

## 1. Introdução

Como o sinal analógico é contínuo no tempo e em nível, contém uma infinidade de valores. E como o um meio de comunicação tem banda limitada, somos obrigados a transmitir apenas um certa quantidade de amostras deste sinal, como enunciado no Teorema de Nyquist. O processo de amostragem é o primeiro passo na geração de sinais PCM(vide Figura 1), onde cada amostra será quantizada e convertida em um código binário para ser transmitida no meio de comunicação. A prática a seguir tem por objetivo observar a geração de sinais PAM e sua reconstituição, bem com sua análise no domínio do tempo e no domínio da frequência.

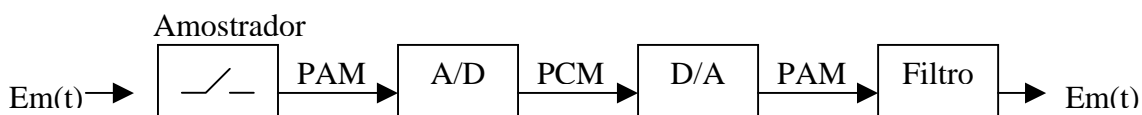


Figura 1 – Digrama de Blocos PCM

## 2. Circuito Amostrador

A Figura 2 mostra o circuito a amostrador que é constituído por dois transistores Q1 e Q2 funcionando como amplificador e chave respectivamente. O sinal modulante  $Em(t)$  (V2) é aplicado na base de Q1, e a função amostra  $Ea(t)$  (V1) é aplicada na base de Q2, que funcionará como uma chave que se abre e se fecha. Utilizaremos um multivibrador estável 555 (Figura 3) para a geração dos pulsos de chaveamento  $Ea(t)$ .

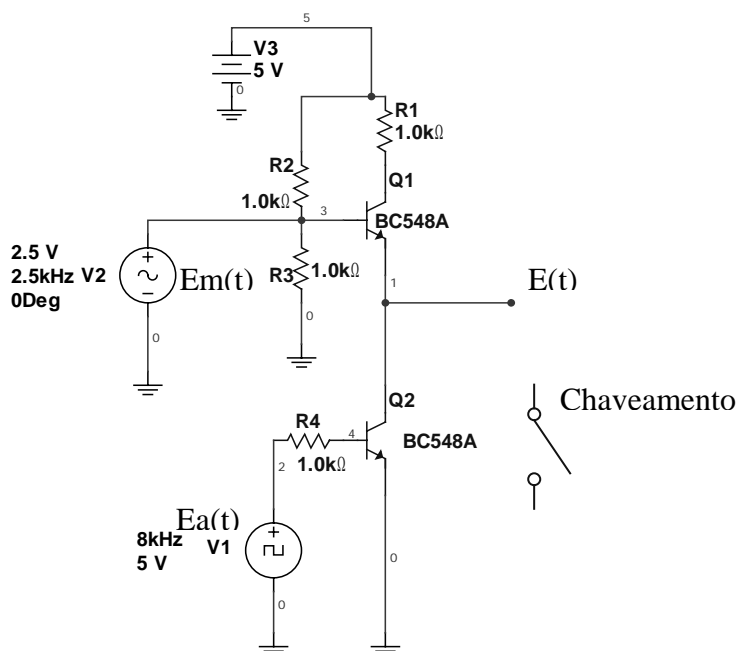
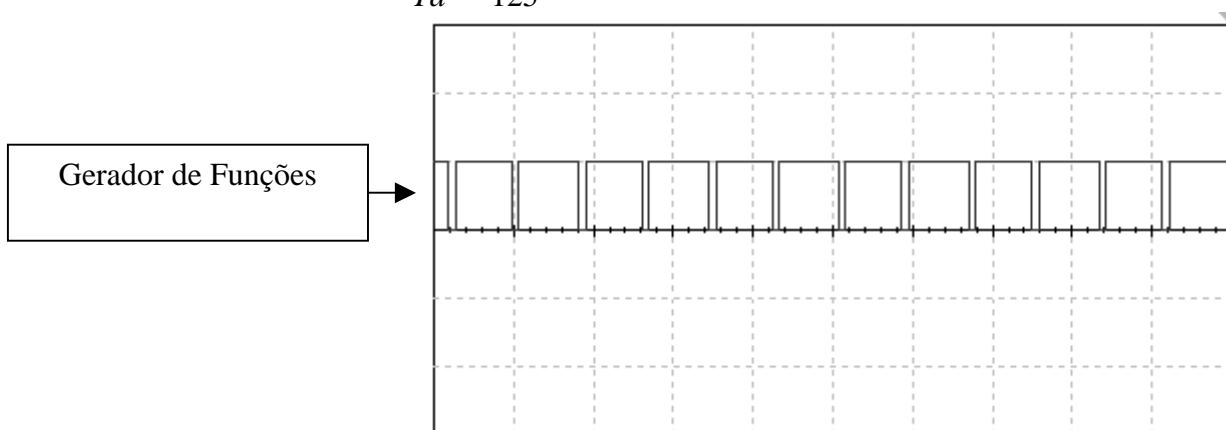


