

Comunicação de Dados

Capacidade do Canal

Prof. Luiz Fernando Carvalho
luizfcarvalho@utfpr.edu.br

Conteúdo

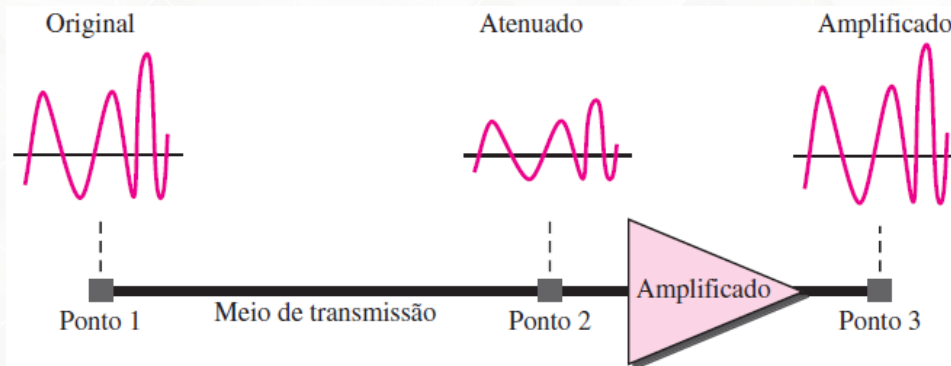
- Imperfeições na transmissão de dados
- Relação sinal ruído
- Limites na taxa de dados
 - Taxa de transferência de Nyquist
 - Capacidade de Shannon
- Desempenho

Comunicação

- Os sinais trafegam por meios de transmissão que não são perfeitos
 - Imperfeição provoca perda de sinal
 - O sinal no início do meio de transmissão não é o mesmo no seu final
- Três causas para essas perdas
 - Atenuação
 - Distorção
 - Ruído

Atenuação

- Significa perda de energia
 - Sinal perde energia para superar a resistência do meio
 - Essa perda é maior quanto maior as frequências utilizadas
- Um sinal recebido deve precisa ter “força” suficiente para que o receptor consiga interpretá-lo
 - Inclusive, o sinal tem que se sustentar em níveis suficientemente mais altos que o ruído para ser recebido sem erros
- Usa-se amplificadores (analógico)/repetidores (digital) para compensar a perda



Atenuação

- Decibel (dB)
 - Mede as intensidades relativas de dois sinais ou um sinal em dois pontos diferentes
 - O valor em decibel é negativo (perda) caso um sinal seja atenuado e positivo (ganho) se for um sinal amplificado

$$G_{dB} = 10 \log \frac{P_2}{P_1}$$

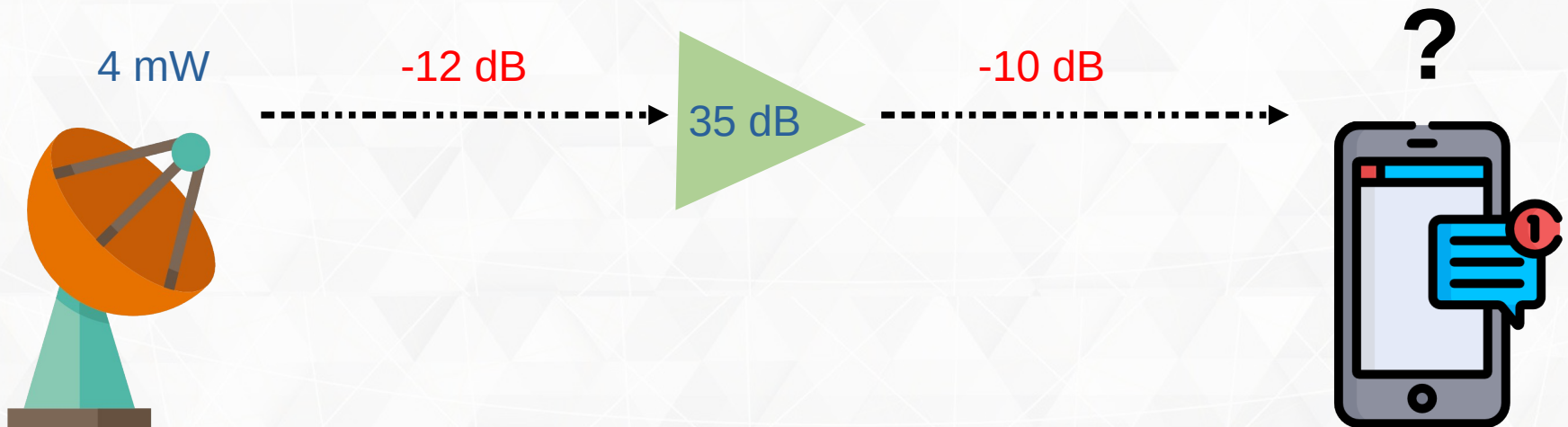
- P_2 e P_1 são, respectivamente as potências de um sinal nos pontos 1 e 2



