

FIBRAS ÓPTICAS

1. Introdução

1.1. Histórico

Como o próprio nome sugere, telecomunicações são as comunicações que acontecem a distância, através de um sistema que propicie esta comunicação. Normalmente estes sistemas são baseados em recursos ópticos ou elétricos, não obstante, é conceitualmente correto dizer, por exemplo, que psicocinese, transmissão de pensamento, comunicação sonora de longo alcance, também são formas de Telecomunicações.

É quase que desnecessário falar da importância deste assunto, em tempos em que os deslocamentos físicos são extremamente conturbados e que a interação entre as pessoas aumenta em progressão geométrica. A única solução capaz de responder a estas demandas é a crescente convergência da comunicação e de novos serviços sobre as redes de Telecomunicações, Telebanco, Telecompras, TV a Cabo, Internet em alta velocidade, Comunicação global a nível de voz, serviços por demanda, e que só se toma possível através das Telecomunicações.



Figura 1-1: Exemplo de comunicação de voz entre dois pontos.

O homem há muito tempo demonstra o interesse em transmitir informações de um lugar distante a outro, utilizando a comunicação óptica. Na antiga Grécia, quando Clytaimestra

solicitou a Agamemnon para enviar-lhe uma mensagem utilizando uma rede de tochas em cadeia, estando este em Tróia e ela em Mycaene, com o intuito de informá-la do momento da saída de Trojan War da cidade de Tróia (permitido-a planejar a morte de Trojan War); ela possivelmente não considerou que este fato consistiria no primeiro relato documentado de transmissão de mensagem utilizando recursos ópticos.

Ainda na Grécia antiga, Políbio (200 a 120 A.C.) podia transmitir qualquer mensagem através de dois conjuntos de tochas dispostos um na esquerda e outro na direita, tendo como referência um quadro contendo o alfabeto grego, disposto em linhas e colunas.

	1	2	3	4	5
1	α	ζ	λ	π	φ
2	β	η	μ	ρ	χ
3	γ	θ	ν	σ	ψ
4	δ	ι	ξ	τ	ω
5	ε	κ	ο	υ	ς

Figura 1-2: Quadro representativo do alfabeto grego.

A figura 1-2 apresenta a tabela, com o alfabeto grego, utilizada para decodificar a mensagem das tochas. Os números em itálico (superior) eram representados pela quantidade de tochas posicionadas à direita, enquanto os números em normal (lateral) pela quantidade à esquerda.

No final do século XVIII, uma informação podia ser transmitida, de forma óptica, por uma distância de 423km desde Paris até Strasburg em apenas 7 minutos. O equipamento usado era um telégrafo óptico (semelhante a uma letra T), com torres intermediárias para transmitir sinais móveis que eram vistos por telescópios. Este recurso permitia um número de 256 combinações possíveis.



Figura 1-3: Exemplo representando a transmissão através de tochas na antiga Grécia. No caso a letra indicada pelo cruzamento 3x2 é "O".

Transpondo isto para código binário, apenas para exemplificar, equivale a dizer que este sistema permitiria o envio de uma palavra de 8 bits, dentro de certos limites.

No século XIX, grandes avanços foram obtidos no campo da óptica destacando-se dentre eles o físico inglês John Tyndall que verificou o princípio de guiamento da luz dentro de um jato de água, demonstrando assim, o fenômeno da reflexão total da luz (princípio básico para transmissão óptica).

Figura 1-4: Exemplo de um telégrafo óptico por barras.

Outra grande contribuição à ciência foi prestada pelo inventor Alexandre Graham Bell, que utilizando um fotofone (por ele patenteado), possibilitou a primeira transmissão de



voz, através de luz não guiada. Usando lentes e espelhos, incidia-se a luz em um diafragma, que vibrava com a voz do locutor e modulava a luz. O receptor, a uma distância de 200m, possuía um foto-resistor de selênio que variava a resistência conforme a luz modulada incidente e, assim variava a corrente que circulava por um fone, que reproduzia a voz do locutor.

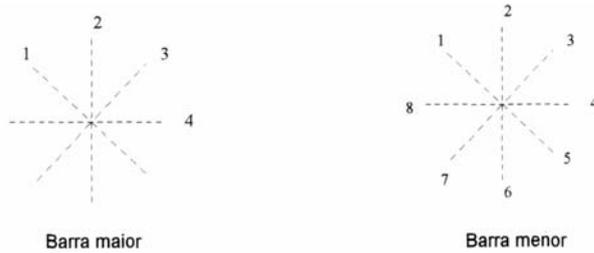


Figura 1-5: Número de combinações possíveis para o telégrafo óptico por barras.

A partir destes experimentos, iniciou-se no século XX as primeiras investigações e experimentos em busca de um guia de luz conveniente. Cronologicamente pode-se estabelecer as seguintes datas como pontos de clivagem na história da comunicação óptica:

- 1956. Primeiro esboço de um sistema a luz de laser;
- 1960: Desenvolvido o primeiro sistema laser, pelo físico Theodore Maiman;
- 1966: Proposto o uso de fibras de vidro como meio de transmissão eficiente à luz de laser, pelos pesquisadores Charles Kao e Charles Hockham na Inglaterra. A atenuação da fibra era em torno de 1000 dB/km;
- 1970: *Primeira experiência concreta utilizando sistemas a emissão e detecção da luz de laser*, usando como meio de transmissão a fibra de vidro, hoje fibra óptica. Conseguiu-se resultados espantosos com atenuações em 20dB/km.

A partir deste feito, os avanços visando a comunicação por meio óptico propiciou o desenvolvimento dos componentes emissores e receptores ópticos a partir de semicondutores, dos conectores ópticos, das emendas ópticas, e das tecnologias de transmissão.

Atualmente existem sistemas de comunicação óptica operando com taxas de transmissão de 80Gbps (WDM) em uma única fibra óptica, apenas pela variação do comprimento de onda da luz do laser, a distâncias superiores a 80km sem a necessidade de regeneração do sinal.

1.2. Princípios de Comunicação via Fibra Óptica

Embora os sistemas de transmissão por meio físico estivessem constantemente gerando inovações tecnológicas e aprimoramento, estas inovações jamais puderam ser consideradas revolucionárias. Foi a partir do desenvolvimento do LASER semicondutor e das fibras ópticas e do avanço na tecnologia digital que ocorreu uma mudança radical na tecnologia das comunicações. Este desenvolvimento tomou possível a conversão de sinais *elétricos em sinais ópticos e sua transmissão* a longa distância em fibras da espessura de *um fio de cabelo* feitas de cristal de sílica. Foi o início de uma nova era nas comunicações, com os cabos de cobre sendo gradualmente substituídos por cabos de fibras ópticas. Embora os cabos de cobre já existentes continuem sendo utilizados na digitalização das redes de comunicação, novas ligações por meio físico por todo o mundo estão sendo equipadas quase exclusivamente com cabos de fibras ópticas.

A comunicação por ondas luminosas consiste na modulação de um feixe de luz de forma analógica ou digital pelo sinal modulante. Sendo o meio de propagação do feixe óptico a fibra óptica. O sistema básico de transmissão por fibras ópticas, pode ser representado conforme a figura abaixo:

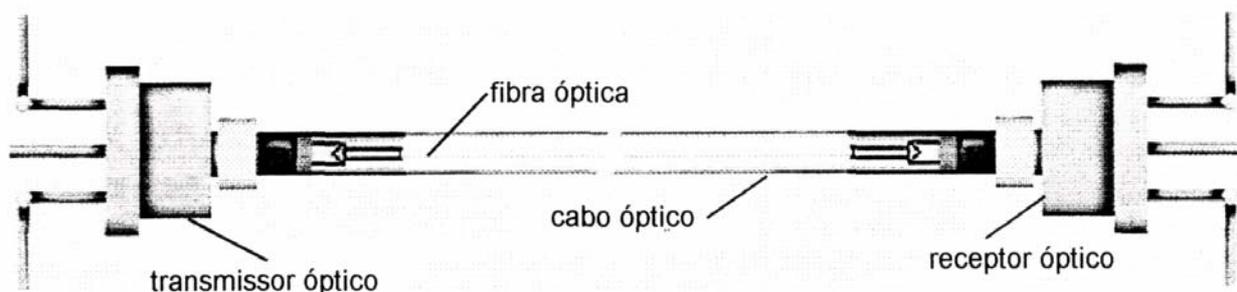


Figura 1-6: Princípio da transmissão usando luz laser.

- **Transmissor Óptico:** Um diodo emissor de luz (LED) ou um diodo laser (LD) é utilizado como transmissor óptico. Estes dispositivos convertem um sinal elétrico digital ou analógico em um sinal óptico apropriado para a transmissão.
- **Fibra Óptica:** É um guia de onda dielétrico com estrutura circular cilíndrica e seção circular reta que funciona como meio de transmissão a longa distância sem interferência externa para a luz produzida pelo transmissor óptico.
- **Cabo Óptico:** É o dispositivo *composto* por uma *ou diversas* fibras ópticas. *Na prática* as fibras necessitam de uma proteção para garantir suas características de transmissão. Isto é conseguido com uma série de revestimentos que são aplicados nas fibras de acordo com a aplicação a que se destina. O revestimento aplicado visa proteger as fibras do meio ambiente e de esforços mecânicos sofridos durante a instalação ou operação.
- **Receptor Óptico:** Um diodo PIN ou um fotodiodo de avalanche (APD) são utilizados como receptores ópticos. Estes dispositivos convertem o sinal óptico novamente em um sinal elétrico.

1.3. Vantagens e Desvantagens

O crescente uso das fibras ópticas se deve as diversas vantagens que esta apresenta em relação aos cabos de cobre e sistema via rádio. Existem muitas razões que fizeram das fibras ópticas líderes na tecnologia de transmissão de sinais. Problemas associados com os cabos de cobre e sistema via rádio, como interferência eletromagnética (EMI), interferência de radiofrequência (RFI), juntores e diafonia estão completamente eliminados pelas propriedades de transmissão das fibras ópticas.

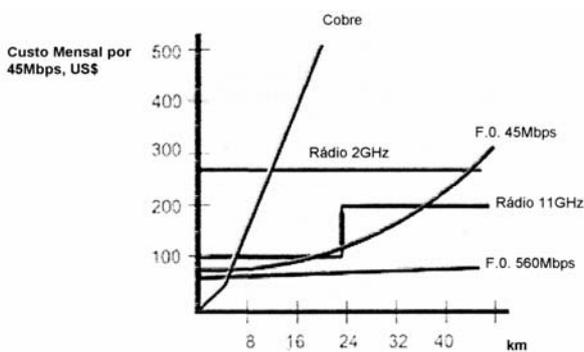


Figura 1-7: Estudo comparativo de sistemas

Observe que na figura 1-7 deve-se tomar o cuidado quando se dimensionam sistemas para curtas distâncias. Neste caso, especificamente, enlaces a cobre possuem um custo muito menor que fibras ópticas. A medida em que se aumentam as distâncias entre o emissor e o receptor de uma informação, os sistemas a fibra e a rádio tomam-se atraentes, sendo aquele, o que apresenta melhor relação.

1.3.1 Principais Vantagens das Fibras Ópticas

A capacidade da fibra em conduzir uma enorme quantidade de informações com baixa perda e a baixo custo torna sua aplicação extremamente vantajosa. Têm-se como vantagens os seguintes tópicos:

• Baixa Atenuação

A baixa atenuação possibilita enlaces de maiores distâncias com poucos repetidores de sinal, representando uma diminuição nos investimentos para implantação dos sistemas de transmissão e os gastos com a posterior manutenção. Hoje é possível implementar enlaces em tomo de 200 km sem uso de repetidores.

• Largura de Banda

Como as fibras ópticas permitem a transmissão de sinais da ordem de 1THz, a excelente performance das fibras ópticas permitem maior capacidade de transmissão superando os meios de transmissão convencionais. Atualmente, mais de 120.000 canais de voz podem ser transmitidos em uma única fibra.

• Imunidade a Interferências Externas e Isolação Elétrica

A fibra é feita de material dielétrico, por isso não é afetado por interferência eletromagnética (EMI) e interferência de radiofrequência (RFI), o que torna viável sua utilização em sistemas que podem sofrer degradações causadas por descargas elétricas e instalações elétricas de alta tensão, além de eliminar o uso de sistemas de proteção contra centelhamento, para utilização em áreas de atmosfera explosiva.

• Baixo Peso e Pequena Dimensão

A fibra óptica pesa, aproximadamente, 30 g/km. Se compararmos um cabo óptico a um cabo de cobre com a mesma capacidade, notamos que o de fibras ópticas é 20 vezes mais leve, além da menor dimensão. Isso o torna mais viável em aplicações onde peso e dimensão são parâmetros importantes, como em cabos aéreos, etc.

- **Sigilo**

Como é difícil retirar ou colocar sinais ópticos ao longo de uma fibra sem que o sistema seja prejudicado, o sigilo pode ser adicionado como um benefício.

- **Baixo Preço da Matéria Prima**

A matéria prima utilizada para fabricação do vidro é a sílica, amplamente encontrada na natureza.

1.3.2 Principais Desvantagens das Fibras Ópticas

Apesar das vantagens citadas anteriormente, existem ainda algumas desvantagens e cuidados quanto à utilização das fibras ópticas. Destacam-se entre elas:

- **Emenda da Fibra Óptica**

Se não forem tomados os cuidados necessários nas emendas das fibras, poderá haver grande perda da potência óptica nessa emenda. Para que uma emenda seja bem feita, é necessário utilizar equipamentos especiais e pessoas treinadas a operá-los. Isso pode acarretar em maior tempo e custo para fazer manutenção em cabos que tenham sofrido rompimento.

- **Derivações Limitadas**

Existem limitações quanto ao uso de derivações passivas, pois os componentes utilizados para esse fim, atenuam consideravelmente o sinal, dificultando ligações do tipo ponto a multiponto.

- **Padrão dos Sistemas Ópticos**

Não existem padronizações para conectores, interfaces, códigos digitais e comprimentos de onda. No momento atual apenas alguns padrões estão definidos, como os códigos de linha para SDH.

- **Efeitos da Radiação Laser**

Apesar do nível de potência óptica não ser elevado, pessoas envolvidas com trabalho de instalação ou manutenção devem usar protetores para os olhos quando estiverem perto de lasers ou em uma extremidade da fibra óptica, prevenindo danos aos olhos.

2. Conceitos de Física Óptica

2.1 Luz

Segundo Maxwell, a luz é produzida pela vibração de partículas (fótons) carregadas eletricamente, gerando uma série de ondas do tipo eletromagnética, que se propagam em linha reta em todas as direções e sentidos, com velocidade dependente do meio, sendo a velocidade da luz no vácuo igual a 300.000km/s. A luz é composta por energia eletromagnética e comporta-se como uma onda de rádio, de radar, de microondas e dos raios X.

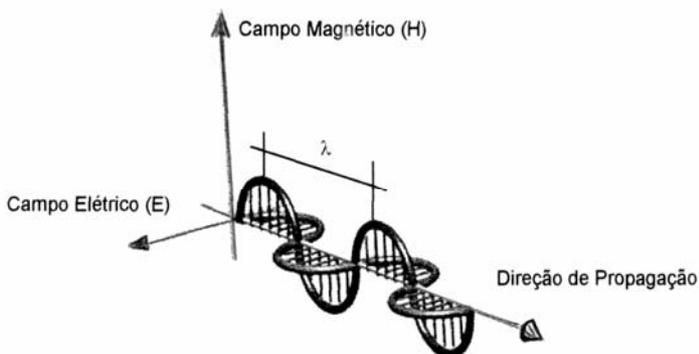


Figura 2-1: Gráfico representativo do campo eletromagnético e elétrico versus a direção de propagação da luz.

A distinção entre as ondas eletromagnéticas é feita pela frequência ou pelo comprimento de onda. Matematicamente a frequência (f), o comprimento de onda (λ) e a velocidade da onda (V) estão relacionados pela seguinte equação:

$$\lambda = V/f$$

A frequência é medida em Hertz, o comprimento de onda em metros e a velocidade da onda em m/s. O espectro de frequência utilizado, apesar de não padronizado, está entre $7,5 \times 10^{10}$ Hz e $6,0 \times 10^{16}$ Hz e constitui apenas uma pequena porção do espectro eletromagnético. O espectro óptico está dividido em três faixas denominadas de banda ultravioleta, banda visível e banda infravermelho. As bandas ultravioleta e

infravermelho não são visíveis pelo ser humano. As radiações usadas atualmente em comunicações ópticas estão na faixa da luz infravermelha, com comprimento de onda variando de 800nm a 1700nm. Vale lembrar que em comunicações ópticas, a referência em relação ao espectro eletromagnético utilizado é sempre em relação ao comprimento de onda e não em relação à frequência, por simples convenção e diferenciação com outros sistemas de transmissão, como as transmissões via rádio, sempre referenciadas à frequência; Rádio 4,7 GHz, por exemplo.

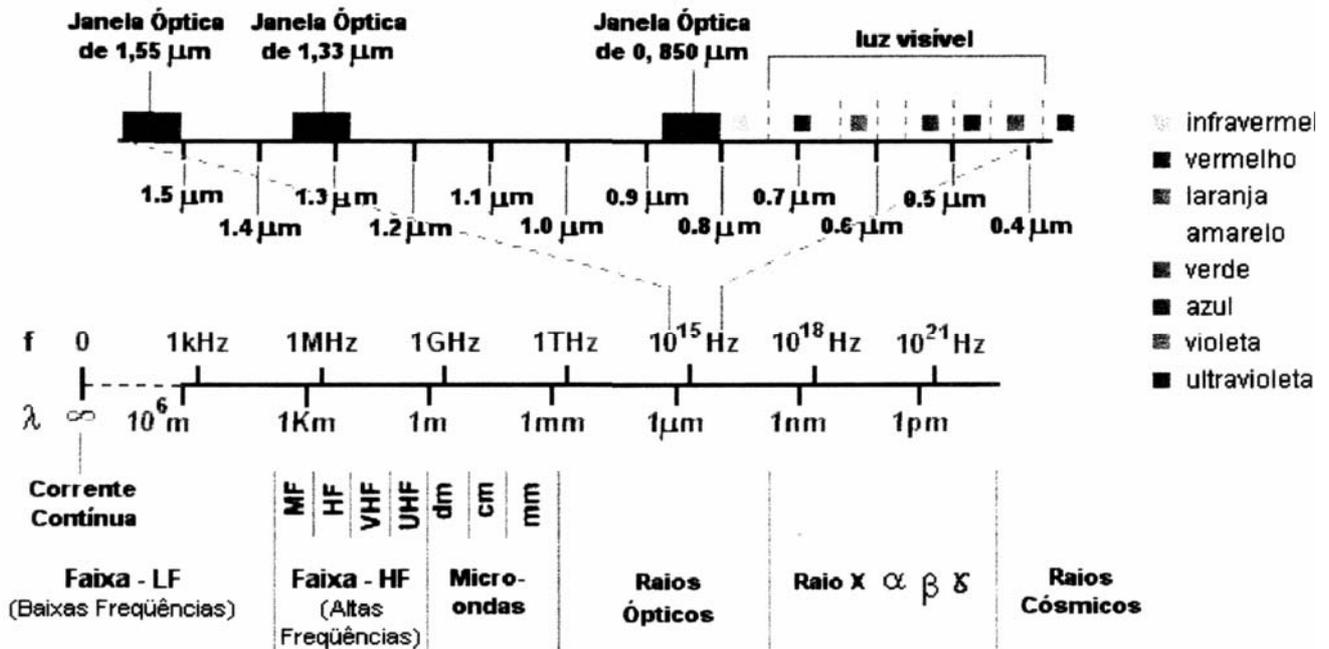


Figura 2-2: Espectro Eletromagnético

2.2 Reflexão e Refração da Luz

Quando a luz colide em uma superfície diferente da qual foi originada, dois fenômenos podem ser observados: **refração** e **reflexão**.

2.2.1 Refração

É a mudança de direção que a luz sofre quando passa de um meio para outro de densidade diferente, de acordo com a variação da velocidade luz.

- Ângulo de incidência (α) é o ângulo formado pelo raio incidente e a normal à superfície;
- Ângulo de refração (β) é o ângulo formado pelo raio refratado e a normal à superfície;
- O ângulo de refração depende do ângulo de incidência e dos meios 1 e 2;
- Quando a luz atravessa de um meio **mais denso** para um meio **menos denso** a luz tende a se **afastar** da normal à superfície;
- Quando a luz atravessa de um meio **menos denso** para um meio **mais denso** a luz tende a se **aproximar** da normal à superfície.

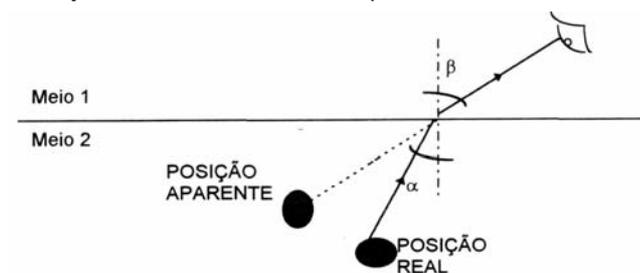


Figura 2-3: Refração

É o parâmetro óptico que caracteriza qualquer meio transparente. O índice de refração é definido como a relação entre a velocidade da luz no vácuo e a velocidade da luz no meio, matematicamente expresso como:

$$n = C/V$$

Onde:

C = velocidade da luz no vácuo

V = velocidade da luz no meio

Tabela comparativa de índice de refração e velocidade da luz em diferentes meios

Meio	Índice de Refração	Velocidade da Luz (km/s)
Vácuo	1,0	300.000
Ar	1,0003	300.000
Água	1,33	225.000
Vidro	1,5	200.000
Diamante	2,0	150.000
Silício	3,4	88.000
Arseneto de Gálio	3,6	83.000

2.2.2 Reflexão

É a mudança de direção que a luz sofre quando se choca contra uma superfície plana.

Analisando-se a figura conclui-se:

- O ângulo de incidência (α_i) é o ângulo formado pelo raio incidente e a normal a superfície;
- O ângulo de reflexão (α_r) é igual ao ângulo de incidência (α_i);
- O ângulo de reflexão depende do ângulo de incidência e dos meios 1 e 2.