Figura 2 – Circuito Amostrador

O sinal  $E_m(t)$  terá 2.5 Vp (5 Vpp) em cima de um off-set de 2.5 Volts, respeitando a máxima excursão de Q1 que é de 5 volts. O valor DC somado a senóide deve-se ao fato do circuito não trabalhar com valores negativos de tensão.

A frequência de amostragem utilizada será de 8 KHz, com um duty-cycle de aproximadamente 92%. Esse valor deve-se ao fato de que quando  $E_a(t)$  estiver com tensão maior que 0.7 Volts, Q2 estará saturado (chave fechada) fazendo com que a saída  $E(t)$  esteja aterrada, ou seja, 0 Volts. Quando  $E_a(t)$  estiver com tensão menor que 0.7 Volts, o transistor Q2 está cortado (chave aberta), fazendo com que o sinal  $E_m(t)$  seja amostrado por um curto intervalo de tempo. O tempo em que  $E_a(t)$  ficará com 5 volts será de 115µs e com 0 Volts será de 10µs, totalizando um tempo de 125 µs, que equivale a 8 KHz

$$Duty - Cycle = \frac{T_{on}}{T_a} = \frac{115}{125} = 92\%$$



Procedimento Prático: Figura 3 –  $E_a(t)$  - Função Amostra

- 1) Use um gerador de onda quadrada para controlar o chaveamento dos pulsos. Ajuste seu duty-cycle para aproximadamente 95% como mostra a Figura 3.  $T_{off}$  tem aproximadamente 10µs.
- 2) Conecte o gerador de onda quadrada no resistor R4 (Base de Q2)
- 3) Ajuste um outro gerador de função com um sinal senoidal de 2,5Vp, Off-set de 2.5 Volts e frequência de 2.5 KHz. Ligue esse sinal à base de Q1
- 4) Verifique no osciloscópio a saída  $E(t)$ . Deveremos ter nesse ponto um sinal PAM, como mostra a Figura 4

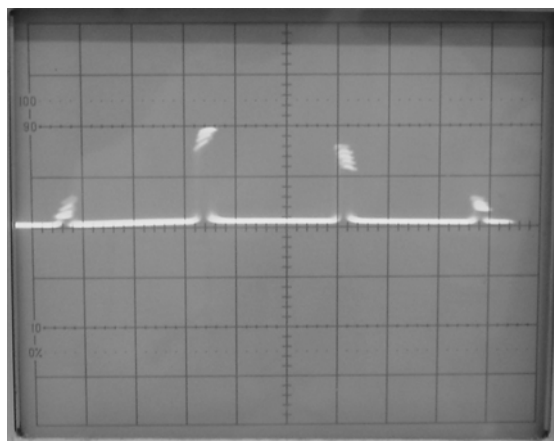


Figura 4 – Sinal PAM

### 3. Espectro do sinal PAM

O sinal de amostragem (que atua na chave) é constituído de impulsos com a frequência de amostragem  $f_a$ , também chamado função pente (ou função amostra). O espectro deste sinal contém raias de mesmo nível e frequência múltiplas inteiras de  $f_a$ , ou seja, **0 Hz (componente contínua),  $f_a$ ,  $2f_a$ ,  $3f_a$ ,  $4f_a$  ...** (até o infinito se a duração do impulso for nula...). O sinal PAM terá portanto estas mesmas raias, porém com as bandas laterais criadas pela modulação em amplitude, como mostra a Figura 5.

