

Modulação QAM

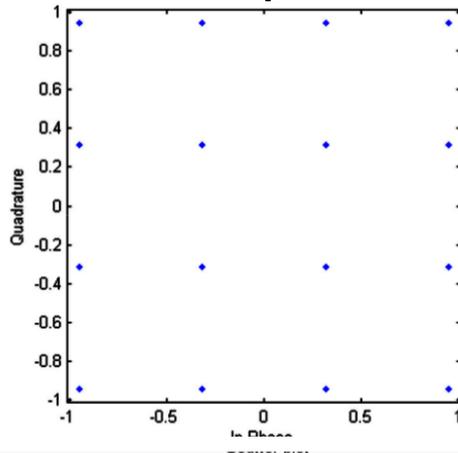
Análise de desempenho: Taxa de Erro de Bit (BER)

- Na comunicação digital, a BER representa o número de bits recebidos de um fluxo de dados ao longo de um canal de comunicação que foram alteradas devido a erros de sincronização de bit, ruído, interferência ou distorção.
- A BER é calculada pelo número de bits errôneos dividido pelo número total de bits transferidos durante um intervalo de tempo estudado.
- BER é uma medida do desempenho adimensional, muitas vezes expressa como uma percentagem.
- Está diretamente relacionada à relação sinal-ruído do canal de comunicação (SNR ou CNR)