Uma perda de 3 dB (-3 dB) equivale a perder metade da potência

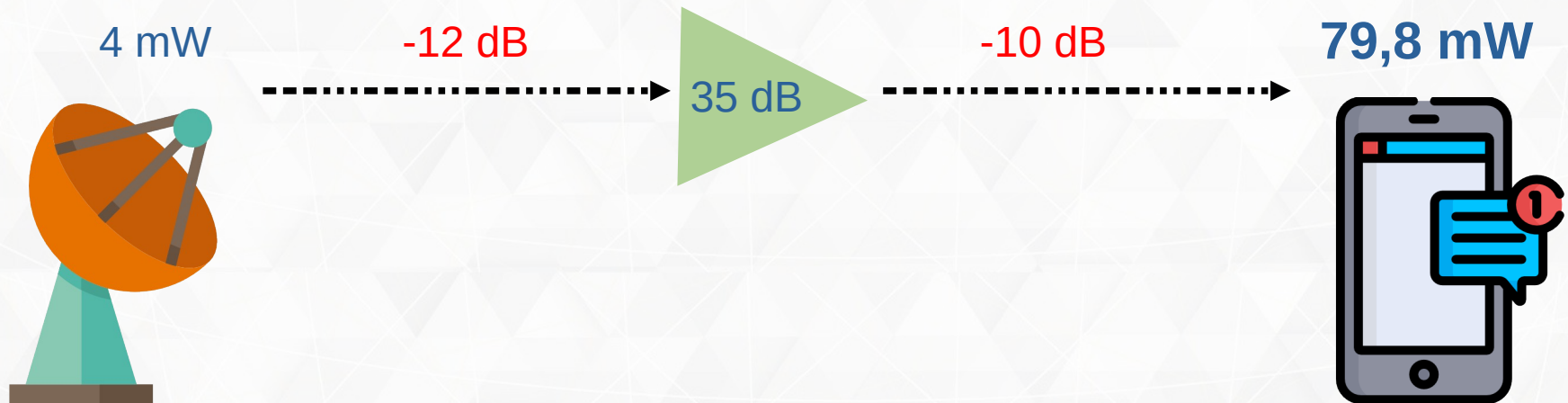
Atenuação e potência do sinal

Exemplo



Atenuação e potência do sinal

Exemplo



Atenuação

- O valor decibel descreve a mudança na magnitude dos valores
- Uma medida mais interessante é a *dBW* (*decibel-watt*)
 - O valor 1W é usado como referência e definido como 0 dBW

$$P_{dBW} = 10 \log \frac{P_W}{1 W}$$



$$P_{dBW} = 10 \frac{dBW}{10}$$

- Outra unidade comum é dBm (*decibel-miliwatt*), em que usa 1mW como referência, ou seja, 0 dBm = 1 mW

