

Teorema de Nyquist – Teorema da Amostragem

- Em um canal livre de ruídos, a única limitação imposta à taxa de transmissão de dados será devida à largura de banda do canal.
 - **A formulação para esta limitação é devida à Nyquist e estabelece que, dada uma largura de banda B , a maior taxa de sinal que poderá ser suportada por esta largura de banda será $2B$.**
- Em um sinal binário, a taxa de dados que pode ser suportada por B Hz será $2B$ bps.
 - Um canal de voz de BW igual a 3100 Hz está sendo utilizado via MODEM para transmitir dados digitais. A capacidade do canal será, então, igual a $2B=6200$ bps.
- O Teorema de Nyquist é de extrema importância no desenvolvimento de codificadores de sinais analógicos → digitais porque estabelece o critério adequado para a amostragem dos sinais.
 - **Nyquist provou que, se um sinal arbitrário é transmitido através de um canal de largura de banda B Hz, o sinal resultante da filtragem poderá ser completamente reconstruído pelo receptor através da amostragem do sinal transmitido, a uma frequência igual a, no mínimo $2B$ vezes por segundo.**
 - Esta frequência, denominada **Frequência de Nyquist**, é a **frequência de amostragem** requerida para a reconstrução adequada do sinal.

- Para o caso de sinais que utilizam mais do que dois níveis (blocos de bits, ao invés de apenas os 2 níveis, nível 0 ou nível 1), a formulação de Nyquist se torna

$$C = 2B \log_2 M$$

onde M é o número de níveis utilizados para representar o sinal e $\log_2 M = 1 \text{ baud}$.

Esta é a fórmula de Nyquist para a capacidade máxima de um canal dada a sua largura de banda, na ausência de ruído.

- Em outras palavras, através de um canal de largura de banda igual a B Hz pode-se transmitir um sinal digital de, no máximo $2B$ bauds.

$$\text{Se } M=2 \rightarrow \log_2 M = 1 \text{ bit} = 1 \text{ baud} \rightarrow C = 2B = 6200 \text{ bps}$$

$$\text{Se } M=8 \rightarrow \log_2 M = 3 \text{ bits} = 1 \text{ baud} \rightarrow C = 6B = 18600 \text{ bps}$$

$$\text{Se } M=16 \rightarrow \log_2 M = 4 \text{ bits} = 1 \text{ baud} \rightarrow C = 8B = 24800 \text{ bps} \dots$$

- Portanto, para uma dada BW, a taxa de dados poderá ser aumentada através do aumento do n^o de níveis utilizados para transportar o sinal.
- No entanto, quanto maior M , maior a dificuldade encontrada pelo receptor para distinguir entre os M possíveis sinais transmitidos.

- A formulação de Nyquist define a taxa de transmissão máxima para um canal de banda passante limitada e imune a ruídos.
- No entanto, muitas distorções podem ocorrer durante a transmissão de um sinal por meio físico devido a fatores como atenuação, ruídos, etc.
- Claude Shannon estendeu os resultados de Nyquist para o caso de um canal sujeito a ruído térmico.

Fontes de Distorção de Sinais em Transmissão



- Ruídos
- Atenuação
- Ecos

Ruídos

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 ruídos. 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 invés 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.

Ruídos 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 frequências do espectro (sendo por isto freqüentemente citado como *ruído branco*) e sua quantidade é função da temperatura.

Quando sinais de diferentes frequências compartilham um mesmo meio físico (através de multiplexação na frequência) pode-se obter um ruído denominado de *ruído de intermodulação*.

A intermodulação pode causar a produção de sinais em uma faixa de frequências, 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 conversa telefônica, por uma conversa 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.

Lei de Shannon

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

O principal resultado de Shannon (*Lei de Shannon*) 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 frequência de sinalização. É importante notar que este é um limite máximo teórico, e que, na prática, é difícil até mesmo se aproximar deste valor. Muito embora vários esquemas tenham sido propostos, a lei de Shannon constitui-se em um limite máximo intransponível.

$$30dB = 10 \log_{10} \frac{S}{N} \rightarrow \frac{S}{N} = 10^{(30/10)} = 1000$$

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) = 3000 \log_2 1001$$

$$C = 3000 \text{ Hz} \left(\frac{\ln 1001}{\ln 2} \right) = 3000 (9.97) \cong 29902 \text{ bps}$$

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 frequências 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.

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. .

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.

Meios Físicos de Transmissão

Meios de transmissão diferem com relação à banda passante, potencial para conexão ponto a ponto ou multiponto, limitação geográfica devido à atenuação característica do meio, imunidade a ruído, custo, disponibilidade de componentes e confiabilidade.

A escolha do meio de transmissão adequado às aplicações é extremamente importante não só pelos motivos mencionados, mas também pelo fato de que ele influencia diretamente no custo das interfaces com a rede.

