Capítulo 2

A CAMADA FÍSICA

A camada física trata da geração de sinais e sua propagação através do meio físico. A camada deve especificar:

- a natureza do meio físico: sua constituição (par trançado, fibra ótica, etc.), suas dimensões (diâmetro, comprimento, etc.), suas constantes físicas (impedância característica, atenuação, etc.), dentre outros parâmetros;
- a forma como os hosts e roteadores são interconectados no meio físico (conectores, pinagem, etc.);
- a forma como 0s e 1s são codificados em sinais compatíveis com o meio físico;
- os parâmetros e suas respectivas tolerâncias dos sinais: tensões, correntes, freqüências, etc.;
- o procedimento de modulação e multiplexação de sinais no meio físico, se houver.

Vamos examinar os principais tópicos relacionados com a camada física, procurando limitar o nível de detalhamento ao escôpo deste texto. Padrões publicados por entidades como IEEE, ANSI e ISO devem ser consultados para um estudo mais aprofundado dos componentes da camada física para uma determinada tecnologia de rede.

2.1 Modos de Transmissão

A camada física é responsável pela transmissão através do meio físico dos quadros oriundos da camada de enlace. De acordo com o hardware empregado, a transmissão pode ocorrer em modo *full duplex* onde dois hosts comunicantes transmitem simultaneamente, ou *half duplex* caso a informação tenha seu fluxo alternado no tempo (apenas um host por vez pode transmitir). Em redes locais de computadores, a comunicação *half duplex* é a mais comum, dado que, na maioria das vezes, o meio físico suporta transmissão unidirecional apenas.

A transmissão de bits através do meio físico pode se processar de forma *serial* ou *paralela*. Na transmissão serial um bit é transmitido a cada intervalo de tempo, enquanto na paralela os bits são transmitidos serialmente por N canais independentes, resultando na transmissão de

N bits por unidade de tempo. Como a transmissão paralela requer um meio físico composto de vários canais, esta técnica não é empregada nas redes de computadores convencionais.

Uma transmissão de bits pode se dar de forma *síncrona* ou *assíncrona*. Na transmissão síncrona um bit é transmitido em intervalos de tempo bem definidos, enquando na transmissão assíncrona um bit pode ser transmitido em um instante de tempo arbitrário. A transmissão síncrona requer que tanto o host transmissor quanto o host receptor disponham de uma base de tempo comum, o que torna seu emprego muito restrito em redes de computadores. A transmissão assíncrona no nível de bits, por outro lado, é um processo ineficiente pois requer a introdução de um separador entre dois bits (caracter especial ou intervalo de tempo sem transmissão).

Na prática, utiliza-se um meio termo entre os modos síncrono e assíncrono, onde a transmissão assíncrona se dá no nível de bloco de bits (transmissão start-stop). Detectado a ocorrência de um bloco, os bits que o compõe são recebidos sincronamente. Cada bloco é iniciado com um delimitador de início (combinação de bits) e terminado com um delimitador de final de bloco. Ao detectar um delimitador de início, o receptor sincroniza seu relógio para receber, sincronamente, os bits que compõem o bloco. Mesmo que o host transmissor e receptor apresentem um certo *drift* em seus relógios, a transmissão start-stop requer sincronismo apenas entre os delimitadores de início e final de bloco.

2.2 Codificação de Sinais Digitais

A representação de bits em circuitos digitais se dá, via de regra, por sinais do tipo ON/OFF onde um valor alto de tensão representa o código 1 enquanto um valor baixo representa o código 0 (ou vice-versa). Esta forma de codificação produz ondas quadradas de formato altamente irregular o que dificulta sua transmissão através do meio físico (justificativa adiante). Outras formas de se codificar um sinal digital ON/OFF para sua posterior transmissão são (figura 2.1):

- Código Polar NRZ (Non Return to Zero): idêntico ao sinal ON/OFF, exceto que duas polaridades são empregadas (positiva e negativa). Raramente empregado em redes de computadores;

- Código Unipolar RZ (Return to Zero): o bit 1 c oincide com um pulso de relógio, enquanto o bit 0 é representado pela ausência do pulso. Raramente empregado em redes de computadores;

- Código Manchester: uma transição sempre ocorre no meio do intervalo de um bit. Se positiva (subida), a transição representa o bit 1, se negativa (descida) o bit 0. Transições são do tipo RZ;

- Código Bifase: idêntico ao Manchester, mas empregando transições NRZ;

- Código Manchester Diferencial: uma transição sempre ocorre no meio do intervalo de um bit. Uma transição adicional no início do intervalo representa o bit 0, enquanto a ausência desta representa o bit 1. Transições são do tipo RZ;

- Código Bifase Diferencial: idêntico ao Manchester Diferencial, mas empregando transições NRZ;
- Código CMI (Code Mark Inversion): o bit 0 é representado por uma transição positiva (subida) no meio do intervalo do bit, e o bit 1 pela ausência de transição positiva. Uma transição no final do intervalo ocorre quando bits 1s se repetem. Transições são do tipo NRZ.

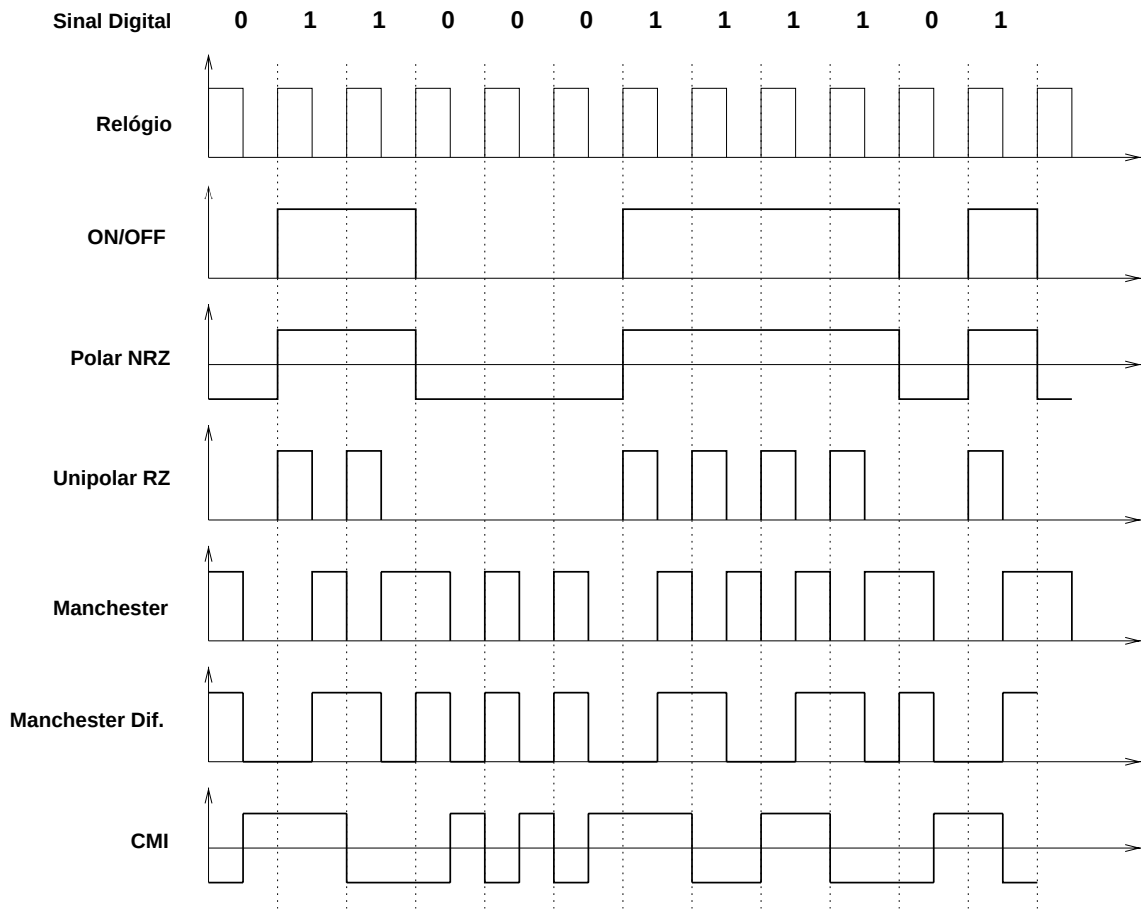

Figura 2.1: Formas de codificação de sinais digitais.

Um sinal codificado pode ser transmitido de forma digital ou analógica. Na forma digital, pulsos elétricos (ou óticos) são gerados no meio físico. O padrão IEEE 802.3 (CSMA/CD) utiliza transmissão digital com codificação Manchester.

Na forma analógica, sinais senoidais são gerados no meio físico. A geração de sinais senoidais a partir de um sinal digital é denominada *modulação*. O padrão IEEE 802.4 (Token Bus) emprega modulação na transmissão de sinais digitais pelo meio físico.

2.3 Modulação de Sinais Digitais

O processo de modulação consiste em variar a amplitude, a freqüência ou a fase de um sinal senoidal para representar determinado nível de um sinal digital.

A *Modulação por Chaveamento de Amplitude* (ASK) emprega uma onda senoidal de freqüência fixa e dois níveis de amplitude que representam os níveis do sinal digital (figura 2.2).

A *Modulação por Chaveamento de Freqüência* (FSK) emprega duas freqüências para codificar os níveis do sinal digital (figura 2.2). A passagem da freqüência alta para a baixa pode se dar de forma contínua ou de forma discreta. Na passagem contínua (modulação FSK-contínua), existe um tempo máximo para ocorrer a transição entre as duas freqüências e uma variação máxima nas amplitudes correspondentes às freqüências alta e baixa. Na passagem discreta (FSK-coerente), normalmente empregam-se N ciclos de freqüência baixa para representar determinado nível binário, e $2N$ ciclos de freqüência alta (o dobro da baixa) para o outro nível.

O padrão IEEE 802.4 (Token Bus) prevê ambas as formas de modulação FSK (não coexistentes na mesma rede, obviamente). Na moduação FSK-contínua, as freqüências são 3.75 e 6.25 MHz com uma tolerância de $\pm$ 80 KHz. O período de transição não pode ultrapassar 100 nanosegundos e as amplitudes nas freqüências alta e baixa não devem ter uma variação superior a 10%. Na modulação FSK-coerente, são empregadas freqüências de 5 e 10 (ou 10 e 20) MHz e um ciclo de freqüência baixa para representar o bit 1 ($N = 1$).

Finalmente, a *Modulação por Chaveamento de Fase* (PSK) representa os níveis binários por um avanço ou atraso de fase no sinal senoidal. Por exemplo, uma transição negativa (de 1 para 0) é representada por um avanço de 90° na fase do sinal senoidal, enquanto uma transição positiva (de 0 para 1) é representada por um atraso equivalente (figura 2.2).

2.4 Multiplexação

Multiplexação é o processo pelo qual o meio físico é compartilhado entre dois ou mais pares transmissor-receptor. A multiplexação pode se dar pela divisão em freqüência (FDM: Frequency Division Multiplex) ou pela divisão no tempo (TDM: Time Division Multiplex).

Na multiplexação FDM, diferentes bandas de freqüências são alocadas a diferentes pares transmissor-receptor. Esta técnica é empregada em fibras óticas[1] onde sinais de diferentes freqüências (cores) são propagados simultaneamente no cabo. A multiplexação TDM é análoga ao *time-sharing* onde a CPU de um processador é alocada a cada usuário de forma alternada. A multiplexação TDM pode ser síncrona ou assíncrona. Na multiplexação TDM síncrona, o meio físico é alocado alternadamente e por um período fixo a cada host, independente do host utilizá-lo ou não. Caso tenha quadros para transmitir, o host o faz no período em que o meio fica a ele alocado. Esta técnica provoca uma sub-utilização do meio físico, mas garante uma taxa mínima de transmissão para cada host. Esta garantia é fundamental em aplicações de tempo real.

Na técnica TDM assíncrona, quando um host necessitar transmitir quadros o mesmo deve

[1] No caso específico das fibtas óticas, esta multiplexação denomina-se *Multiplexação por Comprimento de Onda*, ou WDM (Wavelength Division Multiplexing).

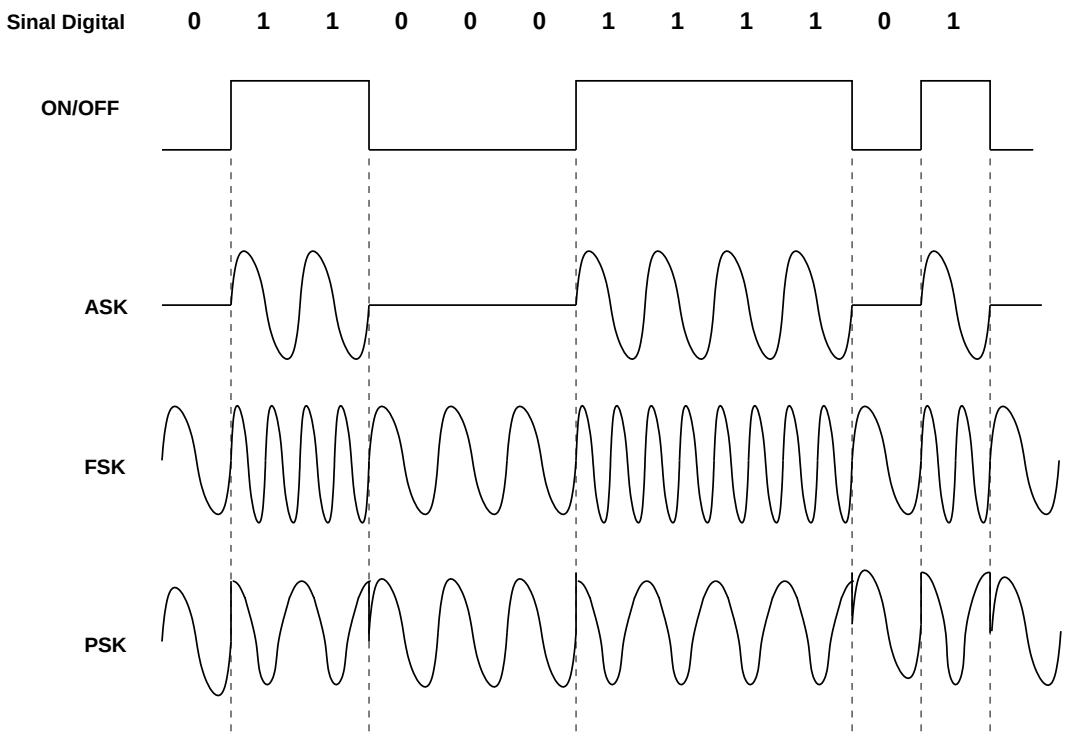

Figura 2.2: Modulação de sinais digitais.

executar um procedimento de acesso ao meio físico. Procedimentos convencionais são: passagem de ficha e sensoriamento do meio (estudados no próximo capítulo). Na técnica TDM assíncrona, o meio físico é utilizado mais eficienetmente, mas, em geral, não existe garantia de taxa mínima de transmissão para os hosts. Usualmente, redes locais de computadores empregam multiplexação TDM assíncrona, enquanto redes de longa distância empregam TDM síncrona.

2.5 Características dos Meios de Transmissão Elétricos

Via de regra, os meios de transmissão elétricos são do tipo passa-baixas, isto é, permitem a propagação de freqüências baixas até determinado limiar (largura de banda B). Em geral, a largura de banda é definida como a freqüência em que o sinal injetado em um extremo tem sua potência diminuida em 50% (-3 dB) na outra extremidade (figura 2.3-a).

Entretanto, se considerarmos os elementos elétricos diretamente conectados ao meio de transmissão, sua característica passa-baixas se altera para uma característica passa-faixa. Considere, por exemplo, que o circuto de transmissão e recepção esteja ligado ao meio através de um transformador de desacoplamento. Como transformadores exercem forte atenuação em baixas freqüências, o conjunto transformador-meio de transmissão passa a operar como um filtro passa-faixa (figura 2.3-b).

A característica passa-faixa de um meio de transmissão é a razão pela qual utiliza-se codificação de sinais diferentes de ON/OFF. Seja um sinal aleatório em codificação ON/OFF com amplitude unitária no caso de 1 e com igual probabilidade de ocorrência de 0s e 1s.

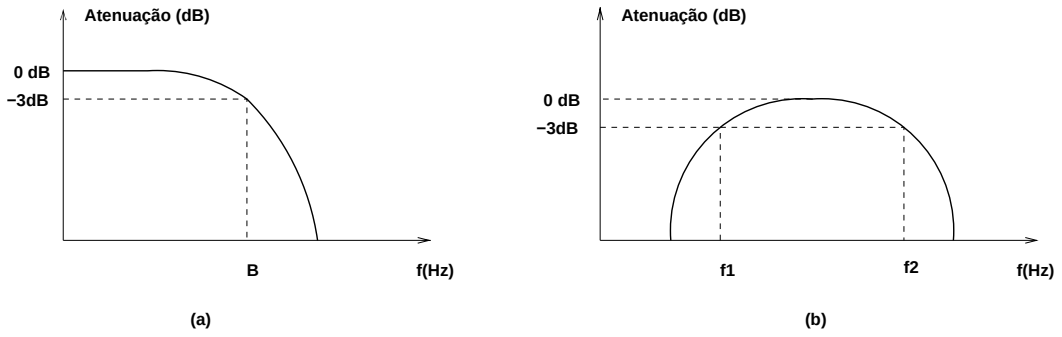

Figura 2.3: Um filtro passa-baixas (a) e passa-faixa (b).

Utilizando-se um filtro ideal que permite a passagem apenas se sinais na freqüência f, vamos aplicar o sinal ON/OFF ao filtro e computar a potência do sinal filtrado. Variando-se f de zero (nível DC) a infinito, obtem-se o gráfico (espectro de potência) da figura 2.4-a.

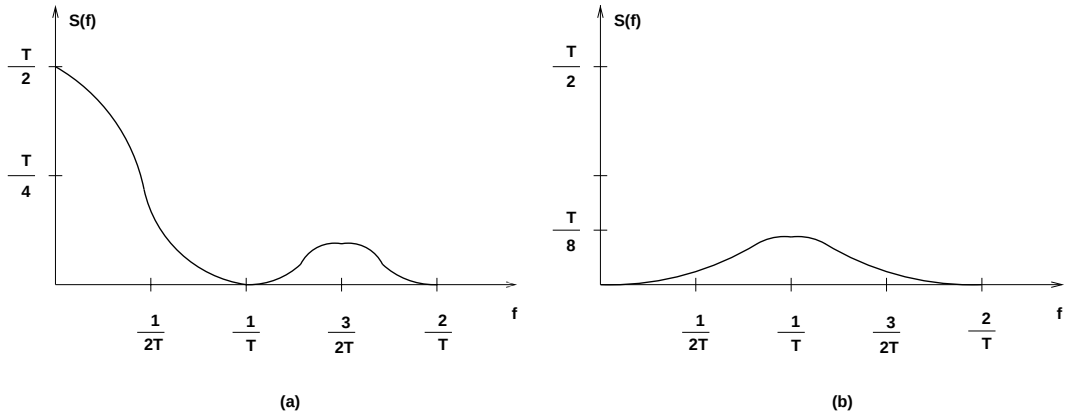

Figura 2.4: Espectro de potência de um sinal de amplitude unitária e período de ocorrência de bits igual a T: (a) codificação ON-OFF; (b) codificação Manchester.

Percebe-se agora que um meio de transmissão com características passa-faixa é inadequado para transmitir um sinal binário em codificação ON/OFF, pois este sinal demanda a propagação de potências consideráveis em baixas freqüências (de 0 até o inverso do período do bit-T). Impedindo-se a propagação de tais freqüências, tem-se um sinal altamente distorcido no receptor.

Passando agora o sinal ON/OFF por um codificador Manchester antes de aplicá-lo ao filtro, obtem-se o espectro de potência da figura 2.4-b. O código Manchester demanda a propagação de potências moderadas tanto de baixas quanto de altas freqüências, causando pouca distorção do sinal quando transmitido através de um meio passa-faixa.

2.6 Fontes de Distorção do Sinal

Característica Passa-faixa do Meio

A figura 2.5 mostra a distorção de um sinal periódico pela ausência (ou atenuação) de suas componentes de alta freqüência. A ausência de componentes de baixa freqüência dificulta ainda mais a identificação de 0s e 1s pelo receptor. Sinais periódicos necessitam apenas da propagação de submultiplos inteiros de sua freqüência (harmônicas da série de Fourier).

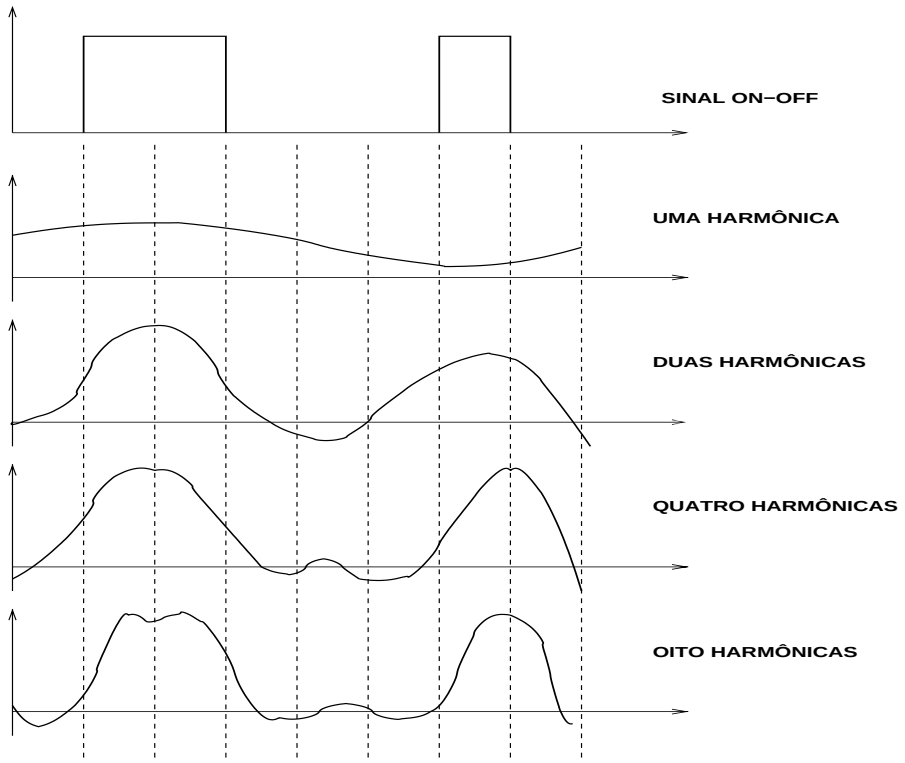

Figura 2.5: Um sinal periódico e suas harmônicas.

Interferência Entre Símbolos

Quando aplicamos uma onda retangular de tensão a um meio de transmissão elétrico, temos no receptor do sinal uma onda não retangular como mostra a figura 2.6. A subida íngreme da tensão é impedida pelas capacitâncias inerentes do meio, que necessitam armazenar energia para ter sua tensão variada. Esta energia é devolvida quando a tensão decai, impondo igualmente um decréscimo suave da tensão no meio.

Suponha a ocorrência do bit 1 seguido do bit 0. O decaimento suave da tensão pode fazer com que o receptor detecte o bit 1 no lugar do bit 0, caso a amostragem se dê mais próxima do início do intervalo do bit. A este fenômeno denomina-se *interferência entre símbolos*.

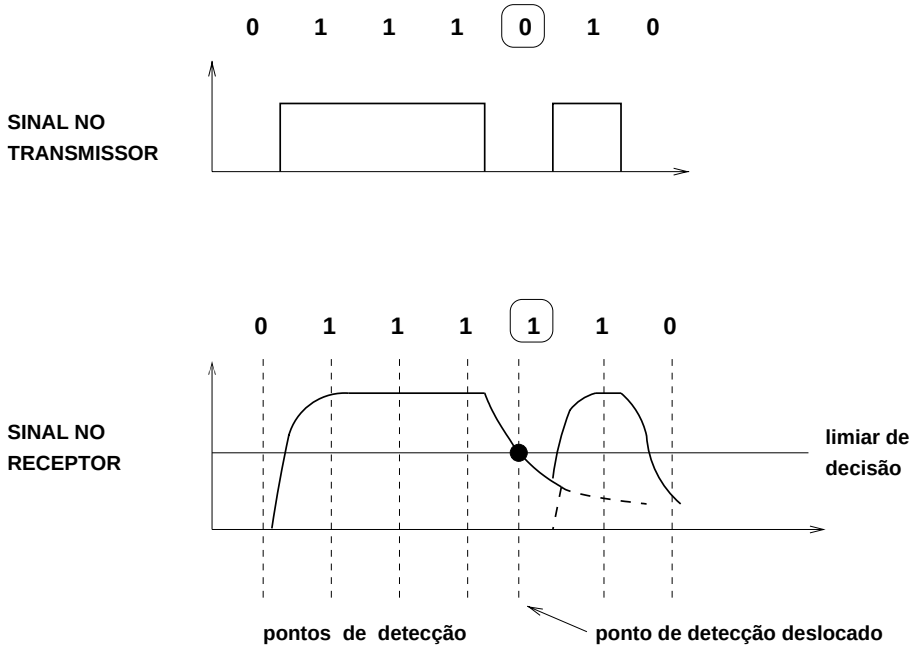

Figura 2.6: Interferência entre símbolos.

Jitter de Fase

Jitter de fase é uma imprecisão na fase do sinal digital causada por alteração do ponto de operação normal dos circuitos eletrônicos devido a variações de temperatura, oscilações da tensão de alimentação, etc. O jitter de fase causa uma mudança no instante de passagem pelo limiar que distingue uma transição (figura 2.7). Como consequência, o período de ocorrência dos bits tem um valor não constante, podendo causar erros na recepção do sinal.

O jitter de fase é medido pela faixa de tempo em que a transição pode variar (em valor absoluto ou relativo ao período do bit).

Ruído Térmico

Ruído térmico é uma perturbação de natureza aleatória que distorce o sinal. Transitórios térmicos e eletromagnéticos são as causas mais comuns de ruído térmico. Transitórios mecânicos é outra fonte de ruído térmico, alterando as características elétricas dos contactos (resistência e capacitância de contacto).

A figura 2.8 ilustra a distorção causada pelo ruído térmico.

Distorção por Atraso de Propagação

Um sinal pode ser representado por um certo número de componentes harmônicas senoidais. Nos meios físicos usuais a velocidade de propagação de uma onda senoidal depende de sua freqüência. Caso esta dependência seja acentuada, uma harmônica de freqüência alta pode ter sua fase alterada em relação as harmônicas de freqüências baixas. A figura 2.9 mostra este efeito.

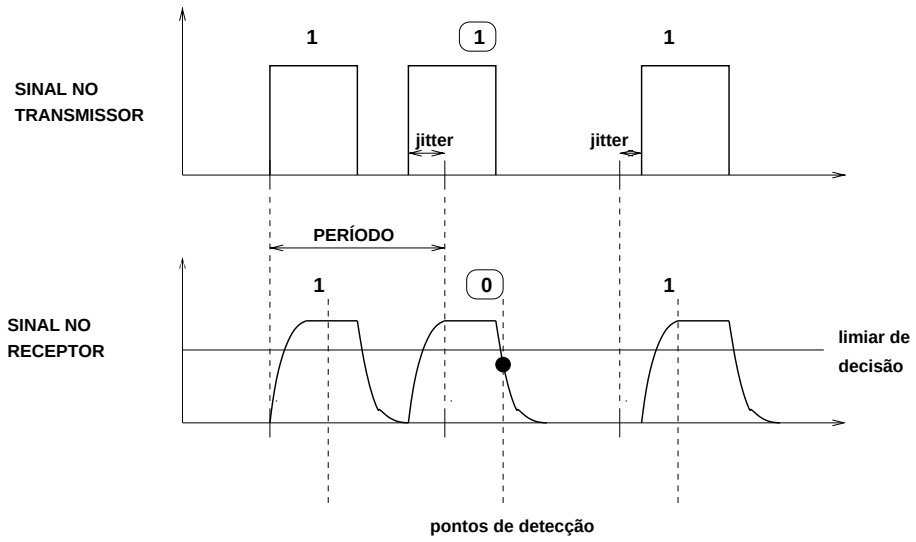

Figura 2.7: Erro de detecção devido ao jitter de fase.

2.7 Capacidade de Transmissão de um Canal

A freqüência com que um sinal pode se propagar no meio de transmissão é denominada *baud*. Um canal de 10 Mbaud permite 10^6 variações do sinal por segundo. A relação entre baud e bits por segundo (bits/baud) depende da forma de codificação do sinal. Um canal com capacidade de N bauds pode transportar N bits/s no caso de sinal digital com codificação ON/OFF ou NRZ. No caso de codificação Manchester, teremos N/2 bits/s em média.

Um canal de N bauds pode transportar um número maior que N de bits/s. É o caso de, por exemplo, utilizar-se um sinal digital com codificação ON/OFF e 4 níveis de tensão representando as ocorrências dos bits 00, 01, 10 e 11. Neste caso temos 2N bits/s. A codificação de múltiplos bits em uma única variação do sinal é rara em redes locais devido a alta taxa de falhas na decodificação do sinal. Quando utilizada (principalmente em conexões de acesso via rede telefônica), emprega-se transmissão analógica com modulação PSK e ASK combinadas. (figura 2.10).

A capacidade de transmissão de um canal passa-baixas é limitada pelo teorema de Nyquist: Um canal livre de ruído com largura de banda B transmitindo um sinal com V diferentes amplitudes possui uma taxa de transmissão T (em bits/s) dada por

$$T \leq 2B \log_2 V$$

Por exemplo, um canal com largura de banda 3 KHz apresenta uma capacidade máxima de 6 Kbits/s caso sejam empregadas duas amplitudades (modulação ASK) para codificar os níveis 0 e 1. Intuitivamente, o limite de Nyquist se deve a filtragem de freqüências altas pelo canal tornando inútil amostragens com taxa maior que 2B.

Devido a presença das fontes de distorção descritas acima, o limite teórico de Nyquist nunca é atingido na prática. A interferência entre símbolos causadas pelas indutâncias e capacitâncias ao longo do meio é um fator preponderante na limitação da taxa de transmissão de um canal elétrico.

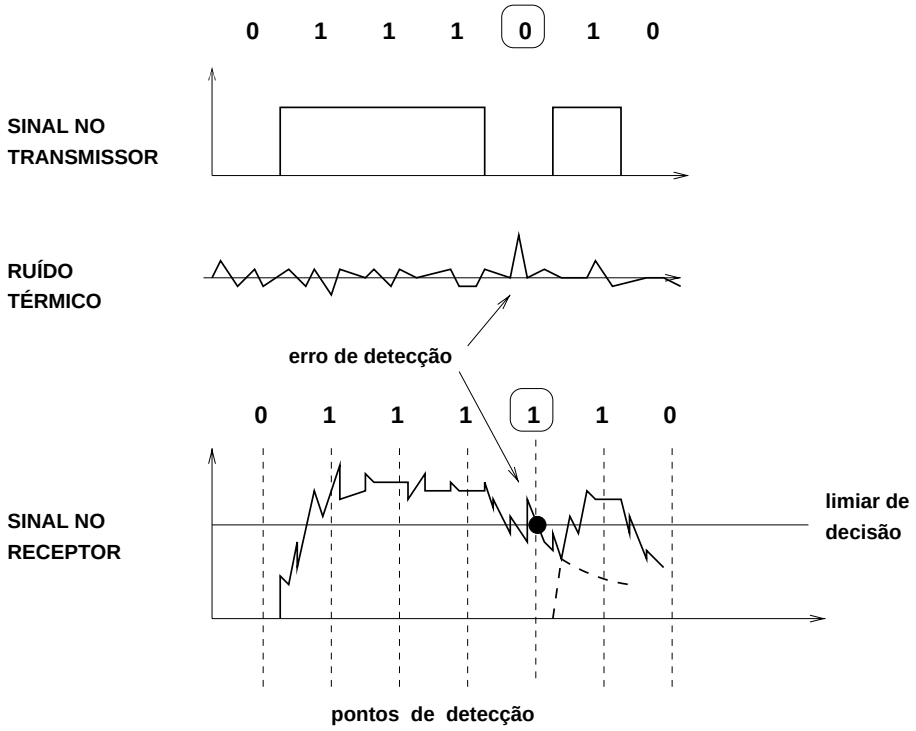

Figura 2.8: Erro de detecção devido ao ruído térmico.

Em redes de computadores baseadas em canais elétricos, taxas da ordem de 100 Mbits/s são típicas. Em redes baseadas em fibra ótica, taxas entre 1 e 10 Gbits/s são típicas.

2.8 Meios de Transmissão

2.8.1 Par Trançado Metálico

Um par[2] trançado constitui-se de fios enrolados de forma helicoidal. Esta forma evita que os fios assumam características de uma antena, o que os tornaria susceptíveis a interferências eletromagnéticas, bem como minimizam a componente indutiva da impedância. A componente resistiva da impedância sofre o chamado *efeito pelicular*, segundo o qual a corrente elétrica tende a se concentrar nas bordas exteriores do condutor, aumentando sua resistência efetiva.

Pares trançados são utilizados tanto para transmissão de sinais analógicos (em redes telefônicas), quanto digitais (em redes de computadores). Este meio de transmissão tem como atrativo o baixo custo e a facilidade de instalação, aproveitando-se, em muitos casos, a própria infra-estruturas telefônica existente (canaletas, caixas de passagem, etc.).

A freqüência máxima de transmissão depende do comprimento e da espessura dos fios, o que em última instância dita a impedância elétrica do par. Para longas distâncias (quilomet-

[2]O termo *par* é oriundo da telefonia onde apenas dois fios são empregados. Em redes de computadores, emprega-se 8 fios por cabo.

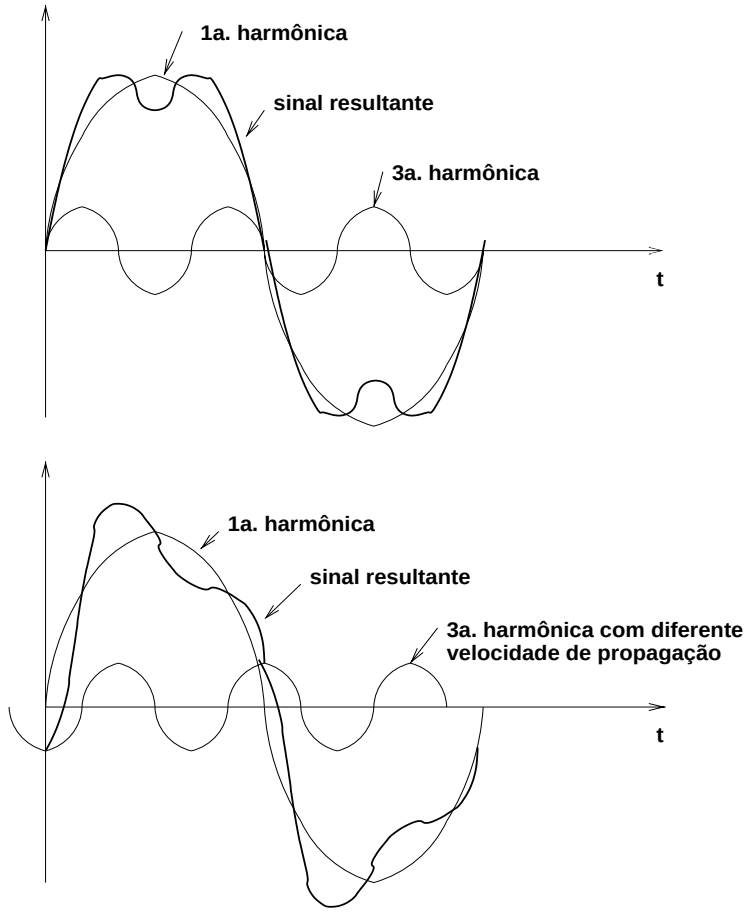

Figura 2.9: Distorção devido a variação da velocidade de propagação das harmônicas com a freqüência.

ros) a taxa de transmissão não ultrapassa 20 Kbits/s, podendo atingir 100 Mbits/s em comprimentos de até 100 metros.

2.8.2 Cabo Coaxial

É composto de um condutor cilíndrico isolado envolto por uma malha de cobre e uma capa plástica de proteção (figura 2.11). A blindagem forma uma proteção eletrostática ao condutor central tornando o cabo mais imune a interferências eletromagnéticas. Sua forma de construção minimiza as perdas em altas freqüências (efeito pelicular e irradiação). Entretanto, sua estrutura assimétrica contribui para a atenuação imposta à amplitude do sinal. O cabo coaxial foi suplantado pelo par trançado metálico em curtas distância e pela fibra ótica em longas distâncias. Exceto em situações muito particulares[3], este meio de transmissão não é mais empregado em redes de computadores.

[3]Por exemplo, em acessos através de rede de TV a cabo.

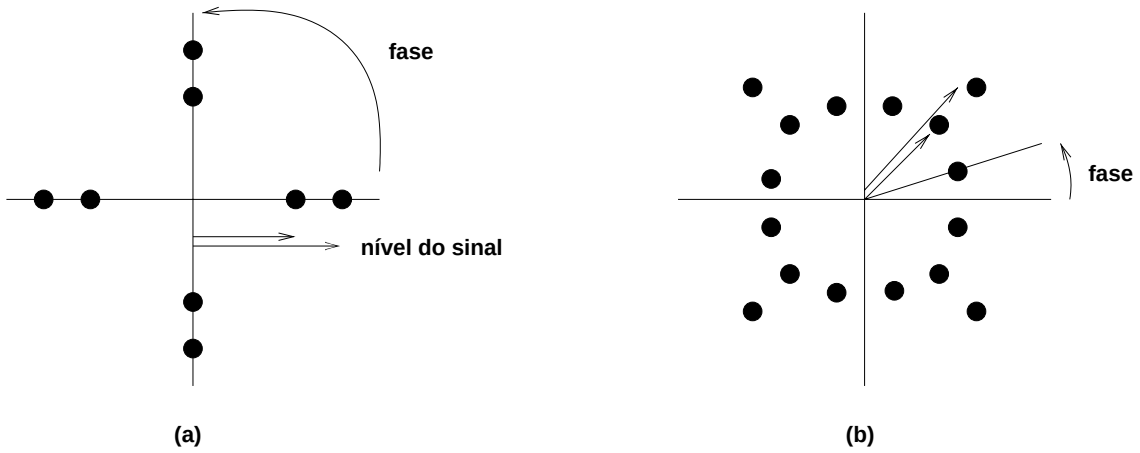

Figura 2.10: Modulações PSK e ASK combinadas para 3 bits/baud (a) e 4 bits/baud (b).

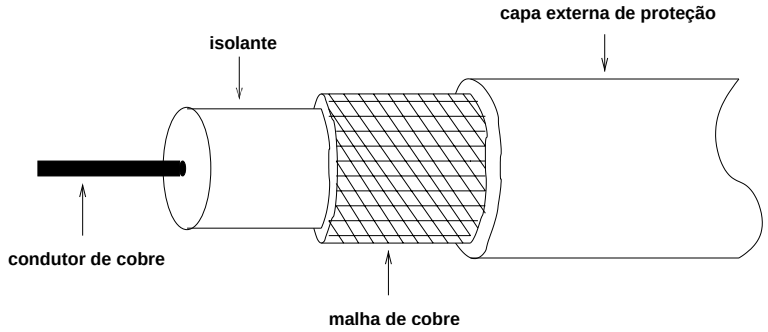

Figura 2.11: Cabo coaxial de cobre.

2.8.3 Fibra Ótica

A fibra ótica é composta de um núcleo de sílica envolto por uma casca também de sílica, tudo protegido por uma capa plástica. O núcleo e a casca apresentam índices de refração distintos, apesar de construídos de materiais similares. A tecnologia mais comum é a chamada fibra *multimodo* onde a luz é mantida no núcleo por reflexão na casca (figura 2.12). Fibras multimodo possuem diâmetros entre 50 e 200 μm. Atenuações de 1 a 5 dB por quiilometro na potência do sinal ótico são típicas.

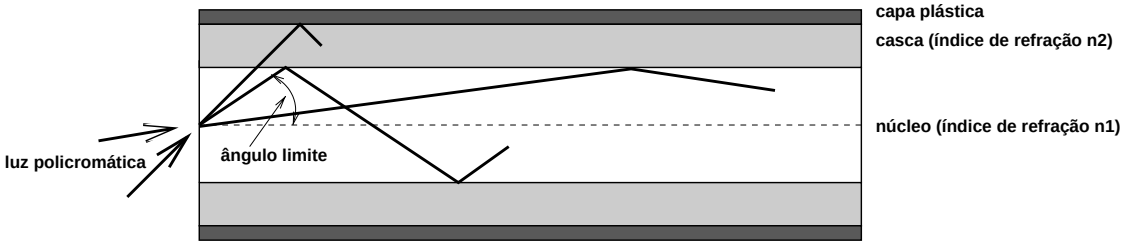

Figura 2.12: Fibra ótica multimodo.

O sinal ótico consite de luz policromática de comprimento de onda centrado em $0.8\mu m$.

O sinal é produzido por diodos LED e captado por fotodetetores, sendo totalmente imune a interferências eletromagnéticas.

As fibras óticas são de difícil instalação (curvaturas devem obedecer raio mínimo, cortes e instalação de conectores exige ferramentas especiais, etc.) A conexão de um host em uma rede de fibra ótica é um processo complicado. O sinal ótico é convertido em um sinal elétrico correspondente, passado ao computador que, quando for o caso, o retransmite empregando o processo inverso. Essa regeneração do sinal coopera para o aumento da distância da rede (figura 2.13).

