II SINAL. CONDICIONAMENTO DE SINAL.

1. SINAL

1.1. Considerações Gerais

Um sinal pode ser considerado como a variação no tempo de uma grandeza física observada num dispositivo ou sistema de captação. Um sinal resulta, em muitas situações, de fenómenos naturais. O sinal de voz captado por um microfone, uma vibração registada num sismógrafo, um sinal de vídeo proveniente de uma câmara TV são alguns exemplos de sinais.

Para a análise de sinais é muitas vezes necessário representá-los por uma função matemática no tempo, ou por um grupo de funções, cada uma das quais definida para um dado intervalo de tempo. Como se sabe, dispõe-se de diversas ferramentas de análise bastante poderosas, tais como a Transformada de Laplace e a Série e a Transformada de Fourier. Serão ferramentas a que se recorrerá sempre que necessário.

A medida de fenómenos variáveis no tempo envolve em muitos casos processos determinísticos e não-determinísticos. Os primeiros são aqueles que podem ser descritos por uma relação matemática explícita em função da variável tempo. Os segundos, devido à sua natureza aleatória, são definidos em termos probabilísticos e estatísticos. Neste âmbito tem particular interesse a caracterização de sinais na presença de ruído.

Os sinais determinísticos podem ainda ser classificados em periódicos e aperiódicos, conforme se observe ou não a repetição da sua forma decorrido um determinado intervalo de tempo - o período T.

A caracterização matemática de alguns aspectos importantes para a medida e detecção desta classe de sinais determinísticos será considerada neste parágrafo.

A característica visível de um sinal é a sua forma de onda cuja evolução gráfica no tempo pode ser observada num registador ou num osciloscópio. A caracterização gráfica de um sinal é uma das vias possíveis para o descrever. No entanto, é frequente o recurso a uma caracterização mais compacta, utilizando-se diversos parâmetros mensuráveis tais como, o valor máximo, o valor médio, o valor eficaz, etc.

Muita instrumentação recorre a detectores de valor médio como passo intermédio de determinação de outros parâmetros, tais como o valor eficaz. É assim importante no âmbito de uma disciplina de Instrumentação e Medidas conhecer bem as relações entre estes parâmetros para as formas de onda mais frequentes.

2.1 O Valor Médio e o Valor Eficaz

O valor médio de um sinal periódico de período T - v(t) -, ou o seu valor dc, é definido pela expressão

$$V_0 = \langle v(t) \rangle = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T v(t)\ dt$$

O valor médio quadrático ("root mean square" - **rms**) ou o valor eficaz de v(t), V_{ef}, é definido por

$$V^2{}_{ef} = \langle v^2(t) \rangle = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T v^2(t)\ dt$$

Na tabela 1 apresenta-se o valor médio e o valor eficaz de algumas formas de onda típicas.

Tipo de sinal	Valor médio	Valor eficaz
1. Sinusoidal $v(t) = Vp \sin wt$	0	$\frac{Vp}{\sqrt{2}}$
2. Rectificação de meia onda sinusoidal $v(t) = 0, \quad 0 < t < T/2$ $= Vp \sin w\, t, \quad T/2 < t < T$	$\frac{Vp}{\pi}$	$\frac{Vp}{2\sqrt{2}}$
3. Rectangular $v(t) = Vp, \quad 0 < t < Tp$ $= 0, \quad Tp < t < T$	$Vp\ d$ d ("duty cycle") = $\frac{Tp}{T}$	$Vp\sqrt{d}$

Tabela 1. Valor médio e eficaz de alguns sinais periódicos (período T).

O valor eficaz de uma qualquer forma de onda de tensão pode considerar-se como sendo o valor de uma tensão dc que produz a mesma quantidade de energia durante o mesmo intervalo de tempo. Esta definição permite, como se verá, calcular o valor eficaz de qualquer sinal periódico.

Um sinal periódico v(t) pode ser expresso pelo seu desenvolvimento em série de Fourier, pela expressão

$$v(t) = v1 \sin wt + v2 \sin 2wt + v3 \sin 3wt + \ldots$$

Se o valor eficaz de cada um dos harmónicos for V1, V2, V3 ,..., então o valor eficaz de v(t), V_{ef}, é

$$V_{ef} = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \ldots}$$

Esta expressão pode ser facilmente deduzida se notarmos que a potência total dissipada numa resistência R por uma tensão sinusoidal (em particular por um harmónico) é a razão do quadrado do valor eficaz de tensão pela resistência R.

