

# EL68B - Comunicações Digitais

## Transmissão Banda-Base

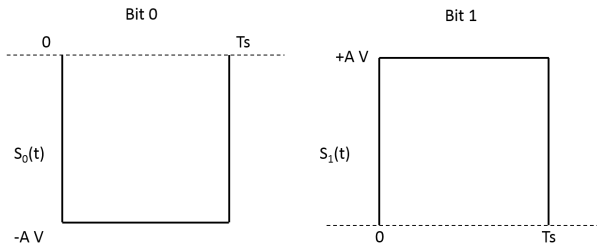
**Professor:** Bruno Sens Chang

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

## Modulação Binária Antipodal ou 2-PAM

Na transmissão banda-base as sequências de bits são transformadas em pulsos, os quais são transmitidos diretamente pelo canal.

**Exemplo:** Transmissão binária antipodal (ou 2-PAM)



## Binária Antipodal ou 2-PAM

Sinal a ser transmitido para a palavra 1 0 1 0.

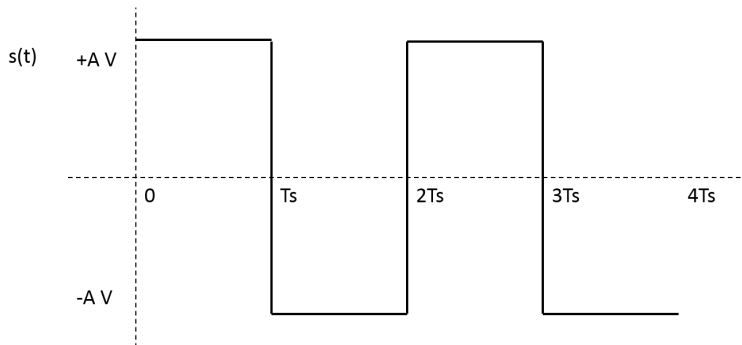


Figura: Sinal a ser enviado pelo canal.

## Binária Antipodal ou 2-PAM

Sinal a ser transmitido para a palavra 1 0 1 0.

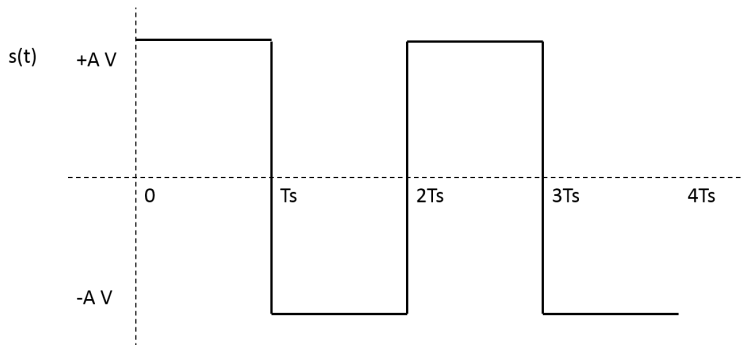


Figura: Sinal a ser enviado pelo canal.

**Exercício:** Qual é a energia média gasta por bit?

## Definições Importantes

**Bit:** É a menor unidade de informação. Assume valores 0 ou 1.

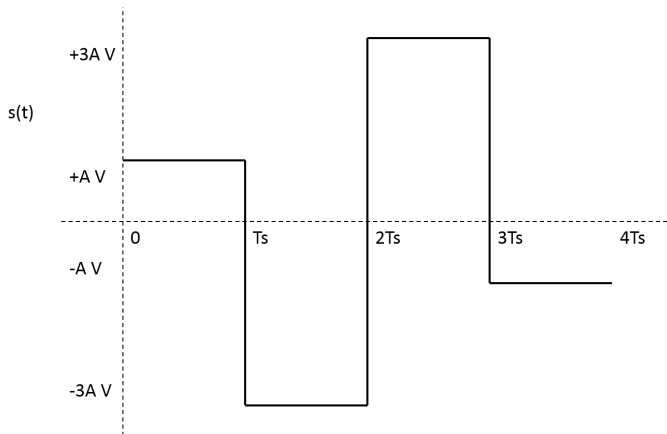
**Símbolo:** É a menor unidade de transmissão pelo canal, pode conter um ou mais bits. Se a modulação tem  $M$  símbolos possíveis, cada símbolo transporta  $\log_2 M$  bits.

Na modulação 2-PAM cada símbolo transporta um bit ( $M = 2$ ), e assim o período de símbolos  $T_s$  é igual ao período de bits  $T_b$ .