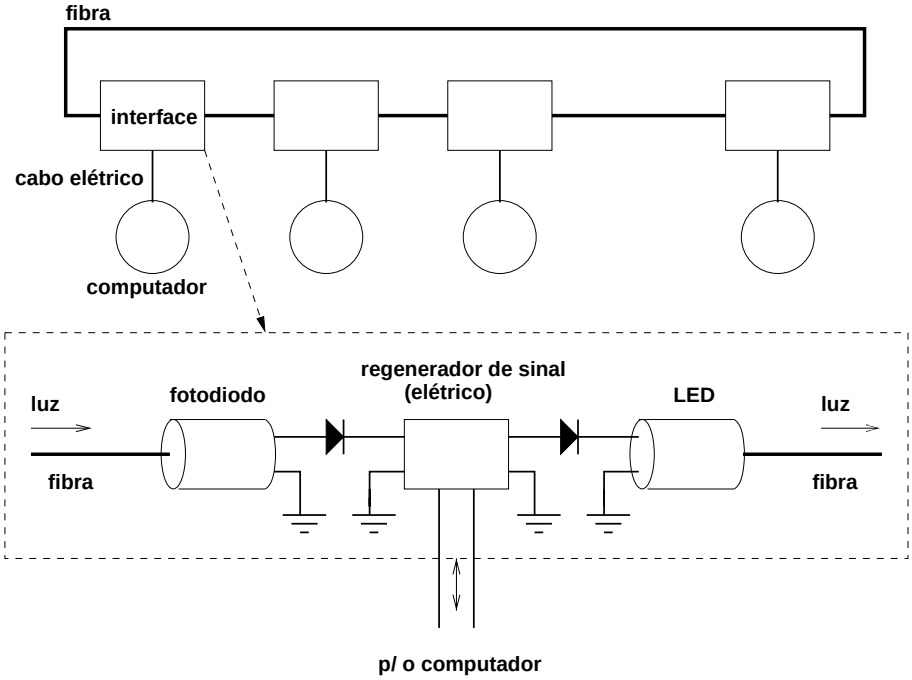

Figura 2.13: Rede de fibra ótica em anel com repetidores ativos.

Redes baseadas em fibra ótica já operam na faixa de Gigabit/s. Percursos de longas distâncias necessitam fibras monomodo (diâmetros de 5 a 10 μm) e luz monocromática produzida por diodos laser.

2.9 Padrões da Camada Física

No caso de redes públicas, um padrão da camada física deve especificar a interconexão do *equipamento terminal de dados* (DTE: Data Terminal Equipment) ao *equipamento de comunicação de dados* (DCE: Data Communication Equipment). O DTE é tipicamente um host, mas pode ser também um dispositivo de entrada/saída como terminal ou impressora. O DCE é o equipamento de conexão à rede pública (tipicamente um modem[4] ligado a um equipamento par localizado no provedor através de uma conexão telefônica, de rádio, de

[4]Modulador/demodulador.

fibra ótica, etc.). A conexão DTE-DCE pode se dar através de cabo, rádio, fibra ótica, etc., e deve especificar:

- o número e função dos fios presentes no cabo bem como conectores e pinagem;
- o padrão de codificação de sinais (exemplo: ITU G.703)
- os limites físicos e condições de instalação tais como distância e curvatura máximas;
- as velocidades máximas de operação (bits/s).

No caso de redes locais, um padrão de camada física deve especificar a interconexão do host ou equipamento de entrada/saída (impressora, por exemplo) ao equipamento de chaveamento (repetidor ou chave). Atualmente, o par trançado metálico operando na faixa de 100 a 1000 Mbits/s é o meio mais utilizado. A especificação deve considerar os mesmos itens da conexão DTE-DCE no caso das redes públicas. A figura 2.14 ilustra o escopo dos padrões da camada física para as redes públicas e locais.

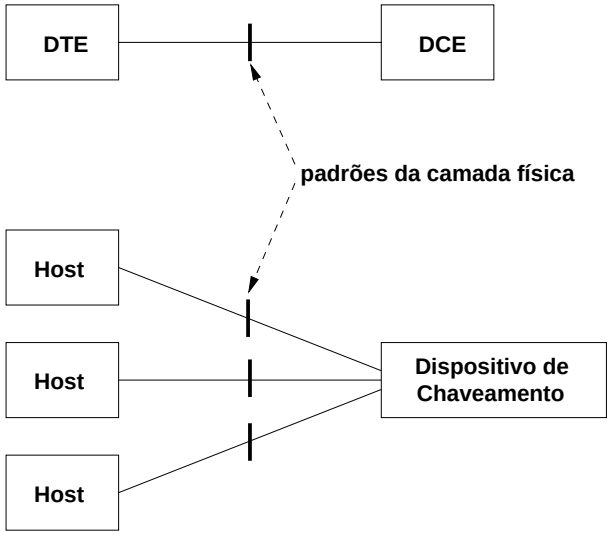

Figura 2.14: Escopo dos padrões da camada física para as redes públicas (acima) e locais (abaixo).

2.10 Problemas

1. Quais os motivos de se empregar esquemas de codificação diferente do ON/OFF?
2. Desenhe a forma de onda nos códigos Manchester e Manchester Diferencial do sinal composto dos bits 0001110101.
3. Diz-se que o código Manchester colabora para a manutenção do sincronismo entre o emissor e o receptor de um sinal. Comente esta afirmação.

4. Quais as formas de se modular um sinal digital?
5. Qual a taxa de transmissão de um canal de 6 MHz utilizando-se modulação PSK com 4 avanços de fases distintos?
6. O que é interferência entre símbolos e jitter de fase e quais os seus efeitos na transmissão de sinais digitais?
7. Em que situações são utilizados par trançado metálico e fibra ótica?
8. Por que a grande maioria das redes baseadas em fibra ótica apresentam topologias em anel?
9. Tipicamente a velocidade de acesso às redes públicas é inferior à velocidade de uma rede local. Por que?
10. Pesquise as características do padrão de camada física 100-Base T empregado nas redes Ethernet.