



## Introdução às Telecomunicações

Departamento de Engenharia Eletrotécnica  
Secção de Telecomunicações  
Mestrado integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores  
Licenciatura em Engenharia Informática

Grupo: \_\_\_\_ n° \_\_\_\_ e \_\_\_\_

\_\_\_\_\_

### 1º Trabalho de Laboratório

**Objetivo Geral: Familiarização com o osciloscópio, geradores de funções.**

**ATENÇÃO: O material que vai utilizar é bastante oneroso, não existem componentes sobresselentes e acidentes como sobre tensões ou curto-circuitos podem danificar irremediavelmente uma bancada de trabalho.**

**Siga as instruções dos relatórios e pense bem sempre que não houver indicações completas, antes de efetuar ligações.**

Leia e faça o Ponto 0 **ANTES** da aula de laboratório. À entrada da aula pode-lhe ser pedido este enunciado com o ponto 0 executado. Resista à tentação de copiar os resultados porque depois não entenderá muito do que se vai fazer no laboratório.

## Ponto 0 – Explicações preliminares

### dB, Volts, Volts rms e companhia

#### Pergunta: Como converter os dB lidos no analisador espectral do osciloscópio em Volt?

O dB é uma relação adimensional que mede relações entre potências ou tensões. Por exemplo, no caso de ser potências tem-se

$$\text{dB} = 10 \log P_1/P_2$$

se se tiver tensões tem-se

$$\text{dB} = 20 \log V_1/V_2$$

Os analisadores espectrais dos nossos osciloscópios têm uma tensão de referência em que 0 dB correspondem a 1 V rms. Portanto,  $V_2$  igual a 1 V rms.

Aqui entra a tensão em rms, que diz respeito à parte não contínua do sinal.

Para sinusoides a relação é de raiz de 2. Isto é,

multiplica-se uma tensão rms por raiz de 2 e obtém-se a tensão do sinal.

Vamos então a casos concretos sobre mudar dB em Volts, pois aparecem em vários sítios neste e no 6º trabalho.

-3 dB lidos no analisador espectral provenientes de uma onda sinusoidal dão o seguinte

Divide-se por 20 e eleva-se à base 10.

Dá 0,707 V rms

Multiplica-se por raiz de 2 e dá 1 V

Outro exemplo

10,8 dB lidos no analisador espectral provenientes de uma onda sinusoidal dão o seguinte

Divide-se por 20 e eleva-se à base 10.

Dá 3,47 V rms

Multiplica-se por raiz de 2 e dá 4,9 V

Para facilitar todos estes cálculos foi executado um programa que está disponível nos computadores do laboratório.

**TIRE UMA FOTOCÓPIA DESTA PÁGINA PARA A USAR NO 6º TRABALHO**

## Espectro de amplitude de um sinal

Já foi estudado que a série de Fourier de um sinal periódico é dada pela seguinte expressão:

$$g_p(t) = a_0 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[ a_n \cos\left(\frac{2\pi n t}{T_0}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi n t}{T_0}\right) \right] \quad (1)$$

Esta expressão é inteiramente válida e a partir dela podemos calcular a amplitude que a componente de X Hz tem (assumindo que está definida, isto é, que  $X = n f_0 = n/T_0$ ).

O cálculo complexo apareceu, com a expressão complexa da série de Fourier, para termos uma formulação mais compacta. A dedução foi simples como está mostrado na sequência de expressões seguintes, pois usaram-se as fórmulas de Euler, e tirou-se partido da simetria dos termos relativamente a zero visível na Eq. 5:

$$\cos(a) = \frac{1}{2} [\exp(ja) + \exp(-ja)] \quad (2)$$

$$\sin(a) = \frac{1}{2j} [\exp(ja) - \exp(-ja)] \quad (3)$$

substituindo os cosenos e os senos na Eq. 1 e pondo em evidência exponenciais com a mesma potência, tem-se a seguinte expressão

$$g_p(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ (a_n - j b_n) \exp\left(\frac{j 2\pi n t}{T_0}\right) + (a_n + j b_n) \exp\left(-\frac{j 2\pi n t}{T_0}\right) \right] \quad (4)$$

as duas parcelas da soma dentro dos parêntesis retos são conjugadas uma da outra. Note-se também a seguinte relação

$$\sum_{n=1}^{\infty} \left[ (a_n + j b_n) \exp\left(-\frac{j 2\pi n t}{T_0}\right) \right] = \sum_{n=-\infty}^{-1} \left[ (a_n - j b_n) \exp\left(\frac{j 2\pi n t}{T_0}\right) \right] \quad (5)$$