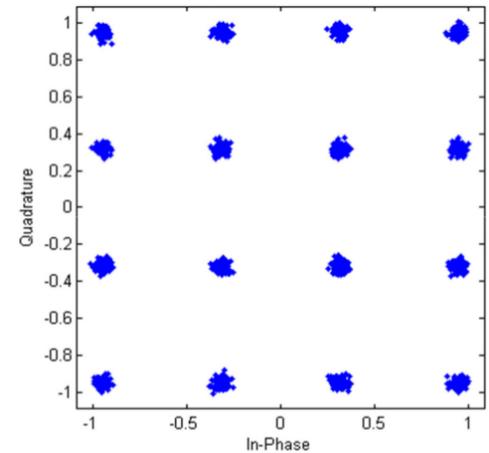
Modulação QAM

Análise de desempenho: Diagrama de constelação

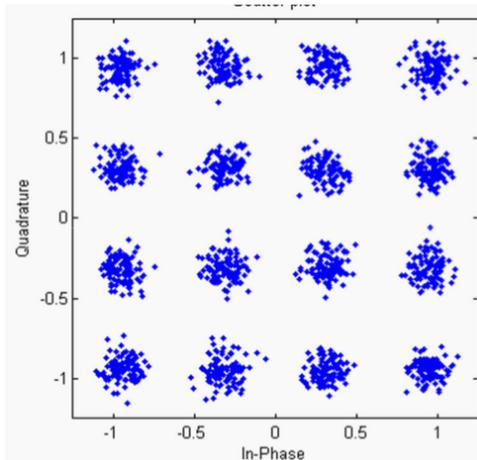
$$\frac{E_b}{N_0} = \infty$$



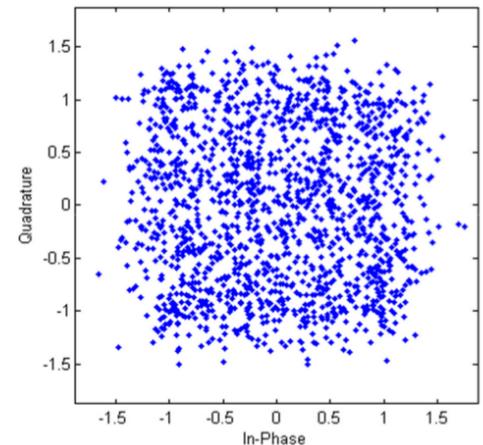
$$\frac{E_b}{N_0} = 30 \text{ dB}$$



$$\frac{E_b}{N_0} = 20 \text{ dB}$$

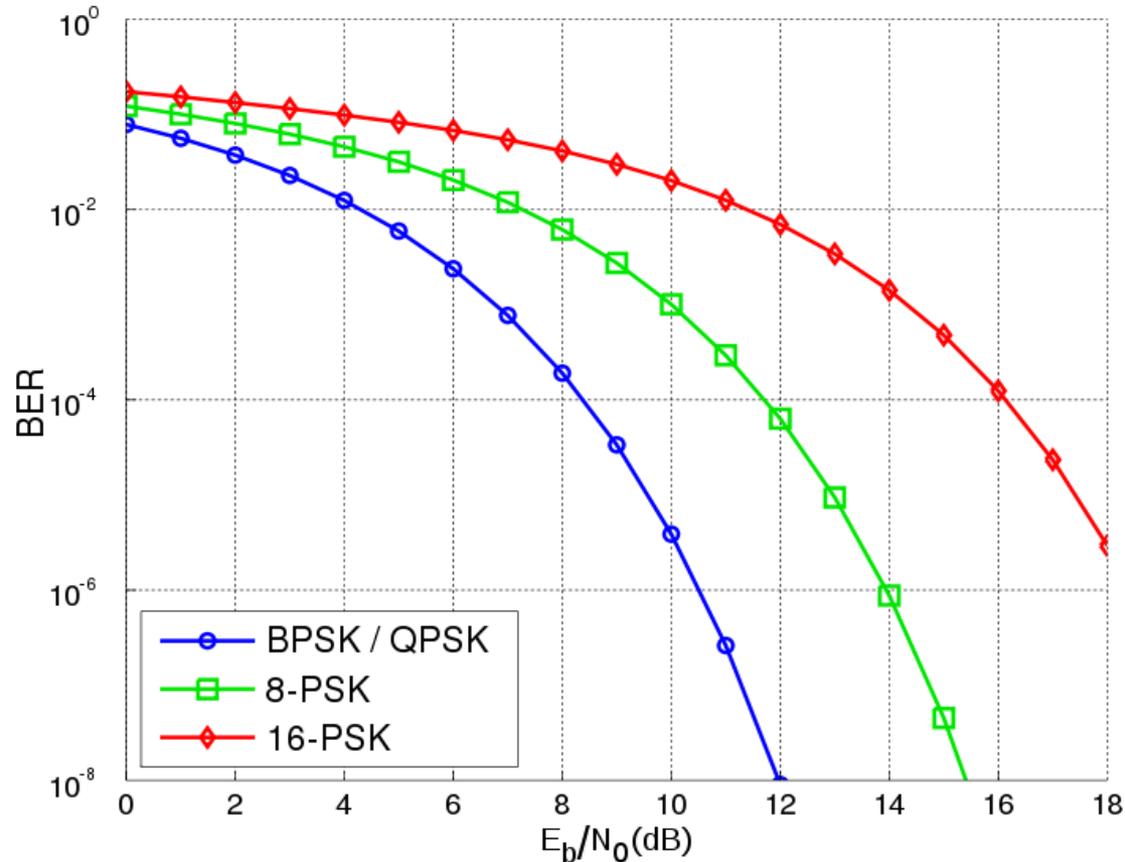


$$\frac{E_b}{N_0} = 10 \text{ dB}$$



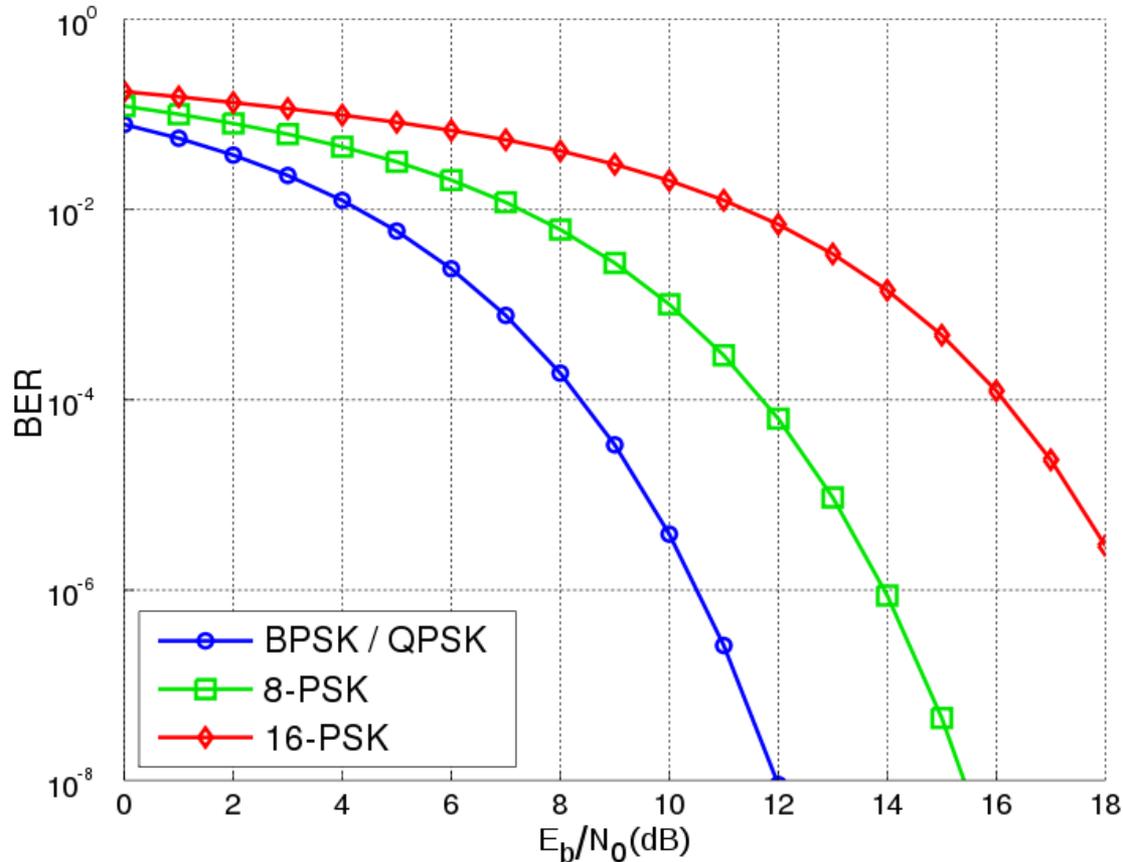
Modulação QAM

Taxa de Erro de Bit (BER): curva em função da SNRdB



Modulação QAM

Taxa de Erro de Bit (BER): curva em função da SNRdB



Modulação QAM

Taxa de Erro de Bit (BER): Análise Teórica

- ▮ Conhecendo-se a probabilidade de erro de um canal de comunicação e o tipo de modulação, pode-se determinar a BER
- ▮ Está diretamente relacionada à relação sinal-ruído do canal de comunicação (SNR ou CNR)
- ▮ A análise matemática considera a condição: AWGN (Additive white Gaussian noise)

