

Introdução às Telecomunicações

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

Grupo: ____ nº ____ e ____

7º Trabalho de Laboratório

Objetivo Geral: Modulação digital por codificação de pulsos– PCM (*Pulse Code Modulation*) e DPCM (*Differential Pulse Code Modulation*).

ATENÇÃO: O material que vai utilizar é bastante oneroso, não existem componentes sobresselentes e acidentes como sobretensões 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.

Este trabalho começa com um texto com explicações preliminares.

Existe depois o ponto 0 com o enunciado de um problema teórico que é necessário para a execução das experiências e que deve ser **resolvido e preenchido antes da aula** de laboratório. À entrada na aula este ponto será **verificado pelo docente**. Não se esqueça que é relativamente simples verificar quem executou o exercício e quem copiou os resultados. Este tipo de informação será levado em conta na avaliação final da parte de laboratório.

A terceira parte contém a descrição das experiências a efetuar.

Explicações preliminares

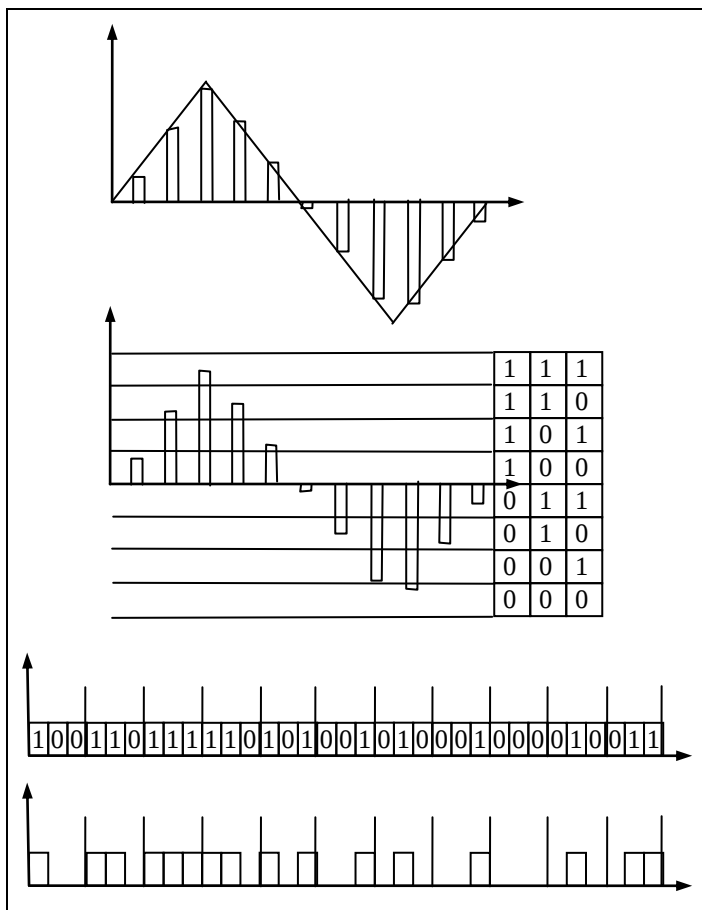
Um sinal PAM gerado por uma amostragem é um sinal discreto no tempo e contínuo na amplitude. Para o converter para um sinal digital têm de se efetuar duas operações: **quantização** e **codificação**. Estas operações estão explicadas no livro recomendado e devem ser estudadas antes de efetuar as experiências deste trabalho. Muito sucintamente, a quantização **discretiza** os valores da amplitude e provoca um erro não recuperável – **erro de quantização**. Podemos ter uma **quantização linear** ou uma **quantização logarítmica (companding)**.

Podia-se depois enviar os pulsos em amplitude (tal como no caso de PAM) mas esse tipo de sistema ficaria muito vulnerável ao ruído. Assim, é melhor enviar a informação de uma forma mais robusta ao ataque do ruído. Para tal codificam-se os intervalos de quantização usando **símbolos binários** – 0 ou 1. Dependendo do número de intervalos, vão ser precisos mais ou menos bits. Por exemplo, para oito intervalos são precisos 3 bits. A cada conjunto de 3 bits vamos chamar de **código**.

O último passo é decidir como os símbolos 0 ou 1 são representados em tensão na linha e definiram-se os **códigos de linha**. Existem muitos códigos de linha diferentes, e estudaram-se alguns nas aulas teóricas.

Um bastante simples (e com algumas limitações) é o **código unipolar NRZ (Non return to zero)** em que o símbolo 1 tem um valor de tensão durante todo o tempo de bit, T_b , e o símbolo 0 não tem tensão durante todo esse tempo.

A figura ao lado mostra as várias operações para se modular em PCM (*Pulse Code Modulation*). A primeira figura representa um modulador PAM (já experimentado no trabalho anterior). A segunda figura mostra o modulador PCM com a quantização e a codificação. A terceira figura já coloca os símbolos em série pela ordem como eles vão ser transmitidos, e finalmente, a quarta, mostra o código de linha de cada símbolo se se usar o código unipolar NRZ.



Veja na segunda figura os erros de quantização que se cometem por considerar o meio de cada intervalo em vez do valor real do pulso.

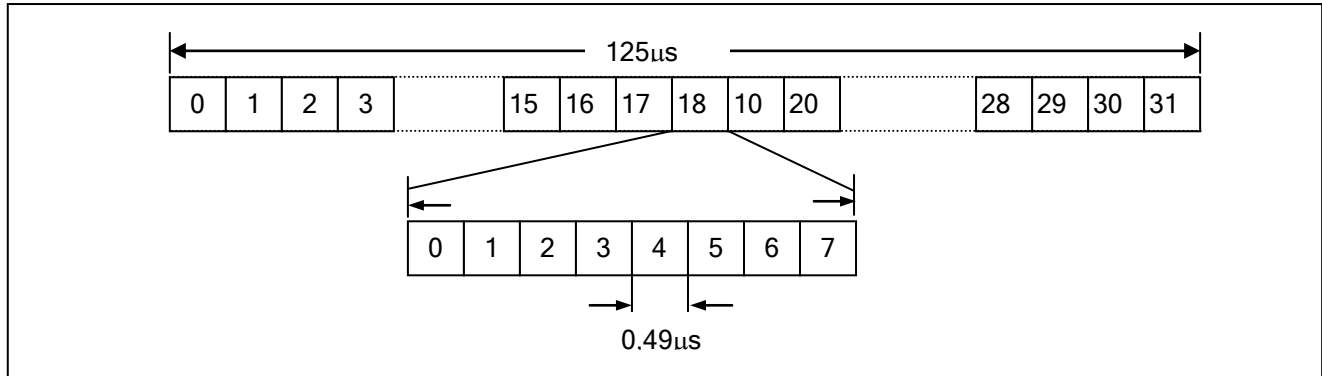
A desmodulação PCM tem as operações inversas: começa com a conversão dos códigos de linha em símbolos binários, o agrupamento de símbolos para formarem o código do intervalo (que no exemplo é de três bits) e a geração de pulsos PAM com a tensão igual a metade do intervalo respetivo. Depois existe um filtro passa-baixo para “arredondar” os pulsos e formar uma onda contínua.