Assim a contribuição na dissipação de potência do harmónico índice i é

$$Pi = \frac{V_i^2}{R}$$

A potência total P é o somatório das potências parciais, Pi, isto é

$$P = \sum_{i=1}^{n} Pi = \frac{(V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \ldots)}{R}$$

A potência dissipada por uma tensão dc equivalente, Vdc, é

$$P = \frac{V_{dc}^2}{R}$$

Identificando estas duas expressões, ter-se-á o valor de Vdc equivalente, ou como acima se referiu, o valor eficaz. A sua expressão será então

$$V_{ef} = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \ldots}$$

Em particular, se o sinal v(t) apresentar uma componente contínua V_0, V_{ef} será

$$V_{ef} = \sqrt{V_0^2 + V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \ldots}$$

Para além destas considerações iniciais, que deverão estar bem presentes aquando do estudo dos detectores de valor eficaz, também é importante a relação entre o valor de pico e o seu valor eficaz, que se designa por factor de crista CF. A sua expressão é

$$CF = \frac{V_p}{V_{ef}}$$

O factor de crista é unitário para ondas quadradas simétricas ou para tensões dc. Outros sinais de forma mais complexa apresentam factores de crista mais elevados (ver tabela 2). O desvio absoluto médio **mad** ("Mean Absolute Deviation") utilizado na tabela é o valor médio do sinal após rectificação de onda completa.

Forma de onda (1 Volt de pico)	rms	mad	$\frac{rms}{mad}$	Factor de crista
1. Sinusoidal	$\frac{V_p}{\sqrt{2}} = 0.707$ Volt	$\frac{2V_p}{\pi} = 0.636$ Volt	$\frac{0.707}{0.636} = 1.11$	1.414
2. Onda quadrada simétrica	$\frac{V_p}{1} = 1.00$ Volt	$\frac{V_p}{1} = 1.00$ Volt	$\frac{1.00}{1.00} = 1.00$	1.00
3. Triangular	$\frac{V_p}{\sqrt{3}} = 0.580$ Volt	$\frac{V_p}{2} = 0.500$ Volt	$\frac{0.580}{0.500} = 1.155$	1.73

Tabela 2. Factor de crista.

Exemplo 1.1 Calcule o factor de crista CF de um sinal rectangular (figura 1) de valor médio nulo, valor máximo Vp e periodo T.

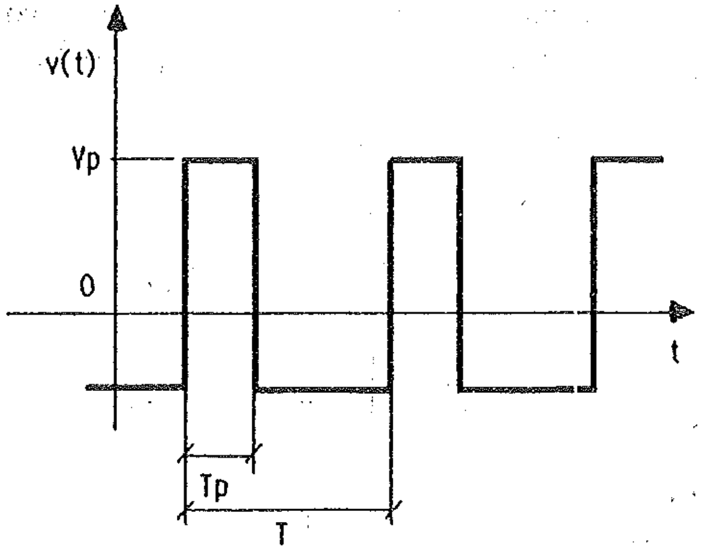

Figura 1. Sinal rectangular.

