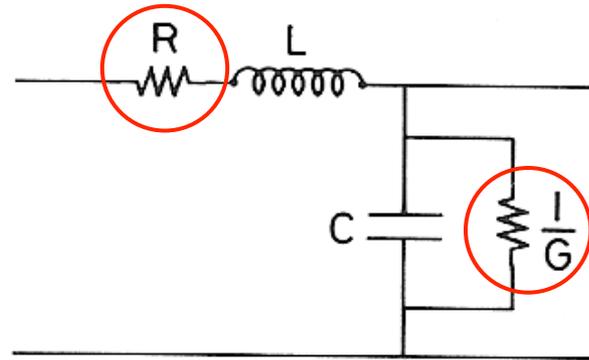
onde a e b são os raios do fio interno e do externo respectivamente, μ e ϵ a permeabilidade e permissividade do material dielétrico, $K_e = \epsilon/\epsilon_0$ e

$$K_m = \mu/\mu_0.$$

Valores típicos são $C \approx 100$ pF/m e $L \approx 20-80$ $\mu\text{H/m}$.

Características dos Cabos Coaxiais

Mas em cabos reais existe também uma resistividade devido ao fato dos condutores não serem perfeitos, e existir uma certa condutividade através do dielétrico devido à sua imperfeição como isolante. Desta forma, podemos representar um cabo como um circuito elétrico do tipo:



Onde R representa a resistência elétrica e G a condutividade por unidade de comprimento do fio.

Equação de Onda para um Cabo Coaxial

Podemos derivar as equações de uma voltagem V e corrente I no cabo. Consideremos um pequeno comprimento de cabo Δz , a variação de tensão ΔV e corrente ΔI pode ser calculado para essa pequena distância por

$$\Delta V(z,t) = -R\Delta z I(z,t) - L\Delta z \frac{\partial I}{\partial t}(z,t)$$

$$\Delta I(z,t) = -G\Delta z V(z,t) - C\Delta z \frac{\partial V}{\partial t}(z,t)$$

Dividindo por Δz e fazendo $\Delta z \rightarrow 0$

$$\frac{\partial V}{\partial z} = -RI - L \frac{\partial I}{\partial t}$$

$$\frac{\partial I}{\partial z} = -GV - C \frac{\partial V}{\partial t}$$

que diferenciando com relação a z e a t e fazendo a substituição teremos

$$\frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = LC \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} + (LG + RC) \frac{\partial V}{\partial t} + RGV$$

Equação de onda geral para um cabo coaxial.

Cabo Ideal sem Perdas

Para o caso onde R e G são iguais a zero:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = LC \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} \text{Equação de onda.}$$

Supondo uma voltagem senoidal simples no cabo do tipo

$$V = V(z) \exp(i\omega t) \quad \text{teremos}$$

$$\frac{d^2 V}{dz^2} = -\omega^2 LC V = -k^2 V \quad \text{com} \quad k^2 = \omega^2 LC$$

A solução espacial e temporal desta equação é:

$$V(z,t) = V_1 \exp[i(\omega t - kz)] + V_2 \exp[i(\omega t + kz)]$$


Duas ondas que se propagam em direções contrárias:
onda transmitida, onda refletida.

Velocidade e Atraso do Sinal

Temos que a velocidade de propagação da onda é

$$v = \frac{\omega}{k} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Que em termos práticos é expresso no seu inverso, o tempo de propagação por unidade de comprimento

$$T = v^{-1} = \sqrt{LC}$$

Esta quantidade é conhecida como *atraso* do cabo e é tipicamente da ordem de 5 ns/m para cabos de 50 Ω .

Impedância Característica

$$Z_0 = \frac{V}{I} \quad Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{para um cabo ideal, sem perdas.}$$

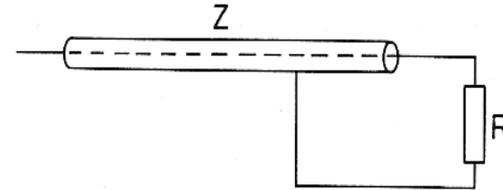
É totalmente independente do comprimento, dependendo apenas da geometria da seção transversal e dos materiais usados. Não é possível medi-la diretamente com um ohmímetro (multímetro) ordinário, mas se comporta como uma impedância efetiva quando conectada à saída de um dispositivo. Ela é a impedância oferecida à propagação de um sinal na linha.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = 60 \sqrt{\frac{K_m}{K_e}} \ln \frac{b}{a} [\Omega]$$

Os cabos usados em eletrônica rápida de física nuclear e de partículas tem impedância característica de **50 Ω** . Cabos de 93 Ω são usados para sinais mais lentos.