Companding – o termo *companding* é a aglutinação das palavras *compression* e *expansion*. Existe para que, com o mesmo número de bits se possa melhorar a relação sinal-ruído (SNR) nos intervalos mais críticos (os de menor tensão). De facto, a SNR é mantida constante nos vários intervalos de quantização. Num sistema linear, em que todos os intervalos são iguais, a SNR é pior nos intervalos em que o sinal tem uma tensão pequena. É fácil de perceber porquê: nos intervalos em que a tensão é grande o valor do erro de quantização é pequeno **relativamente** ao valor da tensão. Nos intervalos em que a tensão é pequena, metade do intervalo é quase o valor do próprio sinal. A ideia é, então, ter o tamanho dos intervalos em que a tensão do sinal é pequena (os mais próximos do eixo dos xx) mais pequenos e os intervalos em que a tensão do sinal é maior, maiores. Esta **compressão** dos intervalos mais próximos de 0 V tem de ter uma **expansão** no recetor para não criar distorções no sinal. A função para fazer a compressão é uma função logarítmica, mas na prática é aproximada por 13 treços lineares para facilitar o fabrico dos circuitos que a desempenham.

Multiplexagem por divisão temporal – Do mesmo modo do que a modulação PAM, o PCM também é apropriado para se fazer multiplexagem por divisão temporal. Na Europa existe um sistema, E1, muito usado comercialmente. É um sistema que transmite 30 canais telefónicos mais um canal de sincronização e ainda mais um canal para sinalização telefónica (taxação, desligar chamadas, etc.). Cada canal telefónico transmite sinais na gama de frequências entre os 300 Hz e os 3.400 Hz, usando 256 intervalos e, portanto, oito bits por código. Para limitar os sinais a estas frequências usam-se filtros de *pre-alias* antes da amostragem, e de acordo com o teorema da amostragem deveríamos ter uma frequência de amostragem de 6.800 Hz. Como não existem filtros ideais que cortem logo na frequência de corte, usa-se uma frequência

de amostragem um pouco maior – de 8 kHz. Assim, as amostras estão distanciadas umas das outras de 125 μ s. No E1, entre duas amostras de um canal telefónico têm de ser amostrados os outros 31 canais. Como cada amostra usa 8 bits, existem $C=f_p \cdot 8 \cdot 32$ bits transmitidos em cada segundo. Para uma frequência de amostragem, f_p , de 8 kHz o ritmo de bits por segundo de um E1 é de 2,048 Mbps. A figura em baixo mostra a estrutura da **trama de pulsos** do E1, e os oito bits de uma amostra de um canal telefónico. O canal 0 tem, alternadamente, um sinal de alarme ou um sinal de sincronização usado para o reconhecimento da trama (no caso do recetor se dessincronizar, no momento em que o recetor começa a funcionar, etc.). O canal 16 contém sinais de sinalização (controlo) da rede (taxação, ligar chamadas, desligar chamadas, etc.).

A grande vantagem de PCM-TDM relativamente a PAM-TDM é a sua maior imunidade a fatores perturbantes (como o



ruído) e a possibilidade de se fazer a recuperação do sinal por **regeneração**, em vez de **amplificação**.

A **modulação DPCM** (*Differential Pulse Code Modulation*) foi estudada nas aulas teóricas e está explicada no livro recomendado. Muito sucintamente, a ideia base desta modulação é que em vez de transmitir o valor da amostra, ou a diferença que o valor da amostra tem relativamente à amostra anterior, o emissor transmite o erro que se comete ao se assumir que a amostra é igual a uma previsão que ambos, o emissor e o recetor, fazem tendo em conta as amostras anteriores. Se a previsão for boa o erro deve ser muito pequeno e, de facto, está-se a transmitir um sinal com uma potência média muito menor e a poupar bits por segundo (porque são precisos menos intervalos de quantização) para a mesma qualidade.

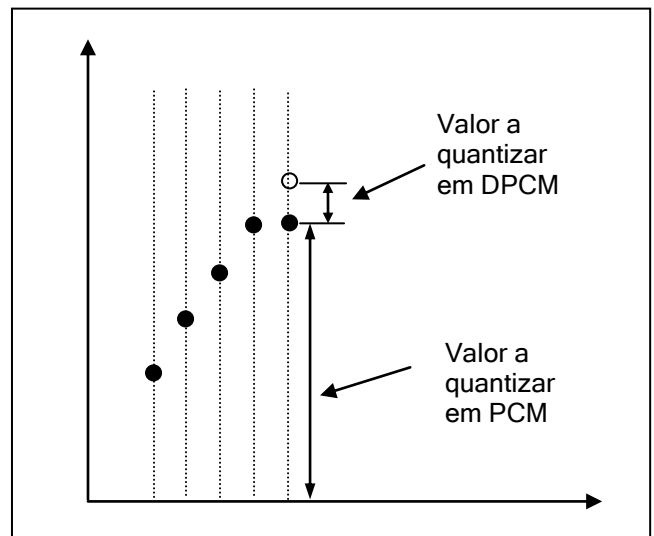
Na figura ao lado estão representadas quatro amostras de um sinal. Baseado nessas quatro amostras, por exemplo, o emissor (e o recetor) vão fazer uma previsão de quanto vai valer a amostra atual. Essa previsão está representada a branco. Ora, por acaso, o sinal estabilizou e o seu valor realmente foi a amostra a negro. Assim, a diferença entre a previsão e o valor real é o que vai ser quantizado e transmitido ao se usar DPCM.

Convém referir que se pode ter qualquer algoritmo para a previsão, desde que seja igual nos dois lados. Se ela falhar muito, os erros a transmitir serão maiores... Claro que quanto melhor for a previsão menor vai ser a amplitude do erro. Para se ter uma boa previsão é necessário conhecer a estatística do sinal. Consequentemente, o princípio do DPCM é baseado na possibilidade de se ser capaz de prever com um certo sucesso a ocorrência de um certo valor para a amplitude da próxima amostra PAM.

O processo é semelhante à previsão do tempo – baseado no tempo dos últimos dias e do dia de hoje prevê-se como será o dia de amanhã. Para simplificar o processo vai-se trabalhar com sinais triangulares que são fáceis de prever pois o declive é constante (mudando de vez em quando).

Uma característica importante para que o DPCM trabalhe bem é que exista grande **correlação** entre as amostras do sinal. Um exemplo de um certo tipo de correlação existe nas sequências de letras em palavras. Por exemplo, em Português existe uma forte correlação de que a seguir à letra “q” venha a letra “u”. O “u” a seguir ao “q” é um pouco redundante e se utilizássemos um processo semelhante ao DPCM poder-se-ia enviar zero pois o emissor preveria que depois de um “q” apareceria um “u”, o mesmo acontecendo com o recetor, pelo que o erro seria zero, e era isso que se transmitia!

Este tipo de técnicas preditivas que estamos a estudar para a voz são fortemente utilizadas em imagem como métodos de compressão de imagem. Se uma imagem é constituída por muitos **pixels**, é natural que se estivermos a ver uma parede, ou o céu, os **pixels** mudem muito pouco de uns para os seus vizinhos, e pode-se assim reduzir substancialmente o volume de dados de uma imagem.