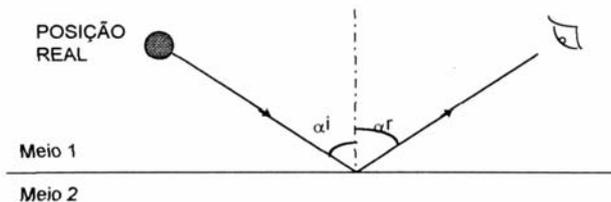


Figura 2-4: Reflexão

2.2.3 Lei de Snell

Segundo a **Lei de Snell**, quando um feixe luminoso ultrapassa de um meio para outro, existe uma razão constante entre o seno do ângulo de incidência α e o seno do ângulo de refração β definidos como :

Lei de Snell $n_1 \text{ sen}\alpha = n_2 \text{ sen}\beta$

Onde: n_1 é o índice de refração do meio 1 e n_2 do meio 2.

Na verdade, quando um raio luminoso incidir em uma superfície que separa dois meios com índice de refração diferente (p.ex. n_1 e n_2), este será dividido em duas componentes, uma irá **retratar** e a outra **refletir**.

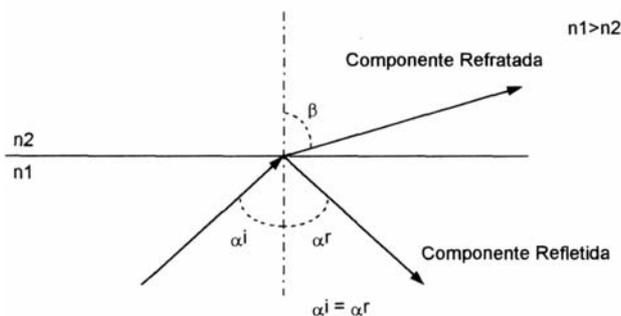


Figura 2-5: Fenômeno de refração e reflexão simultâneos

Aumentando o ângulo de incidência α , o ângulo de refração β se aproxima de 90° . Ângulo crítico é o ângulo de incidência que produz um ângulo de refração de 90° em relação a normal à superfície.

Se o ângulo de incidência α_i for maior que o ângulo crítico α_c , haverá reflexão total.

É importante salientar que para ocorrer reflexão total é necessário que duas condições sejam satisfeitas:

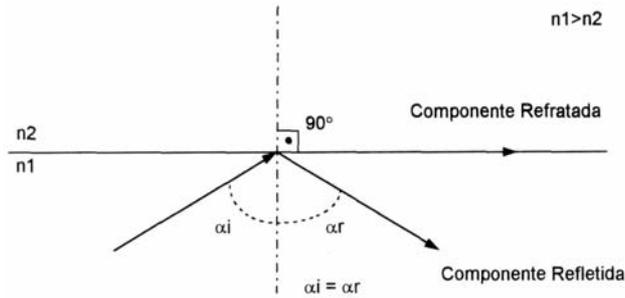


Figura 2-6: Fenômeno mostrando o ângulo de incidência crítico.

- O ângulo de incidência deve ser maior que o ângulo crítico;
- O sentido de propagação da luz deve ser do meio mais denso para o meio menos denso, obrigatoriamente.

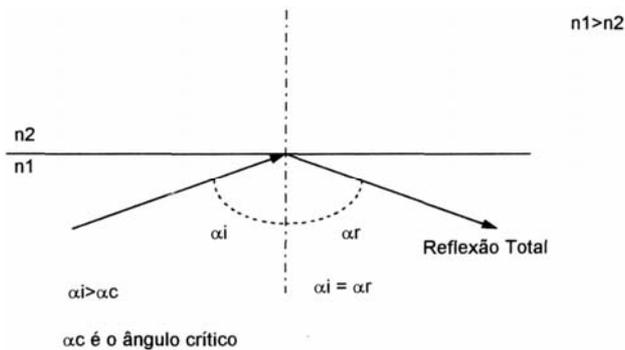


Figura 2-7: Fenômeno de reflexão total.

3. Caracterização de Fibras Ópticas

3.1 Fibra

A fibra óptica é um guia de onda dielétrico com estrutura cilíndrica e seção circular reta. Ao longo do comprimento da fibra a estrutura e a distribuição, em geral, são uniformes. É composta de duas partes:

- Núcleo: Parte central da fibra por onde a luz é guiada;
- Casca: Parte externa da fibra que envolve o núcleo, cujo índice de refração é menor que do núcleo para garantir que a luz se propague ao longo do núcleo pelo fenômeno da reflexão total ou interna (lei de Snell)

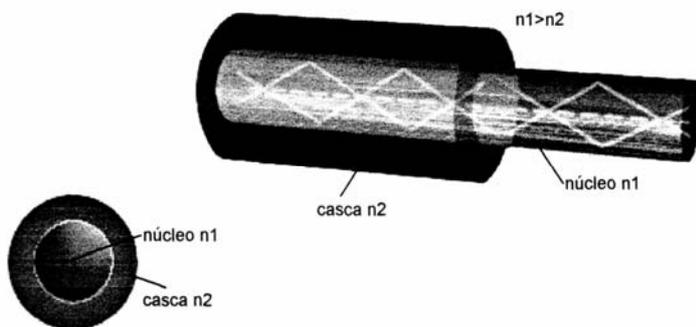


Figura 3-1: Estrutura interna de uma fibra óptica.

Na seção transversal, o índice de refração é maior no núcleo, n_1 (mais denso), que na casca n_2 (menos denso). O princípio básico de funcionamento da fibra consiste em que haja uma reflexão total dos raios de luz na interface entre o núcleo e a casca. Isto é conseguido utilizando-se índices de refração diferentes para o núcleo e a casca.

A variação de índice de refração na seção transversal da fibra é representada pelo **perfil de índices de refração** e é obtido usando-se diferentes materiais dielétricos ou diferentes dopagens na sílica usada para fabricação da fibra. Existem dois tipos de perfis de índices de refração para fibras:

- **Perfil Degrau:** o núcleo possui índice de refração constante maior que o da casca. Isto cria uma variação abrupta entre o núcleo e a casca;

- **Perfil Gradual:** a variação do índice de refração do centro da fibra em direção à casca diminui gradativamente.



Figura 3-2: Perfis de índices de refração **degrau** e **gradual**.

3.2 Princípio de Propagação da Luz na Fibra.

O mecanismo de propagação pode ser explicado, numa visão geométrica, através de fenômenos de reflexão e refração da luz na interface dielétrica conforme a **Lei de Snell**.

Para compreendermos como a luz é propagada na fibra óptica, ou como a luz é guiada, vamos aplicar um feixe na fibra, cujos índices de refração estão mostrados conforme a figura abaixo:

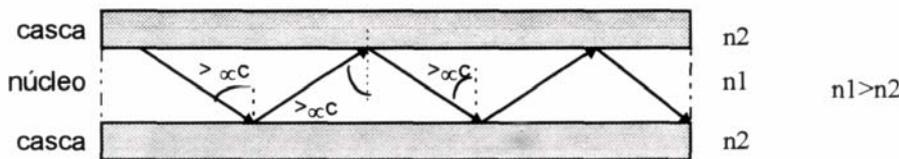


Figura 3-3: Fibra óptica com feixe de luz aplicado.

O raio de luz que incide na fronteira entre o núcleo e a casca com ângulo de incidência maior que o ângulo crítico, sofrerá reflexão total e voltará para o núcleo. O raio refletido tomou-se um raio incidente para a nova fronteira entre o núcleo e a casca. Este raio irá incidir com ângulo de incidência maior que o crítico e, portanto, sofrerá reflexão total, novamente retomando ao núcleo. Este raio refletido novamente irá se tornar um raio incidente e novamente sofrerá reflexão. Como podemos ver o processo é repetitivo, com sucessivas reflexões do raio luminoso. Desta forma é possível guiar a luz no núcleo através da reflexão interna total. É desta forma que ocorre o guiamento, na propagação de luz numa fibra óptica.

Portanto, qualquer raio incidente com ângulo superior ao crítico será totalmente refletido, sendo confinado no núcleo da fibra.

3.3 Freqüência Normalizada

As características de propagação da luz em uma fibra dependem de parâmetros estruturais, tais como a distribuição dos índices, o raio do núcleo da fibra (r), do comprimento de onda no espaço livre (λ), e da onda que se propaga através dela.

Estes parâmetros podem ser combinados em um parâmetro normalizado, v , denominado freqüência normalizada ou número v da fibra.

$$v = \frac{2\pi r}{\lambda} \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

3.4 Abertura Numérica

Abertura numérica é o parâmetro que indica a capacidade de captar luz de uma determinada fibra óptica.

O raio de luz emitido pelo transmissor deve ser acoplado ao núcleo da fibra óptica. Ao incidir na fibra, o raio sofre **refração**, mudando sua direção. É esperado que após a refração sofrida no acoplamento a direção do raio ainda possibilite **reflexão total** dentro da fibra, isto é, o ângulo de incidência na fronteira entre o núcleo e a casca seja maior que o ângulo crítico.

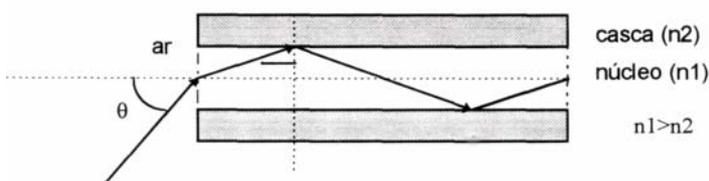


Figura 3-4: Ângulo máximo permitido para entrada de luz na fibra para propagação.

A Abertura Numérica é a medida do ângulo máximo que o raio de luz que irá ser acoplado ao núcleo da fibra pode formar com o eixo central da fibra para que se propague no núcleo pelo fenômeno de **reflexão**

total. Fisicamente, representa a capacidade de **absorção de luz** pela fibra, definindo o quanto de luz incidente sobre a extremidade da fibra é transmitida. Os raios que incidirem com ângulos superiores ao máximo serão refletidos de volta à fonte luminosa ou serão refratados na face entre os meios núcleo e casca.

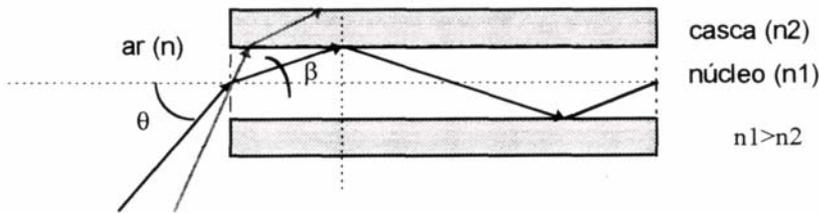


Figura 3-5: Figura representando a inserção de luz com ângulo acima da abertura numérica.

Matematicamente, abertura numérica é o seno do ângulo máximo de aceitação da fibra óptica.

$$AN = n \cdot \text{sen} \theta = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Onde:

AN = Abertura Numérica.

n = meio no qual a fibra está mergulhada.

θ = ângulo máximo entre o raio e o eixo da fibra óptica.

3.5 Modos de Propagação

Quando se estuda a propagação da luz por meios de raios, na verdade se está fazendo uma simplificação dos modos de propagação, tomando a visualização dos fenômenos mais simples.

Modos de propagação são determinados a partir das equações de Maxwell e representam as ondas eletromagnéticas que conseguem penetrar na fibra óptica e serem guiadas de maneira estável por esta. Simplificadamente podemos considerar modos de propagação como sendo todos os caminhos ou trajetórias que os raios luminosos podem percorrer dentro da fibra.

O número de modos pode ser estabelecido a partir de um parâmetro denominado frequência normalizada, representada pela letra v. Matematicamente:

$$v = (\pi \cdot d / \lambda) \cdot AN$$

Onde:

v = frequência normalizada

d = diâmetro do núcleo

λ = comprimento de onda

AN = abertura numérica

Assim, o número de modos que penetram na fibra, que pode variar desde 1 até 100.000, com ângulo de incidência menor que a abertura numérica, e se propagam por esta é, matematicamente:

$$N = v^2 / 2 \text{ para fibras de índice degrau}$$

ou

$$N = v^2 / 4 \text{ para fibras de índice gradual}$$

Exemplo:

Considerando uma fibra óptica com perfil de índice de refração degrau, diâmetro do núcleo de 100 μm, abertura numérica de 0,158 e comprimento de onda da luz de 900 nm, o número de modos transmitidos por esta fibra é:

$$v = (\pi \cdot 100 \times 10^{-6} / 900 \times 10^{-9}) \times 0,158 \text{-----} \rightarrow v = 55,2$$

Então:

$$N = 55,2^2 / 2 \rightarrow N = 1.524 \text{ modos}$$

Isto significa que, para esta fibra óptica, serão transmitidos 1.524 ondas de radiação eletromagnética, que se propagarão de diferentes formas nesta fibra.

3.6 Atenuação em Fibras Ópticas

Atenuação representa a perda de potência óptica dentro da fibra do ponto de transmissão ao ponto de recepção do sinal óptico.

3.6.1 Conceito de Atenuação

A atenuação é medida em dB e é expressa pela seguinte fórmula:

$$\text{atenuação} = 10 \log Ps/Pe$$

Onde:

Pe = potência óptica de entrada

Ps = potência óptica de saída

O coeficiente de atenuação é definido como a perda dada em dB a cada km da fibra óptica. É definido como:

$$\text{coeficiente de atenuação} = (10 \log Ps/Pe) / L$$

Onde:

L = comprimento da fibra óptica em km

3.6.2 Janelas de Transmissão

A atenuação varia em função do comprimento de onda da luz, ou seja, dentro de uma mesma fibra óptica a atenuação não é a mesma para diferentes comprimentos de onda da luz. Disto resulta a definição de janelas de transmissão. Janelas de transmissão são faixas dentro do espectro eletromagnético onde a atenuação em uma determinada fibra é menor. Atualmente estão definidas 3 janelas, 850 nm, 1.300 nm e 1.550 nm.

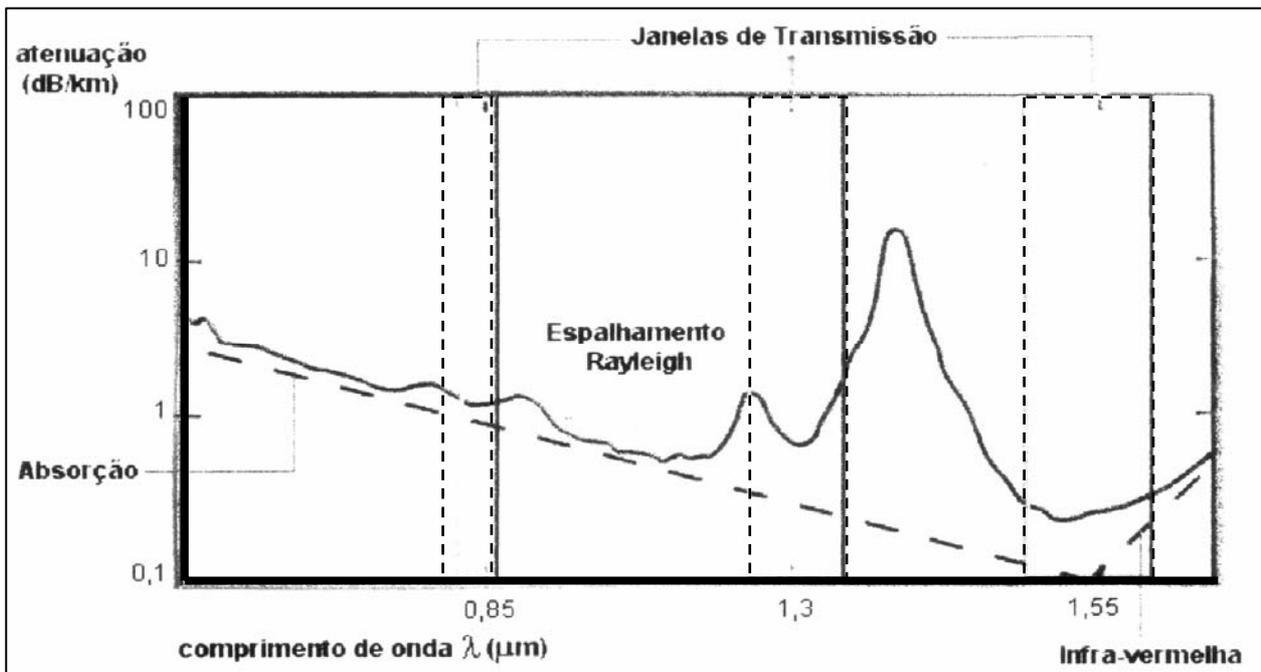


Figura 3-6: Gráfico apresentando as atenuações e as janelas de transmissão.

3.6.3 Principais Causas de Atenuação das Fibras Ópticas

3.6.3.1 Espalhamento

É causado por imperfeições da estrutura da fibra e se caracteriza pelo desvio da luz em várias direções.

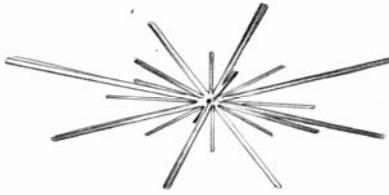


Figura 3-7: processo de espalhamento.

Processo de Espalhamento Linear de Rayleigh: Ocorre a transferência de potência de um modo propagante a outro, mantendo o mesmo comprimento de onda, provocado pelas não homogeneidades do silício e de natureza aleatória. Depende das flutuações de densidade do meio e variações na composição do vidro.

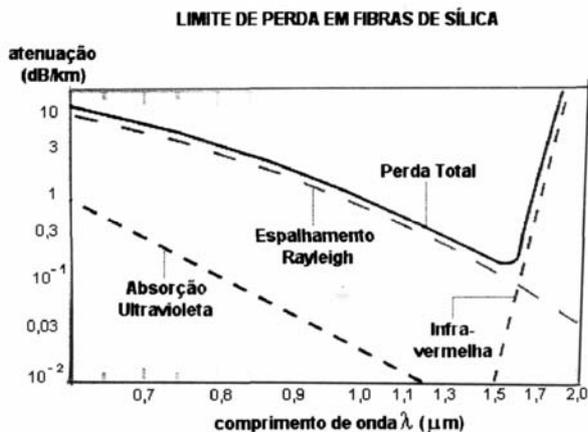
Processo de Espalhamento Linear de Mie: Ocorre a transferência de potência de um modo propagante a outro, mantendo o mesmo comprimento de onda, provocado pelas não homogeneidades e imperfeições na estrutura cilíndrica da fibra de dimensões da ordem de grandeza do comprimento de onda. Para minimizar o efeito, deve-se promover a remoção das impurezas na estrutura da fibra e ajustes no processo de fabricação.

Processo de Espalhamento Não Linear: Ocorre a transferência de potência de um modo propagante a outro, variando o comprimento de onda.

3.6.3.2 Absorção

É a resposta do material à luz incidente e depende do material (ressonâncias atômicas e eletrônicas). É o processo onde as impurezas na fibra absorvem parte da energia óptica e a dissipam em forma de calor. As impurezas são originárias do processo de fabricação da fibra. Algumas das impurezas mais importantes são os íons metálicos, como cromo, ferro, cobre, manganês e o íon OH, difícil de ser eliminado. A diminuição da absorção é essencialmente um problema de purificação da matéria prima da fibra, o vidro.

Existem dois tipos de absorção:



- **Absorção Intrínseca:** Inerente ao material, portanto não pode ser eliminada.

Figura 3-8: Limite de perdas em fibras de Sílica.

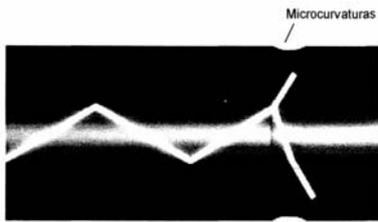


- **Absorção Extrínseca:** Devido a presença de dopantes.

Figura 3-9: Espectro de absorção para grupo OH em Sílica.

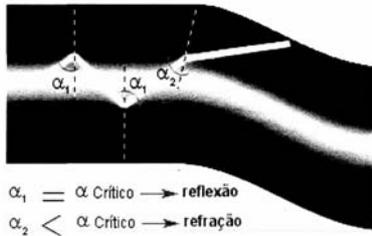
3.6.3.3 Deformações Mecânicas

As perdas por deformações mecânicas podem ser resultantes de dois tipos chamados de **microcurvaturas** e **macrocurvaturas**.



• **Microcurvatura:** É uma pequena deformação na fronteira entre o núcleo e a casca e pode ser provocada durante a fabricação da fibra óptica. Pode ter dimensões da ordem de grandeza inferior ou da mesma ordem de grandeza do raio da fibra.

Figura 3-10: Exemplo de microcurvatura.



• **Macrocurvatura:** É provocada quando a fibra é curvada com um raio suficientemente pequeno de modo que os raios internos deixem de ser refletidos internamente e passem a ser absorvidos pela casca.

Figura 3-11: Exemplo de macrocurvatura.

3.6.3.4 Perda por Reflexão de Fresnel

E a perda provocada no momento em que a luz é inserida na fibra e no momento em que sai da fibra. Isso ocorre devido à diferença entre os índices de refração dos meios onde ocorre a propagação da luz.

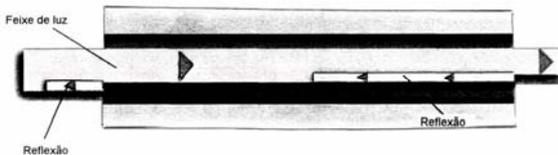


Figura 3-12: Reflexão de Fresnel

3.7 Dispersão

A dispersão é um fenômeno resultante dos atrasos relativos na propagação dos modos e componentes espectrais que transportam energia luminosa. A dispersão produz uma distorção nos sinais transmitidos impondo limitação na capacidade de transmissão. A distorção é percebida como o alargamento do pulso que se propaga na fibra.