$$P_{dBm} = 10 \log \frac{P_{mW}}{1 mW}$$

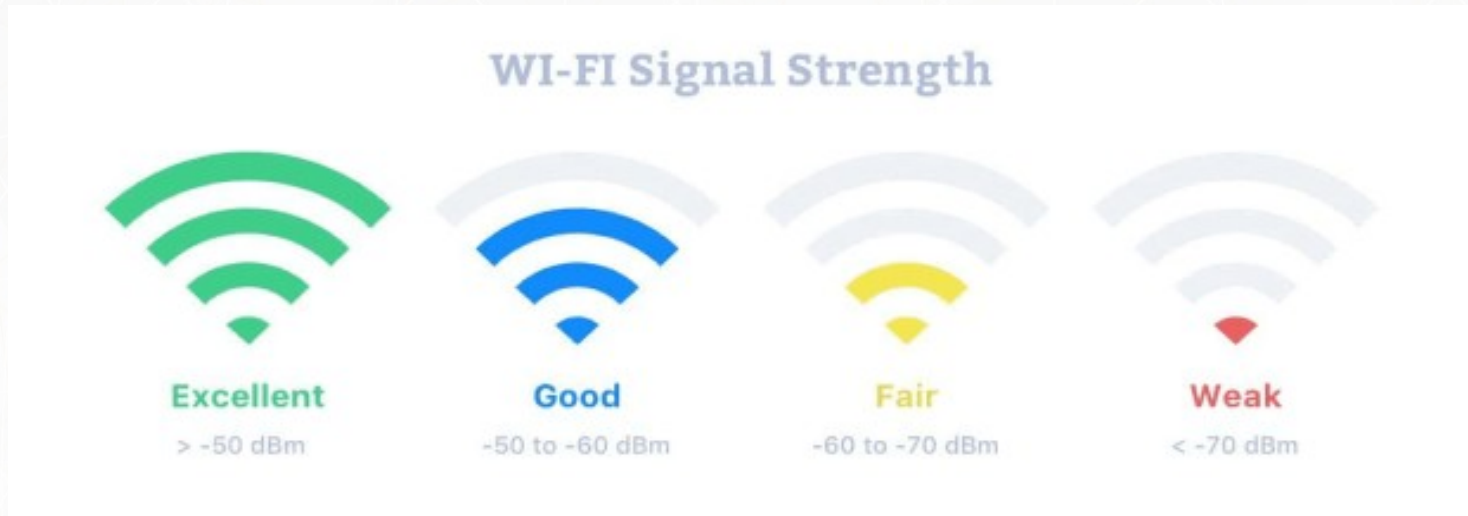


$$P_{dBm} = 10 \frac{dBm}{10}$$



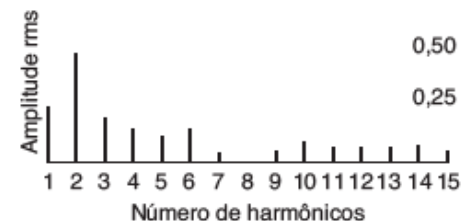
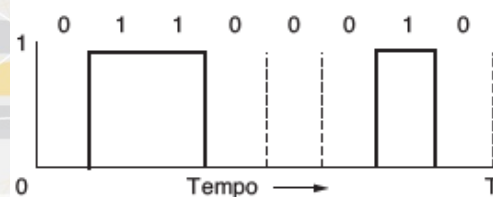
Uma potência de 1000 W é 30 dBW e uma potência de 1 mW é -30 dBW

Atenuação e potência do sinal

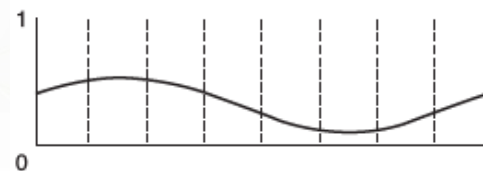


Atenuação

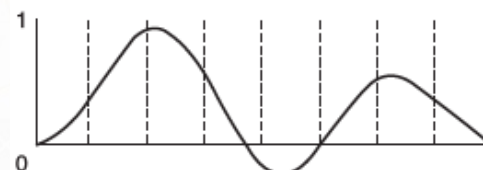
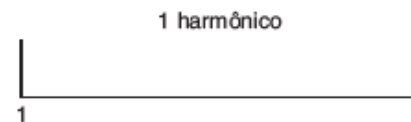
- Transmissão do caractere ASCII **b**, codificado como um byte: **0 1 1 0 0 0 1 0**
- O quadrado das amplitudes das harmônicas são proporcionais à energia transmitida na frequência correspondente
- Se todas as componentes do sinal tivessem mesma amplitude e sofresse atenuação, o sinal continuaria com a mesma forma
- Componentes são afetadas de maneira diferente causando **distorções** no sinal



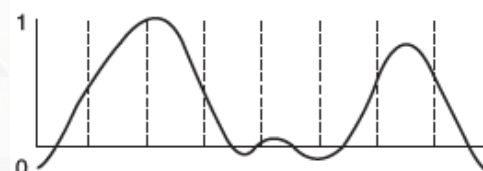
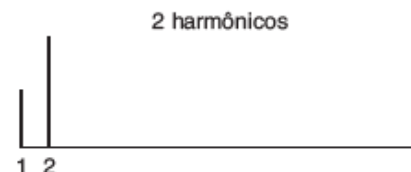
(a)



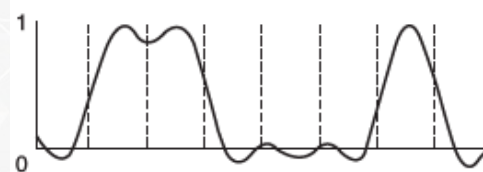
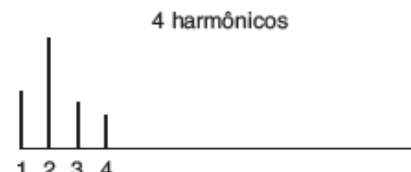
(b)



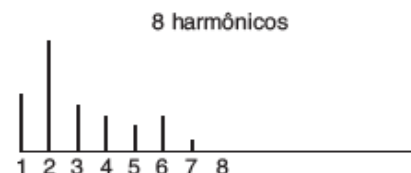
(c)



(d)