Reflexão de Sinais

$$V = f(x - vt) + g(x + vt)$$



O sinal se propaga no cabo

$$Z = \frac{V_0}{I_0}$$

encontra a carga R

$$R = \frac{V_0 + V_r}{I_0 + I_r}$$

O sinal refletido retorna pelo mesmo cabo

$$Z = \frac{V_r}{-I_r}$$

O coeficiente de reflexão é dado por

$$\rho = \frac{V_r}{V_0} = \frac{-I_r}{I_0} = \frac{R - Z}{R + Z}$$

Casamento de Impedância

- Para evitar a distorção provocada pela interferência entre o sinal a ser transportado pelo cabo a algum outro dispositivo e sinais refletidos.
- Atualmente esse problema é parcialmente evitado através da padronização dos dispositivos usados em física nuclear e de partículas. Entradas e saídas são normalmente de .
- Existem casos, principalmente quando se trata da fase testes em que o correto casamento de impedância deve ser observado. Por exemplo, no de instrumentos de bancada como osciloscópios e geradores de sinais.
- A adição de um resistor em série ou em paralelo deve ser feita para adequar a impedância dos cabos.

Instrumentos de Bancada

Instrumentos Básicos de Bancada

- Multímetro, também conhecido como:
 - VOM (**V**olt, **O**hm, **M**eter (**M**illiammeter)), DVOM (**D**igital **V**OM), DMM (**D**igital **M**ulti**M**eter)
 - *Multitester, tester.*
- Osciloscópios, tipos:
 - Analógicos;
 - Digitais.
- Geradores de sinais;
 - Gerador de pulso;
 - Gerador de forma de onda.

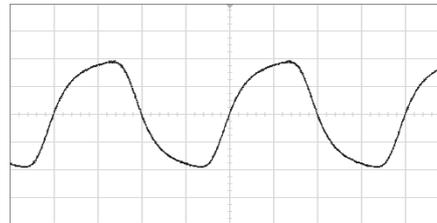
Osciloscópios

Analógico e Digital

Função

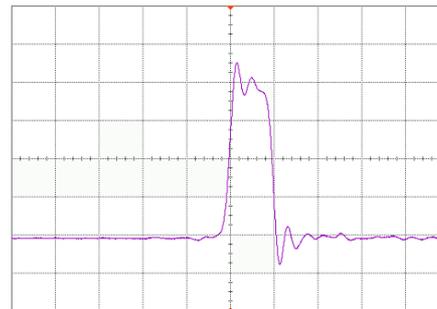
Medidas da variação de tensões em função do tempo

