

CAPÍTULO X – SISTEMAS DE COMUNICAÇÕES ÓPTICAS

Sistemas de comunicações ópticas são sistemas de transmissão que utilizam a luz para transferência de informação. Em um sistema básico, tem-se o transmissor, que é constituído por um dispositivo que converte o sinal do domínio elétrico para o domínio óptico, o meio de transmissão, que guia a luz até o receptor, e o próprio receptor, que é responsável por converter o sinal do domínio óptico para o domínio elétrico. Os transmissores mais utilizados são os LEDs (*Light Emitting Diodes*) ou os LASERs (*Light Amplification by Stimulated Emission Radiation*) (ambos serão abordados na seção 10.3). Os receptores são fotodetectores, basicamente divididos em dois tipos, p-i-n ou APD (*Avalanche Photodiode*) (ambos serão abordados na seção 10.4). O meio de transmissão mais comum é a fibra óptica, apesar de existirem sistemas que transmitam informação no domínio óptico pelo espaço livre.

A fibra óptica determinou um marco histórico na evolução dos sistemas de comunicações. As fibras ópticas, que são estruturas finas e flexíveis constituídas de vidro ou plástico, permitem propagar o sinal de informação utilizando ondas de luz por longas distâncias. Atualmente, sistemas de comunicações ópticas utilizando fibras ópticas (doravante utilizaremos somente sistemas de comunicações ópticas para descrever estes sistemas) compõem a tecnologia que podem prover a maior banda de transmissão entre os sistemas de transmissão conhecidos atualmente. O recorde de transmissão pertence a uma equipe japonesa [Fukuchi 2001]. O experimento consistiu na transmissão de 10,92 Tb/s utilizando 273 canais de 40 Gb/s utilizando tecnologia WDM nas bandas *C*, *S* e *L* (ver seção 10.6).

Por esse e vários outros fatores, a comunidade científica internacional investe muita atenção nesta área, pois os sistemas de comunicações ópticas ainda possuem um grande potencial para novas descobertas e desenvolvimento.

O resto do capítulo está organizado da seguinte forma: Na seção 10.1 será apresentado um breve histórico sobre comunicações ópticas; Na seção 10.2 estão descritos alguns fundamentos básicos sobre fibras ópticas; na seção 10.3 e 10.4 são discutidos os dispositivos optoeletrônicos para transmissão e recepção, respectivamente; Na seção 10.5 são apresentados dispositivos para aumentar o alcance dos enlaces; Na seção 10.6 são

discutidas as nuances da utilização da tecnologia de multiplexação por divisão de comprimentos de onda (**WDM**, *Wavelength Division Multiplexing*); Na seção 10.7 é discutida uma medida importante de desempenho de sistemas, a taxa de Erro por bit (**BER**, *Bit Error Rate*); Na seção 10.8 são apresentados os conectores ópticos e na seção 10.9 são discutidas as perspectivas para evolução dos sistemas de comunicações ópticas para redes ópticas de alta velocidade. Na seção 10.10 estão listadas algumas referencias para leitura complementar.

10.1. HISTÓRICO DAS COMUNICAÇÕES ÓPTICAS

Ao longo da história vários fatos foram importantes para definir a atual tecnologia dos sistemas de comunicações ópticas. Os primeiros passos foram os estudos e as descobertas sobre a luz e os efeitos correlacionados com sua propagação. Em 1621, Willebrod Snell descobriu dois efeitos comportamentais sobre a propagação da luz que ficaram conhecidas como as leis de Snell. Basicamente estas leis modelam a reflexão e refração em uma interface entre dois meios com índices de refração diferentes segundo as condições da óptica geométrica. Em 1678, Christian Huygens modela a luz como onda e alguns anos depois, De Brouglie discute sobre o comportamento dualístico onda/matéria da luz. Em 1800, William Herschel descobriu a região infravermelha do espectro e, um ano após, Ritter descobriu a região ultravioleta do espectro.

Em 1870, John Tyndal mostrou à *Royal Society*, do Reino Unido, um efeito que motivaria a criação das fibras ópticas dois séculos depois. Foi mostrado que a luz se curva para acompanhar um esguicho de água. Isto decorre do efeito de reflexão interna total que será descrito detalhadamente na próxima seção 10.2.

Por volta de 1930, algumas estruturas capazes de guiar de luz foram desenvolvidas com *Perspex* para iluminar cirurgias. Em 1950, pesquisadores começam a sugerir o uso de uma casca em volta da fibra para guiar a luz. Estes novos dispositivos chamados *fibrescopes* foram desenvolvidos, mas na época o custo para produção ainda era proibitivo.

Em 1952, O físico indiano Narinder Singh Kanpany propõe a idéia de utilizar estas estruturas para transmissão de informação, surge então o termo fibra óptica, empregado

pela primeira vez em 1956. Nesta ocasião, uma equipe do Laboratório Bell (USA) composta pelo Doutor Kampany e pelos Doutores A. L. Schawlow e C. H. Townes apresentaram os planos para a construção do primeiro LASER a ser usado em Sistemas de Telecomunicações.

Em 1964, Kao especulou que a redução das perdas das fibras para 20 dB/km (a cada quilometro a potência óptica do sinal se reduz a um centésimo), tornaria possível transmitir sinais de informação à longa distância com repetidores. Contudo, em 1968 as fibras ópticas da época apresentavam perda de 1000 dB/km, valor que torna inviável a construção de um sistema de comunicações ópticas de longa distância. Note que com esta perda de 1000 dB/km, em apenas 20 metros de fibra óptica o sinal perde 99% da sua potência. Para resolver este problema, a empresa *The Post Office* patrocina projetos para obter vidros de menor perda. Em 1970, a empresa *Corning Glass* conseguiu produzir alguns metros de fibra óptica com perdas de 20 dB/km.