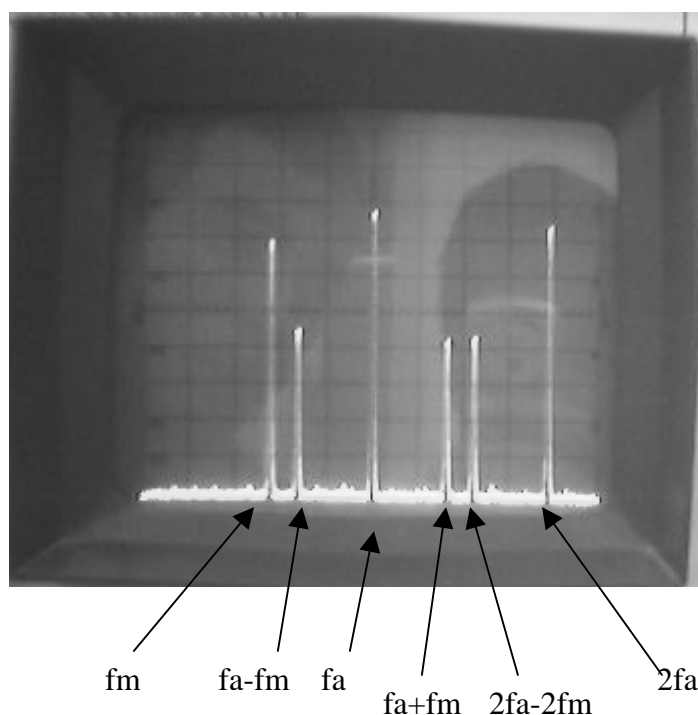


Figura 5 – Espectro do sinal PAM

Note que existe uma banda de guarda entre as bandas laterais  $f_a + f_m$  e  $2f_a - 2f_m$ , isso deve-se ao fato de estarmos amostrando sinal menor que 4 KHz, que é a frequência limite de Nyquist. Dessa forma, não haverá aliasing no sinal reconstituído.

#### 2.1 Verificando o Aliasing no domínio da frequência

Procedimento Prático:

- 1) Coloque em  $E_m(t)$  um sinal de 2.5 KHz
- 2) Aumente gradativamente a frequência de  $f_m$  até que as raias de  $f_a + f_m$  e  $2f_a - 2f_m$  comecem a se sobrepor.
- 3) Perceba que a frequência limite se encontra por volta de 3.7 KHz

### 3. Reconstituição do PAM no domínio do tempo

**Como preencher os espaços vazios entre as amostras PAM ?** Ou seja, como completar corretamente a infinidade de pontos que estão faltando entre as amostras ? **Esta é a função do filtro passa baixo.** A Figura 6 é um exemplo de sinal PAM a ser reconstituído em sinal analógico :



Figura 6 – Sinal PAM

#### 4.1 Resposta impulsional de um filtro passa baixo ideal.

Quando um **filtro passa baixo ideal** é excitado na sua entrada por um **impulso**, o sinal na sua saída tem a forma  **$\text{sen } x / x$** , como mostra a Figura 7