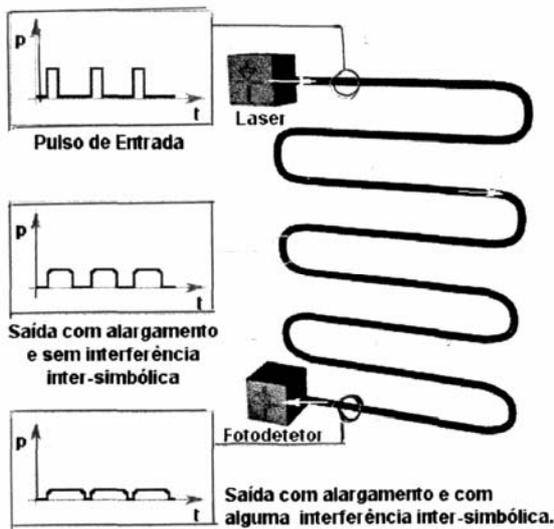


Figura 3-13: Exemplo do efeito da dispersão na transmissão óptica.

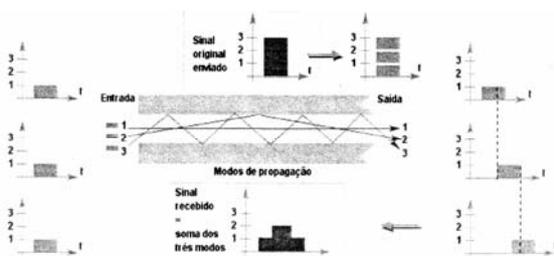
Esse alargamento ocorre em três tipos de dispersão:

- dispersão modal
- dispersão do material
- dispersão do guia de onda

3.7.1 Dispersão Modal

Este tipo de dispersão ocorre nas fibras multimodo e é provocado pelos diferentes trajetos (modos) de propagação da luz e por conseqüência, o seu tempo de percurso no núcleo das fibras.

Figura 3-14: Dispersão modal.



3.7.2 Dispersão do Material (Cromática)

A dispersão do material ocorre em todas as fibras, pois cada comprimento de onda emitido pelo transmissor se

propaga com velocidade diferente. A dispersão do material é menor quanto menor a largura espectral da fonte luminosa.

Este tipo de dispersão é um parâmetro que depende da dopagem da fibra e pode ser modificado dentro de certos limites. Ele se deve a propriedades dispersivas do material do guia de onda. É resultante do alargamento espectral finito devido à largura de linha das fontes de sinal propagante. Como conseqüência

provoca o alargamento de cada modo de transmitido e, portanto, dispersão intramodal que corresponde a diferentes atrasos na propagação dos modos.

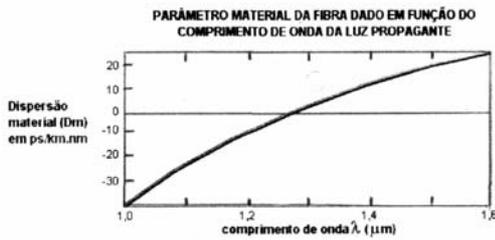


Figura 3-15: Dispersão cromática

3.7.2 Dispersão do Guia de Onda

Este tipo de dispersão é mais significativo em fibras que transmitem um único comprimento de onda (monomodo) e ocorre em função da variação dos índices de refração do

núcleo e da casca ao longo da fibra.

Outra causa importante de dispersão em fibras deste tipo, é causada pela dependência da constante de propagação β com o comprimento de onda, decorrente da estrutura do guia de onda, parâmetros geométricos e **perfil de índice de refração**, que aparecem na equação de autovalores característica do modo de propagação.



Figura 3-16: Dispersão do Guia de Onda

3.8 Tipos de Fibras Ópticas

De acordo com a forma de guiar os raios de luz pela fibra óptica, a fibra é denominada **multimodo** ou **monomodo**. Associado a estas duas terminologias, as fibras são classificadas segundo o **perfil de índice de refração** ou **gradual**. Como foi visto, a fibra óptica é constituída por duas partes, o núcleo e a casca, onde, o índice de refração do núcleo é maior que o da casca que o envolve. Desta forma, a luz se propaga ao longo do núcleo pelo fenômeno de reflexão total. Entretanto, na prática, as fibras são constituídas por **três** componentes básicos denominados **núcleo, casca e capa protetora**.

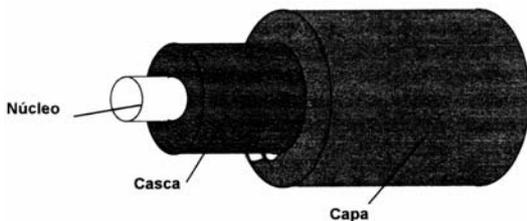


Figura 3-17: Estrutura de uma fibra óptica.

Onde:

•**Núcleo**: Parte central da fibra por onde a luz é guiada;

•**Casca**: Parte externa da fibra que envolve o núcleo, cujo índice de refração é menor que do núcleo para garantir que a luz se propague ao longo do núcleo pelo fenômeno da reflexão total (Lei de Snell);

•**Capa protetora**: geralmente formada por um polímero, que protege mecanicamente o núcleo e a casca, sem afetar suas propriedades físicas. A capa é agregada logo após a fabricação do núcleo e casca.

3.8.1 Fibra Multimodo

É a fibra óptica onde centenas de modos são propagadas. A fibra multimodo pode ainda ser classificada de acordo com o perfil de índice de refração. Existem dois tipos de fibra multimodo:

- Fibra multimodo de índice degrau;
- Fibra multimodo de índice gradual.

3.8.1.1 Fibra Multimodo Índice Degráu

Possui perfil de **índice de refração degráu**. O núcleo desta fibra pode ter um diâmetro de 50 μm até aproximadamente 600 μm . Isto representa um núcleo grande em relação as outras fibras, o que facilita o acoplamento óptico, ou seja, é mais fácil injetar luz em seu interior. Pelas dimensões envolvidas, a conexão também se torna mais fácil. Algumas das desvantagens são: atenuação elevada, pequena largura de banda e dispersão modal mais intensa que as outras fibras. Pelas desvantagens citadas, este tipo de fibra não é viável para utilização em telecomunicações, porém possui aplicações em outras áreas, como por exemplo, na área médica e na comunicação de dados a curta distância.

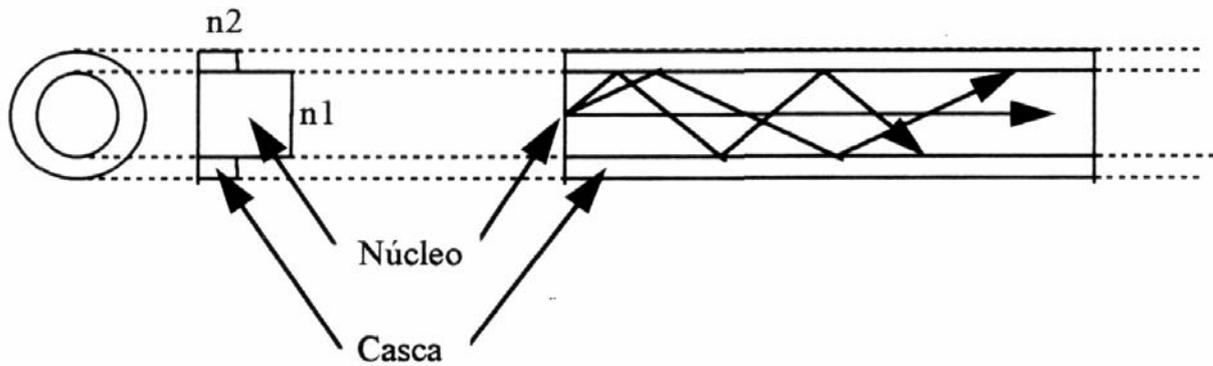


Figura 3-18: Fibra multimodo índice degrau.

Características técnicas:

• Diâmetro do Núcleo	50 a 600 μ m
• Diâmetro da Casca	150 a 1000 μ m
• Abertura Numérica (AN)	0,2 a 0,4
• Coeficiente de Atenuação na Janela Óptica de 0,85 μ m (α)	3 a 20 dB/km
• Coeficiente de Atenuação na Janela Óptica de 1,3 μ m (α)	1 a 10 dB/km
• Capacidade de Transmissão (BI)	> 0,05 GHz/km

3.8.1.2 Fibra Multimodo índice Gradual

Caracteriza-se por ter um perfil de índice que decresce gradualmente de forma quase parabólica. Pode-se dizer que a fibra consiste de um núcleo composto de várias camadas, cada uma com **índice de refração** um pouco menor à medida em que se afastam do eixo da fibra. Nesta fibra, os raios serão propagados em curvas suaves, de forma a compensar percursos maiores com maior velocidade e os pulsos de luz alcançarão o receptor com menor alargamento. Dessa forma, consegue-se uma **dispersão** menor e maior largura de banda. Como a fibra tem um diâmetro razoavelmente grande, acoplamentos e emendas são relativamente fáceis de serem realizados sem perdas significativas. Normalmente o núcleo é fabricado em sílica dopada e a casca em sílica pura.

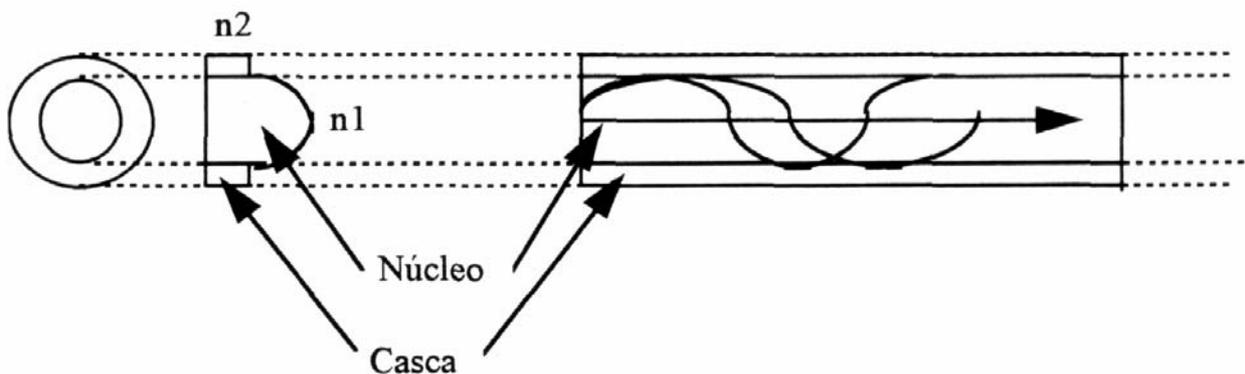


Figura 3-19: Fibra multimodo índice gradual

Características técnicas:

• Diâmetro do Núcleo	40 a 100 μ m
• Diâmetro da Casca	100 a 200 μ m
• Abertura Numérica (AN)	0,2
• Coeficiente de Atenuação na Janela Óptica de 0,85 μ m (α)	2 a 4 dB/km
• Coeficiente de Atenuação na Janela Óptica de 1,3 μ m (α)	0,5 a 1 dB/km
• Capacidade de Transmissão (BI)	0,1 a 2 GHz/km

Sabe-se da fórmula:

$$n = \frac{C}{V}$$

Onde :
 C = velocidade da luz no vácuo
 V = velocidade da luz no meio

Notamos então que quanto menor o índice de refração, maior será a velocidade e vice-versa. Desta forma, a luz que se propaga pelas áreas mais externas do núcleo percorrem uma distância maior, porém com maior velocidade que a luz que percorre o centro, cuja distância é menor.

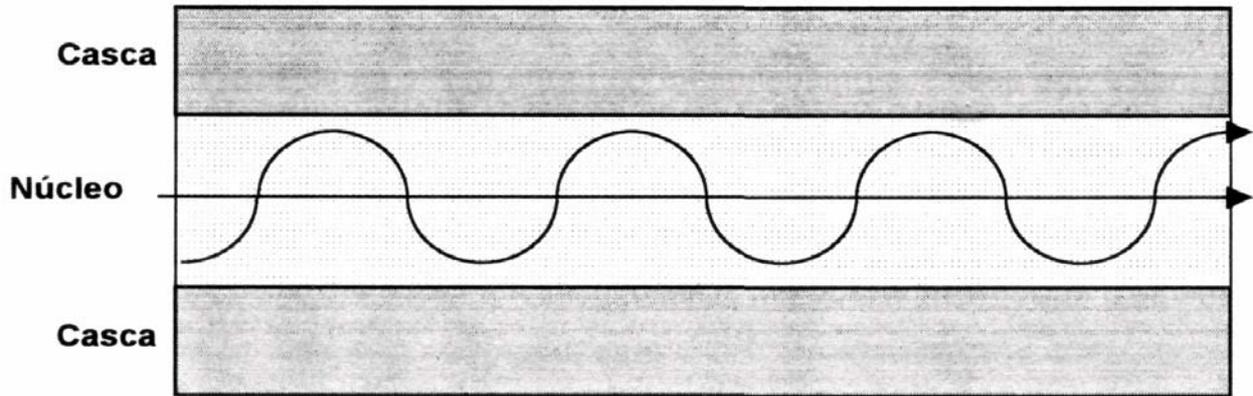


Figura 3-20: Ilustração representando a diferença de velocidade em uma fibra multimodo gradual

3.8.2 Fibra Óptica Monomodo

É a fibra óptica onde, idealmente, apenas um modo se propaga. Na prática apenas alguns modos se propagam. Sendo assim, as fibras monomodos são fibras ópticas com **perfil de índice de refração degrau**, cujo diâmetro do núcleo está entre 4 μm a 10 μm. A casca tem um diâmetro pelo menos 10 a 12 vezes maior, em torno de 100 μm a 200 μm. Esta fibra apresenta uma grande largura de banda, pois não há **dispersão** modal, e apresenta uma baixa **atenuação** em relação à multimodo. Por isso, este tipo de fibra é largamente utilizada em comunicações à longa distância com alta capacidade de transmissão.

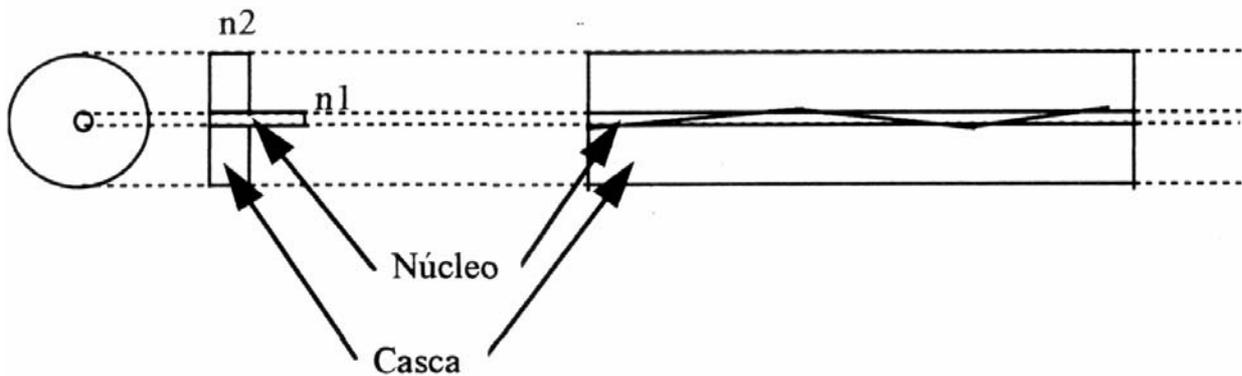


Figura 3-21: Fibra monomodo índice degrau.

Características técnicas:

• Diâmetro do Núcleo	4 a 10 μm
• Diâmetro da Casca	100 a 200 μm
• Abertura Numérica (AN)	0,1 a 0,2
• Coeficiente de Atenuação na Janela Óptica de 0,85 μm (α)	2 a 4 dB/km
• Coeficiente de Atenuação na Janela Óptica de 1,3 μm (α)	0,3 a 0,5 dB/km
• Capacidade de Transmissão (BI)	> 10 GHz/km

Como vimos, o número de modos de propagação em uma fibra depende de três fatores:

- Diâmetro do núcleo;
- Abertura numérica (AN);

- Comprimento de onda da luz (λ).

Para diminuir o **número de modos propagantes**, poderíamos alterar um das variáveis da fórmula acima.

- Diminuindo a Abertura Numérica poderíamos conseguir a diminuição dos modos, porém isto afetaria o acoplamento óptico à fibra, diminuindo a capacidade de absorção de luz;
- Poderíamos alterar o valor do comprimento de onda, mas um comprimento de onda maior provocaria uma maior atenuação;
- Então, a única forma encontrada foi diminuir o tamanho do núcleo. E é a solução adotada para as fibras monomodo.

3.8.3 Tipos Especiais de Fibras

3.8.3.1 Fibras de Plástico

São fibras **multimodo** que apresentam alto valor de atenuação, por isso são aplicáveis onde às distâncias são curtas e a banda passante não é grande. São utilizadas principalmente, em **sistemas de instrumentação, comunicações em automóveis, sistemas de iluminação, transmissão de imagens e aplicações médicas**.

3.8.3.2 Fibras com Dispersão Deslocada (DS)

Neste tipo de fibra, o ponto de dispersão zero é deslocado para janela de 1550nm. A atenuação costuma ser maior ou igual às fibras para 1300nm. São utilizadas em sistemas de **longa distância e altas taxas de transmissão**.

3.8.3.3 Fibras com Dispersão Plana

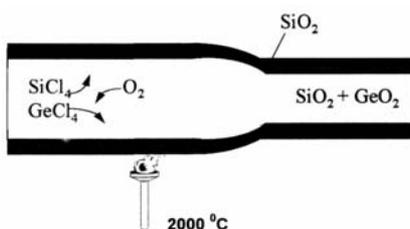
Apresentam dispersão aproximadamente constante para a faixa de 1300nm e 1550nm. São utilizadas para **sistemas WDM - Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda**.

4. Técnicas de Fabricação da Fibra Óptica

Os processos de fabricação das fibras ópticas requerem equipamentos especiais e de grande precisão. As fibras de alta capacidade de transmissão, muito usadas em telecomunicações, utilizam como matéria prima a sílica. A primeira etapa da fabricação dessas fibras consiste na obtenção de um tubo chamado de "**preforma**". Existem vários processos de fabricação da preforma, dentre os quais: **Deposição Interna (IVD), Deposição Externa (OVD), Deposição Axial (VAD)**;

4.1 Deposição Interna – IVD

Dos processos de fabricação da preforma por deposição interna, destaca-se o CVD (**Deposição Química de Vapor**) que consiste basicamente na deposição de várias camadas de partículas de vidro (dopantes) no interior de um tubo de sílica pura, que são injetadas na forma gasosa (SiCl_4 , GeCl_4 , entre outros), esse tubo de sílica pura, que será a casca da fibra, fica girando, à medida que são depositados os dopantes no seu interior, enquanto que no exterior do tubo, um maçarico o percorre longitudinalmente a uma temperatura de aproximadamente 1600 °C. Para cada camada depositada controla-se a concentração dos materiais dopantes, para se obter vários índices de refração.



Após a deposição do número desejado de camadas, aumenta-se a temperatura do maçarico para aproximadamente 2000 °C, onde ocorre o colapso do tubo, isto é, um encolhimento radial, tomando-o maciço e finalizando assim a fabricação da preforma.

Figura 4-1: Colapso do tubo

4.2 Deposição Externa – OVD

Neste processo, várias camadas de dopantes são depositadas sobre um mandril rotante. Após a deposição de todas as camadas, inclusive a que fará a função de casca, o tubo formado será colocado com o mandril num forno com temperatura de aproximadamente 1500 °C, onde ocorrerá sua dilatação para retirada do mandril. E esse mesmo forno tem sua temperatura aumentada para aproximadamente 2000 °C, onde ocorrerá o colapso do tubo, formando a preforma.

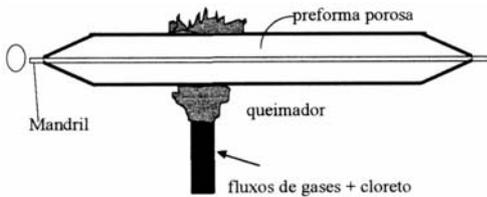


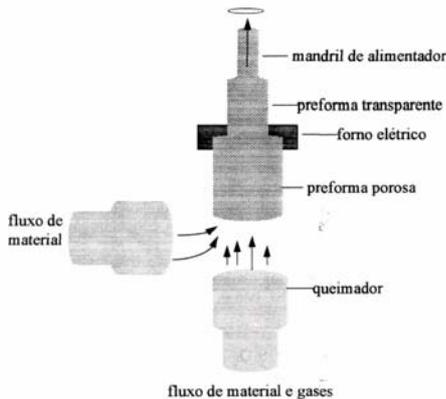
Figura 4-2: Deposição Externa

4.3 Deposição Axial – VAD

O material dopante em estado gasoso é depositado axialmente na extremidade de um bastão rotante (mandril) o qual resulta no crescimento do tubo ao longo do eixo deste bastão.

4.3 Puxamento

Na segunda etapa de fabricação das fibras, a preforma obtida é posicionada verticalmente com a extremidade inferior introduzida em um forno com temperatura de aproximadamente 2000 °C, onde ocorre o escoamento da fibra que é puxada e enrolada em uma bobina.



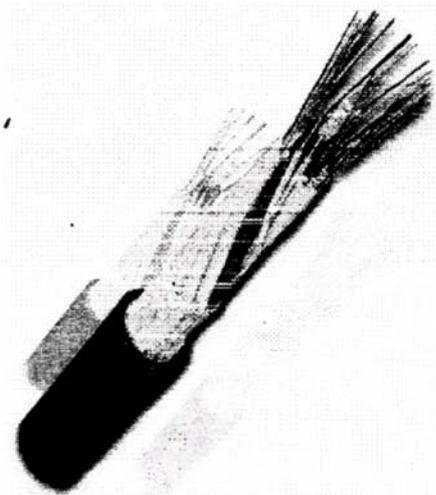
As velocidades de puxamento da fibra e da introdução da preforma no forno são controladas em função do diâmetro que se quer obter da fibra. Durante o puxamento, a fibra recebe um revestimento, geralmente de silicone ou acrilato para dar proteção mecânica.

Figura 4-3: Deposição Axial

5. Cabos Ópticos

O cabo óptico é a estrutura que encapsula e protege as fibras ópticas. Pode ser composto por uma ou diversas fibras ópticas. Na prática, as fibras necessitam de uma proteção para garantir suas características de transmissão. Isto é conseguido com uma série de revestimentos que são aplicados nas fibras de acordo com a aplicação a que se destina. O revestimento aplicado visa proteger as fibras do meio ambiente e de esforços mecânicos sofridos durante a instalação ou operação.