Em 1976, a *Bell Laboratories* instalou um link telefônico em Atlanta com 1 km de alcance e provou ser possível utilizar fibras ópticas para telefonia. O primeiro link de TV a cabo com fibras ópticas foi instalado na cidade de *Hastings* no Reino Unido. Enquanto isso, a empresa *Rank Optics* na cidade de Leeds, Reino Unido, fabricava fibras ópticas com diâmetro de 110 μ m para propósitos de iluminação e decoração.

O que realmente impulsionou a utilização das fibras ópticas para comunicações foi a fabricação de fibras ópticas com perdas menores do que 1,5 dB/km em 1978. Em 1988, foi lançado o primeiro cabo submarino de fibras ópticas no oceano que deu início às transmissões transoceânicas.

A primeira geração de sistemas de comunicações ópticas operava em 850 nm. A determinação do comprimento de onda deveu-se basicamente à disponibilidade dos componentes de transmissão e recepção da época. Os dispositivos optoeletrônicos eram construídos de GaAs (liga de semicondutor composta por Arsênio e Gálio) que emitem em 850 nm. A migração para a janela de 1310 nm ocorreu de forma paralela ao surgimento de dispositivos construídos da liga ternária InGaAs. Esta migração foi interessante, pois a janela de 1310 nm apresenta perdas e dispersão mais baixa do que a janela anterior. A segunda migração para a janela de 1550 nm foi um pouco mais conturbada porque apesar das fibras ópticas padrão apresentarem perdas menores neste comprimento de onda, a

dispersão, efeito responsável por alargar os pulsos de informação, era mais alta. Entretanto, com o surgimento de amplificadores ópticos adequados (EDFAs, versão seção 10.5) e desenvolvimento de fibras ópticas com perfis de dispersão mais sofisticados, a janela de 1550 nm se tornou a opção mais interessante para comunicações ópticas de longa distância.

Atualmente, as fibras ópticas apresentam perdas de aproximadamente 0,17 dB/km em 1550 nm e constituem a melhor opção para transmissão de alta capacidade. Em 2001, o mercado envolvendo a fibra óptica já movimentava cerca de 30 bilhões de dólares anuais.

10.2. FUNDAMENTOS BÁSICOS SOBRE FIBRAS ÓPTICAS

Para melhor entender o funcionamento das fibras ópticas faz-se necessário discorrer brevemente sobre os conceitos físicos envolvidos no processo. As leis de Snell podem ser consideradas como ponto de partida para melhor entendimento sobre o funcionamento de uma fibra óptica. Considere a Fig. 10.1, a primeira lei de Snell diz que, em uma interface que separa dois meios com índices de refração diferentes, uma parcela da potência de um raio incidente (representado pela seta que incide na interface com ângulo θ_1) é refletida para o mesmo meio com ângulo θ_{1r} igual em relação à normal ($\theta_{1r} = \theta_1$). Também foi observado que quando a luz atravessa esta interface, as condições de propagação mudam e a direção de propagação muda. Esta formalizada pela primeira vez o efeito da refração e eternizada como a segunda lei de Snell.

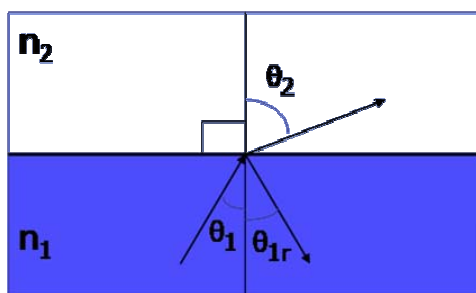


Figura 10.1 – Representação dos raios refletidos (1) e refratados (2) na interface entre dois meios com índices de refração diferentes.

Matematicamente, a segunda lei de Snell é enunciada pela relação apresentada em (10.1). Note que se o índice de refração muda, a angulação do raio luminoso no meio também muda.

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2). \quad (10.1)$$

Esta equivale a,

$$\theta_1 = \sin^{-1} \left[\frac{n_2}{n_1} \sin(\theta_2) \right]. \quad (10.2)$$

Considere agora que o índice de refração do meio do raio incidente é maior do que o índice de refração do outro meio $n_1 > n_2$. Então, existe um ângulo de incidência que faz com que o ângulo refração seja 90° . Este ângulo é chamado de ângulo crítico θ_c e é dado pela seguinte expressão:

$$\theta_c = \sin^{-1} \left[\frac{n_2}{n_1} \right]. \quad (10.3)$$

As fibras ópticas usam este efeito, chamado de reflexão interna total, para guiar luz. A forma mais comum de se conseguir confinamento espacial de luz em uma determinada região espacial é construir um guia cilíndrico constituído de um cilindro (núcleo) com índice de refração maior do que uma casca cilíndrica (casca). A Fig. 10.2 ilustra a estrutura com um corte transversal.

A Fig. 10.3 mostra um corte longitudinal de uma fibra óptica. É importante ressaltar da Fig. 10.3 que a luz deve ser inserida na fibra óptica longitudinalmente e deve respeitar um ângulo máximo de entrada θ_0 para continuar sob a condição de reflexão interna total na interface núcleo-casca. Um valor típico para este ângulo é 12° . Este ângulo máximo pode ser facilmente calculado e é dado pela seguinte expressão:

$$\theta_0 = \text{sen}^{-1} \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_0}. \quad (10.4)$$

O ângulo máximo define, na verdade, um cone espacial chamado de cone de aceitação (ver Fig. 10.2). O seno do ângulo máximo de entrada é referido como abertura numérica (NA, *Numerical Aperture*) e é frequentemente encontrado nas especificações técnicas das fibras ópticas comerciais.