Qualquer meio físico capaz de transportar informações eletromagnéticas é passível de ser usado em redes de computadores. Os mais comumente utilizados são o par trançado, o cabo coaxial e a fibra ótica. Sob circunstâncias especiais, radiodifusão, infravermelho, enlaces de satélite e microondas também são escolhas possíveis.

Par Trançado

No par trançado, dois fios são enrolados em espiral de forma a reduzir o ruído e manter constantes as propriedades elétricas do meio através de todo o seu comprimento.

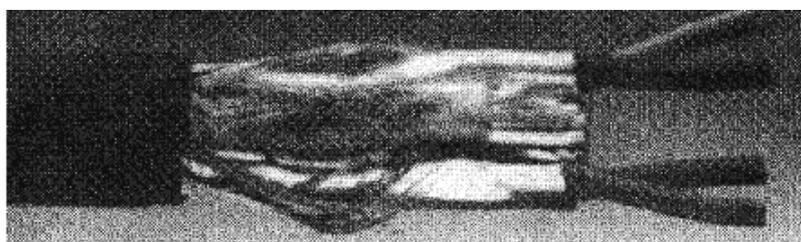
A transmissão no par trançado pode ser tanto analógica quanto digital. Radiação pode ocorrer quando a separação dos condutores e o comprimento de onda se aproximam. Como consequência, existe um limite na frequência de transmissão. A banda passante do par trançado é notavelmente alta, considerando o fato de ele ter sido projetado para o tráfego analógico telefônico. Taxas de transmissão podem chegar até a ordem de alguns megabits por segundo, dependendo da distância, técnica de transmissão e qualidade do cabo.

A perda de energia é um parâmetro importante quando se discute não só a taxa máxima de transmissão, mas também a distância máxima permitida, qualquer que seja o meio de transmissão. A perda de energia aumenta com o aumento da distância, até chegar a um ponto onde o receptor não consegue mais reconhecer o sinal. Energia pode ser perdida por radiação (a linha de transmissão pode agir como uma antena se o condutor é uma fração apreciável do comprimento de onda transmitido) ou por calor (que vai ser proporcional à corrente e à impedância do meio, aumentando com a frequência, uma vez que o sinal é transportado cada vez mais na parte externa do condutor — efeito pelicular). Em geral um par trançado pode chegar até várias dezenas de metros com taxas de transmissão de alguns megabits por segundo.

A desvantagem do par trançado é a sua susceptibilidade à interferência e ruído, incluindo crosstalk de fiação adjacente. Esses efeitos podem, no entanto, ser minimizados com uma blindagem adequada .

O par trançado pode ser comprado com diferentes propriedades (par trançado comum, blindado etc), dependendo de quanto se esteja disposto a pagar. Em sistemas de baixa frequência a imunidade ao ruído é tão boa quanto a do cabo coaxial. Em frequências um pouco mais elevadas (acima de cerca de 100 KHz) o cabo coaxial é bem superior. Cabos de par trançado blindado (*Shielded Twisted Pairs* — STP) são confeccionados industrialmente com impedância característica de 150 ohms e podem alcançar largura de banda de 300 MHz em 100 metros de cabo.

Cabos STP de 150 ohms são confeccionados obedecendo a padrões industriais que definem suas características. A classificação em tipos definida pela IBM constitui-se numa nomenclatura bastante utilizada na especificação desses cabos. Os cabos STP encapsulam em geral dois pares blindados. Os tipos de STP definidos pela IBM são os tipos 1, 1A, 2, 2A, 6, 6A, 9 e 9A. Esses tipos apresentam diferentes características no que se refere à combinação de alguns parâmetros como diâmetro do condutor e material utilizado na blindagem. A utilização desses tipos de cabo é bastante comum em redes Token Ring e FDDI para ligações de estações ao hub.



Cabo com dois pares trançados blindados.

Com o aumento das taxas de transmissão, cabos de par trançado de melhor qualidade foram gradativamente sendo produzidos. Dada a grande evolução apresentada desde os primeiros pares utilizados em telefonia, criou-se uma classificação para cabos sem blindagem (*Unshielded Twisted Pairs* — UTP) que leva em consideração as diversas capacidades de utilização e aplicação. Tal classificação distingue cinco categorias de pares UTP numeradas de 1 a 5. A categoria 1 é basicamente utilizada em sistemas de telefonia. A categoria 2 corresponde ao cabo UTP tipo 3 definido pela IBM, utilizado em sistemas com baixas taxas de transmissão. As aplicações básicas das categorias restantes são listadas na Tabela .

Categoria 3	Cabos e hardware com características de transmissão de até 16 MHz. Utilização típica em taxas de até 10 Mbps.
Categoria 4	Cabos e hardware com características de transmissão de até 20 MHz. Utilização típica em taxas de até 16 Mbps.
Categoria 5	Cabos e hardware com características de transmissão de até 100 MHz. Utilização típica em taxas de até 100 Mbps.

