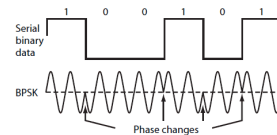




## Hands-on 4: Loopback transmissão e recepção BPSK utilizando o GNURadio

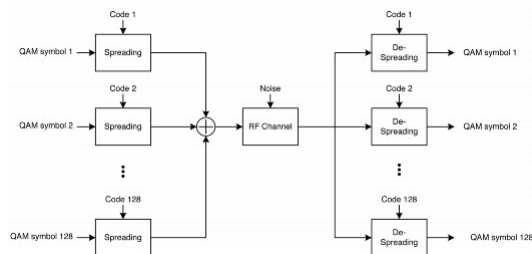
Vicente Sousa  
GppCom/DCO/UFRN



Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

## Objetivos do hands-on

- Construir um “loop-back” da transmissão e recepção do BPSK em banda-base.



## O Transmissor

© Prof. Dr. Vicente Angelo de Sousa Junior @ GppCom - UFRN  
vicente.sousa@ct.ufrn.br

### Transmissor binário em banda-base

- Um sistema de comunicação binária consiste em
  - Uma sequência de 0's e 1's transmitido por meio de dois sinais

$$0 \rightarrow s_0(t), 0 \leq t \leq T_b$$

$$1 \rightarrow s_1(t), 0 \leq t \leq T_b$$

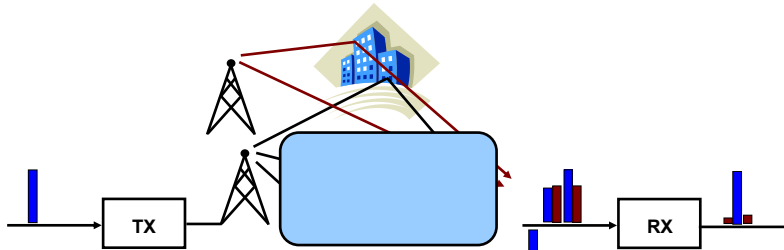
- O que  $1/T_b$  mede?
  - $R = 1/T_b$  é a taxa de transmissão em bits/seg (bps)
- O que vem depois da transmissão?
  - **CANAL DE TRANSMISSÃO !!!!**

© Prof. Dr. Vicente Angelo de Sousa Junior @ GppCom - UFRN  
vicente.sousa@ct.ufrn.br

## O Canal

© Prof. Dr. Vicente Angelo de Sousa Junior @ GppCom - UFRN  
vicente.sousa@ct.ufrn.br

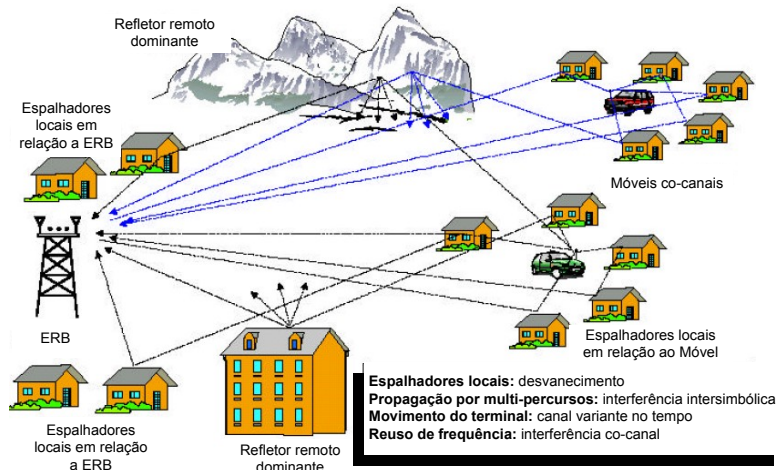
## O Canal de transmissão



- Potência do sinal transmitido sobre atenuação/distorção devido aos fenômenos de propagação do canal rádio-móvel
  - Essa atenuação é aditiva ou multiplicativa?
  - Reflexão, refração, difração, etc
  - Interferência também causa degradação na recepção
  - E o ruído?