## M-PAM (Pulse Amplitude Modulation)

A modulação M-PAM é uma generalização do 2-PAM.

Um exemplo de sinal 4-PAM para a palavra 10 00 11 01 é



# M-PAM (Pulse Amplitude Modulation)

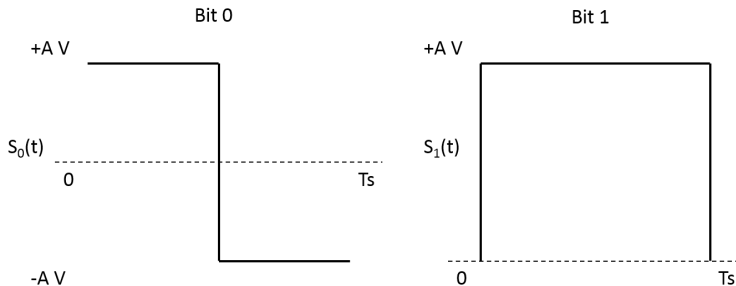
## Exercício

- 1 Qual é a energia média gasta por bit no esquema 4-PAM, supondo que os bits são equiprováveis?
- 2 Na presença de ruído, seria justo comparar o desempenho deste esquema com o 2-PAM como apresentado antes?
- 3 Qual a relação entre a energia média de símbolo e a energia média de bit? E entre o período de símbolos e o período de bits?
- 4 Como seria o 16-PAM?

## Binária Ortogonal

Outra opção é usar pulsos muito diferentes (ortogonais) para os sinais que representam os bits 0 e 1.

**Exemplo:** Transmissão binária ortogonal

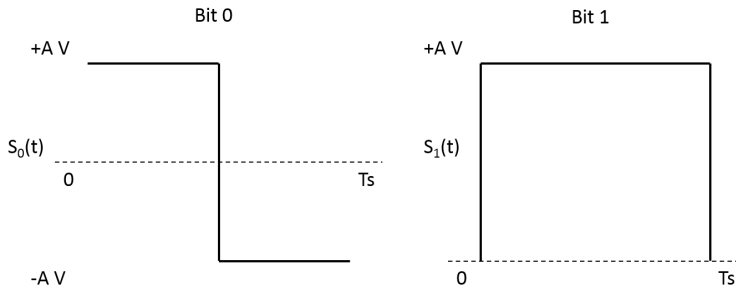




## Binária Ortogonal

Outra opção é usar pulsos muito diferentes (ortogonais) para os sinais que representam os bits 0 e 1.

**Exemplo:** Transmissão binária ortogonal



Por que ortogonal? Porque  $\int_0^{T_s} s_0(t)s_1(t)dt = 0$ .

# Binária Ortogonal

## Exercício

- 1 Qual é a energia média de bit? E a de símbolo?
- 2 Gere a forma de onda a ser enviada para a palavra 10101.
- 3 Na presença de ruído térmico (ruído em amplitude), quem desempenha melhor, o binário antipodal ou o binário ortogonal?

# Binária Ortogonal

## Exercício

- 1 Qual é a energia média de bit? E a de símbolo?
- 2 Gere a forma de onda a ser enviada para a palavra 10101.
- 3 Na presença de ruído térmico (ruído em amplitude), quem desempenha melhor, o binário antipodal ou o binário ortogonal?

# Binária Ortogonal

## Exercício

- 1 Qual é a energia média de bit? E a de símbolo?
- 2 Gere a forma de onda a ser enviada para a palavra 10101.
- 3 Na presença de ruído térmico (ruído em amplitude), quem desempenha melhor, o binário antipodal ou o binário ortogonal? antipodal

## Ruído Térmico: Definição

Sinal indesejado causado pelo movimento aleatório dos elétrons em elementos que dissipam energia.

Uniformemente distribuído na frequência: ruído branco.

A potência de ruído disponível em 1 Hz de banda em um resistor é

$$N_0 = \kappa T \text{ (W/Hz)}$$

- $N_0$ : Densidade Espectral de Potência de Ruído
- $\kappa$ : Constante de Boltzmann,  $1.38 \cdot 10^{-23}$  J/K
- $T$ : Temperatura (K).

## Ruído Térmico: Exercícios

**Exemplo:** Se  $T = 290$  K, então  $N_0 = 4 \cdot 10^{-21}$  W/Hz ou  $N_0 = -204$ dB (W/Hz).

A potência total de ruído em 1Hz é  $N_0 = \kappa T_e$ , onde  $T_e$  é uma **temperatura equivalente de ruído**.