Utilização dos cabos UTP Categorias 3, 4 e 5.

Além de operar a taxas mais elevadas, as categorias 4 e 5 apresentam menor atenuação por unidade de comprimento, e melhor imunidade a ruídos do que a categoria 3.

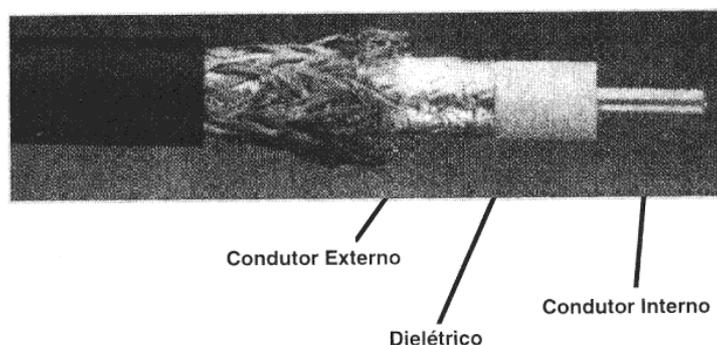
Os cabos considerados nessa classificação são definidos através de padrões industriais [EIA/TIA 91] e correspondem a cabos UTP de 100 ohms com condutores de corpo sólido de 24 AWG. As taxas mencionadas na tabela são consideradas em distâncias de no máximo 100 metros.

Par trançado é o meio de transmissão de menor custo por comprimento. A ligação de nós ao cabo é também extremamente simples, e portanto de baixo custo.

O par trançado é normalmente utilizado com transmissão em banda básica. Outra aplicação típica para par trançado é a ligação ponto a ponto entre terminais e computadores e entre estações da rede e o meio de transmissão. Exemplos são as redes Token Ring (IEEE 802.5) e FDDI (ANSI X3T9.5), que citamos anteriormente, e redes em barra como no padrão IEEE 802.3 10Base5, na qual as estações são ligadas ao meio (cabo coaxial) através de um par trançado, podendo estar a uma distância máxima de 50 metros.

Cabo Coaxial

Um cabo coaxial é constituído de um condutor interno circundado por um condutor externo, tendo, entre os condutores, um dielétrico que os separa. O condutor externo é por sua vez circundado por outra camada isolante.



Existe uma grande variedade de cabos coaxiais, cada um com características específicas. Alguns são melhores para transmissão em alta frequência, outros têm atenuação mais baixa, outros são mais imunes a ruídos e interferência etc. Os cabos de mais alta qualidade não são maleáveis e são difíceis de instalar, mas cabos de baixa qualidade podem ser inadequados para altas velocidades e longas distâncias.

O cabo coaxial, ao contrário do par trançado, mantém uma capacitância constante e baixa, teoricamente independente do comprimento do cabo. Essa característica vai lhe permitir suportar velocidades da ordem de megabits por segundo, sem necessidade de regeneração do sinal e sem distorções ou ecos, propriedade que revela a alta tecnologia já dominada.

A maioria dos sistemas com transmissão em banda básica utilizam o cabo com impedância característica de 50 ohms, ao invés do cabo de 75 ohms comumente utilizado nas TVs a cabo e nas redes em banda larga. Isso se deve ao fato de que na transmissão em banda básica o cabo de 50 ohms sofre menos reflexões devido às capacitâncias introduzidas na ligação das estações ao cabo, além de possuir uma maior imunidade a ruídos eletromagnéticos de baixa frequência. Sistemas com transmissão em banda larga utilizam a tecnologia desenvolvida para os componentes CATV (Community Antenna Television), incluindo o cabo coaxial de 75 ohms.

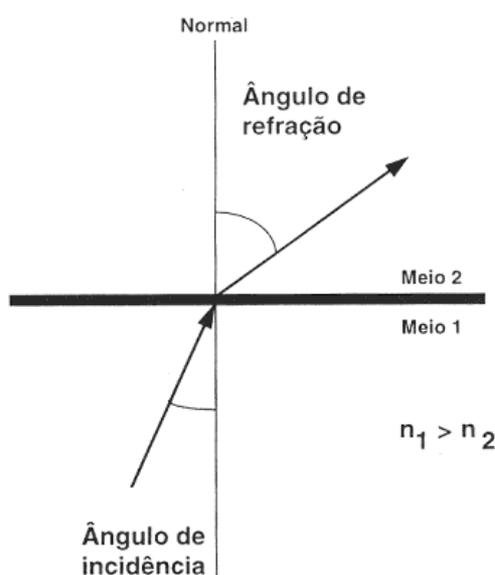
Comparado com o par trançado, o cabo coaxial tem uma imunidade a ruído de crosstalk bem melhor, e uma fuga eletromagnética mais baixa. A transmissão em banda larga fornece uma imunidade ao ruído melhor do que em banda básica. Além disso, os ruídos geralmente presentes em áreas urbanas e industriais são de baixa frequência, tornando as transmissões em banda básica mais susceptíveis a eles. Quanto ao custo, o cabo coaxial é mais caro do que o par trançado, assim como é mais elevado o custo das interfaces para ligação ao cabo.

