

Redes de Computadores

Camada Física

Prof. Clausius Duque Reis

clausius.reis@ufpr.br

A Camada Física

| Camada | Nome |
|----------|---------------|
| 5 | Aplicação |
| 4 | Transporte |
| 3 | Rede |
| 2 | Enlace |
| 1 | Física |

A Camada Física

- **Agenda**
 - Conceitos Básicos
 - Meios de Transmissão
 - Modulação Digital e Multiplexação

- **Agenda**
 - **Conceitos Básicos**
 - Meios de Transmissão
 - Modulação Digital e Multiplexação

Conceitos Básicos

- **Tópicos:**
 - Informação e Sinal;
 - Analógico e Digital;
 - Perdas na Transmissão;
 - Largura de Banda;
 - Taxa máxima de dados de um canal;
 - Latência;
 - Velocidade de sinalização.

- **Processo de comunicação (transmissão de informação de um ponto a outro):**
 - Geração de uma ideia na origem;
 - Descrição da ideia por um conjunto de símbolos;
 - Codificação dos símbolos para transmissão em um meio físico;
 - Transmissão dos símbolos codificados ao destino;
 - Decodificação e reprodução dos símbolos no destino;
 - Recriação da ideia transmitida pelo destinatário.

Informação e Sinal

- **Informação:**

- Estão associadas às ideias ou aos dados manipulados pelos agentes que as criam, manipulam e processam

- **Sinais:**

- Correspondem à materialização específica dessas informações utilizada no momento da transmissão

Analógico e Digital

- Termos normalmente utilizados no contexto de comunicação de dados para qualificar tanto a **natureza das informações** quanto a **característica dos sinais** utilizados para a transmissão;
- **Natureza da informação:**
 - Computadores são equipamentos que manipulam informações em bits que correspondem a dois **valores discretos: 0 e 1**;
 - Informações geradas por fontes sonoras ou visuais apresentam **variações contínuas** de amplitude;
- **Característica dos sinais:**
 - **Analógicos:** conjunto infinito de valores que variam continuamente com o tempo;
 - **Digitais:** conjunto finito (discreto) de valores;

Analógico e Digital

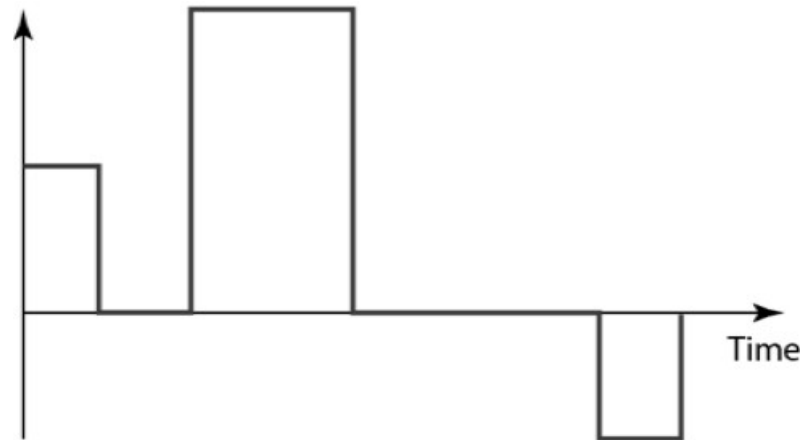
- Termos normalmente utilizados no contexto de comunicação de dados para qualificar tanto a **natureza das informações** quanto a **característica dos sinais** utilizados para a transmissão;
- **Natureza da informação:**
 - Computadores são equipamentos que manipulam informações em bits que correspondem a dois **valores discretos: 0 e 1**;
 - Informações geradas por fontes sonoras ou visuais apresentam **variações contínuas** de amplitude;
- **Característica dos sinais:**
 - **Analógicos:** conjunto infinito de valores que variam continuamente com o tempo;
 - **Digitais:** conjunto finito (discreto) de valores;

Analógico e Digital

- Sinal Analógico:

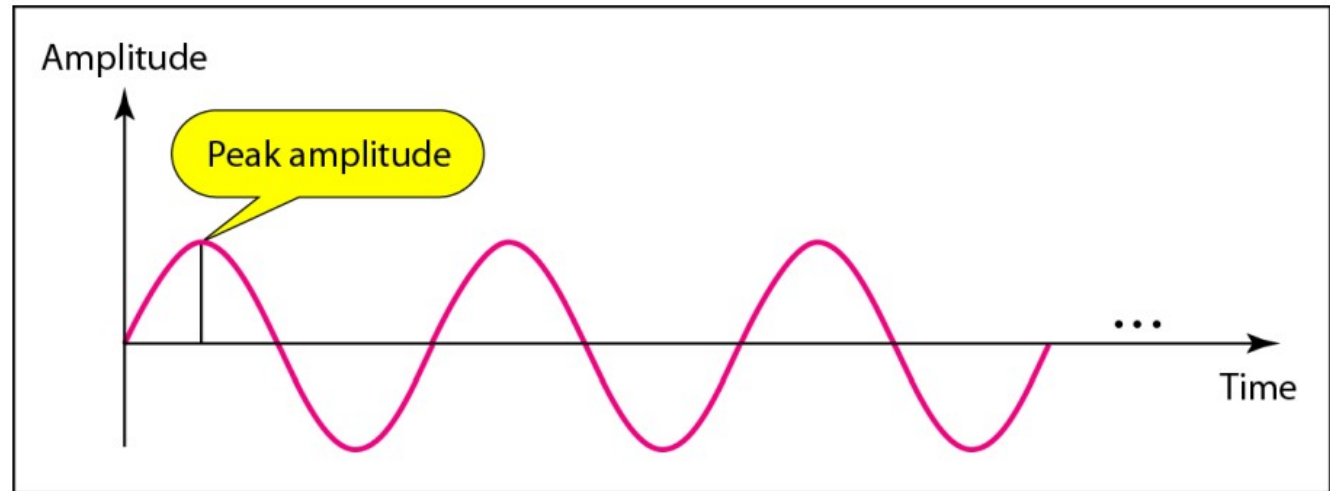


- Sinal Digital:

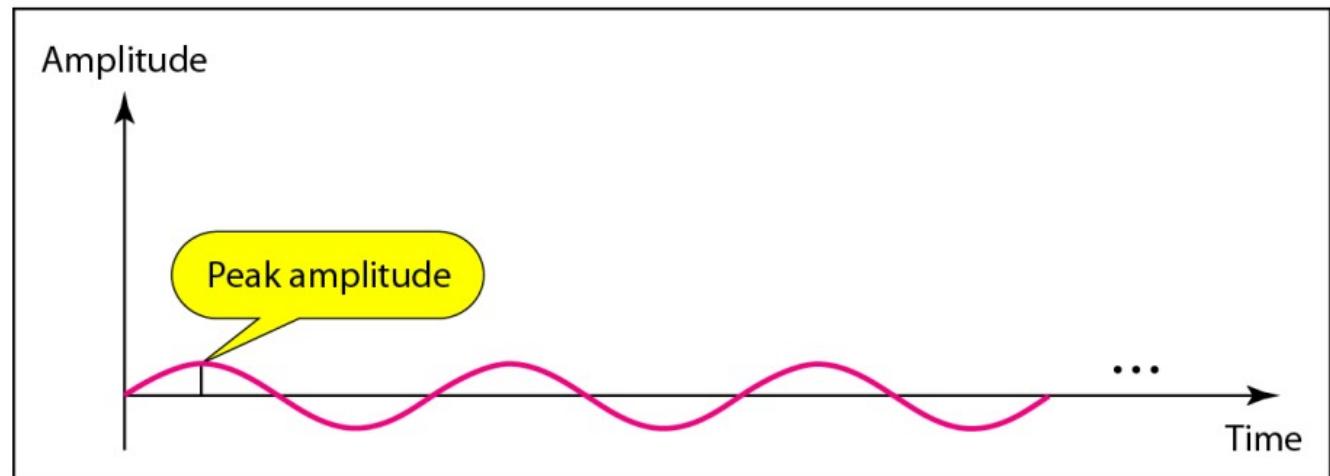


Sinais Analógicos

- **Amplitude**
- Frequência
- Fase



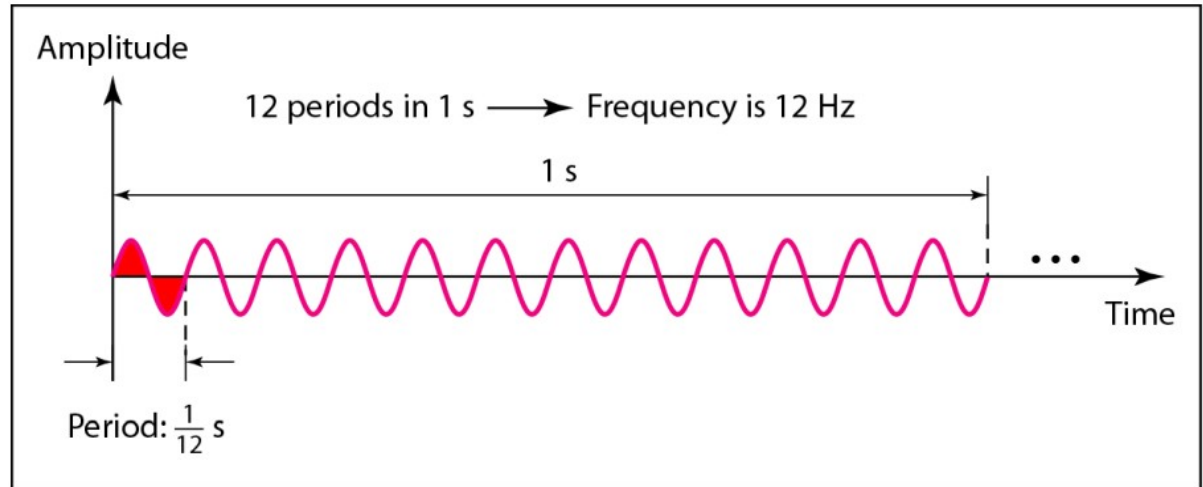
a. A signal with high peak amplitude



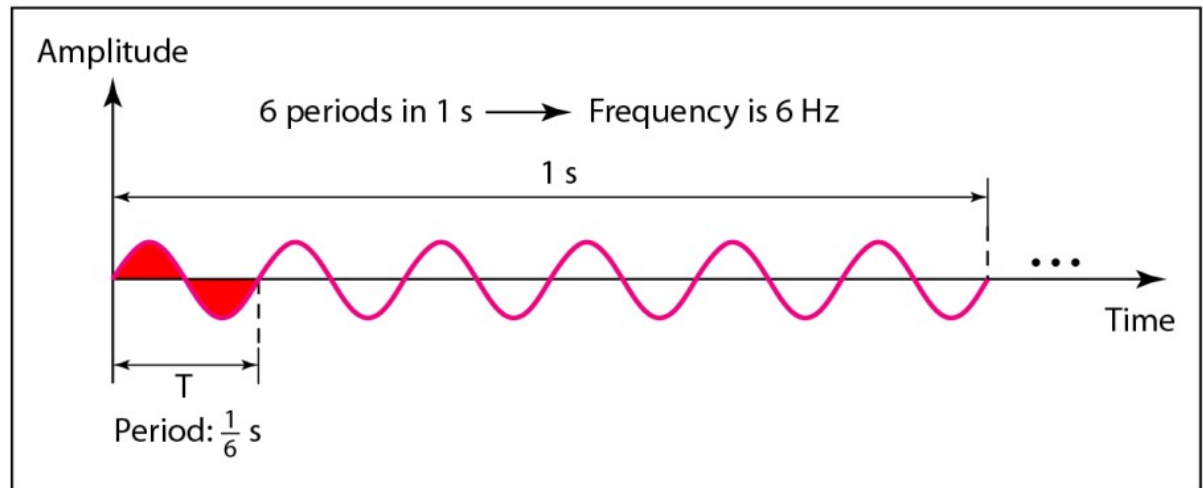
b. A signal with low peak amplitude

Sinais Analógicos

- Amplitude
- **Frequência**
- Fase



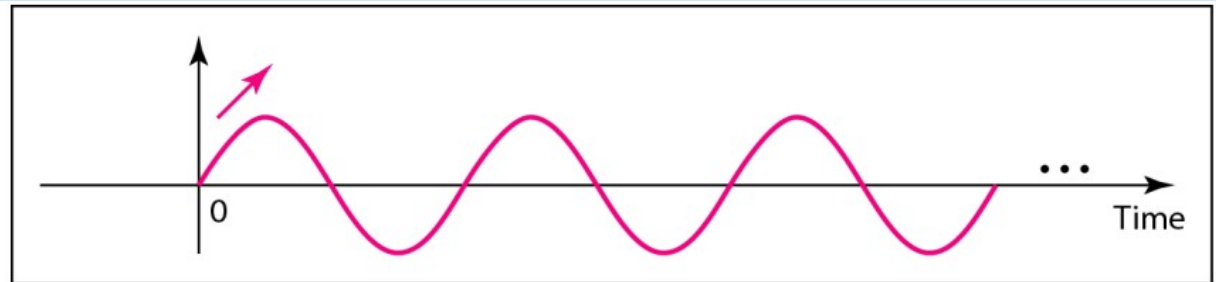
a. A signal with a frequency of 12 Hz



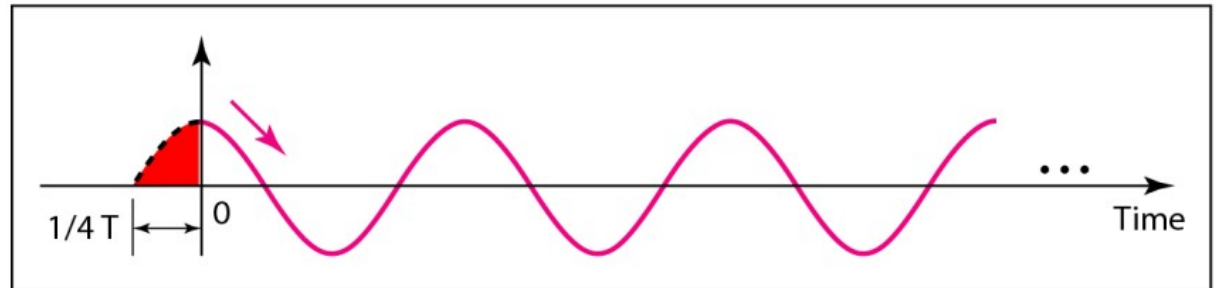
b. A signal with a frequency of 6 Hz

Sinais Analógicos

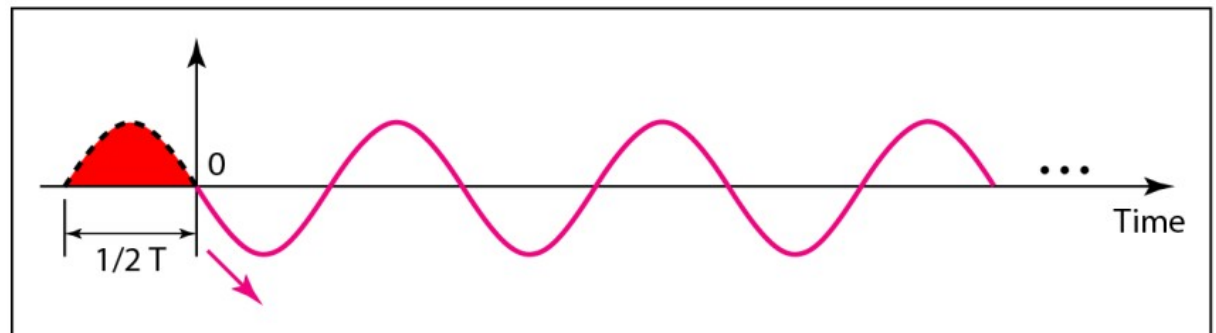
- Amplitude
- Frequência
- **Fase**



a. 0 degrees



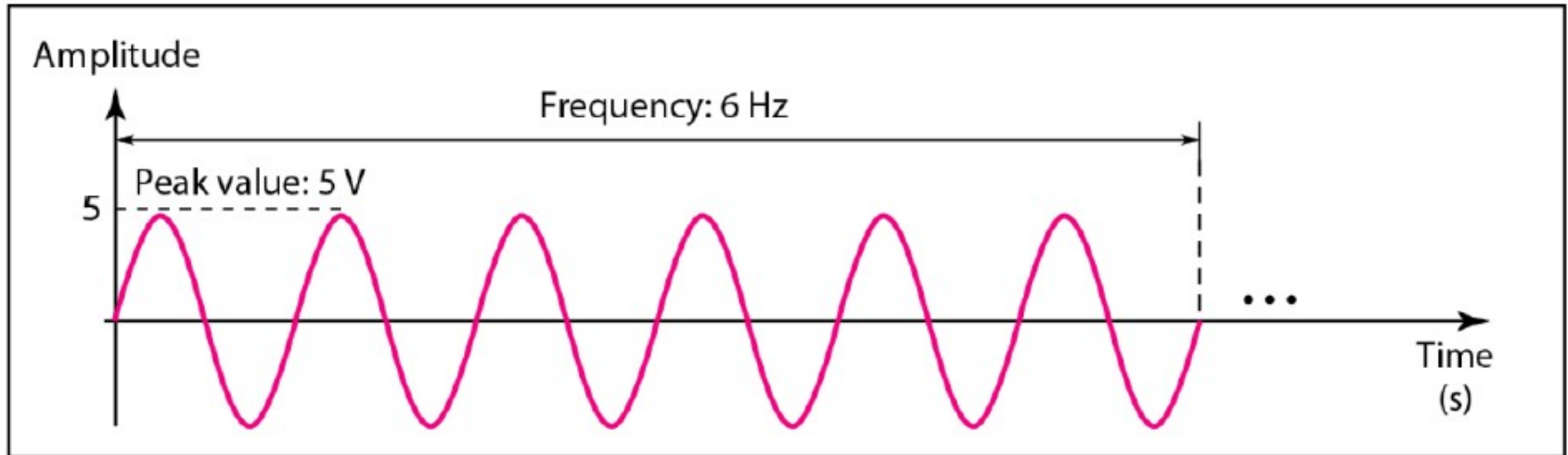
b. 90 degrees



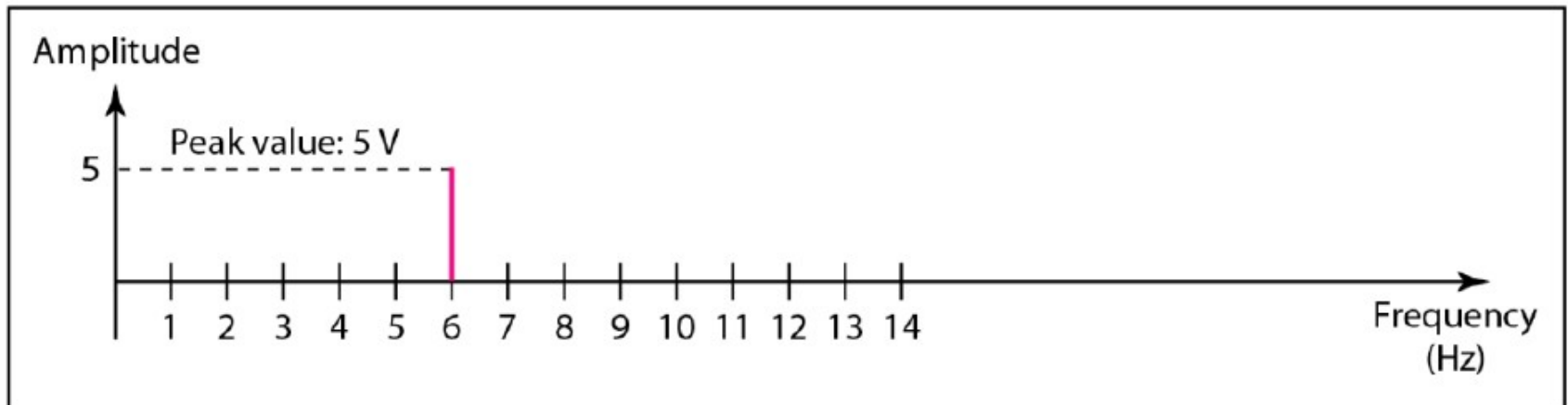
c. 180 degrees

Sinais Analógicos

Domínio de Tempo e Domínio da Frequência:



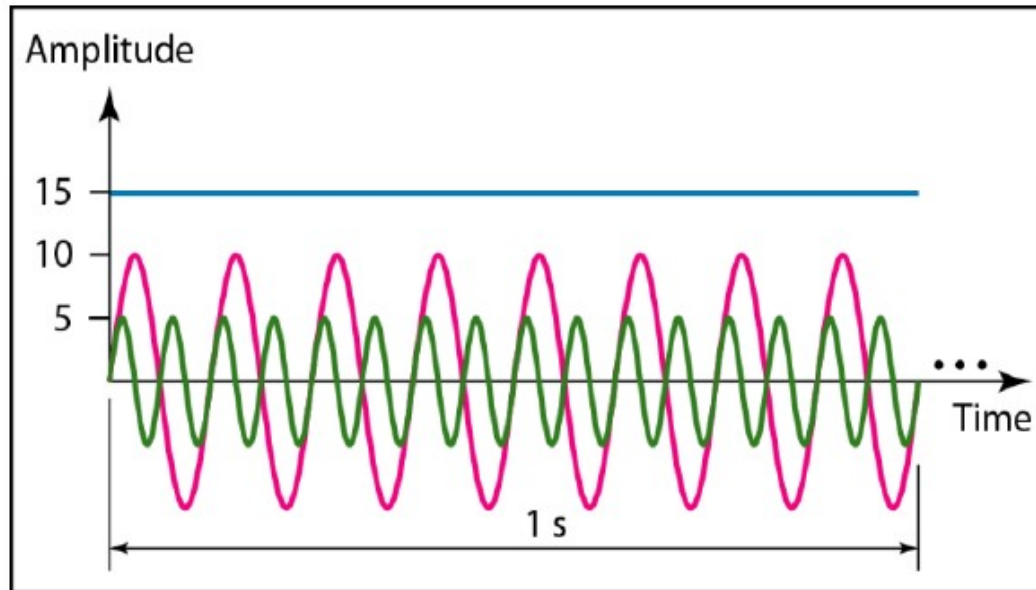
a. A sine wave in the time domain (peak value: 5 V, frequency: 6 Hz)



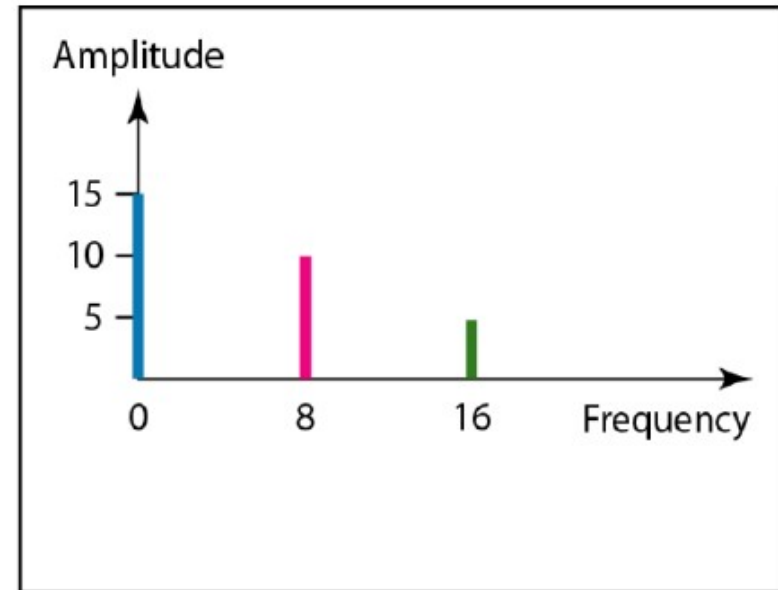
b. The same sine wave in the frequency domain (peak value: 5 V, frequency: 6 Hz)

Sinais Analógicos

- Domínio de Tempo e Domínio da Frequência:



a. Time-domain representation of three sine waves with frequencies 0, 8, and 16

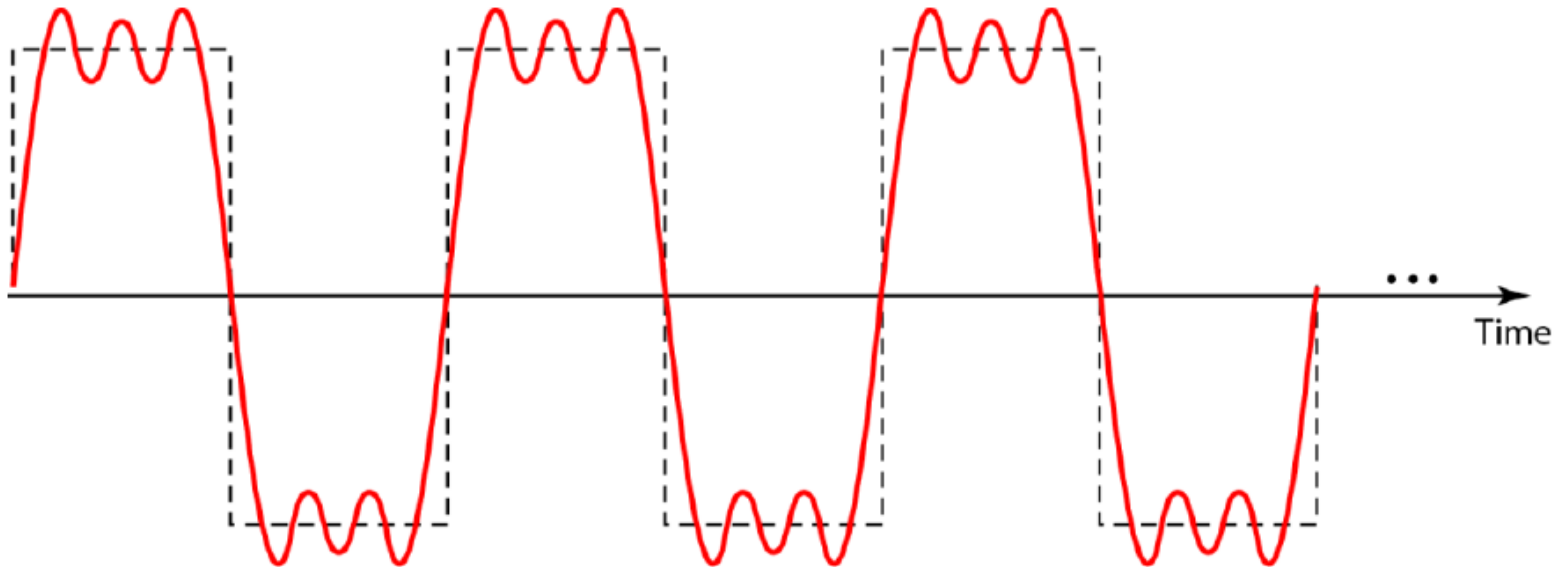


b. Frequency-domain representation of the same three signals

Sinais Analógicos

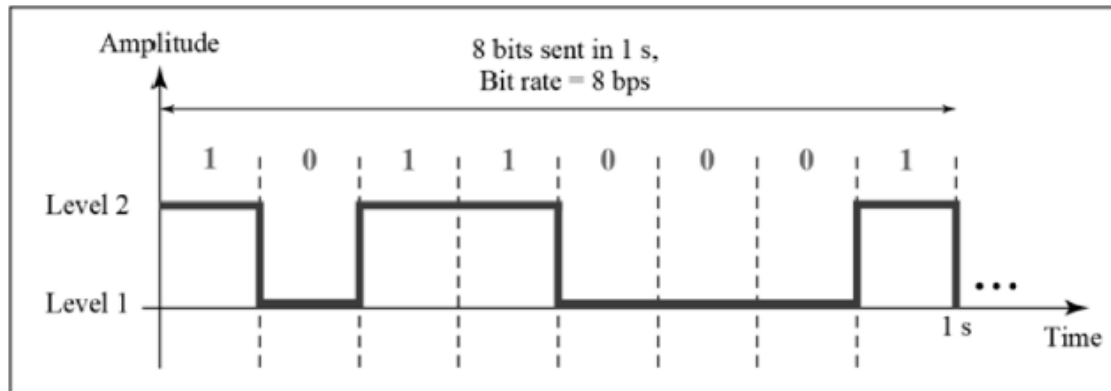
- **Sinais compostos:**

- Jean Fourier provou que qualquer sinal periódico expresso em função do tempo pode ser composto pela combinação de ondas senoidais simples de diferentes frequências (*Série de Fourier*);
- Exemplo:

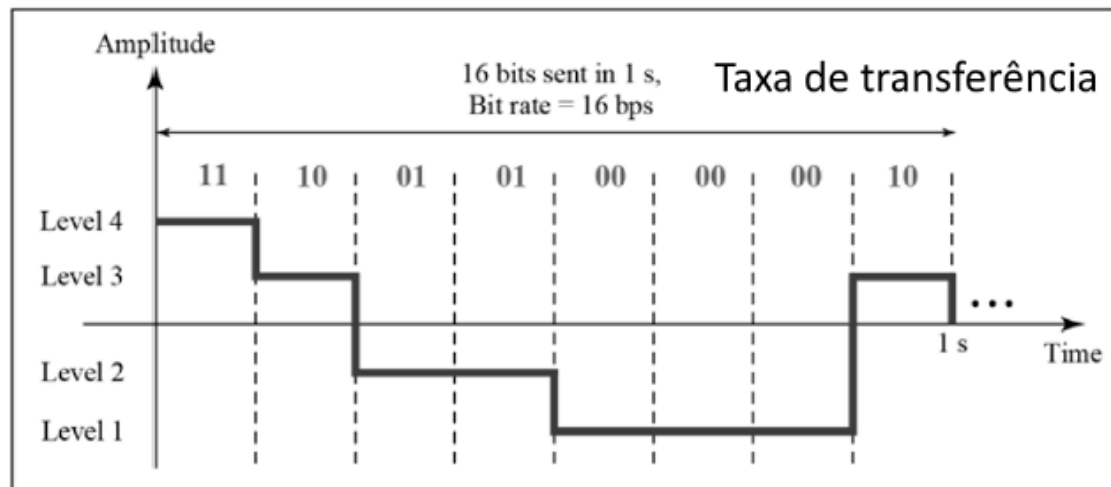


Sinais Digitais

- Caracteriza-se pela presença de pulsos de amplitude fixa (*níveis*);
- O sinal é constituído através de uma sequência de intervalos de tamanho fixo iguais a T segundos (*intervalos de sinalização*).



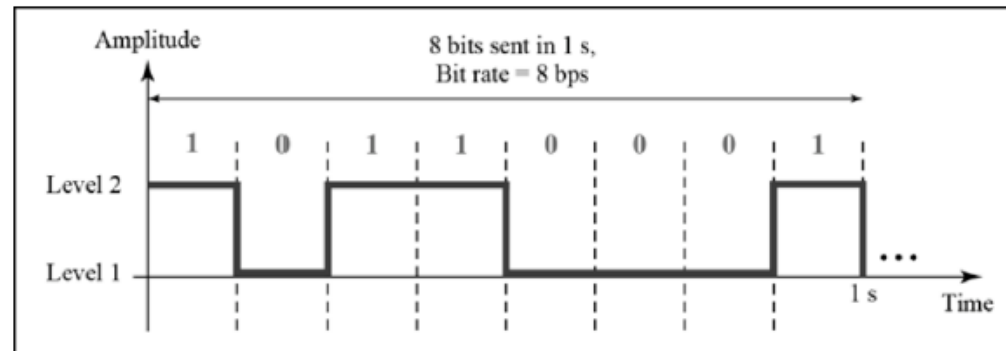
a. A digital signal with two levels



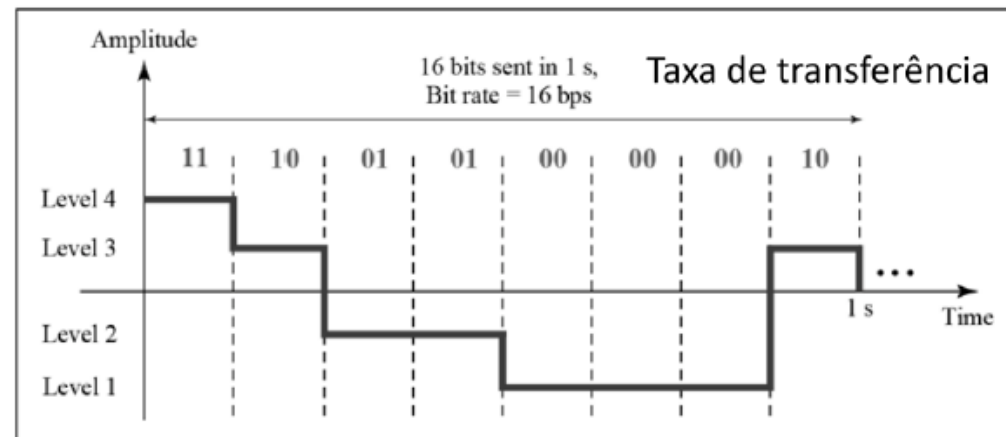
b. A digital signal with four levels

Sinais Digitais

- Para transportar n bits serão necessários 2^n diferentes níveis;
- De forma equivalente, se uma sinalização utiliza L níveis (em uma potência inteira de 2), então o número de bits codificados por nível será de $\log_2 L$ bits.
- Exemplos:
 - 1 bit = 2 níveis;
 - 2 níveis = $\log_2 2$ bits = 1 bit;
 - 2 bits = 2^2 níveis = 4 níveis
 - 4 níveis = $\log_2 4$ bits = 2 bits.



