

---

# *Transmissão de Dados*

*FEUP/DEEC/RCD – 2002/03*  
*MPR/JAR*

---

## *Terminologia e Conceitos*

### ◆ Meios de transmissão

A transmissão de sinais, sob a forma de ondas electromagnéticas, é suportada em meios de transmissão que podem ser:

- » Guiados (par de cobre entrançado, cabo coaxial, fibra óptica)
- » Não guiados (ar, vácuo)

### ◆ Conectividade

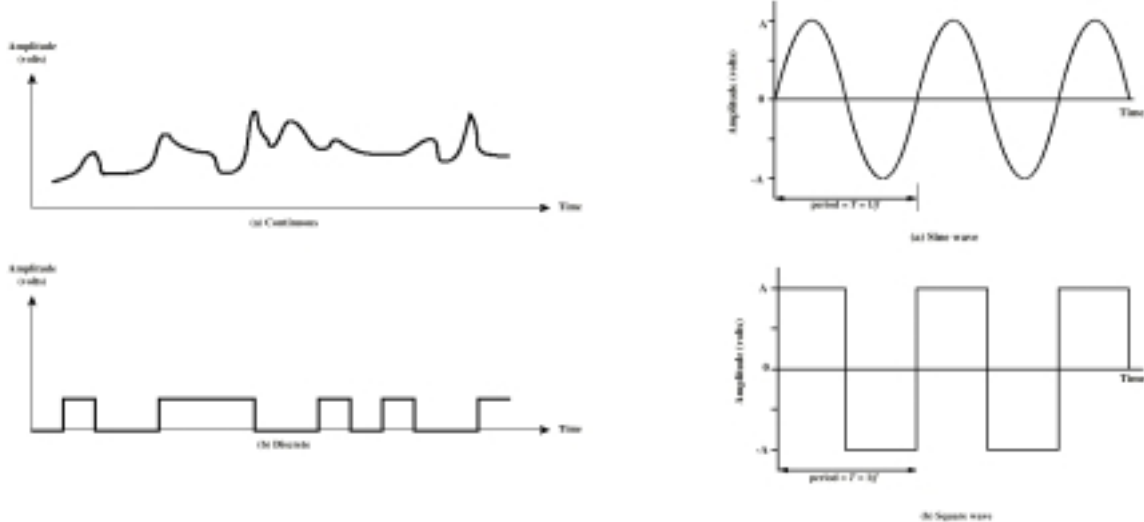
- » Ponto-a-ponto – ligação entre dois dispositivos
- » Multiponto – meio partilhado por mais de dois dispositivos

### ◆ Modo de comunicação (direccionalidade)

- » *Simplex* – comunicação unidireccional (televisão)
- » *Half-duplex* – comunicação bidireccional alternada (rádio polícia)
- » *Full-Duplex* – comunicação bidireccional simultânea (telefone)

## Sinais no Domínio dos Tempos

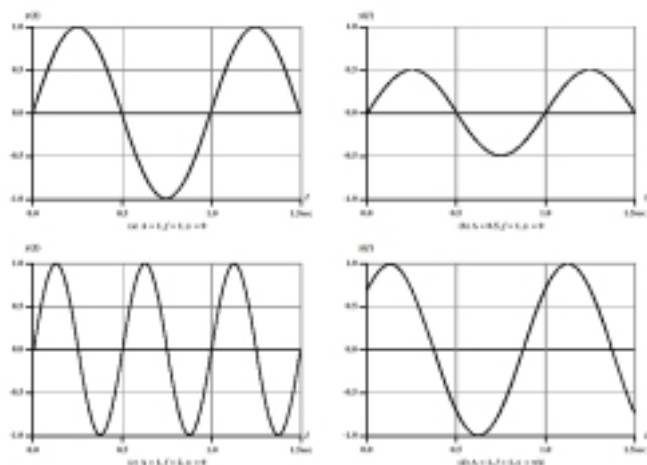
- » Analógicos: variação contínua em amplitude e no tempo
- » Digitais: sequência temporal discreta de valores quantificados (níveis discretos)
  - A designação sinal digital é normalmente usada para referir a sequência de impulsos que representa uma sequência discreta de valores quantificados
- » Periódicos e não periódicos