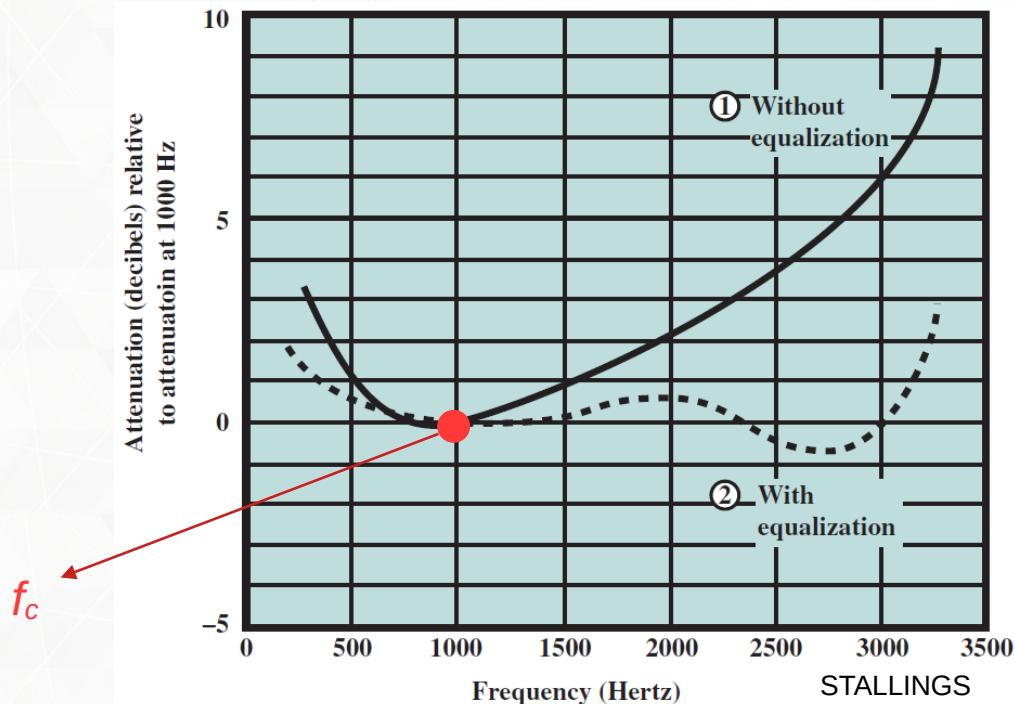


(e)



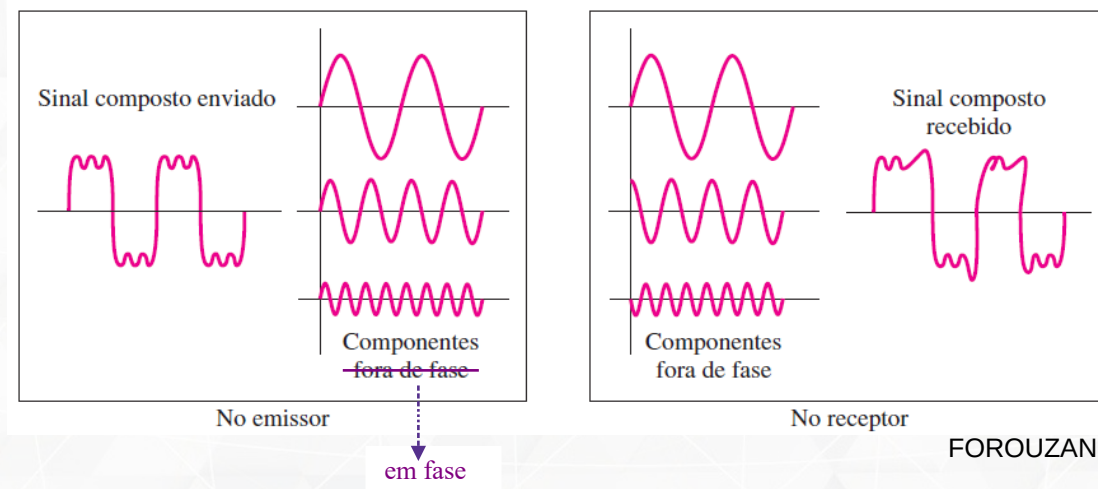
Atenuação

- Em geral, para um cabo, as amplitudes são transmitidas sem redução, de 0 até alguma frequência f_c
 - Todas as frequências acima dessa frequência de corte f_c são atenuadas
 - Assim, a faixa de frequências transmitidas sem serem fortemente atenuadas denomina-se **largura de banda!**



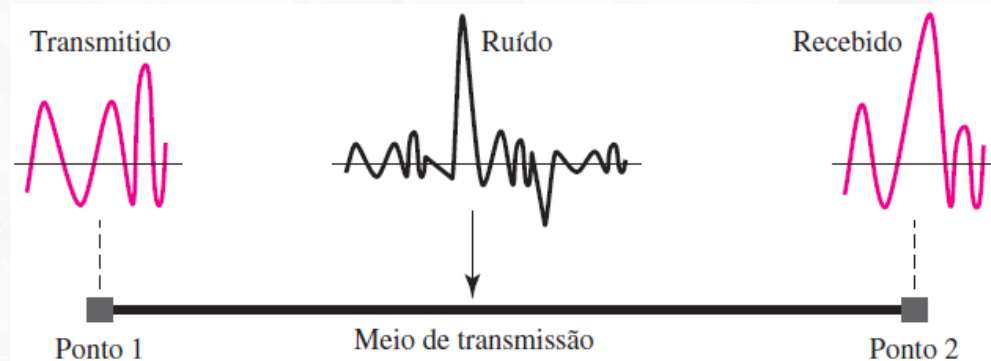
Distorção

- Causa mudanças na forma de um sinal
- Cada componente do sinal tem sua própria velocidade de propagação e, portanto, seu próprio atraso em atingir o destino
- Diferenças nesse atraso podem criar uma diferença na fase
 - Se a fase muda até chegar ao receptor, o sinal recebido já não é mais o mesmo enviado



Ruído

- É o maior fator de limitação da performance dos sistemas de telecomunicação
- Diferentes causas:
 - Térmico
 - Intermodulação
 - *Crosstalk*
 - Impulso