© Prof. Dr. Vicente Angelo de Sousa Junior @ GppCom - UFRN  
vicente.sousa@ct.ufrn.br

## O Canal de transmissão

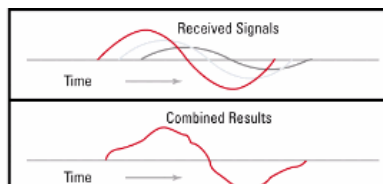
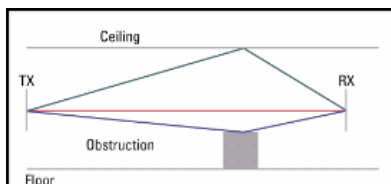


**Preço a pagar pela mobilidade:** canal rádio móvel (potência transmitida é aleatoriamente atenuada pelo canal).

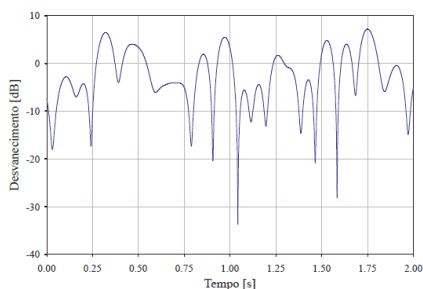
© Prof. Dr. Vicente Angelo de Sousa Junior @ GppCom - UFRN  
 vicente.sousa@ct.ufrn.br

## O Canal de transmissão

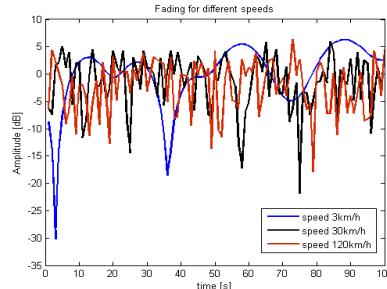
- Desvanecimento de pequena escala (fast fading)



- Atenuação bastante severa para pequenos deslocamentos



- Atenuação depende da velocidade entre TX e RX



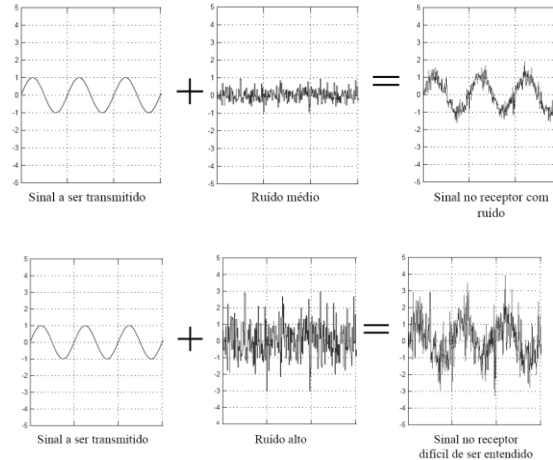
vicente.sousa@ct.ufrn.br

## O Canal de transmissão

- E ainda temos o ruído térmico

- Causado pela própria agitação dos átomos nos componentes dos circuitos dos equipamentos.

- O ruído é um sinal sem padrão definido (aleatório) que se espalha por todo o espectro das ondas eletromagnéticas de maneira mais ou menos uniforme



© Prof. Dr. Vicente Angelo de Sousa Junior @ GppCom - UFRN  
vicente.sousa@ct.ufrn.br

## O Canal de transmissão

- Porque estudar o desempenho perante ao ruído é muito importante?
  - R.: o ruído é o único efeito que não pode ser completamente removido.

© Prof. Dr. Vicente Angelo de Sousa Junior @ GppCom - UFRN  
vicente.sousa@ct.ufrn.br

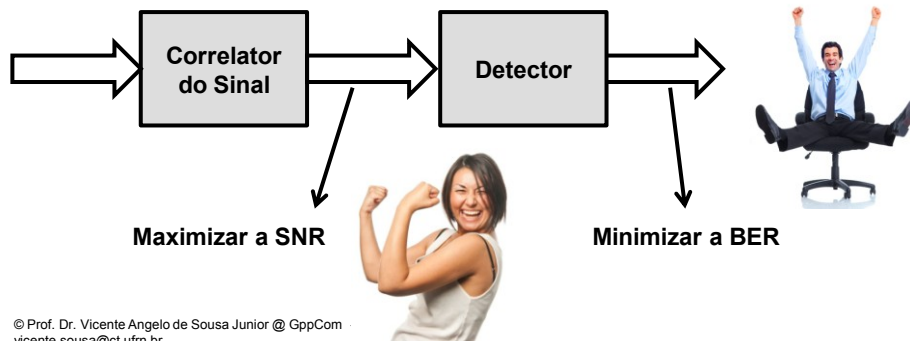
## Receptor/Detector binário

© Prof. Dr. Vicente Angelo de Sousa Junior @ GppCom - UFRN  
vicente.sousa@ct.ufrn.br