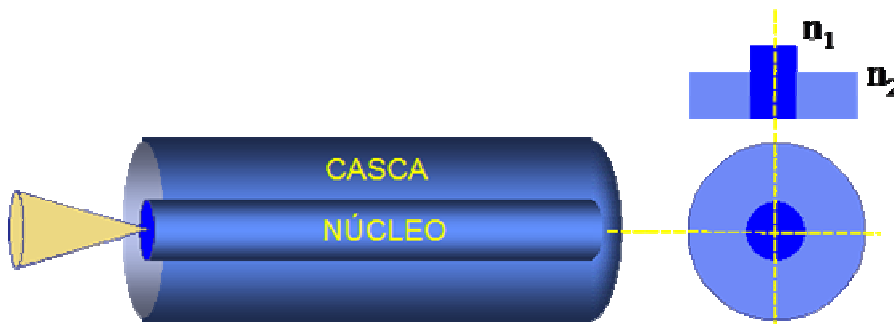


Figura 10.2 – Estrutura de um fibra óptica comum com seu cone de aceitação.

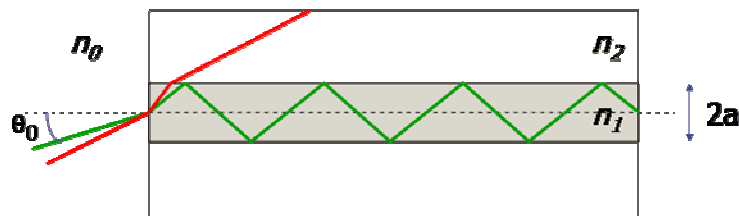


Figura 10.3 – Condição de propagação: raio verde dentro do cone de aceitação e raio vermelho fora do cone de aceitação.

Existem dois efeitos que são bastante prejudiciais ao funcionamento sistemas de comunicações por fibra óptica. São a atenuação e a dispersão.

A atenuação faz com que haja perdas no sinal transmitido, prejudicando principalmente o alcance do enlace, e tem várias fontes como: a absorção no infravermelho e no ultravioleta do material que compõe a fibra, o espalhamento de Rayleigh e a absorção de íons que são depositados no material durante o processo de fabricação. Recentemente, os

processos de fabricação melhoraram bastante fazendo com que as fibras ópticas tenham diminuído substancialmente os picos de absorção por íons, tornando o espectro de absorção mais plano, se aproximando muito do limite teórico, e tornando possível a exploração de uma faixa de comprimentos de onda bem mais extensa por meio de tecnologia de multiplexação espectral.

A potência na saída de uma fibra óptica P_{out} depende da potência de entrada na fibra óptica P_{in} da seguinte forma:

$$P_{out} = P_{in} e^{-\alpha L}, \quad (10.5)$$

onde α é o coeficiente linear de atenuação da fibra. Uma outra forma de se expressar perdas é na escala logarítmica. Por isso, pode-se também definir um coeficiente de atenuação da fibra em decibéis, que pode ser calculado experimentalmente a partir da seguinte expressão:

$$\alpha_{dB} = 10 \log_{10} \frac{P_{in}}{P_{out}}. \quad (10.6)$$

A Fig. 10.4 mostra o espectro de perdas de uma fibra óptica comercial. Pode-se notar que os atuais processos de fabricação tornam proveitosa uma extensa faixa espectral.

Entretanto, existem outros fatores que podem gerar perdas. Por exemplo, a curvatura acentuada de uma fibra instalada pode favorecer a transferência de luz do modo guiado para a casca da fibra, gerando perdas adicionais. Para que essas perdas por curvatura sejam desprezíveis ($< 0,01$ dB), o raio de curvatura de uma fibra padrão deve ser maior que 4 cm (diâmetro da fibra padrão é de 125 μm).

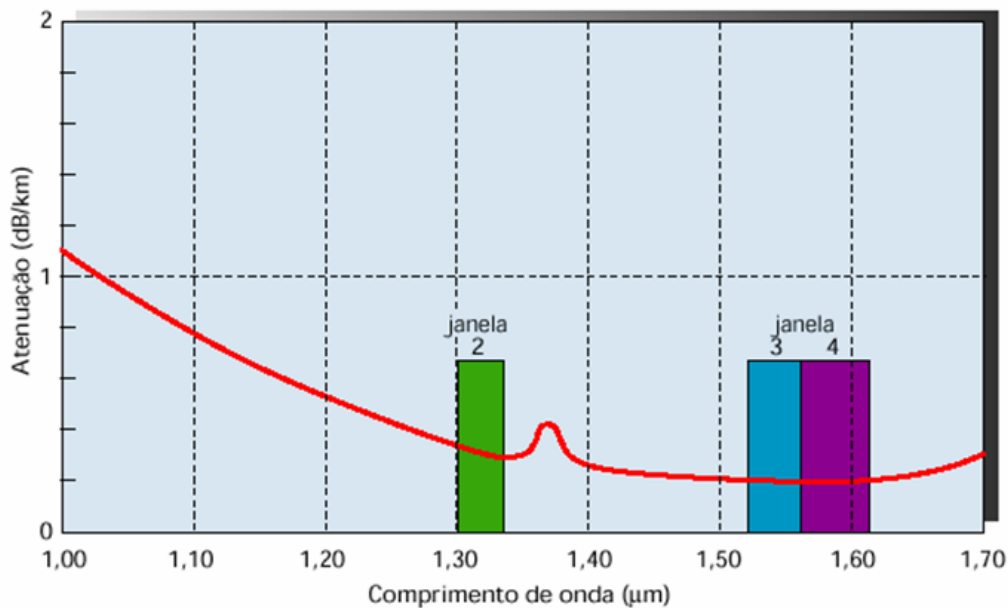


Figura 10.4 – Espectro de atenuação típico de uma fibra composta de Silica.