Se definirmos outro coeficiente,  $c_n$ , relacionado com  $a_n$  e  $b_n$  do seguinte modo

$$c_n = \begin{cases} a_n - j b_n, & n > 0 \\ a_0 & n = 0 \\ a_n + j b_n, & n < 0 \end{cases} \quad (6)$$

então podemos simplificar a Eq. 4 para a seguinte forma

$$g_p(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n \exp\left(\frac{j 2\pi n t}{T_0}\right) \quad (7)$$

em que

$$c_n = \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} g_p(t) \exp\left(-\frac{j 2\pi n t}{T_0}\right) dt \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (8)$$

Repare bem nas várias expressões. Uma segunda virtude da expressão 7 é que, embora seja uma função de t (tempo) podemos fazer os gráficos na frequência com o módulo,  $c_n$ , para as frequências  $n/T_0$ . Dito de outro modo, é muito fácil desenhar o espectro de amplitude e de fase.

Mas repare também num pequeno pormenor. Para uma frequência de, por exemplo, 600 Hz (imaginando que 600 é múltiplo da frequência fundamental e, portanto, existe), o valor da expressão 1 dá, por exemplo 30 Volt. Enquanto que na expressão

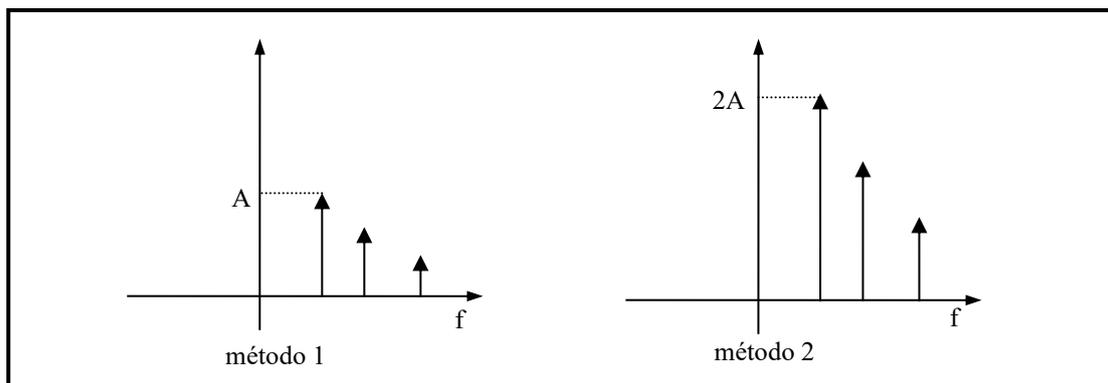
7 dá 15 Volt. **METADE!** Para ter o verdadeiro valor usando a expressão 7 tem de considerar também a frequência -600Hz. Isto é, a verdadeira amplitude de 600 Hz na expressão 7 tem de somar a componente de 600 Hz e a de -600 Hz!!!!

De onde veio este fator de metade? Veio da fórmula de Euler, mas principalmente da expressão 5 que fez passar os índices do somatório de 0 até  $+\infty$  para de  $-\infty$  até  $+\infty$ .

Quando estamos a falar de sinais reais o espectro de amplitude é simétrico relativamente ao eixo dos  $y$ . O problema agora que se põe é como é que os instrumentos representam o espectro de amplitude? Podem representar apenas a parte positiva do espectro (pois a negativa é simétrica) usando a expressão 7. Ou podem representar a parte positiva usando a expressão 1 e, neste caso, é o espectro total pois pela expressão 1 não existem frequências negativas.