## Sinal Sinusoidal no Tempo

$$s(t) = A \sin(2\pi ft + \theta)$$

→ amplitude  
 → Frequency = 1 / period (T)  
 → phase



## Comprimento de onda - $\lambda$

» Distância correspondente a um ciclo de um sinal que se propaga num meio

» Se o sinal se propaga com velocidade  $v$

$$\lambda = vT \quad \lambda f = v$$

» Velocidade de propagação da luz no espaço livre:  $c = 3 * 10^8 \text{ ms}^{-1}$

» Atrasos de propagação típicos ( $\mu\text{s} / \text{km}$ )

- Espaço livre ( $1/c$ ):  $3.3 \mu\text{s} / \text{km}$
- Par de cobre:  $5 \mu\text{s} / \text{km}$
- Cabo coaxial:  $4 \mu\text{s} / \text{km}$
- Fibra óptica:  $5 \mu\text{s} / \text{km}$

## Sinal nas Frequências

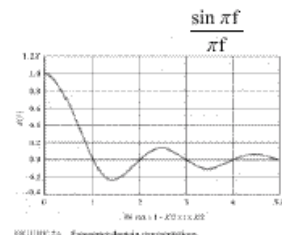
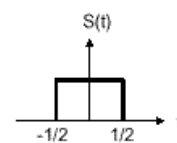
» Sinal periódico  $\rightarrow$  expansível em Série de Fourier

- Frequência fundamental + harmónicos

$$x(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(2\pi n f_0 t + \theta_n), \quad f_0 = \frac{1}{T}$$

» Sinal não periódico  $\rightarrow$  transformada de Fourier

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-j2\pi f t} dt$$



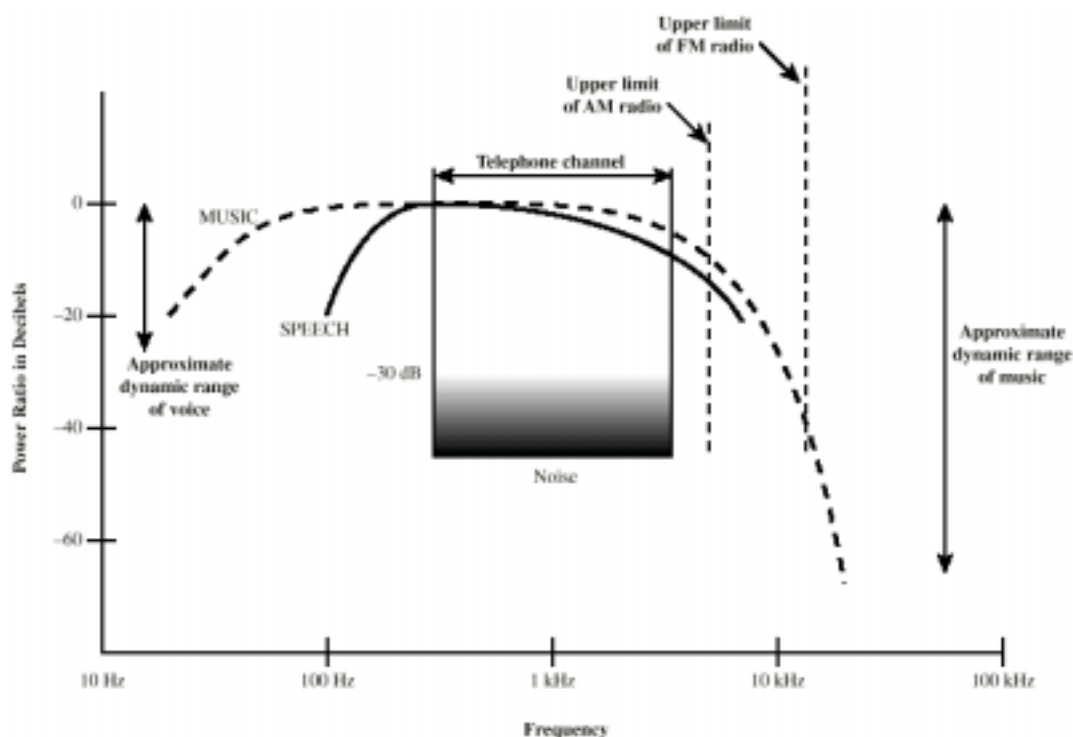
» Espectro de um sinal - gama de frequências do sinal

» Largura de banda (W) - largura do espectro ( $W = f_{\max} - f_{\min}$ )