Resolução: Como o sinal rectangular apresenta valor médio nulo, pode escrever-se

$$VpTp = (Vpp - Vp)\,(T - Tp) \qquad \text{(Vpp = Valor de pico a pico)}$$

O quadrado do valor eficaz é

$$V^2{}_{ef} = \langle v^2(t) \rangle = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T v^2(t)\,dt$$

$$= \frac{1}{T}\int_0^{Tp} Vp^2\,dt + \frac{1}{T}\int_{Tp}^{T} (Vpp - Vp)^2\,dt$$

$$= \frac{1}{T}\left[\,Vp^2 Tp + (Vpp - Vp)^2 (T - Tp)\,\right]$$

como

$$Vpp - Vp = \frac{Vp\ Tp}{(T - Tp)}$$

resulta

$$V^2_{ef} = \frac{1}{T}\left[\,Vp^2 Tp + \frac{(VpTp)^2}{(T - Tp)}\,\right]$$

Finalmente

$$V_{ef} = Vp\sqrt{\frac{Tp}{(T-Tp)}}$$

ou

$$CF = \sqrt{\frac{(T-Tp)}{Tp}} = \sqrt{\frac{(1 - d)}{d}} \qquad \text{com} \quad d\ (\text{"duty cycle"}) = \frac{Tp}{T}$$

Na figura 2, apresenta-se a evolução do factor de crista para ondas rectangulares em função do "duty cycle" d, para: a) onda rectangular de valor mínimo 0 e máximo Vp (onde $CF = \sqrt{1/d}$; b) onda rectangular de valor médio nulo (onde $CF = \sqrt{(1-d)/d}$).

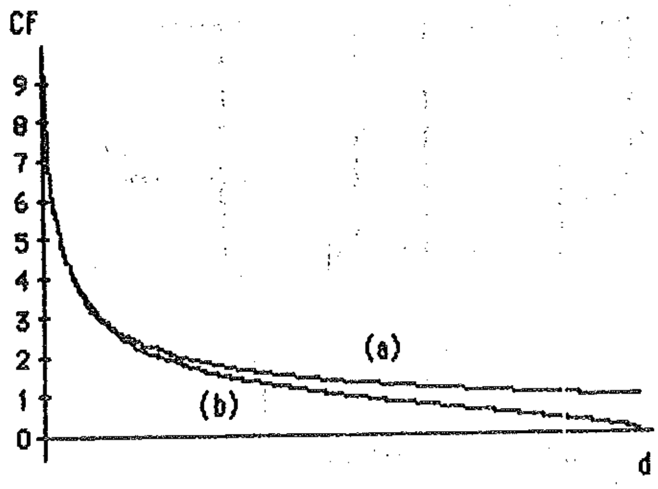

Figura 2. Factor de crista de ondas rectangulares em função de d:
(a) $CF = \sqrt{1/d}$; (b) $CF = \sqrt{(1-d)/d}$)

Formas de onda sinusoidais comutadas encontram-se com frequência em electrónica de potência, colocando-se também o problema da detecção do seu valor eficaz, bem como da influência de CF na detecção. Na figura 3.b) mostra-se a evolução de CF em função do ângulo de comutação ß da onda sinusoidal comutada da figura 3. a) (sugere-se como exercício a dedução desta relação CF(ß)).