Fibra Ótica

A transmissão em fibra ótica é realizada pelo envio de um sinal de luz codificado, dentro do domínio de frequência do infravermelho, 10^{12} a 10^{14} Hz, através de um cabo ótico, cujas características apresentaremos ao longo desta seção.

Para compreendermos os princípios da comunicação através de fibras óticas, devemos lembrar alguns fenômenos físicos observados e definidos no estudo de ótica elementar. Uma das características mais importantes dos materiais no estudo da ótica é seu *índice de refração*, que é definido como a razão entre a velocidade da luz nesse material e a velocidade da luz no vácuo. Como a velocidade da luz em qualquer meio é menor do que a velocidade da luz no vácuo, o índice de refração de qualquer meio é sempre menor do que 1. Na prática, porém, é comum utilizarmos como base o índice de refração do ar (pois este é bem próximo de 1). Dessa forma, consideramos o índice de refração do ar como sendo igual a 1 e podemos obter os índices para qualquer outro material através da razão entre as velocidades de propagação da luz no ar e naquele meio.

Toda vez que um feixe de luz atravessa um material e passa para outro material com índice de refração diferente, ocorre o fenômeno da *refração*

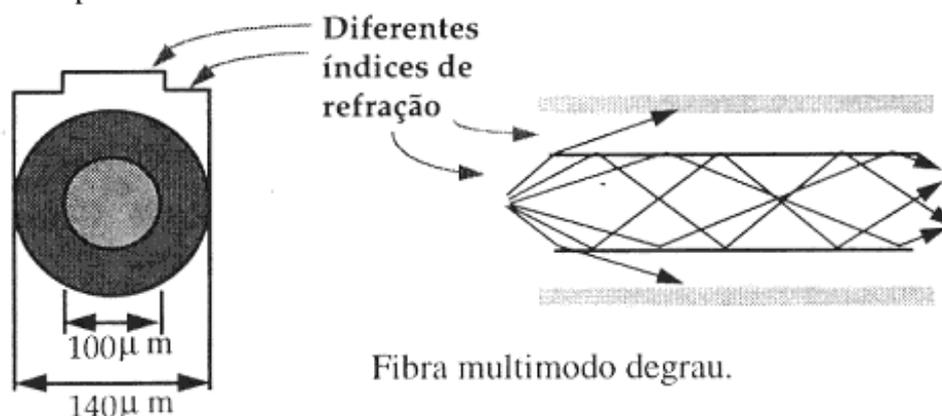


Ao passar para um meio com índice de refração menor, o ângulo do feixe de luz com a normal aumenta em relação ao ângulo de incidência. Para um determinado ângulo de incidência, denominado ângulo crítico, feixes não são mais refratados. Para ângulos maiores do que o ângulo crítico, observaremos apenas o fenômeno da reflexão total do feixe incidente.

O cabo ótico consiste em um filamento de sílica ou plástico, por onde é feita a transmissão da luz. Ao redor do filamento existem outras substâncias de menor índice de refração, que fazem com que os raios sejam refletidos internamente, minimizando assim as perdas de transmissão. Existem três tipos de fibras óticas: as multimodo degrau, as multimodo com índice gradual e as monomodo.

As *fibras multimodo degrau* são as mais simples e foram as primeiras a serem produzidas. O funcionamento dessas fibras é baseado no fenômeno da reflexão total interna na casca de índice de refração mais baixo. O termo *degrau* vem da existência de uma descontinuidade na mudança de índice de refração na fronteira entre o núcleo e a casca da fibra.

A qualificação *multimodo* refere-se à possibilidade de que vários feixes e diferentes ângulos de incidência se propaguem através de diferentes caminhos pela fibra.



As fibras multimodo degrau mais comuns apresentam as medidas ilustradas na Figura para os diâmetros do núcleo e da casca. É comum fazer-se referências a tipos de cabo de fibra ótica através desses diâmetros colocando-os separados por uma barra. A fibra da Figura, por exemplo, é comumente citada como uma fibra 100/140. O padrão ISO 9314/ANSI X3T9.5 (FDDI) especifica a possibilidade de utilização de cabos de fibra multimodo degrau 50/125, 100/140 e 85/125. A Tabela lista alguns cabos de fibra ótica utilizando a nomenclatura IBM.