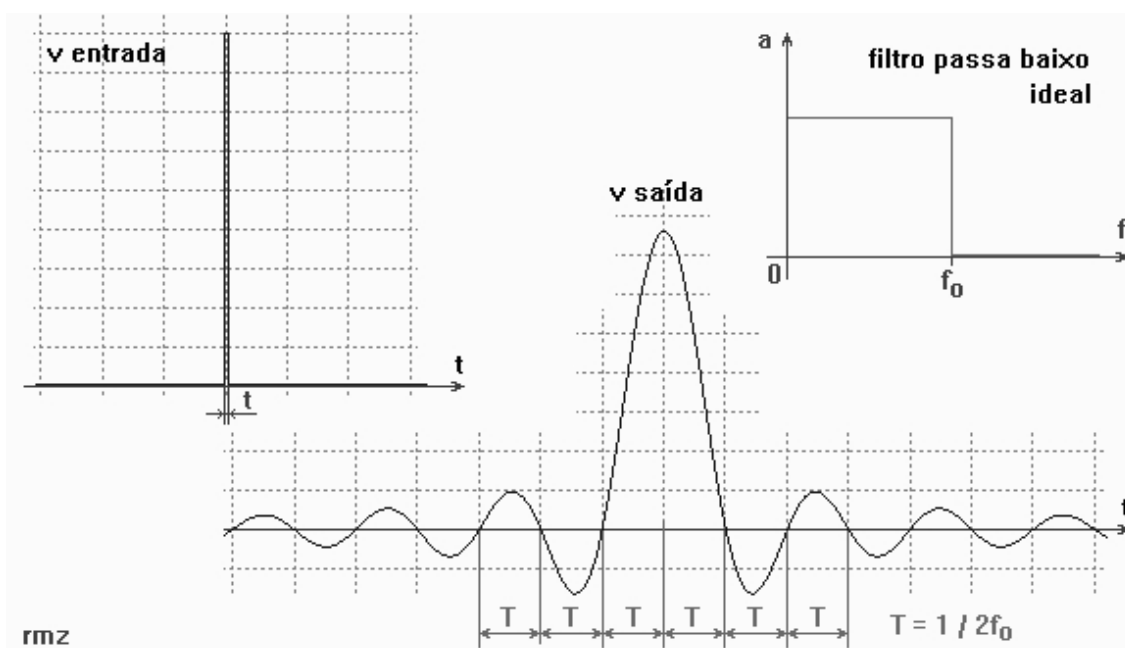


Figura 7 – Resposta impulsional do filtro passa-baixa

Características importantes na resposta impulsional de um filtro passa baixo ideal, com frequência de corte  **$f_0$**  :

- o impulso de entrada é um pulso de curta duração  **$t$**  tal que  **$t \ll 1 / 2f_0$**  ( **$10\mu\text{s} \ll 125\mu\text{s}$** ).
- a amplitude do sinal de saída é proporcional a energia do pulso de entrada, portanto proporcional a amplitude do pulso, desde de que sua duração  **$t$**  seja fixa e dentro do critério acima.
- o sinal de saída tem forma  **$\text{sen } x / x$** , portanto passa por zero em tempos múltiplos inteiros de  **$T = 1 / 2f_0$** , exceto no ponto de máxima amplitude. O tempo  **$T$**  **independe** da duração  **$t$**  do pulso de entrada, desde que  **$t \ll 1 / 2f_0$** .

Se em vez de um único pulso, excitamos o filtro com uma seqüência de pulsos PAM, com cadencia **exatamente igual** a  **$T = 1 / 2f_0$** , então estes pulsos **não interferirão entre si**, pois cada um cairá num ponto zero da resposta impulsional dos seus antecessores e/ou dos seus sucessores. Se o intervalo entre os pulsos PAM não for exatamente  **$T$** , teremos interferência no nível de qualquer pulso pelas respostas individuais dos pulsos anteriores ou posteriores, chamada **interferência intersimbólica I I S**.

## 4.2 Reconstituição do sinal analógico :

A freqüência fundamental dos pulsos PAM, que é a freqüência de amostragem deve ser igual ao dobro da banda passante do filtro passa baixo.

Portanto, o nível de saída do filtro, nos citados pontos de zero, será exatamente proporcional ao nível de cada um dos respectivos pulsos de entrada, não introduzindo nenhum erro nos níveis dos pulsos PAM. Nos intervalos entre os pontos zero da resposta  $\text{sen } x / x$ , o sinal de saída do filtro será o somatório de todos os níveis positivos e negativos das respostas impulsivas presentes neste intervalos, reconstituindo exatamente a forma de onda analógica original que esta faltando entre as amostras.

No caso de reconstituição de sinal, já que a freqüência de amostragem foi definida na geração e não podemos mais altera-la, podemos concluir que **a freqüência de corte do filtro passa baixo ideal deve ser exatamente igual a metade da freqüência de amostragem**, para que os **pulsos PAM possam ser transformados em uma onda analógica continua e sem interferência intersimbólica**.

A Figura 8 mostra como um sinal PAM, de amostras descontínuas, é transformado no sinal analógico original,. observe cada pulso PAM e a respectiva resposta impulsional do filtro, para cada pulso tomado individualmente, sem os outros. A curva envoltória é a resultante do somatório, a cada instante, das respostas impulsivas individuais.