Ponto 0 – Preparação do Laboratório (A efetuar antes da aula de laboratório. Será verificado à entrada da aula)

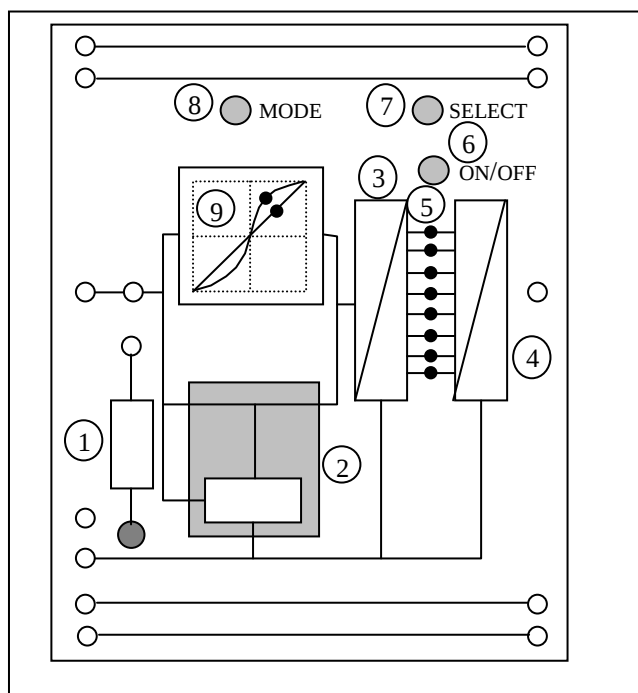
Problema 1:

Na tabela seguinte encontram-se representadas características de 6 sistemas de transmissão. C representa o seu ritmo total de transmissão, f_p representa a frequência de amostragem, m o número de bits que constituem uma amostra e n é o número de canais de transmissão do sistema. Complete a tabela, preenchendo os valores que faltam nas células da tabela. Apresente todos os cálculos efetuados:

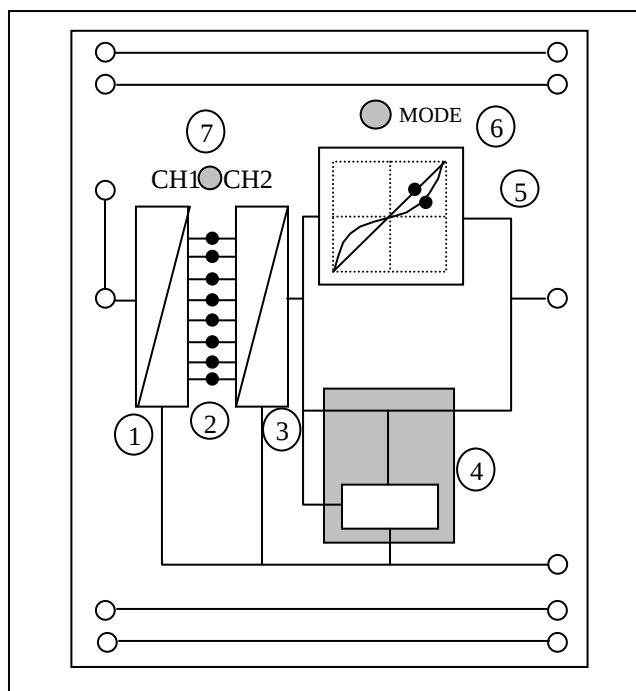
Sistema	C [Kb/s]	m [bits]	n [canais]	f_p [Hz]
A	2048		32	8000
B	4096	8	64	
C	230,4	16		2400
D	2560		16	10000
E		64	1	2000

O Equipamento

Modulador PCM e DPCM – O modulador PCM e DPCM está ilustrado na figura ao lado. Este modulador pode modular sinais tanto em PCM como em DPCM. No caso do PCM pode fazer quantização linear ou quantização logarítmica. O botão 8 serve para selecionar entre estes modos de funcionamento. Pressionando sucessivamente o botão tem-se a seguinte sequência de operação: PCM linear, PCM logarítmica e DPCM. O dispositivo 1 é uma fonte de tensão DC (com um potenciômetro de 10 posições) e serve para experiências de modulação estática. O dispositivo 2 é o filtro de predição para o DPCM. Os módulos 3 e 4 são conversores analógico-digital e paralelo-série. Entre eles existem oito LEDs, 5, para visualizar os oito bits. O botão 6 permite mudar o valor de um bit selecionado permitindo experiências com erros em bits, ou uma redução artificial da resolução (usar cinco bits em vez de oito). O botão 7 permite selecionar o bit. Cada vez que é premido vai mudando para o bit de maior ordem. O botão 6 permite considerar o bit selecionado, ou não. Finalmente o equipamento 9 é o compressor com os 13 segmentos lineares a aproximar a função logarítmica.

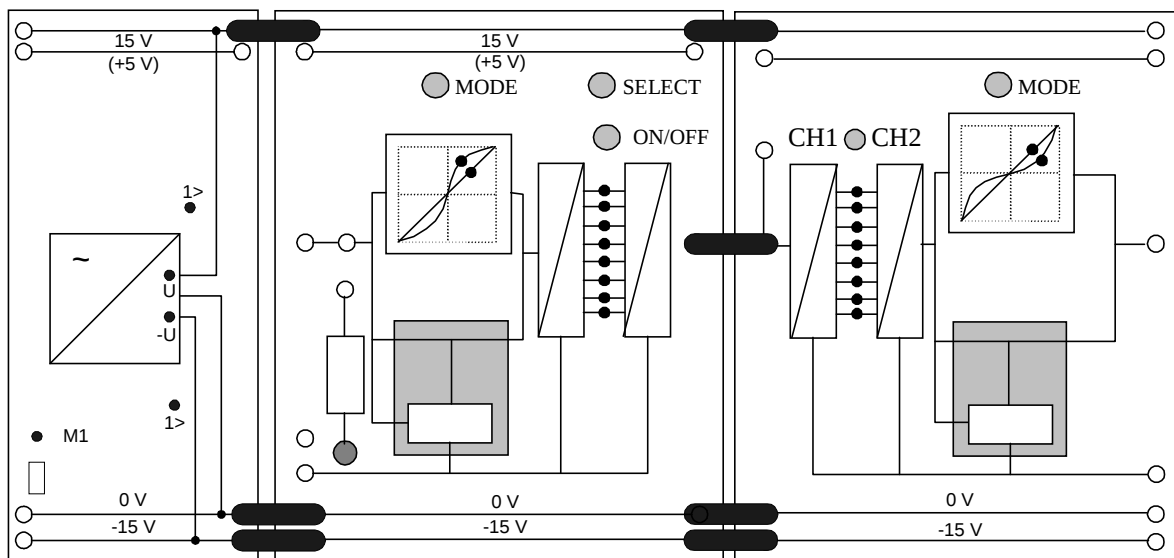


Desmodulador PCM e DPCM – O desmodulador PCM e DPCM está ilustrado na figura ao lado. Tal como o modulador, permite desmodular PCM e DPCM. Os blocos 1 e 3 são o conversor série-paralelo e o conversor digital-analógico. No meio, 2, tem LEDs a indicar o estado dos oito bits. O dispositivo 4 é o filtro de predição para o DPCM. O bloco 5 é o expansor que tem um comportamento inverso do compressor do modulador. O botão 6 é equivalente ao botão 8 do modulador e permite a escolha do modo do desmodulador, trabalhando da mesma forma (sequência de modos). Finalmente, o botão 7 permite trocar a indicação dos LEDs entre os bits do canal 1 e do canal 2.