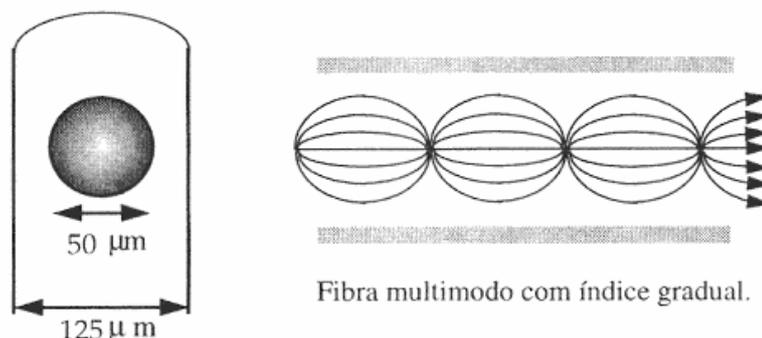
Tipos de cabo	Descrição
Tipo 5	duas fibras 100/140
Tipo 5 J	duas fibras 50/125
Tipo 5 R	X fibras 100/140
Tipo 5 OD	X fibras 100/140

Cabos de fibra ótica segundo a nomenclatura IBM.

Os tipos 5 R e 5 OD são especificações abertas dado que várias características não são definidas (por exemplo, o número de fibras no cabo) de forma a permitir a adequação e construção de cabos específicos às diversas necessidades.

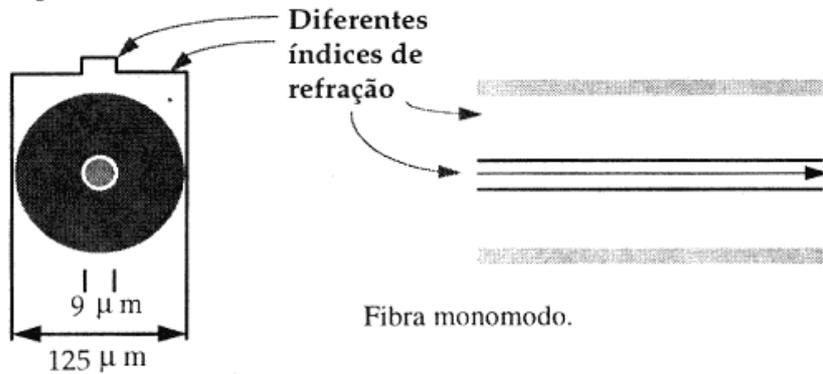
Em fibras multimodo degrau, o fenômeno da *dispersão modal* é um dos maiores limitantes da taxa de transmissão. A dispersão modal refere-se ao fato de que os diferentes raios de um pulso de luz se propagarão por diferentes caminhos ao longo da fibra fazendo com que os momentos de chegada desses raios se espalhem pelo tempo. Assim, existe uma possibilidade de observarmos uma interferência entre pulsos consecutivos. As diferenças nos tempos de chegada dos raios é proporcional ao cosseno do ângulo de incidência (note que, quanto menor o ângulo de incidência, maior é o caminho percorrido por um raio e, por conseguinte, maior é o seu tempo de propagação).

Em *fibras multimodo de índice gradual*, ao invés de uma mudança abrupta de índice de refração do núcleo para a casca, este índice vai diminuindo gradualmente de forma contínua, conforme ilustrado na Figura.