É comum também usar  $T = T_0 = 290$ K, e depois adaptar o valor para o sistema em questão usando o conceito de **Figura de Ruído**.

### Exercícios

- Qual é a potência de ruído  $N$  vista em uma banda de  $B = 10$  MHz, considerando-se a temperatura de ruído padrão  $T_0 = 290$ K?
- Qual é a autocorrelação das amostras de ruído térmico?

## Ruído Térmico: Exercícios

**Exemplo:** Se  $T = 290$  K, então  $N_0 = 4 \cdot 10^{-21}$  W/Hz ou  $N_0 = -204$ dB (W/Hz).

A potência total de ruído em 1Hz é  $N_0 = \kappa T_e$ , onde  $T_e$  é uma **temperatura equivalente de ruído**.

É comum também usar  $T = T_0 = 290$ K, e depois adaptar o valor para o sistema em questão usando o conceito de **Figura de Ruído**.

### Exercícios

- Qual é a potência de ruído  $N$  vista em uma banda de  $B = 10$  MHz, considerando-se a temperatura de ruído padrão  $T_0 = 290$ K?
- Qual é a autocorrelação das amostras de ruído térmico?

## Ruído Térmico: Exercícios

**Exemplo:** Se  $T = 290$  K, então  $N_0 = 4 \cdot 10^{-21}$  W/Hz ou  $N_0 = -204$ dB (W/Hz).

A potência total de ruído em 1Hz é  $N_0 = \kappa T_e$ , onde  $T_e$  é uma **temperatura equivalente de ruído**.

É comum também usar  $T = T_0 = 290$ K, e depois adaptar o valor para o sistema em questão usando o conceito de **Figura de Ruído**.

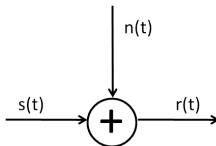
### Exercícios

- Qual é a potência de ruído  $N$  vista em uma banda de  $B = 10$  MHz, considerando-se a temperatura de ruído padrão  $T_0 = 290$ K?
- Qual é a autocorrelação das amostras de ruído térmico?  
não tem autocorrelação pois os elétrons são independentes uns dos outros



## Canal AWGN: Definição

No modelo de canal AWGN (Additive White Gaussian Noise), o sinal transmitido é corrompido por ruído Gaussiano.



**Figura:**  $s(t)$ : Sinal transmitido;  $n(t)$ : Ruído;  $r(t)$ : Sinal recebido

Modela bem os efeitos do ruído térmico. Mas por que Gaussiano?  
teorema do limite central: se houver mtos eventos descorrelacionados, a probabilidade destes eventos ocorrerem é modelada pela distribuição Gaussiana.

## Canal AWGN: Receptor Ótimo

Quem desempenha melhor no AWGN? 2-PAM ou ortogonal?

Qual é o receptor ótimo supondo AWGN?

## Canal AWGN: Receptor Ótimo

Quem desempenha melhor no AWGN? 2-PAM ou ortogonal?

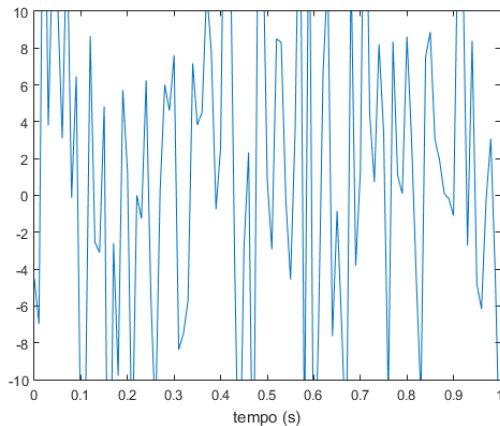
Qual é o receptor ótimo supondo AWGN?

**Tarefa:** O receptor ótimo para o canal AWGN contém o chamado Filtro Casado. Mas por que? Prove matematicamente. Vale apresentação na próxima aula!

Filtro casado é o filtro  $q$  maximiza a SNR no receptor

## Filtro Casado

Considere 2-PAM,  $A = 1V$  e  $T_s = 1s$ . Qual bit foi transmitido?



## Filtro Casado

Só dois sinais poderiam ter sido transmitidos,  $s_0(t)$  e  $s_1(t)$ .

Podemos correlacionar o sinal recebido com  $s_0(t)$  e  $s_1(t)$  e ver qual resulta na maior correlação.

A correlação do sinal recebido com  $s_0(t)$  dá 53 e com  $s_1(t)$  dá 140.