**A diferença entre as duas reside nos valores das amplitudes: pelo primeiro método os valores de amplitude são metade dos valores de amplitude representados pelo segundo método.**

A figura seguinte pretende mostrar esta diferença:



Desde que se perceba o que estamos a fazer, ambas as representações são válidas. É preciso é entender o que o instrumento de medida faz. No caso dos osciloscópios do laboratório de Introdução às Telecomunicações, **eles usam o segundo método** (a expressão 1). Isto quer dizer que se fizermos as contas usando a expressão 7 (que é o habitual em IT) então temos de multiplicar os valores teóricos obtidos por 2 para termos a amplitude real naquela frequência.

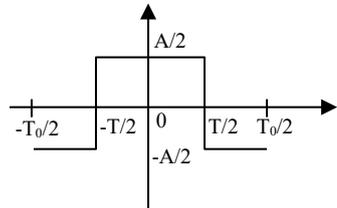
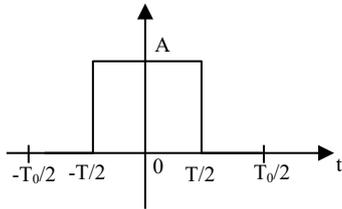
**Atenção que isto não se aplica à componente DC que não é coberta pela expressão 5.**

## Ponto 0 – Preparação do Laboratório

Este problema é necessário para efetuar a aula de laboratório. Vá escrevendo os vários passos da dedução de modo a perceber todo o processo.

### Problema 1. Cálculo da expressão da Transformada de Fourier

Calcule os coeficientes das séries de Fourier dos sinais periódicos obtidos por repetição dos pulsos representados em baixo. (NOTE que o da esquerda é trivial e está coberto no livro. O da direita difere apenas por uma componente DC).



**Problema 2.** Cálculo dos valores de algumas harmónicas. Considerando um *duty cycle* de 25%, e o valor de  $A=10$ , concretize as expressões anteriores para as quatro primeiras harmónicas. Cuidado que as figuras acima parecem representar um *duty cycle* de 50%. No caso de um *duty cycle* de 25% existe amplitude em 0 Hz para os dois casos. Isto é, nenhum dos dois tem o valor médio do sinal a zero. Calcule também para o caso de um *duty cycle* de 50%.



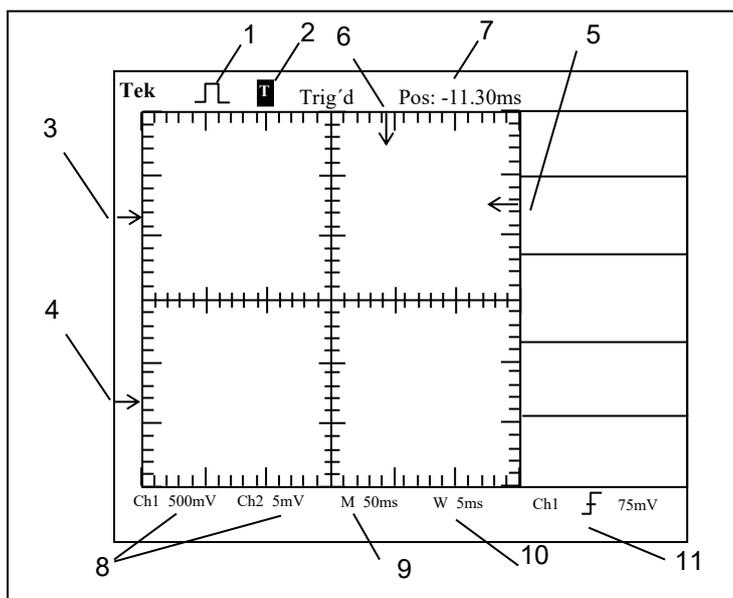
## Ponto 1 - Osciloscópio Digital

O osciloscópio deste laboratório é um osciloscópio digital, muito mais fácil de trabalhar do que um analógico, mas suscetível de tomar "decisões" erradas para certos casos mais patológicos de sinais de entrada.