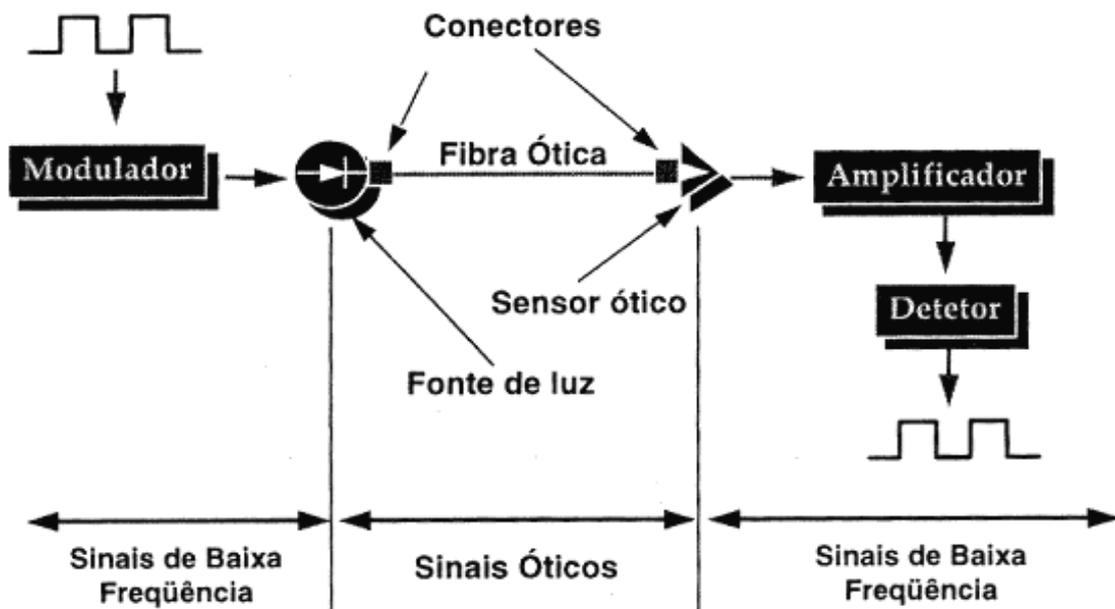


Dependendo do ângulo de incidência, os raios sofrerão uma refração que aumentará os seus ângulos em relação à normal. Os ângulos, gradativamente, atingirão o ângulo crítico, quando então serão refletidos percorrendo o caminho inverso em direção ao eixo central do núcleo, passando por sucessivas refrações que diminuirão cada vez mais os ângulos em relação à normal. Ao passar pelo eixo central, os raios voltarão a se afastar da normal, repetindo o processo. Como índices de refração menores significam maiores velocidades de propagação do sinal, os raios que se afastam mais do eixo central do núcleo, apesar de percorrerem distâncias maiores, adquirem maior velocidade nestas partes mais externas; estes fatores (distância percorrida e velocidade de propagação) se compensam de tal forma que os raios apresentam os mesmos tempos de propagação, evitando o problema da dispersão modal.

Em *fibras monomodo*, a idéia é produzir núcleos de diâmetro tão pequeno, que apenas um modo será transmitido .



Sistemas baseados em fibra ótica apresentam os componentes ilustrados na Figura abaixo.



Sistema baseado em fibra ótica.

As fontes de transmissão de luz podem ser diodos emissores de luz ou lasers semicondutores. Esses últimos são preferidos por serem mais eficientes em termos de potência, e devido a sua menor largura espectral, que reduz os efeitos de dispersão na fibra. Diodos emissores de luz (LEDs) são, por outro lado, mais baratos, além de se acomodarem melhor à temperatura ambiente e terem um ciclo de vida maior do que o laser.

Fibras óticas são imunes a interferências eletromagnéticas e a ruídos e, por não irradiarem luz para fora do cabo, não se verifica crosstalk. Fibras óticas vão permitir um isolamento completo entre o transmissor e o receptor, fazendo com que o perigo de curto entre os condutores não exista.

A composição da fibra é determinante na sua atenuação, que pode ser causada pela dispersão ou absorção da luz por elementos presentes no núcleo. Em linhas de longa distância utilizadas pelas companhias telefônicas, chegam-se a distâncias próximas de 50 Km sem a necessidade de repetidores.

Fibras óticas são mais finas e mais leves do que cabos coaxiais, o que facilita bastante sua instalação. Fibras óticas são, hoje em dia, utilizadas em sistemas com taxas de transmissão que chegam a 150 e a 620 Mbps numa única fibra unidirecional.

Algumas limitações, porém, ainda são encontradas. A junção de fibras é uma tarefa ainda delicada, principalmente em ligações multiponto. A instalação de fibras óticas em determinados ambientes pode fazer com que sejam necessárias dobras nos cabos de fibra. Tais dobras podem tornar o ângulo de incidência dos feixes em relação à normal muito pequeno provocando o escape desses feixes da fibra (pois estes não chegarão a sofrer reflexão).

Radiodifusão: Redes sem Fio

Nas redes sem fio (wireless networks) os pacotes são transmitidos, “através do ar”, em canais de frequência de rádio (frequências na faixa de KHz até GHz) ou infravermelho (frequências da ordem de THz). Nessa seção, nos concentraremos nas características relativas à transmissão utilizando frequências de rádio (radiodifusão), por serem as mais utilizadas em redes de computadores.

Por sua natureza, a *radiodifusão* é adequada tanto para ligações ponto a ponto quanto para ligações multiponto. As redes sem fio (baseadas em radiodifusão) são uma alternativa viável onde é difícil, ou mesmo impossível, instalar cabos metálicos ou de fibra ótica. Seu emprego é particularmente importante para comunicações entre computadores portáteis em um ambiente de rede local móvel.

A radiodifusão também é utilizada em aplicações onde a confiabilidade do meio de transmissão é requisito indispensável. Um exemplo drástico seria em aplicações bélicas, onde, por exemplo, o rompimento de um cabo poderia paralisar todo um sistema de defesa.

Nas ligações entre redes locais, a radiodifusão também tem papel relevante, especialmente se as redes estão distantes e o tráfego inter-rede é elevado. Nesse caso, circuitos telefônicos podem ser inadequados e a radiodifusão pode fornecer a largura de banda necessária.