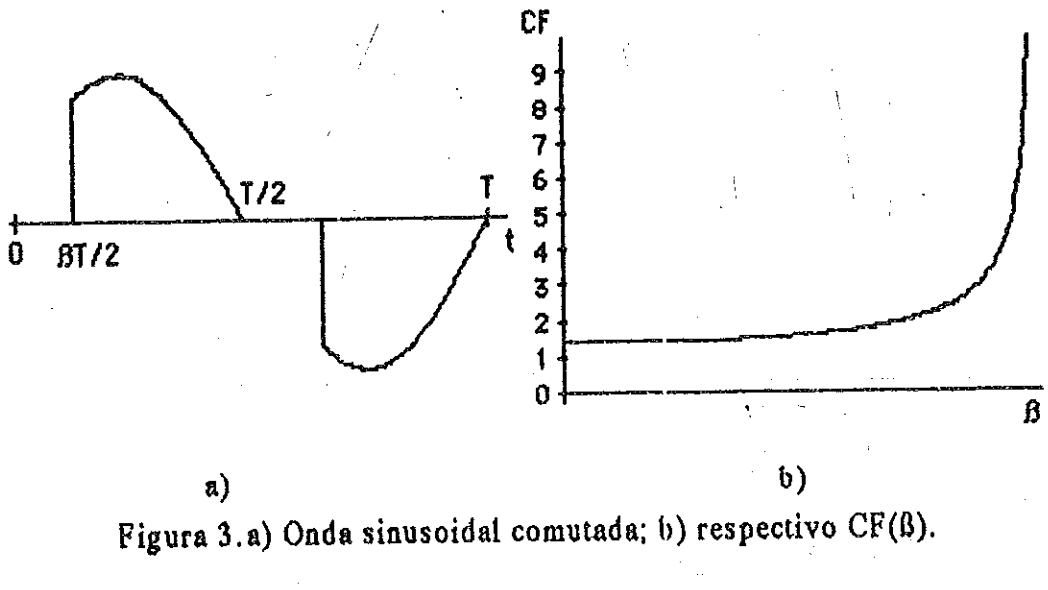

Figura 3.a) Onda sinusoidal comutada; b) respectivo CF(ß).

2. CONDICIONAMENTO DE SINAL

A medida de um sinal envolve a utilização de instrumentação apropriada para extrair os parâmetros caracterizadores do sinal em causa e eventualmente registá-lo de uma forma permanente (em papel, numa fita magnética, etc.) ou de uma forma temporária (p. ex., num ecran de um osciloscópio). Contudo nem sempre um sinal apresenta uma forma apropriada que permita medi-lo ou registá-lo. Pode ser necessário amplificá-lo ou modificá-lo antes de se proceder à comunicação final com o utilizador através de um registo ou de um qualquer visualizador. O processo de preparação do sinal para visualização, existente em qualquer instrumento de medida ou num dispositivo especificamente desenvolvido para o efeito, designa-se por condicionamento de sinal.

Os circuitos de condicionamento de sinal podem assumir uma ou várias das seguintes funções:

a) Atenuação / Amplificação - Em algumas situações os sinais a medir apresentam uma amplitude insuficiente para que seja possível visualizá-lo ou registá-lo, tornando-se necessário amplificá-lo para níveis adequados. Noutras situações torna-se necessário reduzir a sua amplitude, recorrendo a atenuadores, visando não ultrapassar a gama de medida do instrumento usado.

b) Modificação do Sinal - A forma do sinal ou do sinal amplificado/atenuado é alterada através de múltiplos processos, dependentes naturalmente da aplicação. Encontram-se múltiplos dispositivos ou sistemas de modificação de sinal, tais como moduladores AM e FM, pontes de medida, conversores analógico-digitais, etc.

c) Adaptação de Impedâncias - Com esta função visa-se, fundamentalmente, atenuar o efeito de carga sempre existente quando se liga um dispositivo ou instrumento de medida a uma fonte de sinal.

d) Filtragem - A eliminação de interferências exteriores ou de ruído intrínseco ao processo de geração do sinal a medir é o objectivo dos sistemas de filtragem.

Neste parágrafo serão estudados algumas destas funções tais como as de filtragem, atenuação, especialmente nos aspectos mais importantes para a medida e para a instrumentação. Outras funções, tais como amplificação e modulação serão estudadas em disciplinas próprias.

2.1 Filtragem

É comum a utilização de filtros em instrumentação electrónica, sendo usados fundamentalmente dois tipos de filtros: filtros passa-banda e filtros de rejeição de banda. O primeiro filtro elimina os sinais de frequência fora de uma determinada gama de frequências , deixando "passar" os sinais com frequências dentro dessa gama. O segundo filtro realiza a função complementar. Encontram-se também outras designações, tais como, filtros passa-alto e passa-baixo, que não são mais do que casos particulares dos filtros passa-banda. Qualquer uma destas designações é comum em electrónica e descreve o comportamento do filtro no domínio da frequência. Na figura 4 apresentam-se os gráficos do módulo da função de transferência H(f) - |H(f)|- dos filtros ideais que realizam estas operações de filtragem.