Figura 5-1: Exemplos de estruturas de cabos ópticos



No planejamento de um sistema de comunicação, são levantadas as necessidades e as características desejáveis ao sistema a ser implantado, a partir da definição das características básicas dos cabos a serem empregados:

- Eliminação dos problemas oriundos de induções eletromagnéticas;
- Resistência a esforços durante a instalação e vida útil do cabo;
- Facilidades no manuseio, instalação e manutenção, ou seja, os revestimentos devem ser de fácil remoção para o caso de emendas, além de que as fibras devem ser padronizadas por cores para facilitar a identificação;
- Elevada resistência mecânica a impacto, esmagamento e vibrações;
- Proteção contra roedores, insetos e tubarões;
- Proteção contra infiltração de umidade e água;
- Estabilidade das características de transmissão das fibras em uma grande faixa de temperatura;
- Estabilidade dos materiais quanto à corrosão quando expostos a ambientes com altos índices de cloretos;
- Adequada rigidez para evitar curvaturas excessivas, evitando assim atenuação por macrocurvaturas.

5.1 Classes de Estruturas de Cabos

De modo geral, há duas grandes classes de estruturas de cabos ópticos:

- Cabo óptico tipo tight - tecnologia japonesa;
- Cabo óptico tipo loose - tecnologia européia / americana.

Seja qual for à estrutura do cabo, existem propriedades mecânicas muito importantes que um cabo deve ter. Dentre elas, uma determina o comprimento do cabo a ser instalado: **é a máxima carga axial permitida num cabo.**

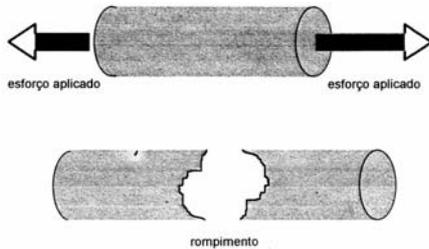


Figura 5-2: Cabos em processo de ruptura após efeito de tração.

Em cabos de **cobre**, alongamentos de mais de 20% são possíveis sem ruptura do cabo, pois os membros de suporte de carga dos cabos são os próprios fios de cobre.

Por outro lado, **fibras ópticas** extremamente fortes tendem a quebrar com 4% de alongamento.

As outras propriedades mecânicas são as máximas forças laterais (dinâmica e estática) onde, com isso, determina-se a configuração de proteção que o cabo fornecerá às fibras (tipo de empacotamento) e o limite da tolerância a microcurvaturas da fibra.

5.1.1 Cabo Óptico Tipo TIGHT (Compacto)

Este tipo de cabo possui uma camada de proteção em plástico duro (nylon ou poliéster) que é aplicada diretamente sobre a fibra revestida. Sobre este revestimento é colocado um material macio que protege a fibra revestida, diminuindo os efeitos dos esforços transversais causadores de **microcurvaturas**. Formam-se então unidades básicas com uma ou mais fibras que serão agrupadas para formar os cabos ópticos.

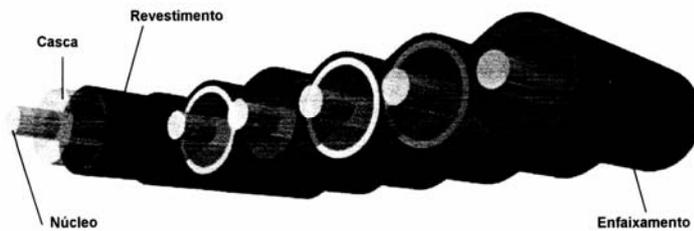


Figura 5-3: Exemplo de cabo compacto

5.1.2 Cabo Óptico LOOSE (Solto)

Este tipo de cabo é constituído por um tubo longo, duro, liso e flexível com diâmetro interno muito maior que o diâmetro da fibra. Contém a fibra isolando-a das tensões do

cabo. A fibra fica livre, ou seja, não está vinculada à estrutura do cabo, não ficando sujeita a toda tensão atuante. Normalmente o tubo é preenchido com compostos petroquímicos ou silicone que garantem lubrificação, evitam entrada de água ou impurezas e asseguram perfeita estabilidade do conjunto. Da mesma forma que o cabo Tight, podem-se formar unidades básicas com uma ou mais fibras ópticas.



Figura 5-4: Exemplo de cabo solto

5.1.2 Comparativo entre Cabos Tight e Loose

Um tubo **Loose** fornece uma grande liberdade às fibras, com respeito a deformações dos cabos quando tencionados, mas é necessário ter o controle de excesso de fibra solta nos tubos. A fibra óptica num tubo **Loose** sofre perdas por microcurvaturas quando é forçada para dentro do tubo.

Na estrutura **Tight**, a deformação da fibra é diretamente proporcional à deformação do cabo, enquanto que na estrutura **Loose**, a deformação da fibra é menor que a do cabo, porque no cabo existe um excesso de fibra.

A janela de **alongamento e contração** de uma fibra óptica dentro de um tubo **Loose** é a deformação que o cabo pode sofrer mantendo a fibra livre de tensões, e pode ser determinada como abaixo:

$$e_{cf} = \pi^2 \cdot (W^2 / 2P)$$

Onde:

e_{cf} = excesso de comprimento da fibra;

W = espaço interno no tubo (diâmetro interno - diâmetro da fibra);

P = período médio da hélice que a fibra descreve no tubo.

Tipicamente, e_{cf} é da ordem de 0,1%, isto é, a fibra num cabo de 1000 metros é de aproximadamente 1001 metros. Pequenos valores de e_{cf} resultam numa baixa performance do cabo, em relação à **atenuação**,

quando este cabo é tencionado. Um excesso de comprimento n , maior que o valor calculado, cria um excesso de atenuação durante a fase de produção e de cabeamento.

A **contração** de uma estrutura de cabo é principalmente determinada pelos coeficientes de temperatura dos diferentes componentes do cabo, principalmente entre a diferença dos coeficientes de expansão térmica entre os materiais plásticos e a fibra de sílica. Temperaturas abaixo de -30°C causam encolhimento no cabo, o qual resulta num crescimento do comprimento de excesso de fibra e, portanto, num acréscimo de atenuação. Usando-se materiais endurecidos, tendo um coeficiente térmico similar ao coeficiente térmico de expansão da sílica, pode-se reduzir o acréscimo de atenuação além de -30°C .

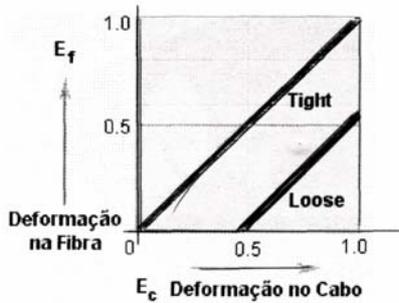


Figura 5-5: Gráfico comparativo entre cabos tipo Tight e Loose, em %.

5.2 Tipos de Cabos Ópticos

O projeto de cabo óptico consiste na escolha da proteção da fibra, na determinação da geometria, na composição do núcleo, no dimensionamento dos elementos que sofrem efeitos mecânicos e térmicos. Conforme o tipo de instalação e aplicação existem diferentes tipos de cabos. As instalações podem ser aéreas, subterrâneas, submarinas e/ou internas.

5.2.1.1 Cabos Ópticos Pára-Raios-OPGW (Optical Ground Wire aerial cable)

Os cabos pára-raios com fibras (OPGW) são instalados em linhas de transmissão de energia com dupla função: substituir o cabo guarda convencional (proteção contra curto-circuito e descarga atmosférica) e fornecer um sistema de comunicação óptico. Também podem ser usados com posteação própria especialmente em regiões sujeitas a vandalismos, queimadas e acidentes que demandem grande atenção por parte das equipes de manutenção. O cabo OPGW, por sua alta confiabilidade, é uma alternativa considerável para melhorar os serviços das empresas de energia elétrica e das de telecomunicações. O cabo OPGW deve ser adequado às condições operacionais do cabo pára-raios e do cabo óptico, do ponto de vista de instalação, manutenção e operação.

As suas características mecânicas, ópticas e elétricas devem harmonizar-se tendo em vista seu uso. Contêm em seu interior **fibras ópticas monomodo ou monomodo com dispersão deslocada**.

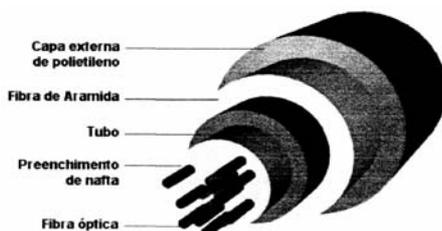


Figura 5-6: Exemplo de cabo pára-raios-OPGW

5.2.1.2 Cabos Ópticos Dielétricos Auto-Sustentado ADSS (AH Dielectric Self Supporting cable)

Os cabos ópticos dielétricos auto-sustentados para Sistemas de Telecomunicações Ópticas instaladas ao longo de linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica são fixados abaixo dos cabos de energia. A vantagem desta instalação em relação ao OPGW é a possibilidade de instalação sem a necessidade de desligar a linha de transmissão. O desempenho mecânico é conseguido adotando-se cabos tipo **Loose**, adequados geometricamente para instalações aéreas. São cabos leves de pequeno diâmetro e de instalação rápida e simples.

A utilização de cabos ópticos dielétricos em sistema de transmissão de energia exige o atendimento típico de redes aéreas e deve apresentar proteção adequada à degradação elétrica da capa. É necessário o conhecimento das linhas de potencial do campo elétrico em função da geometria de instalação dos condutores fase e terra, permitindo a localização dos pontos de menor potencial, apropriados para a instalação do cabo.



O cabo óptico dielétrico auto-sustentado é indicado para rede aérea com vãos entre 80 e 200m.

Figura 5-7: Exemplo de cabo tipo Auto-sustentado.



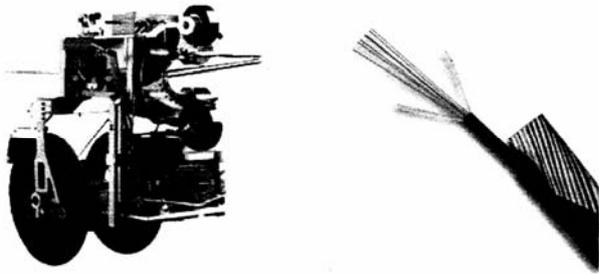
Figura 5-8: Detalhe de instalação aérea



Detalhe de instalação

5.2.1.3 Cabos Ópticos Dielétricos Espinados - AD-Lash (AH Dielectric Lashed cable)

Este tipo de cabo pode ser amarrado (espinado) em cabo pára-raios ou em linha viva operando até 30KV. O cabo óptico é amarrado através da máquina espinadeira que desliza ao longo do cabo pára-raios ou da linha viva fixando o cabo óptico no cabo guia através de uma fita adesiva especial. O cabo é fino, rugoso, de baixo peso e custo, e de fácil instalação.



As fibras ópticas **monomodo** ou **monomodo com dispersão deslocada** são alojadas em um tubo em forma não aderente **Loose**. O tubo é revestido com fibras de aramida impregnada com líquido semicondutivo. A capa externa é feita de um polímero especial para evitar degradação devido a campos elétricos.

Figura 5-9: Exemplo de máquina para amarrar cabos e cabo AD-lash

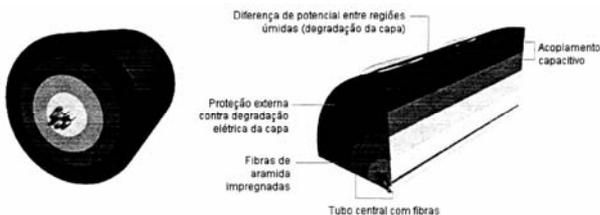
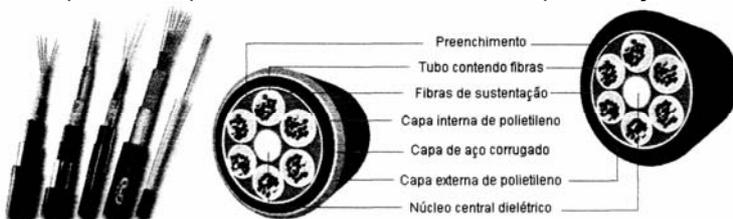


Figura 5-10: Efeito das linhas de campos elétricos sobre a capa do cabo

5.2.2 Rede Subterrânea

Cabos indicados para instalação em canalização subterrânea, em dutos de concreto, conduíte ou diretamente enterrado. As fibras ópticas (2 a 12 fibras) **monomodo** com revestimento em acrilato, são agrupadas no tubo não aderente (**loose**) constituindo as unidades básicas. Estas unidades básicas são reunidas de forma concêntrica em torno de um elemento de tração central dielétrico. O enfaixamento do núcleo protege termicamente de forma a evitar danos as fibras ópticas, às unidades básicas e ao núcleo, evitando adesão entre eles causada pela transferência de calor durante a aplicação da capa de polietileno ou copolímero, podendo ter também uma capa de aço corrugado. A capa externa deve ser perfeitamente ligada, formando um conjunto estanque à entrada de água ou vapor de água que deve ser contínuo e isento de furos e outras imperfeições.



ligada, formando um conjunto estanque à entrada de água ou vapor de água que deve ser contínuo e isento de furos e outras imperfeições.

Figura 5-11: Exemplo de um cabo subterrâneo

5.2.3 Rede Submarina

Os cabos submarinos devem ser mais pesados que a água, devem proteger as fibras ópticas e se sofrerem algum tipo de dano, não devem encher de água. Devem ser capazes de ficarem alojados no fundo do oceano ou serem enterrados no leito dos oceanos. As fibras ópticas, monomodo **ou monomodo com dispersão deslocada** dos cabos submarinos são alojadas no tubo de forma não aderente **loose** preenchidos com um composto especial para evitar a entrada de água. O tubo plástico pode receber uma proteção de cobre que também é usada como cabo de transporte de energia elétrica para alimentar os repetidores em redes de longas distâncias. Para agüentar a pressão no fundo do oceano e/ou as correntes submarinas, os cabos recebem uma ou várias camadas de cabos de aço trançados em torno do tubo, e externamente recebe uma camada de polietileno de alta densidade (HPED)



Figura 5-12: Exemplos de cabos submarinos

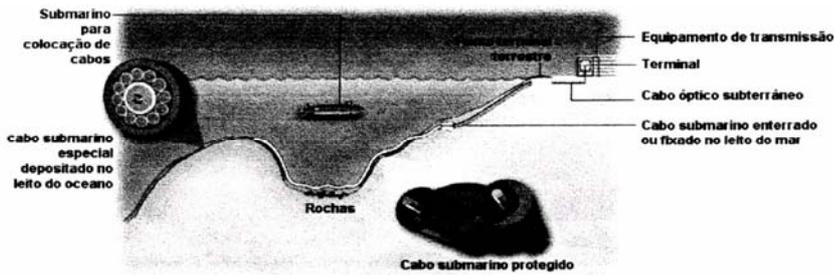


Figura 5-13: Detalhe de representação de rota submarina.

5.2.4 Rede Interna

São cabos especialmente construídos para instalações prediais em dutos ou bandejas de cabos. Apresentam diâmetro externo

pequeno, baixo peso e são de fácil instalação. As principais instalações são em redes LAN tipo FDDI a 100Mbps, LAN Ethernet a 10, 100 ou 1000Mbps, comunicação de sinais em ambientes de elevado ruído, e comunicação de dados e vídeo em geral.

5.2.4.1 Cordão Óptico Monofibra - Cordão Simplex



Os **cordões monofibra** são cordões ópticos multimodo ou monomodo, tipo **tight**. As fibras têm revestimento primário em acrílate e revestimento secundário em nylon. Sobre o revestimento secundário são colocados elementos de tração de fios sintéticos de aramida. Os cordões são reunidos e revestidos por uma camada de material PVC colorido não propagante a chama.

Figura 5-14: Exemplo de cordão óptico monofibra

5.2.4.2 Cordão Óptico Duplex

Cabo óptico tipo **tight** sobre o qual é aplicada a capa termoplástica externa e/ou proteção externa, e elementos de tração de fios sintéticos de aramida.

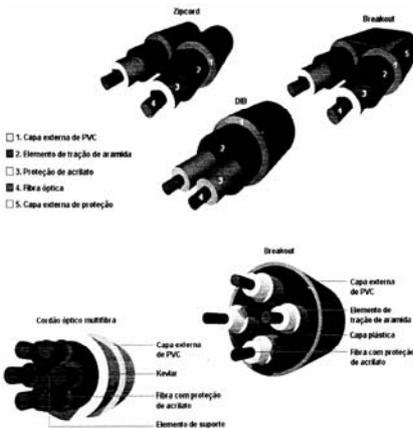


Figura 5-15: Exemplo de cordão óptico duplex.

5.2.4.3 Cordão Multifibra

Cabo óptico tipo **tight** agrupados em torno de um elemento de sustentação central revestidos com elementos de tração de fio kevlar, protegidos por capa externa de PVC colorido não propagante de chamas, ou grupos de fibras com revestimento de aramida e proteção externa.

Figura 5-16: Exemplo de cordão multifibra.

6 Emendas

A emenda une fibras ou cabos de fibras ópticas permanentemente quando o comprimento do sistema é maior que o comprimento contínuo do cabo disponível, para permitir a inserção de novos componentes ópticos ao sistema, ou na ocorrência de ações corretivas devido a rompimentos.



Devido à pequena seção transversal das fibras, é extremamente difícil fazer uma emenda perfeita. As emendas podem ser feitas por fusão ou conexão.

Figura 6-1: Tipos de execução de emendas.

6.1 Causas de Perdas em Emendas

As fibras, quando emendadas sofrem uma perda devido a diferenças no índice de refração, propriedades físicas / dimensionais e também devido ao desalinhamento, ângulo e separação das extremidades durante o processo de emenda. Podemos dividir as causas em:

- Fatores Ambientais, tais como: calor, vibração, poeira e umidade (emenda por conexão);
- Fatores Intrínsecos;

- Fatores Extrínsecos.

6.1.1 Fatores Intrínsecos

6.1.1.1 Diferenças na Abertura Numérica

Esta perda pode ser consequência da diferença na **Abertura Numérica AN**, quando a abertura numérica da fibra que envia luz é maior que daquela que recebe. O inverso permite um bom acoplamento de luz, eliminando tal tipo de perda.

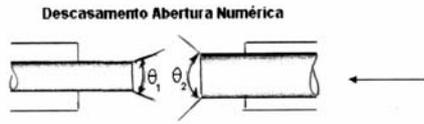
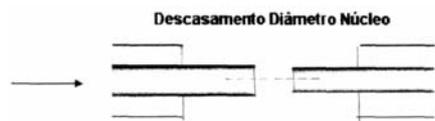


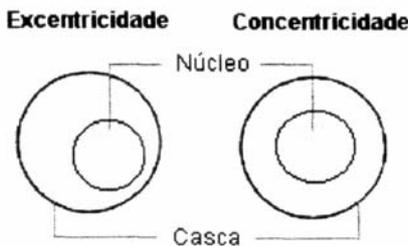
Figura 6-2: Descasamento da abertura numérica



6.1.1.2 Diferenças no Diâmetro do Núcleo e/ou Casca

Uma segunda causa é a ocorrência de diferença no **diâmetro do núcleo e/ou casca**, na situação em que um núcleo maior acopla luz em um com dimensão menor.

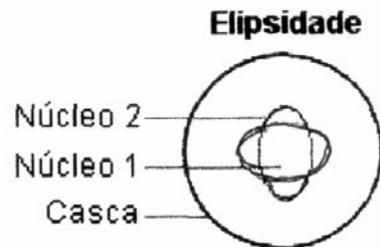
Figura 6-3: Descasamento do diâmetro do núcleo e casca



6.1.1.3 Diferenças no Diâmetro do Núcleo e/ou Casca

Uma segunda causa é a ocorrência de diferença no **diâmetro do núcleo e/ou casca**, na situação em que um núcleo maior acopla luz em um com dimensão menor.

Figura 6-4: Efeitos da excentricidade



6.1.1.4 Elipsidade

Uma quarta situação indesejável é em relação à **elipsidade** do núcleo, causando perdas devido ao descasamento entre os núcleos das fibras.

Figura 6-5: Elipsidade

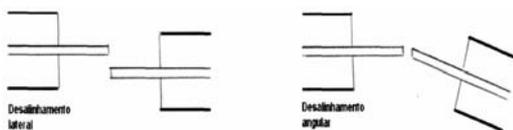
6.1.2 Fatores Extrínsecos

São derivadas do desalinhamento das duas fibras a serem emendadas. Notam-se os seguintes efeitos:

6.1.2.1 Perda por Reflexão na Superfície da Ponta da Fibra:

Quando um feixe de luz viaja através de um meio tendo diferentes índices de refração, ele reflete e é refrato nas fronteiras do meio (**reflexão de Fresnel**). Se entre duas fibras, existe uma diferença nos tipos de meio, por exemplo, ar, uma perda é causada pela reflexão entre as fronteiras de tal meio;

6.1.2.2 Desalinhamento das Fibras:



Perda ocasionada pelo desalinhamento das fibras nas emendas;

Figura 6-6: Desalinhamento extrínseco

6.1.2.3 Separação, Deformação ou Ângulo das Pontas Finais

O valor de referência para a real perda na emenda e avaliação da perda de imagem é influenciada por:



Problemas comuns, devido a clivagem imperfeita;

Figura 6-7: Influência de um corte imperfeito em uma fibra óptica e seu efeito combinado ao desalinhamento.

6.2 Preparação da Fibra para Emenda

Antes de qualquer emenda, devem-se preparar as extremidades das fibras ópticas, de modo a adequá-las às necessidades de cada procedimento. O processo pode ser dividido em 3 partes: **Decapagem, Limpeza e Clivagem.**

6.2.1 Kit Óptico

Uma boa emenda de fibra óptica requer uma excelente preparação e limpeza da fibra. Com as ferramentas é possível retirar com rapidez e segurança as capas protetoras e recobrimentos primários e secundários da fibra.