## Receptor/Detector binário

- Objetivo da recepção digital binária?
  - a cada tempo de bit é decidido se foi transmitido o bit 0 ou o bit 1
- Receptor é composto de dois blocos (recepção feita em duas etapas com objetivos distintos)

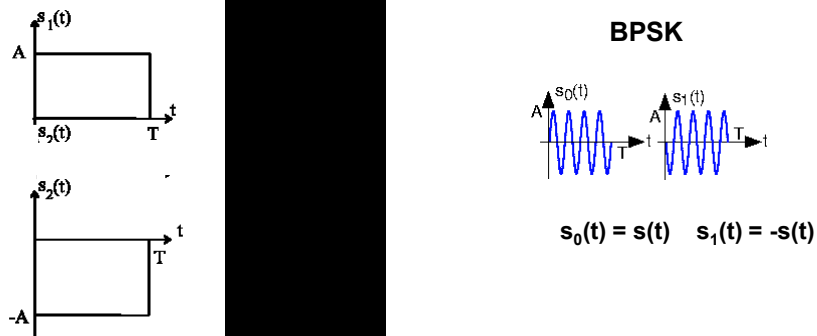
Quais seus objetivos?



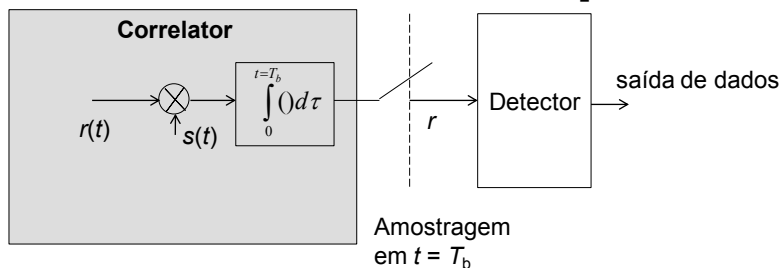
© Prof. Dr. Vicente Angelo de Sousa Junior @ GppCom  
vicente.sousa@ct.ufrn.br

## Sinais antipodais

- Uma forma de onda é o negativo da outra



## Correlator de Sinais Antipodais



- O problema da maximização da SNR é obtida através da correlação cruzada do sinal recebido  $r(t)$  e os sinais de entrada

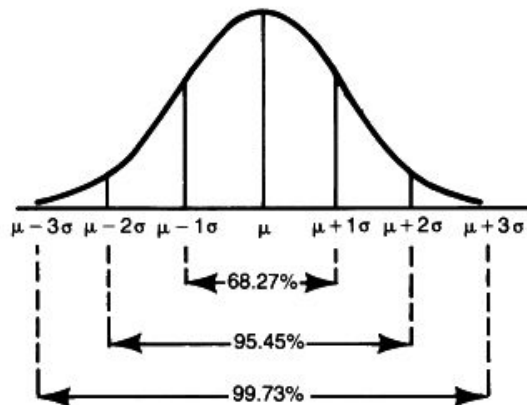
Se  $s_0(t)$  for transmitido:  $r = E + n$

$$r(t) = \pm s(t) + n(t)$$

Se  $s_1(t)$  for transmitido:  $r = -E + n$

## O Ruído é Gaussiano

$$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

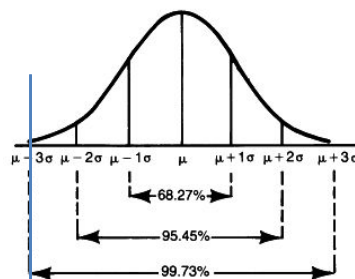
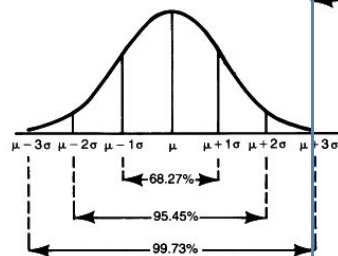


© Prof. Dr. Vicente Angelo de Sousa Junior @ GppCom - UFRN  
vicente.sousa@ct.ufrn.br