A dispersão é responsável basicamente por causar uma deturpação temporal do espectro de frequência de um sinal luminoso propagando em um guia. A dispersão pode ser intermodal ou intramodal.

A dispersão intermodal ocorre em fibras multimodo. Numa abordagem simplista, baseada em óptica geométrica, pode-se dizer que as fibras multimodo permitem que vários raios propagem com ângulos diferentes na fibra (ver Fig. 10.5). Por causa disso, os caminhos físicos são diferentes e cada modo demora um tempo diferente para alcançar o receptor. A consequência imediata é que os pulsos que carregam o sinal de informação se alargam ao longo da propagação.

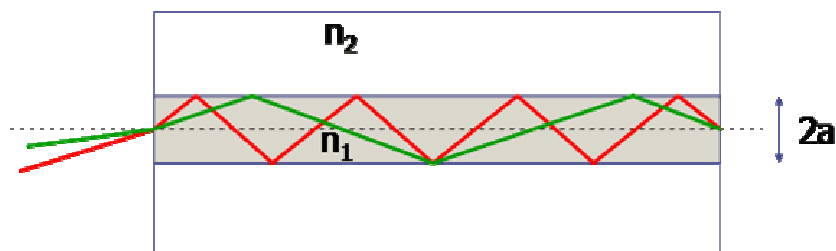


Figura 10.5 – Propagação de dois modos em uma fibra multimodo.

A expressão abaixo determina o máximo produto taxa de transmissão *versus* distância em uma fibra óptica multimodo com perfil de índice degrau.

$$BL < \frac{1}{2} \frac{n_2}{n_1^2} \frac{c}{\Delta}. \quad (10.4)$$

onde B é a taxa de transmissão (bits/s), L é a distância (comprimento de fibra) e $\Delta < \frac{n_1 - n_2}{n_1}$. Tipicamente, $\Delta = 1\%$ e $BL < 10 \frac{Mb.km}{s}$. Note que é importante que a diferença entre o índice de refração da casca não seja muito menor do que o índice de refração do núcleo, pois isso afetaria diretamente a taxa de transmissão máxima de um determinado enlace.

Para minimizar este problema, foram desenvolvidas fibras de índice gradual. Nestas fibras, o índice do núcleo da fibra varia gradualmente do centro do núcleo até a interface núcleo-casca. Isto faz com que os caminhos percorridos pelos vários modos não sejam tão diferentes e, como consequência, a dispersão intermodal é menor. Com estas fibras de índice gradual pode-se chegar a $BL < 10 \frac{Gb.km}{s}$.

A Fig. 10.6 mostra um exemplo da relação taxa de transmissão *versus* distância para duas fibras ópticas multimodo. Note que o fato da fibra com perfil de índice gradual minimizar a dispersão intermodal, faz com que o limite da taxa de transmissão para um sistema utilizando fibra gradual multimodo seja muito maior do que a taxa de transmissão para um sistema utilizando fibra degrau multimodo com mesmo comprimento de enlace. No entanto, por causa da dispersão intermodal, fibras multimodo são utilizadas para sistemas de baixa capacidade e curto alcance, como por exemplo, redes locais de computadores.

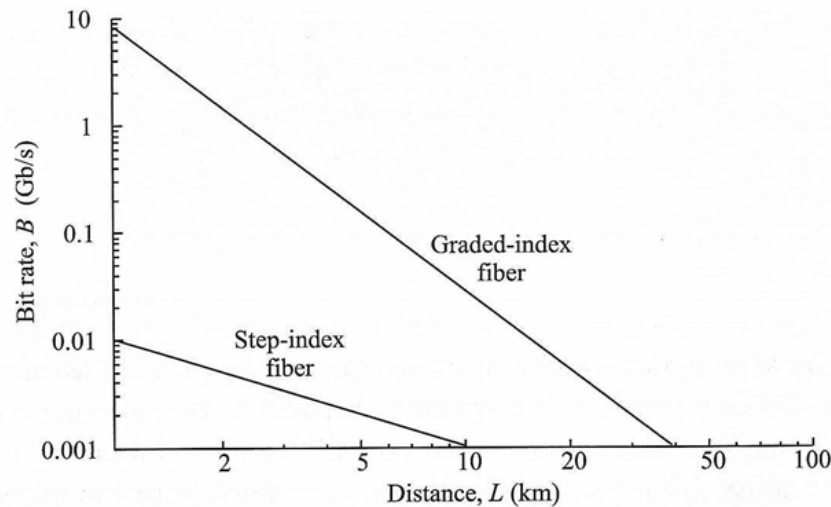


Figura 10.6 – Relação taxa versus alcance para dois tipos de fibras ópticas multimodo.

Em fibras que só suportam um modo a dispersão intermodal não existe. Todavia, a dispersão do material, intramodal ou cromática está presente em todas as fibras. Esta é decorrente da dependência direta do índice de refração do material compositor da fibra óptica com relação ao comprimento de onda. Basicamente, este efeito depende da largura espectral da fonte de luz. Quanto menor a largura de linha da fonte luz, menor a dispersão cromática. Por isso, a utilização de LASERs (que tem largura espectral fina, menor que 1 nm) tem melhor desempenho do que um LED convencional (que tem largura espectral na ordem de 30 nm).

As fibras ópticas de sílica padrão utilizadas para transmissão tem o coeficiente de dispersão nulo em um comprimento de onda próximo a 1300 nm. O comprimento de onda cuja dispersão cromática é zero é conhecido como zero de dispersão. O trem de pulsos de um sinal com largura de linha estreita operando no zero de dispersão não sofre alargamento.