O Kit de Ferramentas Ópticas compõe-se de decapadores, cortadores circular e longitudinal de tubo loose e cortador de cabo óptico, além do material de limpeza necessário para fazer uma excelente emenda.



Composição do Kit Óptico:

01	Maleta
02	Decapadores 0.25mm
02	Decapadores 0.90mm
01	Cortador circular tubo loose
01	Cortador longitudinal de cabo óptico
01	Cortador circular de cabo óptico
01	Lâmina reserva do cortador circular de cabo óptico
01	Cortador longitudinal de tubo loose (midspan)
01	Tesoura
01	Recipiente de álcool isopropílico

Figura 6-8: Kit Óptico

6.2.2 Decapagem

A decapagem corresponde à retirada da camada de acrilato, nylon ou silicone, ou isolamento, que recobre a casca da fibra óptica. Este procedimento deve ser executado utilizando-se ferramentas específicas que atuam mecanicamente sobre o revestimento, sem tocar a superfície da fibra. Neste processo não é necessária a retirada total do material que recobre a fibra, podendo haver resíduos que serão limpos no processo seguinte. Para a decapagem do isolamento da fibra, existe a possibilidade de utilização de processo químicos. Entretanto, deve-se ter certeza que o agente químico utilizado não contaminará a fibra óptica, comprometendo-a ao longo dos anos.

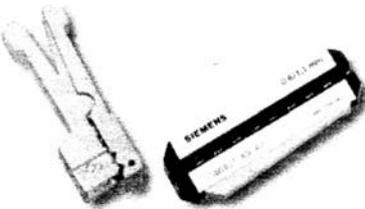


Figura 6-9: Decapadores

6.2.2 Limpeza

Na limpeza deve-se utilizar gaze ou papel de limpeza (que não solte fiapos), embebidos em álcool com baixa concentração de água, preferencialmente do tipo isopropílico ou etílico. Esta limpeza deve ser executada na direção da base da região decapada, para a extremidade da fibra, para retirar os possíveis resíduos da decapagem ou oleosidades, decorrentes do próprio manuseio da fibra pelo operador. Deve-se repetir esta operação tantas vezes quantas forem necessárias, até a completa limpeza da região decapada da fibra, tomando-se o cuidado de não quebrar a fibra durante o procedimento.

6.2.4 Clivagem

A clivagem da extremidade da fibra óptica corresponde ao corte reto da mesma, para a obtenção da máxima aproximação das fibras durante a execução da emenda, ou melhora na emissão ou captação do sinal óptico pela fibra. Utiliza-se ferramentas próprias, denominadas clivadores, compostos por lâminas revestidas de diamante para aumentar a vida útil da ferramenta, visto que a dureza da fibra óptica é elevada. Os clivadores são diferenciados conforme sua performance, sendo avaliados ou classificados de acordo com seu ângulo de clivagem característico. São divididos basicamente em clivadores manuais, que permitem um ângulo de clivagem menor que 2° e clivadores de precisão, que permitem ângulos de clivagem inferiores a 0,5°.



Figura 6-10: Tipo de clivador

6.3 Emenda por Fusão

Caracteriza-se pela fusão entre as extremidades das fibras, de modo a permitir a continuidade óptica através das mesmas. Para execução deste procedimento, são necessárias as **ferramentas de limpeza e clivagem** e uma **máquina de emenda**.

6.3.1 Máquina de Emenda com Sistema de Alinhamento pela Casca (L-PAS)

São utilizadas principalmente na manutenção de redes ou pequenas instalações. Este modelo usa guias de fibra V-grooves para o alinhamento da fibra, através do sistema de vídeo L-PAS (Lens Profile Alignment System). É apropriada para fazer terminações e para seu uso em campo.

As fibras podem ser observadas no monitor LCD nos dois eixos perpendiculares (x,y). O processo de fusão, incluindo o posicionamento e controle é totalmente automático, resultando em emendas de ótima qualidade.

O teste de tensão é realizado automaticamente, se necessário. A perda é menor que 0,06 dB, em fusões de fibras idênticas. Indicada para trabalhos em instalação/manutenção de redes LAN/WAN, pois oferece ótima performance por um baixo custo.



Pelo fato da máquina de emenda com sistema de alinhamento pela casca (L-PAS), em geral, não possuir sistema de avaliação da fibra óptica além da lupa ou monitor de inspeção, dependerá do operador a avaliação da clivagem, limpeza e posicionamento da fibra na câmara de fusão, de forma a deixá-la em condições apropriadas para proceder a emenda. É importante o conhecimento e a habilidade prática do operador. Em função desta limitação do equipamento a produtividade, a estabilidade do nível de qualidade e a confiabilidade das emendas podem ser comprometidas.

Figura 6-11: Máquina de emenda com sistema de alinhamento pela casca

6.3.2 Máquina de Emenda Automática

Os equipamentos de emenda automática, utilizados em situações onde existe a necessidade de execução de muitas fusões em tempo reduzido, têm como principais características: o alinhamento automático das fibras ópticas no interior da câmara de fusão, a avaliação das condições das extremidades da fibra óptica e a posterior estimativa do valor de perda da emenda. Por se tratar de um equipamento automático, todas as avaliações e análise são feitas via parâmetros pré-definidos no software residente, e na ocorrência de qualquer irregularidade, ocorre interrupção do procedimento de fusão pela máquina. Por isto, não é tão exigido a habilidade do operador, havendo ganho em produtividade e níveis estáveis de qualidade ao longo de toda a instalação.

De forma resumida, dividem-se os equipamentos de emenda em 5 partes principais:

- Sistema de inspeção;
- Sistema de alinhamento;
- Sistema de fusão;
- Sistema de teste de tração;
- Sistema de estimativa de perda na emenda.

A máquina de emenda X60 série 5000 é a quarta geração de equipamentos para emenda através de fusão, mais confiável, mais rápida e permite a programação para automatização da emenda de qualquer tipo de fibra simultaneamente.

Características da máquina de emenda X60:

- A X60 tem o menor índice de perda na fusão, independente do tipo de fibra utilizada, do fabricante;
- A X60 com sua capacidade de medição, pelo exclusivo sistema LID, é a única máquina de emenda que mede a atenuação **real** e não simplesmente estimada, como os demais sistemas. Este processo ainda controla e regula automaticamente a fibra durante todo o processo de fusão.
- Detecção automática de vários tipos de fibra, monomodo DS, LS e multimodo.
- Novo software que permite a estruturação de diferentes programas para cada tipo de fibra.
- Para necessidades específicas de emenda com atenuação, a máquina possui um dispositivo que permite a obtenção de atenuação da emenda "in-line" de alta precisão de 0,1 a 10 dB, com ausência de reflexão para comprimentos de ondas de 1310 a 1550 nm.
- O clivador, forno e bandeja foram aprimorados em seus recursos para facilitar o manuseio. Esses acessórios formam sua própria *Workstation* (estação de trabalho).
- Perda de emenda inferior a 0,02 dB para fibras monomodo e 0,01 dB para multimodo.
- Medição real da perda de emenda com o sistema LID.
- Extremamente confiável e resistente.
- Monitor colorido tridimensional de 4 polegadas de alto contraste.
- Estação de trabalho própria, que descarta a necessidade de locais próprios para efetuar a emenda.



Figura 6-12: Máquina de emenda automática por fusão

6.3.2.1 Princípio de Funcionamento do Processo LID

O posicionamento das fibras deve assegurar um alinhamento preciso dos núcleos das mesmas. O posicionamento é controlado através da observação da imagem da fibra ou

através da avaliação da luz transmitida através do ponto de emenda. O uso de sistemas de vídeo e sistemas de injeção e detecção local (LID) tomou-se amplamente difundido. Nos sistemas de vídeo atuais, as fibras são observadas de uma ou duas direções, perpendiculares ao eixo da fibra. Uma distinção adicional é feita entre sistemas que consideram somente o contorno periférico da fibra e sistemas que mostram o núcleo da fibra. Nas fibras modernas, contudo, a excentricidade do núcleo geralmente é tão pequena que, o alinhamento dos contornos externos é suficiente. O sistema de alinhamento de perfil (Profile Alignment System - PAS), no qual o núcleo da fibra é visualizado com o auxílio de lentes especiais, tem-se tornado importante na prática, visto que as lentes PAS fazem uso do efeito de lente cilíndrica das fibras.

Sistemas LID se valem do fato de que a luz pode ser injetada e detectada na fibra não somente nas extremidades mas também nas curvaturas. Sistemas LID consistem de um transmissor e um receptor que são projetados como acopladores de curvatura, nos quais as fibras são curvadas para permitir a entrada e a saída de luz. A quantidade de luz que entra no lado de recepção é proporcional à luz transmitida no ponto de emenda, permitindo um preciso alinhamento dos núcleos das fibras. Adicionalmente, pode ser realizada uma medida real da atenuação da emenda.

Princípio do Sistema LID

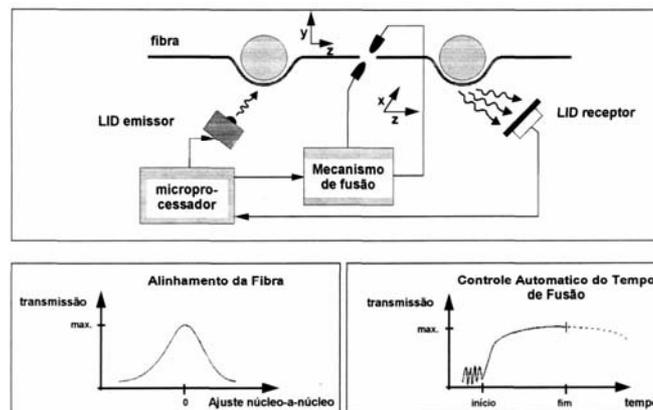


Figura 6-13: Princípio do Sistema LID

6.3.3 Procedimentos para Execução de Emenda

A emenda por **fusão** deve seguir os seguintes passos:

1. **Identificação da Fibra:** Esta informação pode ser obtida no texto de gravação externa do próprio cabo óptico, que trará a informação SM (monomodo) ou MM (multimodo);
2. **Ajuste do Equipamento:** Ajustar o equipamento para o tipo apropriado de fibra (**MM** ou **SM**);
3. **Abrir e Limpar a Extremidade do Cabo Óptico:** Conforme as dimensões definidas para a montagem das caixas de emenda ou bastidores nos quais os cabos será instalado;
4. **Teste do Arco:** Retirar uma amostra da fibra óptica a ser emendada e proceder ao teste de arco. Este teste, disponível em todas as máquinas de emenda, irá ajustar as condições de fusão especificamente para a fibra que será emendada;
5. **Inserção de Protetores:** Este acessório, composto por um elemento metálico de sustentação e um tubo termocontrátil, tem por função proteger o ponto de emenda contra curvaturas ou esforços que possam romper o ponto de fusão;
6. **Limpeza e Clivagem das Fibras:** Deve-se executar este procedimento apenas no momento da emenda, posicionando as fibras nas ranhuras da máquina de fusão, tomando-se o cuidado para que as mesmas não invadam a linha imaginária dada pelos eletrodos;
7. **Inspeção das Fibras:** Inspeccionar as fibras ópticas verificando qualquer irregularidade na região de fusão e mais detalhadamente nas extremidades das fibras;
8. **Posicionamento das Fibras:** Executar o posicionamento das fibras para fusão, no caso das máquinas manuais, utilizando as graticulas da lupa como referência para este posicionamento;
9. **Fusão:** proceder a fusão das fibras;
10. **Teste de Tração:** Tracionar a fibra, adequadamente, para propiciar a homogeneidade da emenda;
11. **Proteção da Emenda:** Centralizar o protetor de emenda sobre o produto no o ponto de fusão, posicionando em seguida na câmara de aquecimento e protegendo a contração da emenda;
12. **Acondicionamento:** Acondicionar a emenda protegida no ordenador da caixa de emenda ou bastidor;
13. **Avaliação:** Executar a avaliação da perda no ponto de fusão, sendo a atenuação máxima admissível de 0,1dB por emenda.

6.4 Emenda Mecânica

Este tipo de emenda permite um tempo de instalação inferior a 2 minutos em campo. Somente é necessário o uso de ferramentas para a preparação da fibra, isto é, o decapador e o clivador. Uma vez preparadas as fibras, estas são introduzidas em um conector mecânico até que seus extremos se toquem. Posteriormente as duas partes móveis do conector mecânico são giradas para a fixação da fibra. Com este procedimento é possível atingir atenuações de até 0,5 dB.

6.5 Emenda por Conector

Caracteriza-se pela adequada preparação das extremidades a serem emendadas e seu posterior alinhamento através de um alinhador de precisão.

Conector óptico é um componente destinado a conectar e desconectar e reconectar freqüente e facilmente, a fibra a uma fonte, um detector ou a uma outra fibra. Apesar de parecer simples, a ocorrência de uma falha neste componente pode trazer resultados extremamente sérios.

6.5.1 Características Ópticas dos Conectores (Perdas)

Os conectores ópticos têm duas importantes características ópticas conhecidas por **perda de inserção** e **perda de retorno**.

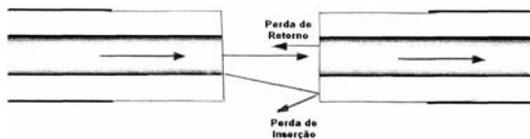


Figura 6-14: Perdas nos conectores ópticos

6.5.1.1 Perda de Inserção

É a potência óptica perdida através de uma conexão que é definida como a razão logaritmo da potência na conexão e a potência transmitida através da conexão. É comumente medida pela comparação da potência em decibéis antes e após a conexão. A diferença entre as duas medições é a perda de inserção do conector. Esta perda deve-se ao alinhamento físico entre os núcleos das fibras ópticas ou à qualidade do acabamento das faces em contato. As perdas podem ser do tipo **intrínsecas** ou **extrínsecas**.

A perda de inserção depende do comprimento de onda e do tipo de fibra utilizada. A perda de inserção típica situa-se na ordem de 0,1 a 1 dB. Neste aspecto temos normalizado que:

- Para conectores montados em **fibras monomodo (SM)**, o valor típico de perda de inserção é da ordem de 0,4 dB (máximo 0,5dB);
- Para **fibras multimodo (MM2 para núcleo 50^μm e MM3 para núcleo 62,5^μm)**, o valor típico de perda de inserção é da ordem de 0,6 dB (máximo 0,7dB).

6.5.1.2 Perda de Retorno

A perda de retorno, também chamada de reflectância ou refletividade, é a medida do nível de potência óptica que é refletida na interface fibra-fibra, retomando esta luz para a fonte luminosa.

A perda de retorno apresenta valor positivo, enquanto a refletividade ou reflectância com o valor negativo. Normalmente, a perda de retorno está associada à transição de um material para um outro, por exemplo, de vidro para o ar. Se dois materiais têm diferentes **índices de refração**, alguma energia óptica pode ser refletida (reflexão de Fresnel) na superfície retomando à fonte, denominado refletividade. Este é um parâmetro importante, visto que a reflexão do sinal e o seu retorno à fonte pode degradar a estabilidade do próprio laser, ou causar redução de performance da rede.

Esta característica está relacionada com a geometria do polimento que é executado na face do ferrolho do conector óptico, podendo ser dos seguintes tipos: Polimento Plano, Polimento Convexo PC e Polimento Convexo Angular APC.

a) Polimento Plano (FLAT): Neste caso ambas as faces são planas.

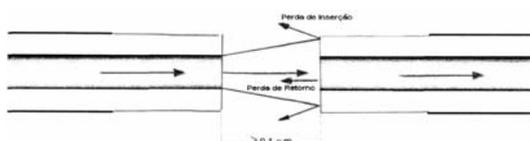


Figura 6-15: Polimento plano

b) Polimento Convexo Angular APC (Angled Physical Contact): Com o aumento da velocidade de transmissão, foi necessária uma evolução dos conectores ópticos, visando principalmente melhorar sua performance quanto a característica de perda de retorno. Dessa evolução surgiram os conectores do tipo APC, onde estes utilizam ferrolhos que combinam a geometria em ângulo de 8° com o polimento PC na sua extremidade. Com ângulo de 8° em relação a normal, evita-se a captura do sinal refletido pelo núcleo da fibra. Os conectores APC foram idealizados para sistemas de altas taxas de transmissão (da ordem de GHz) que necessitam de uma faixa de perda de retorno entre 50dB e 70dB e perda de inserção menor que 0,3dB, para sua operação. Os conectores com geometria APC são compatíveis apenas entre si, não permitindo qualquer outro tipo de arranjo.

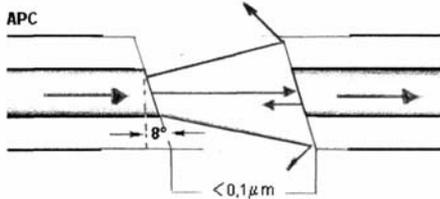


Figura 6-16: Polimento Convexo APC

c) Polimento Convexo PC (Physical Contact): Os conectores ópticos que utilizam a técnica de polimento PC possuem uma melhor resposta de perda de retorno e perda de inserção, comparando com os conectores com polimento plano. O polimento PC minimiza a reflexão da luz, através da utilização de uma técnica de preparação da fibra, onde a face externa do ferrolho e a fibra mantêm um perfil convexo e contato direto com a outra fibra. Vários tipos de conectores ópticos podem ser fornecidos na versão PC, onde a faixa de perda de retorno varia entre:

- 25dB até 35dB para polimento PC
- 35dB até 45dB para polimento super PC (SPC)
- 45dB até 55dB para polimento ultra PC (UPC/HPC)

Uma tabela comparativa dos tipos de polimento é mostrada abaixo:

Tipo de Polimento	Perda de Inserção Valor Máximo em dB	Perda de Retorno Valor Máximo em dB
Plano	0,7	15
PC	0,5	25
SPC	0,4	40
UPC	0,3	45
APC	0,3	55

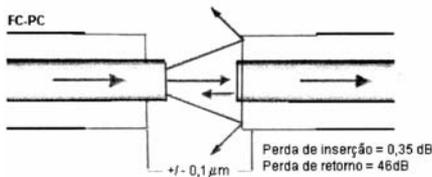
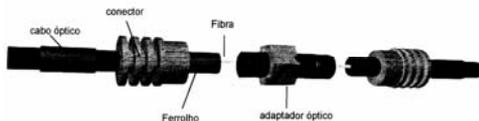


Figura 6-17: Polimento Convexo PC

6.5.2 Conexão Óptica



A conexão óptica é normalmente feita por dois conectores e um adaptador óptico

Figura 6-18: Exemplo de conexão óptica

6.5.2.1 Conector Óptico



Existem vários tipos de conectores ópticos, sendo cada qual para uma utilização específica. Independente da forma de fixação, podemos dizer que um conector óptico básico é formado por: ferrolho, carcaça e capa conforme figura:

Figura 6-19: Partes principais do conector óptico

- **Capa:** Normalmente em PVC, tem por função aliviar os esforços mecânicos entre a base rígida da carcaça, onde está fixada a fibra óptica, e as movimentações do cabo óptico quando da sua manipulação, evitando curvaturas excessivas que poderiam ocasionar o rompimento da fibra óptica;
- **Carcaça:** Em aço inox ou plástico, tem por função prover a forma de fixação e a proteção mecânica ao conjunto ferrolho-cabo óptico. Esta forma de fixação pode ser do tipo rosqueável, baioneta ou push pull;

- **Ferrolho:** Em cerâmica ou aço inox é o componente do conector óptico responsável pela conexão entre as duas fibras ópticas. A eficiência deste componente, está ligada à precisão da furacão pela qual é inserida a fibra óptica e o tipo de polimento aplicado em sua extremidade.

6.5.2.2 Adaptador Óptico

Os conectores ópticos são constituídos na forma de plugues (machos) e são conectados entre si através de outro componente chamado **adaptador óptico** (fêmea). O adaptador óptico é constituído pela carcaça, que atua como suporte de fixação para os dois conectores ópticos, e uma luva de alinhamento interna, pela qual será feito o alinhamento entre os dois ferrolhos sob conexão. Este sistema é ilustrado na figura:

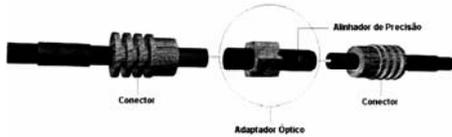


Figura 6-20: Adaptador óptico

6.5.3 Tipos de Conectores

Os principais conectores utilizados no mercado, tanto para redes locais quanto para telecomunicações são os mostrados na tabela a seguir.

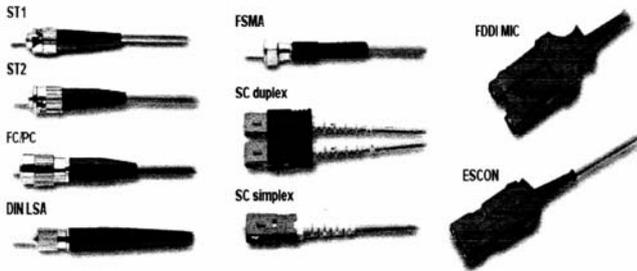
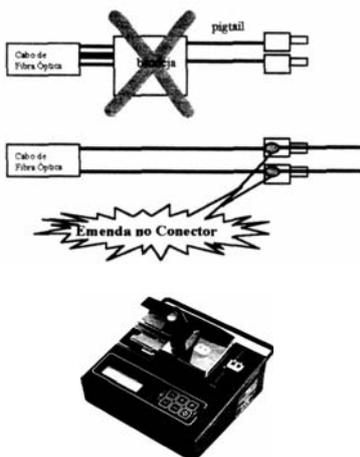


Figura 6-21: Tipos principais de conectores

CONECTOR	APLICAÇÃO	CONSTRUÇÃO	TIPO DE FIBRA/POLIMENTO
ST	Redes de distribuição padrão TELEBRÁS e redes locais	Carcaça metálica Ferrolho cerâmico Encaixe baioneta.	SM, MM2, MM3/SPC
SC	Redes de distribuição padrão TELEBRÁS e redes CATV	Carcaça metálica Ferrolho cerâmico Push-pull	SM, MM2, MM3/SPC, SM/APC
FC	Instrumentação	Carcaça metálica Ferrolho cerâmico Rosqueável	SM, MM2, MM3/SPC, SM/APC
DIN	Equipamentos padrão Siemens	Carcaça metálica Ferrolho cerâmico Rosqueável	SM/PC
ESCON	Equipamentos padrão IBM (rede local)	Carcaça plástica Ferrolho duplo cerâmico Encaixe rápido	MM3/PLANO
FDDI	Equipamentos padrão IBM (rede local)	Carcaça plástica Ferrolho duplo cerâmico Encaixe rápido	MM3/PLANO
HFS-13/A	Redes de distribuição padrão TELEBRÁS	Carcaça metálica Ferrolho metálico Rosqueável	MM2/PC
H MS-10 A	Redes de distribuição padrão TELEBRÁS	Carcaça metálica Ferrolho metálico Rosqueável	SM/PC
mini BNC	Redes locais	Carcaça metálica Ferrolho metálico Encaixe baioneta	MM3/PLANO
SMA-905	Redes locais	Carcaça metálica Ferrolho metálico Rosqueável	MM3/PLANO
E2000	Redes de distribuição de telecomunicações e CATV	Carcaça plástica Ferrolho duplo cerâmico Push-pull	SM/PC, SM/APC

6.5.4 Máquina de Confeção de Conectores FuseLite RXS/Siemens

Fuselite: novo conceito na instalação. Economia na Implantação com a eliminação da bandeja e do pigtail.