Modulação QAM

Taxa de Erro de Bit (BER): Análise Teórica

□ BPSK

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{E_b}{N_0}}$$

$$BER = P_e$$

□ QPSK

$$P_e = \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{E_b}{N_0}}$$

$$BER = \frac{1}{2} P_e$$

□ M-PSK

$$P_e = \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \sin \left(\frac{\pi}{M} \right) \right)$$

$$BER = \frac{1}{2} P_e$$

□ M-QAM

$$P_e = 2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{3}{2(M-1)} \frac{E_b}{N_0}}$$

$$BER = \frac{1}{2} P_e$$

Modulação QAM

Análise de desempenho: Eficiência Espectral

- Em uma comunicação digital, relaciona a máxima taxa de transmissão para uma dada largura espectral do canal

$$\rho = \frac{R_b}{BW} \quad [bits / s / Hz]$$

- R_b : taxa de transmissão em bits/s
- BW : largura espectral utilizada no canal de comunicação em Hz

Modulação QAM

Eficiência espectral máxima (SNR= ∞):

□ BPSK $\rho = \frac{1}{2}$

□ QPSK $\rho = 1$

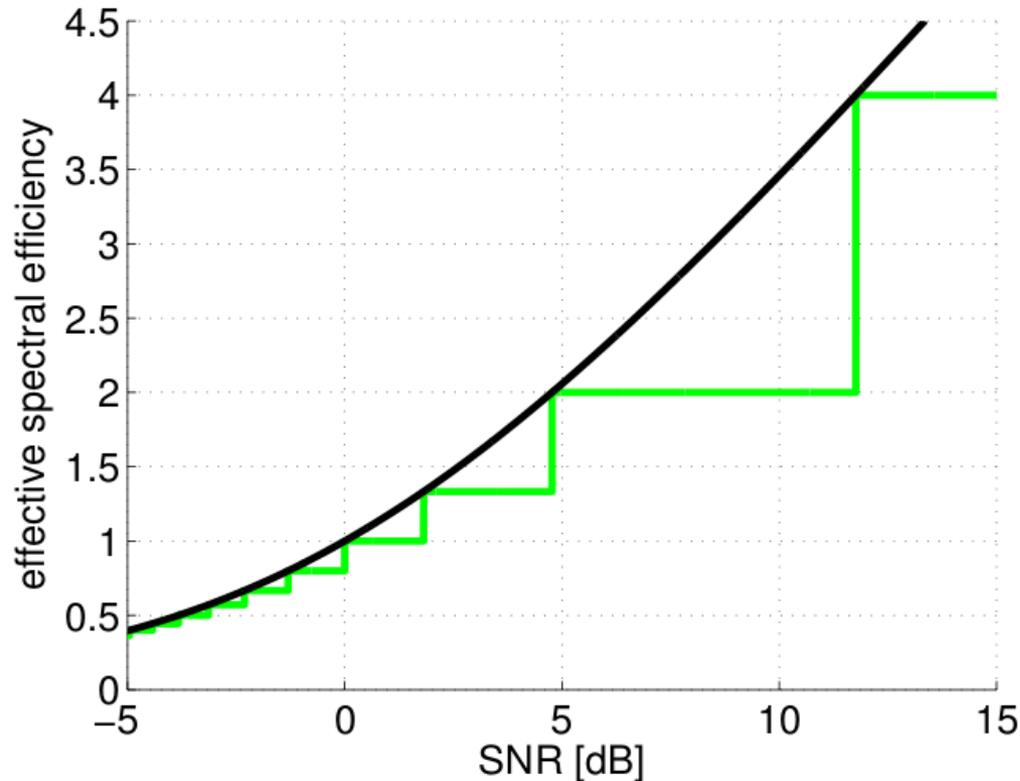
□ M-PSK $\rho = \frac{\log_2 M}{2}$

□ M-QAM $\rho = \frac{\log_2 M}{2}$

Modulação QAM

Eficiência espectral máxima: $\text{SNR} \neq \infty$

□



Modulação QAM

Exercício 3:

Dado um canal de comunicação com uma relação sinal ruído de 20 dB, determine o tipo de modulação mais adequado para que se tenha máxima eficiência espectral mantendo a BER inferior ou igual a 10^{-6} .

Tipos de modulação disponíveis para o problema:

-BPSK

-QPSK

-8, 16, 32, 64-PSK

-8, 16, 32, 64-QAM