

Transmissão de Dados

*FEUP/DEEC
Redes de Computadores
MIEEC – 2010/11
José Ruela*

Canais e meios de transmissão

Terminologia e conceitos

- Meios de transmissão

A transmissão de sinais, sob a forma de ondas electromagnéticas, é suportada em meios de transmissão guiados ou não guiados

- » Meios guiados: par de cobre entrançado, cabo coaxial, fibra óptica
- » Meios não guiados: espaço livre

- Conectividade

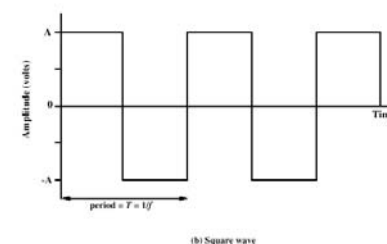
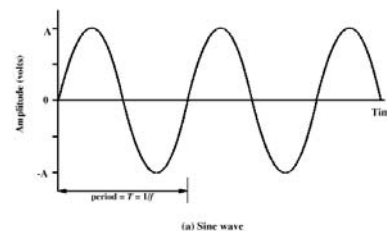
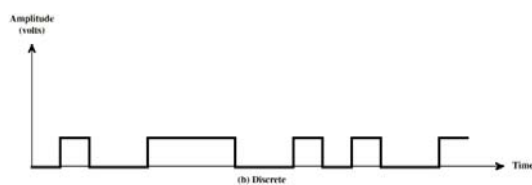
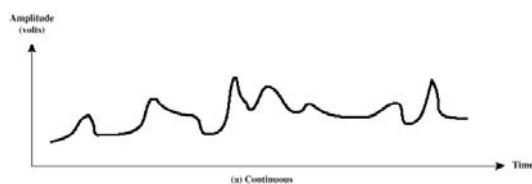
- » Ponto-a-ponto – ligação entre dois dispositivos
- » Multiponto – meio partilhado por mais de dois dispositivos
 - Um emissor e múltiplos receptores, múltiplos emissores e um receptor ou múltiplos emissores e receptores

- Modo de comunicação (direccionalidade)

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

Classificação de sinais

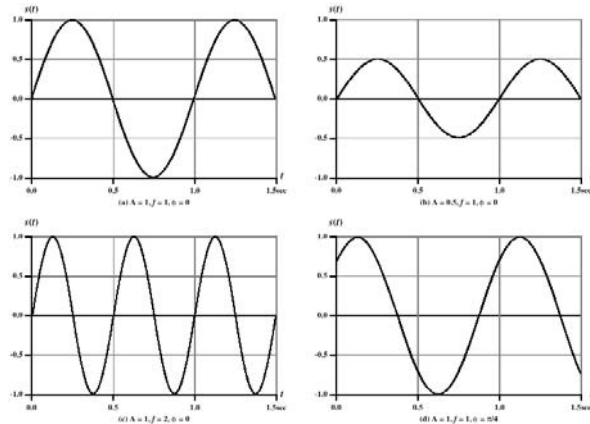
- » Analógicos: variação contínua em amplitude e no tempo
- » Digitais: sequência temporal discreta de valores quantificados (níveis discretos)
 - A designação sinal digital é normalmente usada para referir a sequência de impulsos que representa uma sequência discreta de valores quantificados – $x_i(t_n)$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



Sinal sinusoidal no tempo

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

A → amplitude
 $2\pi ft + \theta$ → phase
 f → Frequency = 1 / period (T)



Comprimento de onda – λ

- » Distância correspondente a um ciclo de um sinal que se propaga num meio
- » Sendo T o período, $f = 1 / T$ a frequência e v a velocidade de propagação, verificam-se as relações

$$\lambda = vT \quad \text{e} \quad \lambda f = v$$

- » Velocidade de propagação da luz no espaço livre: $c = 3 * 10^8 \text{ ms}^{-1}$
- » Valores típicos do atraso de propagação por unidade de distância ($\mu\text{s}/\text{km}$)
 - 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: $5 \mu\text{s}/\text{km}$

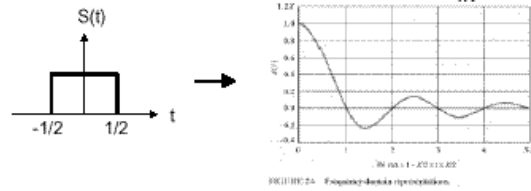
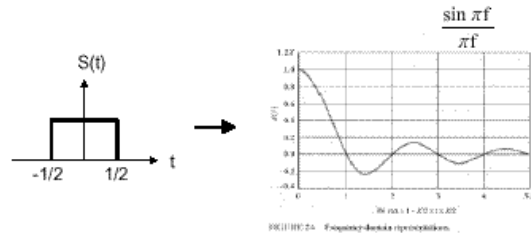
Sinal nas frequências

- » Sinal periódico → expansível em Série de Fourier
 - Frequência fundamental + harmônicos

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

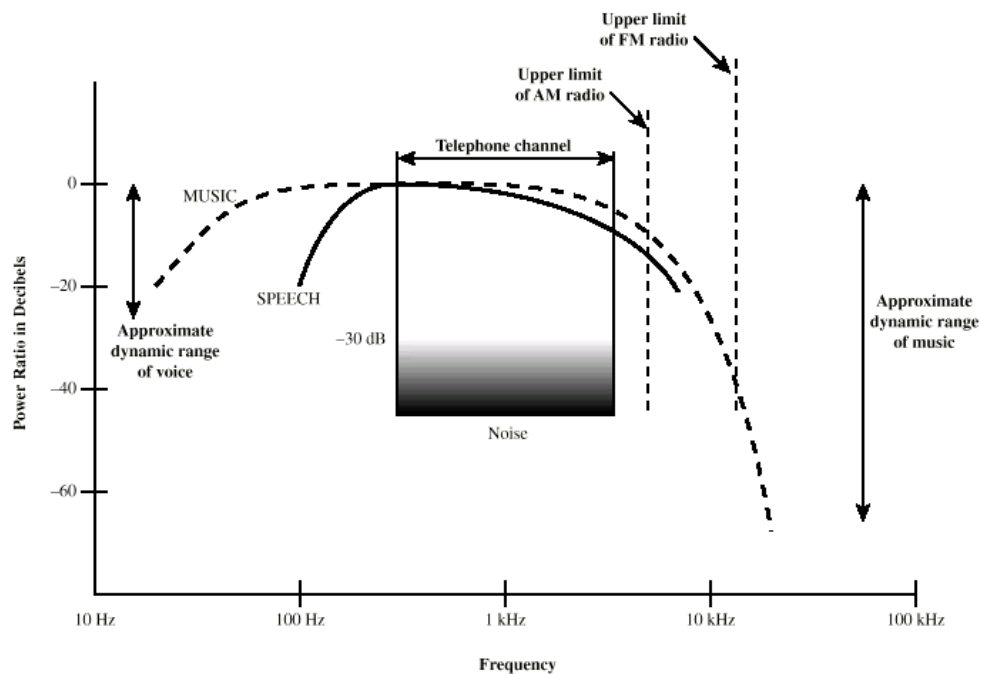
- » Sinal não periódico → transformada de Fourier

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



- » Espectro de um sinal – gama de frequências dominantes 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 ou 3 dB)

Espectros acústicos



Transmissão digital

» Características

- Transmissão de sinais que transportam informação digital
- O sinal é atenuado pelo canal 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
 - O uso de repetidores permite garantir integridade dos dados em transmissão a grandes distâncias
- Exploração de técnicas de multiplexagem no tempo (TDM – *Time Division Multiplexing*)
 - Permite a integração das operações de multiplexagem e comutação digital no mesmo equipamento
 - Permite utilização eficiente de 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
- Possibilidade de integração de serviços na mesma rede
- Segurança e privacidade (criptografia)

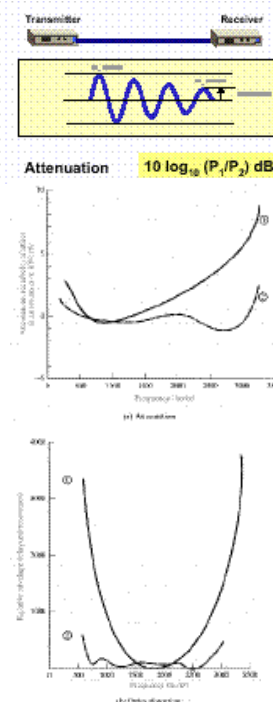
Distorção

» Distorção de amplitude

- A potência do sinal recebido 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)
- Potência do sinal recebido (detecção)
 - Deve ser suficiente para ser detectado (sensibilidade do receptor)
 - A taxa de ocorrência de erros depende da relação sinal ruído
- 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)

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

$$N = kT * B \quad (W, dBW)$$

» Intermodulação

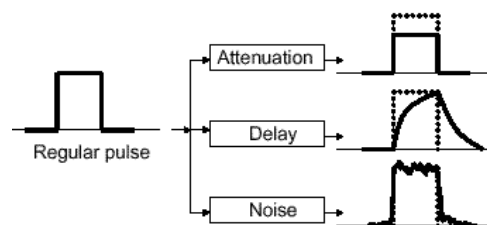
- A mistura de sinais de frequências f_1, f_2 pode gerar componentes $nf_1 \pm mf_2$
- Alguns desses componentes podem interferir com sinais nessas frequências
- Causa: não linearidade do sistema de transmissão (e.g., amplificação)

» Diafonia (*crosstalk*)

- Acoplamento indesejado entre canais

» Impulsivo

- Impulsos irregulares (*bursts*), com grande amplitude e pequena duração
- Causas: interferência electromagnética, descargas atmosféricas, órgãos de comutação, etc.