Esta ferramenta permite a instalação do tipo "fiber to the desk" (fibra até a mesa), oferecendo para os usuários mais uma opção inteligente de instalação. O sistema FuseLite permite a emenda direta dentro do conector, tomando assim, a instalação mais fácil e descomplicada. O sistema também elimina DIO e BEO.

Figura 6-22: Sistema FuseLite

FuseLite é um novo e exclusivo sistema de conexão de fibras ópticas. É a solução completa para a conectorização e fusão da fibra óptica, o que possibilita aplicações de fusão direta dentro dos conectores e fusão da fibra com fibra.

Isto tudo sem perda da qualidade, considerando inserção e perda de retorno, como ocorre com a maioria das conexões feitas em campo.

Figura 6-23: FuseLite RXS/Siemens

7. Conversores Eletro-Ópticos

Os conversores eletro-óptico e óptico-elétrico usado em comunicações ópticas são realizados com materiais **semicondutores** e usam propriedades elétricas e ópticas peculiares a esses materiais. Propriedades essas, determinadas pela estrutura das bandas de energia permitida para os elétrons, quando os átomos desses materiais são dispostos numa rede cristalina. Os componentes usados neste processo são os LED s ou os **lasers**.

7.1 Semicondutores

O Diagrama de Bandas de Energia em um semiconductor intrínseco representa o estado dos níveis de energia dos elétrons e átomos.

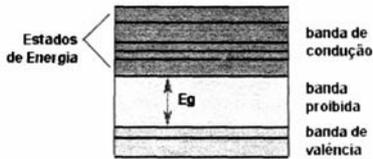


Figura 7-1: Bandas de energia em um semiconductor

Vários mecanismos podem ser responsáveis pelo bombeamento de elétrons da banda de valência para banda de condução, Dentre eles:

- Agitação térmica;
- Absorção de fótons;
- Injeção de elétrons.

Ao abandonar a banda de valência, o elétron deixa uma **ligação covalente incompleta (lacuna)**. Esta ligação pode se mover na rede cristalina.

A tabela abaixo apresenta o valor da largura de banda proibida e as características de recombinação de portadores nos principais semicondutores utilizados.

Material	Tipo de Recombinação	Largura de Banda proibida Eg (eV)	Coefficiente de Recombinação (cm ³ xs ⁻¹)
GaAs	Direto	1,43	7,21x10 ⁻¹⁰
GaSb		0,73	2,39x10 ⁻¹⁰
InAs		0,35	8,50x10 ⁻¹¹
InSb		0,18	4,58x10 ⁻¹¹
Si	Indireto	1,12	1,79x10 ⁻¹⁵
Ge		0,67	5,25x10 ⁻¹⁴
GaP		2,26	5,37x10 ⁻¹⁴

Os elétrons da banda de condução retomam à banda de valência por um mecanismo conhecido como recombinação. Nele o elétron se recombina com a **lacuna** liberando energia na forma de fóton.

A recombinação é o mecanismo de fotogeracão, isto é, geração de luz nas fontes semicondutores.

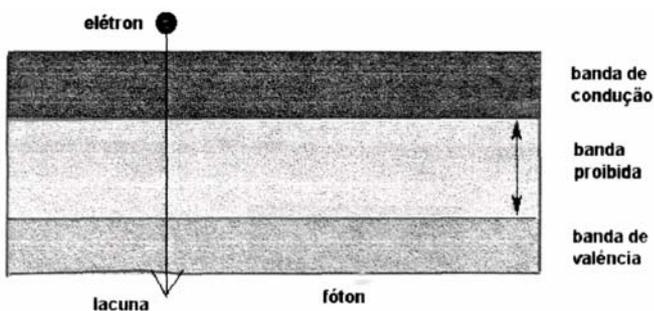
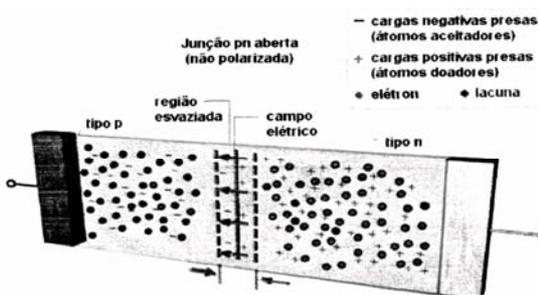


Figura 7-2: Processo de recombinação do elétron com a lacuna.

7.1.1 Junção PN

A junção PN é obtida quando o material semiconductor é dopado com outros materiais aceitadores e doadores. Polarizando-se a junção

PN diretamente, cria-se uma região de coexistência de um grande número de elétrons e lacunas onde passa a acontecer um grande número de recombinação, gerando luz (fótons).



Polarizando-se a junção PN inversamente, a barreira de potencial cresce, não havendo injeção de portadores de um lado para o outro. A corrente devido a portadores nesta região pode ocorrer devido a agitação térmica (corrente de escuro) ou devido à absorção de fótons que gera a fotocorrente nos fotos detectores.

Figura 7-3: Homojunção

Tipos de junção:

Homojunção: É uma junção PN feita do mesmo material cristalino, variando-se somente o nível e o tipo de dopagem de um ponto a outro da estrutura cristalina. Usado em fotodetectores.

Heterojunção: É a junção feita com diferentes materiais cristalinos sem defeitos ou descontinuidades. A heterojunção é necessária nos foto-emissores para que os fótons gerados que tendem a ser reabsorvidos pelo material, possam ser guiados para a superfície do material.

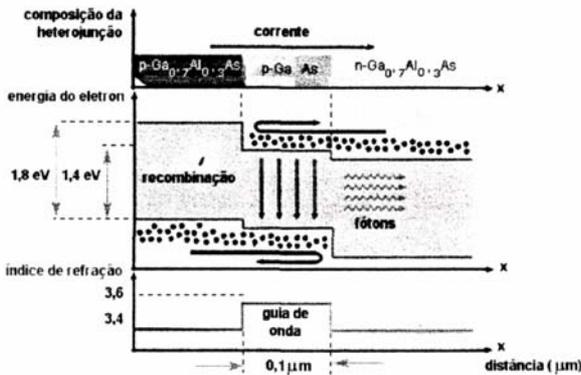


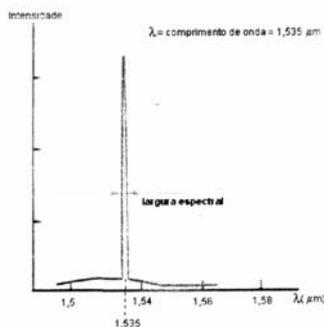
Figura 7-4: Heteroestrutura típica de um laser semiconductor de dupla heterojunção (DH) com emissão na primeira janela de transmissão.

7.2 Requisitos para Conversores Eletro-ópticos

Os principais requisitos para o conversor eletro-óptico estão relacionados ao comprimento de onda, largura espectral, estabilidade, entre outros.

7.2.1 Comprimento de Onda

O comprimento de onda de operação é definido pelo material e pela estrutura semicondutora escolhidos. Para a operação com **fibras monomodo** há a necessidade de fontes com largura de linha estreita. Larguras de linha menores resultam em larguras de banda (BW) maiores e, portanto, mais alta taxas de dados (100-1000GHz).



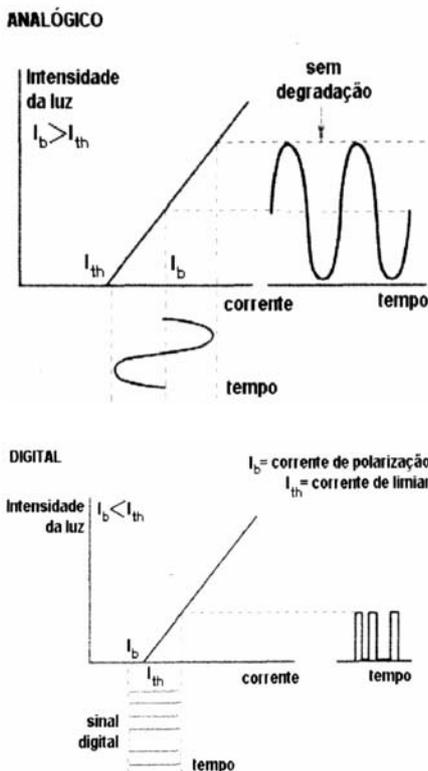
Os primeiros LEDs e lasers foram produzidos para 0,82 e 0,85 µm. Este intervalo representa a primeira janela de baixa perda em fibras. Posteriormente, a operação foi deslocada para o comprimento de onda igual a 1,3 µm, onde a **dispersão** em fibras **monomodo** é mínima. Com a introdução das fibras com dispersão deslocada (DS), passaram a operar em torno de 1,55 µm; esta janela de baixa perda em fibras, permite valores próximos ao limite teórico, 0,2 dB/km.

Figura 7-5: Largura espectral da janela 1,535 µm

7.2.2 Modulação

É a variação de um parâmetro da portadora óptica, através do sinal modulante (informação). Para que o LED e o laser possam ser utilizados como transmissores ópticos é necessário modular a fonte óptica com a informação a ser transmitida. A modulação mais usada é a Modulação em Intensidade onde é feita a variação da corrente injetada na fonte óptica.

Figura 7-6: Modulação do laser a partir de um sinal analógico.



Para entendermos o fenômeno de modulação analisaremos a modulação do laser. A polarização do laser semiconductor para operação com sinais analógicos é diferente da polarização para operação com sinais digitais.

No caso de sinais analógicos, escolhe-se uma corrente de operação no centro da região linear da curva $P \times I$ (Potência óptica versus Corrente de Polarização) do laser. Em seguida aplica-se o sinal analógico.

Figura 7-7: Modulação do laser a partir de um sinal digital

No caso de sinais digitais, a polarização do laser deve ser abaixo ou igual a corrente de limiar para a ação laser (I_{th}). Nesse caso, evita-se a emissão de luz laser quando o nível do sinal digital aplicado é zero (baixa razão de extinção).

7.2.2.1 índice de Modulação Óptica no Laser (OMI)

Este parâmetro é proporcional à raiz quadrada do número de canais que modulam o laser. Um alto índice de modulação significa um sinal forte (elevada relação sinal-ruído) de saída. Porém, existe um compromisso entre o OMI e as **distorções não lineares**. Essa relação limita o número máximo de canais possíveis de serem transmitidos. Para lasers semicondutores **modulados diretamente**, normalmente OMI fica em torno de 25% a 50%. Apesar de alguns lasers apresentarem boas características lineares obtendo OMIs da ordem de 60%, a sobremodulação do dispositivo por curtos períodos de tempo resulta eventualmente na destruição do mesmo.

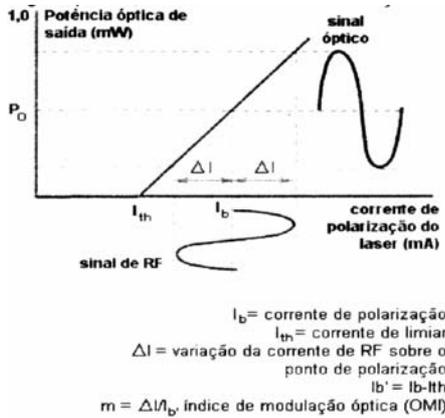


Figura 7-8: representação do índice de modulação óptica no laser

Deve, portanto, existir um compromisso entre as distorções do sistema e o desempenho do sistema em termos de relação sinal-ruído do transmissor óptico. Para prevenir as distorções do sinal óptico de saída, a modulação deve ser confinada na região linear de operação do laser semiconductor. Além do mais, se ΔI for maior que I_b , a porção inferior do sinal óptico será grampeada, ocasionando sérias distorções.

7.2.2.2 Chirp do Laser



O Chirp ou também conhecido como ruído de gorgueio do laser semiconductor, é associado ao alargamento da linha de emissão do laser quando modulado diretamente. Variações na corrente de injeção do laser causam uma mudança na densidade de portadores do material semiconductor, alterando o **índice de refração** do dispositivo.

Figura 7-9: Chirp

7.2.3 Tempo de Resposta

Considerando o esquema de **modulação** de intensidade, os dados são representados pela variação na intensidade da fonte. Uma fonte útil é aquela que pode ligar e desligar fácil e rapidamente.

Grandezas que caracterizam o tempo de resposta de uma fonte:

- **Tempos de subida (rise time= t_r):** Intervalo de tempo em que ocorre a variação de 10% a 90% da potência total de saída, a partir do momento que a fonte foi ligada;
- **Tempos de descida (fali time= t_f):** Intervalo de tempo em que ocorre a variação de 90% a 10% da potência total de saída, a partir do momento que a fonte foi desligada.

Para altas taxas de dados, o dispositivo deve ter t_r e t_f curtos. Esses tempos são especificado, geralmente, pelo fabricante da fonte. A relação entre a largura de banda óptica (BW_{opt}) e o tempo de subida é dada por:

$$BW_{opt} = 0,35/t_r$$

Vale observar que para modulação analógica de intensidade, a intensidade da luz representa a amplitude do sinal transmitido. Qualquer não-linearidade da fonte, neste caso, causa distorções no sinal que está sendo transmitido. Este efeito é especificado como **distorção harmônica do dispositivo**.

7.2.4 Eficiência

O acoplamento de luz em fibras envolve altas perdas de sinal e há necessidade de fontes com alta eficiência para produção de luz e o acoplamento à fibra óptica. A eficiência pode ser definida em termos de fótons gerados para elétrons injetados.

Portanto, **eficiência interna** ou eficiência quântica, teria a seguinte relação:

$$h_q = \text{fótons gerados/elétrons injetados}$$

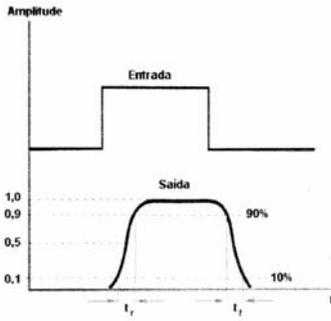


Figura 7-10: Representação da definição do t_r e t_f para uma fonte.

A **eficiência externa**, também denominada eficiência de potência, seria relacionada:

$$h_{PT} = P_{out}/P_{el}$$

Onde:

P_{out} é a potência óptica emitida e

P_{el} é a potência elétrica de alimentação da fonte.

Considerando o **acoplamento** da luz de saída da fonte com fibra óptica, devemos definir a **eficiência de acoplamento** h_c , que relaciona a potência de saída da fonte com a potência de entrada na fibra pela expressão:

$$h_c = P_f/P_{out}$$

Onde:

P_f é a potência na entrada da fibra.

A eficiência total do dispositivo relaciona a potência da entrada na fibra à potência elétrica para alimentação da fonte, pela expressão:

$$h_T = h_{PT} \times h_c = P_f/P_{el}$$

A **eficiência externa** é diferente da **eficiência total**. Eficiência de acoplamento é função da estrutura da fonte e de sua distribuição de intensidade de luz, assim como do tamanho e da **abertura numérica** da fibra.

7.2.4.1 Eficiência de Acoplamento

A eficiência de acoplamento está relacionada à área ativa e de distribuição das fontes, à seção eficaz e a **abertura numérica**.

A distribuição de intensidade é *Lambertiana*, o que significa que a intensidade de luz de saída da fonte (I) tem a forma:

$$I = I_{m\acute{a}x} \cos^2(\theta_a/2)$$

Onde:

θ_a é o ângulo que mede o espalhamento da luz a partir da fonte,

$I_{m\acute{a}x}$ corresponde ao valor máximo de intensidade de corrente produzido pela fonte.

A partir das suposições feitas, podemos definir a **eficiência de acoplamento** de luz na fibra, pela expressão:

$$h_c = \text{sen}^2(\theta_a) = (AN)^2$$

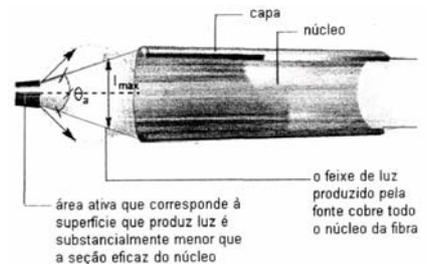


Figura 7-11: Eficiência de Acoplamento

7.2.4 Parâmetros Desejáveis nas Fontes Ópticas

Uma fonte óptica para utilização em comunicações por fibras ópticas, deve ter as seguintes características:

- Intensidade de luz (potência óptica) suficiente para transmissão de sinais a curta, média e longa distância;
- Estrutura compatível com a estrutura da fibra, de modo a permitir o acoplamento da luz de saída;
- Operação em comprimentos de onda adequados para comunicações (1,55; 1,3 ou 0,85 μm);
- Largura de linha estreita para permitir altas taxas de transmissão;
- Tempo de resposta curto (largura de banda BW muito alta) para permitir altas taxas de dados;
- Circuitaria para alimentação dessas fontes deve ser razoavelmente simples;

- O dispositivo deve produzir luz estável e não sofrer alterações devido a modificações ambientais (como temperatura, por exemplo). Deve ser confiável e durável.

7.3 LED (Light Emmiting Diode)

LED é uma junção PN, polarizada diretamente que é atravessada por uma corrente de elétrons passando do material N para o P e que se recombinam com as lacunas produzindo luz. De acordo com a composição do **semicondutor**, haverá um **comprimento de onda** da radiação luminosa, pois a freqüência de radiação está relacionada à largura de **banda proibida**. Por exemplo, o arseneto de gálio emite luz vermelha, o fosfeto de gálio emite luz verde e o arseneto fosfeto de gálio, luz amarela. Existem outros componentes que emitem radiações de distintas freqüências oferecendo diferentes cores.

Os melhores LEDs para uso em comunicações ópticas são os diodos de alta eficiência (LEDs de heterojunção). Esses dispositivos alcançam normalmente altos níveis de saída mediante uma lente que fornece um feixe de luz muito estreito.

7.3.1 Tipos de LED's

7.3.1.1 LED de Homojução

Os LED's de homojução são emissores de superfície, ou seja, a luz gerada é emitida na direção perpendicular ao plano de junção.

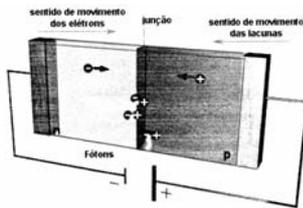
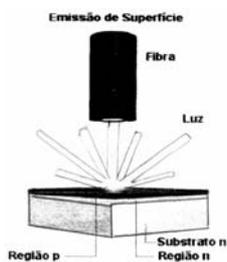


Figura 7-12: LED homojução

O desempenho do LED de homojução não favorece sua utilização em fibras ópticas, pois somente uma pequena parte da luz emitida pode ser acoplada ao núcleo da fibra óptica, diminuindo bastante a eficiência do sistema óptico.

7.3.1.2 LED de Heterojunção



As estruturas cristalinas dos LED's de heterojunção e homojução são semelhantes mas, **com índices** de refração diferentes. Desta forma, pode-se confinar a luz e obter uma saída mais direcionada da luz para a fibra óptica, aumentando a qualidade do **acoplamento** entre LED e fibra óptica.

Figura 7-13: Emissão de Superfície

Existem dois tipos de LED de heterojunção:

SLED (LED de Emissão por Superfície): É um LED de dupla heterojunção com a luz emitida na direção normal ao plano da junção, usada apenas para o confinamento de portadores na região ativa, e não para guiamento de luz. Os fótons produzidos pelas recombinações fotogeradoras são confinados na região circular isolada, alinhada com a fibra que é introduzida num poço cavado no substrato até bem próximo à região ativa. O SLED não tem direção preferencial de emissão, por isso a luz emitida captada pela fibra é de aproximadamente 5% (perda elevada).

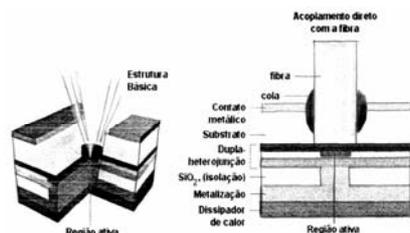


Figura 7-14: Estrutura básica

ELED: É um LED de dupla heterojunção, com geometria semelhante a um laser. Os parâmetros do dispositivo são dimensionados de forma tal que o ganho óptico provido pelo mecanismo de geração estimulada ocorre em todos os comprimentos de ondas.

Existe um guiamento óptico na região ativa para conduzir a luz gerada a um dos lados. Na região transversal a região ativa é limitada pelas heterojunções com a camada de confinamento. O confinamento pode ser feito por heterojunção enterrada, na direção do guiamento lateral, os portadores chegam até as interfaces do dispositivo. A interface oposta a da emissão é feita refletora para evitar perdas e a interface emissora é recoberta por revestimento anti-reflexivo para evitar a **Reflexão de Fresnel**.

A melhor diretividade em um dos planos é suficiente para melhorar significativamente a eficiência de acoplamento à fibra.