Ondas periódicas



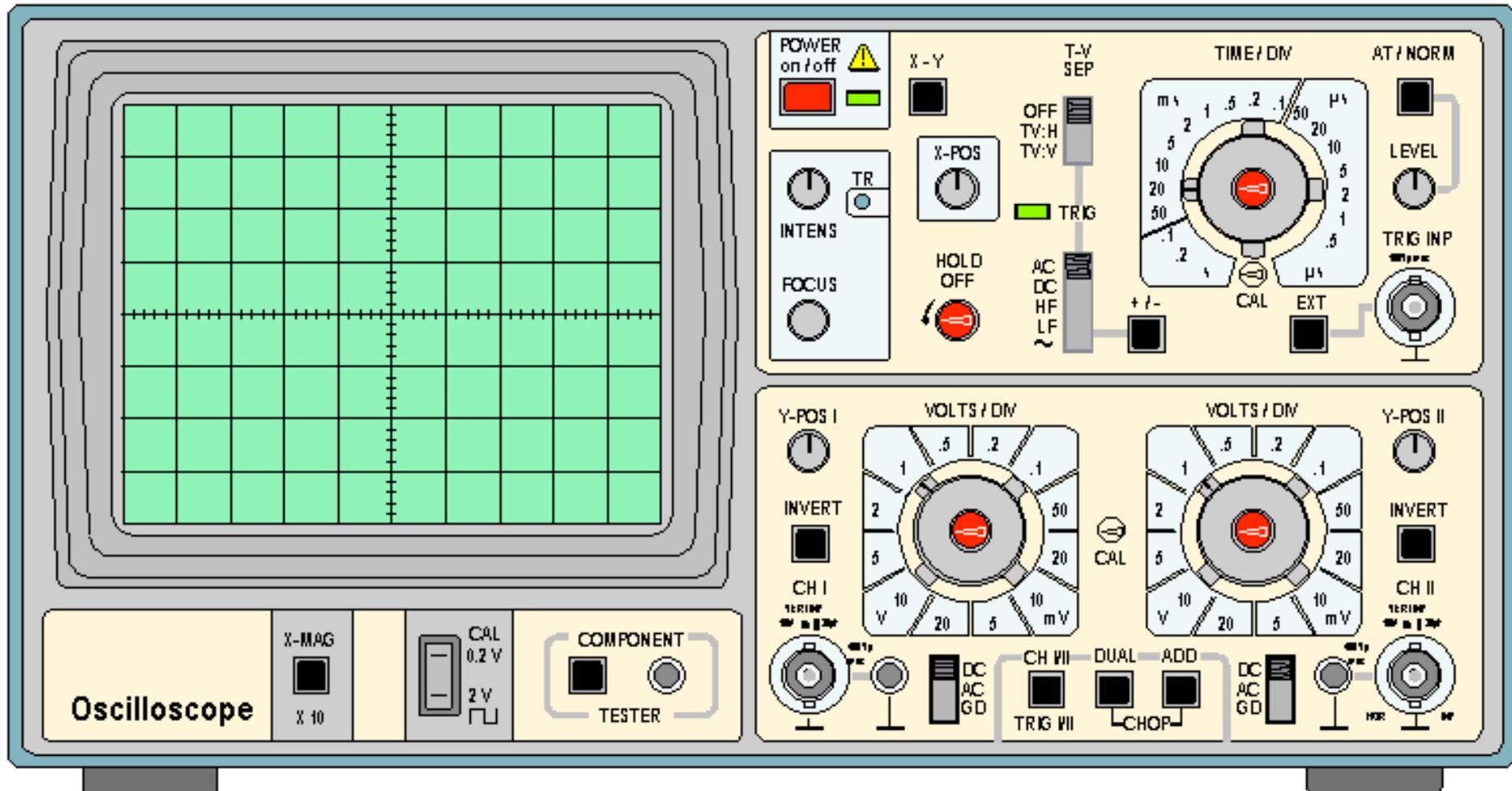
Forma de onda,
Amplitude,
Frequência e etc.

Pulsos variáveis



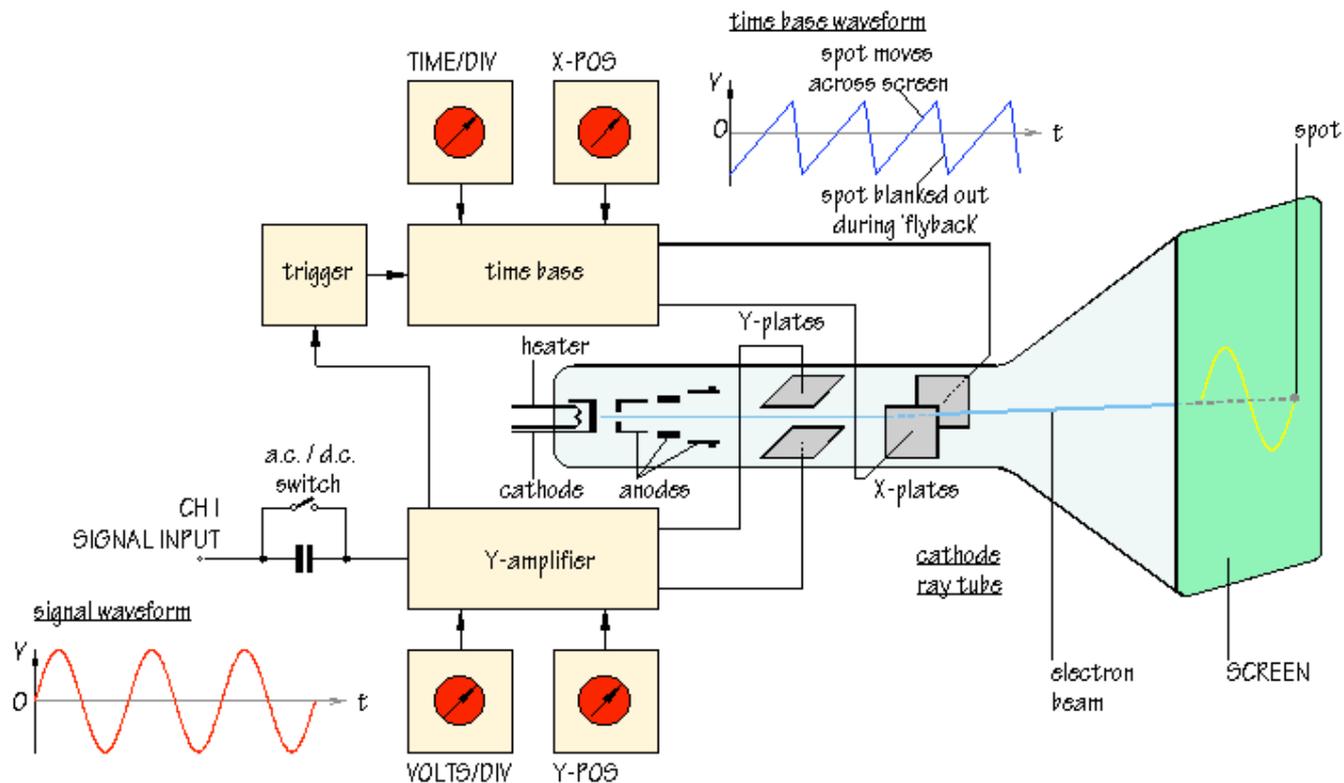
Forma do pulso,
Duração,
Amplitude,
Tempo de Subida e/
ou Descida.