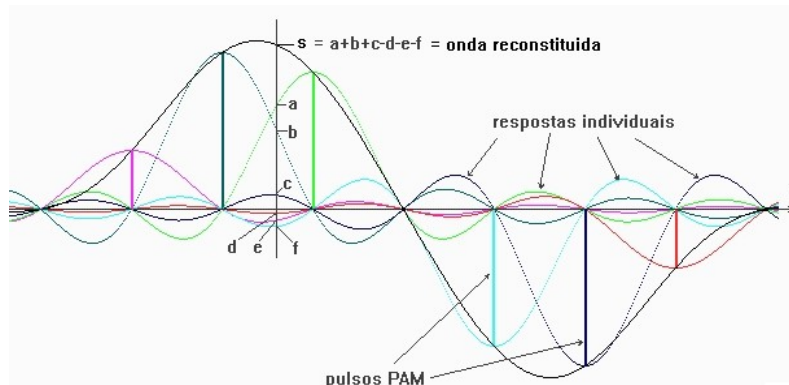


Figura 8 – Sinal reconstituído e respostas individuais dos pulsos

## 4. Filtro Passa-Baixa de ordem 6

Como a resposta impulsional de cada amostra PAM dependerá da curva do filtro, ou seja, quanto mais próximo do ideal melhor será a resposta do filtro na reconstituição do sinal, utilizaremos um filtro de ordem alta para reconstituição do sinal amostrado pelo circuito amostrador. O circuito obtido no software FilterLAB é mostrado na Figura 9 e a sua resposta em freqüência é mostrada na Figura 10.