Teoria da Informação – medida de informação

» Medida de Informação

- Uma fonte digital produz um conjunto de mensagens m_i ($i = 1, 2, \dots, N$) com probabilidades de ocorrência p_i
- A fonte pode ser modelizada por uma variável aleatória $M = (m_1, m_2, \dots, m_N)$, com probabilidades associadas $p(m_i) = p_i$
- Define-se quantidade de Informação $I(m_i)$ da mensagem m_i

$$I(m_i) = -\log_2 p(m_i)$$

I exprime-se em *bit*
(unidade de Informação)

$$p(m_i) = 1 \Rightarrow I(m_i) = 0$$

$$p(m_i) = 0 \Rightarrow I(m_i) = \infty$$

$$p(m_i + m_j) = p(m_i) * p(m_j) \Rightarrow I(m_i + m_j) = I(m_i) + I(m_j)$$

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

$$H(M) = -\sum p(m_i) * \log_2 p(m_i)$$

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

Débito binário de dados – data rate / bit rate

» Codificação binária

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

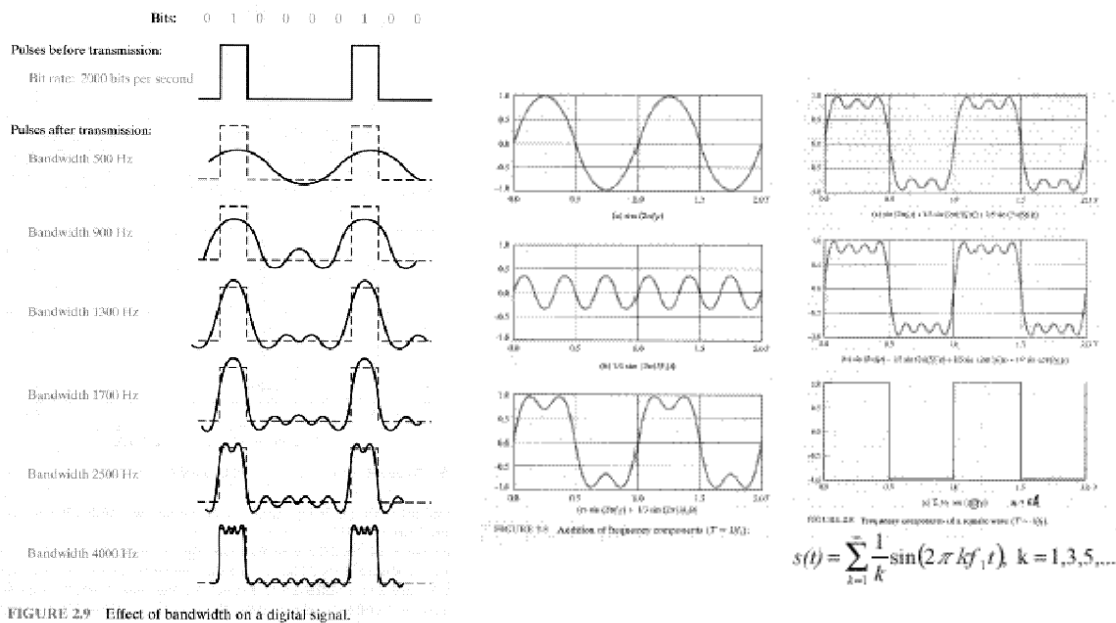
» Débito binário de dados (*data rate / bit rate*)

- 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, deste modo, superior (ou até muito superior) ao número de símbolos binários que são usados para representar a informação
- Em termos práticos (consumo de recursos de transmissão) o que tem significado é o número total de símbolos binários a transmitir por unidade de tempo – débito binário de dados (*data rate* ou *bit rate*), que é assim superior ao débito de informação (*information rate*), que representa a quantidade média de informação transmitida por unidade de tempo
 - Neste contexto, a palavra *bit* é usada na acepção de símbolo binário (e não de unidade de medida de informação) e portanto a expressão *bit rate* traduz o número de símbolos binários que é necessário enviar por unidade de tempo (independentemente do tipo e forma dos sinais transmitidos no canal)

Débito binário e largura de banda

- » Dados binários podem ser representados por um sinal digital (sequência de impulsos) para transmissão através de um meio (canal)
- » Um sinal digital exigiria uma largura de banda infinita, se o objectivo fosse preservar a forma dos impulsos – no entanto, tal não é necessário, visto que o objectivo é apenas preservar a informação contida no sinal, isto é, a sequência de valores binários que representa
- » Um canal físico tem largura de banda finita e limitada (o que, em particular, pode ser determinado por razões económicas); filtra algumas frequências do sinal digital, distorcendo-o, o que dificulta a interpretação do sinal no receptor
- » A redução da largura de banda do canal pode provocar uma distorção elevada do sinal digital e portanto uma probabilidade elevada de interpretação errada de bits; tal pode ser combatido reduzindo a largura de banda efectiva do sinal, preservando a informação nele contida – no entanto existem compromissos a respeitar

Débito binário e largura de banda – exemplo



Capacidade de canal (Nyquist)

» Limite teórico de Nyquist (na ausência de ruído)

- A Capacidade de um canal C (*bit/s*) representa o limite superior do 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, uma sequência binária pode ser representada por uma sequência de símbolos de um alfabeto de L símbolos ($L = 2, 4, 8, \dots$); os L símbolos são transmitidos sob a forma de sinais digitais elementares (impulsos) com diferentes amplitudes
- 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*)

$$DR = MR \log_2 L$$

- O sinal digital é distorcido pelo canal, dando origem a Interferência Intersimbólica (ISI)
- De acordo com o 1º Critério de Nyquist, 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, designada por B (unidade: *Hz*) seja pelo menos igual a

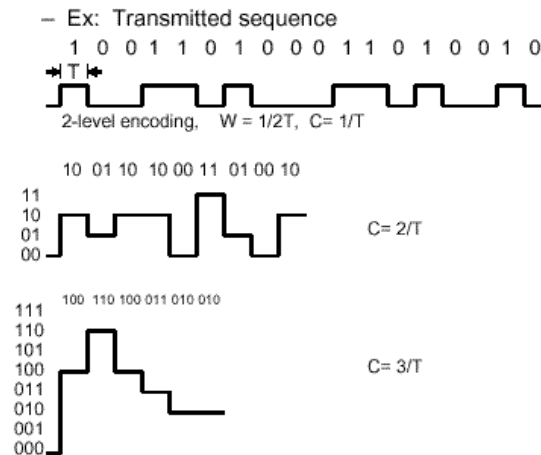
$$B_0 = MR / 2 \text{ (valor mínimo que corresponde a um filtro passa-baixo ideal)}$$

- Filtros de Nyquist obedecem à condição $B = B_0(1 + \rho)$, sendo $0 \leq \rho \leq 1$ o factor de *roll-off*
- O débito binário DR possível é então limitado superiormente por

$$C = 2 B \log_2 L \text{ (que corresponde a } \rho = 0)$$

Bit rate, baud rate e largura de banda

- Para um dado *bit rate*, o aumento do número de níveis de transmissão permite reduzir o *baud rate* associado, e portanto reduzir a largura de banda necessária para transmissão de dados
 - Analogamente, para uma dada largura de banda e o *baud rate* correspondente, o aumento do número de níveis de transmissão permite transmissão de dados com um *bit rate* superior
- No entanto, o aumento do número de níveis de transmissão, para uma mesma potência de sinal transmitido, reduz a imunidade em relação ao ruído, pelo que este aumento tem um limite prático



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
- 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 emissor(es) e receptor(es)
- » Meios guiados
 - Suporte físico: par de cobre entrançado, cabo coaxial, fibra óptica
 - As características do meio têm um impacto significativo na qualidade de transmissão
- » Não guiados
 - Suporte físico: espaço livre (atmosfera, espaço exterior)
 - Transmissão sobre portadora de rádio frequências
 - Afectados por problemas de propagação
 - Espectro electromagnético limitado
 - Necessário planejar frequências para reduzir interferências

Par de cobre entrançado (*twisted pair*)

» Aplicações

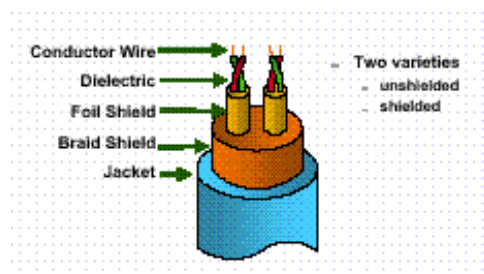
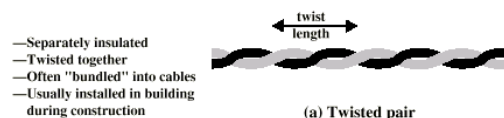
- Pequenas distâncias (< 10 km)
- Lacete de assinante (*local loop*)
 - Canal voz / dados (modem), RDIS, DSL
- Rede telefónica em edifícios
- LANs

» Características

- Usado para sinais analógicos ou digitais
- Atenuação elevada, sobretudo a altas frequências
- Susceptível a interferências e ruído
- Débito máximo decresce com a distância
- Possíveis débitos elevados em distâncias curtas

» Categorias

- *Shielded Twisted Pair* (STP)
 - Uma malha de protecção externa reduz a interferência electromagnética
 - Mais caro e mais difícil de instalar (mais grosso, mais pesado)
- *Unshielded Twisted Pair* (UTP)
 - Aplicações desde par telefónico normal até par de dados
 - Barato e fácil de instalar



Categorias UTP

» Categoria 3 (UTP3)

- Até 16 MHz de largura de banda
- Comprimento do entrançamento → 7.5 a 10 cm
- LANs Ethernet a 10 Mbit/s (10BASE-T) / sistemas telefónicos
- Ainda muito comum mas desactualizado

» Categoria 5 (UTP5)

- Até 100 MHz de largura de banda
- Comprimento do entrançamento → 0.6 a 0.85 cm
- LANs Ethernet a 100 Mbit/s (100BASE-T)
- Instalado nos edifícios mais recentes (inclusive para sistemas telefónicos)

» Categoria 5e (UTP5e)

- Características superiores a UTP5 – tende a substituir este tipo
- Recomendado para LANs Ethernet a 1Gbit/s (1000BASE-T)

» Categoria 6 (UTP6)

- Até 250 MHz de largura de banda



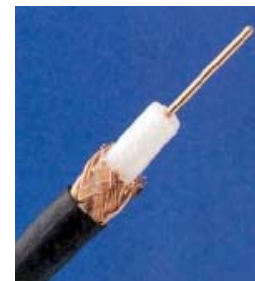
Cabo coaxial

» Aplicações

- LANs das primeiras gerações
- Sistemas de transmissão de longa distância (ultrapassados)
- Sistemas de TV

» Características

- Boa imunidade a interferências
- Largura de banda elevada (centenas de MHz / Mbit/s)



» Tipos

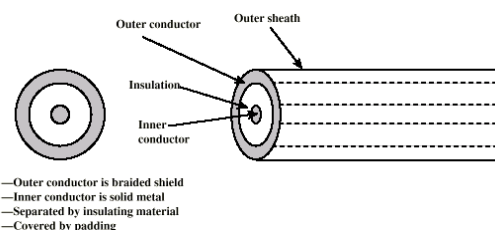
RG-6: *drop cable for CATV, 75 Ω*

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

RG-11: *main CATV trunk, 75 Ω*

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

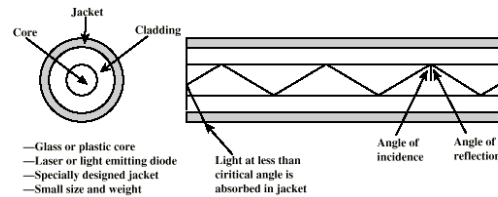
RG-59: *ARCnet, 75 Ω*



Fibra óptica

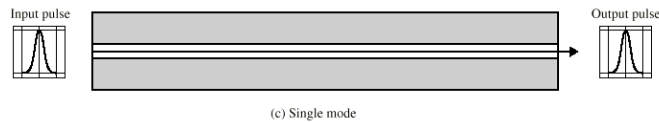
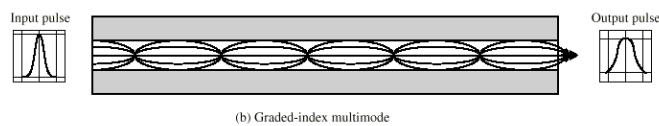
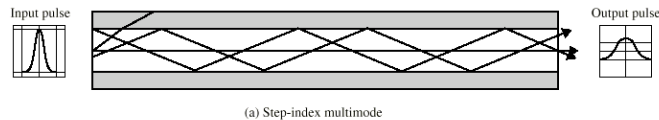
» Vantagens

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



» Desvantagens

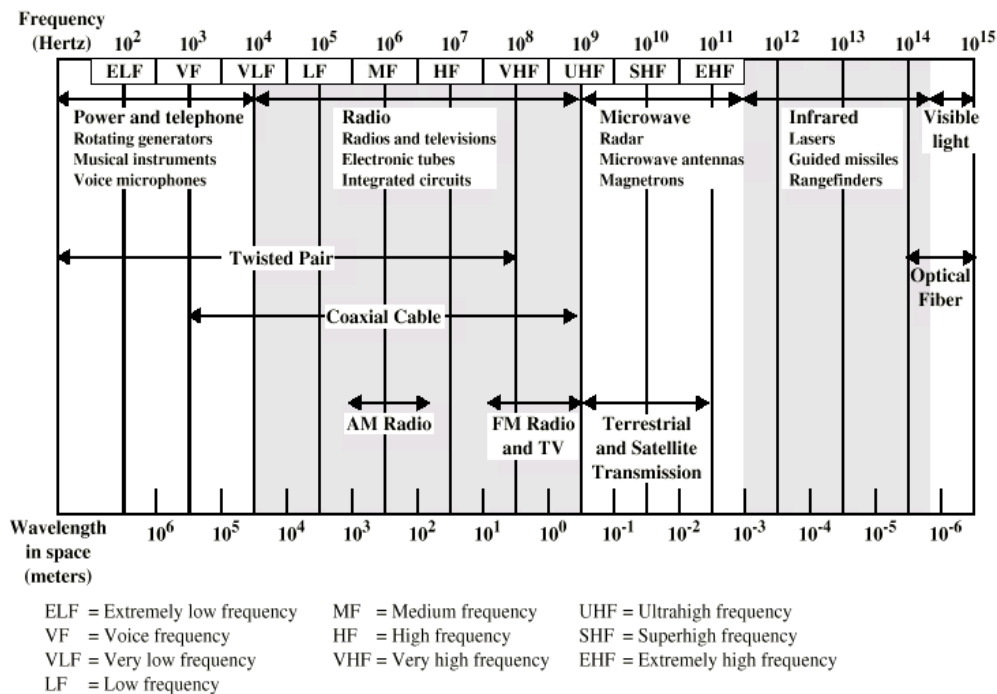
- Interfaces óptico-eléctricas (custo)
- Terminação difícil (perdas)
- Multiponto difícil (perdas)



» Aplicações

- Transmissão a grande distância
- Lacete de assinante
- LANs

Espectro electromagnético

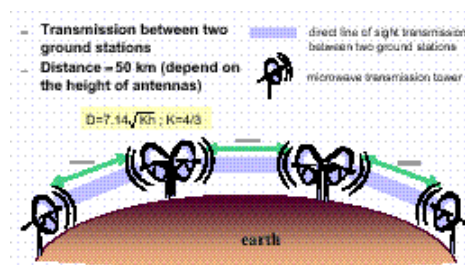


Rádio frequências – microondas terrestres

- » Utilizadas quando o uso de meios guiados é impraticável
- » Bandas: 2 – 40 GHz
- » Transmissão direccional, em linha de vista
- » Antenas parabólicas
 - Diâmetro depende do comprimento de onda
- » Curvatura da terra e efeitos de propagação exigem repetidores intermédios em ligações mais longas
- » Débitos de transmissão elevados (centenas de Mbit/s)
- » Atenuação em espaço livre

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

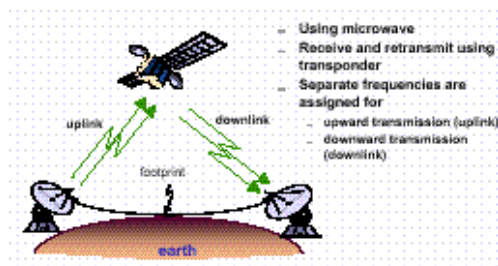
- » Repetidores (distâncias: 10 – 100 km)
- » Aplicações
 - Rede de transporte de longa distância
 - Rede de acesso (*Fixed Wireless Access*)



Rádio frequências – microondas por satélite

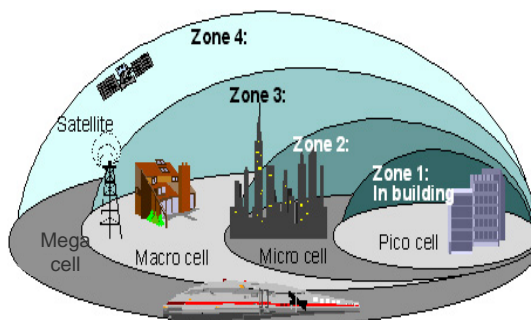
- » Permitem coberturas de grandes áreas da Terra
- » Satélites geoestacionários (órbita a 36 000 km da superfície da Terra)
- » Satélite recebe numa frequência e retransmite noutra
- » Largura de banda – centenas de MHz
- » Atrasos de propagação elevados (cerca de 270 ms entre duas estações terrestres)
- » Aplicações
 - Rede de transporte de longa distância
 - 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 – comunicações móveis

- » Mobilidade exige ligações sem fios
- » Bandas: VHF/UHF (30 MHz – 3 GHz), em alguns casos superiores
- » Estrutura baseada em células
- » Aplicações
 - Comunicações móveis terrestres
 - LANs sem fios
 - Telefones portáteis
- » Exemplos de sistemas
 - GSM / 900 – 1800 MHz
 - DECT / 1 900 MHz
 - IEEE 802.11b / 2.5 GHz / 11 Mbit/s
 - IEEE 802.11g / 2.5 GHz / 54 Mbit/s
 - IEEE 802.11a / 5GHz / 54 Mbit/s
 - IEEE 802.16 (WiMax) / > 2 GHz (diversas bandas) / até 100 Mbit/s
 - UMTS / 2 GHz / até 3.6 Mbit/s descendente (actualmente)



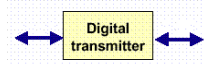
Infravermelhos

- » Distâncias curtas
- » 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
- » Aplicações
 - Controlo remoto de equipamento
 - LANs

Códigos de Transmissão e Modulações Digitais

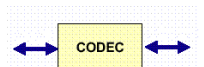
Representação de dados

- » **Dados digitais**, sinal digital

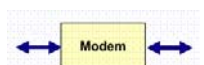


**Código de transmissão
(códigos de linha)
Transmissão em banda base**

- » Dados analógicos, sinal digital



- » **Dados digitais**, sinal analógico



**Modulação digital
Transmissão em banda de canal
(sobre portadora)**

- » Dados analógicos, sinal analógico



Dados digitais, sinal digital (códigos de transmissão)

- Admitimos, sem perda de generalidade, que a informação digital é representada por um código binário, isto é, os dados a transmitir constituem uma sequência de símbolos de um alfabeto binário (0 e 1)
- Para transmissão num canal passa-baixo, os dados binários podem ser representados directamente por um sinal digital, isto é, por uma sequência de impulsos que se sucedem a uma cadência fixa (sincronizada por um relógio)
 - » No caso mais simples cada símbolo binário é representado por um sinal elementar que pode ter um de dois níveis (transmissão binária)
 - » É possível agrupar símbolos binários e representar grupos de símbolos binários (dibit, tribit, etc.) por impulsos que podem ter um de L níveis ($L = 4, 8, \dots$) – a frequência dos sinais elementares (*modulation rate*), expressa em *baud*, deixa de ser igual à frequência dos símbolos binários iniciais (*data rate*), expressa em *bit/s*, excepto no caso em que $L = 2$

$$\begin{array}{l}
 DR = MR \log_2 L \quad DR = 1 / T_2 \\
 T_L = T_2 \log_2 L \quad MR = 1 / T_L
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{c}
 10 \ 01 \ 10 \ 10 \ 00 \ 11 \ 01 \ 00 \ 10 \\
 11 \\
 10 \\
 01 \\
 00
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{c}
 L = 4 \\
 DR = 2 MR \\
 T_4 = 2 T_2
 \end{array}$$

- » É possível estabelecer outro tipo de relações entre os dados binários e a sequência de sinais elementares que os representam
- » Os códigos de transmissão exploram estas relações – um “símbolo” do código pode ser constituído pela combinação de um ou mais impulsos (sinais elementares)

Detecção e interpretação dos sinais – objectivos

- » **Transparência**
 - Os códigos de transmissão devem ser independentes da sequência de bits
- » **Não ambiguidade**
 - Os códigos de transmissão devem permitir descodificação unívoca
- » **Sincronização**
 - O receptor tem de reconhecer os instantes de início e fim de cada impulso
- » **Detecção de nível**
 - O receptor tem de discriminar o valor do nível de cada impulso, a partir do sinal recebido, para poder reconstituir a sequência original de símbolos binários

Limitações à detecção e interpretação dos sinais

- » Perda de informação temporal (sincronização) no receptor
 - O sinal de relógio do receptor deve estar sincronizado (em frequência e fase) com a sequência de impulsos recebidos; uma possibilidade consiste em embutir informação de sincronismo no sinal codificado
 - ISI provoca flutuações nos instantes de transição dos impulsos (*jitter* temporal ou de fase), enquanto que a ausência de transições no sinal provoca perda da referência temporal

- » Perda da referência de amplitude para discriminação dos níveis dos impulsos
 - Em sistemas que usam acoplamento *ac* ou por transformador a filtragem das componentes de baixa frequência do sinal dá origem a uma forma especial de ISI designada por *baseline wander* ou *dc wander*
 - No caso de ocorrerem longas sequências de 0s ou 1s ou, mais geralmente, se a diferença acumulada entre 0s e 1s (disparidade ou *Running Digital Sum – RDS*) não for controlada, este fenómeno impede a correcta discriminação do nível do sinal por perda da referência absoluta de amplitude

- » Relação sinal ruído (SNR), débito binário e largura de banda do canal
 - A probabilidade de erro depende destes factores; a influência do código de transmissão manifesta-se pela relação que impõe entre o *bit rate* e o *baud rate*

Propriedades dos códigos de transmissão

- » Os códigos de transmissão permitem controlar as características estatísticas (espectrais) do sinal codificado, ao impor relações controladas entre os impulsos elementares (para além das determinadas pela sequência de dados)
 - Remoção de correlação indesejável entre bits de informação (e.g., longas sequências de 0s e 1s) por meio de técnicas de *scrambling*
 - Introdução de correlação controlada entre impulsos, através de codificação apropriada

- » A alteração das características espectrais do sinal (*spectral shaping*) apresenta inúmeras vantagens e constitui assim um dos objectivos mais importantes dos códigos de transmissão

- » A obtenção de determinadas vantagens pode ter algumas contrapartidas, pelo que os méritos dos códigos devem ser apreciados face a requisitos e critérios de avaliação concretos

Alteração das características espectrais do sinal

- » A redução da largura de banda efectiva do sinal codificado permite aproveitar o canal de forma mais eficiente e melhorar SNR por filtragem do ruído fora dessa banda
- » A concentração do espectro do sinal codificado na banda de passagem do canal permite reduzir os efeitos da distorção que se manifestam principalmente nos extremos da banda
- » A eliminação de componentes de baixa frequência no sinal codificado reduz os efeitos de *dc wander*, tornando possível acoplamento *ac*, o que garante melhor isolamento eléctrico e a possibilidade de tele-alimentação (repetidores, terminais) recorrendo a transformadores
- » A eliminação de componentes de alta frequência no sinal codificado reduz os efeitos da atenuação no canal e da interferência entre canais em suportes físicos separados (por exemplo múltiplos pares no mesmo cabo), fenómenos que têm maior impacto nas frequências mais elevadas
- » A introdução de zeros no espectro do sinal codificado permite extrair um sinal de relógio se o sinal ou uma sua função tiverem riscas espectrais nessas frequências, que podem ser separadas por um processo de filtragem

Outras propriedades dos códigos

- » Compressão de banda
 - Consegue-se com codificação multinível (sem alteração das características espectrais do sinal), por redução do *baud rate* em relação ao *bit rate*, com a contrapartida de aumentar a probabilidade de erro para idêntico SNR
- » Auto-sincronização
 - A possibilidade de recuperar um sinal de relógio directamente a partir do sinal recebido (auto-sincronização) requer transições frequentes no sinal codificado
- » Insensibilidade à inversão de polaridade do sinal
 - A inversão de polaridade do sinal pode ocorrer inadvertidamente em pares de cobre, interessando portanto uma solução que torne o sistema imune a este problema
- » Detecção de erros
 - Não é um objectivo essencial, mas pode ser uma propriedade intrínseca, a explorar
- » Controlo da disparidade
 - Uma pequena disparidade (RDS) permite reduzir os efeitos de *dc wander*
- » Simplicidade de implementação
 - Uma implementação simples pode reduzir significativamente o custo do sistema

Classificação dos códigos de transmissão

Os códigos de transmissão podem classificar-se de vários pontos de vista

» Polaridade

- Códigos Unipolares – os impulsos têm uma única polaridade; em códigos binários os dois estados são representados por um impulso e pela ausência de impulso
- Códigos Polares – os impulsos apresentam polaridade positiva e negativa, podendo ainda representar-se um estado adicional através da ausência de impulso

» *Duty-cycle* (ciclo de trabalho)

- *Non Return to Zero* (NRZ) – o nível dum impulso mantém-se constante durante o período nominal do(s) símbolo(s) binário(s) que representa
- *Return to Zero* (RZ) – o nível dum impulso regressa a zero antes de terminar esse período nominal (normalmente a meio do período, o que corresponde a um *duty-cycle* de 50%)

» Número de níveis

- Os códigos mais comuns apresentam os seguintes números de níveis: dois (binários), três (ternários puros e pseudo-ternários), quatro (quaternários), oito (octais), etc.

» Exemplos

- Em códigos binários é usual encontrar as quatro combinações: Polar NRZ, Polar RZ, Unipolar NRZ e Unipolar RZ
- Códigos ternários são tipicamente polares, com níveis positivo, negativo e nulo

Código binário NRZ (*Non Return to Zero*)

» NRZ-L (*Non Return to Zero – Level*)

- Usa dois níveis de sinal para representar 0 e 1 (codificação absoluta)
- O nível do sinal permanece constante durante o intervalo nominal de um bit

» NRZ-I (*Non Return to Zero – Inverted*)

- Mudança de nível representa 1
- Codificação diferencial
 - Imune a inversões de polaridade

» Vantagens

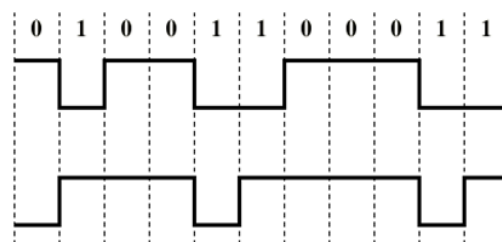
- Fácil de implementar
- Boa eficiência espectral

» Desvantagens

- Não é possível acoplamento *ac*
 - A concentração de baixas frequências no espectro do sinal provoca *dc wander* se for usado acoplamento *ac*
- Não permite auto-sincronização
 - A ausência de transições em sequências longas de 0s ou 1s pode originar a perda de referência temporal no receptor

NRZ-L

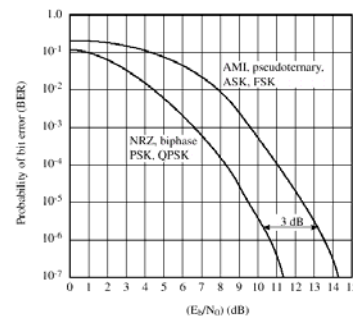
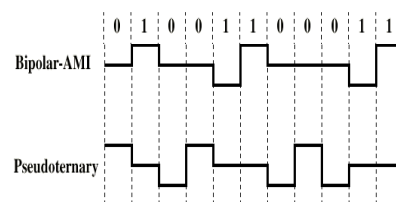
NRZI



Código binário multinível – AMI

São usados 3 níveis para codificar símbolos binários

- » Bipolar / AMI (*Alternate Mark Inversion*)
 - 0 → ausência de sinal
 - 1 → impulsos positivos e negativos alternados
 - Imune a inversões de polaridade
 - Ausência de componentes espectrais de baixa frequência
 - Boa eficiência espectral
 - O *baud rate* é igual ao *bit rate* (se NRZ)
 - Problemas com sequências de 0s são resolvidos com HDB_n
 - AMI RZ usado no sistema T1 americano (1.544 Mbit/s)
- » Pseudoternário
 - 1 → ausência de sinal
 - 0 → impulsos positivos e negativos alternados
 - Usado no acesso básico RDIS (equipamento terminal)
- » Menos eficientes que NRZ
 - Cada nível representa um símbolo binário, enquanto num código ternário puro cada símbolo ternário pode representar $\log_2 3 = 1.58$ bit de informação
 - Receptor deve distinguir 3 níveis; para a mesma probabilidade de erro é necessário SNR 3 dB superior



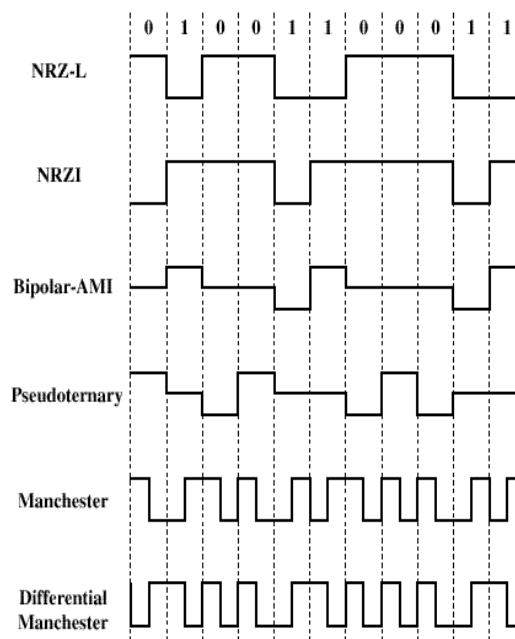
$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{S/R}{N_0} = \frac{S}{kTR} \quad R = 1/T_b$$

E_b → energia de sinal por bit (J/s)

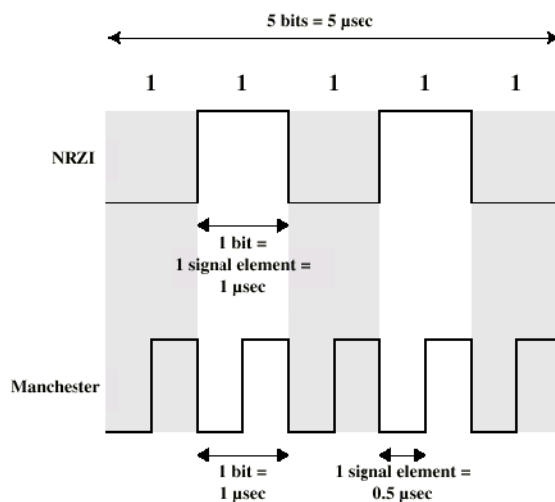
N_0 → Densidade de potência de ruído (W/Hz)

Códigos bifásicos (Manchester)

- Manchester
 - » Transição no meio de cada bit
 - 1: transição ascendente
 - 0: transição descendente
 - » Usado na LAN IEEE 802.3 (Ethernet)
- Manchester diferencial
 - » Transição no meio de cada bit
 - » Diferencial
 - 0: transição no início do bit
 - 1: ausência de transição no início do bit
 - » Usado na LAN IEEE 802.5 (*Token Ring*)
- Vantagens
 - » Fácil de implementar
 - » Propriedade de auto-sincronização
 - » Ausência de componentes espectrais de baixa frequência (imune a *dc wander*)
- Desvantagens
 - » O *baud rate* é duplo do *bit rate*
 - » Requer maior largura de banda do que o código binário NRZ



Ritmo de modulação do sinal bifásico

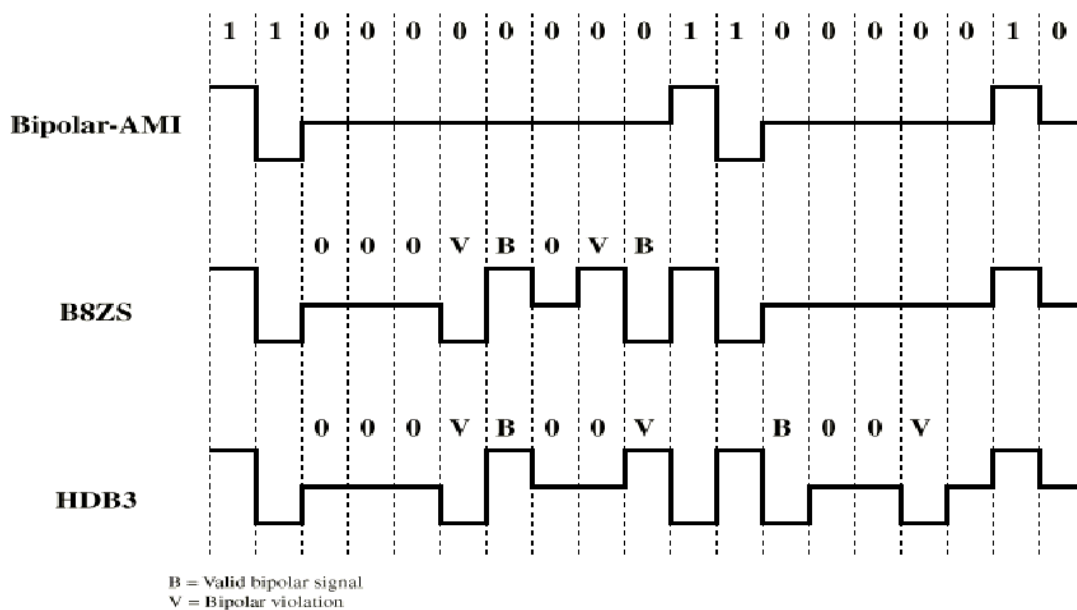


Bit Rate = 1 Mbit/s
Baud Rate = 2 Mbaud

Códigos B8ZS e HDB3

- **B8ZS – Bipolar With 8 Zeros Substitution**
 - » Baseado no bipolar AMI
 - » 0 0 0 + – 0 – + → se octeto de zeros e último impulso anterior positivo
 - » 0 0 0 – + 0 + – → se octeto de zeros e último impulso anterior negativo
- **HDB3 – High Density Bipolar 3 Zeros**
 - » Baseado no código bipolar / AMI
 - » Usado no sistema E1 europeu (1ª hierarquia PDH – 2.048 Mbit/s)
 - » Evita sequências de quatro ou mais zeros
 - » O quarto zero numa sequência é sempre transmitido como um impulso que viola a regra da alternância (V)
 - » Nos casos em que violações consecutivas originassem impulsos (V) com a mesma polaridade, o primeiro zero da sequência é substituído por um impulso que respeita a regra da alternância (B) e o quarto zero por um impulso que viola essa regra (tendo portanto a mesma polaridade que o primeiro impulso da sequência: B00V, isto é, + 0 0 + ou – 0 0 –)
 - Pode verificar-se facilmente que esta regra se aplica quando ocorre um número par de 1s desde a última substituição (violação)

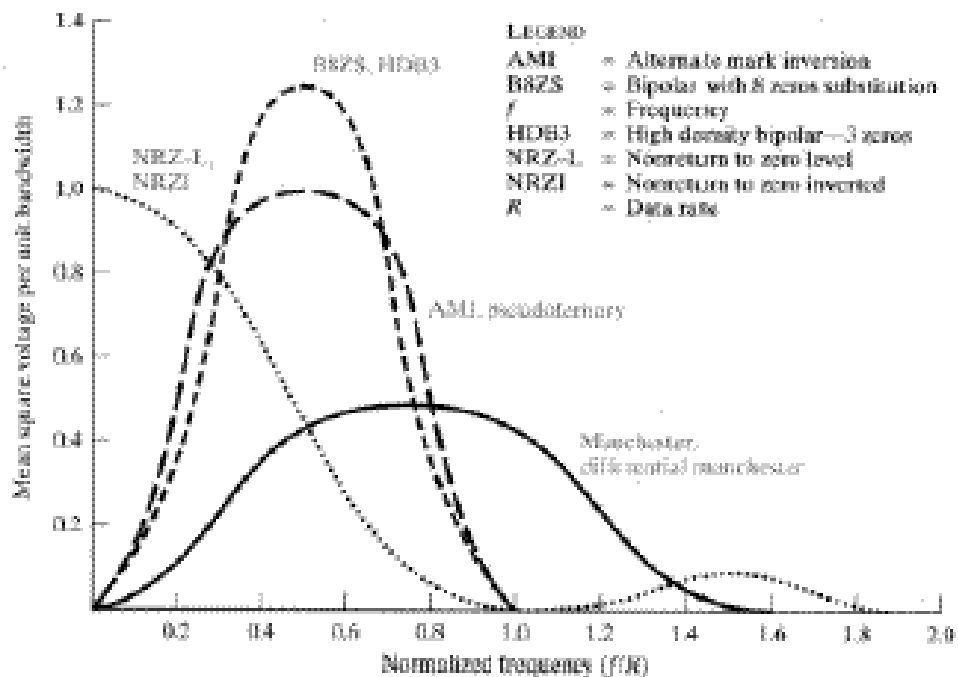
Códigos B8ZS e HDB3 – exemplos



Outros códigos

- » CMI (*Coded Mark Inversion*)
 - 0 → 01
 - 1 → 00 / 11, alternadamente
 - Propriedades: auto-sincronização e auto-igualização
 - O *baud rate* é duplo do *bit rate*
 - A “palavra” 10 pode ser usada para transportar informação de controlo
 - Usado no sistema E4 europeu (4ª hierarquia PDH – 139.264 Mbit/s)
- » mBnB ($n > m$)
 - São códigos alfabéticos – requerem uma tabela para codificação / descodificação
 - São códigos redundantes
 - A redundância é usada para evitar sequências de dados com poucas transições
 - Palavras não usadas para codificar dados podem ser usadas para controlo, delimitação de tramas, etc.
 - O *baud rate* é superior ao *bit rate*: $MR = n/m$ DR
 - São adoptados em sistemas de transmissão ópticos; exemplos: 4B5B (usado na LAN FDDI), 8B10B (usado em Gigabit Ethernet)
- » 4B3T
 - Grupos de 4 símbolos binários são substituídos por grupos de 3 símbolos ternários (códigos pseudo-ternários)
 - São códigos redundantes
 - A redundância é explorada para controlar a disparidade (RDS) do código
 - O *baud rate* é inferior ao *bit rate*: $MR = 3/4$ DR
 - Usado na interface pública de acesso básico RDIS (DR = 160 kbit/s; MR = 120 kbaud)

Espectros de potência



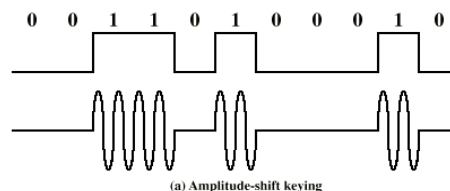
Dados digitais, sinal analógico (Modulações Digitais)

Não é possível transmitir um sinal digital num canal passa-banda sem forte distorção; a alternativa é usar o sinal para modular uma portadora sinusoidal

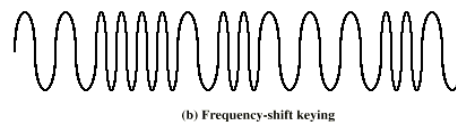
- » Exemplo: canal telefónico com banda de passagem 3 kHz (entre 300 e 3300 Hz)
 - Requer a utilização de *modems* na banda de voz (*voiceband modems*)

Modulações digitais básicas

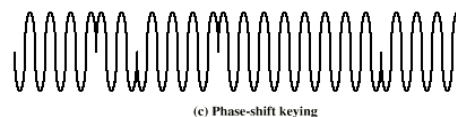
- » *Amplitude Shift Keying* (ASK)



- » *Frequency Shift Keying* (FSK)



- » *Phase Shift Keying* (PSK)



Modulações ASK e FSK

» ASK – Amplitude Shift Keying

- O sinal digital modula a amplitude da portadora; a modulação pode ser descrita por sinais elementares

$$s_i(t) = a_i \cos(2\pi f_c t + \phi)$$

- Em ASK binário há duas escolhas óbvias

$$a_i = (0, 1) \text{ – OOK (On-Off Keying)}$$

$$a_i = (+1, -1) \text{ – PRK (Phase Reversal Keying)}$$

sendo PRK um caso particular de PSK binário

- O espectro dum sinal ASK ocupa uma largura de banda dupla da do sinal digital (banda base); portanto, o débito binário é limitado por

$$C = B \log_2 L, \text{ pois } B_0 = MR \text{ (eliminação de ISI)}$$

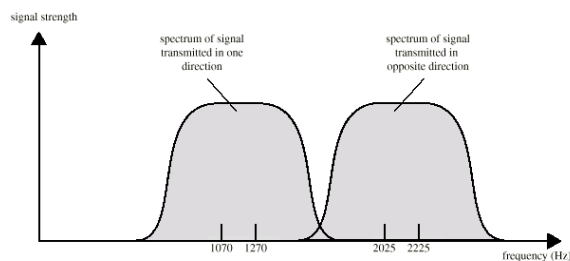
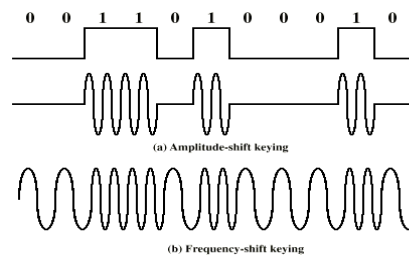
- Usado em canais telefónicos até 1200 bit/s
- Usado em fibras ópticas (modulação ON-OFF de fontes de luz)

» FSK – Frequency Shift Keying

- O sinal digital modula a frequência da portadora

$$s_i(t) = \cos(2\pi f_i t + \phi)$$

- Menos susceptível a erros que ASK
- Usado em canais telefónicos até 1200 bit/s



Full-Duplex FSK Transmission on a Voice-Grade Line

Modulação PSK

» PSK – Phase Shift Keying

- O sinal digital modula a fase da portadora; a modulação pode ser descrita por sinais elementares

$$s_i(t) = \cos(2\pi f_c t + \phi_i)$$

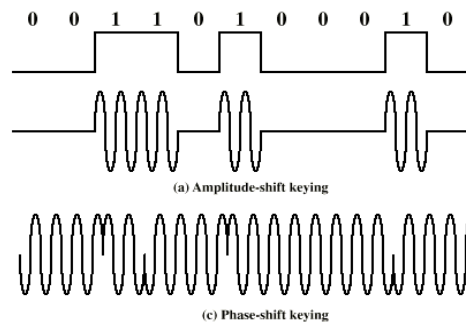
com $\phi_i = 2\pi i/L + \phi_0$, sendo L o número de fases

- Em PSK binário usam-se fases $(0, \pi)$ ou $(\pi/2, 3\pi/2)$
- Em PSK quaternário (QPSK) as alternativas usuais são $(0, \pi/2, \pi, 3\pi/2)$ e $(\pi/4, 3\pi/4, 5\pi/4, 7\pi/4)$
- A modulação PSK pode ser descrita pela combinação de modulações de amplitude de duas portadoras em quadratura (sen, cos)

$$s_i(t) = \cos \phi_i \cos 2\pi f_c t + (-\text{sen } \phi_i) \text{sen } 2\pi f_c t$$

o que indica uma forma prática de gerar o sinal PSK

- Por esta razão um sinal PSK ocupa uma largura de banda idêntica à de um ASK
- É ainda possível uma versão diferencial da modulação PSK – a informação está contida na variação de fase, o que dispensa uma referência absoluta de fase na desmodulação (mas implica desempenho inferior)
- Exemplos de Modems PSK da série V (ITU)
 - V.26 – 4 PSK: DR = 2400 bit/s; MR = 1200 baud
 - V.27 – 8 PSK: DR = 4800 bit/s; MR = 1600 baud



Modulação QAM

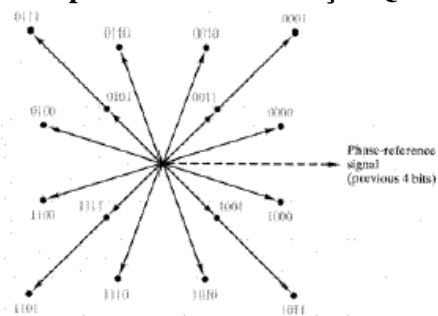
» QAM – Quadrature Amplitude Modulation

- Uma generalização de PSK consiste em combinar a modulação de fase com uma modulação de amplitude

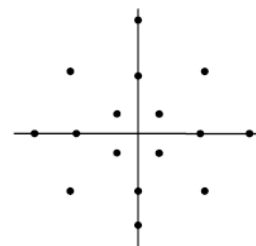
$$s_i(t) = r_i \cos(2\pi f_c t + \phi_i)$$
- Esta forma de modulação designa-se genericamente por *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM), podendo também ser descrita pela modulação de duas portadoras em quadratura

$$s_i(t) = (r_i \cos \phi_i) \cos 2\pi f_c t + (-r_i \sin \phi_i) \sin 2\pi f_c t$$
- As modulações PSK e QAM são habitualmente representadas por um diagrama de amplitudes e fases designado por **constelação**
- Os pontos de uma constelação PSK situam-se sobre uma circunferência, enquanto em QAM se distribuem em circunferências concêntricas
- Os modems V.29 usam uma modulação 16-QAM, com oito fases e duas amplitudes por fase
 - Fases: $(0, \pi/2, \pi, 3\pi/2)$ Amplitudes: $(3, 5)$
 - Fases: $(\pi/4, 3\pi/4, 5\pi/4, 7\pi/4)$ Amplitudes: $(\sqrt{2}, 3\sqrt{2})$
 - DR = 9600 bit/s; MR = 2400 baud
 - Transmissão *full duplex* em dois pares

Exemplo de uma constelação QAM



Modem V.29 – constelação



Modulação TCM

» TCM – Trellis Coded Modulation

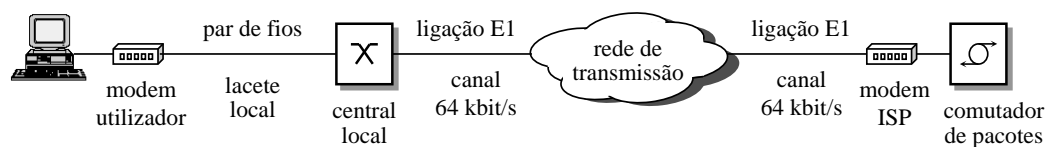
- Esta técnica combina modulação QAM com codificação convolucional
- Aos bits de dados são acrescentados bits redundantes para correcção de erros, o que torna esta modulação mais robusta que QAM
- Os modems V.32 usam modulação 32-QAM (constelação com 32 pontos)
 - A cada grupo de 4 bits de dados (*quadbit*) é adicionado um bit de protecção e o conjunto de 5 bits é usado para modular a portadora
 - DR = 9600 bit/s; MR = 2400 baud (como nos modems V.29)
 - Transmissão *full duplex* num par (com recurso a técnicas de Cancelamento de Eco)
- Os modems V.32 bis usam modulação 128-QAM (constelação com 128 pontos)
 - A cada grupo de 6 bits de dados é adicionado um bit de protecção e o conjunto de 7 bits é usado para modular a portadora
 - DR = 14400 bit/s; MR = 2400 baud
 - Transmissão *full duplex* num par (com recurso a técnicas de Cancelamento de Eco)
- Os modems V.34 usam constelações com um número muito maior de pontos
 - O débito binário máximo (33600 bit/s) aproxima-se do limite teórico de Shannon, considerando SNR da ordem de 34 a 38 dB (devido essencialmente ao ruído de quantificação na conversão A/D na terminação do lacete local nas centrais digitais)

Anexo

Modems PCM

» Configuração

- Ligação utilizador – central local → um par
- Ligação central local – ISP → um canal digital de voz PCM a 64 kbit/s



Configuração de acesso por modem baseado em PCM

» Princípio de operação

- Sinal transmitido no lacete local consiste em impulsos multinível
- Sentido descendente ISP → utilizador
 - Modem ISP: geração de palavras PCM (8 bits @ 8kHz) → máximo 7 bits úteis
 - Central local: conversão D/A de palavras PCM em símbolos multinível
 - Modem utilizador: recepção de símbolos, conversão A/D e extração de dados

Modems PCM

» Princípio de operação

- Sentido ascendente utilizador → ISP
 - Modem utilizador: transmissão de símbolos multinível → máximo 2^6 níveis
 - Central local: conversão A/D dos símbolos multinível em palavras PCM
 - Modem ISP: recepção de palavras PCM e extracção dos dados
 - Requer adicionalmente uma fase de treino para ajustar os níveis dos símbolos transmitidos aos níveis do conversor D/A da central local (não controlados pelo sistema)

» Exemplos

Nome	Data	Débito	Modo	Princípio de operação
V.90	1998	D 56 000 bit/s	Assimétrico	Baseado em PCM
		A 33 600 bit/s		Baseado em portadora (idêntico a V.34)
V.92	2000	D 56 000 bit/s	Assimétrico	Baseado em PCM
		A 48 000 bit/s		

DSL – Digital Subscriber Line

• Características gerais

- HDSL → *High-speed Digital Subscriber Line*
 - Cancelamento de eco adaptativo
 - Transmissão sobre 2 ou 3 pares (mais recentemente 1 par)
- SHDSL → *Single-pair High-speed Digital Subscriber Line*
 - Evolução de HDSL para sistemas multiserviço e multidébito
- ADSL → *Asymmetric Digital Subscriber Line*
 - Modulações sofisticadas, permitindo débitos elevados, sobretudo o descendente
 - Transmissão sobre 1 par
 - Desenvolvimentos recentes → ADSL2
ADSL2+
- VDSL → *Very high-speed Digital Subscriber Line*
 - Prolongamento dos sistemas ADSL/SHDSL para maiores débitos de linha

x-DSL: família de técnicas adequadas a diversas aplicações

número de pares

alcance

débito binário

simetria

cada tecnologia estabelece um compromisso entre vários objectivos

DSL – Digital Subscriber Line

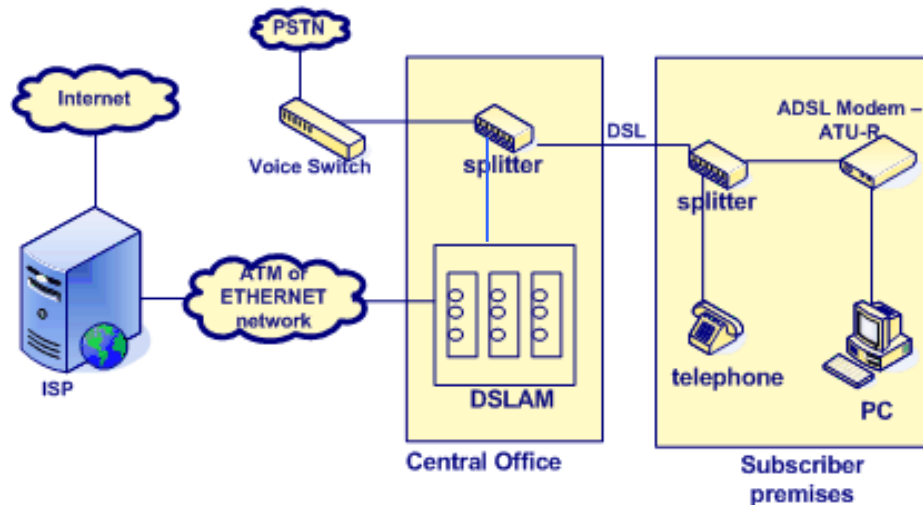
Family	ITU	Name	Ratified	Maximum speed capabilities
ADSL	G.992.1	G.dmt	1999	7 Mbps down 800 kbps up
ADSL2	G.992.3	G.dmt.bis	2002	8 Mbps down 1 Mbps up
ADSL2plus	G.992.5	ADSL2plus	2003	24 Mbps down 1 Mbps up
ADSL2-RE	G.992.3	Reach Extended	2003	8 Mbps down 1 Mbps up
SHDSL (updated 2003)	G.991.2	G.SHDSL	2003	5.6 Mbps up/down
VDSL	G.993.1	Very-high-data-rate DSL	2004	55 Mbps down 15 Mbps up
VDSL2 -12 MHz long reach	G.993.2	Very-high-data-rate DSL 2	2005	55 Mbps down 30 Mbps up
VDSL2 - 30 MHz short reach	G.993.2	Very-high-data-rate DSL 2	2005	100 Mbps up/down

DSL – Digital Subscriber Line

- » A banda passante do canal de voz (analógico) é limitada a cerca de 3 kHz pela introdução de filtros passa-baixo na interface entre a rede telefónica e o lacete de assinante (e o canal é igualizado nessa banda com cargas indutivas)
- » A remoção dos filtros e cargas indutivas é necessária nas interfaces RDIS e na exploração das várias tecnologias DSL (*Digital Subscriber Line*), o que permite explorar uma largura de banda da ordem de grandeza de alguns MHz, típica de pares de cobre entrançados
 - No caso da tecnologia ADSL essa largura de banda é igual a 1.104 MHz
- » A tecnologia ADSL permite multiplexar no lacete de assinante um canal telefónico convencional (POTS – *Plain Old Telephone Service*) ou um acesso RDIS e canais de dados (sentidos ascendente e descendente), para acesso a um fornecedor de serviços Internet
 - Os canais de dados são separados do canal telefónico
 - Anteriormente, eram usados divisores (*splitters*) à entrada da instalação
 - Actualmente, em cada tomada interna usam-se microfiltros

