

# EL68B - Comunicações Digitais

## Formatação de Pulsos

**Professor:** Bruno Sens Chang

Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR  
Departamento Acadêmico de Eletrônica - DAELN

# Introdução

- Na prática é muito comum que os canais sejam limitados em frequência. O que é isso? Qual é o efeito?
- Por exemplo, os canais usados para transmissão de TV são limitados em 6 MHz enquanto que o LTE (4G) pode usar até 20MHz.
- Qual o impacto de um canal limitado em frequência na transmissão de pulsos retangulares?

# Introdução

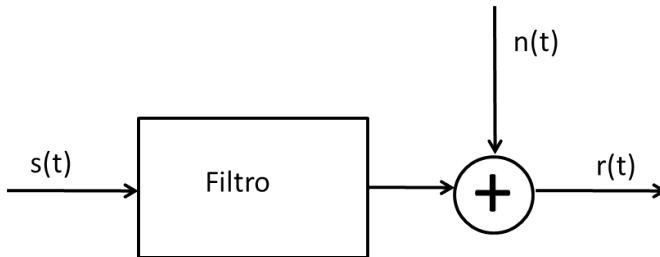
- Na prática é muito comum que os canais sejam limitados em frequência. O que é isso? Qual é o efeito?
- Por exemplo, os canais usados para transmissão de TV são limitados em 6 MHz enquanto que o LTE (4G) pode usar até 20MHz.
- Qual o impacto de um canal limitado em frequência na transmissão de pulsos retangulares?

# Introdução

- Na prática é muito comum que os canais sejam limitados em frequência. O que é isso? Qual é o efeito?
- Por exemplo, os canais usados para transmissão de TV são limitados em 6 MHz enquanto que o LTE (4G) pode usar até 20MHz.
- Qual o impacto de um canal limitado em frequência na transmissão de pulsos retangulares?

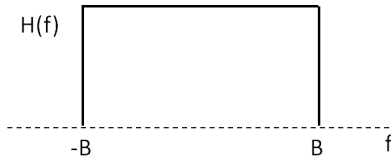
## Introdução

Um canal limitado em frequência pode ser descrito como uma extensão do canal AWGN, tal qual na Figura abaixo.



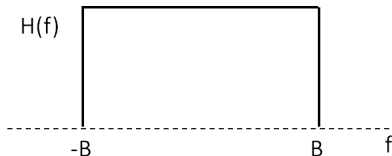
## Nyquist

Por simplicidade, vamos considerar que o filtro tem resposta em frequência plana, ou seja,  $H(f)$  tem a forma:



## Nyquist

Por simplicidade, vamos considerar que o filtro tem resposta em frequência plana, ou seja,  $H(f)$  tem a forma:



Nyquist provou que a mínima banda necessária para se transmitir sem distorção a  $R_s$  símbolos/s em banda base é de

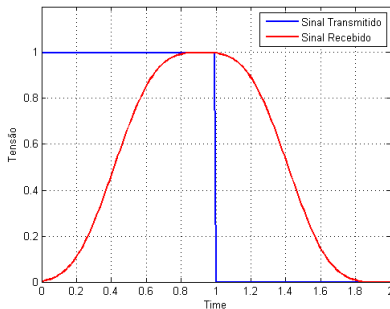
$$B = \frac{R_s}{2}$$

onde  $R_s = \frac{1}{T_s}$  é a taxa de símbolos, ou taxa de transmissão, ou ainda baud rate, e  $T_s$  é o período de símbolos. **Prove!**

# IES

Como obter esta taxa sem distorção e sem interferir em outros canais?

Um pulso retangular transmitido em um canal limitado em frequência se espalha no tempo.