Osciloscópio Analógico



Funcionamento

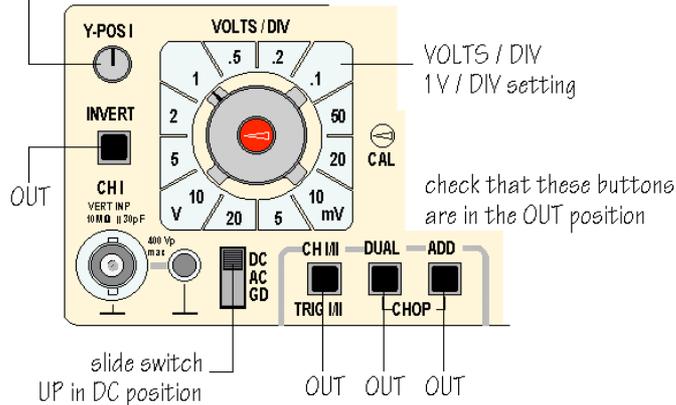
Basicamente, o sinal elétrico é amplificado e usado para deflexionar o feixe de elétrons de um tubo de raios catódicos.



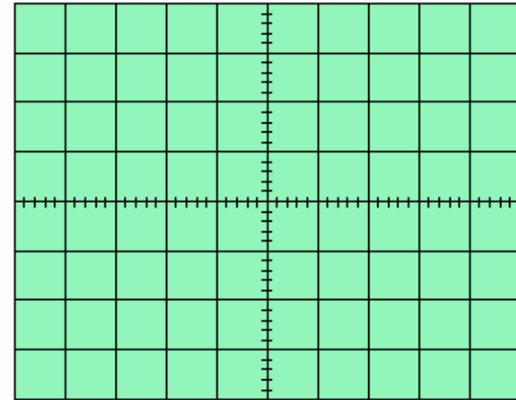
Ajustes Básicos

Escala Vertical

Y-POS centred:
Y-axis along horizontal centre of screen



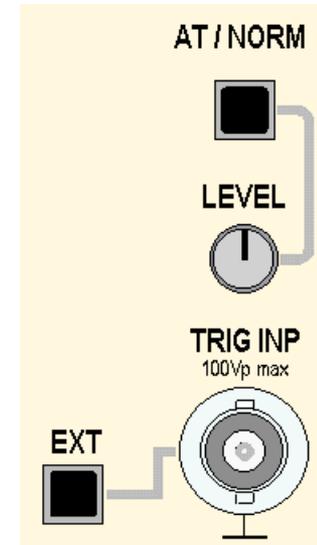
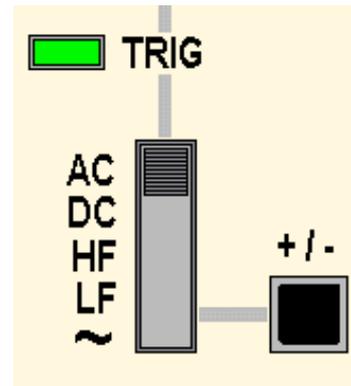
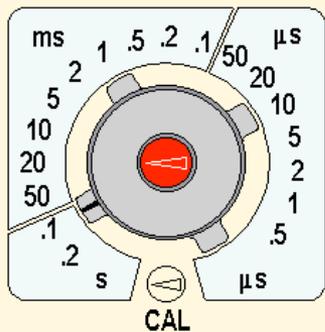
VOLTS
vertical axis
Y-axis