Logo, decidimos por bit 1, o que está correto neste caso.

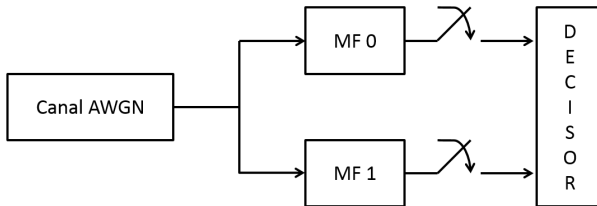
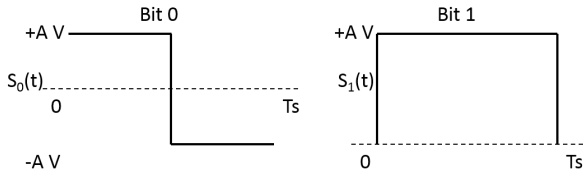
## Filtro Casado

Filtragem casada é uma forma equivalente de se calcular a correlação entre um sinal qualquer e um sinal conhecido.

O Filtro Casado tem resposta ao impulso  $h(t) = z(T_s - t)$ , onde  $z(t)$  é o sinal ao qual ele é casado.

A saída do filtro deve ser amostrada no instante  $t = T_s$  para que a correlação entre a entrada e o sinal  $z(t)$  seja medida.

## Receptor Ótimo: Binária Ortogonal



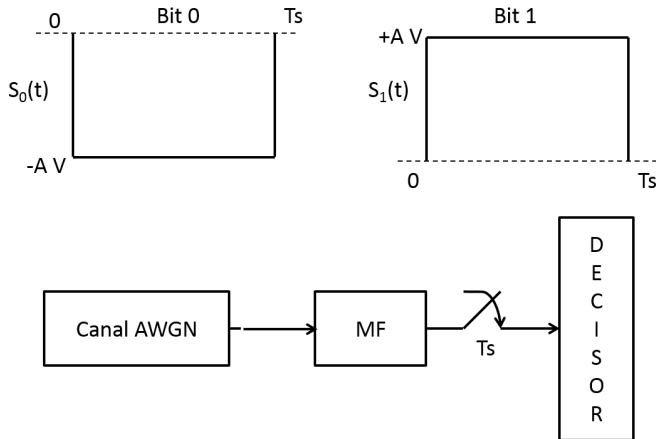
## Binária Ortogonal

### Exercícios

- Trace  $h_0(t)$  e  $h_1(t)$ , as respostas ao impulso dos filtros casados MF0 e MF1. Considere  $A = 1V$  e  $T_s = 1s$ .
- Determine a saída de MF0 se a entrada for  $s_0(t)$  ou  $s_1(t)$ .
- Faça o mesmo para MF1.
- Na presença de ruído, qual deveria ser a regra de decisão?



## Receptor Ótimo: 2-PAM



Note que  $s_0(t) = -s_1(t)$ , por isso usamos apenas um filtro casado.

## 2-PAM

### Exercícios

- Trace  $h(t)$ , a resposta ao impulso do filtro casado MF. Considere  $A = 1V$  e  $T_s = 1s$ .
- Determine a saída de MF se a entrada for  $s_0(t)$  ou  $s_1(t)$ .
- Na presença de ruído, qual deveria ser a regra de decisão?
- O que aconteceria se no caso da modulação binária ortogonal usássemos só um filtro casado como no 2-PAM?
- É possível realizar a modulação binária ortogonal usando outros pulsos? Como seria o desempenho?
- Quantos filtros casados são necessários em geral?

## Tarefas

- 1 O que é  $E_b/N_0$ ? snr por bit
- 2 Qual é a relação sinal ruído na saída do filtro casado?
- 3 Como determinar a saída de um sistema linear invariante no tempo quando o sinal na sua entrada é aleatório?

## Desafio - 1,0 ponto na prova

O que aconteceria se no receptor fosse usado um filtro qualquer ao invés de um filtro casado ao pulso que se quer detectar?

Por exemplo, considere o caso do 2-PAM com pulsos retangulares no canal AWGN. Ao invés de se usar um filtro casado a este pulso, é utilizado um filtro passa baixas ideal no receptor, com largura de faixa  $B$ . A relação sinal ruído na saída do filtro passa baixas é igual, melhor ou pior do que se um filtro casado fosse utilizado?

A mesma pergunta pode ser respondida também se no lugar do filtro passa baixas ideal for considerado um filtro passa baixas qualquer, como um filtro RC.