Contudo outras faixas de frequência apresentam vantagens, como menor perda. Para isso, foram desenvolvidas fibras ópticas de dispersão deslocada (**DSF**, *Dispersion Shifted Fibers*) que tem o zero de dispersão por volta de 1550 nm, reunindo assim os mínimos de atenuação e dispersão.

Contudo, operar no zero de dispersão não é uma boa estratégia em sistemas multicanais, pois ocorre a geração de efeitos não lineares. Atualmente, existem fibras ópticas sofisticadas, como as fibras de dispersão deslocada não nula (**NZDSF**, *Non zero Dispersion Shifted Fiber*), cujo perfil de índices de refração é mais complexo, permitindo uma dispersão baixa e constante por uma faixa de comprimentos de onda bem maior, sendo assim possível aumentar a capacidade dos sistemas através de tecnologia WDM.

10.3. DISPOSITIVOS OPTOELETRÔNICOS PARA TRANSMISSÃO

O principal papel de um transmissor óptico é converter o sinal elétrico em sinal óptico que possa ser acoplado a uma fibra óptica. Para sistemas de comunicações via fibra óptica, os transmissores são dispositivos à base de semicondutor. As vantagens no uso de dispositivos de semicondutor são muitas, entre elas: tamanho compacto, alta eficiência, boa confiabilidade, área de emissão compatível com as dimensões do núcleo de fibras ópticas disponíveis comercialmente, emissão em comprimentos de onda na faixa de baixas perdas das fibras de sílica e, principalmente, possibilidade de modulação direta.

Existem basicamente dois tipos de transmissor: o LED (*Light Emitting Diode*), que consiste em uma junção *p-n* polarizada diretamente gerando emissão espontânea e o LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) de semicondutor, que geralmente é composto de heteroestruturas em múltiplas camadas cujas faces formam uma cavidade, gerando emissão estimulada.

10.3.1. LED

As principais características do LED são: emissão incoerente com largura espectral larga (entre 30 nm e 60 nm), baixa capacidade de modulação (frequência máxima de modulação típica 100 MHz para LED de InGaAsP) e espalhamento angular elevado gerando dificuldade de acoplamento em fibras ópticas (eficiência de acoplamento máxima de 1 %). As aplicações mais importantes em telecomunicações destes dispositivos são em redes locais de relativa baixa velocidade (taxas de transmissão de 10 Mb/s).

10.3.2. LASER

As principais características do LASER são: emissão coerente com largura espectral estreita, tipicamente 1 nm para cavidades Fabry-Perot e menor que 0,1 nm para emissão laser com realimentação distribuída (**DFB**, *Distributed Feedback Laser*); capacidade de emissão de alta potência para utilização como sinal em telecomunicações (da ordem de 10 mW); pequeno espalhamento angular permitindo melhor acoplamento em fibras ópticas monomodo (eficiência de acoplamento máxima entre 30 % e 50 %); e melhor resposta em altas frequências (até 40 GHz) devido ao menor tempo de recombinação associada à emissão estimulada. As aplicações mais importantes em telecomunicações são em redes de longas distâncias principalmente as que utilizam tecnologia WDM.

10.4. DISPOSITIVOS OPTOELETRÔNICOS PARA RECEPÇÃO

Os receptores são os elementos responsáveis em converter o sinal óptico transmitido em sinal elétrico capaz de ser processado. O mais importante componente é o fotodetector, que converte luz em corrente elétrica através da absorção de fótons em uma junção de semicondutor *p-n*. Para sistemas de comunicações via fibra óptica, o receptor deve ter: alta sensibilidade, resposta rápida, baixo ruído, baixo custo, boa confiabilidade e dimensões comparáveis ao diâmetro do núcleo das fibras ópticas utilizadas. Dois tipos básicos de fotodetectores são usados em sistemas de comunicações via fibra óptica: os fotodiodos *p-i-n* e o *APD* (*Avalanche Photodiode*).

O *p-i-n* consiste em uma junção semicondutora *p-n* com uma camada de material intrínseco inserido entre as camadas para que o campo elétrico na região de depleção aumente devido à alta resistividade associada à camada não dopada, melhorando a sua resposta em frequência. A principal diferença entre o *p-i-n* e o fotodiodo básico é que a componente que domina a corrente é a de deriva. Também é interessante frisar que a largura de banda fica limitada pelo longo tempo de trânsito, devido ao comprimento da camada intrínseca.

O *APD* difere do *p-i-n* na adição de uma camada, onde pares elétrons-buracos são gerados através de ionização por impacto. Tal geração de pares provê um fator

multiplicativo na responsividade, tornando este mais sensível do que o *p-i-n*. É importante mencionar que o processo de avalanche é intrinsecamente ruidoso.

10.5. DISPOSITIVOS PARA AUMENTAR O ALCANCE DOS ENLACES

Antes do aparecimento dos amplificadores ópticos, os regeneradores ópticos eram os únicos dispositivos que compensavam as degradações impostas ao sinal. Um regenerador funciona da seguinte forma: toma o sinal óptico a ser regenerado, converte em sinal elétrico, realiza a reformatação, a retemporização e a reamplificação, e então converte o sinal regenerado para o âmbito óptico, dando continuidade à transmissão do sinal. O problema é que a capacidade de transmissão dos sistemas, e conseqüentemente a taxa de transmissão, aumentou significativamente e os circuitos eletrônicos responsáveis pela regeneração do sinal se tornaram caros e complexos. Com isso, aumentou a necessidade de que o processo de amplificação acontecesse no âmbito óptico gerando o surgimento de amplificadores totalmente ópticos.