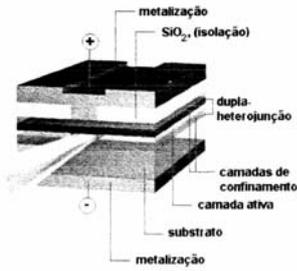


Figura 7-15: Estrutura ELED

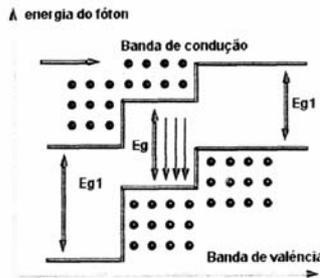
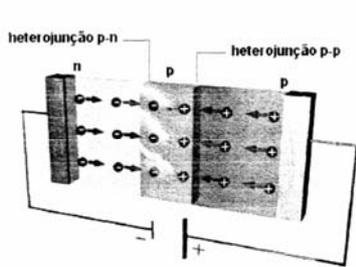


Figura 7-16: Heteroestrutura de um ELED

7.3.2 Potência Óptica no LED

A potência óptica de saída é função da corrente de alimentação e fornece a curva de funcionamento do LED.

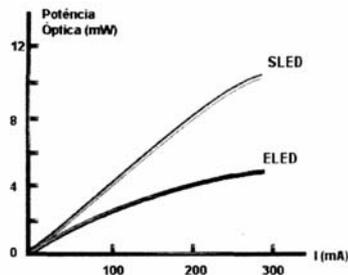


Figura 7-17: Características estáticas do LED (os níveis de potência óptica referem-se a potência colocada no ar)

A resposta dinâmica do LED caracteriza a velocidade com que ele pode ir de um ponto a outro da sua característica estática.

Para modulação analógica a resposta dinâmica é melhor caracterizada pela faixa de modulação do LED. Para a modulação digital o comprimento dinâmico é melhor caracterizado pelos tempos de subida e descida do dispositivo.

7.3.3 Espectro do LED

A distribuição espectral da luz gerada pelo LED é determinada pelo material utilizado, dimensões da estrutura e disposição das camadas semicondutoras. Sendo o comprimento de onda central aproximado pela largura de banda proibida a largura espectral é relativamente elevada.

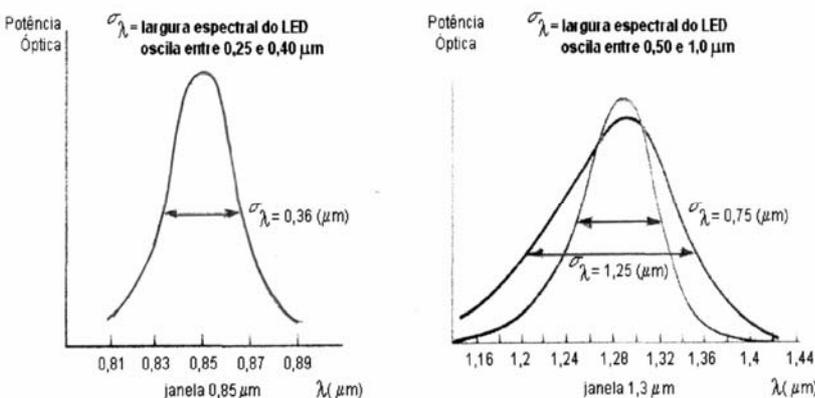


Figura 7-18: Espectros de emissão típicos do LED

7.4 Lasers

O laser (Light Amplification by Stimulated Emission Radiation) é uma fonte óptica que opera por emissão estimulada. A emissão estimulada é um processo onde fótons colidem com elétrons e provocam transições eletrônicas radiativas, que são transições que emitem luz.

Os lasers empregam duas heterojunções que propiciam uma camada ativa central bem definida, onde ocorre a recombinação radiativa de elétrons e lacunas. Os problemas de fuga de portadores minoritários são evitados pelas barreiras de potencial existentes nas hetero-interfaces. Para obter-se a emissão estimulada é necessária uma fonte externa denominada fonte de bombeio e um método para confinar os fótons gerados numa pequena área, com a finalidade de intensificar as colisões fóton-elétron. No caso os fótons são confinados para a área ativa por espelhos construídos nas faces laterais.

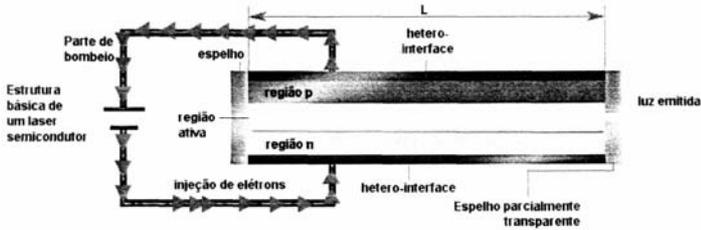


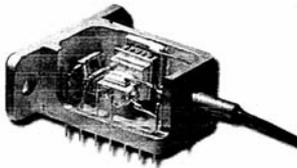
Figura 7-19: Estrutura básica de lasers

Os fótons gerados viajam até os espelhos a são refletidos de volta para a área ativa.

Desse modo, as colisões entre fóton e elétrons são intensificadas e produzem mais fótons e a

partir de uma determinada condição ocorre o leisamento. A região ativa limitada pelos espelhos forma uma cavidade amplificante. Um dos espelhos existentes nas extremidades da cavidade é parcialmente transparente para que a luz possa ser emitida. O leisamento ocorrerá em comprimentos de ondas particulares que estão relacionados ao comprimento da cavidade L.

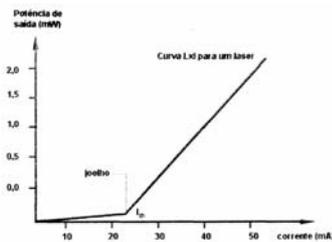
Figura 7-20: Exemplo de um laser



7.4.1 Curva L-Lasers

A curva de funcionamento dos lasers é dada pelas curvas de caracterização da potência de sinal de saída em função da corrente de alimentação.

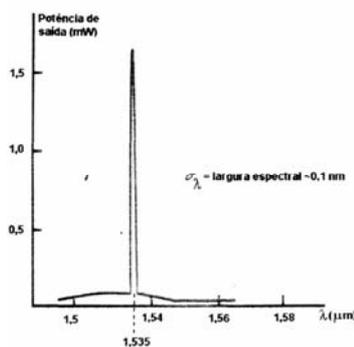
O laser possui uma corrente de limiar característica (I_{TH}) que indica o ponto a partir do qual o dispositivo começa a funcionar como um laser. Para correntes de alimentação superiores a essa corrente de limiar, a potência de saída do laser cresce rapidamente à medida que a corrente de alimentação cresce. A corrente de limiar depende da temperatura. A medida que a temperatura aumenta, a corrente de limiar aumenta e em conseqüência, ocorrem mudanças na potência de saída dos lasers. Devido a sensibilidade que os lasers têm com relação à temperatura, é fundamental haver o controle de temperatura durante seu funcionamento.



A fonte de alimentação, além de possuir circuitos de proteção contra transientes de corrente, deve também garantir o controle preciso de temperatura para o bom funcionamento do diodo laser.

Figura 7-21: Curva L x I para um laser

É importante lembrar que feixes de luz produzidos por laser são altamente danosos ao olho humano, mesmo os que têm pequena intensidade. Portanto, quando se trabalha com lasers não se deve olhar diretamente na região emissora de luz. No caso de se trabalhar com lasers que emitem luz no infravermelho, caso dos comprimentos de onda em 1,3 e 1,5 μm , deve-se utilizar visores ópticos ou cartões sensíveis à radiação infra-vermelha.



7.4.2 Espectro dos Lasers

A distribuição espectral da luz gerada por um laser é determinada pelo material utilizado para fabricação do laser, pelas dimensões da cavidade e pela estrutura escolhida para a disposição das camadas semicondutoras.

Figura 7-22: Espectro de um laser DFB

Observamos o espectro de saída de um laser DFB (Distributed Feedback), cuja principal característica é apresentar largura de linha bastante estreita (0,1 nm). O comprimento de onda da luz emitida é igual a 1,535 μm . A cavidade desses lasers é feita com uma periodicidade que força a seleção de um comprimento de onda.

Portanto, permite um espectro de saída estreito, no comprimento de onda característico de operação do laser.

7.4.3 Tipos de Lasers

7.4.3.1 Laser de Injeção

A estrutura mais simples de um laser de injeção é constituída por uma junção P-N fortemente dopada e fabricada a partir de um material de gap direto que é alimentado por uma corrente elétrica. A realimentação óptica é feita por espelhos que são formados usualmente pela clivagem do material semicondutor ao longo dos planos do cristal. A diferença de índice de refração entre o cristal semicondutor e o ar, faz com que as

faces clivadas funcionem como refletores. Assim o material semiconductor funciona como meio de ganho e ressonador óptico.

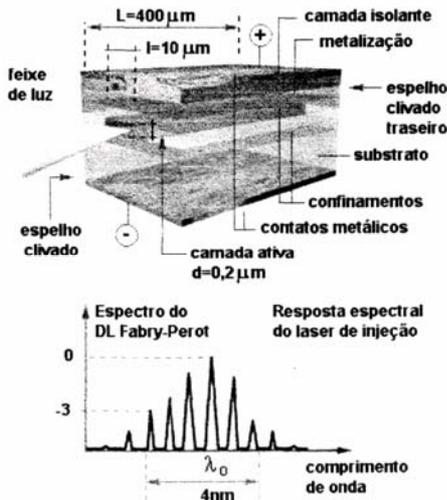
Para que as faces clivadas provoquem interferências construtivas entre ondas sucessivamente refletidas, gerando a realimentação positiva, é preciso que a distância de ida e volta entre os espelhos, dada pelo dobro de comprimento L da região ativa, seja um múltiplo inteiro de comprimentos de onda no cristal.

$$2L = m\lambda/n_g$$

Onde:

L - Comprimento

n_g - índice de Refração da guia de onda



Da equação obtêm-se os comprimentos de ondas gerados pela estrutura conhecida como **Ressonador Fabry Perrot**, concentrando-se em torno de valores discretos.

Figura 7-23: Laser Fabry-Perrot

Em comparação com outros tipos de lasers de injeção, tem a vantagem de possuir tecnologia de fabricação bastante desenvolvida e conhecida. No entanto, a largura de linha espectral desse tipo de laser é tipicamente maior que de outros tipos.

7.4.3.2 Laser DFB (Distributed FeedBack)

Uma estrutura elegante que permite o funcionamento do laser a uma única frequência, a partir da utilização de "ressonantes distribuídos", fabricados na própria estrutura do laser e que permite a seletividade do comprimento de onda.

Nestes lasers a ação realimentadora dos espelhos é substituída pela de uma corrugação periódica numa parede longitudinal do guia. Como o período da corrugação é múltiplo do meio comprimento de onda desejado, a realimentação deste fica assegurada, ao passo que a dos outros comprimentos de onda é destruída pela interferência entre ondas parcialmente refletidas por sucessivas cristas de corrugação. O resultado é um espectro com apenas um modo longitudinal.

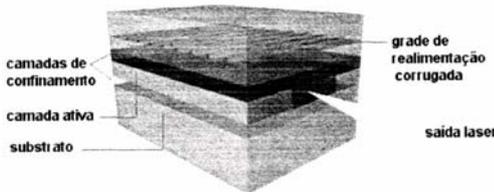
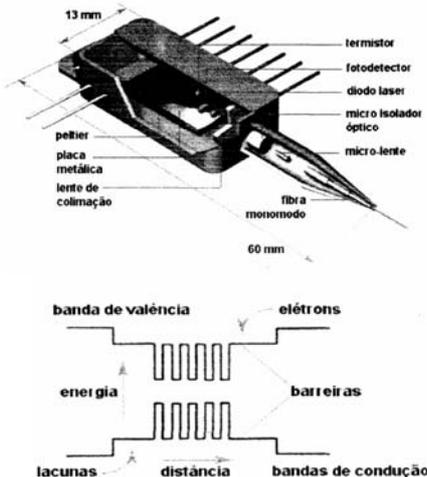


Figura 7-24: Laser DFB

A figura ilustra um laser tipo DFB. Esses lasers já possuem isolador óptico embutido dentro do encapsulamento, além do controle automático de potência óptica, corrente de polarização e controle de temperatura. Alguns transmissores usando laser DFB possuem um sofisticado controle pré-distorção para

umentar a linearidade do sinal óptico de saída do transmissor. Os lasers DFB são indicados para a comunicação a longas distâncias.

Figura 7-25: Exemplo prático de laser DFB



7.4.3.3 Laser Quantum-Well

A possibilidade de crescimento de camadas epitaxiais extremamente finas de materiais semicondutores tem permitido a fabricação de novos tipos de estrutura para laser. Em lasers de poços quânticos, a espessura da camada ativa é reduzida de 1 mm para até 2 nm. Lasers com estrutura de um único poço quântico (Single Quantum Well) ou com múltiplos poços quânticos (Multiple Quantum Well) têm sido fabricados. Os efeitos quânticos ocorrem a partir do confinamento de portadores no poço de potencial formado pelas bandas de condução e de valência.

Figura 7-26: Estrutura com múltiplos poços quânticos

O movimento dos elétrons e lacunas na camada ativa é quantizado

para a componente perpendicular ao poço. Como resultado dessa restrição dos portadores, a energia dos elétrons e lacunas que se movem na direção de confinamento é quantizada para níveis de energia discretos. As transições radiativas da mais baixa energia ocorrem a uma energia do fóton que é significativamente mais alta que a banda de gap do material. A ação laser usualmente ocorre sobre a transição entre a mais baixa sub-banda/banda de condução e a mais alta sub-banda da lacuna da banda de valência. A energia do fóton depende da largura do poço e aumenta com a amplitude das barreiras de potencial. A amplitude das barreiras de potencial dependem, na verdade, do material utilizado para a fabricação do poço e das barreiras.

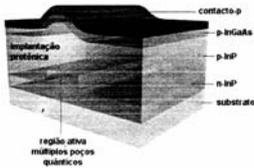


Figura 7-27: Funcionamento do Laser Quantum-Well

7.5 Comparação entre LED e Laser

7.5.1 Potência Óptica

O LED emite potência maior quando o laser está operando com uma corrente inferior a de limiar; entretanto, após a corrente do laser superar a de limiar, a potência óptica emitida pelo laser supera a potência óptica emitida pelo LED.

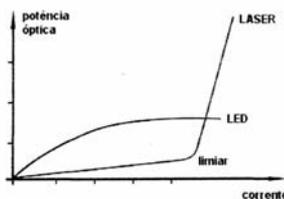


Figura 7-28: Corrente de limiar do laser

7.5.2 Utilização

As principais aplicações de LED estão voltadas para redes locais (LAN) onde as exigências são:

- Alta imunidade a ruído;
- Taxa de transmissão relativamente baixa;
- Pequenas distâncias de transmissão;
- Baixa sensibilidade à temperatura;
- Utilizem fibras multimodo.

As aplicações de laser são voltadas a redes de alta velocidade e longa distância normalmente. Normalmente utilizam fibras monomodo, como as redes metropolitanas (MAN) redes geograficamente distribuídas (WAN) e as redes globais (GAN).

7.5.3 Largura do Espectro

A radiação laser possui uma faixa estreita de comprimento de onda, enquanto o LED emite vários comprimentos de onda.

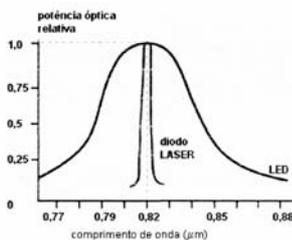


Figura 7-29: Espectros de LED e Laser

7.5.3 Tempo de Vida

Os LEDs exibem degradação gradual. Sob condições de operação adequadas, chegam a funcionar 10^6 a 10^9 minutos ininterruptas. Lasers semicondutores podem chegar a funcionar de 10^5 a 10^7 horas ininterruptas sob condições de operação adequadas.

7.5.5 Sensibilidade a Temperatura

A luz produzida por uma fonte I deve depender somente do sinal de entrada e não variar com a temperatura ou outras condições ambientais. LED's não são afetados por mecanismos de degradação irreversíveis como é o caso de lasers semicondutores que, por exemplo, sofrem danos irrecuperáveis quando submetidos a transientes de corrente.

7.5.6 Tabela Comparativa

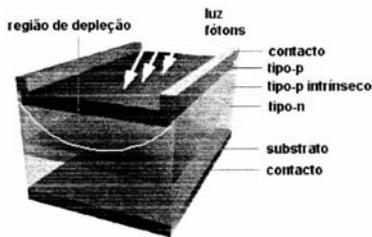
Característica	Diodo Laser	LED
Potência Óptica	alta	baixa
Custo	alto	baixo
Utilização	complexa	simples
Largura do Espectro	estreita	larga
Tempo de Vida	menor	maior
Velocidade	rápido	lento
Divergência na Emissão	menor	maior
Acoplamento à Fibra Monomodo	melhor	pior
Sensibilidade	maior	menor

7.6 Fotodetectores

É o dispositivo que recebe a luz transmitida pela fibra e converte-a em corrente elétrica para processamento pelo receptor. O mecanismo básico da conversão da luz em corrente pelo material semiconductor é a fotoionização. Na fotoionização a energia do fóton é usada para tirar o elétron da banda de valência, levando-o à banda de condução. Pela fotoionização, os fótons geram portadores de carga. Para gerar corrente elétrica é necessário que um campo elétrico movimente esses portadores antes que eles se recombinem no interior da rede cristalina.

A estrutura básica de um fotodetector é uma junção PN polarizada reversamente, também chamada de fotodiodo. No fotodiodo a absorção dos fótons incidentes produzem corrente elétrica proporcional à luz. Para obtenção de um bom fotodetector é necessário que o mesmos sejam capazes de receber pequenas potências ópticas convertendo-as em corrente, com o mínimo de ruído e distorção.

7.6.1 Diodo PIN (P, Intrínseca, N)



O diodo PIN é formado por uma camada P e N fortemente dopadas e uma camada intrínseca (I) levemente dopada submetida à polarização reversa.

Figura 7-30: Diodo PIN

Tendo em vista que a região de depleção pode ser facilmente ampliada na região intrínseca, o fotodiodo **PIN** terá uma grande região de depleção o que aumenta o coeficiente de absorção de radiação do dispositivo.

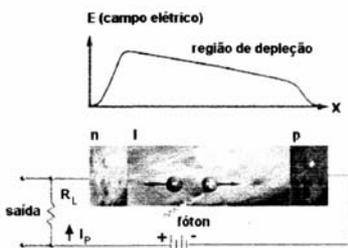


Figura 7-31: Representação do funcionamento do diodo PIN

O diodo PIN é usado nos sistemas que requerem boa sensibilidade para sinais fracos e grandes larguras de faixa. A eficiência do diodo PIN é expressa em termos de sua responsividade R_{PIN} , definida como a relação entre a corrente gerada e a potência óptica incidente.

7.6.2 Diodo APD (Avalanche Photo Detector)

Nos casos em que o sinal é fraco e a frequência muito elevada, será necessário usar os fotodiodos de avalanche. A principal característica desses diodos é detectar e amplificar o sinal luminoso pelo processo de multiplicação eletrônica (avalanche). Quando um fóton incidir no fotodiodo, elétrons serão gerados e acelerados devido à forte polarização, originando um fenômeno semelhante a uma avalanche de elétrons. O ganho de corrente nesses diodos pode ser de 100 a 200, por isso detectam sinais muito mais fracos que um **Diodo PIN**.

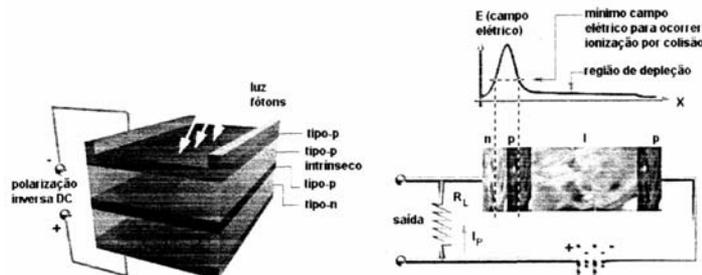


Figura 7-32: Diodo APD

7.7 Comparação entre Fotodetectores PIN e APD

Característica	PIN	APD
Sensibilidade	menor	muito maior
Linearidade	maior	menor
Relação Sinal/Ruído	pior	melhor
Custo	baixo	alto
Tempo de Vida	maior	menor
Tempo de Resposta	maior	menor
Sensibilidade à Temperatura	menor	maior
Circuitos de Polarização	simples	complexo

8 Dispositivos Ópticos

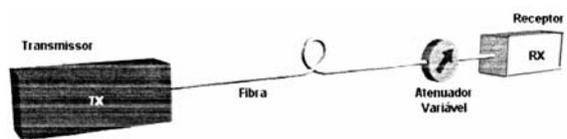
São dispositivos utilizados em conjunto com a fibra óptica visando ampliar suas facilidades.

8.1 Atenuador Óptico



Atenuador óptico é um componente óptico de duas portas, com a função de reduzir a potência óptica em propagação na fibra. A atenuação pode ser fixa ou variável.

Figura 8-1: Atenuador Fixo (esquerda) e atenuador variável (direita)



O atenuador deve permitir a redução da potência óptica recebida pelo fotodetector para um nível dentro da faixa dinâmica do receptor óptico.

Figura 8-2: Atenuador inserido em uma rede óptica

8.2 Isolador Óptico

É um componente usado para prevenir reflexões de retorno do feixe óptico ao longo do caminho de transmissão. Retorno este causado por emendas malfeitas, conectores ou filtros presentes na rede de fibra. O isolador óptico é usado na saída dos transmissores laser e nos amplificadores, pois esses componentes são muito sensíveis à luz que retorna por **reflexão de Fresnel** nas emendas, conectores e filtros. Os sinais ópticos refletidos podem danificar ou alterar a resposta em frequência dos lasers.



Figura 8-3: Isolador óptico (Fitel)

O funcionamento do isolador é baseado no cristal rotator de Faraday. A luz incidente, após ser polarizada, é rotacionada (campo elétrico) de 45°. O sinal que retorna da rede sofre uma rotação oposta de 45°, não conseguindo, assim, se propagar na direção do laser.