## O Detector

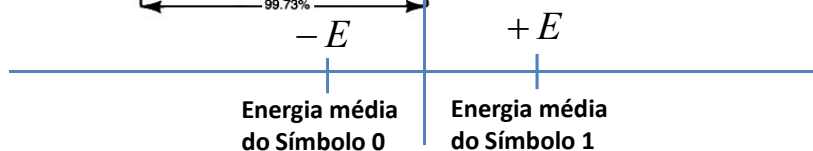
Símbolo 1 (recepção)

$$r(t) = -s(t) + n(t)$$



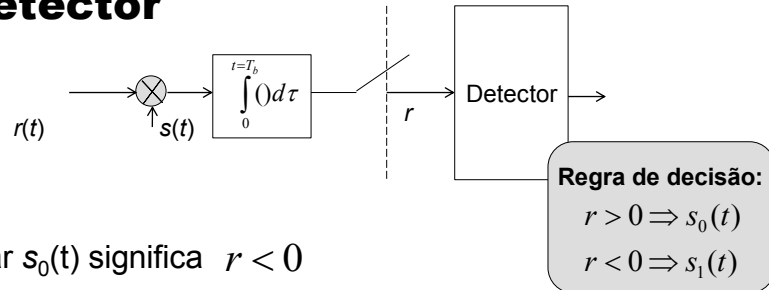
Símbolo 0 (recepção)

$$r(t) = s(t) + n(t)$$





## O Detector



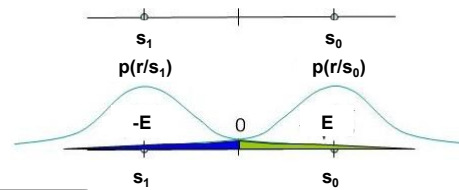
- Erro  $s_0(t)$  significa  $r < 0$

Se  $s_0(t)$  for transmitido:  $r = E + n$

$$p_e = p(r < 0)$$

$$p_e = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^0 e^{-\frac{(x-E)^2}{2\sigma^2}} dx$$

$$p_e = Q\left(\sqrt{\frac{2E}{N_0}}\right)$$



$$\mu_1 = -E \quad e \quad \mu_0 = E$$

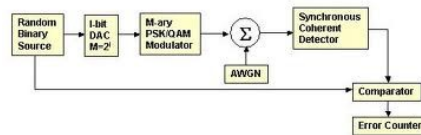
$$\sigma_0 = \sigma_1 = N_0$$

© Prof. Dr. Vicente Angelo de Sousa Junior @ GppCom - UFRN  
 vicente.sousa@ct.ufrn.br

## O Detector

© Prof. Dr. Vicente Angelo de Sousa Junior @ GppCom - UFRN  
 vicente.sousa@ct.ufrn.br

## Método de simulação



© Prof. Dr. Vicente Angelo de Sousa Junior @ GppCom - UFRN  
 vicente.sousa@ct.ufrn.br

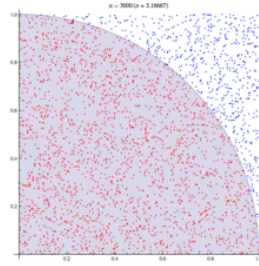
## Metodologia de Monte Carlo

- Método de Monte Carlo (MMC): método que se baseia em amostragens aleatórias massivas para obter resultados numéricos
  - repetindo sucessivas simulações um elevado numero de vezes, para calcular probabilidades heurísticamente, tal como se, de fato, se registrassem os resultados reais.

© Prof. Dr. Vicente Angelo de Sousa Junior @ GppCom - UFRN  
 vicente.sousa@ct.ufrn.br

## Metodologia de Monte Carlo

- Exemplo: calcular valor de  $\pi$ 
  - Modelagem:** considerar um círculo inscrito em um quadrado unitário. Sabemos que: a razão de suas áreas é  $\pi/4$ .
- MMC:**
  - Desenhar um quadrado com um círculo inscrito
  - Distribuir uniformemente objetos pequenos e de tamanho uniforme (e.g. grãos de arroz) no quadrado
  - Contar o número de objetos dentro do círculo e o número total de objetos
  - A razão entre os dois contadores é uma estimativa da razão entre as duas áreas, que multiplicada por 4, dá o valor de  $\pi$
- O que acontece se o número de objetos distribuídos é pequeno?