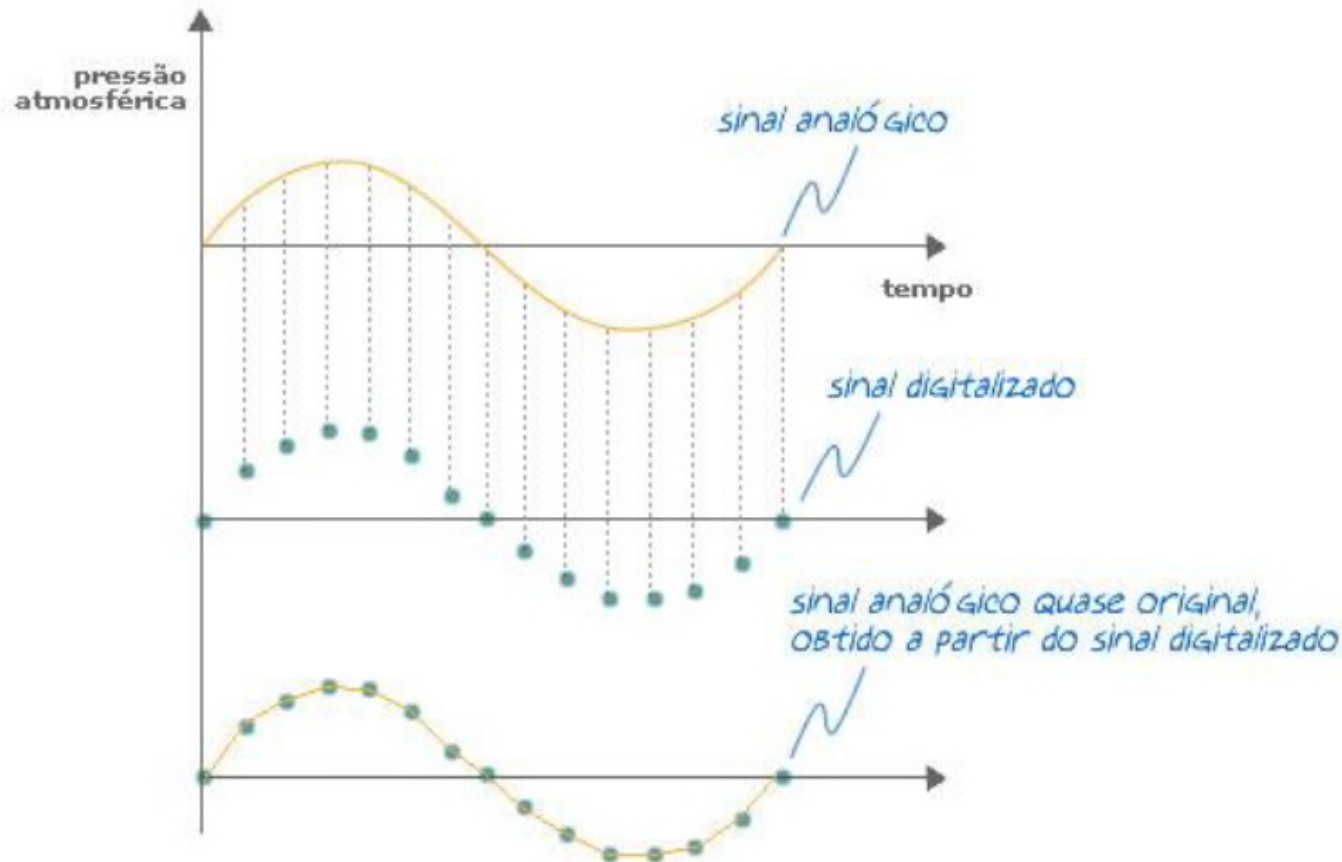
a. A digital signal with two levels



b. A digital signal with four levels

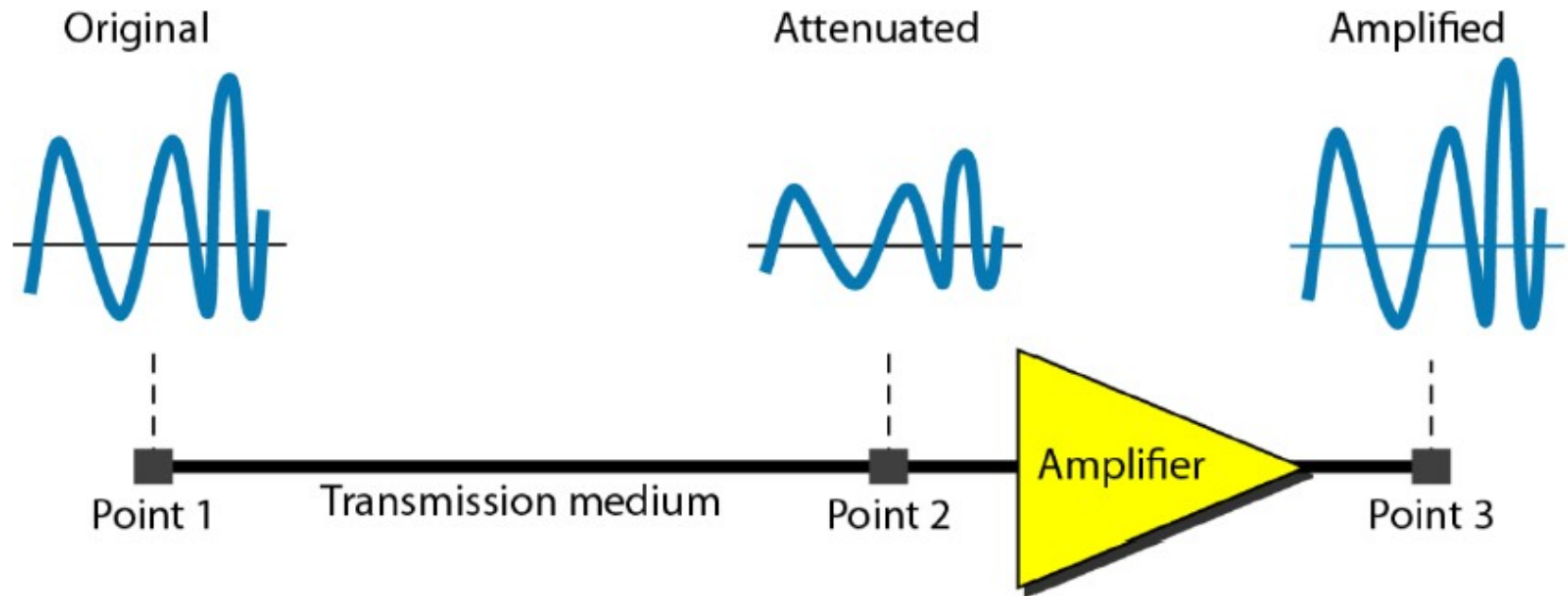
Analógico e Digital

- Qualquer tipo de informação, seja ela analógica ou digital, pode ser transmitida tanto através de um sinal analógico quanto por um sinal digital;
- Exemplo: voz sendo transmitida por um sinal digital:



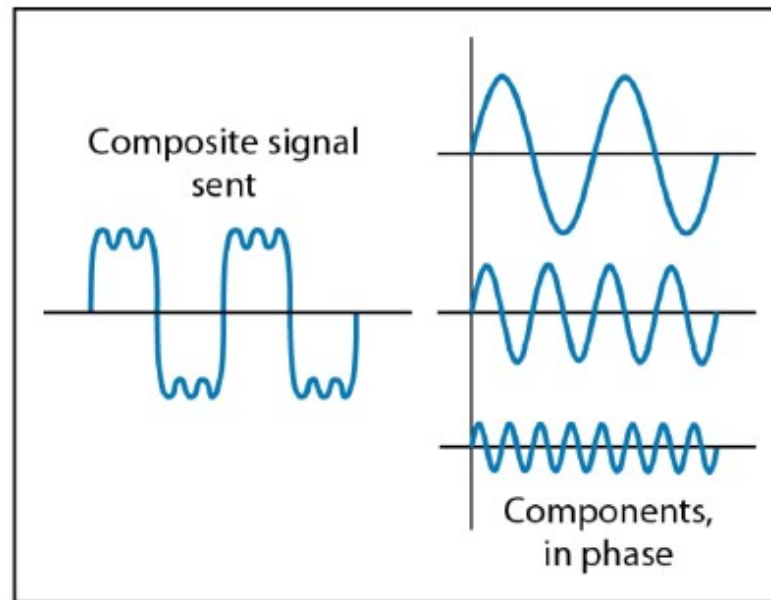
Perdas na transmissão

- Causas de perdas nas transmissões:
 - **Atenuação:**
 - Distorção;
 - Ruído.

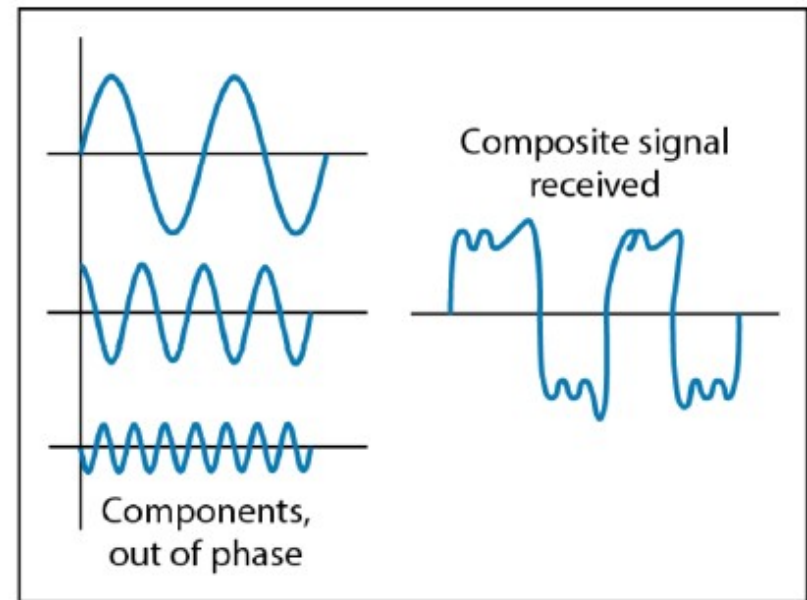


Perdas na transmissão

- Causas de perdas nas transmissões:
 - Atenuação;
 - **Distorção:**
 - Ruído.



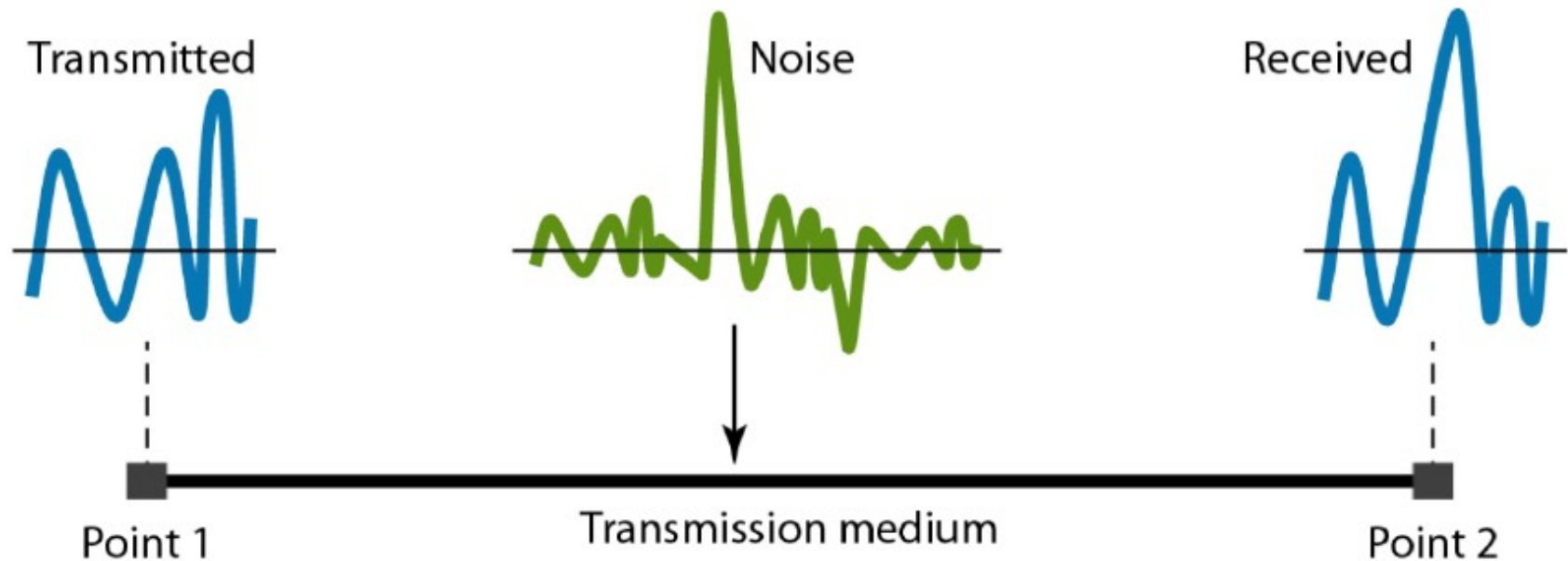
At the sender



At the receiver

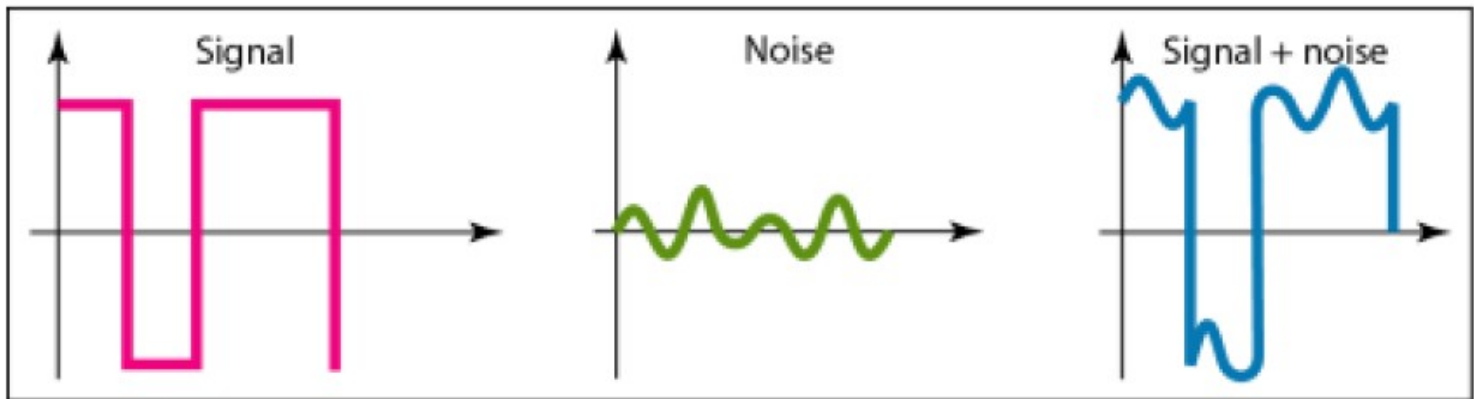
Perdas na transmissão

- Causas de perdas nas transmissões:
 - Atenuação;
 - Distorção;
 - **Ruído:**
 - Em sinal analógico:

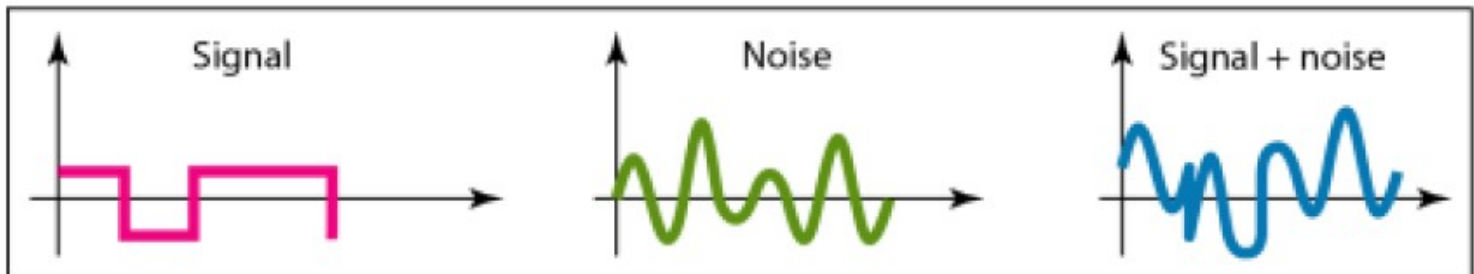


Perdas na transmissão

- Causas de perdas nas transmissões:
 - Atenuação;
 - Distorção;
 - **Ruído:**
 - Em sinal digital:



a. Large SNR



b. Small SNR

Largura de Banda

- Nenhum recurso de transmissão é capaz de transmitir sinais sem perda de parte da energia no processo;
- **Largura de Banda (bandwidth):**
 - Faixa de frequência transmitidas sem serem fortemente atenuadas;
 - As amplitudes são transmitidas sem redução de **0** até f_c (Hz);
 - Restrições quanto à largura e banda:
 - **Dependente do meio:** propriedades físicas do meio, como largura e comprimento de um cabo;
 - **Filtros:** Canais sem fio (802.11) tem permissão para usar até 20 MHz, assim rádios 802.11 filtram frequências acima deste valor;

Largura de Banda

- **Banda Base:**
 - Sinais que vão de **0** até uma **frequência máxima** definida;
- **Banda Passante:**
 - Os sinais podem ser deslocados para ocupar faixas de frequência mais altas;
 - Ou seja, sinais superiores aos sinais de banda base;
- **Filtro passa-baixas:**
 - Filtro que permite a passagem de baixas frequências sem dificuldades e atenua (ou reduz) a amplitude das frequências maiores que uma frequência de corte;
- **Filtro passa-altas;**
- **Filtro passa-faixa.**

Taxa máxima de dados

- Até mesmo um **canal perfeito** tem uma capacidade de transmissão finita (Henry **Nyquist**);
- Então ele determinou que, em um **canal sem ruído** a taxa máxima de transferência de dados é dada por:

$$MC_N = 2 * B * \log_2 V \text{ bits/s}$$

- onde:
 - MC_N = taxa máxima de transferência de dados no **canal sem ruídos**;
 - B = largura de banda do canal;
 - V = número de níveis discretos utilizados;
- **Exemplo:** Um canal de 3 KHz sem ruído não pode transportar mais que 6.000 bps usando sinais binários (dois níveis).