O fato dos íons trivalentes de Érbio (Er^{3+}) emitirem fluorescência exatamente na faixa de comprimentos de onda onde as perdas nas fibras de sílica são mínimas, consolidou o uso dos amplificadores ópticos, especialmente os amplificadores a fibra dopada com Érbio (**EDFA**, *Erbium Doped Fiber Amplifier*) em sistemas de alta capacidade. As grandes vantagens dos amplificadores ópticos são: a indiferença quanto ao formato e taxa do sinal contendo a informação e o largo espectro de amplificação, permitindo o uso de tecnologia WDM.

Os amplificadores ópticos funcionam de uma forma relativamente simples. Algum dispositivo gera inversão de população entre níveis de energia e quando um fóton passa pelo material ocorre um processo de emissão estimula, ou seja, um elétron decai do nível superior de energia para o nível inferior e, por conseqüência, um fóton é gerado com mesmo comprimento de onda, fase e polarização do fóton incidente. Com isso, o número de fótons aumenta e assim a amplificação é obtida. A inversão de população pode ser obtida por injeção de portadores, em amplificadores ópticos de semicondutor (**SOA**, *Semiconductor Optical Amplifiers*), ou por bombeamento com um laser em um comprimento de onda

adequado. Os amplificadores que utilizam bombeamento óptico são: amplificadores a fibra dopada com Érbio (**EDFA**, *Erbium Doped Fiber Amplifiers*), usados para a banda *C* e muitas vezes para a banda *L*; amplificadores a fibra dopada com Túlio (**T DFA**, *Thulium Doped Fiber Amplifiers*), usados para a banda *S*; amplificadores Raman (**RFA**, *Raman Fiber Amplifiers*), usados para todas as bandas.

Além da emissão estimulada, existem processos de emissão espontânea. Esta emissão espontânea pode ser amplificada (**ASE**, *Amplified Spontaneous Emission*) e atuar como ruído para um sinal que está sendo amplificado. Para quantificar a degradação imposta pelo ruído, é comum definir uma medida de qualidade quanto a ruído chamada de Figura de Ruído (**NF**, *Noise Figure*). A figura de ruído quantifica a relação entre a relação sinal ruído (**OSNR**, *Optical Signal to noise Ratio*) na entrada e na saída. As principais componentes que contribuem para degradação do sinal é o batimento entre sinal e ruído e o ruído balístico. A figura de ruído pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$NF = 10 \log \left(\frac{2P_{ASE}}{h\Delta\lambda G} + \frac{1}{G} \right), \quad (10.5)$$

onde P_{ASE} é a potência de ASE, G é o ganho linear do amplificador, e $\Delta\lambda$ é a banda óptica utilizada.

10.6. TECNOLOGIA WDM

Os sistemas com multiplexação por divisão de comprimentos de onda (**WDM**, *Wavelength Division Multiplexing*) funcionam dentro da região infravermelha do espectro eletromagnético, semelhantemente ao FDM. Cada portadora óptica, em um comprimento de onda diferente, pode carregar vários canais elétricos que foram multiplexados com técnicas FDM e TDM. No WDM, portanto, percebe-se um outro nível de multiplexação, exclusivo ao sistema de fibra óptica e não presente nos sistemas puramente elétricos. As bandas utilizadas em sistemas de comunicações ópticas estão apresentadas na tabela abaixo e estão mostradas na Fig. 10.8.

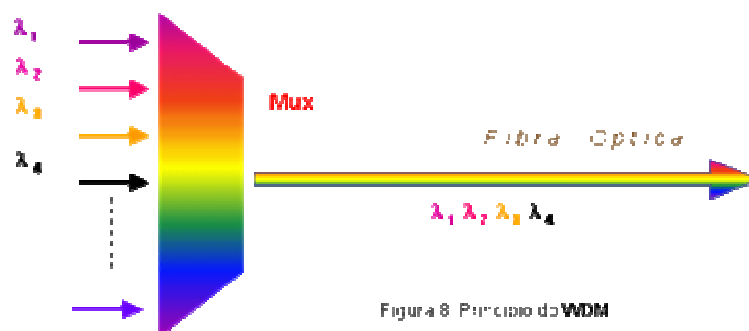


Figura 10.7 – Esquema ilustrativo de um multiplexador WDM.

Tabela 10.1 – Bandas utilizadas em sistemas WDM.

Banda	Descrição	Faixa de comprimento de onda
O	Original	1260 – 1360
E	Extended	1360 – 1460
S	Short Wavelength	1460 - 1530
C	Conventional	1530 - 1565
L	Long Wavelength	1565 - 1625
U	Ultra-Long	1625 – 1675