Experiências

Faça as ligações como está ilustrado na figura em baixo. Com a fonte de alimentação desligada alimente os circuitos com a terra (0 V), +15 V e -15 V. Chame o assistente para verificar as ligações e ligue a fonte de alimentação. Premindo o botão MODE escolha o modo PCM quantização linear tanto no modulador como no desmodulador (quando o LED apropriado se acender). Coloque todos os bits ativos no modulador (para isso prima o botão SELECT que faz piscar LED a LED começando no de cima. Para cada LED a piscar carregue rapidamente em ON/OFF para o fixar aceso. Passe ao LED seguinte). No desmodulador selecione o canal 2 (CH2) com o botão CH1CH2.



O presente trabalho consiste nos seguintes pontos:

Ponto 1 – Experiências de quantização e de codificação binária

Em que se vai ver como os intervalos de quantização são definidos para o caso de quantização linear e logarítmica

Ponto 2 –O PCM como método de transmissão

Em que se vai ver o funcionamento completo de um sistema a trabalhar em PCM

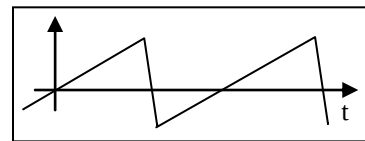
Ponto 3 – DPCM (*Differential Pulse Code Modulation*)

Em que se vai ver o funcionamento completo de um sistema a trabalhar em DPCM

Ponto 1 – Experiências de quantização e de codificação binária

1.1. Quantização linear

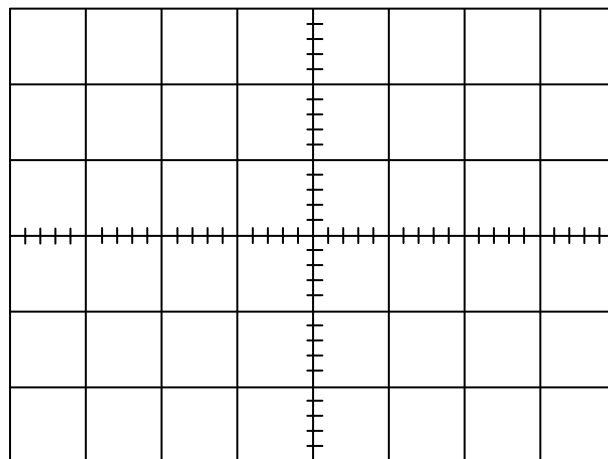
Objetivo: Pretende-se verificar a curva característica do quantizador (uma linha em escada) e o tamanho dos intervalos no caso de quantização linear. O melhor modo de ver essa curva é ter um sinal de entrada que cresça linearmente em toda a gama dinâmica e desça rapidamente. Para isso vai-se utilizar uma forma de onda dente de serra, como está mostrado na figura ao lado (use a onda triangular do gerador de funções com o *duty cycle* no máximo).



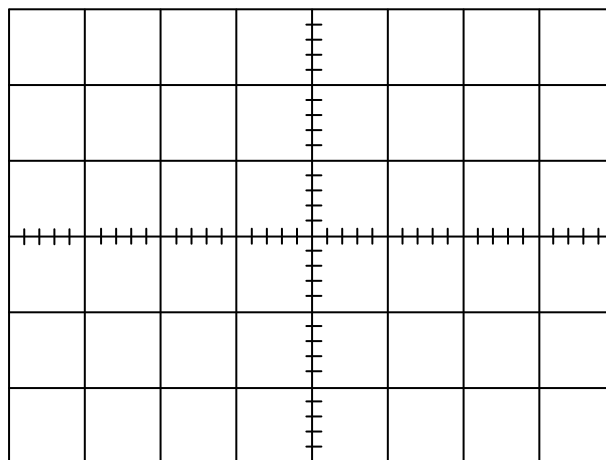
O modo XY do osciloscópio: Nas experiências que se seguem as características deveriam ser registadas ponto-a-ponto. Assim, ir-se-ia crescendo a amplitude do sinal de entrada de $-9,5\text{ V}$ a $9,5\text{ V}$ e medindo a saída em função da entrada (para valores diferentes da entrada no mesmo intervalo de quantização obter-se-iam valores iguais à saída). Usava-se a fonte de tensão que existe nos moduladores PCM (com o número 1 na página 4). Outro modo simples de se obterem estes gráficos (não tão precisos, mas aceitáveis para este trabalho) é visualizá-los no osciloscópio no modo XY. O osciloscópio trabalha normalmente em modo YT (a tensão é exibida verticalmente e o tempo horizontalmente). O modo XY exibe o canal 1 no eixo horizontal e o canal 2 no eixo vertical. Para colocar o osciloscópio no modo XY pressione o botão DISPLAY e escolha o modo no botão “Formato”. Nas alíneas 5 e 6 abaixo interessa medir valores numa escala que vai de -8 V a 8 V – **a gama dinâmica**. Como a característica do quantizador é simétrica, e para se ter uma representação grande, utiliza-se uma onda de entrada dente de serra (com *duty cycle* máximo) na entrada do modulador (e no canal 1) que **varie entre 0 V e 8 V**, e $f_M = 1\text{ Hz}$. Com esta onda vê-se só a parte de sinais positivos, mas a parte de sinais negativos é simétrica.

Procedimentos:

1. Coloque o gerador de funções em 1.000 Hz , para uma onda triangular com $A_M = 8$ (0 V a 8 V). Visualize essa onda no osciloscópio no canal 1. Coloque agora a frequência em 1 Hz . Como a frequência é tão pequena o modo digital do osciloscópio não a consegue apanhar. Terá, manualmente, de aumentar a escala de tempo até visualizar a onda. Esta será a onda U_1 .
2. Coloque esse sinal à entrada do modulador. Visualize que os bits do desmodulador vão crescendo no código binário. O LED mais abaixo é o LED do sinal e deve estar sempre aceso.
3. Ligue agora a saída do desmodulador ao canal 2 do osciloscópio, a esta onda chamaremos de U_2 .
4. Coloque o osciloscópio em modo XY como está explicado acima. Aparece-lhe um ponto a mover-se no écran. Para conseguir perceber o caminho desse ponto tem de fazer com que a persistência do écran seja infinita. Para isso escolha o menu DISPLAY e ponha a PERSISTÊNCIA em infinito. Sempre que quiser “apagar” essa linha e criar outra, retire a persistência e volte a colocá-la em infinito. Com os botões dos cursores do canal 1 e 2 faça com que a linha percorrida pelo ponto fique centrada no écran. Use o botão 1 para deslocar para a esquerda e para a direita e o botão 2 para deslocar para cima e para baixo.
5. Desenhe então essa curva – a curva de U_2 versus U_1 – a característica do quantizador – no diagrama à direita em cima. Não se esqueça que é só a parte positiva.
6. Descative os três bits menos significativos (os de cima, com o auxílio dos botões SELECT e ON/OFF). e volte a repetir a experiência da alínea anterior, desenhando a característica no diagrama à direita em baixo.
7. O que conclui?