TIME
horizontal axis
X-axis

Trigger

Escala Horizontal



Osciloscópios Analógicos

Vantagens

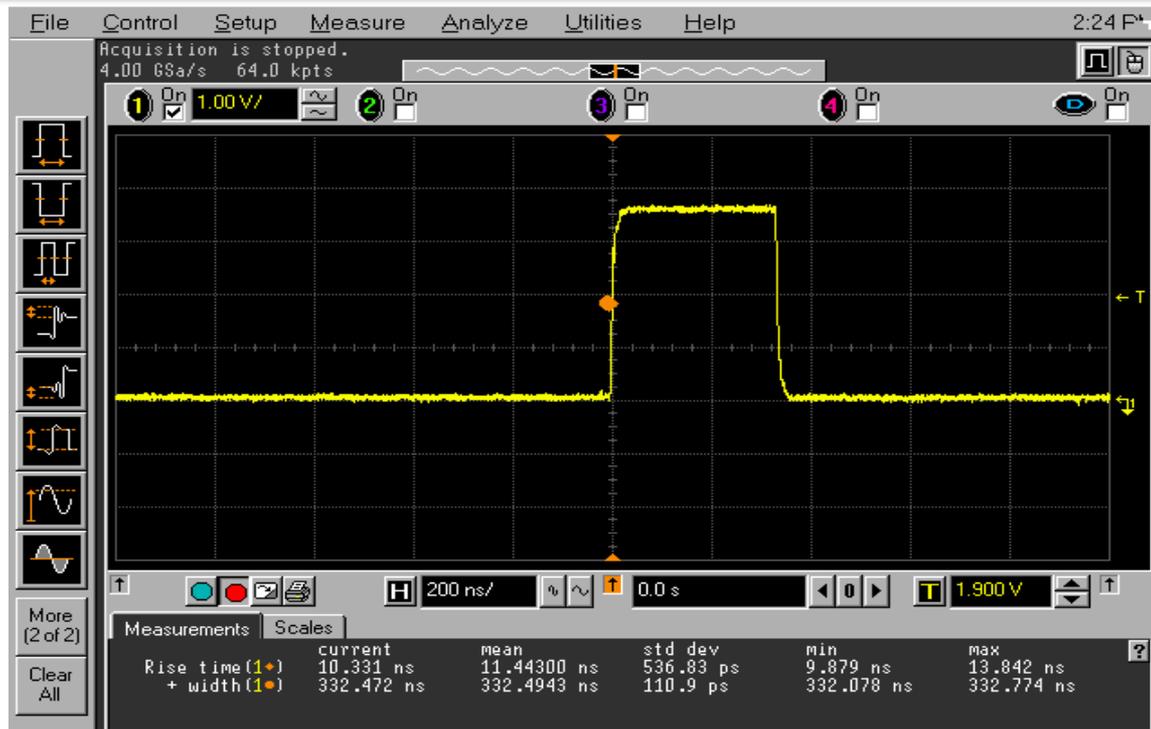
- Fácil de usar
- Rápida atualização da informação.
- A intensidade do sinal na tela traz indícios de anomalias.
- Baixo custo.

Desvantagens

- Limitação da frequência do sinal a ser medido (largura de banda).
- Visualização de sinais isolados.
- Difícil de obter uma cópia do que é observado.
- Capacidade de *trigger* limitada.
- Não é possível obter dados para análise *offline*.