© Prof. Dr. Vicente Angelo de Sousa Junior @ GppCom - UFRN  
vicente.sousa@ct.ufrn.br

## Metodologia de Monte Carlo

- Exemplo:** calcular valor de  $\pi$  (uma realização do experimento)
  - Valor real = 3.141592653589793** (format long do Matlab)

# de pontos de Monte Carlo	Razão das áreas	$\pi$ estimado	Erro
1.000	0.776	3.104	0.037593
10.000	0.79	3.16	-0.018407
10.000.000	0.78538	3.1415072	8.5454e-05

Script do Matlab: MCCPi.m

© Prof. Dr. Vicente Angelo de Sousa Junior @ GppCom - UFRN  
vicente.sousa@ct.ufrn.br

## Simulação de Monte Carlo de Sistemas de Comunicação Binários Antipodais

- **Modelagem geral**
  - Simulação de Monte Carlo
  - Cada evento é a transmissão e recepção de um bit
  - Número de bits transmitidos é igual ao número de experimentos de Monte Carlo (entrada da simulação)
  - Variação da potência de transmissão para gerar vários valores de SNR (saída do simulador)
- **Modelagem da transmissão/recepção (um evento de Monte Carlo)**
  - $s_0$  e  $s_1$  são gerados: gerar aleatoriamente a informação se 0 ou 1 foi transmitido
  - A atenuação do canal no sinal transmitido é modelado
  - **$r$  é calculado e comparado com zero: verificar se 0 ou 1 foi detectado**
  - Comparar a detecção com o que realmente foi transmitido

© Prof. Dr. Vicente Angelo de Sousa Junior @ GppCom - UFRN  
vicente.sousa@ct.ufrn.br

## Simulação de Monte Carlo de Sistemas de Comunicação Binários Antipodais

- **Ao final de todos os experimentos: calcular a taxa de erro**
  - Contar todos os bits errados
  - Calcular BER

$$BER = \frac{\text{\# de bits errados}}{\text{\# de bits transmitidos}}$$

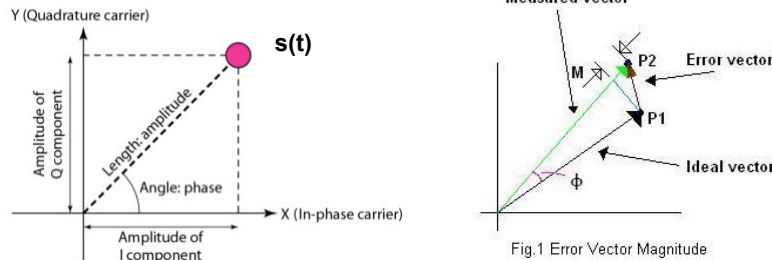
- Comparar BER com  $p_e$  teórica

$$p_e = Q\left(\sqrt{\frac{2E}{N_0}}\right)$$

© Prof. Dr. Vicente Angelo de Sousa Junior @ GppCom - UFRN  
vicente.sousa@ct.ufrn.br

## Simulação de Monte Carlo de Sistemas de Comunicação Binários Antipodais

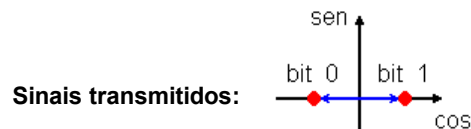
- Ao final do experimento podemos ver o diagrama de constelação



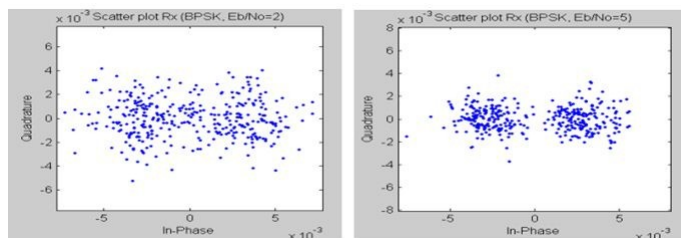
© Prof. Dr. Vicente Angelo de Sousa Junior @ GppCom - UFRN  
vicente.sousa@ct.ufrn.br

## Simulação de Monte Carlo de Sistemas de Comunicação Binários Antipodais

- Ao final do experimento podemos ver o diagrama de constelação



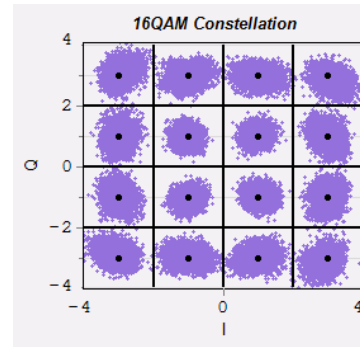
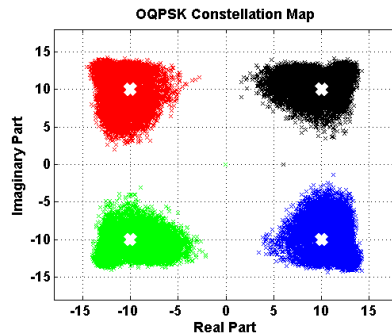
Sinais recebidos:



© Prof. Dr. Vicente Angelo de Sousa Junior @ GppCom - UFRN  
vicente.sousa@ct.ufrn.br

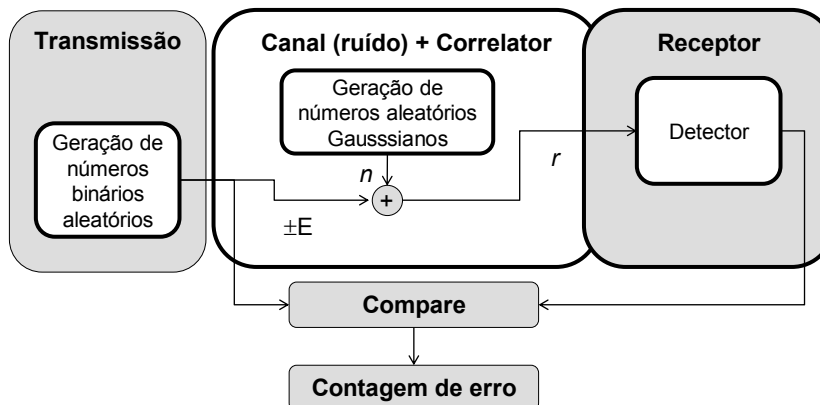
## Simulação de Monte Carlo de Sistemas de Comunicação Binários Antipodais

- Outras modulações



© Prof. Dr. Vicente Angelo de Sousa Junior @ GppCom - UFRN  
vicente.sousa@ct.ufrn.br

## Simulação de Monte Carlo de Sistemas de Comunicação Binários



$s_0(t)$  e  $s_1(t)$  são sinais antipodais de energia  $E$

Se  $s_0(t)$  :  $r = E + n$

Se  $s_1(t)$  :  $r = -E + n$

**Regra de decisão:**

$r > 0 \Rightarrow s_0(t)$

$r < 0 \Rightarrow s_1(t)$

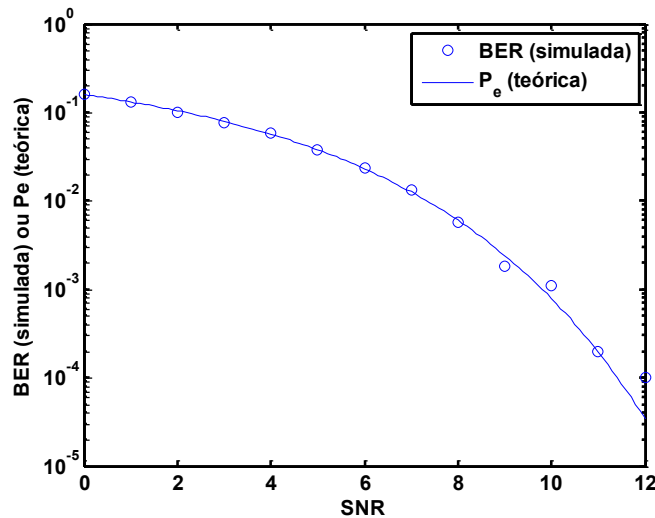
## Resultados

### Eixo x:

- SNR: medida direta da energia gasta para transmitir cada bit

### Eixo y:

- BER (simulada)
- $P_e$  (teórica)



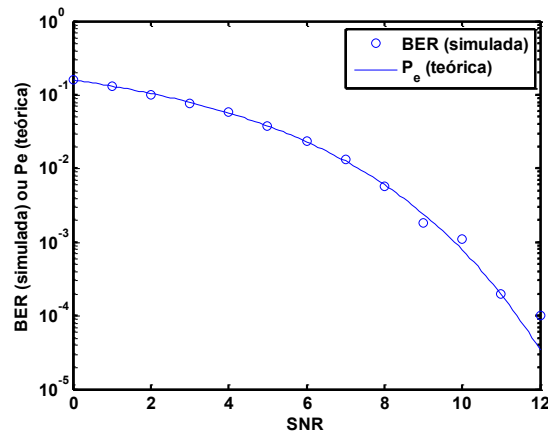
- Qual a relação entre BER vs SNR?