» Largura de banda efectiva

- Contém a maior parte da energia do sinal (largura de banda de meia potência / 3 dB)

## Espectros Acústicos



## Transmissão Digital

### » Características

- Transmissão de sinais que transportam informação digital
- O sinal é atenuado e a sua integridade é afectada por ruído, distorção, etc.
- Uso de repetidores
  - ◆ Recebem o sinal, regeneram a informação digital e retransmitem o sinal
  - ◆ Reduzem os efeitos adversos da atenuação e da distorção; o ruído não é amplificado

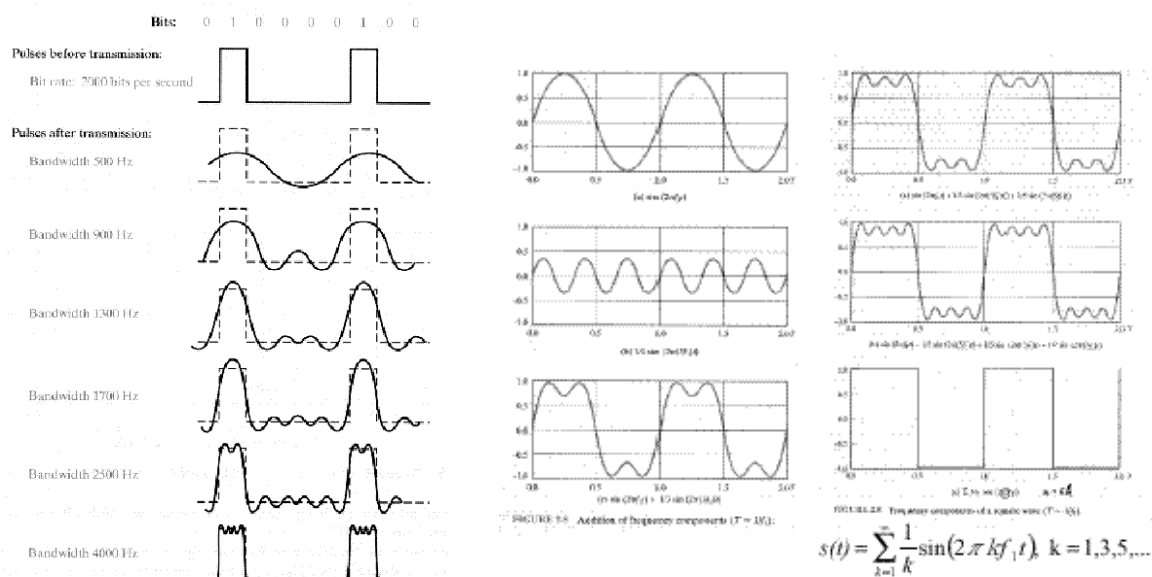
### » Vantagens (sobre transmissão analógica)

- Benefícios da tecnologia digital (integração em larga escala, baixo custo, consumo reduzido)
- Maior imunidade ao ruído e à distorção; uso de repetidores garante integridade dos dados em transmissão a grandes distâncias, mesmo com linhas de qualidade reduzida
- Exploração de técnicas de multiplexagem digital (TDM – *Time Division Multiplexing*)
  - ◆ Permite a integração das operações de multiplexagem e comutação digital no mesmo equipamento
  - ◆ Permite utilização eficiente de elevada largura de banda
- Utilização de técnicas de Processamento Digital de Sinais
  - ◆ Compressão, filtragem, igualização, cancelamento de eco, etc.
  - ◆ A representação digital de qualquer tipo de informação, independente do conteúdo, favorece a convergência de serviços
- Integração de Serviços na mesma rede
- Segurança e privacidade (criptografia)

## Débito de Transmissão e Largura de Banda

- » Dados binários podem ser representados por um **sinhal digital** (seqüência de impulsos) para transmissão através de um meio (**canal**)
- » Um **sinhal digital** exigiria uma largura de banda infinita, se o objectivo fosse preservar a forma dos impulsos
- » Um **canal** físico tem largura de banda finita e limitada (por razões económicas); filtra algumas frequências do sinal digital, distorcendo-o, o que dificulta a interpretação do sinal no receptor
- » Uma reduzida largura de banda do **canal** provoca elevada distorção do **sinhal digital** e portanto uma elevada probabilidade de interpretação errada de bits; é necessário reduzir a largura de banda efectiva do sinal, preservando a informação nele contida
- » Relação entre débito binário e largura de banda
  - Quanto maior for o débito binário, maior é a largura de banda efectiva do sinal
  - Quanto maior for a largura de banda do canal, maior é o débito binário possível no canal