Taxa máxima de dados

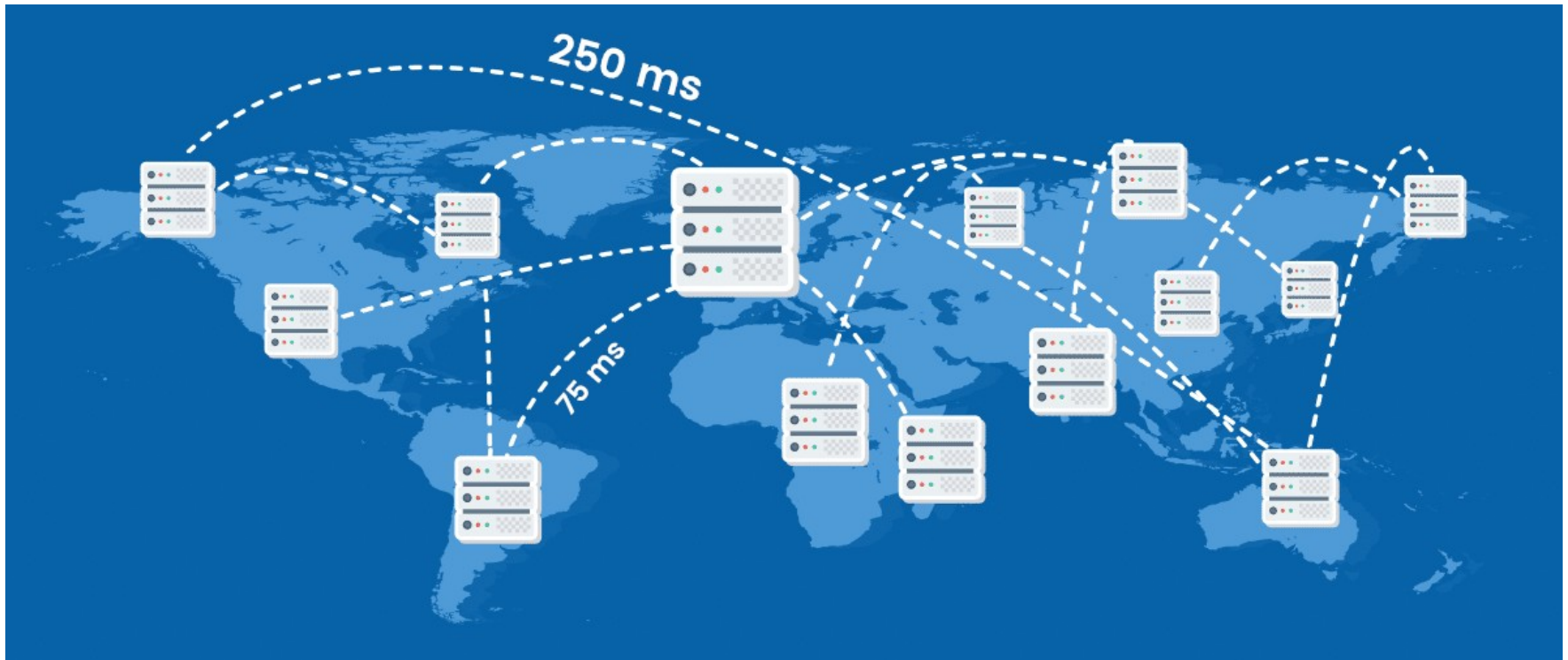
- Posteriormente, **Shannon** determinou a taxa de transferência máxima de um **canal com ruído**:

$$MC_s = B * \log_2 (1 + S/N) \text{ bits/s}$$

- onde:
 - **MC_s** = taxa máxima de transferência de dados no **canal com ruídos**;
 - **B** = largura de banda do canal;
 - **SNR** = Relação sinal-ruído (em decibéis - dB);
 - **$SNR = 10 * \log_{10} S/N$** ;
- **Exemplo:** Uma rede ADSL com canal de 1 MHz com ruído de cerca de 40 dB não pode transportar mais que 13 Mbps usando sinais binários (dois níveis).
 - $\log_{10} S/N = 40 / 10 = 4$, ou seja, $S/N = 10^4 = 10.000$
 - $MC_s = 1M * \log_2 10.001 = \mathbf{13.3 \text{ M bits / s}}$

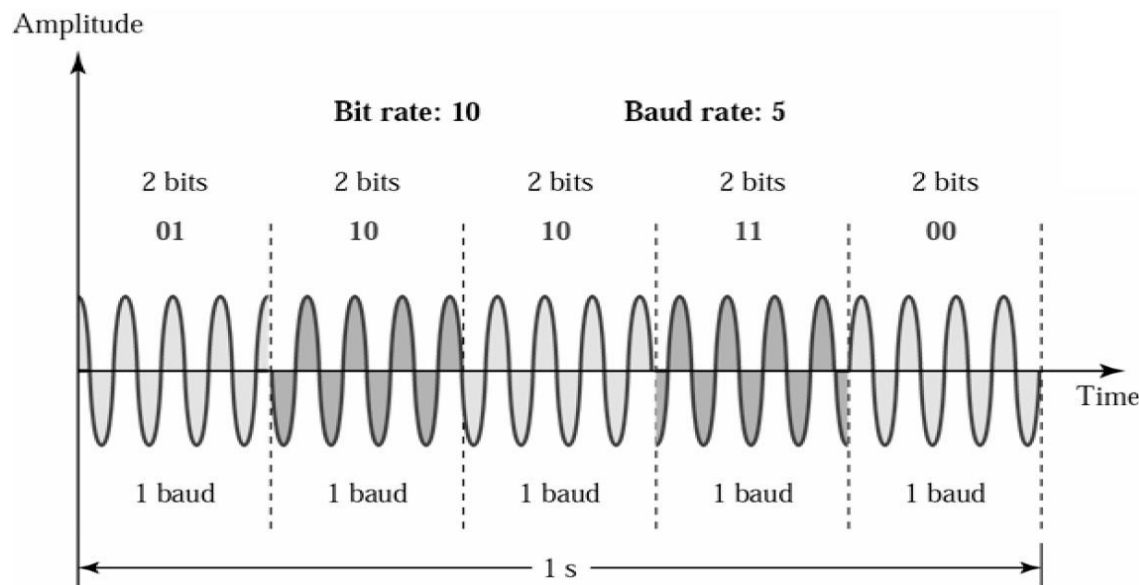
Latência

- Tempo decorrido entre o envio e a recepção de um sinal;
- Ou seja, tempo gasto pelo sinal para sair da origem e chegar ao destino;



Velocidade de sinalização

- Número de vezes por segundo que um sinal é inserido na linha;
- Medido em **bauds**;
- Em uma linha de ***b*** bauds não significa que trafegam ***b*** bits/s;
- Exemplo:
 - Dibit (2 bits/ baud);
 - Tribit (3 bits/ baud).



| Fase | bits |
|------|------|
| 0 | 00 |
| 90 | 01 |
| 180 | 10 |
| 270 | 11 |

- **Agenda**
 - Conceitos Básicos
 - **Meios de Transmissão**
 - Modulação Digital e Multiplexação

Meios de transmissão

- **Tópicos**
 - Introdução
 - Meios guiados
 - Meios não-guiados

Meios de transmissão - Introdução

- **Vale lembrar o objetivo da camada física:**
 - Transmitir um fluxo bruto de bits de uma máquina para outra;
- **Vários meios físicos podem ser usados:**
 - Cabos coaxiais, fibra óptica, água, ar, etc...
 - Qualquer meio físico capaz de transportar informações é passível de ser usado;
- **Cada um tem suas peculiaridades:**
 - Largura de banda;
 - Atenuação;
 - Imunidade a ruído;
 - Custo;
 - Facilidade de instalação;
 - etc...

Meios de transmissão - Introdução

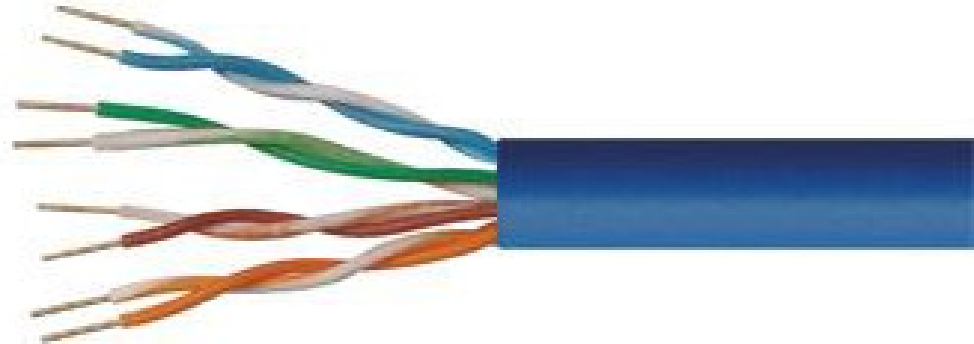
- Os meios podem ser agrupados em:
 - **Guiados:**
 - Utiliza um condutor para transportar sinais do emissor ao receptor;
 - Exemplos: fio de cobre e fibra óptica;
 - **Não-Guiados:**
 - Usa ondas propagadas pelo ar em diferentes frequências;
 - Exemplos: rádio, raios laser transmitidos pelo ar.

Meios guiados

- **Abordaremos:**
 - Pares trançados;
 - Cabo coaxial;
 - Linhas de energia elétrica;
 - Fibra óptica.

Pares Trançados

- Meio mais antigo e mais comum;
- Consiste de dois fios de cobre que são trançados para evitar interferência;
- Permite a transmissão de dados analógicos ou digitais;
- A largura de banda depende da espessura do fio e da distância;
- Pode transmitir dados por alguns quilômetros sem necessidade de amplificação;
- Baixo custo de instalação.



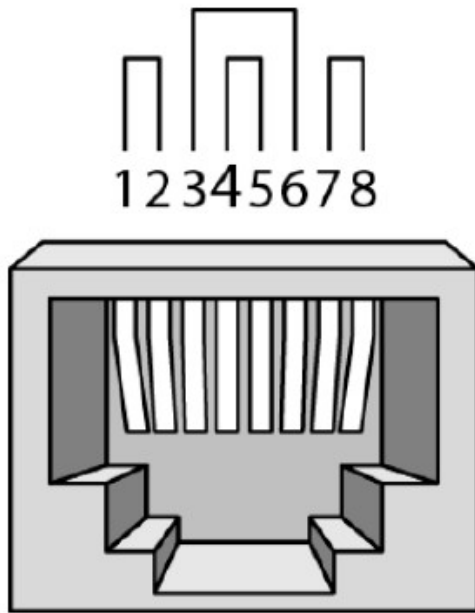
Pares Trançados

- Pode ser de vários tipos:

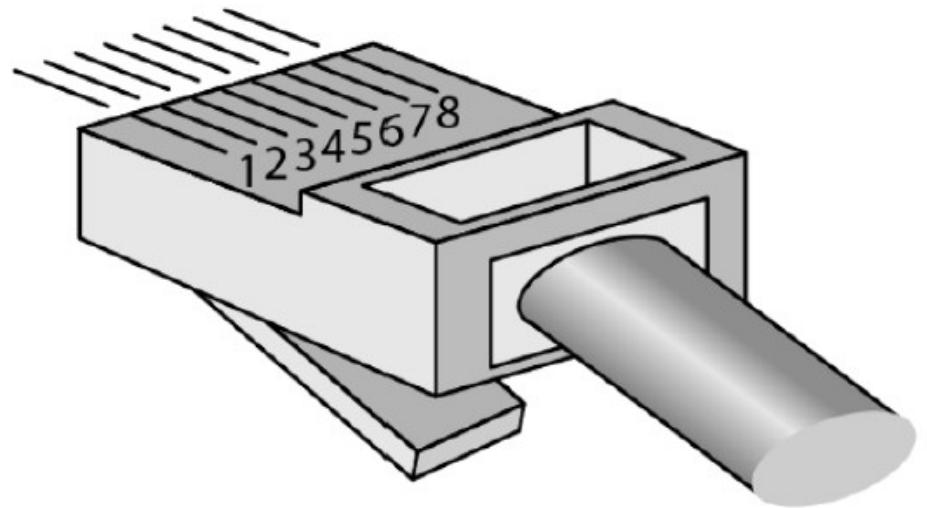
| Categoria | Descrição |
|--------------|--|
| 3 | Mais antigo. Usa um número maior de voltas para reduzir a interferência e permitir distâncias maiores. Pode atingir velocidades de 100 Mbps a 1Gbps. |
| 5 | Utiliza menos voltas que o Cat 3. Quatro pares são agrupados em uma capa plástica para protegê-los e mantê-los unidos. |
| 6 e 7 | Possuem especificações mais rígidas para aceitar maiores larguras de banda. Podem chegar a 10 Gbps. Cat 7 possui blindagem para reduzir a suscetibilidade à interferência externa e linhas cruzadas. |

Pares Trançados

- Conector RJ-45:



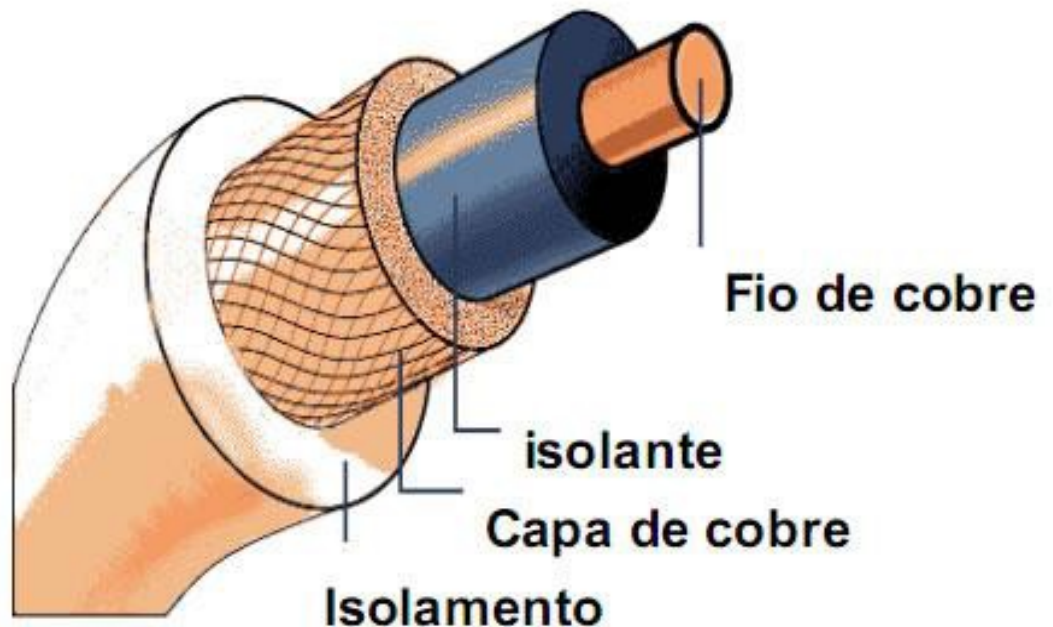
RJ-45 Female



RJ-45 Male

Cabo coaxial

- Composto de:
 - Um fio de cobre na parte central;
 - Um material isolante envolvendo o fio de cobre;
 - Um condutor externo em malha (capa de cobre);
 - Uma capa plástica protetora.