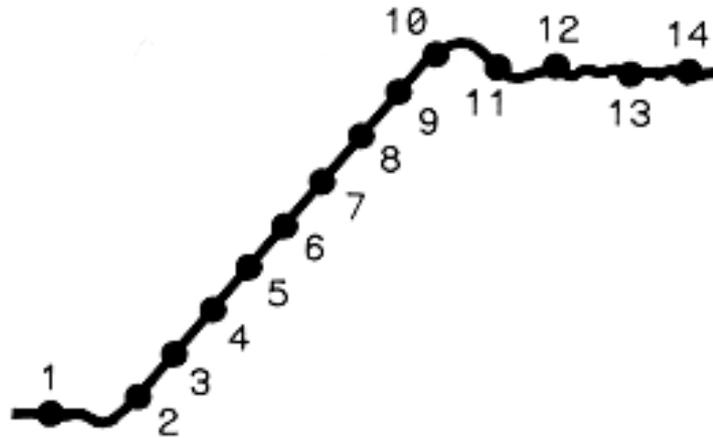
Osciloscópio Digital

Sinal de entrada é convertido em informação digital e processado por software por um computador. A informação exibida na tela é o resultado deste processamento.



Funcionamento

O sinal a ser estudado é digitalizado por conversores A/D, normalmente de 8 bits, e a saída é colocada na memória do computador.



A taxa de amostragem do sinal e a largura de banda do processamento interno determinam qual o sinal mais rápido que pode ser medido.

Osciloscópios Digitais

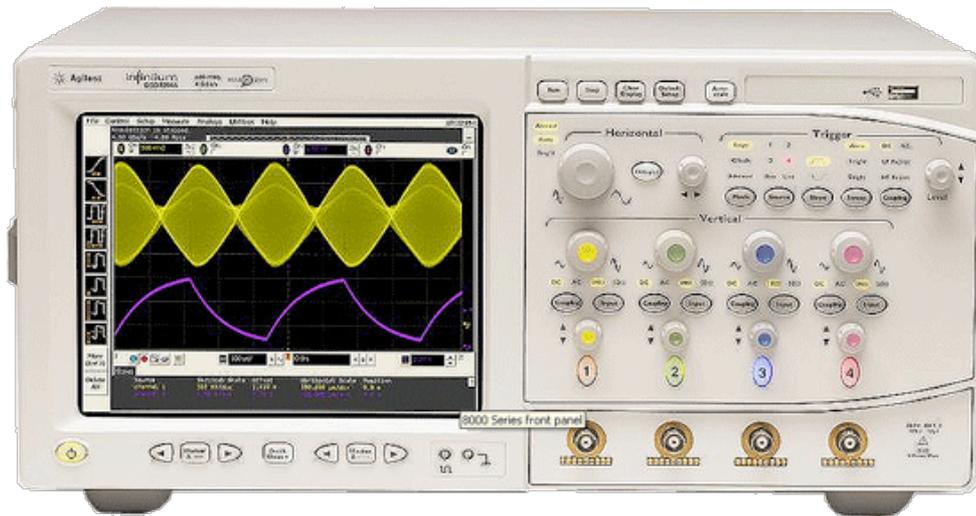
Vantagens

- Cada pulso pode ser estudado individualmente.
- A largura de banda é limitada apenas pela velocidade dos amplificadores e processadores internos.
- O computador interno pode medir diretamente informações relevantes como a amplitude do sinal, largura de pulso, frequência média, tempo de subida e descida e etc.

Desvantagens

- Apenas modelos mais sofisticados podem reproduzir o efeito de intensidade luminosa da tela conforme o sinal de entrada.
- Entradas utilizando FADCs são mais sensíveis e sujeitas a danos no caso de variações bruscas de tensão.
- Alto custo.

O Osciloscópio DSO 8064A



- 4 canais independentes;
- 600 MHz de largura de banda;
- reprodução de persistência do fósforo;
- programável em diversas linguagens;
- sistema de trigger avançado;
- analisador de sinais;
- comunicação USB e Ethernet.

Cuidados na Operação

- Para fazer medidas de melhor acurácia, permita o aquecimento por ao menos 30 minutos.
- Verifique sempre o *offset* que tende a se deslocar (levemente) conforme o tempo de uso.
- Não é necessário executar a auto-calibração frequentemente, mas caso vá executá-la permita um tempo maior que 40 minutos antes de executá-la.

Cuidados na Operação

- NUNCA ligue a entrada do osciloscópio diretamente aos sinais de fotomultiplicadores, sem antes passá-los por amplificadores ou isoladores.
- Ao desligar um equipamento, certifique-se que nenhuma de suas conexões estejam ligadas à entrada do osciloscópio.
- Quando não for mais usar o osciloscópio, desconecte os sinais das entradas.