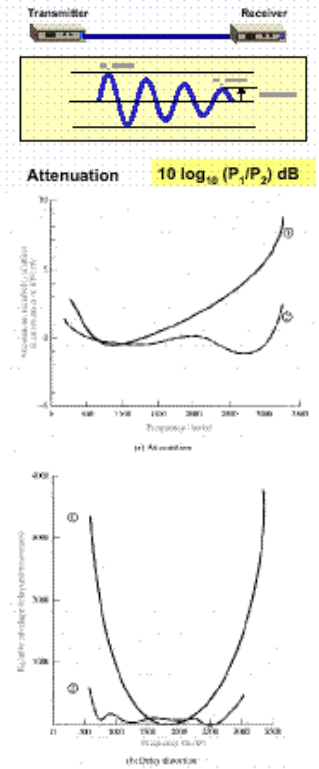
## Débito de Transmissão e Largura de Banda



# Distorção

## » Distorção de Amplitude

- A potência do sinal diminui com a distância (atenuação)
  - ◆ Em meios guiados, a atenuação varia exponencialmente com a distância (medida em escala logarítmica; unidade: dB / km)
  - ◆ A transmissão analógica requer amplificadores
  - ◆ A atenuação depende das características do meio
- A atenuação aumenta com a frequência (distorção de amplitude)
- A potência do sinal recebido
  - ◆ Deve ser suficiente para ser detectado (sensibilidade do receptor)
  - ◆ Deve ser superior ao ruído para ser detectado sem erros
- O sinal digital é regenerado com recurso a repetidores



## » Distorção de fase (atraso de fase)

- Causa: variação da velocidade de propagação com a frequência
  - ◆ Se o desvio de fase introduzido pelo canal variar linearmente com a frequência, o sinal não é distorcido mas simplesmente atrasado
- Característica de meios guiados (cabos, fibras)

# Ruído

## » Térmico (branco)

$$N_0 = kT \quad (W / Hz)$$

$$N = kTB \quad (W, dBW)$$

## » Intermodulação

- A mistura de sinais de frequências  $f_1, f_2$  pode gerar componentes
- Esses componentes podem interferir com sinais nessas frequências
- Causa: não linearidade do sistema de transmissão (e.g. amplificação)

$$i(f_1 + f_2) \quad i(f_1 - f_2)$$

## » Diafonia (Crosstalk)

- Acoplamento indesejado entre canais

## » Impulsivo

- Impulsos irregulares (*bursts*), com grande amplitude e pequena duração; causas: interferência electromagnética, etc.

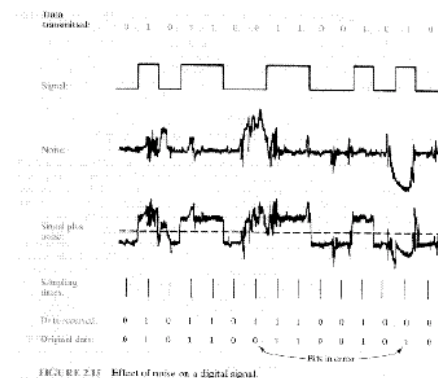
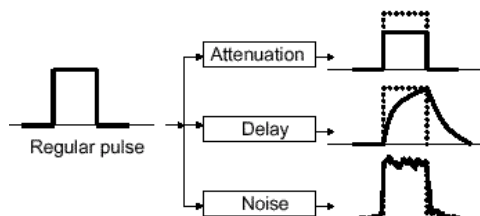


FIGURE 2.15 Effect of noise on a digital signal.