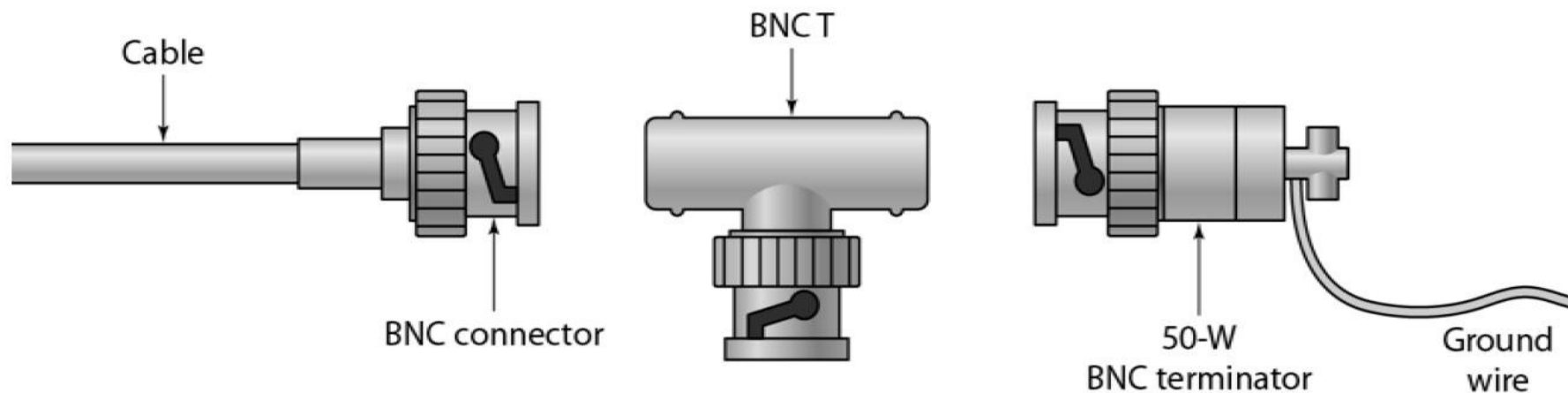


Cabo coaxial

- Melhor blindagem que o par trançado:
 - Maiores distâncias e velocidades mais altas;
- Dois tipos de cabos:
 - 50 ohms: utilizado para transmissão digital;
 - 75 ohms: utilizado para transmissão analógica (TV a cabo);
- Uma boa combinação de alta largura de banda (GHz) e excelente imunidade a ruído.

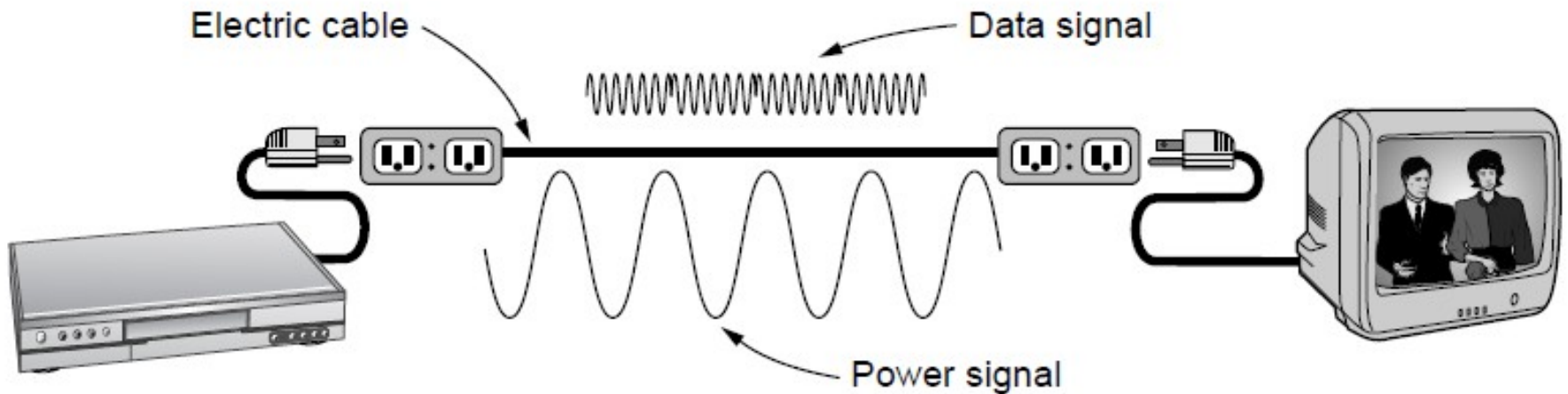
Cabo coaxial

- Conectores



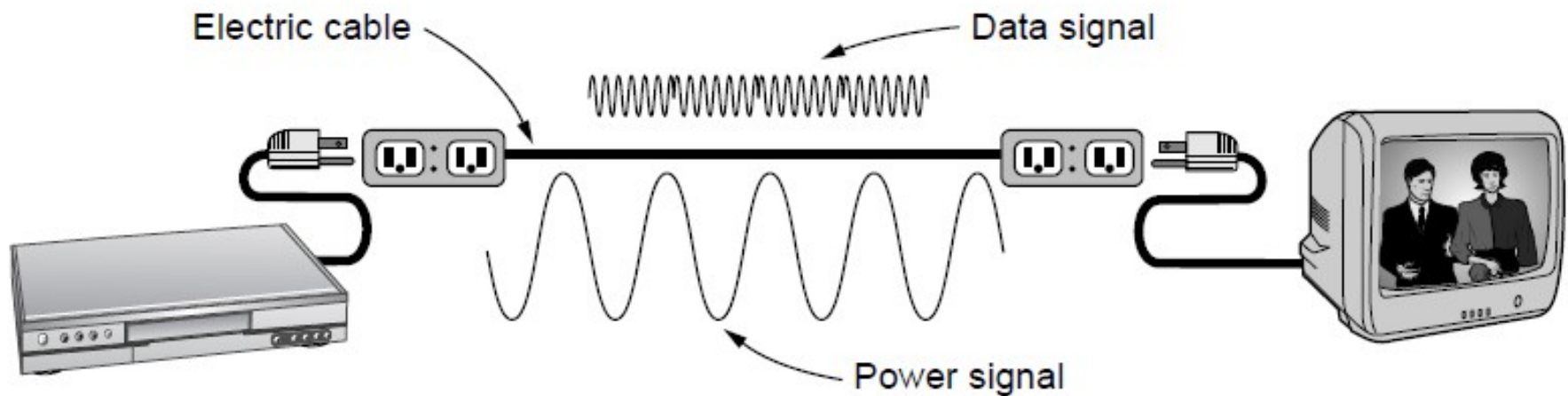
Linhas de energia elétrica

- É uma rede de cabeamento muito mais comum do que a de telefonia e TV a cabo;
- Também podem ser utilizadas para comunicação de dados;
- Sua utilização é uma ideia antiga apesar de não ser muito comum;
- Exemplo de uma possível utilização:



Linhas de energia elétrica

- Vantagens:
 - Alcance muito grande;
 - Altas taxas de transmissão;
- Desvantagens:
 - Regulamentação por parte dos órgãos competentes;
 - Interferências em outros aparelhos;
 - Muito sensível a ruídos.



Fibra óptica

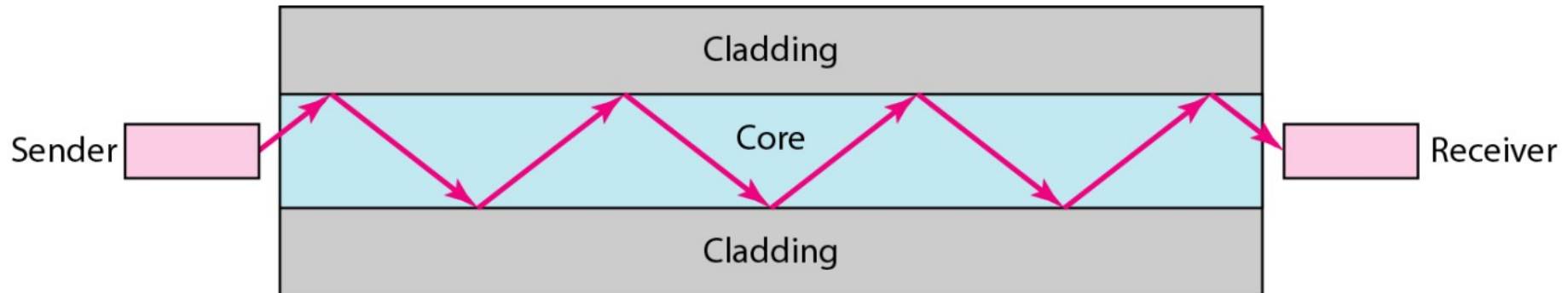
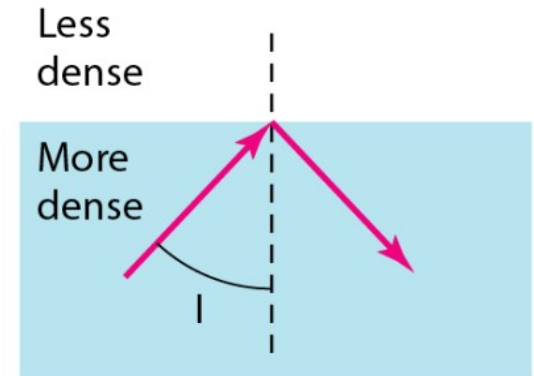
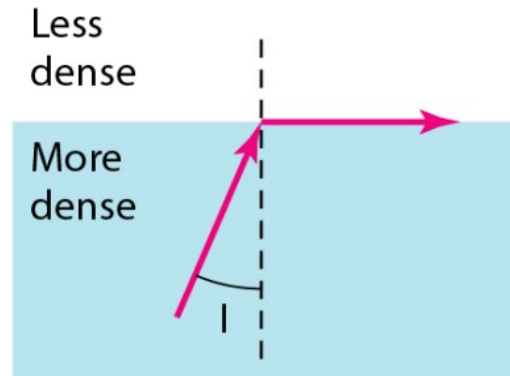
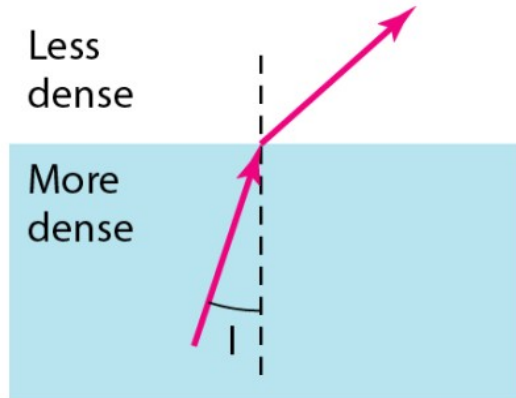
- Da espessura de um fio de cabelo;
- Taxa de erros praticamente nula;
- Alta largura de banda:
 - Altas taxas de transmissão;
 - Teoricamente → 50 Tbps;
 - Na prática → 100 Gbps:
 - Devido às conversões de sinal elétrico / óptico;
 - Somos incapazes de realizar a conversão de forma mais rápida;
 - Uma possível solução: um sistema completamente óptico;
 - Transmissão dos dados unidirecional (simplex).

Fibra óptica

- Componentes de um sistema óptico:
 - **Fonte de luz:**
 - Converte sinais elétricos em pulsos de luz;
 - Bit 1: pulso de luz;
 - Bit 0: ausência de luz;
 - Dois tipos de fonte de luz: LEDs ou Lasers semicondutores;
 - **Meio de transmissão:**
 - Fibra de vidro ultrafina;
 - A luz não é afetada por ruídos elétricos;
 - **Detector:**
 - Converte pulsos de luz em sinais elétricos;
 - Normalmente é um fotodiodo.

Fibra óptica

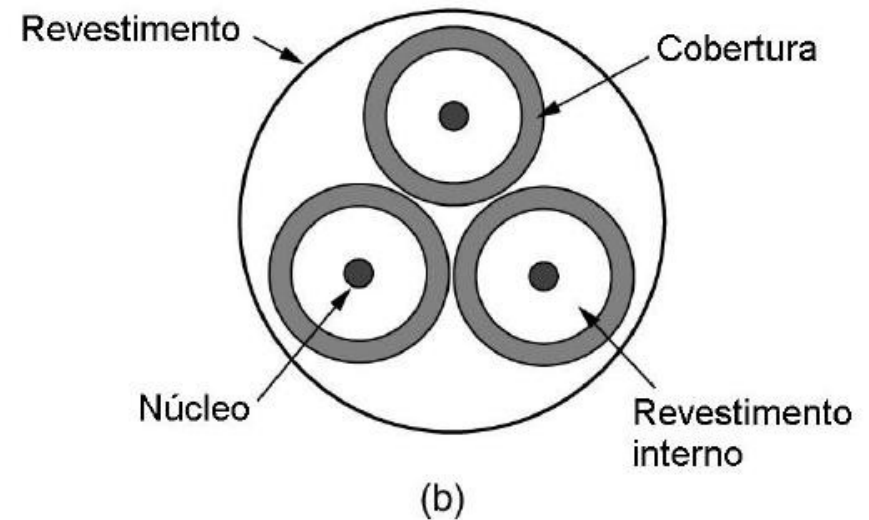
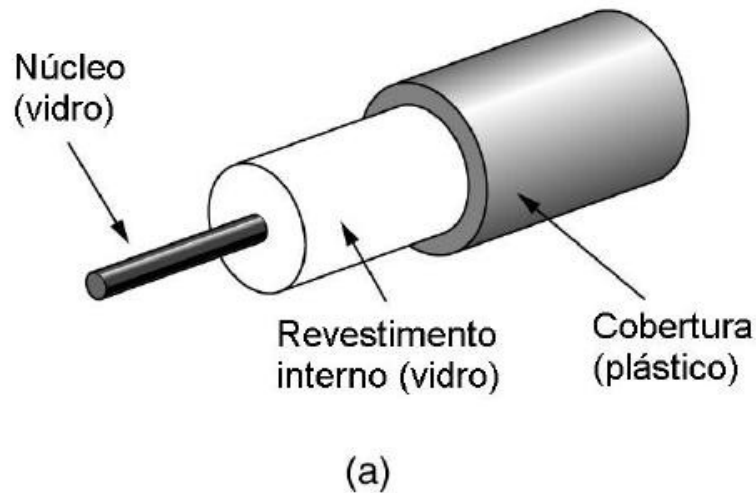
- Transmissão



- **Transmissão (2)**
 - Vários feixes de luz podem estar em uma mesma fibra, contanto que cada um seja refletido em um ângulo;
 - Dois tipos de fibras:
 - **Multimodo**: que pode transportar mais de um sinal de luz;
 - **Monomodo**: transmitem apenas um sinal de luz;
 - Fibras monomodo permitem uma largura de banda maior, mas são mais caras.

Fibra óptica

- Composição do cabo



Fibra óptica

- **Vantagens:**
 - Largura de banda maior;
 - Atenuação (50 Km);
 - Imunidade a interferências eletromagnéticas;
 - Resistência à corrosão (vidro ou plástico v.s. cobre);
 - Peso;
 - Imune a derivações;
- **Desvantagens:**
 - Instalação e manutenção;
 - Unidirecional (simplex);
 - Custo.

Meios não-guiados

- **Abordaremos:**
 - Transmissão sem fios;
 - Espectro eletromagnético;
 - Transmissão de rádio;
 - Transmissão de microondas;
 - Transmissão de infravermelho;
 - Transmissão via luz;
 - Satélites de comunicação.