1. Ligue o osciloscópio.
2. Depois de deixar que se efetuem os auto-testes iniciais escolha a língua de trabalho - Carregue no botão "UTILITY" e carregue depois no botão da linguagem até aparecer o "Português".
3. **Verificação funcional do osciloscópio.** Ligue um cabo *ponta de prova - BNC* ao canal 1. Ligue a ponta de prova e o fio de referência às duas argolas logo à esquerda da entrada do canal 1. Carregue no botão de "AUTOSSET" e espere alguns segundos. Deve visualizar um trem de pulsos quadrados com uma frequência de 1 KHz e aproximadamente 5 Volt.
4. **Blocos do osciloscópio:**
  - 4.1. **Visor:** Uma figura do visor está esquematizada em baixo. Existe uma barra vertical de opções ao alto à direita. Cada item desta barra pode ser alterado carregando nos botões respetivos, tal como fez para a escolha da linguagem. Normalmente o primeiro item modifica o que pode ser modificado nos itens de baixo.

O símbolo 1 representa o tipo de aquisição que o osciloscópio está a fazer. Existem três modos diferentes: O modo "**AMOSTRA**" faz a aquisição por amostragem até 1 G amostras por segundo. Apenas um ponto é amostrado nos intervalos de aquisição do visor que podem ir até 2.500, dependendo da escala temporal escolhida. É o modo padrão. O modo "**DETEÇÃO DE PICO**" amostra o valor de tensão máximo e o valor de tensão mínimo em cada intervalo de aquisição. É útil para eliminar efeitos indesejáveis e pequenas imperfeições. O modo "**MÉDIA**" tem em atenção amostras anteriores (4, 16, 64 ou 128) para ponderar a amostra presente. É utilizado para reduzir ruído aleatório e o sinal aparece com uma linha mais fina. Para mudar o tipo de aquisição carregue no botão "ACQUIRE" e seleccione os vários modos para ver o efeito! Volte a colocar no modo "AMOSTRA". O símbolo 2 indica o estado do disparo - se há uma fonte adequada de disparo ou se a aquisição foi interrompida.

Existem quatro setas no écran. As setas 3 e 4 são os zeros dos canais 1 e 2. Podem ser alteradas mexendo no botão regulador dos blocos de controlo vertical. Mexa nesses botões para ver o efeito! A seta 5 representa o valor para o qual se efetua o disparo do osciloscópio. Altera-se com o botão regulador na coluna de "TRIGGER". Se esse valor sair dos valores da onda, tem-se um problema de disparo. Se estiver mesmo no extremo da onda também se tem problemas. Experimente alterá-lo para ver o efeito! Finalmente a quarta seta, a 6 na figura ao lado, indica a posição em que se está a fazer o disparo horizontal. Normalmente deve estar a ser feito no flanco ascendente da onda. Seleccione o menu de disparo (do bloco de controlo de disparo - *trigger*) e altere o segundo item para fazer com que o disparo se faça no flanco descendente, vendo o efeito no visor. Coloque novamente no flanco ascendente. A informação 7 mostra a diferença (no tempo) entre a quadrícula principal (que por definição é zero) e a posição do disparo. Rode o botão de posição do bloco horizontal para ver o efeito!



Na parte de baixo do écran o campo 8 indica quanto vale cada quadrícula em Volt para cada canal. O seu valor pode ser alterado com o botão "Volts/Div" do canal respetivo. Altere o valor para o canal 1! O campo 9 indica quanto vale em tempo cada quadrícula horizontal (o eixo dos tempos). Altere esse valor usando o botão "Sec/Div" da coluna de controlo horizontal. O símbolo 10 mostra o ajuste da base de tempo da área da janela. O último símbolo, o 11, indica qual a fonte que está a ser utilizada para o disparo, a inclinação selecionada para o disparo e o valor numérico do nível que se definiu para o disparo (o tal da seta 5). A última linha de baixo do visor serve para mostrar mensagens de interesse momentaneamente.

Finalmente, nas colunas de controlo verticais existem botões de menu para colocar o menu respetivo na barra vertical à direita. O menu "MATH", que está a meio das colunas de controlo vertical vai ser particularmente interessante para se poder ver a Transformada de Fourier da onda. Mais abaixo vamos ver como funciona.

No caso de necessitar de realizar conversões para valores eficazes e/ou dB e vice-versa, pode utilizar para esse efeito o programa "conversor" disponibilizado que realiza as seguintes operações:

- Conversão para valores eficazes

- Conversão de valores eficazes para valores não eficazes
- Conversão para dB
- Conversão de dB para unidades lineares.