© Prof. Dr. Vicente Angelo de Sousa Junior @ GppCom - UFRN  
vicente.sousa@ct.ufrn.br

## Resultados

### Conclusão 1:

- A medida que se gasta mais potência, menos se erra



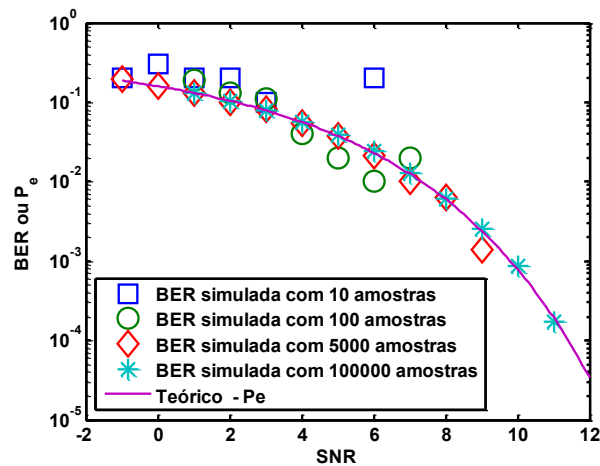
### Outras perguntas:

Qual é a relação entre  $P_e$  e BER?

Quando  $P_e$  e BER serão iguais?

© Prof. Dr. Vicente Angelo de Sousa Junior @ GppCom - UFRN  
vicente.sousa@ct.ufrn.br

## Resultados



### Perguntas:

- Porque para poucas amostras alguns pontos não aparecem? (e.g. a partir de 7 dB para 10 amostras)
- O que acontece com BER quando a número de amostras aumenta?

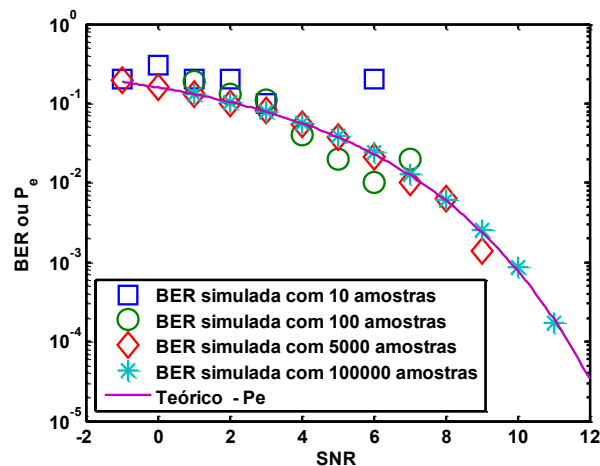
© Prof. Dr. Vicente Angelo de Sousa Junior @ GppCom - UFRN  
vicente.sousa@ct.ufrn.br

## Resultados

### Conclusão 2:

- A medida que se aumenta o valor do número de repetições de Monte Carlo (gasta mais tempo de simulação), mais BER se aproxima de  $P_e$

**Segundo Proakis:**  
Número de amostras deve ser 7-10 vezes maior que  $1/P_e$



© Prof. Dr. Vicente Angelo de Sousa Junior @ GppCom - UFRN  
vicente.sousa@ct.ufrn.br



**Bom material para treinar**

- **GNU Radio Tutorials: Part 4 - Phase-Shift Keying (PSK), Constellations & Auto-correlation:**  
[https://www.youtube.com/watch?v=JMEyN\\_lvaiE](https://www.youtube.com/watch?v=JMEyN_lvaiE)
- **GNU Radio Tutorial Series:**  
[https://www.youtube.com/playlist?list=PL618122BD66C8B3C4&feature=view\\_all](https://www.youtube.com/playlist?list=PL618122BD66C8B3C4&feature=view_all)
- **Introduction to GNU Radio from the 2012 ARRL TAPR DCC**
  - Parte 1: [https://www.youtube.com/watch?v=\\_hGNT1w-jig](https://www.youtube.com/watch?v=_hGNT1w-jig)
  - Parte 2: <https://www.youtube.com/watch?v=cg3TA3EDx78>
  - Parte 3: <https://www.youtube.com/watch?v=nemfS9QAYHc>
  - Parte 4: <https://www.youtube.com/watch?v=94R2qE7mEc4>