## Teoria da Informação

---

### » Medida de Informação

- Uma fonte digital produz um conjunto de mensagens  $\mathbf{m}_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) com probabilidades de ocorrência  $\mathbf{p}_i$
- A fonte pode ser modelizada por uma variável aleatória  $X = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ , com probabilidades associadas  $p(x_i) = p_i$
- A ocorrência de  $x_i$  elimina a incerteza *a priori* e produz um Ganho de Informação

$$I(x_i) = -\log_2 p(x_i) \quad \text{expresso em bit (unidade de Informação)}$$

- A Informação média produzida pela fonte, designada por **Entropia**, é

$$H(X) = -\sum p(x_i) * \log_2 p(x_i)$$

- O valor máximo da Entropia é  $\log_2 N$ , que se verifica quando as ocorrências são equiprováveis e independentes

## Teoria da Informação

---

### » Codificação binária

- Usando um alfabeto binário (0, 1), o número médio  $L(X)$  de símbolos binários necessários para codificar as mensagens é superior ou igual à Entropia da fonte, sendo portanto a eficiência do código  $\eta = H(X) / L(X)$  inferior ou igual a 100%
- No limite um símbolo binário (**bit - binary digit**) pode representar um **bit de informação**

### » Débito binário (*data rate*)

- Para além de o processo de codificação de fonte poder não ser 100% eficiente, aos símbolos binários que representam a informação são adicionados antes da transmissão outros símbolos para protecção (códigos detectores ou correctores de erros) ou para execução de funções protocolares (controlo, endereçamento, etc.)
- O número de símbolos binários a transmitir é sempre superior ao número de símbolos binários que seriam necessários para representar a informação
- Em termos práticos (consumo de recursos de transmissão) o que tem significado é o número total de símbolos binários transmitidos por unidade de tempo - débito binário de dados (*data rate*), que é sempre superior ao débito de informação (*information rate*), que representa a quantidade média de informação transmitida por unidade de tempo

## Capacidade de Canal (Nyquist)

### » Limite teórico de Nyquist (na ausência de ruído)

- A **Capacidade** de um canal **C** (**bit/s**) representa o limite superior ao débito binário (de dados) a que o emissor pode transmitir
- O **débito binário DR** (*Data Rate / Bit Rate*) expressa o número de símbolos binários que o emissor transmite por segundo (unidade: **bit/s**)
- Para transmissão no canal, a sequência binária pode ser convertida num sinal digital com **L** níveis ( $L = 2, 4, 8, \dots$ ); cada nível é representado por um sinal digital elementar
- Designa-se por **ritmo de modulação MR** (*Modulation Rate / Baud Rate*) a frequência de transmissão de sinais elementares, ou seja, o inverso da sua duração (unidade: **baud**)

$$DR = MR \log_2 L$$

- Designa-se por **B** a **Largura de Banda** do canal físico (**Hz**)
- O sinal digital é distorcido pelo canal, dando origem a Interferência Intersimbólica (ISI)
- Demonstra-se que é possível recuperar a informação contida no sinal, reduzindo a ISI nos instantes em que o sinal é amostrado, desde que a largura de banda do canal seja superior a

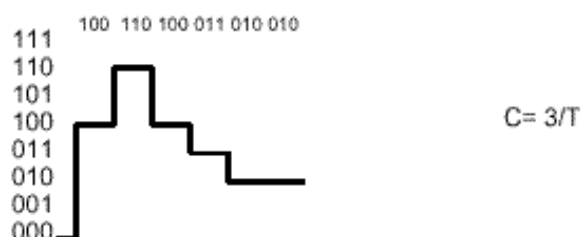
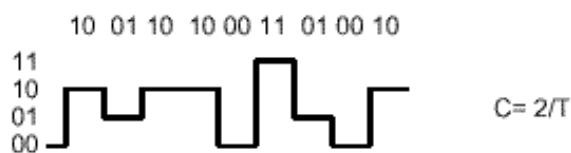
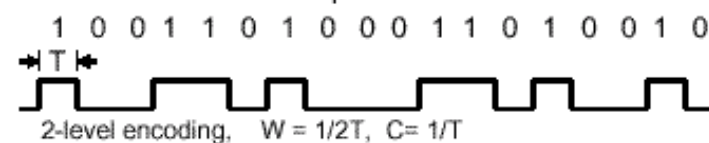
$$B_0 = MR / 2$$