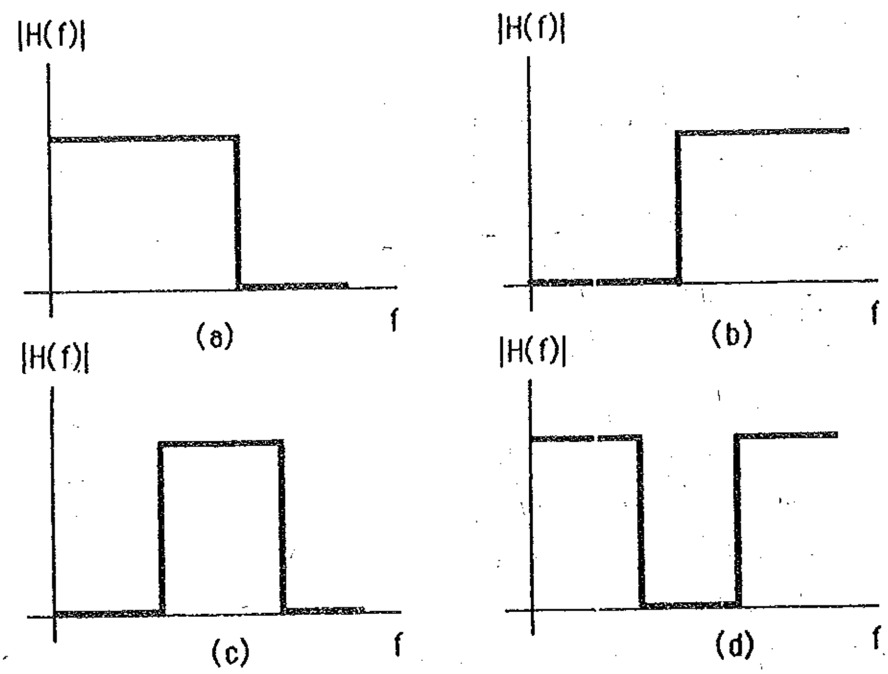

Figura 4. Filtros ideais: a) passa-baixo; b) passa-alto; c) passa-banda; d) rejeição de banda.

A determinação de H(f) para caracterizar um filtro ou um sistema no domínio da frequência, pode ser realizada registando as relações de amplitude e fase entre as ondas sinusoidais de entrada e de saída com frequências dentro de uma gama especificada.

Qual a razão pela qual os sinais sinusoidais são importantes para testar sistemas ? De facto, uma onda sinusoidal é a única forma de onda que ao atravessar um sistema linear não altera a sua forma, sendo a saída ainda uma sinusóide da mesma frequência, observando-se apenas alterações no módulo e fase. Estas alterações permitem-nos medir a função de transferência em função da frequência originando as curvas de módulo e fase. Assim, se a um sistema linear for aplicado o sinal

$$vi(t) = A1 \operatorname{sen} wt \qquad (\text{com } w=2\pi f)$$

a saida será

$$vo(t) = A2 \operatorname{sen}(wt - \phi(w))$$

em que a função $\phi(w)$ exprime a variação da fase com a frequência; $|H(w)| = A2 / A1$ é o módulo da função de transferência $H(w)$, exprimindo, em amplitude, a relação entrada/saída. Deste modo, a função de transferência do sistema é uma grandeza complexa, que à frequência w, apresenta o módulo $|H(w)|$ e fase $\phi(w)$, isto é

$$H(w) = |H(w)|\, e^{j\,\phi(w)}$$

A largura de banda, a frequência superior e inferior de corte são parâmetros habituais que caracterizam o comportamento em frequência de um sistema linear.

A caracterização temporal, através de ondas quadradas, degraus de Heaviside ou impulsos rectangulares, é frequentemente utilizada para testar não só o comportamento temporal do sistema, mas também para avaliar a sua resposta em frequência. De facto, a observação da resposta às transições rápidas permite qualificar a resposta do sistema às altas frequências, enquanto que a observação da resposta à variação lenta, possibilita a caracterização qualitativa do comportamento do sistema às baixas frequências. Na figura 5 apresentam-se diversas respostas possiveis a uma onda quadrada e identifica-se de uma forma qualitativa o tipo de sistema testado.