Característica da quantização linear com 8 bits



Característica da quantização linear com 4 bits

8. O que significa “quantização linear”?

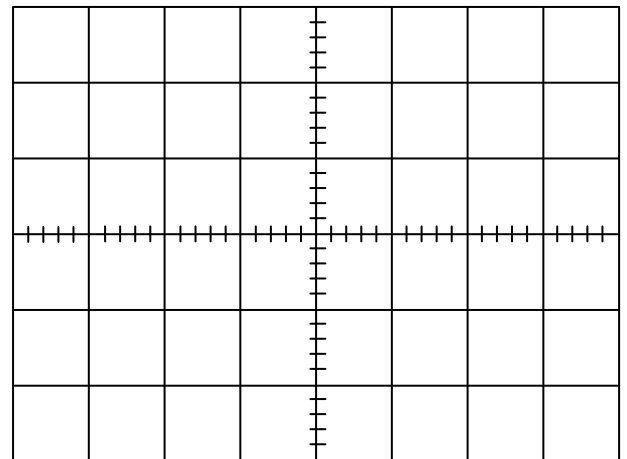
1.2. Quantização não linear (logarítmica)

Objetivo: Pretende-se ver as curvas do compressor e do expansor isoladamente, para depois as ver ao mesmo tempo. Para as ver isoladamente um dos sistemas deve estar em quantização não linear e o outro em quantização linear. Quando for para as ver em conjunto, ambas devem estar em não-linear.

1.2.1. Registo da característica de *companding* – característica do compressor

Prima o botão MODE para colocar o modulador em modo PCM quantização não linear. Deixe ficar o desmodulador em operação linear.

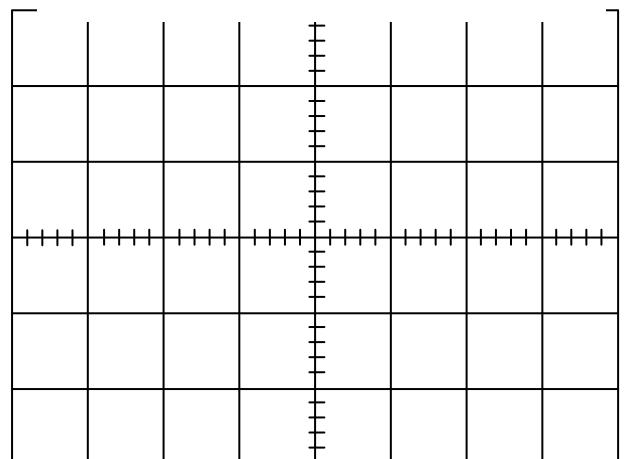
9. Proceda de um modo idêntico ao efetuado para a característica da quantização linear. Desenhe a curva característica do compressor no diagrama à direita. Não se esqueça, mais uma vez, que está a ver apenas a parte positiva.



Característica do compressor na quantização não-linear com 8 bits

10. Descative agora os três bits menos significativos. Desenhe a curva característica do compressor no diagrama à direita. Não se esqueça, mais uma vez, que está a ver apenas a parte positiva.

11. O que conclui?

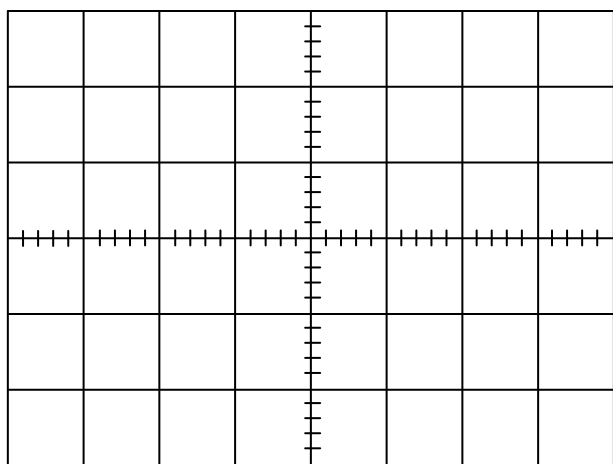


Característica do compressor na quantização não-linear com 5 bits

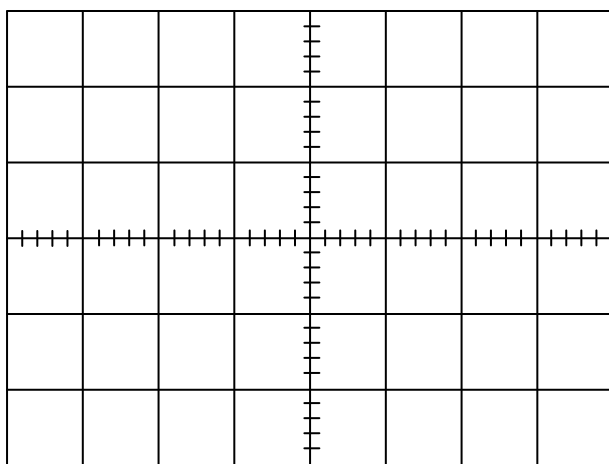
1.2.2. Registo da característica de *companding* – característica do expansor

Para efetuar o registo da característica do expansor coloque o modulador em modo PCM quantização linear e o desmodulador em modo PCM quantização não-linear.

12. Repita as experiências das alíneas 9 e 10 e escreva algumas conclusões



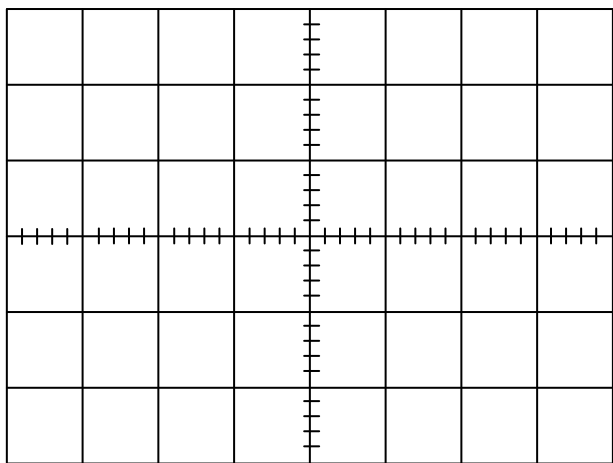
Característica do expansor na quantização não-linear com 8 bits



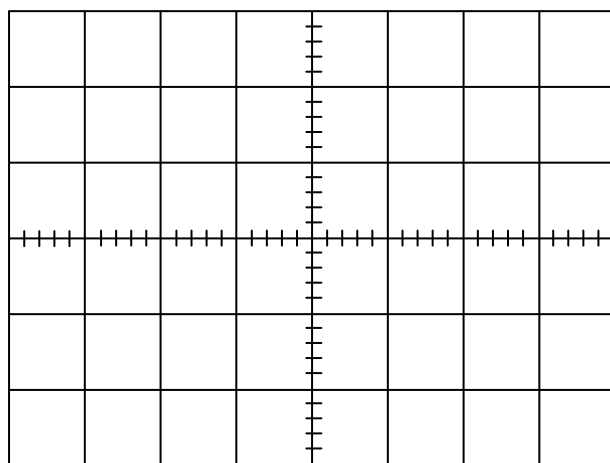
Característica do expansor na quantização não-linear com 4 bits

1.2.3. Registo da característica de transmissão não-linear

13. Nas alíneas anteriores foram efetuadas experiências do compressor e do expansor separadamente. Cada uma dessas funções, sozinhas, levam a distorções do sinal. No entanto, em operação normal elas são feitas simultaneamente. Para efetuar esta experiência coloque ambos o modulador e o desmodulador em modo PCM quantização não-linear. Registe as características do mesmo modo que anteriormente e retire algumas conclusões.