Transmissão sem fios

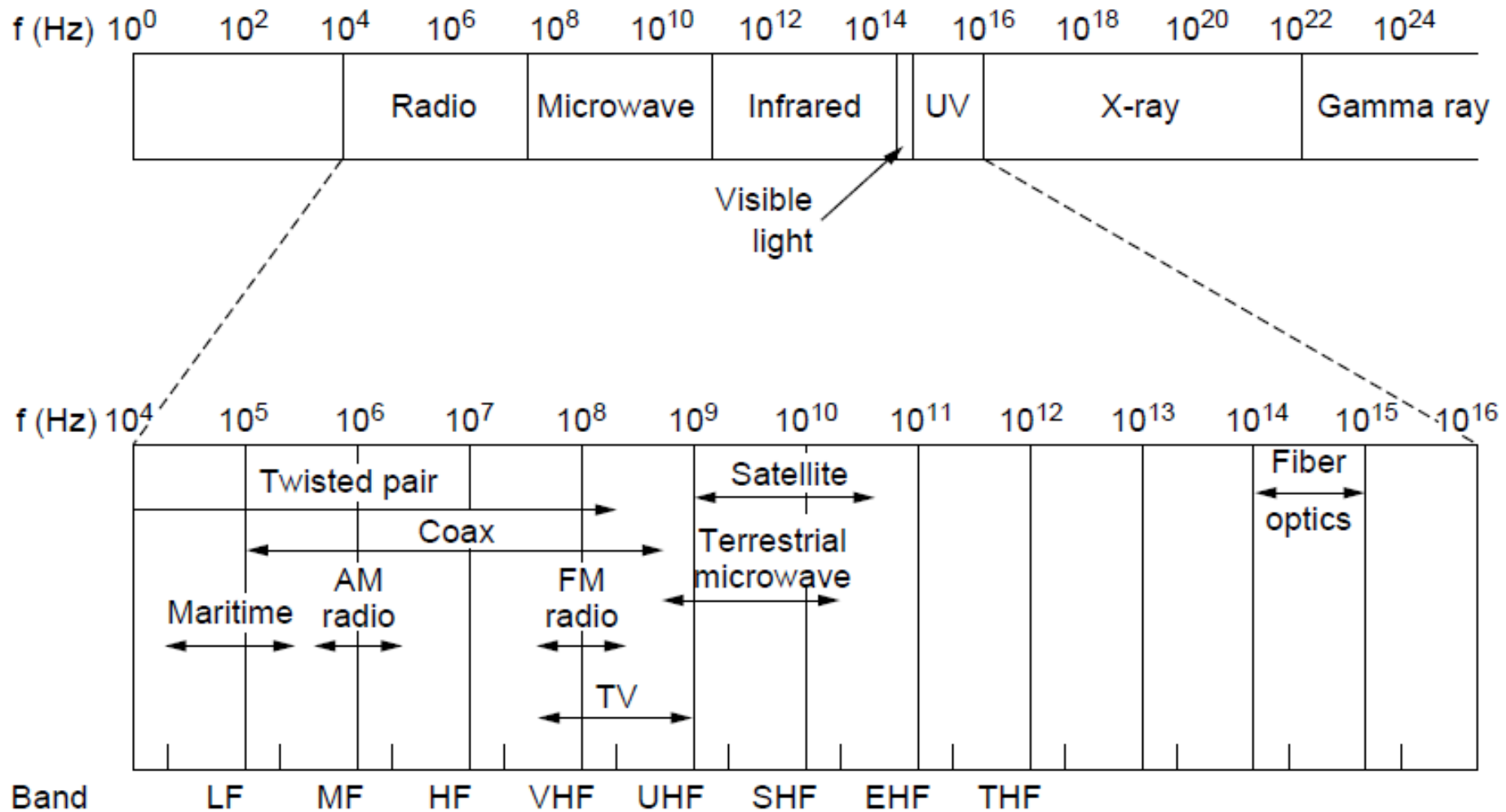
- Caracteriza-se pela ausência de cabos na comunicação;
- Uma boa alternativa quando há limitações geográficas;
- Em vários casos o cabeamento envolve custos altos e torna-se inviável:
 - A moderna comunicação sem fios teve seu início nas ilhas havaianas. Lá os usuários estavam separados por grandes distâncias marítimas e o sistema de telefonia era precário;
- Usuários móveis precisam estar permanentemente on-line, sem depender da infraestrutura de comunicação terrestre.

Espectro eletromagnético

- A transmissão sem fio se dá através da propagação de **ondas eletromagnéticas**;
- As ondas eletromagnéticas podem se propagar pelo espaço livre;
- Cada onda possui:
 - Uma determinada **frequência** - número de oscilações por segundo medida em Hertz (**Hz**);
 - Um comprimento de onda (**m**);
- O **espectro eletromagnético** representa toda a faixa de frequências usada para transmissões.

Espectro eletromagnético

- Como é usado na comunicação:



Espectro eletromagnético

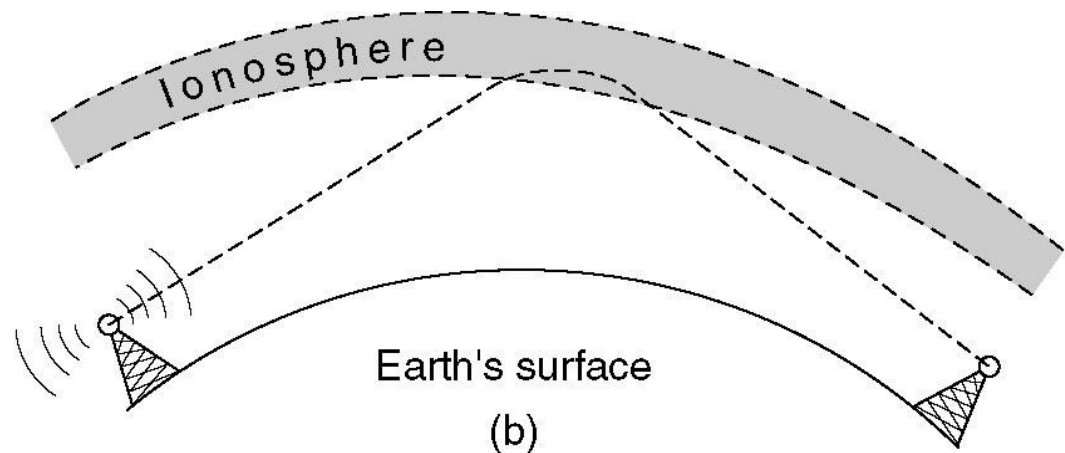
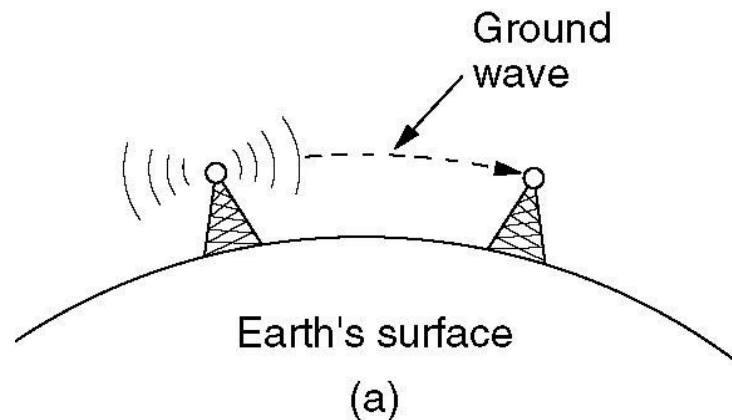
- Cada porção do espectro possui vantagens e desvantagens que a tornam adequada a uma determinada aplicação:
 - São usadas as faixas de rádio, micro-ondas, infravermelho e luz visível;
 - As faixas de ultravioleta, raios X e raios gama são perigosas para os seres vivos.
- A utilização do espectro é regulada pelos governos nacionais:
 - Licitação de bandas;
 - Concessões;
- Algumas faixas são liberadas para uso geral:
 - Equipamentos de baixa potência;
 - Infravermelho;

Transmissão de rádio

- Amplamente utilizadas para comunicação;
- Facilidade na geração;
- Podem percorrer longas distâncias;
- Penetram no interior de construções;
- Viajam e todas as direções;
- Sujeitas à interferências de motores e outros equipamentos.

Transmissão de rádio

- Propagação das ondas:
 - Nas bandas VLF, LF e MF se propagam perto do solo, obedecendo a curvatura da terra;
 - Nas bandas HF e VHF elas são rebatidas na ionosfera (entre 100 a 500 km de altura).



Transmissão de microondas

- Trafegam praticamente em linha reta;
- Repetidores são necessários para grandes distâncias;
- Antenas precisam estar alinhadas;
- Não penetram tão bem no interior de construções;
- Frequências superiores a 4 GHz são absorvidas pela água;
- Muito utilizado em sistemas de telefonia de longa distância, móvel e em sinais de televisão.

Transmissão de infravermelho

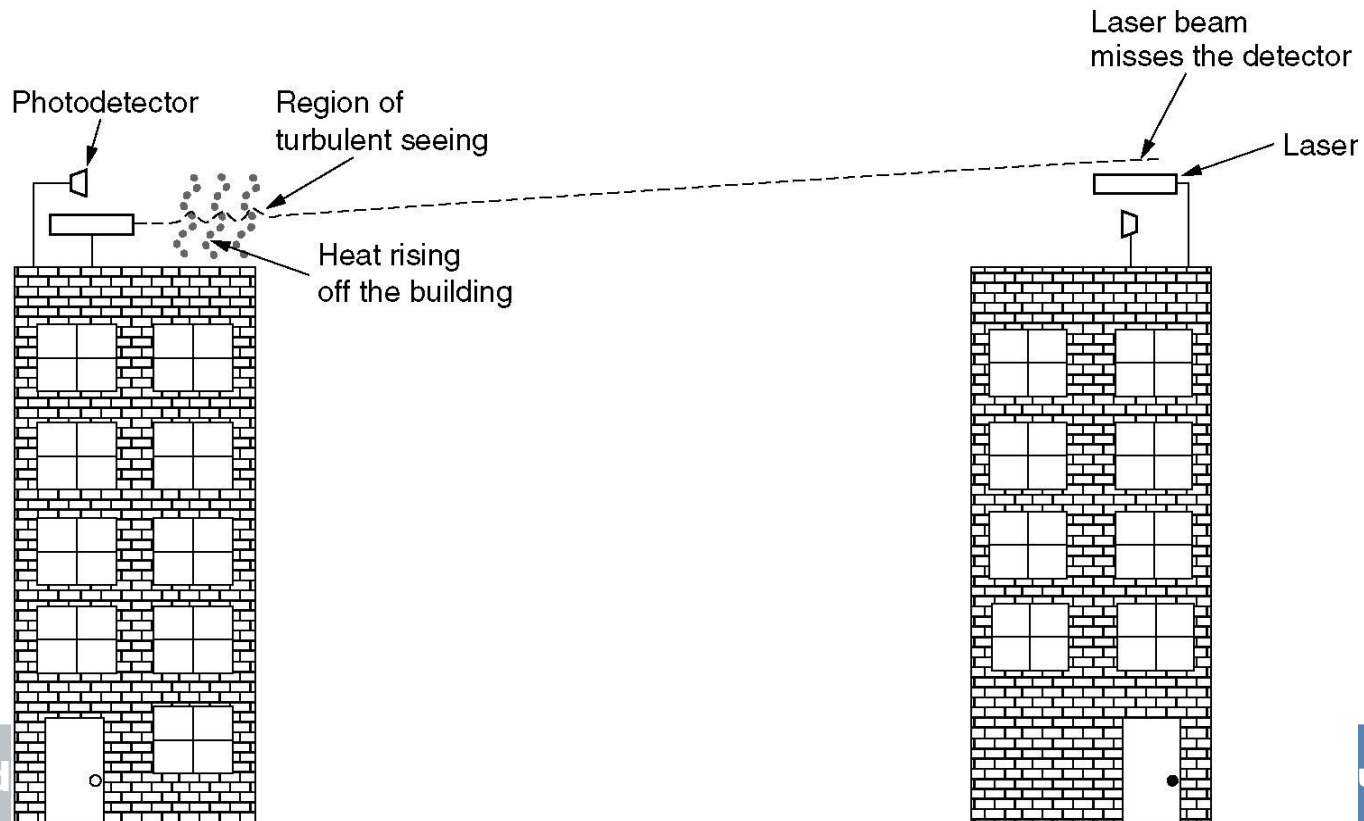
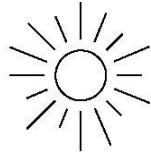
- Utilizadas em comunicação de curto alcance;
- Controle remoto, celulares e algumas interfaces de computadores;
- Transmissor e receptor precisam estar alinhados (não 100%);
- Não atravessam objetos sólidos;
- Susceptibilidade a interferência de luz ambiente forte.

Transmissão via luz

- Ou **transmissão óptica**, ou **óptica do espaço livre**;
- Exemplo: Conectar duas LANs de prédios distintos através de lasers instalados em seus telhados:
 - A transmissão será unidirecional;
 - Cada prédio precisará de um emissor de raio laser e de um fotodetector;
 - Oferece largura de banda alta e relativamente seguro;
 - Instalação é fácil;
 - Não precisa de licença;
 - Entretanto...:

Transmissão via luz

- Entretanto...:
 - Feixe de luz estreito
 - Sensível a condições climáticas (vento, temperatura, neblina, etc)



Satélites de comunicação

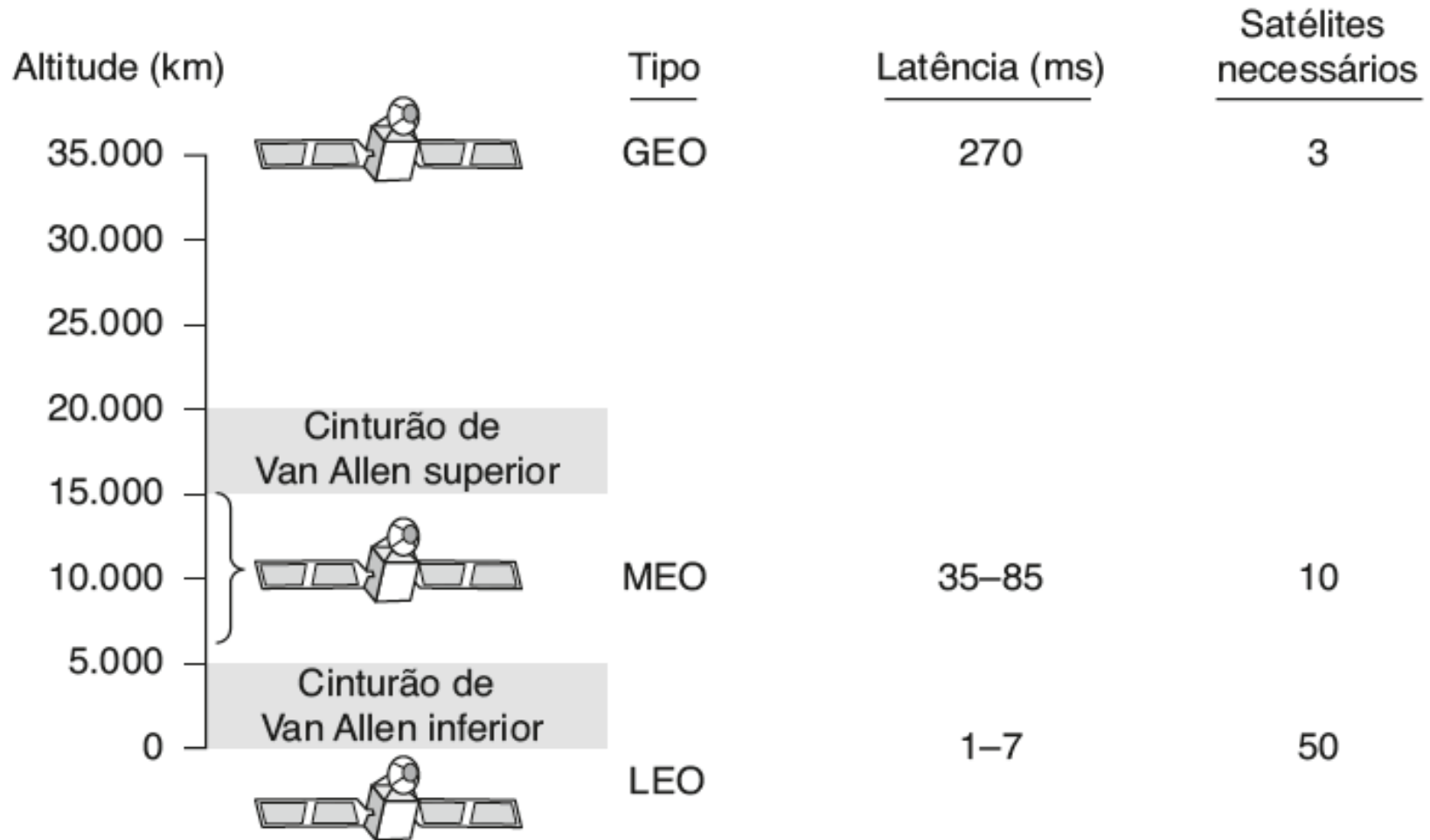
- Podem ser considerados grandes repetidores de microondas no céu;
- O período orbital varia com o raio da órbita (altura) do satélite:
 - Quanto mais alto mais longo o período;
 - 35.800 km – 24 horas;
- Limitação de “regiões” (alturas):
 - Cinturões de Van Allen: camadas de partículas;
 - Satélites seriam destruídos.