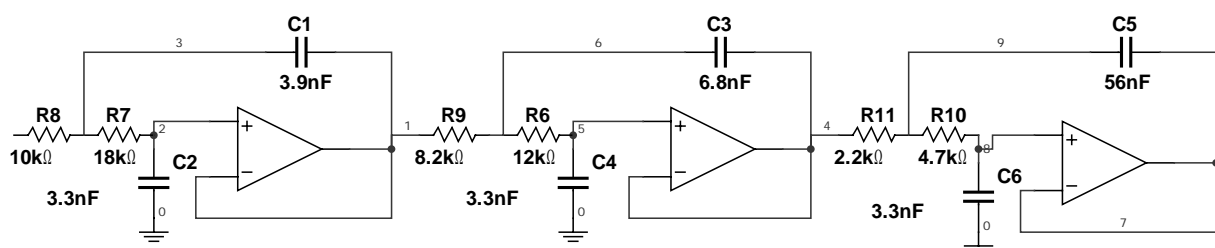


Figura 9 – Filtro para reconstituição do sinal PAM

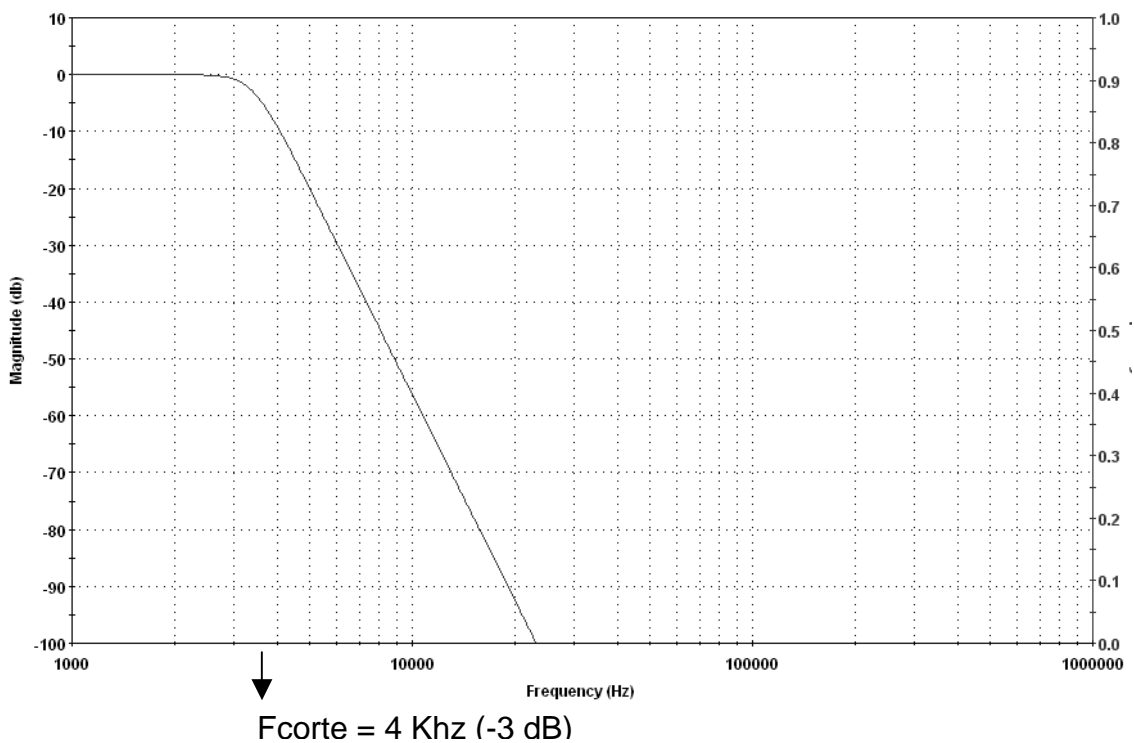


Figura 10 – Resposta em freqüência do filtro passa-baixas

### Procedimento Prático

- 1) Monte o filtro da Figura 9
- 2) Ajuste o gerador de funções com uma freqüência de 1Khz e 1 Volt de pico. Verificando a saída do filtro, aumente gradativamente a freqüência até que se tenha 0.7 Volts de pico (-3dB). Essa será a freqüência de corte, que deverá está em torno de 4 KHz
- 3) Injete um sinal senoidal de 2.5 KHz na entrada do circuito amostrador e conecte a saída do mesmo na entrada do filtro. Na saída do filtro deverá aparecer o mesmo sinal senoidal de 2.5 KHz reconstituído.

A Figura 11 Mostra a simulação feita no Multisim 8 dos sinais envolvidos no processo e amostragem e reconstituição.

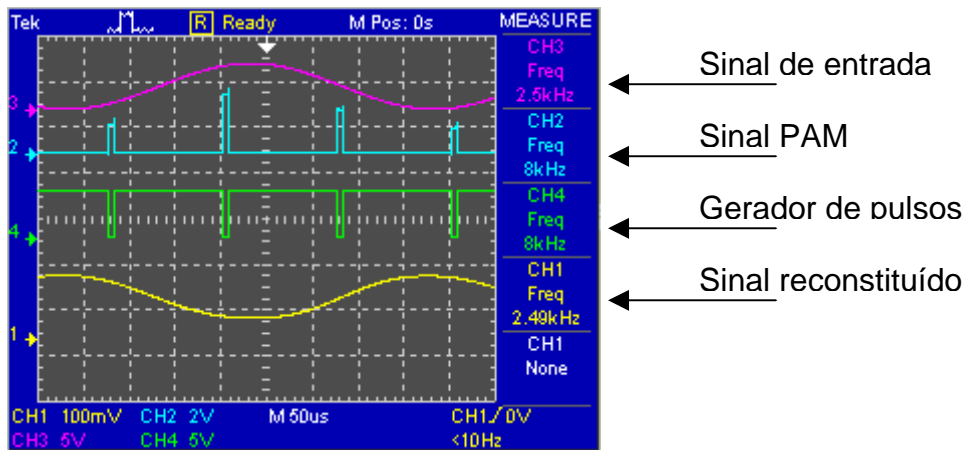


Figura 11 – Sinais envolvidos na amostragem/reconstituição

## 5. Verificando um sinal sub-amostrado (Aliasing)

A Figura 12 ilustra o que acontece quando sub-amostramos um sinal ( $F_a < 2F_m$ )