Ruído térmico

- Provém da movimentação de elétrons criando um sinal extra
- Está presente em todos os dispositivos e em meios de transmissão metálicos
- O ruído térmico é uniformemente distribuído ao longo da largura de banda comumente usada nos sistemas de comunicação e geralmente é chamado de ruído branco (*white noise*)
- Esse ruído não pode ser eliminado e, é dado por:

$$N = 10 \log k + 10 \log T + 10 \log B$$

N = ruído térmico em decibel-watts

k = constante de Boltzmann = $1,38 \times 10^{-23}$

T = Temperatura em kelvin

B = largura de banda em Hz

Ruído de intermodulação

- Ocorre quando sinais de diferentes frequências compartilham o mesmo meio de transmissão
- O efeito desse ruído produz sinais que são resultante da soma ou diferença dos sinais originais
 - Por exemplo: um sinal de 4 kHz e outro de 8 kHz, ambos compartilhando um cabo, podem produzir um sinal de 12 kHz
 - Esse sinal ruidoso pode interferir em outro sinal de 12 kHz utilizado para transmissão
- O ruído de intermodulação pode ocorrer devido a componentes defeituosos ou por causa de sinais com potência muito alta.

Ruído crosstalk

- Causado pela interferência entre canais de comunicação vizinhos
- O sinal que é transmitido em um meio gera perturbações sobre um outro que esteja em suas proximidades
- Esse tipo de ruído será maior tanto quanto for maior a proximidade entre os meios de transmissão, a amplitude e as frequências

Ruído por impulso

- O ruído por impulso é oriundo de fontes externas que provocam um pulso de energia muito intenso e, geralmente, de curta duração
- É um ruído não contínuo, com grandes amplitudes e de difícil prevenção
- Normalmente ele é pouco danoso à uma transmissão analógico (exemplo, corte temporário em uma transmissão de voz)
- Em transmissão digital ele é um dos maiores causadores de erro

Ruído

Data transmitted:

1 0 1 0 0 1 1 0 0 1 1 0 1 0 1

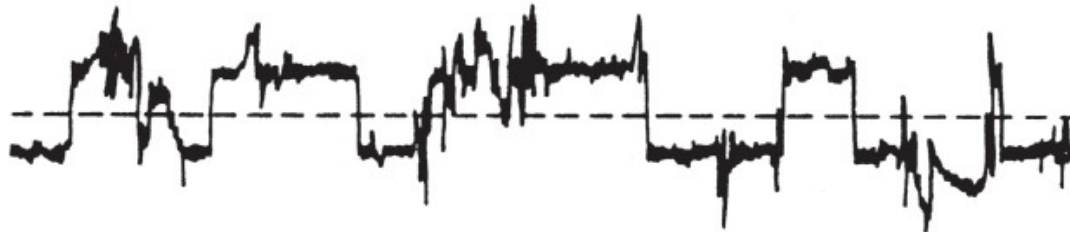
Signal:



Noise:



Signal plus noise:



Sampling times:



Data received:

1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 1 0 1 1 1

Original data:

1 0 1 0 0 1 1 0 0 1 1 0 1 0 1

Bits in error



Relação Sinal-Ruído (SNR) Signal-to-Noise Ratio

$$SNR = \frac{\text{potência média do sinal}}{\text{potência média do ruído}}$$

- Razão daquilo que é desejado (sinal) por aquilo que não é desejado (ruído)
- Precisamos considerar a potência média do sinal e potência média do ruído, pois elas podem mudar com o tempo
- Como o SNR é a razão entre duas potências, é normalmente descrito em decibéis

$$SNR_{dB} = 10 \log SNR$$



SNR = o sinal é menos afetado pelo ruído



SNR = o sinal é mais prejudicado pelo ruído

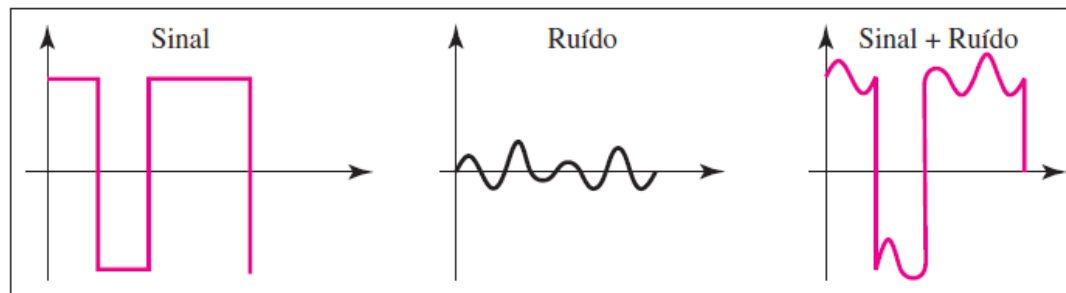
Relação Sinal-Ruído (SNR)