Neste parágrafo rever-se-ão alguns sistemas básicos, realçando-se os aspectos mais importantes no estudo da instrumentação. Será estudada a resposta temporal e em frequência de circuitos com funções de transferência de primeira ordem (circuitos RC passa-baixo e o passa-alto). Para cada um deles, será definido um conjunto de parâmetros caracteristicos mais importantes.

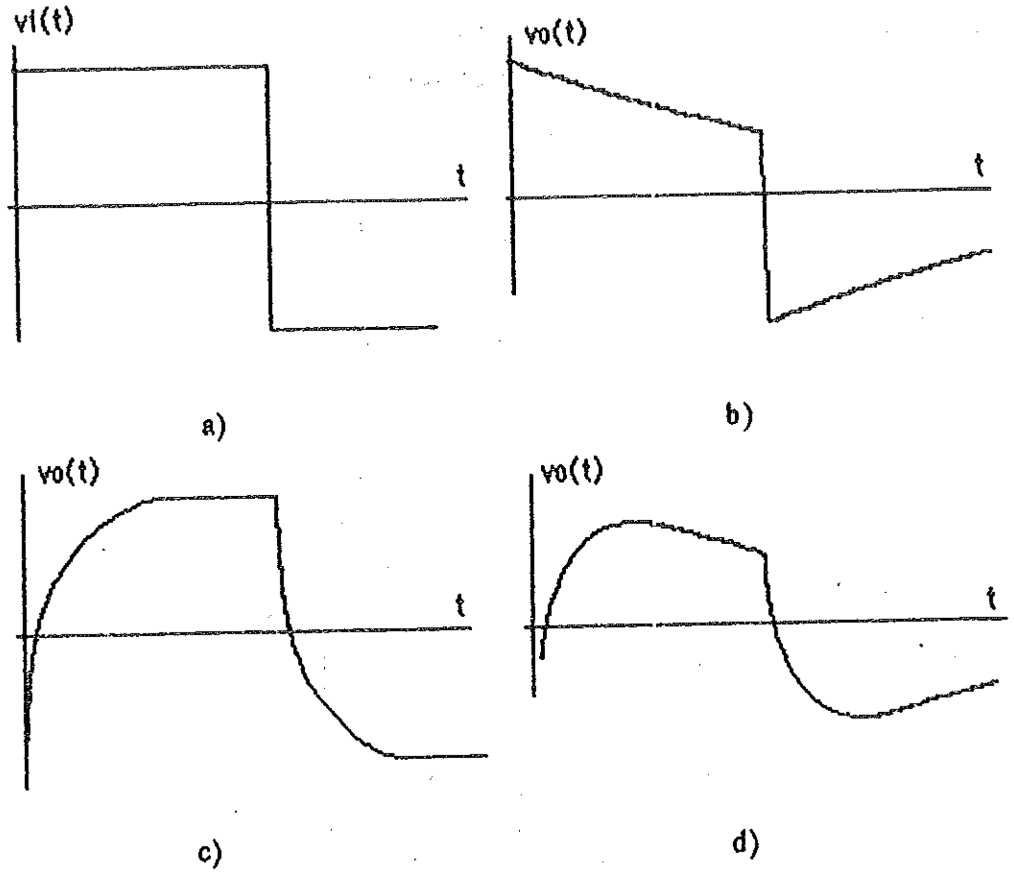

Figura 5. Resposta a uma onda quadrada de diversos tipos de filtros:
a) entrada e respostas a b) passa-alto; c) passa-baixo; d) passa-banda.

2.1.1 Circuito RC passa-alto

A função de transferência H(s), do circuito RC passa-alto (figura 6.a) é

$$H(s) = \frac{Vo(s)}{Vi(s)} = \frac{s\tau}{1 + s\tau}$$

onde Vi(s) e Vo(s) são, respectivamente, as transformadas de Laplace de vi(t) e vo(t). O parâmetro τ é a constante de tempo, tendo a expressão $\tau = R\,C$.

- <u>Resposta em frequência</u>

Em regime sinusoidal, isto é, para $s = jw = j2\pi f$, a função de transferência é

$$H(f) = \frac{Vo(f)}{Vi(f)} = \frac{jf}{f1 + jf} \qquad \text{onde } f1 = \frac{1}{2\pi\tau}$$

O módulo e a fase da função de transferência H(f) apresentam as expressões: