

Capítulo 3

Transmissão de Informação

A transmissão de informação através de sistemas de comunicação pressupõe a passagem de sinais através dos meios físicos de comunicação que compõem as redes. As propriedades físicas de meios de transmissão e as características dos sinais transmitidos apresentam uma série de questões tecnológicas que influenciam na construção e no projeto de redes de computadores. Neste capítulo, apresentaremos os principais conceitos envolvidos na codificação e transmissão de informação.

3.1 - Informação e Sinal

O processo de comunicação envolve a transmissão de informação de um ponto a outro através de uma sucessão de processos, a saber:

1. A geração de uma idéia, padrão ou imagem na origem.
2. A descrição dessa idéia, com uma certa medida de precisão, por um conjunto de símbolos.
3. A codificação desses símbolos em uma forma propícia à transmissão em um meio físico disponível.
4. A transmissão desses símbolos codificados ao destino.
5. A decodificação e reprodução dos símbolos.

41

6. A recriação da idéia transmitida — com uma possível degradação de qualidade — pelo destinatário.

A geração de idéias ou imagens na origem do processo representa a produção de informação na sua forma mais pura ou fundamental. A concretização dessa informação em computadores digitais, por exemplo, corresponde a um conjunto de dados, eletrônica ou magneticamente armazenados.

O processo de codificação dos símbolos que descrevem a idéia, em uma forma propícia para a transmissão é o processo pelo qual o remetente produz uma *mensagem*, utilizando-se de uma *linguagem*, que poderá então ser transmitida e decodificada pelo receptor.

A degradação de qualidade mencionada no item 6 do processo pode ser ocasionada pelas diversas imperfeições existentes e por ventura presentes no sistema.

Comunicação é o ato de transmitir informações. Ao transmitir informações esperamos preservar seu significado, recuperar seu entendimento para permitir a sua manipulação. Um processo de comunicação admite a existência de um código ou linguagem capaz de representar informações através de símbolos compreensíveis para as partes envolvidas. A linguagem verbal é certamente a mais conhecida e utilizada pelo homem.

Quando conversamos, participamos de um processo contínuo de conversão de nossas idéias em mensagens numa linguagem de comunicação verbal, que pode ser transmitida através de sinais acústicos com a ajuda das cordas vocais. Os sistemas de comunicação tratados neste livro, por outro lado, se utilizam, em geral, de sinais ou ondas eletromagnéticas que trafegam através de meios físicos de transmissão.

Sinais nada mais são do que ondas que se propagam através de algum meio físico, seja ele o ar, um par de fios telefônicos etc. Os sinais podem possuir, por exemplo, amplitude que varia ao longo do tempo correspondendo à codificação da informação transmitida. Sinais podem, assim, ser representados como uma função do tempo.

O contexto no qual empregamos os termos sinal e informação é que os diferenciam. *Informações* estão, em geral, associadas às idéias ou aos dados manipulados pelos agentes que as criam, manipulam e processam. *Sinais*, por outro lado, correspondem à materialização específica dessas informações utilizada no momento da transmissão.

3.2 - Os Termos Analógico e Digital

Os termos *analógico* e *digital* correspondem, de certa maneira, à variação *contínua* e *discreta* respectivamente. Esses termos são freqüentemente utilizados no contexto de comunicação de dados para qualificar tanto a natureza das informações quanto a característica dos sinais utilizados para a transmissão através de meios físicos.

Computadores, por exemplo, são equipamentos que armazenam, processam e codificam informações em bits que correspondem a dois níveis *discretos* de tensão ou corrente, representando os valores lógicos "0" ou "1". Chama-se esse tipo de informação de *digital*. Já informações geradas por fontes sonoras apresentam variações *contínuas* de amplitude, constituinto-se no tipo de informação que comumente denominamos de *analogica*.

De forma análoga a que se procedeu a respeito da natureza da informação, podemos classificar em dois os tipos de sinais gerados para transmissão: sinais *análogicos* e sinais *digitais*. Sinais analógicos variam continuamente com o tempo, como pode ser observado na Figura 3.1.



Figura 3.1: Sinal analógico.

Já um sinal digital caracteriza-se pela presença de pulsos nos quais a amplitude é fixa, como apresentado na Figura 3.2. O sinal é construído através de uma sequência de intervalos de tamanho fixo iguais a T segundos, chamados *intervalos de sinalização*, durante os quais a amplitude do sinal permanece fixa, caracterizando um dos símbolos digitais transmitidos.

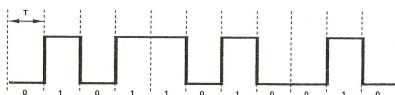


Figura 3.2: Sinal digital.

42

43

É importante que se entenda que qualquer tipo de informação (seja analógica ou digital) pode ser transmitida através de um sinal analógico ou digital. Um sinal de voz analógico, por exemplo, pode ser amostrado, quantizado e o resultado dessa quantização, codificado em um sinal digital para transmissão. A transmissão de informação digital através de sinais analógicos também é possível; técnicas de modulação transformam sinais digitais em sinais que apresentam variação contínua de amplitude.

Em computadores digitais, o bit é a unidade de informação e pode ser univocamente mapeado na amplitude do sinal digital da Figura 3.2. Entretanto, o número de níveis utilizado em sinais digitais não necessariamente precisa se restringir a dois. Outras formas possíveis de codificação de sinais digitais podem ser obtidas através da atribuição de mais de um bit a cada nível de amplitude, casos em que o número de níveis possível não será mais apenas dois. Ao se transmitir dois bits por nível, por exemplo, necessita-se de quatro níveis para expressar todas as possíveis sequências de dois bits; tem-se o chamado "dibit". A Figura 3.3 apresenta um exemplo de sinal digital "dibit". Pode-se ter esquemas com três ("tribit") ou mais bits por nível de amplitude. No caso de "tribits", o número de níveis necessário será de oito. De uma forma mais geral, para se codificar n bits em um nível de amplitude são necessários 2^n níveis diferentes. Ou, equivalente, se a sinalização no meio se utiliza de L níveis (onde L é uma potência inteira de 2), então o número de bits codificados por nível é de $\log_2 L$ bits.

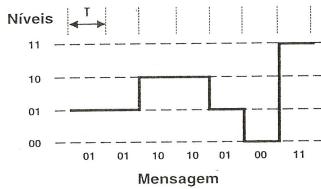


Figura 3.3: Dibit.

Devemos notar que a sinalização em termos do *número de intervalos de sinalização por segundo*, pode ser diferente do número de bits por segundo (bps). No caso "dibit", cada intervalo de sinalização por segundo corresponde a 2 bps. O número de intervalos de sinalização por segundo de um

sinal digital é o número de *bauds* deste sinal. Se em cada nível de tensão codificam-se $\log_2 L$ bits, então

$$1 \text{ baud} = \log_2 L \text{ bps}$$

3.3 - Banda Passante

Ainda no século XIX, um famoso matemático francês chamado Jean Fourier provou que qualquer sinal periódico, expresso como uma função do tempo $g(t)$, com período T_0 , pode ser considerado como uma soma (possivelmente infinita) de senos e cossenos de senos e cossenos de diversas freqüências. A essa soma, dá-se o nome de *Série de Fourier* [Fourier 78], que pode ser representada como:

$$g(t) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(2\pi nft) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos(2\pi nft)$$

A freqüência $f = 1/T_0$ é chamada *freqüência fundamental* do sinal. Juntamente com o sinal de freqüência fundamental, os sinais nas outras freqüências (múltiplas inteiros da freqüência fundamental f) presentes na soma formam as *componentes* do sinal $g(t)$. Assim, um sinal com período T_0 tem componentes de freqüências 0, f , $2f$, $3f$, e assim por diante, onde f é a freqüência fundamental. Cada componente é um *harmônico* do sinal com as respectivas amplitudes a_n e b_n , e freqüências nf para o seno e o cosseno. Costumamos nos referir a um harmônico pela sua posição na soma; por exemplo: primeiro harmônico, segundo harmônico, n -ésimo harmônico etc.

A representação de um sinal periódico através da série de Fourier é o equivalente à apresentação dos seus vários harmônicos. Em outras palavras, um sinal periódico $g(t)$ sempre pode ser descrito de duas formas equivalentes: (1) através de uma representação no *domínio do tempo*, onde a função $g(t)$ é definida como uma função do tempo t , e (2) uma representação no *domínio da freqüência*, onde o sinal é definido em termos de suas componentes. Apresentar as componentes de freqüências de um sinal corresponde a apresentar, para cada freqüência, as amplitudes a_n e b_n correspondentes, ou, em outras palavras, o seu *espectro*.

Os valores dos coeficientes a_n , b_n e a_0 da série de Fourier podem ser calculados através das seguintes fórmulas:

$$a_n = \frac{2}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} g(t) \sin(2\pi nft) dt$$

$$G(f) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) e^{-j2\pi ft} dt$$

A transformada inversa da função $G(f)$ é a própria função $g(t)$, que pode ser obtida da primeira através da seguinte fórmula:

$$g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} G(f) e^{j2\pi ft} df$$

Denomina-se *banda passante* de um sinal o intervalo de freqüências que compõem este sinal. A largura de banda desse sinal é o tamanho de sua banda passante (ou seja, a diferença entre a maior e a menor freqüência que compõem o sinal).

A Figura 3.4 apresenta um pulso retangular como uma função $s(t)$ do tempo e o respectivo *espectro de freqüências* $S(f)$ (em módulo) desse sinal obtido através da transformada de Fourier. Observa-se que um pulso retangular (unidade básica para transmissão de sinais digitais em sua forma original) é um sinal com largura de banda infinita, cujas componentes de maior importância situam-se em torno de 0 Hz.

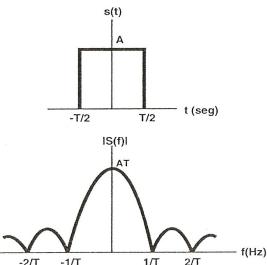


Figura 3.4: Espectro de freqüências de um pulso retangular.

Nenhum meio de transmissão é capaz de transmitir sinais sem que hajam perdas de energia durante o processo. Perdas de energia significam reduções na amplitude de sinais componentes. Se todos os sinais componentes

fossem igualmente reduzidos em amplitude, o sinal resultante seria todo reduzido em amplitude, mas não distorcido. Infelizmente, a característica dos meios de transmissão é a de provocar perdas nos diversos sinais componentes em diferentes proporções, provocando a distorção do sinal resultante transmitido. A proporção da perda para cada frequência do espectro é uma característica do meio e pode ser descrita através de um gráfico (*frequências X ganho*). Desta forma, o meio de transmissão atua como um filtro sobre o sinal, que sofrerá uma perda em cada uma de suas componentes de acordo com a curva característica do ganho daquele meio físico, ocasionando distorções no sinal resultante. Essas distorções serão tão maiores quanto maiores forem as perdas nas frequências mais significativas do sinal original. No caso de um pulso retangular, a distorção será maior quanto maiores forem as perdas provocadas pelo meio nas componentes de baixa frequência (próximas a 0 Hz).

Em geral, a curva de ganho em meios de transmissão corresponde à característica de *filtros passa-faixa*, nos quais uma determinada banda é praticamente preservada (isto é, ganho igual a aproximadamente 1) enquanto que sinais componentes de frequências exteriores a essa banda são praticamente eliminados durante a transmissão. Chamaremos *banda passante do meio físico* àquela faixa de frequências que permanece praticamente preservada pelo meio. Considere, como exemplo, a curva característica da linha de transmissão apresentada na Figura 3.5. A banda passante desta linha vai de, aproximadamente, 300 a 3300 Hz, o que representa uma largura de banda de aproximadamente 3 KHz.

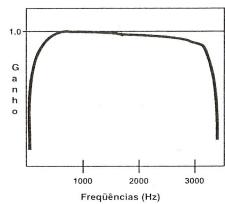


Figura 3.5: Curva característica do ganho para uma linha de transmissão.

Vejamos agora o que acontece na transmissão do conjunto de bits "01100010" através de um meio com banda passante limitada [Tanenbaum

89]. Utilizaremos, para simplificar, a série de Fourier; em outras palavras, estamos admitindo que o sinal se repete ao longo do tempo. A análise de Fourier do sinal leva aos seguintes coeficientes:

$$a_n = \frac{1}{\pi n} [\cos(\pi n/4) - \cos(3\pi n/4) + \cos(6\pi n/4) - \cos(7\pi n/4)]$$

$$b_n = \frac{1}{\pi n} [\sin(3\pi n/4) - \sin(\pi n/4) + \sin(7\pi n/4) - \sin(6\pi n/4)]$$

$$a_0 = \frac{3}{8}$$

A Figura 3.6 apresenta o sinal resultante da transmissão desse conjunto de bits ("01100010") através de linhas com banda passante variando de 0 a W Hz. Quanto maior é W, mais harmônicos são passados através do meio possibilitando que o sinal recebido se aproxime mais do sinal original (que corresponde ao caso ideal onde todos os harmônicos — até o infinito — estão presentes).

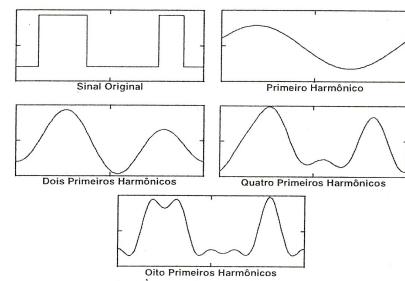


Figura 3.6: Somas dos primeiros harmônicos para um sinal digital "01100010".

Percebe-se que, à medida que a largura de banda do meio vai se tornando mais estreita, atingem-se situações onde a recepção correta do sinal transmitido se torna impossível (como no caso da transmissão de apenas um ou dois harmônicos). Porém, percebe-se também que com oito harmônicos é bem possível que um circuito receptor consiga recuperar a informação refer-

rente à sequência de bits original, o que significa dizer que, apesar das distorções ocasionadas pela banda passante limitada do meio físico, existe uma banda mínima a partir da qual é possível recuperar a informação sem erros.

É importante perceber que as características de distorção são válidas também quando analisam-se sinais análogicos. Conforme a banda passante do meio filtra frequências significativas de um sinal de voz analógico, por exemplo, o processo de transmissão deste sinal provocará distorções que poderão prejudicar a qualidade ou mesmo o entendimento dos interlocutores em uma conversação. No caso analógico, denomina-se *banda passante necessária de um sinal* a largura mínima necessária na banda passante de um meio físico de forma a garantir uma qualidade mínima no recebimento deste sinal. Estudos e análises de Fourier sobre o sinal de voz mostraram que uma banda de 3 KHz é o suficiente para garantir um bom entendimento com qualidade aceitável.

No caso de transmissão de sinais digitais, torna-se interessante definir a banda passante necessária como a largura de banda mínima capaz de garantir que o receptor ainda recupere a informação digital originalmente transmitida.

Devemos observar que a largura de banda do sinal digital depende do tamanho T dos pulsos (o intervalo de sinalização); em outras palavras: depende da velocidade em bits por segundo (bps) do sinal. A pergunta a se fazer é: qual a banda passante W necessária para se transmitir um sinal digital de I/T bps? Ou, de forma inversa: quantos bits por segundo podemos transmitir em um meio físico cuja largura de banda é de W Hz? A próxima seção é dedicada à apresentação dos resultados que permitem inferir a *taxa de transmissão máxima de um canal*, dadas algumas características do canal em questão, como a sua banda passante e a *razão sinal-ruído*.

3.4 - Taxa de Transmissão Máxima de um Canal

Em 1928, H. Nyquist formulou uma equação que define a taxa de transmissão máxima para um canal de banda passante limitada e imune a ruídos [Nyquist 28]. Como veremos no decorrer desta seção, outras distorções podem ocorrer durante a transmissão de um sinal por um meio físico devido a fatores como atenuação, ruídos etc. Alguns anos mais tarde, em 1948, Claude Shannon estendeu os resultados de Nyquist para o caso de um canal sujeito a ruído térmico [Shannon 48, Shannon 49].

3.4.1 - Teorema de Nyquist

Nyquist provou que, se um sinal arbitrário é transmitido através de um canal de largura de banda W Hz, o sinal resultante da filtragem pode ser completamente reconstruído pelo receptor através da amostragem do sinal transmitido, a uma frequência igual a no mínimo 2W vezes por segundo [Nyquist 28]. Nyquist demonstrou que esta é a frequência mínima de amostragem necessária e, ao mesmo tempo, amostrar esse sinal a uma frequência maior que 2W é inútil já que as frequências componentes que seriam recuperadas por uma tal amostragem já não existem no sinal devido à filtragem do canal. Para sinais digitais, isso corresponde a dizer que o número de transições de um nível de amplitude para outro no sinal original não pode ser maior do que 2W vezes por segundo. Em outras palavras, através de um canal de largura de banda igual a W Hz, pode-se transmitir um sinal digital de no máximo 2W bauds. Como $I \text{ band} = \log_2 L \text{ bps}$ (onde L é o número de níveis utilizado na codificação), então a capacidade C do canal na ausência de ruído é dada por

$$C = 2W \log_2 L \text{ bps}$$

Essa é a fórmula obtida por Nyquist para a capacidade máxima de um canal dada a sua banda passante, na ausência de ruído.

3.4.2 - Fontes de Distorção de Sinais em Transmissão

Além dos efeitos de distorção dos sinais transmitidos oriundos da banda passante limitada do meio físico, outros fatores causarão distorções nos sinais durante a transmissão. Entre eles encontramos: os *ruidos* presentes durante a transmissão, a *atenuação* e os *ecos*. Passemos a analisar cada um desses fatores, seus principais efeitos e a forma de contorná-los.

3.4.2.1 - Ruidos

Em qualquer transmissão, o sinal recebido consiste no sinal transmitido modificado por várias distorções impostas pelas características do meio físico adicionadas de outras distorções inseridas durante a transmissão devido à interferência de sinais indesejáveis denominados ruidos. O ruído é um dos maiores limitantes do desempenho de sistemas de comunicação.

A quantidade de ruído presente numa transmissão é medida em termos da razão entre a potência do sinal e a potência do ruído, denominada *razão sinal-ruído*. Se representarmos a potência do sinal por S e a potência do ruído por N, a razão sinal-ruído é dada por S/N . É muito comum utilizar-se, ao

inverso desta razão diretamente, o valor $10 \log_{10}(S/N)$. O resultado obtido é uma medida da razão sinal-ruído em uma unidade denominada *decibel (dB)*. Uma razão de 10 corresponde a 10 dB; uma razão de 100 corresponde 20 dB; uma razão de 1.000 corresponde a 30 dB e assim por diante.

Ruidos podem ser classificados em quatro tipos: ruído térmico, ruído de intermodulação, crosstalk e ruído impulsivo.

O *ruído térmico* é provocado pela agitação dos elétrons nos condutores, estando, portanto, presente em todos os dispositivos eletrônicos e meios de transmissão.

O ruído térmico é uniformemente distribuído em todas as freqüências do espectro (sendo por isto freqüentemente citado como *ruído branco*) e sua quantidade é função da temperatura.

Quando sinais de diferentes freqüências compartilham um mesmo meio físico (através de multiplexação na freqüência — que veremos mais adiante neste capítulo) pode-se obter um ruído denominado de *ruído de intermodulação*. A intermodulação pode causar a produção de sinais em uma faixa de freqüências, que poderão perturbar a transmissão de outro sinal naquela mesma faixa. Este mal funcionamento acontece devido a defeitos em componentes do sistema ou devido a sinais com potência muito alta.

Crosstalk é um ruído bastante comum em sistemas telefônicos. Quem de nós ainda não teve a experiência de ser perturbado, durante uma conversação telefônica, por uma conversação travada por terceiros? É o fenômeno que comumente chamamos de "linha cruzada". Este efeito é provocado por uma interferência indesejável entre condutores próximos que induzem sinais entre si.

Os tipos de ruído descritos até aqui têm magnitudes e características previsíveis de forma que é possível projetar sistemas de comunicação que se ajustem a essas características. O *ruído impulsivo*, porém, é não contínuo e consiste em pulsos irregulares e com grandes amplitudes, sendo de prevenção difícil. Tais ruídos podem ser provocados por diversas fontes, incluindo distúrbios elétricos externos, falhas nos equipamentos etc.

O ruído impulsivo é, em geral, pouco danoso em uma transmissão analógica. Em transmissão de voz, por exemplo, pequenos intervalos onde o sinal é corrompido não chegam a prejudicar a inteligibilidade dos interlocutores. Na transmissão digital, o ruído impulsivo é a maior causa de erros de comunicação.

3.4.2.2 - Lei de Shannon

Vinte anos depois de Nyquist, Shannon provou, também matematicamente, que um canal tem uma capacidade máxima limitada. A parte mais interessante do seu trabalho discute canais na presença de ruído térmico.

O principal resultado de Shannon (conhecido como a *Lei de Shannon* [Shannon 49]) afirma que a capacidade máxima C de um canal (em bps) cuja largura de banda é W Hz, e cuja a razão sinal-ruído é S/N , é dada por:

$$C = W \log_2(1 + S/N)$$

Um canal de 3.000 Hz, por exemplo, com uma razão sinal-ruído de 30 dB (parâmetros típicos de uma linha telefônica) não poderá, em hipótese alguma, transmitir a uma taxa maior do que 30.000 bps, não importando quantos níveis de sinal se utilizem ou qual a freqüência de sinalização. É importante notar que este é um limite máximo teórico, e que, na prática, é difícil atingir mesmo se aproximar deste valor. Muito embora vários esquemas tenham sido propostos, a lei de Shannon constitui-se em um limite máximo intransponível.

3.4.2.3 - Atenuação

A potência de um sinal cai com a distância, em qualquer meio físico. Essa queda, ou *atenuação*, é, em geral, logarítmica e por isso é geralmente expressa em um número constante de decibéis por unidade de comprimento. A atenuação se dá devido a perdas de energia por calor e por radiação. Em ambos os casos, quanto maiores as freqüências transmitidas, maiores as perdas. A distorção por atenuação é um problema facilmente contornado em transmissão digital através da colocação de repetidores que podem regenerar totalmente o sinal original, desde que a atenuação não ultrapasse um determinado valor máximo. Para tanto, o espaçamento dos repetidores não deve exceder um determinado limite, que varia de acordo com a característica de atenuação do meio físico utilizado.

3.4.2.4 - Ecos

Ecos em linhas de transmissão causam efeitos similares ao ruído. Toda vez que há uma mudança de impedância numa linha, sinais serão refletidos e voltarão por esta linha, podendo corromper os sinais que estão sendo transmitidos.

Precauções para que a impedância de uma linha de transmissão não seja alterada podem ser tomadas para evitar a reflexão dos sinais. A utiliza-

ção de terminadores e transceptores de alta impedância em redes em barra foi exemplificada no Capítulo 2 e será novamente tratada no Capítulo 4.

Em sistemas telefônicos, os ecos podem ser bastante desagradáveis quando percebidos em intervalos maiores que dezenas de milissegundos. Nesses sistemas é comum a utilização de canceladores de eco nos pontos onde é inevitável a alteração de impedância.

3.5 - Multiplexação e Modulação

Sempre que a banda passante de um meio físico for maior ou igual à banda passante necessária para um sinal, podemos utilizar este meio para a transmissão do sinal. Na prática, a banda passante necessária para um sinal é, em geral, bem menor do que a banda passante dos meios físicos disponíveis, como mostra a Figura 3.7.



Figura 3.7: Meio físico com banda passante maior do que a banda passante necessária para o sinal.

A pergunta natural a se fazer neste momento é: não seria possível aproveitar a banda passante extra disponível para a transmissão de outros sinais? Mais especificamente, dados, por exemplo, três sinais (C_0 , C_1 , C_2) com a banda passante necessária indicada na Figura 3.8, não seria possível transmiti-los simultaneamente através de um mesmo meio físico, como apontado nesta mesma figura? A resposta a essa pergunta é sim, e a técnica que permite a transmissão de mais de um sinal em um mesmo meio físico é denominada *multiplexação*. Existem duas formas básicas de multiplexação: a *multiplexação na freqüência* (Frequency Division Multiplexing — FDM) e a *multiplexação no tempo* (Time Division Multiplexing — TDM).



Figura 3.8: Multiplexação na freqüência (FDM).

3.5.1 - Multiplexação na Freqüência

Em primeiro lugar, se passarmos um filtro em cada um dos sinais da Figura 3.8 de forma a preservar somente a faixa relativa à banda passante necessária de cada um deles, teremos dado o primeiro passo para alojar estes três sinais na forma desejada, sem que um sinal interfira no outro. O passo seguinte é deslocar a faixa de freqüências original do segundo e do terceiro sinal de forma que eles passem a ocupar as três faixas disjuntas, sem sobreposição. Felizmente, técnicas que permitem esse deslocamento ou *shift* de freqüências são conhecidas e denominadas *técnicas de modulação*. Dessa forma, os três sinais podem ser transmitidos no meio físico, cada um deles ocupando uma *banda* ou *canal* distinto com tamanho necessário para a sua transmissão. Como os sinais foram previamente filtrados de acordo com a sua banda passante necessária, a informação de cada um deles está preservada e contida naquela faixa de freqüências na qual está sendo transmitido e em nenhum outra.

Considere o exemplo ilustrado na Figura 3.9. Nessa figura, estão representados dois sinais de voz através de seus espectros. Um dos sinais foi modulado e, por isso, deslocado para uma outra faixa de freqüências. Os sinais são passados por filtros de forma a impedir que existam componentes em outras freqüências que não a faixa a eles reservadas, faixas estas de tamanho igual a 4 kHz. Note que mencionamos anteriormente que a banda passante necessária para um sinal de voz tem uma largura de 3 kHz, portanto, 4 kHz é mais do que suficiente para a transmissão desses sinais. Após terem sido filtrados, esses sinais podem trafegar simultaneamente pelo mesmo meio físico.

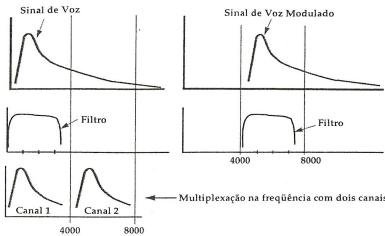


Figura 3.9: Multiplexação na frequência de dois sinais de voz.

Um receptor que deseja recuperar um dos sinais transmitidos numa linha multiplexada na frequência, deverá conhecer a faixa de frequências que está sendo utilizada para a sua transmissão. Dessa forma, ele poderá deslocar o sinal recebido de forma a fazer o sinal desejado ocupar novamente a sua faixa original (de 0 a n Hz). O sinal *demodulado* pode a seguir ser filtrado para conter somente o sinal original. A Figura 3.10 ilustra o processo de transmissão em uma linha multiplexada na frequência. Equipamentos capazes de realizar modulação e demodulação de sinais são denominados MODEMS (Móduladores/DEMóduladores).

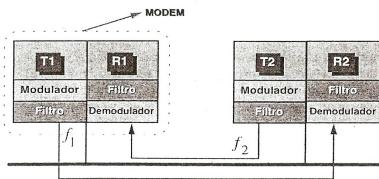


Figura 3.10: Transmissão em uma linha multiplexada na frequência.

3.5.2 - Técnicas de Modulação

Todas as técnicas de modulação envolvem o deslocamento do sinal original, doravante denominado *sinal modulador*, de sua faixa de frequências original para uma outra faixa. O valor desse deslocamento corresponde à frequência de uma onda denominada *portadora*.

Existem três técnicas básicas de modulação:

- Modulação por Amplitude (Amplitude Modulation — AM).
- Modulação por Frequência (Frequency Modulation — FM).
- Modulação por Fase (Phase Modulation — PM).

No caso específico do sinal modulador ser um sinal digital, essas técnicas tomam as seguintes denominações:

- Modulação por Chevamento da Amplitude (Amplitude Shift Keying — ASK).
- Modulação por Chevamento da Frequência (Frequency Shift Keying — FSK).
- Modulação por Chevamento de Fase (Phase Shift Keying — PSK).

A Figura 3.11 ilustra essas técnicas.

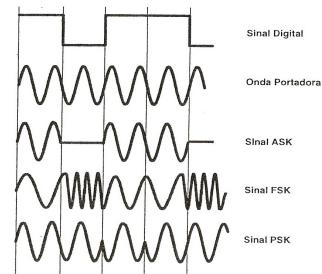


Figura 3.11: Técnicas de modulação.

Na técnica ASK, a amplitude do sinal resultante da modulação varia de acordo com a amplitude do sinal que se quer modular, mantendo-se a frequência da onda portadora.

Na técnica FSK, mantém-se a amplitude da portadora. O que varia é a frequência de acordo com o sinal transmitido.

Por último, na técnica PSK, a transmissão do sinal é identificada por modificações na fase da onda transmitida. Amplitude e frequência da onda portadora são mantidas. O sinal PSK ilustrado na Figura 3.11 corresponde a uma codificação que utiliza uma mudança de fase de 180° em relação ao intervalo anterior caso o bit transmitido seja 1, e nenhuma modificação de fase (ou modificação de 0° , se preferirmos) se o bit for 0.

Vamos abrir um pequeno parêntese para mostrar como um esquema de modulação causa o deslocamento na faixa de frequências de um sinal. Vamos utilizar como exemplo o esquema ASK. O sinal ASK pode ser obtido através da multiplicação do sinal original pela onda portadora.

Recordando, um sinal periódico qualquer pode ser considerado como uma soma dada pela série de Fourier:

$$g(t) = \frac{c_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \cos(2\pi n f t + \theta_n)$$

Efetuar o produto de um sinal por um outro sinal senoidal corresponde a multiplicar cada uma das componentes e, então, efetuar a soma. Vamos denominar cada sinal presente na série de $g_n(t)$, de forma que

$$g_n(t) = c_n \cos(2\pi n f t + \theta_n)$$

Sendo a onda portadora um sinal senoidal simples, com a forma genérica dada por:

$$a(t) = A \cos(2\pi f_a t)$$

O sinal resultante da modulação da componente $g_n(t)$ será:

$$\begin{aligned} m(t) &= a(t) \cdot g_n(t) \\ &= A \cdot c_n \cos(2\pi n f t + \theta_n) \cos(2\pi f_a t) \\ &= \frac{A \cdot c_n}{2} \cos[2\pi(n f + f_a)t + \theta_n] + \frac{A \cdot c_n}{2} \cos[2\pi(n f - f_a)t + \theta_n] \end{aligned}$$

O sinal pode ser, assim, deslocado de f_a e $-f_a$. A Figura 3.12 ilustra esse efeito tomando como exemplo o espectro de um pulso retangular.

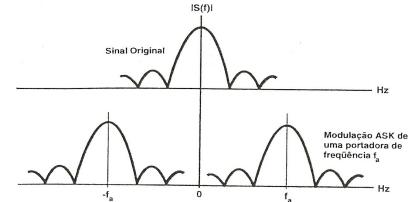


Figura 3.12: Efeito da modulação ASK.

3.5.3 - Sistemas em Banda Larga e em Banda Básica

As técnicas de transmissão estão diretamente relacionadas com as técnicas de multiplexação. Duas técnicas de transmissão são as mais empregadas: a sinalização em banda básica (baseband) e a sinalização em banda larga (broadband).

Na sinalização em banda básica o sinal é simplesmente colocado na rede sem se usar qualquer tipo de modulação, aparecendo diretamente na rede e não como deslocamentos de frequência, fase ou amplitude de uma portadora de alta frequência.

Sinalização em banda básica vem sendo adotada nos projetos de redes por não necessitar de modems e por possibilitar a transmissão em alta velocidade. Para transmissão a longas distâncias certas precauções devem ser tomadas. A técnica também não é adequada a circuitos que estão sujeitos a ruidos, interferências e erros aleatórios. No ambiente restrito das redes locais, contudo, a sinalização em banda básica, em geral, é adequada.

Ao contrário da sinalização em banda básica (também chamada *sinalização digital*) na qual todo o espectro (banda) de frequência do meio é utilizado para produzir o sinal, a sinalização em banda larga (também chamada *sinalização analógica*) realiza a multiplexação em frequência (FDM). Com essa multiplexação o espectro de frequência do meio é dividido em vários canais, cada um podendo suportar diferentes tráfegos. Um caso especial de sistema em banda larga é o sistema de baixo custo que utiliza apenas um canal. Para fazer a distinção entre os dois casos adotaremos a mesma convenção de Stallings [Stallings 85] e nos referiremos a eles como *banda larga*

FDM (FDM broadband) e *banda larga de único canal* (single-channel broadband).

Sinalização em banda larga é geralmente utilizada em redes locais em barra. Sua utilização numa topologia em anel é problemática, pois exigiria que cada repetidor fosse capaz de receber e retransmitir dados nos múltiplos canais. O custo de dispositivos para realização desta tarefa tornaria a rede inviável. Centraremos assim nossa atenção nas redes em barra comum. Nessas redes, pelo menos um dos canais é compartilhado por todas as estações.

Um sistema típico em banda larga é mostrado na Figura 3.13. Como nos sistemas em banda básica, as estações se conectam ao meio através de transceptores. Devido à atenuação, amplificadores devem ser colocados ao longo de todo o cabo. Diferente dos sistemas em banda básica, o meio no sistema em banda larga é unidirecional. Sinais inseridos no meio podem propagar-se em apenas uma direção. A razão primordial disso é que não é viável, do ponto de vista do custo, a construção de amplificadores que passem sinais das várias frequências nas duas direções. Essa característica de unidirecionalidade vai implicar que apenas as estações que estão na direção do fluxo receberão o sinal. Dessa forma, dois caminhos serão necessários. Estes caminhos se juntam em um ponto da rede conhecido como *central repetidora (headend)*. Todas as estações devem transmitir em um dos caminhos na direção da central repetidora — *caminho de transmissão (inbound)*. Os sinais recebidos pela central repetidora são retransmitidos ao longo do segundo caminho — *caminho de retorno (outbound)* — sendo então recebidos pelas estações.

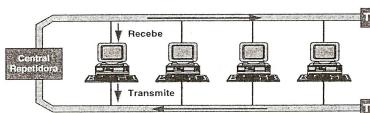


Figura 3.13: Rede em banda larga de cabo duplo.

A configuração da Figura 3.13, conhecida como rede em banda larga de duplo cabo, não é a única possível. A Figura 3.14 apresenta uma configuração com um único cabo, onde os tráfegos de transmissão e de retorno são multiplexados em frequência, de forma que a meia banda inferior do cabo é usada para os canais de retorno, e a meia banda superior, para os canais de transmissão. A central repetidora neste caso contém um dispositivo, conhecido como conversor de frequências, que traduz as frequências de transmissão para a faixa de retorno e vice-versa.

cido como conversor de frequências, para a tradução das frequências de transmissão nas frequências de retorno.

Três divisões de frequência são utilizadas para as configurações em cabo simples. *Sub-split* usa a faixa de 5 a 32 MHz como caminho de retorno e a faixa de 54 a 300/400 MHz como caminho de transmissão. Esse sistema é comumente utilizado pela indústria de TVs a cabo. *Mid-split* usa a faixa de 5 a 102 MHz como caminho de retorno e a faixa de 162 a 300/400 MHz como caminho de transmissão. Ela provê uma divisão mais equitativa da largura de banda do cabo e é mais adequada para redes locais. *Mid-split* foi desenvolvida para cabos de 300 MHz de largura de banda. Cabos de 400 MHz de largura de banda estão hoje disponíveis e tanto *super-split* quanto *equal-split* são utilizadas para um melhor平衡amento das meias bandas. *High-split* usa a faixa de 5 a 174 MHz como caminho de retorno e a faixa de 234 a 300/400 MHz como caminho de transmissão. Alguns fabricantes de equipamentos de TV a cabo apresentam pequenas variações quanto às faixas de frequência, sendo importante a consulta ao vendedor para determinarmos a faixa exata a ser utilizada.

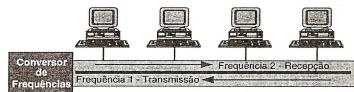


Figura 3.14: Rede em banda larga de cabo único.

A Figura 3.15 apresenta a configuração *mid-split*, onde cada canal contém uma faixa de 6 MHz. Essa configuração é aconselhada pelo padrão IEEE 802.4, conforme veremos no Capítulo 9. Os canais são numerados com a nomenclatura usual de TV a cabos. Para uma rede de 10 Mbps o IEEE 802.4 recomenda o uso dos canais 3' e 4' e os canais P e Q, que são adjacentes, como canais de uso compartilhado.

Sistemas de duplo cabo são mais restritos do ponto de vista do custo. Além do maior custo do hardware envolvido, o esquema requer uma manutenção maior. Além disso, não é fácil controlar a faixa passante e o maior número de portadoras presentes no duplo cabo. Por outro lado, a configuração de duplo cabo fornece uma capacidade duas vezes maior, não requer tradução de frequência na central repetidora e não introduz componentes ativos bidirecionais que reduzem a confiabilidade e podem introduzir interferências devido ao crosstalk [Edholm 83].

| Canal de Retorno | Límite da faixa de frequência (MHz) | Canal de Transmissão | Límite da faixa de frequência (MHz) |
|------------------|-------------------------------------|----------------------|-------------------------------------|
| T 7 | 5,75 | H | 162 |
| T 8 | 11,75 | I | 168 |
| T 9 | 17,75 | J | 174 |
| T 10 | 23,75 | K | 215 |
| T 11 | 29,75 | L | 222 |
| T 12 | 35,75 | M | 238 |
| T 13 | 41,75 | N | 240 |
| T 14 | 47,75 | O | 246 |
| 2' | 53,75 | P | 252 |
| 3' | 59,75 | Q | 258 |
| 4' | 65,75 | R | 264 |
| 4A' | 71,75 | S | 270 |
| 5' | 77,75 | T | 276 |
| 6' | 83,75 | U | 292 |
| FM1' | 89,75 | V | 288 |
| FM2' | 95,75 | W | 294 |
| FM3' | 101,75 | | |

Figura 3.15: Canais de frequência broadband IEEE 802.4.

Já mencionamos em parágrafos anteriores as redes em banda larga de um único canal. Em geral essas redes utilizam a topologia em barra com transmissão bidirecional sem a necessidade de amplificadores (atingem distâncias não muito grandes) e da central repetidora. Nessas redes, as transmissões são geralmente em baixa frequência (alguns MHz), pois assim os sinais terão atenuações menores e poderão chegar a distâncias maiores. Como o cabo é utilizado como um único canal, as saídas dos modems dessas redes não precisam estar confinadas a uma faixa estreita de frequência, sendo estes, portanto, mais simples e de menor custo.

A principal razão para a utilização das redes em banda larga de um único canal é a possibilidade, com um pequeno custo inicial, de instalar uma rede que, mais tarde, caso haja necessidade de expansão, poderá ser trocada por uma rede em banda larga com toda sua capacidade, evitando todo o custo de instalação e fiação, que não é desprezível.

Nas redes em banda larga, cada canal pode ser utilizado para transportar qualquer tipo de sinal, por exemplo, sinais analógicos, como imagem ou voz, ou sinais digitais. Os canais podem ser classificados como dedicados ou chaveados. Tanto os canais dedicados quanto os chaveados podem ser ponto a ponto ou multiponto. Uma das vantagens do uso de múltiplos canais é que cada um deles pode ser utilizado para satisfazer diferentes requisitos.

Nos canais ponto a ponto, uma porção da largura de banda do cabo é reservada para o uso exclusivo de dois terminais, cada um acoplado ao cabo através de modems sintonizados na mesma frequência. Canais ponto a ponto podem ser simplex, half-duplex ou full-duplex conforme os sentidos permi-

tidos de transmissão. Tudo se passa como se existisse uma linha física ligando os dois dispositivos. Esse serviço pode ser usado quando se espera um tráfego de comunicação regular entre os dispositivos. Em canais simplex, apenas um sentido de transmissão é definido no momento da alocação do canal. Canais half-duplex correspondem, tipicamente, à existência de diálogo entre as duas estações. Em canais full-duplex, é necessário multiplexar o próprio canal de forma a permitir a utilização dos dois sentidos de transmissão possíveis. Na grande maioria dos casos, canais ponto a ponto em redes em banda larga são canais simplex.

Cada canal ponto a ponto é denominado um canal dedicado quando é previamente alocado à comunicação dos dois dispositivos, permanecendo a elas alocado por todo o tempo (Figura 3.16).

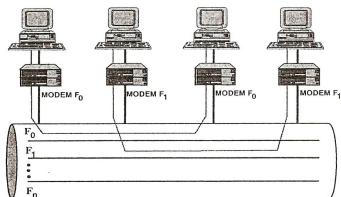


Figura 3.16: Exemplo de dois canais ponto a ponto dedicados.

Canais ponto a ponto chaveados não são preestabelecidos. Os dispositivos são conectados à rede através de modems de frequência variável (frequency-agile modems), capazes de trocar sua frequência de operação através de comando eletrônico (Figura 3.17). Uma estação, ao desejar estabelecer uma conexão, envia um pedido ao controlador, que reserva uma banda de frequência (canal) disponível aos dois dispositivos que entrarão em comunicação. O controlador envia, então, um sinal sintonizando os modems dos dois dispositivos àquela banda de frequência. Uma conexão permanece alocada aos dispositivos até que um deles (ou ambos) resolva desfazê-la. Neste momento, um sinal deve ser enviado ao controlador para informá-lo da disponibilidade do canal, que agora já poderá ser utilizado para atender a outros pedidos de conexão.

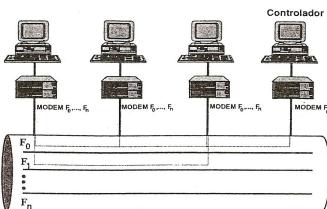


Figura 3.17: Exemplo de canais chaveados, o canal F1 está sendo utilizado.

Uma vez que o custo dos modems de frequência variável cai grandemente conforme diminui-se a taxa de transmissão de dados, taxas típicas em um canal chaveado não passam de 56 Kbps. Essa técnica é bastante utilizada para comunicação terminal-computador, e pode também ser usada para transporte de voz. As estações podem se comunicar com o controlador através de um canal de qualquer tipo, como por exemplo, um canal multiponto chaveado assíncrono, conforme exemplificado na Figura 3.17, pelo canal 0.

Um canal multiponto (Figura 3.18) vai permitir que um grande número de dispositivos utilizem uma mesma banda de frequência. Tal como nas redes em banda básica, alguma regra deve haver para o controle de acesso para transmissão nesse canal compartilhado, que pode ser dedicado ou chaveado. O acesso ao canal pode ser síncrono ou assíncrono, como veremos no item 3.5.5.

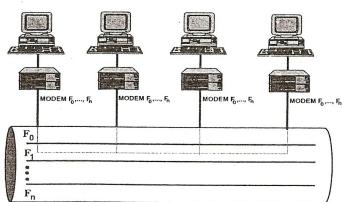


Figura 3.18: Canal multiponto F1.