Configuração de acessos ADSL

ADSL LOOP ARCHITECTURE



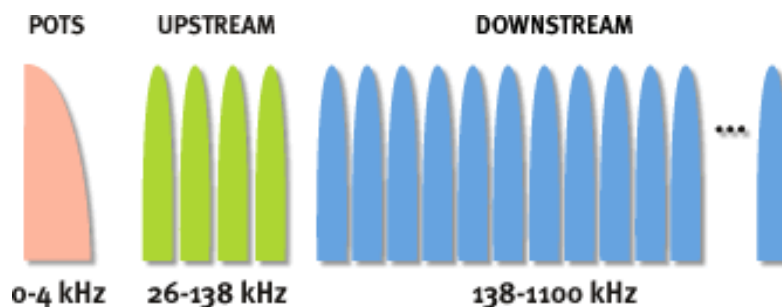
DSLAM – Digital Subscriber Line Access Multiplexer

Modems ADSL

- » Em ADSL usa-se uma técnica de modulação designada *Discrete MultiTone* (DMT), que combina QAM com FDM (*Frequency Division Multiplexing*)
- » DMT baseia-se na divisão da largura de banda (1.104 MHz) em 256 canais, cada um com banda 4.3125 kHz (portadoras separadas de 4.3125 kHz)
 - A sequência de bits é separada em múltiplas sequências paralelas
 - Cada sequência modula uma portadora de forma independente (QAM)
 - O número de bits usados para modular cada portadora varia entre zero e quinze, isto é, a densidade da constelação é variável, adaptando-se às condições do respectivo canal
 - Cada símbolo tem uma duração de 250 μ s (o *baud rate* por canal é igual a 4000 baud)
- » A separação (isolamento) dos sentidos de transmissão (ascendente e descendente) pode ser feita por FDM ou com recurso a técnicas de cancelamento de eco
- » Em ADSL a divisão de capacidade pelos dois sentidos de transmissão é assimétrica, sendo (muito) mais elevada no sentido descendente (do ISP para o assinante), devido à natural assimetria do volume de tráfego gerado e consumido pelos assinantes do serviço

Modems ADSL – canais de dados

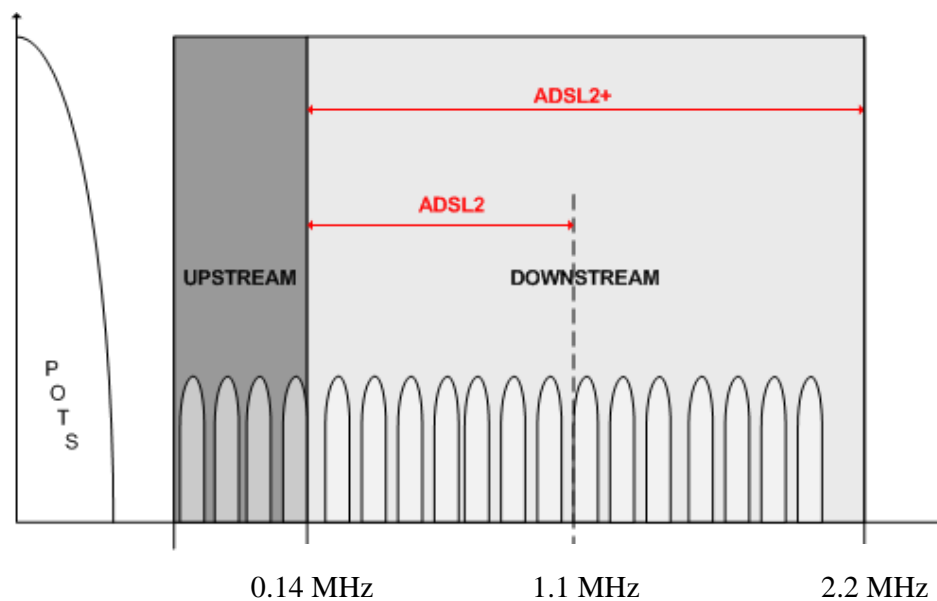
- » O canal 0 é usado para POTS, os canais 1 a 5 não são usados e os restantes 250 são usados para transmissão de dados e controlo
- » Os canais 6 a 30 são usados para transmissão ascendente (sendo um usado para controlo)
 - Considerando 24 canais de dados, o débito máximo possível é 1.44 Mbit/s ($24 \cdot 4000 \cdot 15$), mas valores típicos situam-se entre 64 kbit/s e 1 Mbit/s
- » Para transmissão descendente são usados os canais 31 a 255, no caso de não haver sobreposição com os canais ascendentes, ou os canais 6 a 255, no caso de se usar cancelamento de eco; em qualquer caso, um canal é usado para controlo
 - Considerando 224 canais de dados (primeiro caso), o débito máximo possível é 13.4 Mbit/s ($224 \cdot 4000 \cdot 15$), com valores típicos entre 512 kbit/s e 8 Mbit/s



ADSL2 e ADSL2+

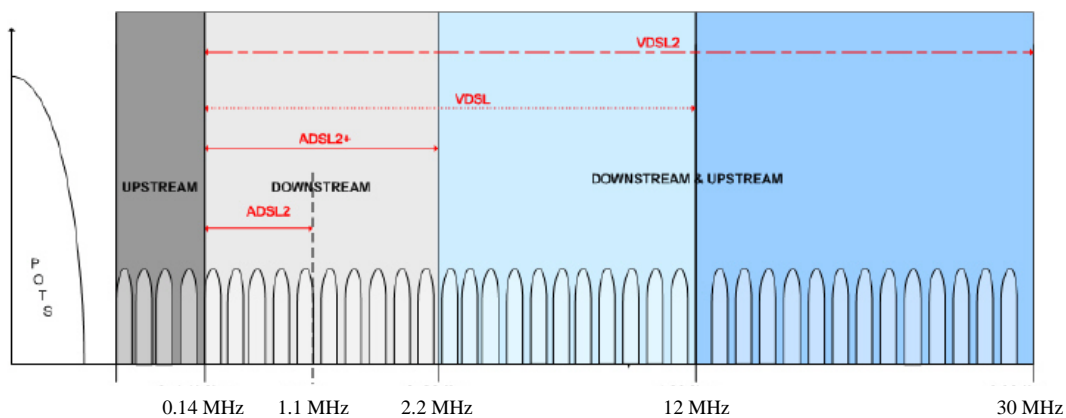
- Evolução da tecnologia ADSL2 em relação a ADSL
 - » Modulação mais eficiente permitindo maior débito em função do alcance
 - » Duplicação da banda do canal descendente (ADSL2+)
 - » Inicialização otimizada
 - Maximiza os bits por sub-portadora
 - Modo de inicialização rápida
 - » Reconfiguração dinâmica melhorada
 - » Melhoria do diagnóstico da linha
 - » Modos de baixa potência
 - » Possibilidade de aumentar o débito ascendente
 - Utilização da banda de voz para dados (modo totalmente digital)
 - Elevação da separação das bandas ascendente/descendente de 138 para 276 kHz
 - Alternativas relevantes para aplicações empresariais

ADSL2 e ADSL2+



VDSL

- Evolução da tecnologia VDSL em relação a ADSL
 - » Suporta o acesso analógico telefónico (POTS) ou RDIS como em ADSL
 - » Aumento significativo da banda para 12 MHz (VDSL) / 30 MHz (VDSL2)
 - » Permite débitos muito altos num único par, sobretudo em linhas curtas



Modems de cabo – sistemas

- » Os operadores de distribuição de televisão por cabo oferecem também um serviço de acesso à Internet, explorando a capacidade disponível no cabo e não utilizada para distribuição de canais de TV
- » Enquanto a distribuição de TV é unidireccional, a comunicação de dados requer transmissão bidireccional (sentidos ascendente e descendente) e usa bandas não usadas para distribuição de TV
- » Foram propostos vários sistemas – DAVIC (*Digital Video Audio Council*), DOCSIS (*Data Over Cable Service Interface Specification*) e IEEE 802.14, que diferem nas gamas de frequências para distribuição de TV e comunicação de dados, na largura de banda dos canais de dados constituídos nas bandas correspondentes e nos esquemas de modulação adoptados nos canais de dados e respectivos débitos
- » A distribuição de TV realiza-se em canais com largura de banda de 6 a 8 MHz (conforme os sistemas) numa gama de 54 / 65 MHz até cerca de 550 MHz
 - Para comunicação de dados são usadas uma banda de frequências abaixo e outra acima da banda de TV, respectivamente nos sentidos ascendente e descendente

Modems de cabo – canais de dados

- » A comunicação de dados no sentido ascendente realiza-se na banda de 5 a 42 / 65 MHz, dividida em múltiplos canais (cada um com largura de banda típica de 1 a 6 MHz)
 - São usadas modulações QPSK ou 16-QAM, a que correspondem débitos máximos por canal da ordem de 5 e 10 Mbit/s, respectivamente
 - Cada canal ascendente é partilhado (multiplexagem temporal) por um grupo de assinantes que competem pelo canal
- » No sentido descendente é usada a banda acima de 550 MHz (que se pode estender até frequências da ordem de 800 MHz), dividida em canais com largura de banda de 1 a 6 / 8 MHz
 - Em cada canal é usada modulação 64-QAM, permitindo um débito da ordem de 38 Mbit/s, que se reduz a cerca de 28 Mbit/s úteis (excluindo os *overheads*)
 - Em canais de elevada qualidade é possível usar modulação 256-QAM, a que corresponde um débito máximo útil da ordem de 40 Mbit/s
 - Cada canal descendente é igualmente partilhado por um grupo de assinantes, mas não existe competição, uma vez que as tramas de dados são difundidas para todos os assinantes associados ao canal (e filtradas com base no endereço)