Característica da transmissão não-linear 8 bits



Característica da transmissão não-linear 4 bits

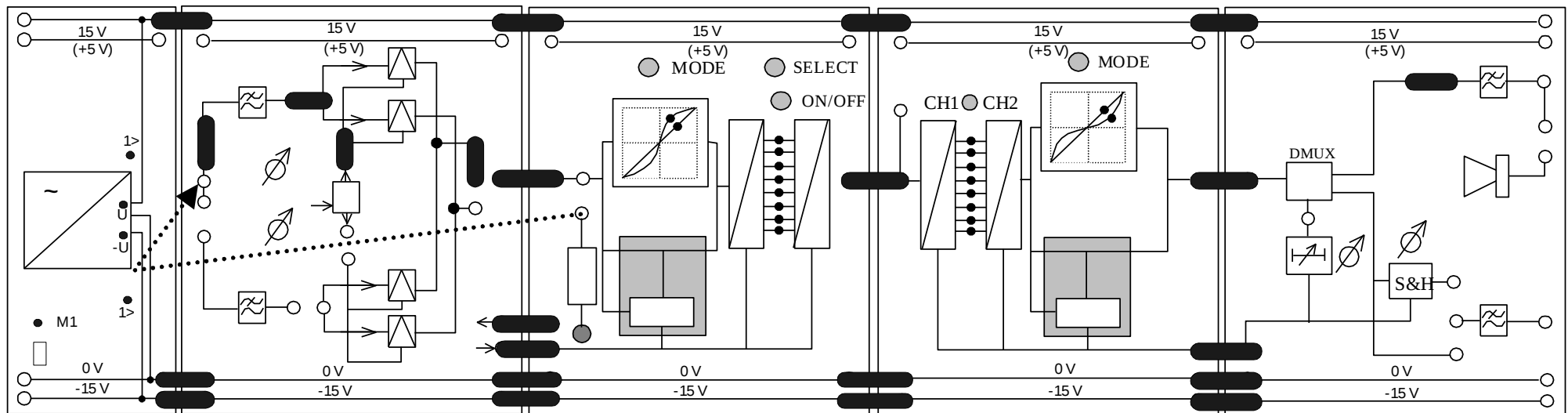
Ponto 2 –O PCM como método de transmissão

Objetivo: Vai-se experimentar agora um sistema de transmissão completo em PCM.

1. Desligue a fonte de alimentação e faça a montagem de acordo com a figura em baixo. Para além disso configure do seguinte modo. No final, chame o assistente e ligue a fonte de alimentação.

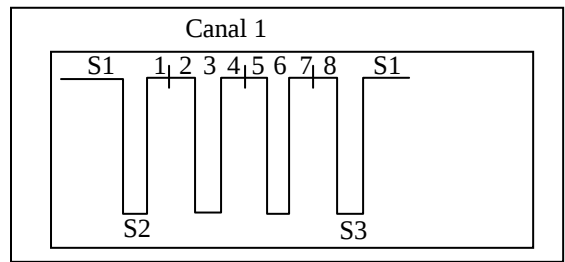
Configuração do sistema PAM	
Frequência de amostragem f_p	PCM
Duty-cycle τ/T_p	PCM
Atraso no multiplexar Δt	Min.

Configuração do sistema PCM	
Modulador PCM	PCM linear
Desmodulador PCM	PCM linear
BITS Ativos	Todos ON
Seleção de canal	“CH 1”

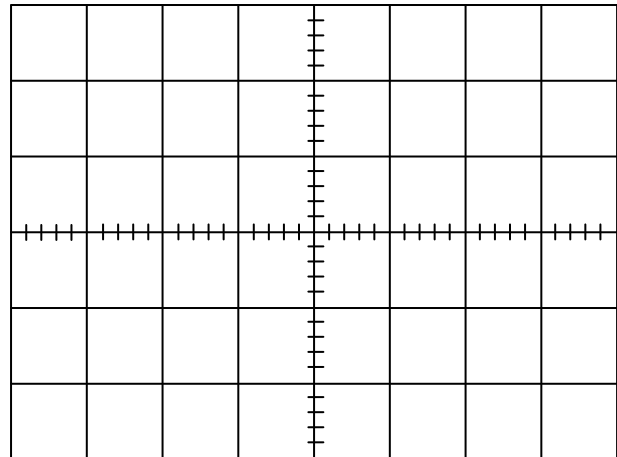


2. Vai-se primeiro experimentar com um valor de tensão constante. Um sinal DC. Para isso ligue a fonte DC do modulador PCM à entrada do filtro passa-baixo do canal 1 do modulador PAM (Como está mostrado na linha a tracejado na figura). Visualize no osciloscópio o sinal de saída do modulador PCM. Como é um sinal DC, vai sempre ficar no mesmo intervalo de quantização e, portanto, o sinal é sempre o mesmo no osciloscópio.
3. Varie um pouco a tensão DC até perceber que existem duas regiões de bits (leia até ao final deste ponto e veja a figura da página seguinte para perceber melhor o que deve encontrar). Tente perceber o significado do que vê no osciloscópio. Existem dois canais PAM que dão entrada no codificador PCM e o codificador vai codificar um e outro.

Cada canal tem uma estrutura de 11 bits. Os oito bits de dados da figura são 11011011. Começa com um START BIT (S2 na figura) (que é sempre “low” para os dois canais). O START BIT vem depois da linha estar em “high” algum tempo com o STOP BIT (S1 na figura). Depois tem os sete bits da magnitude da amostra, começando com o menos significativo, seguidos do oitavo bit que é o BIT DE SINAL. De seguida vem o BIT DE SINCRONIZAÇÃO (S3 na figura) que serve também para identificar o canal (o canal 1 tem este bit ativo em “low”). O último bit é o STOP BIT (que é sempre “high” e serve para marcar a distância mínima entre estruturas de dados). Se variar ligeiramente a tensão DC vê que uma zona do osciloscópio se altera e outra não (os stop, start e bits de sincronização não se alteram e os de dados sim. Para além disso, como só está a usar o canal 1, a zona da estrutura de dados do canal 2 também não se altera (está a transmitir sempre 0 porque não existe tensão à entrada).