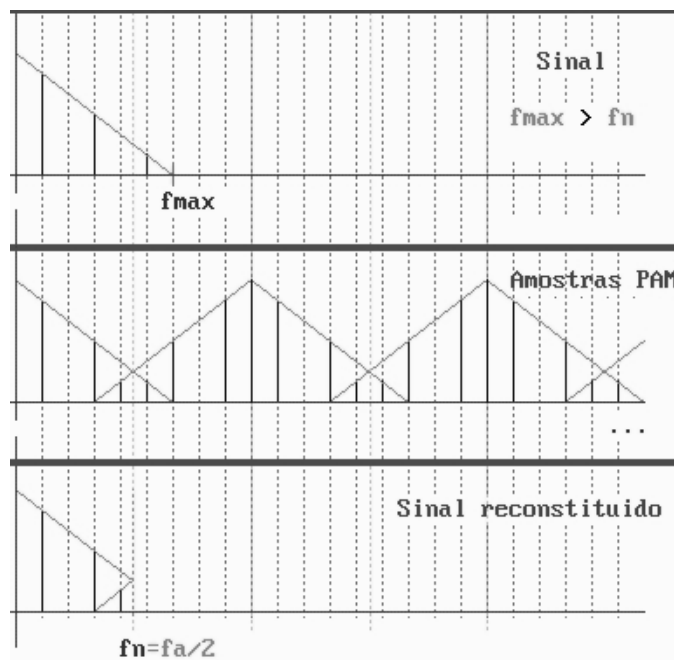


Figura 12 – Espectro do sinal PAM

Podemos agora observar como ocorre o **efeito de aliasing**, que nada mais é do que a **superposição dos espectros** de cada raia **PAM**, por falta de espaço. Na restituição do sinal pelo filtro passa-baixa com frequência de corte  $f_n$ , a parte do espectro original acima de  $f_n$  (no caso a ponta do triângulo) aparece como se tivesse sido **dobrada em torno de  $f_n$  e invertida espectralmente**, ou seja, frequências mais altas passam a ser menores. O sinal indesejável de aliasing que aparece na reprodução é uma **réplica** do sinal original  $f_0$ , porém com frequência errada e igual a  $f_a - f_0$ .

### 6.1 Verificando o Aliasing no domínio do tempo

Procedimento Prático:

1) Com o mesmo set-up do procedimento prático anterior, injete um sinal senoidal de 5Khz na entrada do amostrador

2) Verifique qual a frequência do sinal reconstituído. Ele deve está em torno de 3 KHz, já que o aliasing é uma réplica do sinal original só que com a frequência errada, dada por **fa-fo: (8 – 5 = 3) KHz**. A Figura 13 mostra o aliasing na simulação feita no Multisim 8

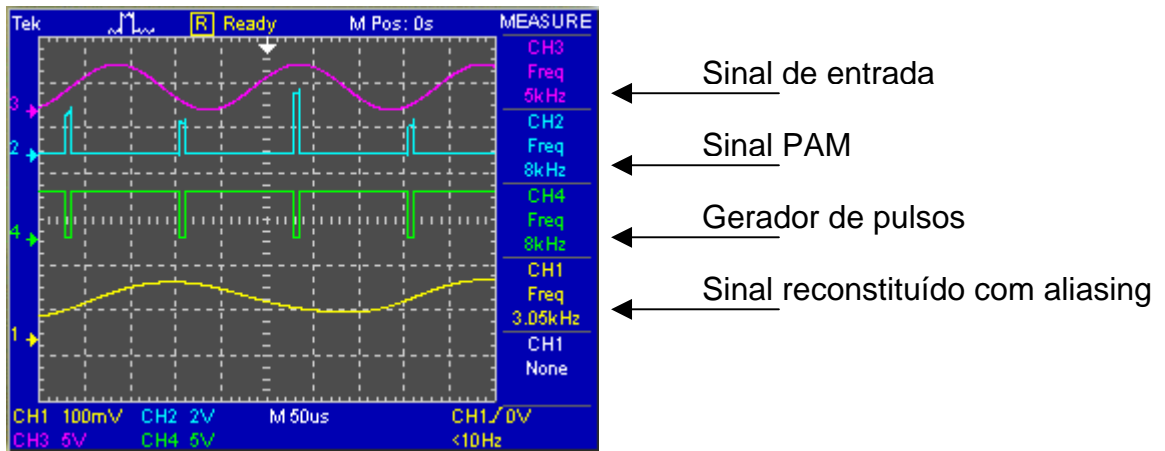


Figura 13 – Aliasing