Satélites de comunicação

- Tipos de satélites:
 - Geoestacionários (GEO - Geostationary Earth Orbit);
 - Órbita média (MEO - Medium-Earth Orbit);
 - Órbita baixa (LEO - Low-Earth Orbit);

Satélites de comunicação

- Tipos de satélites e algumas propriedades:



Satélites de comunicação

- Satélites Geoestacionários (GEO):
 - **Geoestationary Earth Orbit;**
 - Altitude: 35.800;
 - Período de 24 horas: parece estar parado no céu;
 - Alocação de slots de órbita feito pela ITU (International Telecommunication Union).

Satélites de comunicação

- Satélites de órbita média (MEO):
 - **Medium-Earth Orbit;**
 - Altitude muito mais baixas que os GEOs;
 - Período de 6 horas para circular a Terra;
 - Devem ser acompanhados à medida que se movem;
 - Atualmente utilizados apenas para **GPS (Global Positioning System);**

Satélites de comunicação

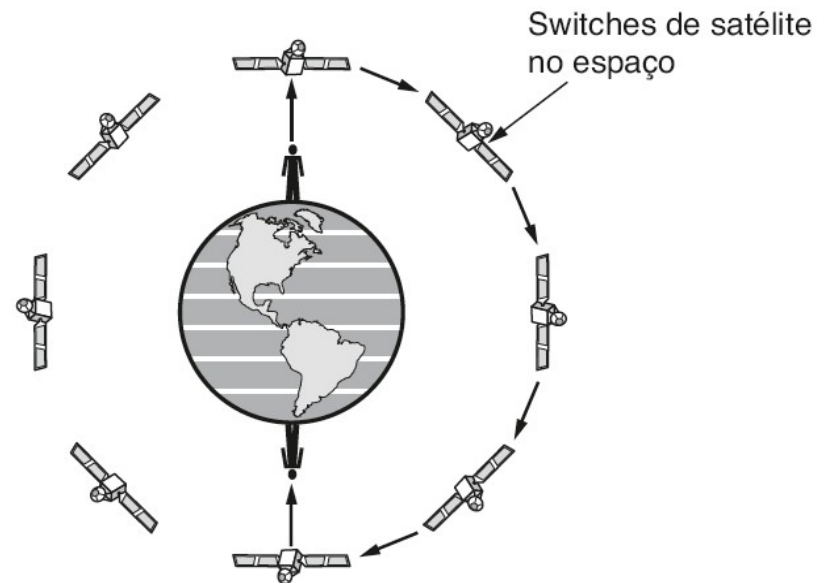
- Satélites de órbita baixa (LEO):
 - **Low-Earth Orbit;**
 - Baixas altitudes;
 - Necessário um número muito maior para se obter uma cobertura completa;
 - Pela proximidade da Terra:
 - Necessidade de menor potência;
 - Atrasos menores;
 - Custo de lançamento mais baixos.
 - Exemplos:
 - Iridium;
 - Globalstar.
 - Starlink (350km, 550km e 1150km)

Satélites de comunicação

- Satélites Iridium

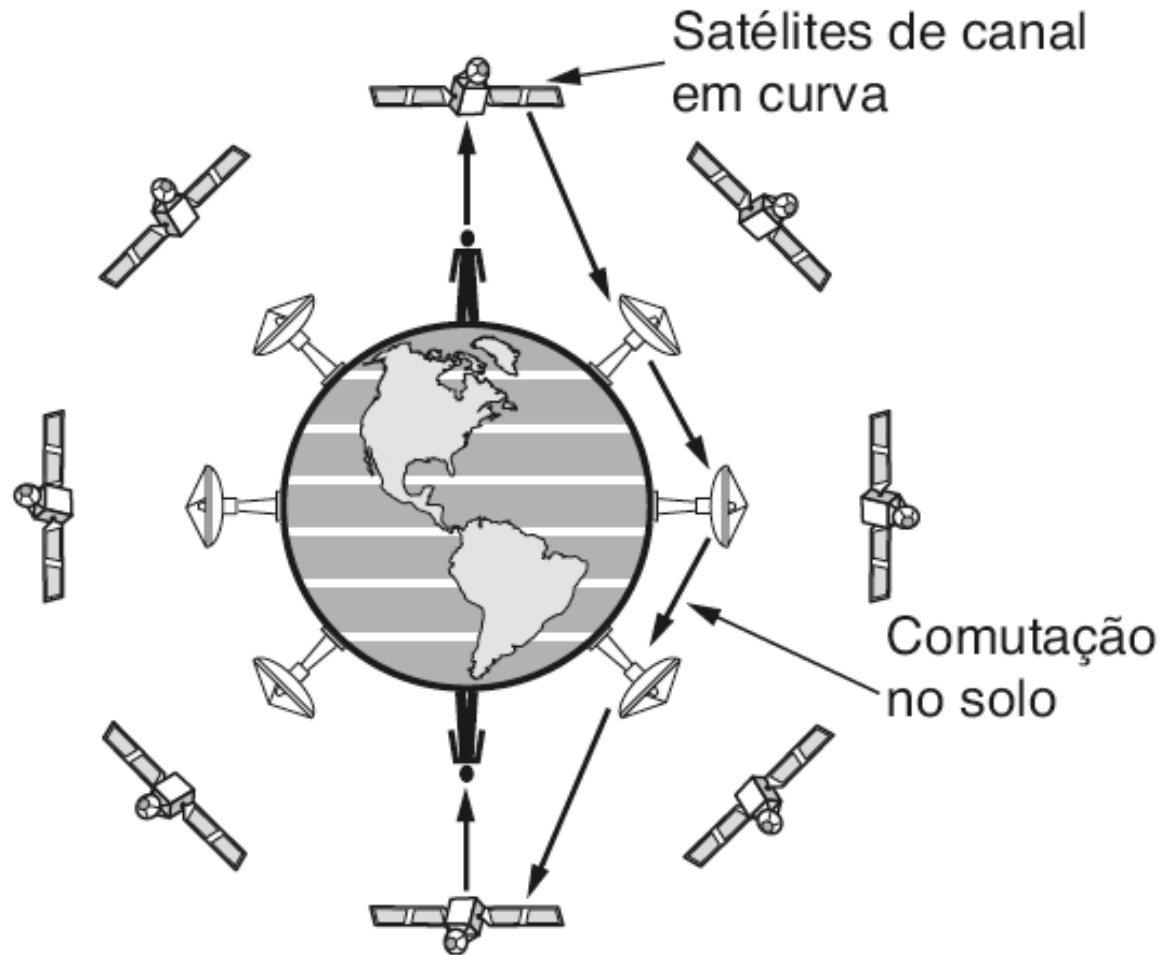


Cada satélite tem
quatro vizinhos



Satélites de comunicação

- Satélites Globalstar



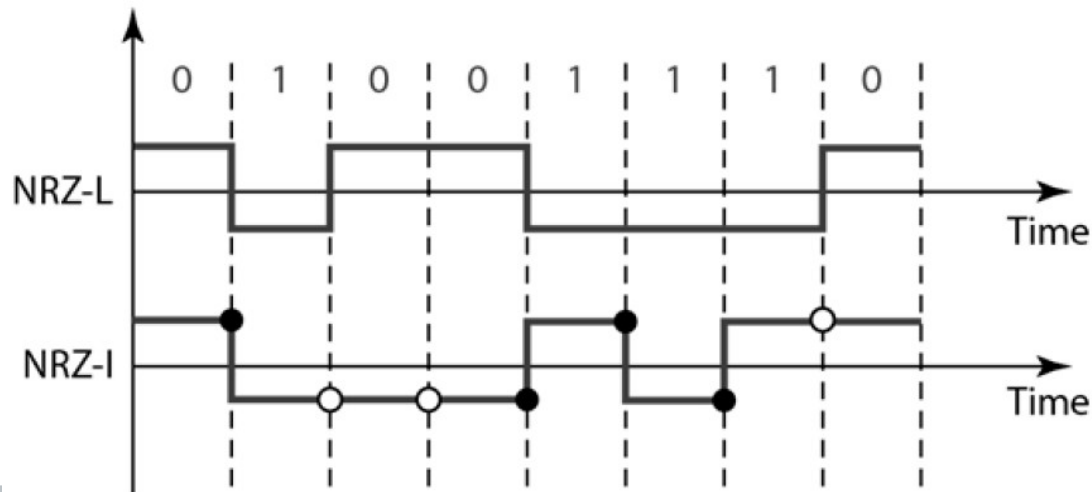
- **Agenda**
 - Conceitos Básicos
 - Meios de Transmissão
 - **Modulação Digital e Multiplexação**

Modulação digital

- Canais com ou sem fio transportam sinais analógicos;
- Como utilizar estes meios para enviar informações digitais?
- **Modulação Digital:**
 - Processo de conversão entre bits e sinais que os representam;
- Esquemas transmissão em banda base:
 - NRZ (Non-Return-to-Zero);
 - NRZI (Non-Return-to-Zero Inverted);
 - Manchester;
 - Codificação 4B/5B;
- Esquemas transmissão em banda passante:
 - ASK (Amplitude Shift Keying);
 - FSK (Frequency Shift Keying);
 - PSK (Phase Shift Keying);
 - QAM (Quadrature Phase Shift Keying).

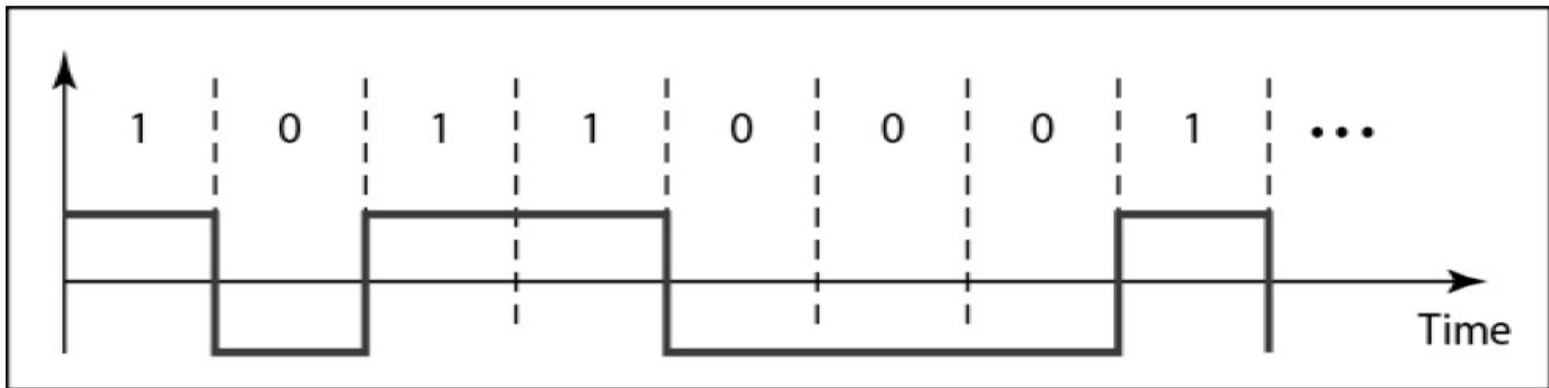
Modulação digital

- **NRZ (Non-Return-to-Zero):**
 - Codificação depende apenas do estado do bit;
 - Tensão positiva representa “1”, tensão negativa representa “0”;
 - Presença de luz representa “1”, ausência de luz representa “0”;
- **NRZI (Non-Return-to-Zero Inverted):**
 - Codificação depende do estado anterior;
 - Quando ocorre bit “1” o sinal é invertido e quando ocorre bit “0” nada acontece (ou vice-versa).

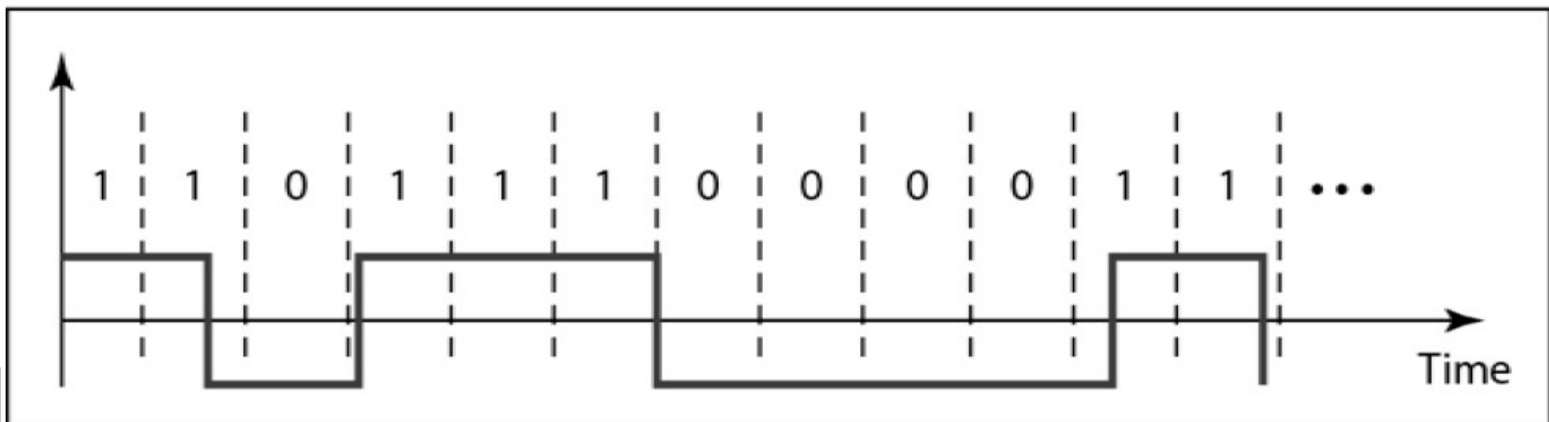


Modulação digital

- **NRZ** e **NRZI** possuem problemas de sincronização:
 - No NRZ para longas sequências de “0” e “1”;
 - No NRZI apenas para sequências de “0” (ou de “1”).



a. Sent

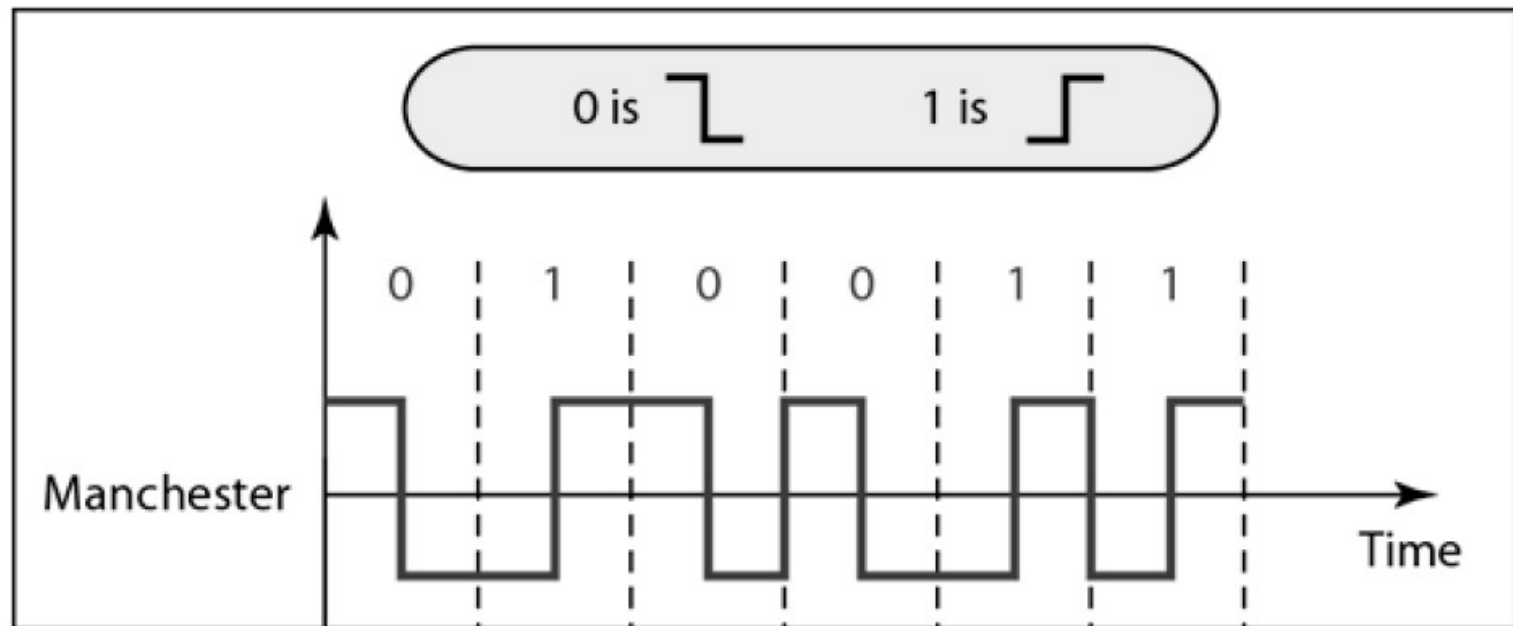


b. Received

Modulação digital

- **Manchester**

- Realiza uma inversão no meio de cada estado para a representação e sincronização da transmissão:
 - Bit “1”: realiza uma transição positiva;
 - Bit “0”: realiza uma transição negativa;



- **Problema:** exige largura de banda duas vezes maior que o NRZ.