4.2. **Cursores:** É possível ter leituras mais precisas do que simplesmente olhar para a onda e tentar perceber qual o seu valor. Essas leituras fazem uso de cursores e da barra à direita. Vamos ver primeiro os cursores de tensão.

Carregue no botão "CURSOR" e escolha no item "Tipo" o valor de tensão. No item origem escolha o canal 1. Para mover um dos cursores use agora o botão da coluna de controlo vertical do canal 1 e para mover o outro use o da coluna 2. Coloque um cursor na extremidade superior do trem retangular e o outro na extremidade inferior. O valor da diferença entre os dois cursores, e o valor absoluto de cada um deles é mostrado na barra à direita. Registe estes três valores para a sua onda

Delta: \_\_\_\_\_ Cursor 1: \_\_\_\_\_ Cursor2: \_\_\_\_\_

Para se proceder agora a uma medida no tempo mude o item "Tipo" para "Tempo". Coloque um cursor no início do período e outro no fim. Meça a diferença, e os valores absolutos de cada um

Delta: \_\_\_\_\_ Cursor 1: \_\_\_\_\_ Cursor 2: \_\_\_\_\_

4.3. **Medidas:** A funcionalidade que falta ver nesta primeira introdução ao osciloscópio é o botão "MEASURE". Carregue nesse botão para ativar o menu na parte direita. O primeiro item seleciona o que pode ser mudado nos outros itens. Selecione o campo "Origem" e selecione todos os outros itens para o canal 1. Selecione depois o primeiro item para "Tipo" e escolha algumas medidas que pode fazer nos itens inferiores. Para cada uma das hipóteses (por exemplo, frequência, período, etc.) explique sucintamente o que significam e qual o valor que obteve:

Frequência: \_\_\_\_\_

Período: \_\_\_\_\_

Médio: \_\_\_\_\_

Pico a pico: \_\_\_\_\_

T. subida: \_\_\_\_\_

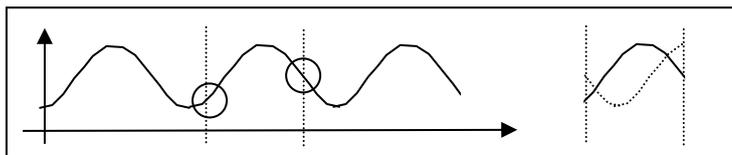
T. descida: \_\_\_\_\_

Larg. Pos: \_\_\_\_\_

Larg. Neg: \_\_\_\_\_

5. Está a chegar ao fim a visita guiada ao osciloscópio

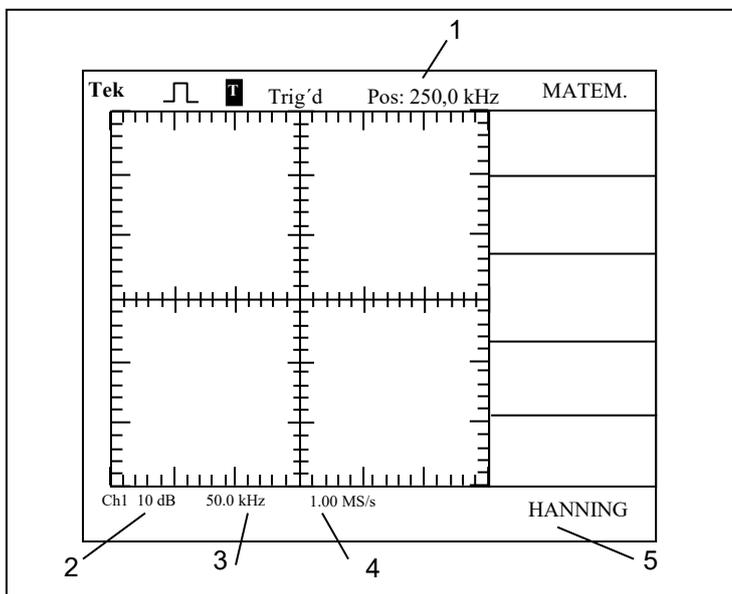
6. **Vamos ver agora o bloco de análise espectral.** O osciloscópio tem um problema mais ou menos grave na análise espectral. A onda amostrada numa certa janela temporal pode terminar com um certo valor de tensão e começar com outro na janela seguinte (como está mostrado na figura em baixo). Isto acontece sempre que o tamanho da janela de tempo não é múltiplo do ciclo da onda! Quando isto acontece a forma de onda na janela temporal seguinte não é exatamente igual à anterior e é como se houvesse descontinuidades na forma de onda temporal do sinal (na parte da direita da figura tentou-se ilustrar o problema colocando a janela seguinte, a ponteadado, sobreposta à janela atual da parte esquerda da figura). Isso significa um salto na tensão e a introdução de componentes de muito alta frequência estragando qualquer análise. Para evitar essa situação foram inventados três algoritmos de "ajuste" das tensões ao terminar uma janela e começar a seguinte para que a onda não apresente esses problemas.