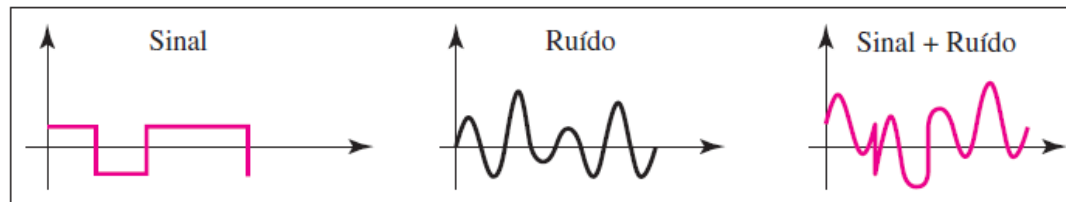
SNR = o sinal é menos afetado pelo ruído



SNR = o sinal é mais prejudicado pelo ruído



a. SNR alto



b. SNR baixo

Relação Sinal-Ruído (SNR)

- **Exemplo:** A potência de um sinal é 10 mW e a potência do ruído é igual a 1 μW. Quais são os valores de SNR e SNR_{dB}?

$$SNR = \frac{10.000 \mu W}{1 \mu W} = 10.000$$

$$SNR_{dB} = 10 \log 10.000 = 10 \log 10^4 = 40$$

- **Exemplo:** Os valores de SNR e SNR_{dB} para um canal sem ruído são:

$$SNR = \frac{\text{potência do sinal}}{0} = \infty$$

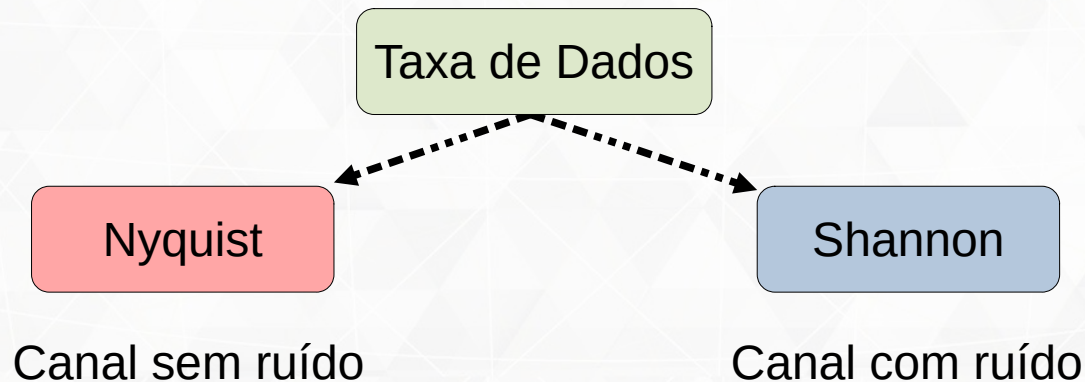
$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \infty = \infty$$



O valor ideal SNR = ∞ não pode ser atingido na vida real

Limites na Taxa de Dados

- A rapidez com que se pode enviar dados através de um canal depende de três fatores
 - Largura de banda disponível
 - O nível dos sinais usados
 - A qualidade do canal (nível de ruído)



Taxa de Transferência de Nyquist

$$\text{Taxa Transferência} = 2 \times \text{largura de banda} \times \log_2 L$$

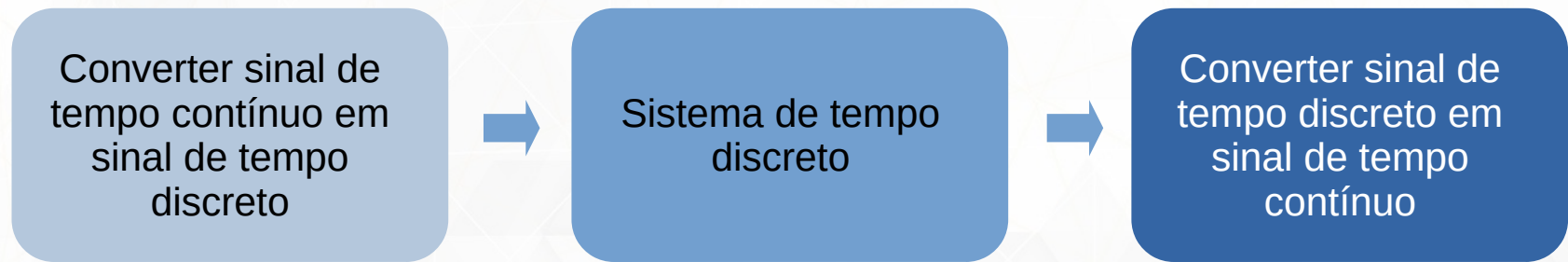
- L corresponde ao número de níveis do sinal usado para representar dados
- *Taxa Transferência* é medido em bits por segundo
- Aumentar o número de níveis do sinal impõe uma carga sobre o receptor
 - *Níveis de sinal for dois*: receptor distingue entre 0 e 1
 - *Níveis de sinal for 64*: receptor deve ser muito sofisticado para distinguir 64 níveis diferentes