- O débito binário DR é então limitado por

$$C = 2 B \log_2 L$$

## Capacidade de Canal (Nyquist)

– Ex: Transmitted sequence





## *Capacidade de Canal (Shannon)*

---

### » Limite teórico de Shannon

- O resultado estabelecido por Shannon aplica-se a canais com ruído branco e Gaussiano
- SNR - Relação sinal ruído

$$SNR = \text{potência de sinal} / \text{potência de ruído}$$

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

- Capacidade do canal (Shannon)

$$C = B \log_2 (1 + SNR)$$

### » Exemplo

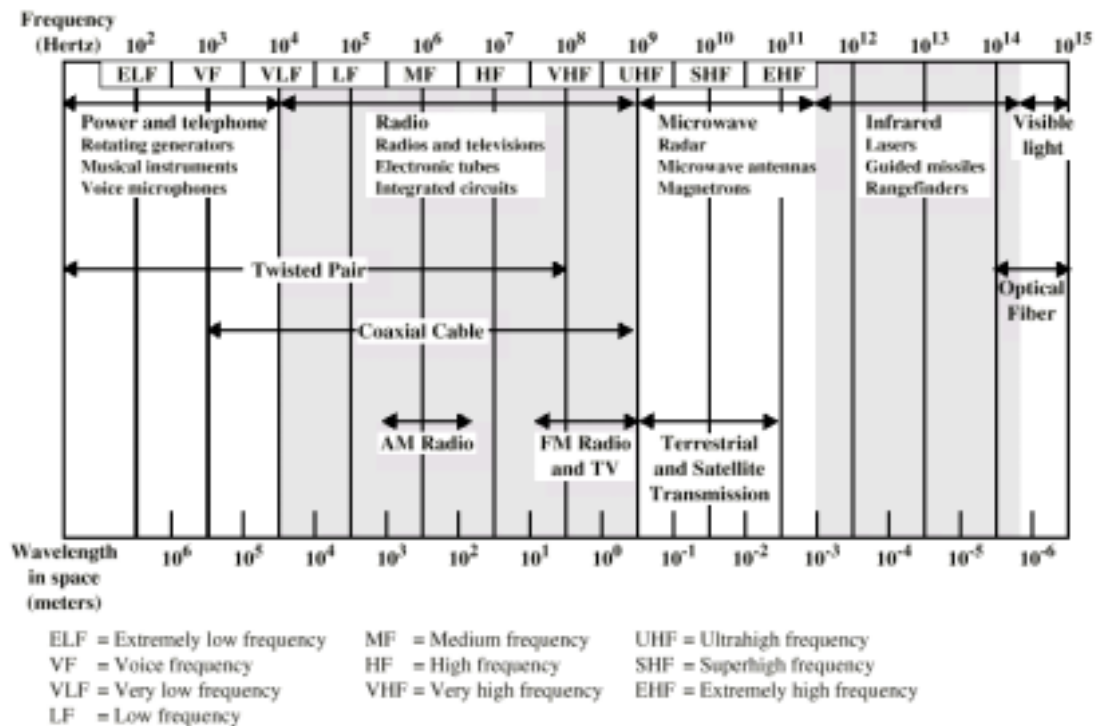
- Canal de voz:  $B = 3 \text{ kHz}$
- Relação sinal ruído no canal (valor típico):  $SNR_{dB} = 30 \text{ dB} \rightarrow SNR = 1000$
- $C = 3 \log_2 (1+1000) \sim 30 \text{ kbit/s}$ 
  - ◆ débitos maiores são possíveis com SNR mais elevado ou com compressão de dados
- Por Nyquist:  $C = 2 B \log_2 L$ ,  $30 = 2 * 3 \log_2 L \rightarrow L = 32$  (5 bits por símbolo)

## *Meios de Transmissão*

---

- » Asseguram a ligação física entre o emissor e o receptor
- » Meios guiados e não guiados (sem fios)
  - Guiados - par de cobre entrançado, cabo coaxial, fibra óptica
  - Não guiados - antenas de emissão e recepção
- » As características e a qualidade da transmissão são determinadas pelo meio e pelo sinal
- » Em meios guiados as características do meio são mais importantes
- » Em meios não guiados as características do sinal são mais importantes

## Espectro Electromagnético



## Transmissão Guiada – Twisted Pair

» *Twisted Pair* – par de cobre entrançado

» Aplicações

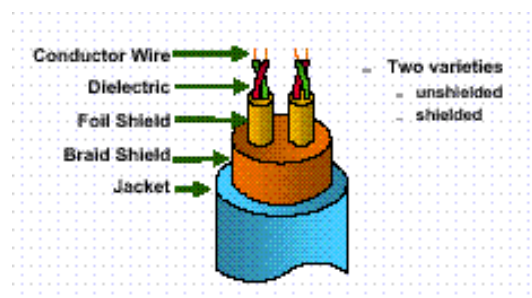
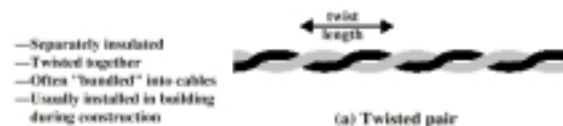
- Meio mais comum
- Rede telefónica (jacete de assinante)
- Dentro de edifícios (central telefónica local)
- Em redes locais (LANs a 10 e 100 Mbit/s)