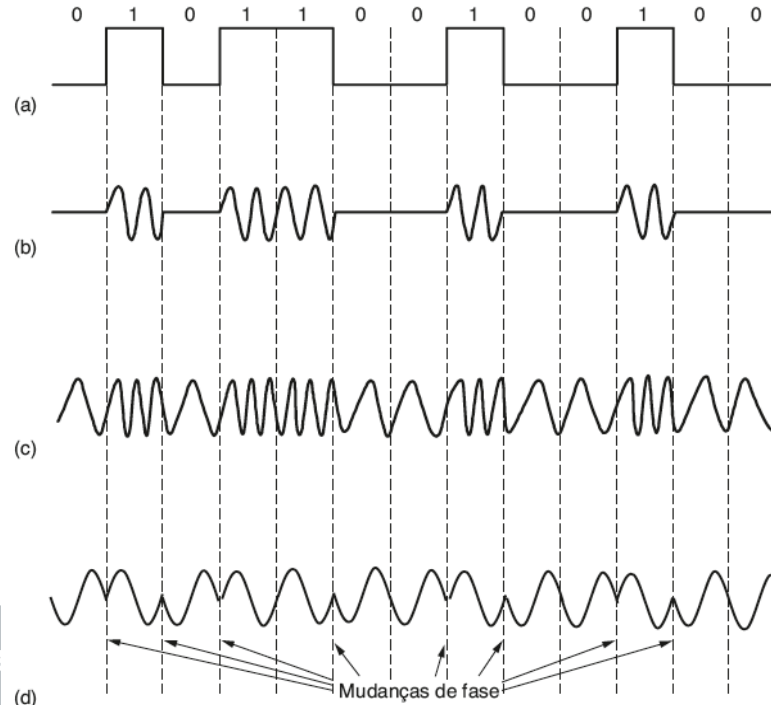
Modulação digital

- Codificação 4B/5B:
 - Minimiza o problema de sincronização do NRZI;
 - Reduz sequências de 0;
 - Cada 4 bits são mapeados para uma sequência de 5 bits:

| Dados (4B) | Código (5B) | Dados (4B) | Código (5B) |
|------------|-------------|------------|-------------|
| 0000 | 11110 | 1000 | 10010 |
| 0001 | 01001 | 1001 | 10011 |
| 0010 | 10100 | 1010 | 10110 |
| 0011 | 10101 | 1011 | 10111 |
| 0100 | 01010 | 1100 | 11010 |
| 0101 | 01011 | 1101 | 11011 |
| 0110 | 01110 | 1110 | 11100 |
| 0111 | 01111 | 1111 | 11101 |

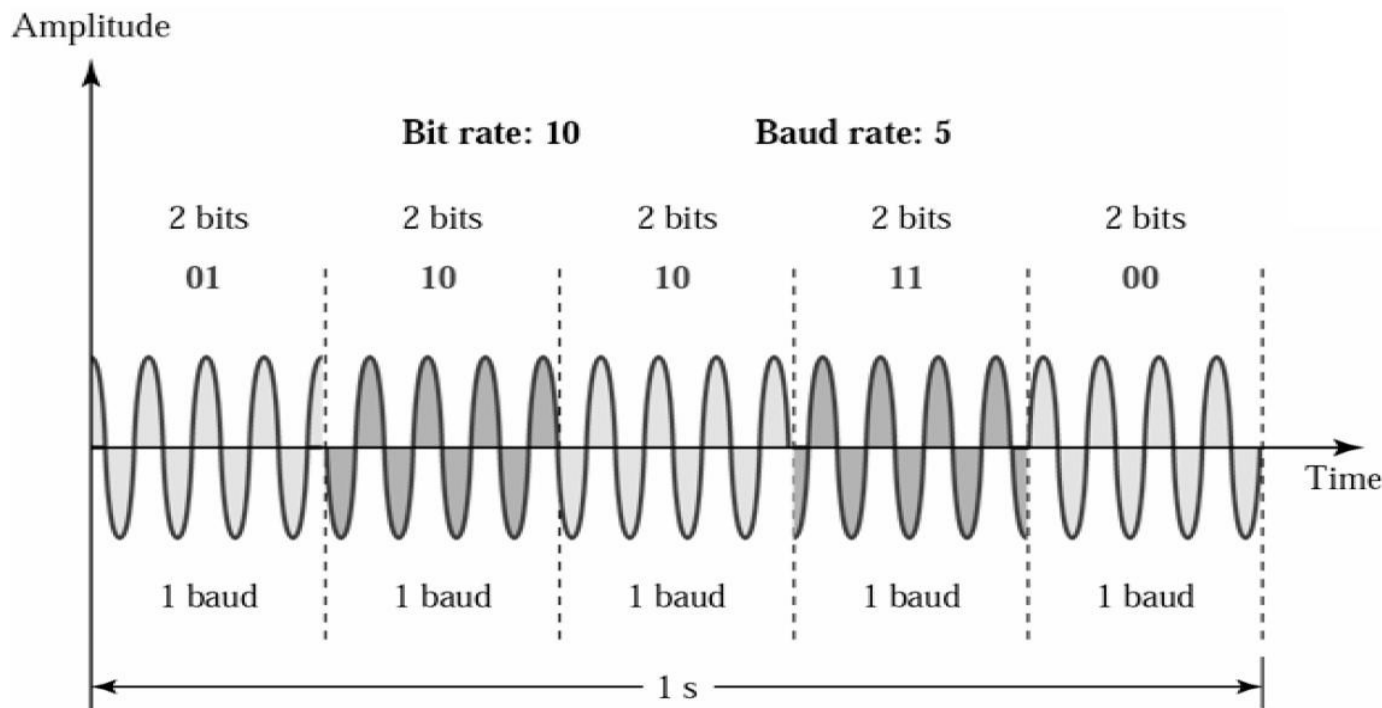
Modulação digital

- **ASK (Amplitude Shift Keying):**
 - Altera valores de amplitudes para representar os bits (b);
- **FSK (Frequency Shift Keying):**
 - Altera valores de frequência para representar os bits (c);
- **PSK (Phase Shift Keying):**
 - Altera valores de fases para representar os bits (d);



Modulação digital

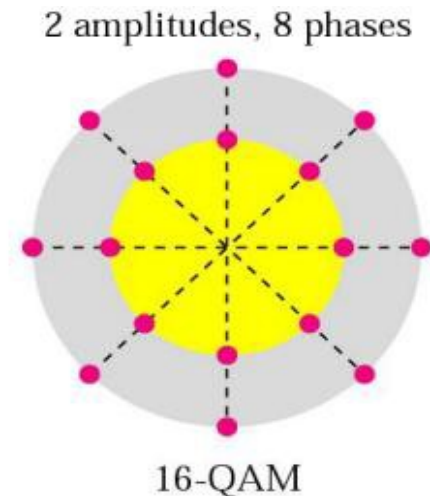
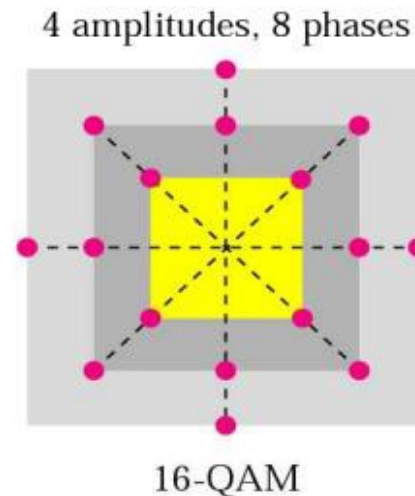
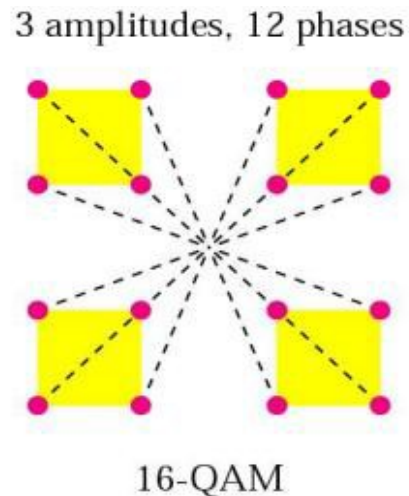
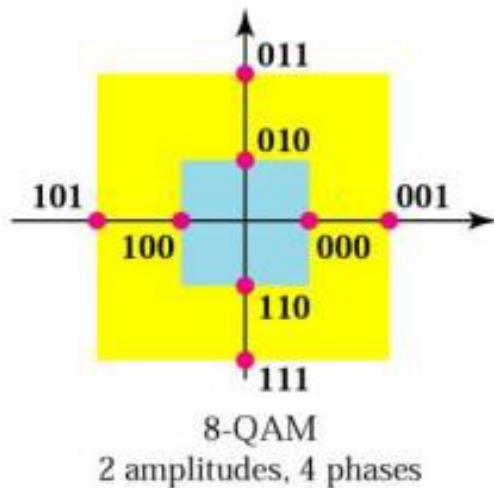
- Variações do **PSK**:
 - O que vimos anteriormente é também denominado BPSK, B de binary (duas fases);
 - Pode-se usar mais fases para aumentar a taxa de transferência:
 - 4 fases = QPSK (Q de Quadrature):



| Fase | bits |
|------|------|
| 0 | 00 |
| 90 | 01 |
| 180 | 10 |
| 270 | 11 |

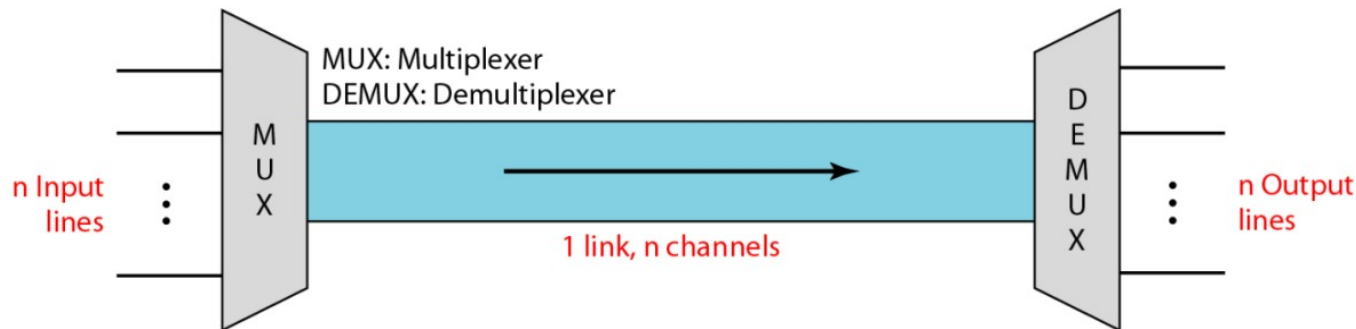
Modulação digital

- QAM (Quadrature Amplitude Modulation Keying):
 - Combina ASK com PSK;
 - Altera-se amplitude e fase;
 - Exemplos:
 - QAM-8 (3 bits);
 - QAM-16 (4 bits);
 - QAM-64 (6 bits);
 - Diagramas de constelação:



Multiplexação

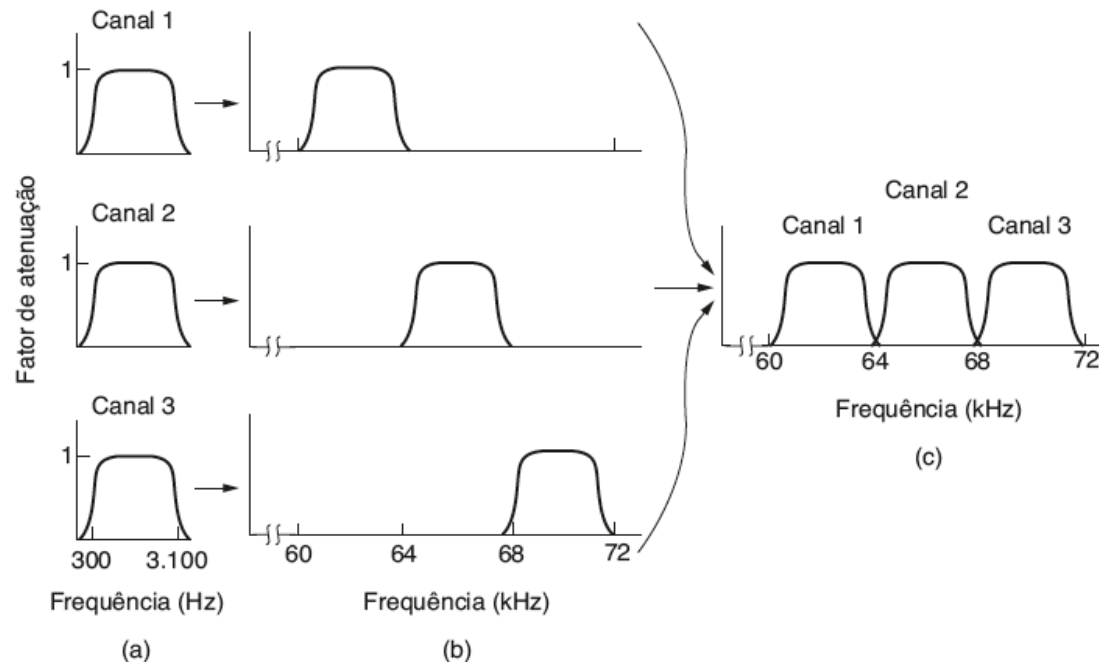
- Canais são normalmente compartilhados por vários sinais;
- Vários sinais em um fio é melhor do que um fio para cada sinal;
- **Multiplexação:**
 - Compartilhamento de um único canal através de vários sinais;
 - Objetivo: maximizar o número de conexões (conversações);



- Métodos de multiplexação:
 - Por divisão de frequência (FDM);
 - Por divisão de tempo (TDM);
 - Por divisão de comprimento de onda (WDM).

Multiplexação por frequência

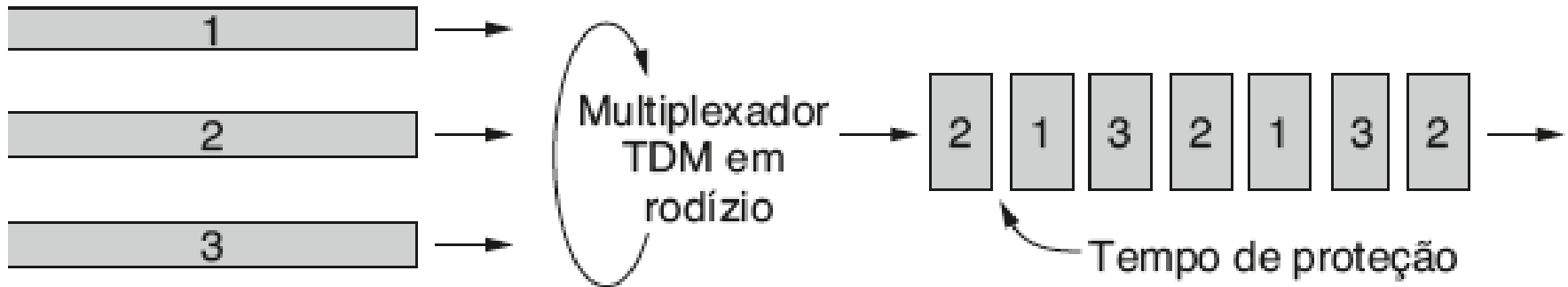
- **FDM (Frequency Division Multiplexing);**
- Utiliza-se da banda passante para compartilhar um canal;
- Divide o espectro em bandas de frequência, uma para cada sinal.



- (a) Largura de banda original. (b) Aumento da largura de banda com a frequência. (c) Canal multiplexado.

Multiplexação por divisão de tempo

- **TDM (Time Division Multiplexing);**
- Usuários se alternam em um rodízio: cada um utiliza toda a largura de banda por um pequeno período.



Multiplexação por divisão de comprimento de onda

- **WDM (Wavelength Division Multiplexing);**
- Variação do FDM;
- Utilizado em canais de fibra óptica;
- Utiliza diferentes comprimentos de onda fazendo uso da banda passante.