**BEM VINDO AO MUNDO REAL, DEIXANDO O AMBIENTE ARTIFICIAL DO SIMULINK!!!!**

Existem três algoritmos possíveis: o algoritmo RETANGULAR que não faz nada e existem essas componentes de alta frequência (é bom para formas de onda que não apresentem descontinuidades); os outros dois algoritmos modificam de algum modo a onda na parte final da janela e na parte inicial da janela seguinte para evitar o salto. O algoritmo de HANNING tem uma exatidão maior na frequência, mas é mais pobre na exatidão da magnitude das harmônicas; o algoritmo FLATTOP tem uma exatidão melhor na magnitude das harmônicas, mas é menos bom na exatidão da frequência. Vamos utilizar normalmente o algoritmo de HANNING.

Para entrar no modo de análise espectral carregue no botão de menu "MATH". Selecione o algoritmo de HANNING e o canal 1. O visor no modo FFT (*Fast Fourier Transform*) tem cinco informações diferentes do visor em modo de tempo, como está representado na figura ao lado. A informação 1 indica a frequência da quadrícula central do visor. A informação 2 indica a escala vertical em dB por divisão (0 dB = 1  $V_{RMS}$ ). A informação 3 indica a escala horizontal em frequência por divisão. A informação 4 indica a taxa de amostra em número de amostras por segundo (pode ser alterada com o botão "Sec/Div" no bloco de controlo vertical). Finalmente, a informação 5 indica que algoritmo se está a usar. Atendendo a que a onda de pulsos quadrados tem uma frequência de 1 kHz modifique as escalas para ver bem o seu espectro.



No ponto seguinte, com a introdução do gerador de funções, far-se-ão medidas mais precisas...

7. Desligue a ponta de prova das duas argolas.

## Ponto 2 - Gerador de Funções

O gerador de funções deste laboratório pode gerar ondas até aos 2 MHz. Na parte frontal, tem à esquerda um botão vermelho para se ligar o equipamento e um LED para indicar que está ligado. Tem depois sete teclas, em cima, com a indicação da frequência. Estas sete teclas (em que apenas uma pode estar selecionada a cada momento) representam saltos de potências de dez, na frequência. São chamadas de **décadas**. Quando o botão giratório da esquerda estiver em 1.0, a onda gerada pelo gerador corresponde à indicação da tecla selecionada. O botão giratório permite multiplicar essa frequência por valores de 0.1 até 2.0 possibilitando varrer a frequência totalmente desde 0.1 Hz até 2 MHz. O botão seguinte (andando para a direita) serve para inverter a onda que se selecionou. Os três botões seguintes permitem escolher a forma de onda que se quer: pulsos quadrados, pulsos triangulares ou uma onda sinusoidal. O último botão (o mais à direita) serve para atenuar a saída do gerador em 20 dB.

Na parte de baixo do painel frontal existem mais alguns comandos. No bloco "FUNCTION" o primeiro botão à esquerda controla a *duty cycle* da onda. Na sua posição para a esquerda (em "CAL") o gerador produz uma onda com um *duty cycle* de 50%. Tirando o botão dessa posição pode-se produzir uma onda com um *duty cycle* diferente. O segundo botão serve para colocar uma componente dc no sinal. Tal como o botão está, nenhuma componente dc é adicionada. Para a adicionar (quer seja uma componente dc negativa ou positiva) tem de puxar o botão e rodá-lo. Se adicionar uma componente dc muito elevada em valor absoluto pode saturar a saída do gerador de funções e a onda é cortada pela amplitude máxima. O terceiro botão serve para controlar a amplitude do sinal gerado. Se o puxar existe uma atenuação precisa de 20 dB no sinal.