» Características

- Usado para sinais analógicos ou digitais
- Distância entre repetidores: 2 a 3 km
- Débitos de transmissão – até 100 Mbit/s
- Susceptível a interferências e ruído

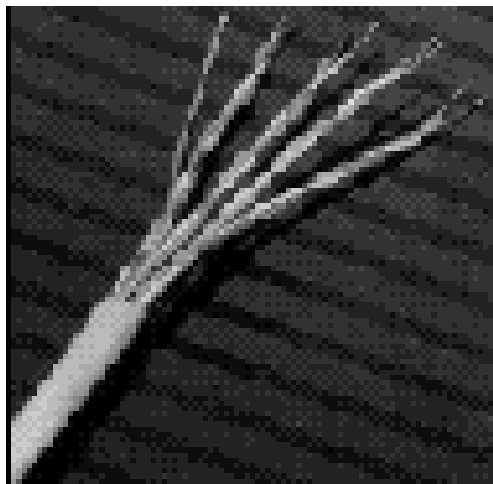
» Categorias

- *Shielded Twisted Pair* (STP)
  - ◆ Malha de protecção externa que reduz interferência electromagnética
  - ◆ Mais caro; mais difícil de trabalhar (mais grosso, mais pesado)
- *Unshielded Twisted Pair* (UTP)
  - ◆ Fio telefónico normal
  - ◆ Barato e fácil de instalar



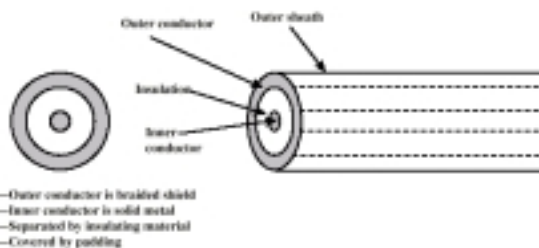
## Categorias UTP

- » Categoria 3
  - Até 16 MHz
  - Já instalado em muitos edifícios
  - Comprimento do entrançamento → 7.5 a 10 cm
- » Categoria 4
  - Até 20 MHz
- » Categoria 5
  - Até 100 MHz
  - Instalado nos edifícios mais recentes
  - Comprimento do entrançamento → 0.6 a 0.85 cm



## Cabo Coaxial

- » Aplicações
  - Meio versátil
  - LANs, TV, circuitos telefônicos (longa distância)
- » Boa imunidade ao ruído
- » Largura de banda elevada
  - Centenas de MHz / Mbit/s



Point-to-point transmission characteristics of guided media

Transmission medium	Total data rate	Bandwidth	Repeater spacing
Twisted pair	4 Mbps	3 MHz	2 to 10 km
Coaxial cable	500 Mbps	350 MHz	1 to 10 km
Optical fiber	2 Gbps	2 GHz	10 to 100 km

**RG-6:** drop cable for CATV, 75 Ω

**RG-8:** thick Ethernet LAN (10Base5), 50 Ω

**RG-11:** main CATV truck, 75 Ω

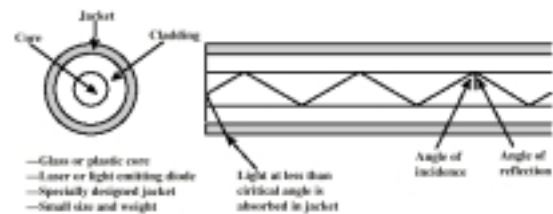
**RG-58:** thin Ethernet LAN (10Base2), 50 Ω

**RG-59:** ARCnet, 75 Ω

## Fibra Óptica

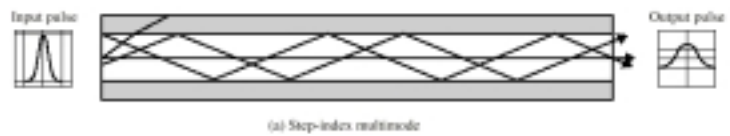
### » Vantagens

- Débitos de transmissão até centenas de Gbit/s
- Leves, flexíveis e pouco volumosas
- Baixa atenuação
- Imunidade a interferência electromagnética