3.5.4 - PCM

Nas seções anteriores, examinamos a codificação de informações digitais por sinais analógicos através de processos que denominamos de modulação. Essa técnica é necessária quando desejamos empregar multiplexação na frequência em redes em banda larga, ou quando necessitamos ajustar a faixa de frequências do sinal para a transmissão em um canal específico com características próprias (como é o caso da transmissão de dados via linhas telefônicas).

Fora os casos citados anteriormente, a transmissão digital é, em geral, mais vantajosa do que a analógica devido, principalmente, à possibilidade de restaurarmos o sinal original mesmo na presença de falhas ou ruídos no sistema. A transmissão digital vem substituindo a analógica sempre que possível, inclusive na própria rede telefônica, com a instalação de novas centrais e cabos de fibra ótica.

A informação de voz é, como vimos, originalmente analógica. Para utilizarmos as vantagens da transmissão digital, devemos codificá-la em um sinal digital antes da transmissão. Os dispositivos capazes de codificar informações analógicas em sinais digitais são denominados CODECs (CODe/DECoder). Nesta seção examinaremos a principal técnica utilizada por CODECs, denominada *Pulse Code Modulation* (PCM).

A técnica PCM é baseada no teorema de Nyquist (ou *teorema da amostragem*) apresentado no item 3.4.1. O teorema assegura que uma taxa de amostragem de $2W$ vezes por segundo é o suficiente para recuperar o sinal com banda passante W Hz. Utilizando uma taxa de amostragem maior ou igual a $2W$, o sinal original deve ser amostrado e, a cada amostra, deve-se associar um valor proporcional à amplitude do sinal naquele ponto. Este processo, ilustrado na Figura 3.19, é conhecido como *Pulse Amplitude Modulation* (PAM).

A partir dos pulsos PAM, podemos produzir os pulsos PCM através de um processo conhecido como *quantização*, onde cada amostra PAM é aproximada a um inteiro de n bits. No exemplo da Figura 3.19, escolhemos $n=3$, dando origem a oito níveis (2^3). A saída PCM corresponde ao resultado dessa quantização.

Podemos calcular, a partir desse processo, a taxa gerada pela transmissão de informação analógica através de sinais digitais. Considere o caso de sinais de voz, por exemplo. Se assumirmos que a banda passante necessária desses sinais tem largura igual a 4.000 Hz, a taxa de amostragem de Nyquist é, neste caso, igual a 8.000 amostras por segundo. Se escolhemos essa taxa e codificarmos cada amostra com oito bits, a taxa gerada será $8.000 \times 8 = 64$ Kbps.

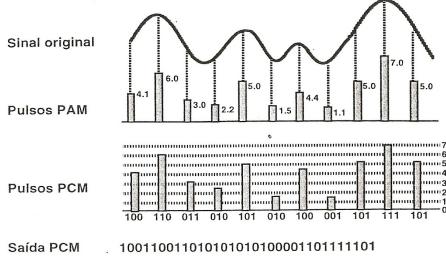


Figura 3.19: PCM.

3.5.5 - Multiplexação no Tempo

Conforme já mencionado, podemos compartilhar um meio físico por várias estações não só pela multiplexação na frequência, mas também pela multiplexação no tempo. A multiplexação por divisão do tempo (Time Division Multiplexing — TDM) se beneficia do fato de que a capacidade (em quantidade de bits por segundo) do meio de transmissão, em muitos casos, excede a taxa média de geração de bits das estações conectadas ao meio físico. Quando isso ocorre, vários sinais podem ser transportados por um único caminho físico, intercalando-se porções de cada sinal no tempo. A multiplexação no tempo pode ser classificada em *síncrona* ou *assíncrona*.

3.5.5.1 - TDM Síncrono

No TDM síncrono (ou simplesmente TDM), o domínio do tempo é dividido em intervalos de tamanho fixo T chamados *frames*; cada frame é subdividido em N subintervalos $\{t_1, \dots, t_n\}$ denominados *slots* ou *segmentos* que formam uma partição dos frames que, por sua vez, formam uma partição de tempo infinito (Figura 3.20).

Denomina-se *canal*, ao conjunto de todos os segmentos, um em cada frame, identificados por uma determinada posição fixa dentro desses frames. Por exemplo, o canal 3 é formado pelo terceiro slot de cada frame. Canais podem ser alocados a estações que desejem transmitir. Cada estação deverá

esperar o slot correspondente dentro de cada frame, quando então poderá transmitir durante o tempo daquele slot, utilizando a taxa de transmissão máxima suportada pelo meio físico.

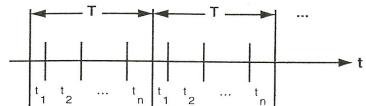


Figura 3.20: TDM síncrono.

Da mesma forma que alocamos canais de frequência em redes utilizando o FDM, em redes que utilizam TDM, os canais devem ser alocados às diferentes fontes de transmissão ou estações. Se a alocação de um determinado canal é fixa durante todo o tempo e preestabelecida antes do funcionamento da rede, então tem-se um canal *dedicado*.

Canais também podem ser alocados e desalocados dinamicamente durante o funcionamento da rede. Nesse caso, esses canais são denominados canais *chaveados*, de forma análoga à nossa definição para redes em banda larga. Uma estação, ao alocar um canal chaveado, pode transmitir neste canal pelo tempo que desejar. Quando não mais deseja o monopólio do canal, a estação o devolve à controladora do sistema, que agora pode alocá-lo a outras estações. Este esquema de alocação é sempre utilizado quer o canal seja ponto a ponto ou multiponto. Este esquema é que define o canal como sendo síncrono. Canais que podem ser alocados para transmissão de uma estação de origem para uma de destino são chamados canais ponto a ponto e, também de forma análoga às redes em banda larga, os canais que podem ser alocados por uma estação para a transmissão a várias estações são canais multiponto. Com o esquema de alocação chaveado apresentado anteriormente neste parágrafo, um canal multiponto é regulado por um tipo de acesso que denominamos síncrono.

Os segmentos de tempo dentro de um frame não precisam ter o mesmo tamanho. O tamanho do segmento no frame vai determinar a taxa de transmissão máxima efetiva no canal correspondente. Suponha, por exemplo, um segmento ocupando $1/a$ do frame. Como a transmissão neste segmento deve ser realizada a C bps (capacidade de transmissão do meio), a taxa de transmissão efetiva do canal será de C/a bps.