As bandas de frequência *ISM (Industrial, Scientific and Medical)*, que podem ser utilizadas sem que seja necessário uma licença, são alocadas para as aplicações de radiodifusão dentro de edifícios. Os valores destas bandas variam de acordo com os países.

Como exemplo, o padrão para redes sem fio IEEE 802.11 especifica como opções de nível físico as bandas: 902 a 928 MHz, 2.4 a 2.48 GHz e 5.72 a 5.85 GHz. Nessas bandas de frequência, o sinal transmitido por um dispositivo, com uma potência de 100 mW, cobre uma área de 500 m².

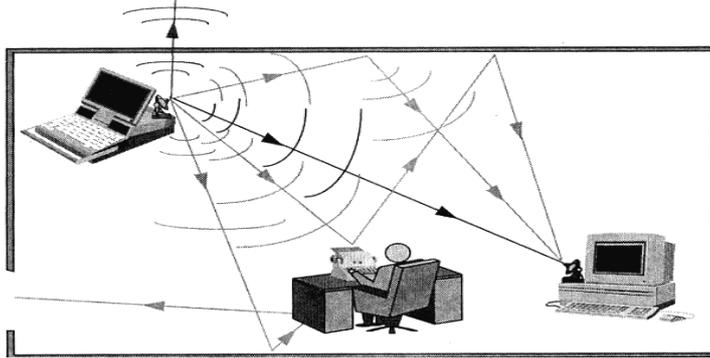
Como várias estações compartilham o mesmo meio de transmissão, é necessário utilizar um método para disciplinar este compartilhamento. Alguns dos métodos usados são: Multiplexação por Divisão da Frequência (FDM), Multiplexação por Divisão do Tempo (TDM) e Multiplexação por Divisão do Espaço (*Space Division Multiplexing* — SDM).

O método SDM pode ser realizado de duas formas. A primeira delas baseia-se na utilização de antenas direcionais, que emitem sinais de rádio de alta frequência concentrados em feixes. Esse método é usualmente empregado em enlaces de microondas, e permite que uma mesma frequência possa ser reutilizada, desde que os feixes de ondas sejam transmitidos em regiões distintas do espaço.

Outra forma de realização do SDM é estruturar a rede em células, isto é, dividir a área total da rede em áreas menores (células), que normalmente possuem a forma de hexágonos. O funcionamento dos sistemas celulares baseia-se na rápida diminuição da potência do sinal de rádio, à medida que se propaga. No espaço livre, a potência do sinal decai aproximadamente com o quadrado da distância do transmissor, e quando as antenas estão próximas ao solo, a potência diminui com aproximadamente a quarta potência da distância. Essa característica torna possível a reutilização da mesma frequência, quando os transmissores estão suficientemente distantes uns dos outros.

Exemplos de aplicação da SDM são: estações de rádio localizadas em cidades diferentes, transmitindo na mesma frequência, e o sistema de telefonia celular.

Como já mencionamos, as redes sem fio normalmente utilizam frequências altas em suas transmissões: 915 MHz, 2.4 GHz, 5.8 GHz etc. Parte das ondas de rádio, nessas frequências, são refletidas quando entram em contato com objetos sólidos, o que implica na formação de diferentes caminhos entre o transmissor e o receptor, principalmente em um ambiente fechado, como o ilustrado na Figura .



Caminhos seguidos pelas ondas de rádio em um ambiente fechado.

Como pode ser observado na Figura , apenas parte do sinal segue o caminho reto entre o transmissor e o receptor. Como consequência, acontece um espalhamento no tempo do sinal que chega ao receptor (a velocidade de propagação é igual e os caminhos possuem comprimentos diferentes), isto é, várias cópias do sinal chegam ao receptor deslocadas no tempo. Quando as várias cópias do sinal chegam ao receptor, após percorrerem distâncias diferentes, elas somam-se aleatoriamente, sendo o valor do sinal captado pela antena do receptor igual ao resultado dessa soma. Se a diferença no comprimento dos caminhos for igual a um múltiplo ímpar de metade do comprimento de onda da portadora do sinal (o comprimento de uma onda com 915 MHz de frequência é 32,8 cm), os componentes podem cancelar-se total ou parcialmente, fenômeno conhecido como desvanecimento de Rayleigh (Rayleigh fading) [Bantz 1994], mesmo não havendo interferência intersímbolos, que veremos no próximo parágrafo. O resultado disso é que, no mesmo ambiente, em alguns locais, o sinal pode ser muito fraco (quase imperceptível), enquanto que em outros, a poucos metros de distância, pode ser perfeitamente nítido. Assim, ao movimentar-se, o receptor pode perceber variações abruptas na potência do sinal. Mesmo sem movimentar-se, um receptor não fica imune a esse efeito, que pode ser causado pela modificação da posição dos obstáculos no ambiente de operação da rede, por exemplo, movimentação de pessoas ou objetos sólidos.