Aumentar os níveis de um sinal reduz a confiabilidade do sistema

Teorema de Nyquist – Amostragem do sinal

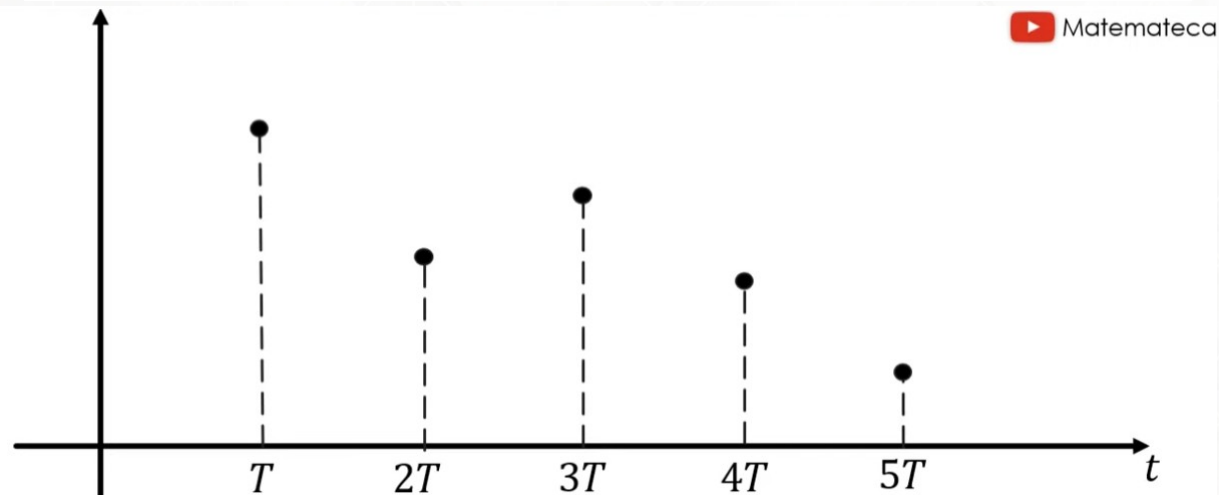
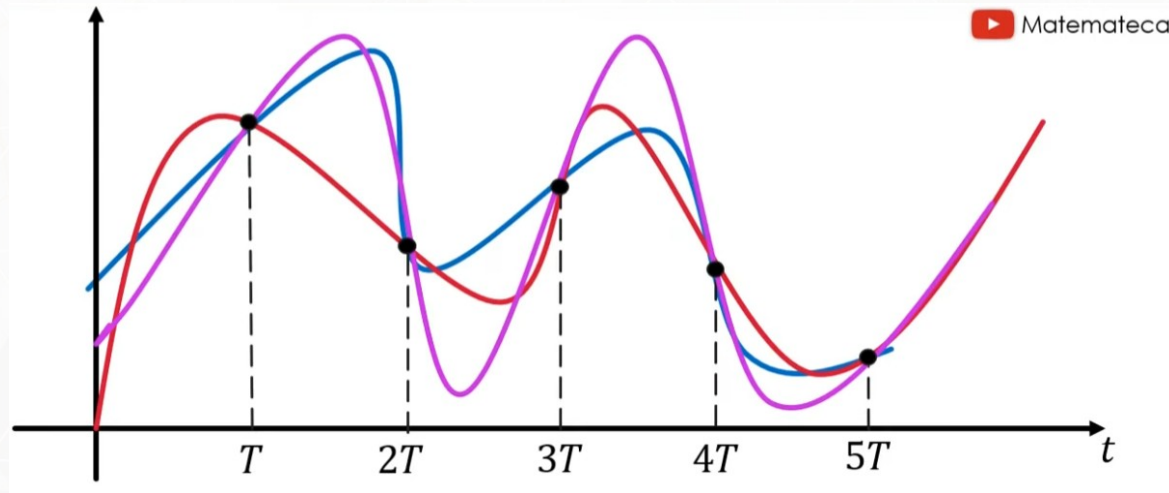
- Em muitas aplicações, é mais vantajoso processarmos sinais de tempo discreto do que de tempo contínuo



- Para reproduzir um sinal analógico original, uma condição necessária é que a taxa de amostragem seja **pelo menos o dobro** da frequência mais elevada contida no sinal original
 - Um sinal com largura de banda infinita não pode ser amostrado
 - A taxa de amostragem leva em consideração a maior frequência do sinal, não a largura de banda

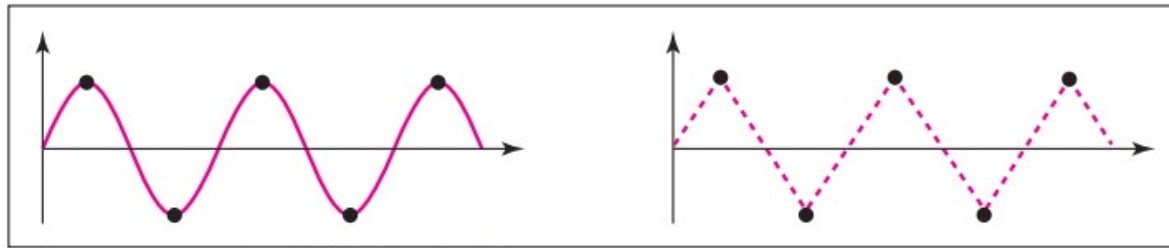
Teorema de Nyquist – Amostragem do sinal

- Como escolher o período de amostragem?