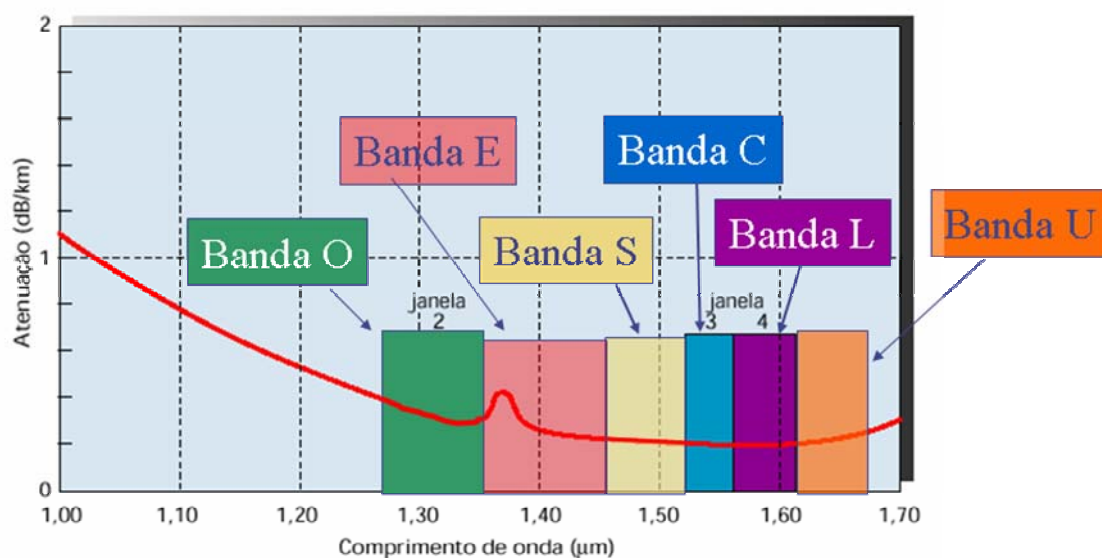


Figura 10.8 – Ilustração das bandas de transmissão para sistemas de comunicações ópticas.

Os principais componentes utilizados para propiciar o funcionamento de sistemas WDM são os Multiplexadores (**MUX**, *Multiplexer*), que agregam os canais operando em

diferentes comprimentos de onda vindos de diferentes fontes em uma única fibra para transmissão, e os demultiplexadores (**DEMUX**, *Demultiplexer*), que fazem exatamente o oposto. Os MUX podem funcionar a base de acopladores (divisores de potência), formando combinadores. Os DEMUX funcionam a base de filtros interferométricos seletivos em comprimento de onda. Tanto os MUXs, quanto os DEMUXs, são dispositivos totalmente passivos.

As principais características técnicas que se deve atentar no MUXs/DEMUXs são o número de canais e os seus comprimentos de onda. As principais características técnicas que se deve atentar no MUXs/DEMUXs são: Largura de banda a 1 dB: 0,1 – 0,4 nm; Isolação entre canais: ~ 25 dB; Perda: ~ 0,2 – 7 dB; PDL: ~ 0,1 – 0,5 dB; Coef. Térmico: ~ 0,01 nm/oC.

10.7. TAXA DE ERRO POR BIT

A Taxa de erro por bit (**BER**, *Bit Error Rate*) quantifica o desempenho do sistema de comunicação (transmissão e recepção). Geralmente é utilizado como uma medida de qualidade de serviço. BER de 2×10^{-6} significa 2 bits errados em um milhão (10^6) de bits transmitidos. Em sistemas ópticos a exigência é de BER de 10^{-9} ou 10^{-12} , dependendo do tipo de aplicação. A BER pode ser estimada a partir de modelos provenientes da teoria de comunicação digital considerando o ruído como gaussiano branco.

10.8. CONECTORES ÓPTICOS

Diferentemente dos sistemas elétricos onde o simples contato faz conduzir elétrons entre fios, as fibras ópticas apresentam algumas peculiaridades para a junção de trechos de fibras ópticas. Para isto são necessários os conectores ópticos, que permitem a transferência adequada de luz de uma fibra para outra. Os tipos de conectores mais comuns estão apresentados na Fig. 9, são eles: o conector FC e o SC. O FC é mais utilizado para experimentos e medições, já que apresenta um elemento de fixação com rosca. Contudo, em aplicações práticas é mais comum a utilização de conectores SC que são de encaixe.

Fora isso, existe a questão da superfície. Quando a superfície de contato é perpendicular ao eixo longitudinal da fibra óptica, diz-se que o contato é PC (*Physical Contact*). Já quando este contato é angulado (normalmente com 8° em relação ao eixo longitudinal da fibra óptica), diz-se que o contato é APC (*Angled Physical Contact*). Normalmente a ponta do conector é feito de cerâmica, quando este conector é metalizado na ponta, diz-se que este contato é UPC (*Ultra Physical Contact*). No cálculo de potência de um enlace é comum considerar a perda de uma conexão como 0,5 dB.

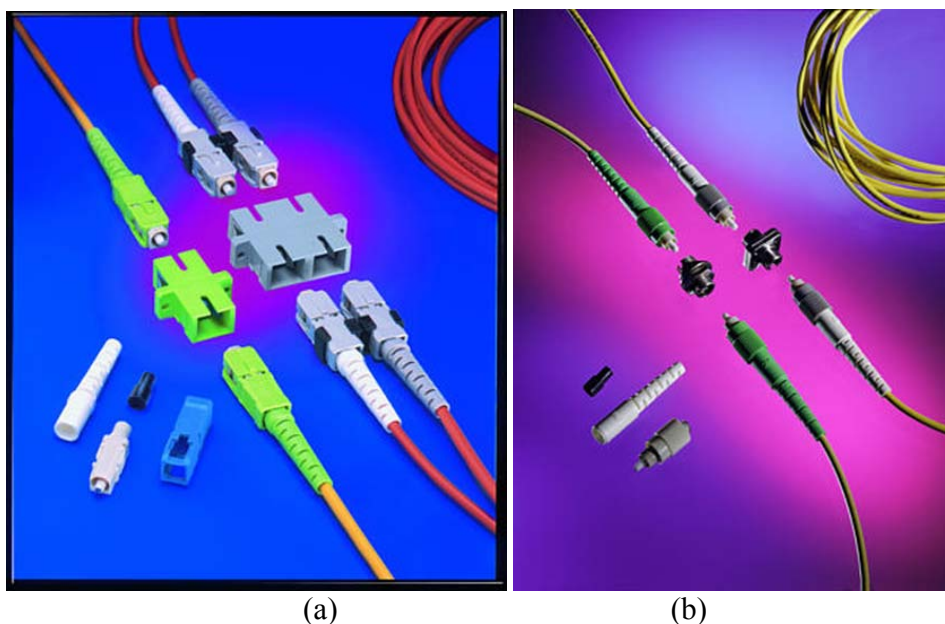


Figura 10.9 – Conectores ópticos tipo (a) SC e (b) FC.