# IES

Efeito: Interferência entre os símbolos (IES)

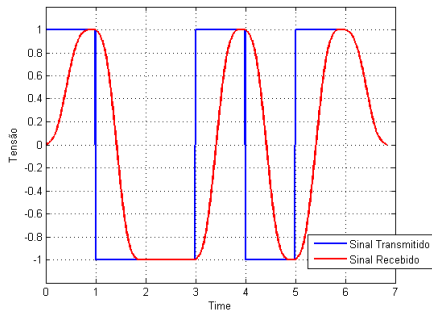


Figura: Sinal Recebido

# IES

Efeito: Interferência entre os símbolos (IES)

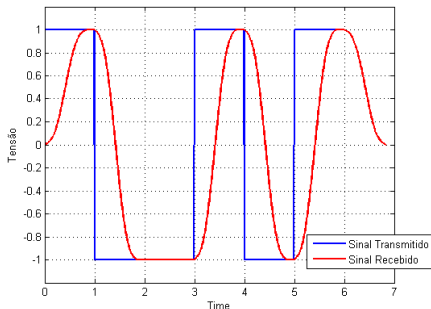


Figura: Sinal Recebido

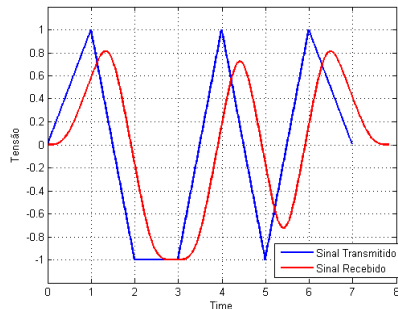


Figura: Após Filtragem Casada

# IES

- Para evitar IES o pulso base precisa ter banda limitada e cruzar por zero nos instantes de amostragem dos outros símbolos.
- Esta propriedade deve ser garantida **após a filtragem casada!**
- Pulsos com esta propriedade são os pulsos de Nyquist.
- Um exemplo direto é o pulso sinc. Confirma?

## IES

- Para evitar IES o pulso base precisa ter banda limitada e cruzar por zero nos instantes de amostragem dos outros símbolos.
- Esta propriedade deve ser garantida **após a filtragem casada!**
- Pulsos com esta propriedade são os pulsos de Nyquist.
- Um exemplo direto é o pulso sinc. Confirma?

## IES

- Para evitar IES o pulso base precisa ter banda limitada e cruzar por zero nos instantes de amostragem dos outros símbolos.
- Esta propriedade deve ser garantida **após a filtragem casada!**
- Pulsos com esta propriedade são os pulsos de Nyquist.
- Um exemplo direto é o pulso sinc. Confirma?

## IES

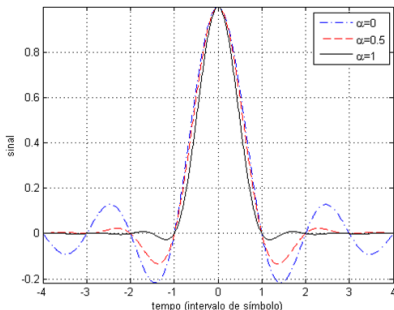
- Para evitar IES o pulso base precisa ter banda limitada e cruzar por zero nos instantes de amostragem dos outros símbolos.
- Esta propriedade deve ser garantida **após a filtragem casada!**
- Pulsos com esta propriedade são os pulsos de Nyquist.
- Um exemplo direto é o pulso sinc. Confirma? É prático?

## Cosseno Levantado

Uma alternativa é o pulso cosseno levantado:

$$p(t) = \text{sinc}\left(\frac{t}{T_s}\right) \left[ \frac{\cos(\pi\alpha t/T_s)}{1 - 4\alpha^2 t^2/T_s^2} \right]$$

onde  $\alpha$  é o chamado fator de excesso de faixa ou fator de roll-off.

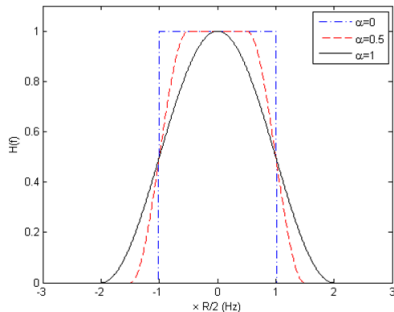
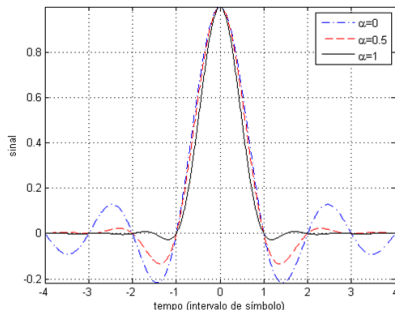


## Cosseno Levantado

Uma alternativa é o pulso cosseno levantado:

$$p(t) = \text{sinc}\left(\frac{t}{T_s}\right) \left[ \frac{\cos(\pi\alpha t/T_s)}{1 - 4\alpha^2 t^2/T_s^2} \right]$$

onde  $\alpha$  é o chamado fator de excesso de faixa ou fator de roll-off.