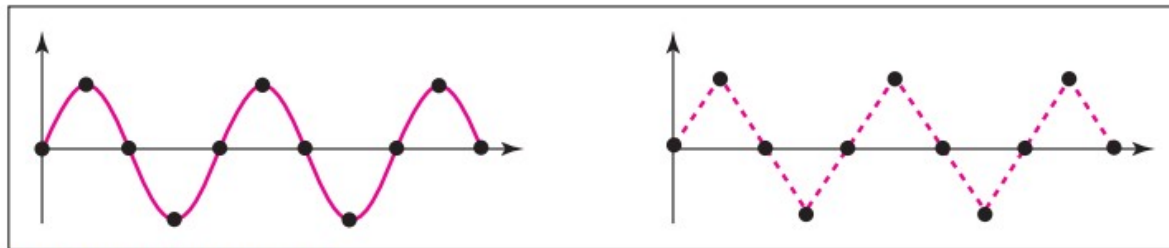


Teorema de Nyquist – Amostragem do sinal

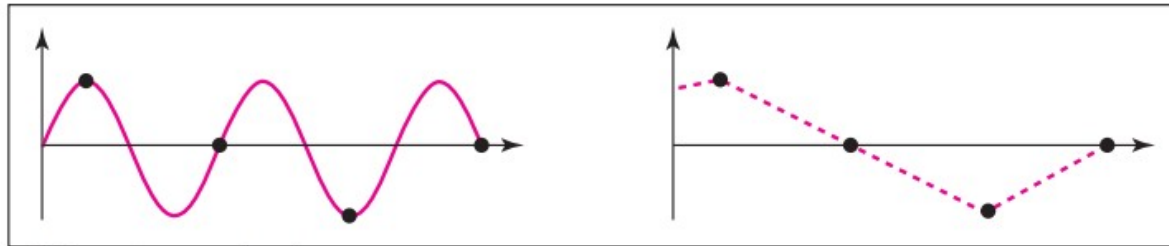
$$\text{Taxa de Nyquist} = 2 \times f_{\max}$$



a. Amostragem com taxa de Nyquist: $f_s = 2f$



b. Sobreamostragem: $f_s = 4f$



c. Subamostragem: $f_s = f$

Capacidade de Shannon

$$Capacidade = largura\ de\ banda \times \log_2(1 + SNR)$$

- Introduzida em 1944 por Claude Shannon, a equação indica a capacidade do canal em bits por segundo
 - Provou matematicamente que um canal tem capacidade limitada
 - A capacidade calculada é superestimada, pois leva em consideração apenas o ruído térmico
- O sistema telefônico oferece uma largura de banda de aproximadamente 3.000 Hz (300 a 3.300 Hz) a uma relação sinal ruído de 3.162
 - $Capacidade = 3.000 \log_2(1 + 3.162) = 34.860$ bps
 - Para enviar dados de forma mais rápida na linha telefônica
 - Aumentar a largura de banda
 - Melhorar a relação sinal/ruído

Nyquist e Shannon - Exemplo

- Na prática usa-se a combinação dos dois métodos para encontrar os limites e níveis de sinal
- **Exemplo:** Temos um canal com uma largura de banda de 1 MHz. A SNR para esse canal é 63. Quais são a taxa de transferência e o nível de sinal apropriados?

Shannon para encontrar o limite superior:

$$C = B \log_2 (1 + \text{SNR}) = 10^6 \log_2 (1 + 63) = 10^6 \log_2 64 = 6 \text{ Mbps}$$

Para um melhor desempenho, pode-se escolher um limite menor, por exemplo 4Mbps

Nyquist para encontrar o número de níveis de sinal:

$$C = 2 \times B \times \log_2 L$$

$$4 \text{ Mbps} = 2 \times 1 \text{ MHz} \times \log_2 L \quad \rightarrow \quad L = 4$$

Desempenho

- Largura de Banda: mediado em Hertz ou bits por segundo
 - Largura em Hertz: intervalo de frequências contido em um sinal composto
 - Largura em bits: número de bits por segundo que um canal, enlace ou rede é capaz de transmitir
- *Throughput*: medida da rapidez pela qual podemos realmente enviar dados pela rede
 - Largura de banda é sempre maior ou igual ao *throughput*
- *Jitter*: problema ocorrido quando partes das mensagens (pacotes) têm atrasos diferentes e aplicação que fará uso dos dados no receptor for sensível ao tempo (por exemplo, áudio e vídeo)

Desempenho

- Latência: Tempo para uma mensagem chegar de forma completa no seu destino

Tempo de propagação

Tempo para um bit trafegar da origem para o destino



Tempo de transmissão

Tempo para transmissão de toda a mensagem



Tempo de fila

Tempo para cada dispositivo intermediário ou terminal manter a mensagem antes dela ser processada



Atraso de processamento

Tempo para um dispositivo ler o conteúdo da mensagem e decidir para onde esta deve ser encaminhada

$$TP = \frac{\text{distância}}{\text{Vel. de propagação}}$$

$$TT = \frac{\text{Tam. da mensagem}}{\text{Larg. de banda}}$$