4. Coloque a tensão DC da fonte do modulador PCM em 5 V. Desenhe a curva do sinal da saída do modulador PCM (no ponto que está mesmo à entrada do desmodulador PCM) no diagrama ao lado (o que vê no osciloscópio da explicação da alínea anterior). Identifique os bits. Atenção que esta não é uma onda periódica, pelo que das duas uma: ou coloca o disparo, em disparo único do menu TRIGGER; ou usa o botão RUN/STOP para parar o écran. Escreva o código que usou (leia-o no desmodulador PCM).



Sinal de saída do PCM com CH1: 5 V e
CH2: 0 V

5. Determine o ritmo de transmissão C, líquido e bruto, para $f_p = 10$ kHz. Não se esqueça que cada amostra tem 8 bits líquidos, mais 3 bits brutos.

$C_{líquido} =$ bps $C_{bruto} =$ bps

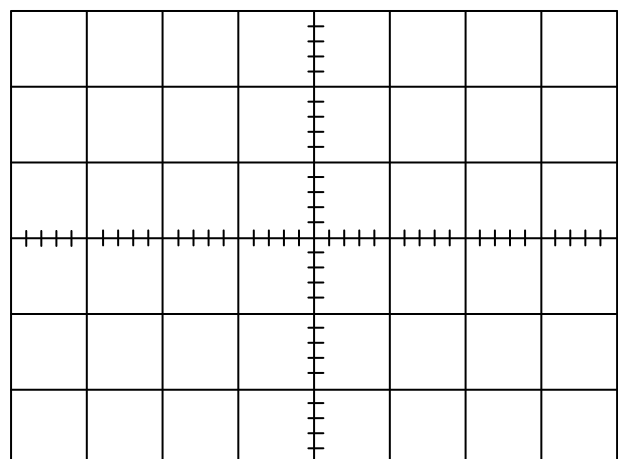
6. Assumindo que a ligação PCM pode ter no mínimo uma duração de bit de $2,7 \mu$ seg e que existem 2 canais, qual a frequência de amostragem máxima por canal para os casos de se usarem 8 e 11 bits?

$f_{máx,líquido} =$ Hz $f_{máx,bruto} =$ Hz

7. Retire a tensão DC da fonte do modulador PCM da entrada do modulador PAM e coloque um sinal sinusoidal com $f_M = 100$ Hz e $A_M = 5$ V (10 V pico a pico). Porque é que não obtém um padrão estável, de amostra para amostra, como o da figura da alínea 4?

8. Para obter um padrão estável coloque momentaneamente a frequência f_M em aproximadamente 0,5 Hz! Que relação temporal existe entre os símbolos PCM e os pulsos de amostragem do modulador PAM?

9. Volte a colocar a senoide em 500 Hz e veja no osciloscópio a onda de entrada e a onda desmodulada. Desenhe-as no diagrama ao lado. Que observações faz?



Sinal sinusoidal de entrada e desmodulado

Ponto 3 – DPCM (Differential Pulse Code Modulation)

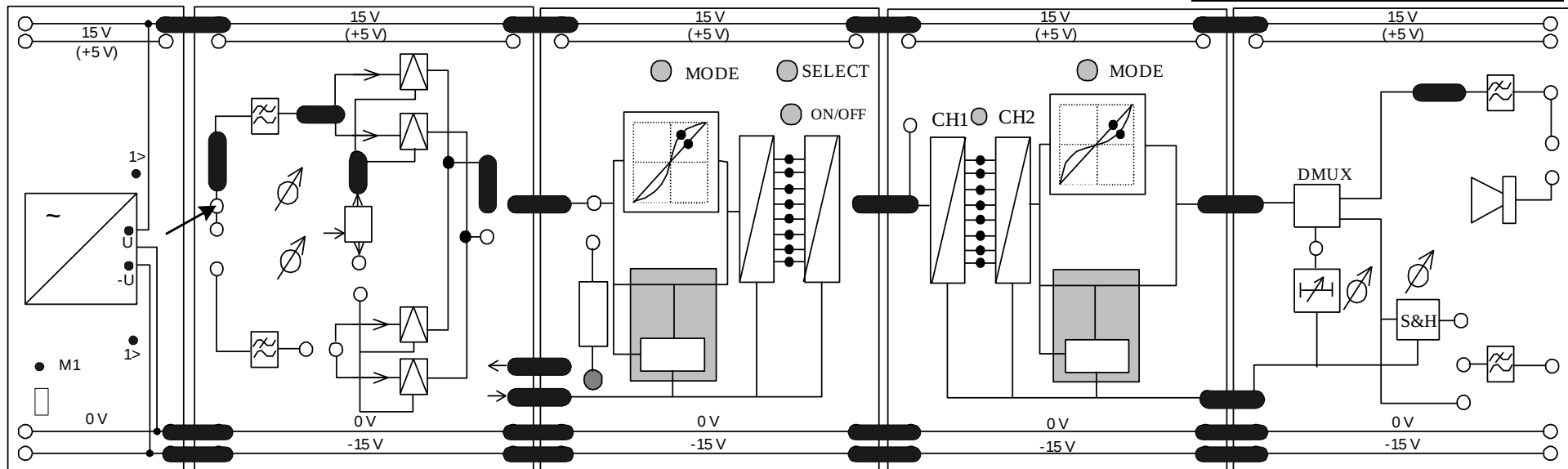
Explicação: O DPCM é um método de redução de redundância. Como se explicou no início deste trabalho, o preditor faz os seus cálculos em função dos valores anteriores. Isto é, tenta prever que valor vai surgir e depois envia o erro do valor real relativamente ao que ele previu (no caso do emissor); ou usa o valor recebido para corrigir o valor que previu em função dos valores anteriores (no caso recetor). As previsões do emissor e do recetor devem ser sempre iguais. É, portanto, muito importante que no início da transmissão ambos os preditores comecem com o mesmo valor. Para se conseguir isso, deve-se fazer o seguinte procedimento aquando da colocação em operação.

1. Ligue a entrada PAM no modulador PCM a 0 V.
 2. Mude o modulador PCM para DPCM
 3. Mude o desmodulador PCM para DPCM
 4. Desligue a entrada PAM do modulador PCM de 0V
 5. Baixe a amplitude do sinal a modular no gerador de funções para 0 V.
 6. Coloque o sinal a modular na entrada PAM do modulador PCM e coloque a amplitude desejada.
- O passo 5 deve ser sempre feito cada vez que se façam alterações aos BITS ACTIVOS. Depois do passo 5 pode-se mudar outra vez a amplitude do sinal.

Atenção aos seis procedimentos explicados em **Explicação**.

Configuração do sistema PAM	
Frequência de amostragem f_p	PCM
Duty-cycle τ/T_p	PCM
Atraso no multiplexer Δt	Min.