Para conexões definitivas é comum utilizar máquinas de emenda por fusão para emendar trechos de fibras. A emenda é realizada colocando as fibras alinhadas e bem próximas, e disparando um arco voltaico na região da emenda. A perda típica de uma emenda por fusão é de 0,1 dB.

Note que em enlaces longos, deve-se considerar o tamanho das bobinas de fibras para calcular a quantidade de emendas e inserir a perda causada pelas emendas no cálculo de potência do enlace.

10.9. REDES ÓPTICAS

O aumento da demanda por capacidade de transmissão de dados tem impulsionado os recentes avanços da indústria de telecomunicações. Os sistemas de comunicações ópticas se mostram como os melhores candidatos para prover esta alta capacidade de transmissão. Todavia, para prover flexibilidade e devido a novos elementos de redes como OADMs (optical add and drop multiplexers) e OXCs (optical cross-connects), os sistemas ponto-a-ponto estão evoluindo para topologias de rede totalmente transparentes. Nas redes totalmente transparentes os canais são transmitidos por nós de rede intermediários no domínio óptico sem regeneração. Um exemplo de nó totalmente óptico está mostrado na Fig. 10.10. Cada *switch* é responsável por gerenciar um comprimento de onda e os comprimentos de onda são separados e juntos com MUX e DEMUX.

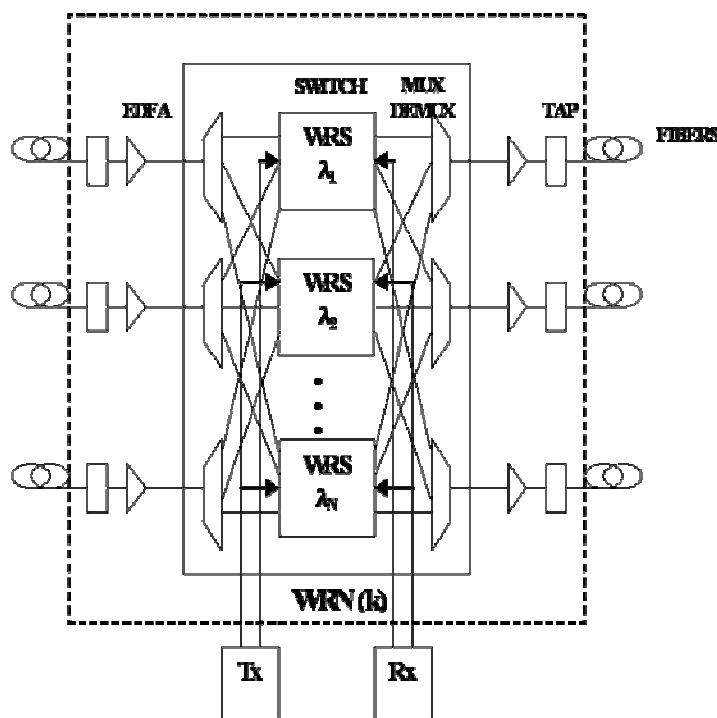


Figura 10.9 – Estrutura de um nó de uma rede óptica totalmente transparente.

Esta migração, apesar das vantagens, implicou em um novo problema, a determinação do caminho do sinal dentro da rede por nós intermediários e a escolha do canal dentre os canais disponíveis. O responsável por resolver este problema é o algoritmo de Roteamento e Alocação de Comprimento de Onda (**RWA**, *Routing and Wavelength Assignment*). O processo de RWA torna-se complexo pelo contínuo processo de

provisionamento de novas conexões e a retirada das conexões encerradas, já que isto implica numa constante variação da potência óptica total circulando pela rede, levando a variações da relação sinal-ruído das conexões sobreviventes devido a processos dinâmicos como saturação de ganho e transientes de ganho em amplificadores ópticos, cross-talk em roteadores ópticos, PMD e efeitos não-lineares nas fibras ópticas. Nas redes ópticas transparentes, o RWA é determinado pela camada de gerência levando em consideração a camada física. Os algoritmos de roteamento mais usados são os que calculam a menor distância, menor número de saltos e melhor distribuição de carga.

10.10. LEITURA COMPLEMENTAR

Abaixo estão relacionadas algumas referências para leitores que desejem obter mais informações sobre os variados assuntos.

COMUNICAÇÕES ÓPTICAS

- [Fukuchi 2001]
- G. P. Agrawal. Fiber-Optic Communication Systems. 3a Edição, Nova Iorque, John Wiley & Sons, 2002.

REDES ÓPTICAS

- R. Ramaswami, K. N. Sivarajan. Optical Networks. A Practical Perspective. 2a Edição, Londres, Morgan Kaufmann Publishers, Academic Press, 2002.

10.11. EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

Fora isso, existe a questão da superfície. Quando a superfície de contato é

10.12. EXERCÍCIOS PROPOSTOS

10.12.1. Considere que queremos interligar duas cidades distantes de 320 km com fibra óptica. Decidimos que vamos utilizar um detector que tem sensibilidade de -37 dBm em 1550 nm, fibra óptica com perda de 0,2 dB/km e dois amplificadores com ganho de 12 dB. Qual a mínima potência do laser de sinal?

10.12.2. Considere que queremos interligar duas cidades distantes de 100 km com fibra óptica. Sabendo que o coeficiente de dispersão é 1 ps/km.nm e a largura de linha é de 0,1 nm. Qual a máxima taxa permitida?