Os últimos dois blocos contêm fichas. A primeira, VCF (*Voltage-controlled frequency*) é uma entrada. Serve para controlar a frequência do gerador a partir da tensão do sinal que lá se coloca. Pode-se colocar sinais com tensões entre os -10 Volt e os +10 Volt. O efeito, mais uma vez, é modificar a frequência da onda gerada pelo gerador em função da tensão à entrada do VCF. Isto é, se o gerador estiver a produzir uma onda numa certa frequência, e a tensão de entrada no VCF for grande, a frequência da onda produzida muda proporcionalmente. Este mecanismo é precisamente o estudado na modulação de frequência, na parte de introdução da disciplina!!!! É um modulador de frequência muito básico. De um ponto de vista mais concreto, se a tensão no VCF for de +10 Volt a frequência do sinal de saída desce três décadas, ou 1000:1. Se a tensão no VCF for de -10 Volt a frequência do sinal de saída cresce três décadas, ou 1:1000.

As outras duas fichas são de saída. A mais à direita pode gerar ondas quadradas, triangulares ou sinusoidais com um máximo de 20 Volt pico a pico. A ficha com a legenda "Pulse" gera apenas ondas quadradas (a seleção do tipo de ondas fica desativada).

1. Ligue então o gerador de funções, selecione uma onda quadrada de 4 kHz, 50 % de *duty cycle*, sem componente dc, e com uma amplitude muito baixa (deve-se iniciar sempre com uma tensão muito baixa para não colocar os circuitos logo numa situação possível de saturação).
2. Ligue um cabo *BNC - 2 crocodilos* à saída principal. Ligue a ponta de prova do canal 1 do osciloscópio e carregue no botão "AUTOSSET" para ver a onda. Com o auxílio dos menus de medidas e cursores regule a onda quadrada para ter uma frequência de 4 kHz e uma amplitude pico a pico de 10 Volt.
3. Verifique noutra janela de medida se existe uma componente dc residual na onda ou não. Escreva o seu valor e o nome da medida que usou para a determinar. Meça também a potência *rms* (*root-square mean*) da onda (como se lembra da parte teórica, esta potência tem a ver com a componente ac do sinal).

CH1 \_\_\_\_\_ : \_\_\_\_\_

CH1 RMS \_\_\_\_\_ : \_\_\_\_\_

4. Calcule **teoricamente** qual a Transformada de Fourier de uma onda quadrada de 4 kHz, com 50 % de *duty cycle*, e com uma amplitude de - 5 Volt a 5 Volt (Isto é, volte a copiar os cálculos que fez antes da aula de laboratório no ponto 1.1).

5. Vamos verificar então o cálculo teórico. Selecione a análise espectral do osciloscópio e regule as escalas até estar satisfeito com a forma representada. Desenhe essa onda e comente o que obteve comparando com os resultados teóricos

---

---

---

---

6. Tire agora algumas medidas interessantes, usando os cursores. Meça os valores das quatro primeiras harmônicas e compare os valores lidos com os obtidos pela via teórica. Use o algoritmo FLATTOP pois está a medir magnitudes.

7. Finalmente coloque alguma componente dc no sinal e veja o efeito que isso tem a nível espectral. Comente

---

---

---

---

8. Volte a visualizar a onda no tempo e coloque uma componente dc tal que a onda tenha os valores de 0 Volt e + 10 Volt. Existe agora uma componente dc clara na onda final, com o consequente efeito a nível espectral. Calcule **teoricamente** a transformada de Fourier desse trem de ondas quadradas (Isto é, copie os resultados de 1.1).

9. Volte a visualizar no osciloscópio o espectro do trem de ondas quadradas, comente com o resultado teórico e meça o valor da componente de 0 Hz, o valor da primeira harmónica e a relação entre elas. Faça o mesmo para a primeira harmónica em relação à segunda.

---

---

---

---

---

---

10. Retire a componente dc. Aumente agora a tensão da onda um pouco.  
11. Visualize o espectro da onda no osciloscópio e  
12. Desligue os cabos e o gerador de funções.