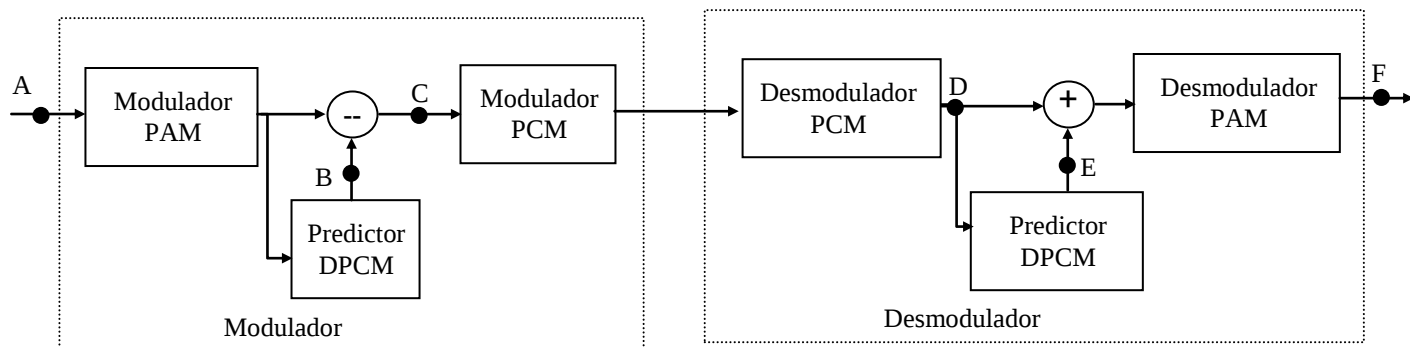
Configuração do sistema PCM	
Modulador PCM	DPCM
Desmodulador PCM	DPCM
BITS Ativos	Todos ON
Seleção de canal	"CH 1"



Procedimentos:

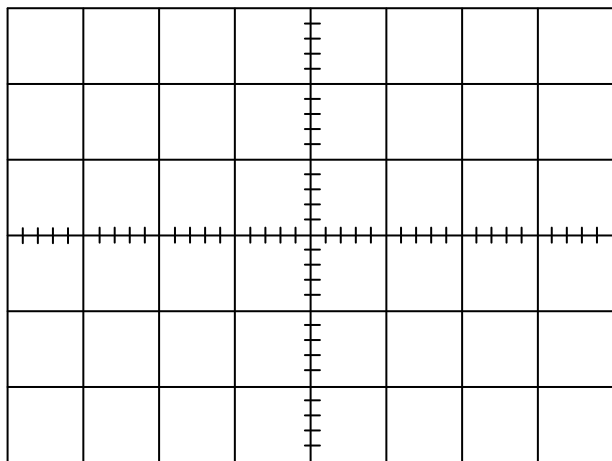
1. Use a montagem mostrada na página anterior, que em termos de ligações é igual à do PCM, mas configure-o com os valores da tabela da página anterior. Coloque um sinal triangular com aproximadamente 500 Hz de frequência e amplitude 4 V (8 V pico a pico) no filtro de entrada do canal 1 do modulador PAM.

Vamos ver o que vai acontecendo ao longo do processo de transmissão, de acordo com os blocos da figura seguinte. Pretende-se visualizar as formas de ondas nos pontos A a F. Se o modulador e desmodulador PCM não introduzir nenhuma alteração, as formas de onda em C e D serão iguais.

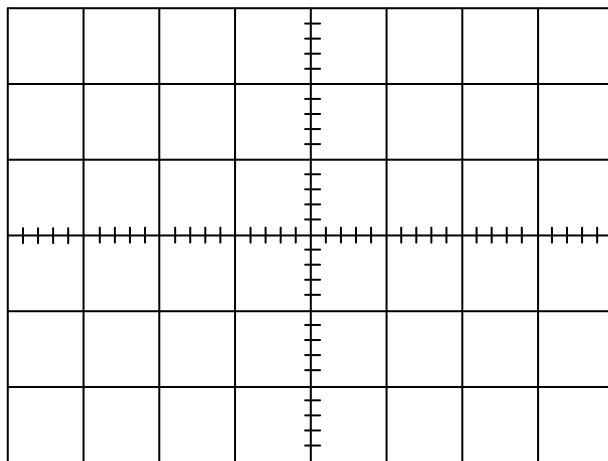


2. Ligue o canal 1 do osciloscópio ao sinal de entrada do modulador PAM. Visualize os seguintes sinais no canal 2 e desenhe as ondas nos diagramas respetivos, escrevendo uma pequena descrição do que desenhou.

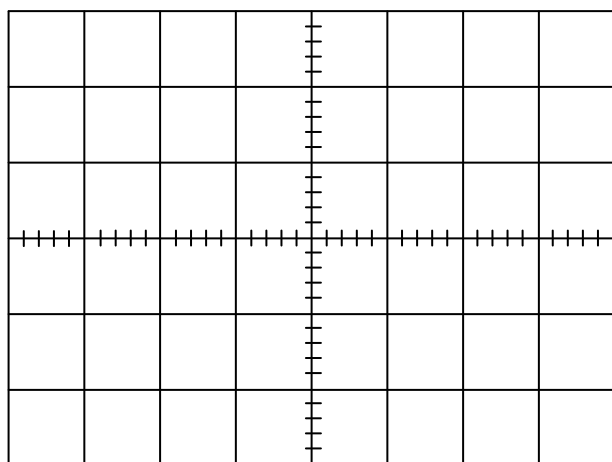
Sinal de entrada PAM - Ponto A



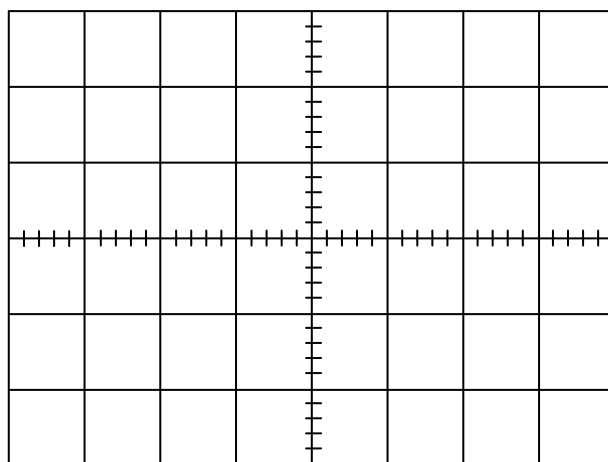
Sinal do predictor do modulador DPCM – Ponto B



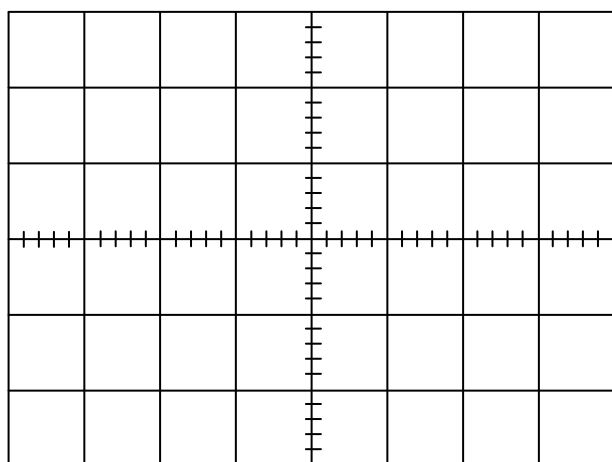
Sinal de saída do modulador DPCM – Ponto C



Sinal de entrada do desmodulador DPCM –
Ponto D



Sinal do preditor do desmodulador DPCM –
Ponto E



Sinal de saída PAM – Ponto F