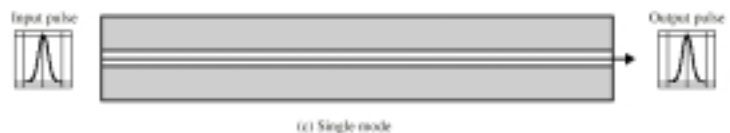
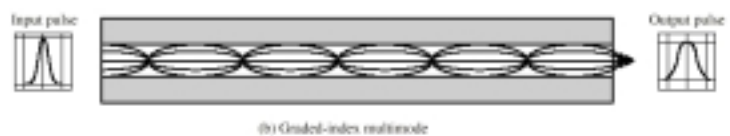
### » Desvantagens

- Interfaces óptico-eléctricas (custo)
- Terminação difícil (perdas)
- Multiponto difícil



### » Aplicações

- Transmissão a grande distância
- Lacete de assinante
- LANs



## Microondas Terrestres

- » Utilizadas quando o uso de cabo é impraticável
- » Banda: 2 - 40 GHz
- » Transmissão direccional, em linha de vista
- » Antenas parabólicas

– Diâmetro depende do comprimento de onda (e.g.: 3 m)

- » Máxima distância entre antenas em km  $d = 7.14\sqrt{(4/3)h}$

$h$  – altura da antena em metros

- » Débitos de transmissão elevados → centenas de Mbit/s

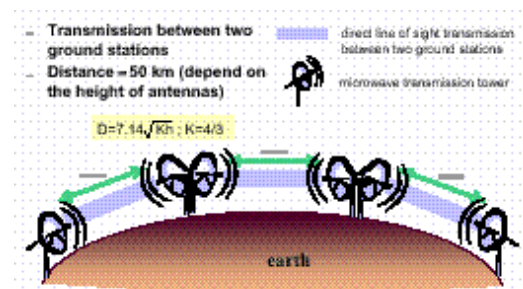
- » Atenuação

$$10 \log (4 \pi d / \lambda)^2 dB$$

- » Repetidores → 10 – 100 km

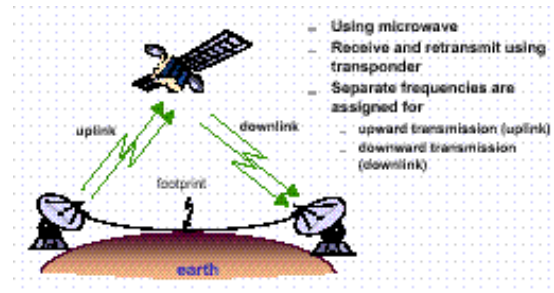
- » Aplicações

– Circuitos telefónicos de longa distância



## Microondas por Satélite

- » Satélites geoestacionários (órbita a 36 000 km da superfície da Terra)
- » Satélite recebe numa frequência e retransmite noutra
- » Largura de banda – centenas de MHz
- » Atrasos de propagação elevados (270 ms)
- » Aplicações
  - Circuitos telefónicos
  - Distribuição de TV
  - Redes privadas



Freq.	Band	uplink	downlink	use
4/6	C	5.925-6.425	3.7-4.2	commercial
7/8	X	7.9-8.4	7.9-8.4	military
11/14	Ku	14.0-14.5	11.7-12.2	commercial
20/30	Ka	27.5-30.5	17.7-21.2	military
20/44	Q	43.5-45.5	20.2-21.32	military

## Rádio Frequências

- » Transmissão omnidireccional
- » Banda: 30 MHz – 1 GHz
- » Distância entre antenas e atenuação

$$d = 7.14\sqrt{(4/3)h}$$

$$10 \log (4 \pi d / \lambda)^2 \text{ dB}$$

## *Infravermelhos*

---

- » Distâncias curtas
  - Aplicações: controlo remoto de equipamento, LANs
- » Transmissão em linha de vista, directa ou por reflexão em superfícies
  - Radiações infravermelhas não atravessam paredes
    - ◆ Boa segurança
    - ◆ Ausência dos problemas de interferência presentes em sistemas de microondas
- » Espectro não licenciado