Uma consideração importante, quando uma portadora carrega um sinal digital modulado, é o comprimento (duração) do sinal que transporta a codificação de um símbolo (o estado do sinal que representa um bit ou um grupo de bits). Nesse caso, o efeito do espalhamento no tempo do sinal pode causar a sobreposição dos símbolos, ou interferência intersímbolos. Como o comprimento do símbolo diminui com o aumento da taxa de transmissão, esse é um fator limitante da capacidade de transmissão dos canais de rádio. Um exemplo do efeito da interferência intersímbolos é o aparecimento de fantasmas nas imagens de televisão, muito comuns quando são utilizadas antenas internas nos aparelhos de TV.

Quando se utiliza a radiodifusão como meio de transmissão, um aspecto que tem que ser considerado é a segurança. Teoricamente, não existem fronteiras para um sinal de rádio, logo, é possível que ele seja captado por receptores não autorizados. Um atenuante desse inconveniente é o fato do sinal, quando transmitido por equipamentos próximos ao solo, decair com a quarta potência da distância por ele percorrida. Porém, para garantir privacidade, é indispensável a utilização de algum mecanismo de criptografia ao transmitir os sinais. Além disso, em geral se exige que as transmissões nas bandas ISM utilizem técnicas de espalhamento de banda (*spread spectrum*).

As técnicas recomendadas para espalhamento de banda são o FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum*) e DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*). A técnica FHSS divide a banda utilizada para transmissão em vários canais, por exemplo, de 0,5 MHz na banda de 915 MHz. O transmissor envia os dados por um intervalo de tempo (um chip) em um canal e salta (*hop*) para outro canal, sucessivamente. O padrão que define a seqüência de canais utilizados na transmissão é denominado seqüência de saltos (*hopping sequence*). A seqüência de saltos pode ser fixa ou aleatória, sendo previamente determinada ou aprendida ao longo da transmissão. Note que, se o receptor não conhecer a seqüência de saltos, ele não conseguirá decodificar a informação transmitida. No esquema DSSS, uma seqüência binária é usada para modular o sinal antes de sua transmissão. Isso é feito através da multiplicação binária (aplicação da função ou-exclusivo) dos dados transmitidos com a seqüência binária. Da multiplicação resulta uma cadeia de bits (obviamente com uma taxa maior que a dos dados), que é então usada para modular a frequência portadora. O fator de espalhamento (*spreading factor*), relação entre a taxa da seqüência de bits usada no espalhamento e a taxa de bits dos dados do usuário, situa-se entre 10 e 100 em sistemas comerciais, podendo atingir até 10.000 em sistemas militares. No esquema DSSS, o receptor precisa conhecer a seqüência binária usada na modulação para decodificar corretamente o sinal.

Z

Outro cuidado que deve ser tomado ao se utilizar radiodifusão como meio de transmissão, é a possível existência de interferência, provocada por fontes que geram sinais na mesma banda de frequência da rede. Alguns exemplos de possíveis fontes de interferência são: motores elétricos, radares, dispositivos eletrônicos, copiadoras, impressoras a laser etc.

As redes sem fio estruturadas em células, onde os usuários possuem muita mobilidade, apresentam dois problemas adicionais. Um dos problemas é como permitir que estações em uma célula possam se comunicar com estações em outras células, de forma transparente. Uma solução é definir um sistema de distribuição (possivelmente usando cabos de metal ou fibra ótica como meio de transmissão) para transmissão de informações entre células distintas, e eleger uma das estações da célula como *ponto de acesso* ao sistema de distribuição. Essa estação ficaria encarregada de capturar as transmissões feitas na célula, endereçadas a estações fora dela, e enviá-las através do sistema de distribuição para a célula de destino. De forma dual, essa estação deve capturar no sistema de distribuição as mensagens endereçadas a sua célula, transmitindo-as via radiodifusão para as estações de destino.

Outro problema a ser solucionado, oriundo da estrutura celular, ocorre quando uma estação desloca-se de uma célula para outra. A função que permite que a estação continue se comunicando, de forma transparente, é denominada handoff ou handover. O handoff pode ser realizado de modo centralizado ou distribuído. No esquema centralizado, uma estação especial monitora a potência do sinal transmitido pelas estações móveis, e decide que ponto de acesso deve ser o responsável pela estação, isto é, decide em que célula a estação móvel está localizada ao longo do tempo. A referência [Chen 94] apresenta vários algoritmos utilizados nessa decisão.

As soluções hoje disponíveis para redes locais utilizando radiodifusão são todas proprietárias, entretanto está sendo elaborado no IEEE um padrão para esse tipo de rede: o padrão IEEE 802.11 .