## Largura de Faixa

Quanto maior  $\alpha$ , maior a largura de faixa necessária, tal que

$$B_{CL} = B(1 + \alpha) = \frac{R_s}{2}(1 + \alpha),$$

onde  $B = \frac{R_s}{2}$ , e  $B_{CL}$  é a banda ocupada por um pulso do tipo cosseno levantado a uma taxa  $R_s$  em banda base.

## Largura de Faixa

Quanto maior  $\alpha$ , maior a largura de faixa necessária, tal que

$$B_{CL} = B(1 + \alpha) = \frac{R_s}{2}(1 + \alpha),$$

onde  $B = \frac{R_s}{2}$ , e  $B_{CL}$  é a banda ocupada por um pulso do tipo cosseno levantado a uma taxa  $R_s$  em banda base.

Para  $\alpha = 0$  o cosseno levantado se reduz ao *sinc*. Na prática  $\alpha$  é usado em torno de 0,2.

## Largura de Faixa

Quanto maior  $\alpha$ , maior a largura de faixa necessária, tal que

$$B_{CL} = B(1 + \alpha) = \frac{R_s}{2}(1 + \alpha),$$

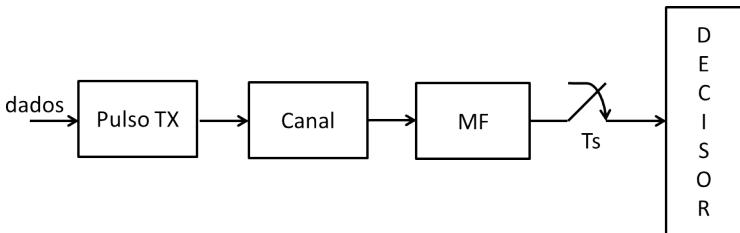
onde  $B = \frac{R_s}{2}$ , e  $B_{CL}$  é a banda ocupada por um pulso do tipo cosseno levantado a uma taxa  $R_s$  em banda base.

Para  $\alpha = 0$  o cosseno levantado se reduz ao *sinc*. Na prática  $\alpha$  é usado em torno de 0,2.

Por que é que não se usa logo algo muito próximo de zero?

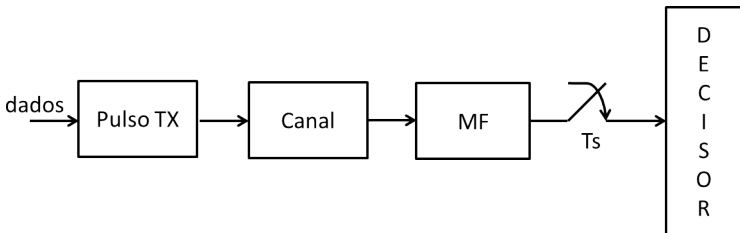
## Raiz de Cosseno Levantado

Um pulso cosseno levantado tem que ser visto antes do amostrador no receptor, que contém um filtro casado (MF).



## Raiz de Cosseno Levantado

Um pulso cosseno levantado tem que ser visto antes do amostrador no receptor, que contém um filtro casado (MF).



Que pulso usar no TX e que resposta ao impulso usar no RX?

## Raiz de Cosseno Levantado

Na prática se utiliza o chamada pulso raiz de cosseno levantado no TX e no filtro casado.

Sua resposta em frequência é a raiz quadrada da resposta em frequência do cosseno levantado

O resultado final é um pulso cosseno levantado logo antes do amostrador

## Raiz de Cosseno Levantado

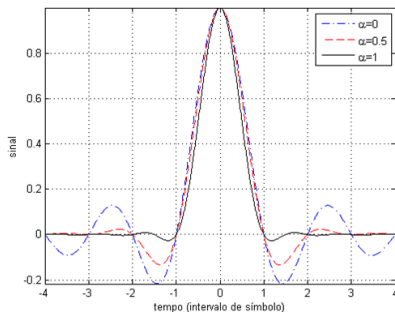


Figura: Cosseno Levantado

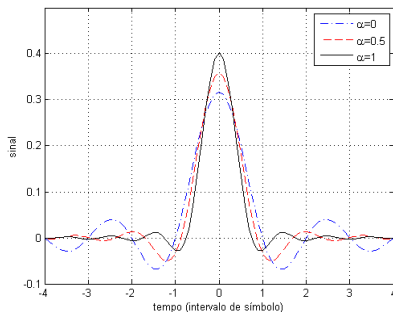


Figura: Raiz de Cosseno Levantado

## Raiz de Cosseno Levantado

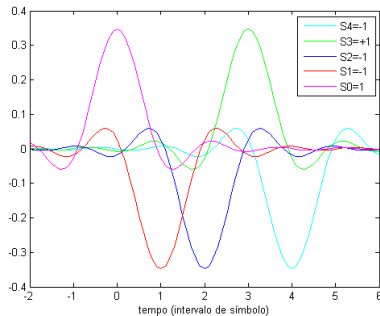


Figura: Pulsos a serem transmitidos



## Raiz de Cosseno Levantado

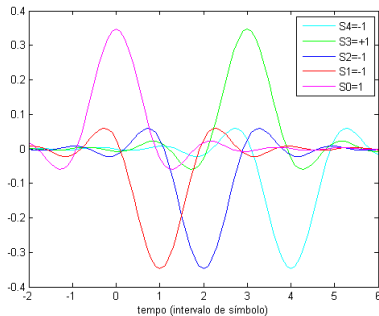


Figura: Pulsos a serem transmitidos

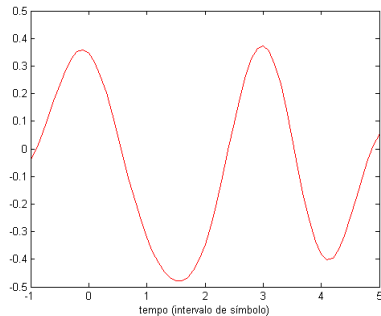
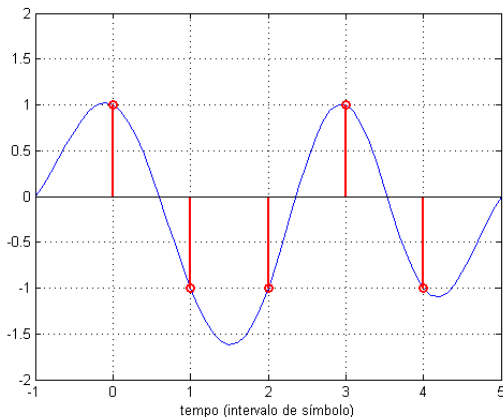


Figura: Pulso completo

## Raiz de Cosseno Levantado

Sinal amostrado após o filtro casado



## Exercícios

- ❶ Seja um canal com largura de faixa de  $B = 3\text{kHz}$ . Qual a máxima taxa de bits usando 2-PAM? E se for usado 8-PAM?
- ❷ Qual é a mínima largura de faixa teórica necessária para transmitir a 10Mbps usando 16-PAM?
- ❸ Dados são transmitidos a 9600bps usando 8-PAM e pulsos cosseno levantado. O sinal ocupa uma largura de faixa de 2,4 kHz. a) Qual é a baud rate? b) Qual é o fator de excesso de faixa?
- ❹ Um sinal analógico é amostrado e quantizado em 16 níveis. O resultado é transmitido usando 2-PAM e cosseno levantado com  $\alpha = 0,25$ .
  - Qual a máxima taxa de bits sabendo que o canal tem 100kHz?
  - Qual a máxima largura de faixa do sinal analógico original?
  - E se fosse usado 16-PAM?

# Tarefas

## Tarefa

Ler Sklar seção 3.3 e fazer exercício 3.12

## Tarefa

Existem outras soluções para a formatação de pulsos?