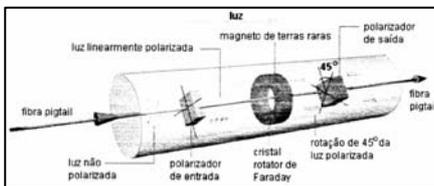


Figura 8-4: Funcionamento do isolador óptico

8.3 Chave Óptica

É um componente (ou equipamento) com duas ou mais portas que seletivamente transmite, redireciona ou bloqueia potência óptica numa linha de transmissão de fibra óptica. Na prática são chaves optomecânicas usadas para chavear sinais ópticos entre fibras, podendo ser o chaveamento baseado no movimento das fibras ou movimento de prismas ou espelhos.

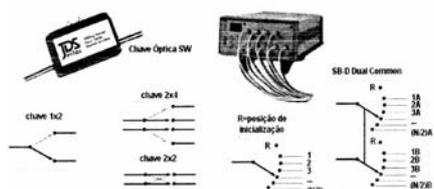


Figura 8-5: Exemplos de chaves ópticas

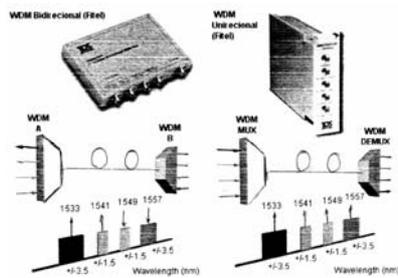
Em redes ópticas o uso de chaves ópticas normalmente propicia dois benefícios que são o aumento de confiabilidade do sistema e a redução de custos. Permite o aumento de confiabilidade por meio de redundância de rota ou fonte, diversidade do nó e capacidade de teste da rede de forma não intrusiva.

8.4 Acopladores Ópticos

São dispositivos capazes de combinar sinais luminosos de várias fibras ópticas em uma única fibra e também separá-los quando desejado. O acoplador óptico é um termo genérico usado para um conjunto de componentes passivos que dividem, combinam ou multiplexam sinais ópticos.

Quando se usam acopladores ópticos é importante observar o seguinte conjunto de parâmetros:

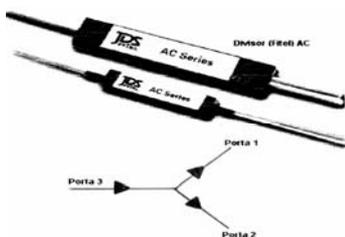
- **Faixa de comprimento operacional:** A faixa de comprimento de ondas sobre o qual a performance é especificada;
- **Uniformidade:** Definida como a diferença absoluta da perda de inserção máxima e mínima entre as portas de saída;
- **Razões de Acoplamento:** Descreve como a luz se divide entre as portas de saída;
- **Perda de Retorno:** Medida do sinal que retorna na porta de entrada na qual foi lançada uma potência, sendo todas as outras portas terminadas de forma a não haver reflexão;
- **Perda de Inserção:** Perda total de qualquer caminho de luz de uma porta de entrada específica através do acoplador, para uma porta de saída específica;
- **Diretividade:** Medida de como o acoplador está enviando potência para a porta desejada;
- **Perda Intrínseca:** Potência perdida no acoplador que não será recapturada em nenhuma das portas de saída;
- **Crosstalk:** Medida de isolamento entre os vários comprimentos de ondas operacionais para uma dada porta de saída de um WDM (Wavelength Division Multiplex).



8.4.1 Mux/Demux WDM

A utilização de acopladores ópticos em esquemas de multiplexação (Mux) e demultiplexação (Demux) em comprimento de onda (WDM - Wavelength Division Multiplex) possibilita o aumento efetivo de largura de banda do sistema de transmissão, além de permitir a comunicação bidirecional em uma única fibra. Viabiliza a redução de custos devido à economia de componente ópticos já implantados.

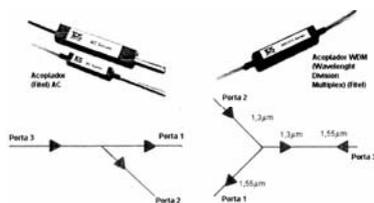
Figura 8-6: Exemplos de WDM



8.4.2 Divisor (Splitter)

Divide o sinal óptico de entrada em múltiplos e iguais sinais de saída. Nos projetos de redes ópticas deve-se considerar sempre as perdas nos divisores devido à divisão, associada às perdas de inserção dos sinais.

Figura 8-7: Divisor (Fitel) AC



8.4.3 TAP ou Acopla-dor Direcional

Acoplador tipo árvore 1x2 com razão de acoplamento desigual.

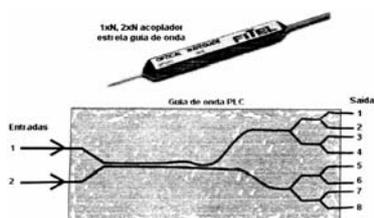
Figura 8-8: Acopladores direcionais



8.4.4 Combinador

Tipicamente tem uma porta de saída e duas ou mais portas de entrada.

Figura 8-9: Combinador

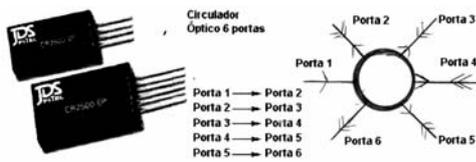


8.4.5 Acoplador Estrela

Figura 8-10: Acopladores estrela

São acopladores ópticos a fibra monomodo com múltiplas entradas e

múltiplas saídas específicas para rede FTTH (Fiber To The Home) e aplicações com performance independentes do comprimento de onda.



8.4.6 Circulador Óptico

Figura 8-11: Circuladores

Circuladores ópticos são componentes que direcionam a luz de uma porta para outra porta seqüencialmente em uma direção. Em sistemas de comunicações ópticas, os circuladores são usados para transmissão bidirecional, redes WDM, sistemas de amplificação óptica e para monitoramento por retro-espalhamento óptico no domínio do tempo (OTDR).

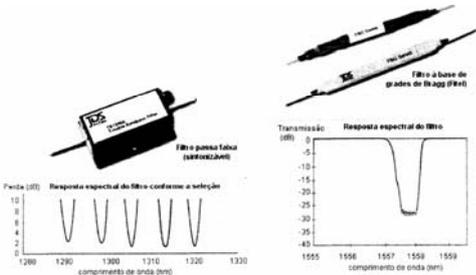


Figura 8-12: Filtros ópticos

8.5 Filtros Ópticos

São componentes passivos usados junto aos acopladores ópticos para filtrar potência indesejável. Por exemplo: potência insuficiente rejeitada num dispositivo WDM ou potência que causa ruído no sistema. O filtro deve ter baixa atenuação na banda de transmissão e alta isolamento. Podem ser filtros passa faixa e filtros isoladores.

Um amplificador de fibra dopada a érbio (AFDE) é um dispositivo que aumenta a amplitude de um sinal óptico através da emissão estimulada.

O meio com ganho em um AFDE é uma fibra, em geral, de sílica dopada com érbio e com comprimento físico pré-determinado a partir da potência de bombeamento utilizada. O comprimento de onda, onde o sinal é amplificado, está entre 1,53 μm e 1,57 μm coincidindo com a região de mínima atenuação para fibras de sílica. A energia exigida para esta amplificação é fornecida opticamente, a partir de uma outra fonte de laser (referida como bombeamento). O bombeamento deve estar na faixa de comprimento de onda adequado para promover a inversão de população na fibra ativa, tipicamente lasers semicondutores de 0,98 μm ou 1,48 μm .

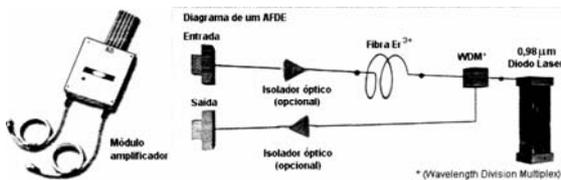
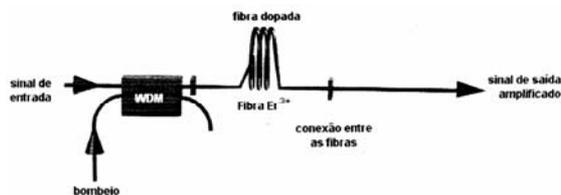


Figura 8-13: Amplificador

8.6.1 Amplificador Básico

A configuração básica de um AFDE é composta por um laser semicondutor de bombeio, um acoplador com multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM) e um trecho de fibra dopada com érbio acoplados à FDE. A introdução de um ou mais codopantes e a escolha do material hospedeiro são fatores críticos para se obter fibras com espectro de emissão largo e com pouca estrutura, isto é, pequena variação da intensidade associada à variação do comprimento de onda.

Figura 8-14: Amplificador básico

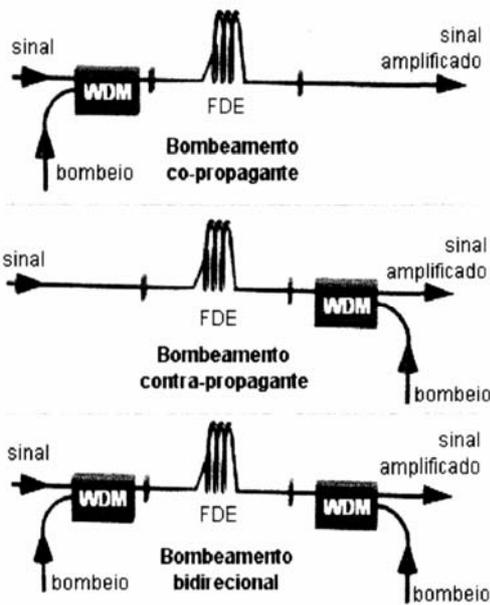


8.6.2 Principais Configurações de Amplificadores

As configurações utilizadas para bombeamento, no caso da utilização de um único laser de bombeamento, podem ser co ou contra-dopantes, para propagação de bombeio e sinal no mesmo sentido ou em sentido oposto, respectivamente. Utilizando-se dois lasers de bombeamento, a configuração é denominada bombeamento bidirecional.

O desempenho de um amplificador é caracterizado através do ganho, potência máxima de saída, largura espectral e figura de ruído. Tipicamente, os AFDEs são bombeados com potências de 20 a 100 mW e saturam, em média, com 30 dB de ganho para o caso de pequeno sinal. A potência máxima de sinal amplificado com ganho saturado, varia entre +12 e +24 dBm. A largura de linha de espectro aproveitável para a amplificação, varia de uma fibra para outra conforme o codopante que está sendo utilizado. Os maiores valores para largura espectral de AFDEs são observados para fibras codopadas com $\text{GeO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$

que apresentam pequena estrutura (vale dizer que a curva de emissão apresenta pouca variação de intensidade, ao longo da variação do comprimento de onda), e a largura de banda varia entre 30 a 40 nm.



Na região de ganho (1,53 a 1,57 μm) a figura de ruído está entre 4 e 7 dB. A figura de ruído, como em um amplificador eletrônico convencional, mede a degradação da relação sinal ruído.

Figura 8-15: Configuração básica de um AFDE, com diferentes esquemas de bombeamento.

8.7 Modulador Eletro Óptico

É um dispositivo que permite variar através do sinal modulante um parâmetro da portadora óptica. A modulação pode ser feita em intensidade e frequência. O modulador eletro-óptico de Niobato de Lítio é usado para modular externamente o feixe do laser operando em regime contínuo (CW). O sinal de RF composto, ou o sinal de dados é aplicado nos eletrodos do modulador sob forma de tensão $V(t)$. Esse sinal irá modular o feixe laser que produz uma saída óptica proporcional ao sinal elétrico aplicado.

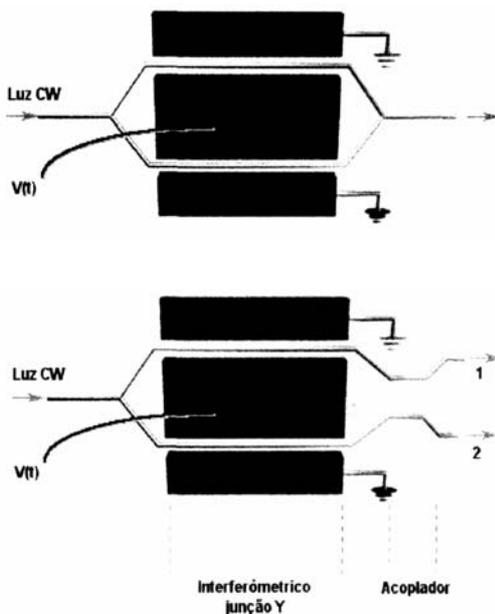


Figura 8-16: Modulador Interferômetro de Match-Zehnder

Figura 8-17: Modulador de Ponte Balanceada

8.7.1 Linearização de Moduladores

Circuitos de pré-distorção usam um linearizador composto por um banco de diodos cuja função de transferência é oposta à do modulador externo. Portanto, o sinal de RF composto antes de ser impresso no modulador externo, sofre uma distorção prévia que irá compensar as distorções a serem introduzidas no modulador externo. Como resultado, temos uma saída com resposta linearizada.

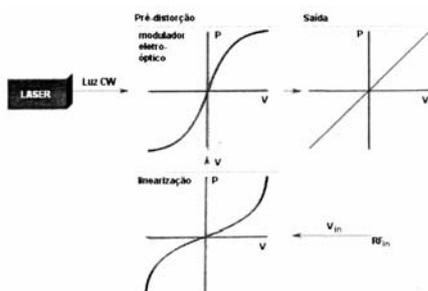


Figura 8-18: Linearização de moduladores

9 Sistema de Comunicação Óptica

É composto de 3 blocos fundamentais: transmissão, enlace e recepção. São os equipamentos necessários para viabilizar a comunicação óptica entre dois pontos.

No projeto de um sistema de comunicação fixam-se parâmetros de dois blocos e obtêm-se os parâmetros necessários para o terceiro deles. Como normalmente as opções para transmissores e

receptores são limitadas, deixa-se o enlace de fibras para projeto. Fixam-se os componentes disponíveis e descreve-se o balanço de potência. O projeto pode ser limitado por atenuação ou dispersão.

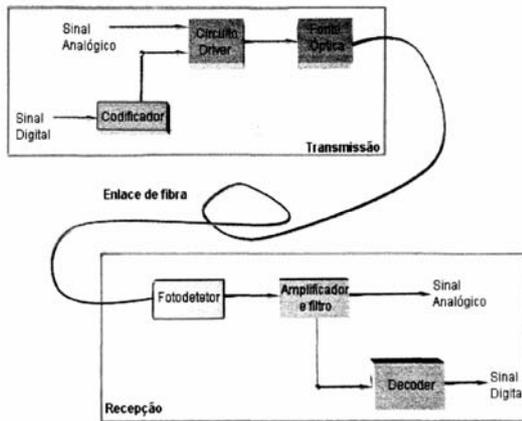


Figura 9-1: Sistema de fibras ópticas

9.1 Transmissão

O transmissor óptico é um bloco que consiste de uma fonte eletro-óptica (LED ou Laser), no qual através de um método de modulação direta ou modulação externa, se varia a intensidade do sinal óptico.

O sinal modulante pode ser analógico ou digital (PCM).

As três considerações mais importantes na seleção da fonte são:

- Deve ser capaz de suportar a taxa de modulação requerida (determinada pela taxa de transmissão desejada);
- Sua potência óptica de saída deve ser suficiente para dar a potência mínima requerida no detector;
- Seu comprimento de onda deve ser tal que se ajuste com os requisitos impostos pela atenuação e pela dispersão na fibra e pela responsividade no detector. Neste bloco, uma perda de potência ocorre no acoplamento entre a fonte e a fibra. Esta perda pode ser elevada (20db) para um LED acoplado a uma fibra monomodo e baixa (3 a 5 dB) para um diodo laser acoplado à fibra monomodo. O comprimento de onda da fonte é normalmente determinado pelo mínimo de perda na fibra. Para sistemas baseados em fibras monomodo isto significa λ em torno de 1,3 ou 1,55 μm . Entretanto, em sistemas de altíssimas taxas de transmissão, a fibra é projetada para ter baixa dispersão em um comprimento de onda particular e a fonte deve emitir naquele comprimento de onda. A largura espectral da fonte também determina o alargamento dos pulsos, portanto, é parâmetro importante do projeto.

9.2 Enlace da Fibra

Esta parte consiste de diversos trechos de fibras unidos por emendas e/ou conectores. O comprimento do enlace é determinado pela perda ou pela banda passante. As contribuições para as perdas surgem da atenuação da fibra (0.2 a 3 dB/km), emendas (0.1 a 0.3 dB/emenda) e conectores (1 a 2 dB/conector). O limite na perda máxima possível e, em consequência, no comprimento do enlace é colocado pela margem de potência requerida, definida como sendo a diferença entre a potência de saída do transmissor e a potência mínima necessária no receptor. Em alguns casos, o comprimento pode ser limitado pela banda passante da fibra (especificada em MHz/km ou GHz/km), particularmente em sistemas de alta taxa de transmissão. Nestes casos, a perda no enlace toma-se um fator secundário. Se levadas em conta as considerações de perda e/ou banda passante introduzidas no sistema, o comprimento do enlace resulta ser melhor que o comprimento desejado para o sistema. Então o comprimento total é dividido em seções menores e repetidores inseridos entre eles. Basicamente um repetidor é constituído por um receptor acoplado a um transmissor.

9.3 Recepção

Consiste de um fotodetector (PIN ou APD) para converter pulsos ópticos em elétricos, permitindo a reconstrução do sinal. O detector deve ser sensível na faixa de comprimento de onda da fonte utilizada e sua característica mais importante é a potência mínima necessária para detecção não ambígua da presença ou ausência de pulsos. Para comunicações digitais, a taxa de erro de bit (BER) padrão requerida é de 10^{-9} , o que significa que um erro de detecção de 1 bit em um bilhão (10^9) pode ser tolerado. Para um determinado detector, a potência mínima necessária para alcançar esta BER aumenta com a taxa de transmissão.

10 Sistemas e Equipamentos.

10.1 Sistemas e Equipamentos de Longa Distância.

10.1.1 Visão Geral Sobre Sistema

Em sistemas telefônicos normalmente os ELOs são ligados ponto-a-ponto.

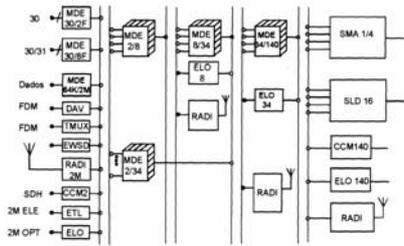


Figura 10-1: Sistema de telecomunicações, equipamentos Siemens

Segundo o padrão Siemens, o lado elétrico do ELO denomina-se F2 e o lado óptico denomina-se F1.

• **Sistemas padronizados:**

Na verdade a padronização só passou a existir a partir dos ELOs síncronos, pois para os ELOs PDH cada fabricante desenvolveu suas

próprias soluções tecnológicas.

Técnica	Taxa de bits	Exemplo de equipamento
PDH	2 Mbits/s	E1 - OLTS2, (ELO2)
	8 Mbits/s	E2 - OLTS8, (ELO8)
	34 Mbits/s	E3 - OLTS34, (ELO34)
	140 Mbits/s	E4 - LALWL1400H (ELO140)
	565 Mbits/s	E5 -
SDH	155 Mbits/s	STM 1 - SL1, SMA1 (1920 canais)
	622 Mbits/s	STM 4 - SL4, SMA4 (7680 canais)
	2,5 Gbits/s	STM 16 - SL16, SMA16 (30720 canais)
	10 Gbits	STM 64 -
	40 Gbits	STM 256 -

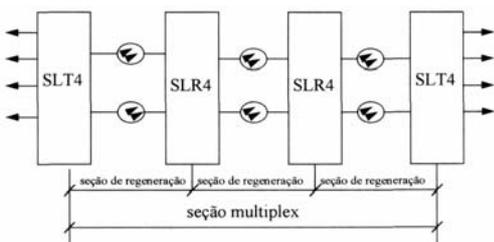
• **Limitações quanto a distância:**

A distância máxima entre dois ELOs é limitada pela atenuação e/ou dispersão que o sistema pode suportar. Para enlaces longos, isto é, quando o limite de máxima atenuação (distância muito grande) e/ou máxima dispersão (taxa de bits muito alta) são alcançados é necessária a utilização de regeneradores ou amplificadores.

Os regeneradores são equipamentos que:

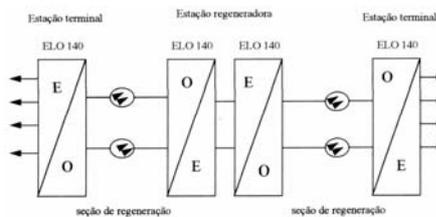
- Compensam a atenuação e a dispersão;
- As informações adicionais são disponibilizadas;
- O canal de serviço telefônico fica disponível;
- Ocupam mais espaço físico;
- A transformação em estação de passagem é facilitada.

Existem duas implementações possíveis:



a) Sistema regenerador:

Figura 10-2: Regeneradores em linha



b) Sistema "costa-a-costa":

Figura 10-3: Costa-costa

Para os ELO PDH a única configuração possível para regenerador é a "costa-a-costa", que tem como facilidade a possibilidade de utilização tanto em estações regeneradoras quanto em de passagem.

Para os ELO SDH existem versões SLR que são exclusivas para a regeneração, isto toma o sistema mais compacto, porém só podem ser utilizados em estações regeneradoras.

Estações de passagem: são estações, onde parte da canalização é retirada para atender a população, bem como, novas informações são inseridas.

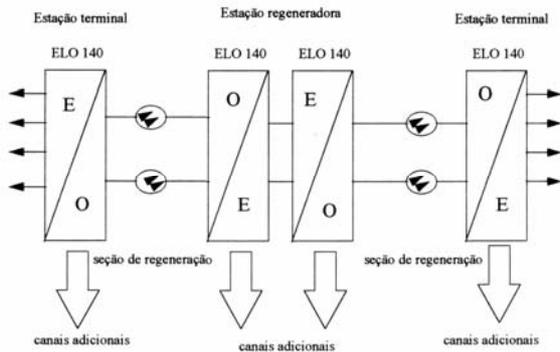


Figura 10-4: Estações de passagem

Os amplificadores ópticos:

- Compensam a atenuação
- São compactos
- Quando instalados adicionalmente ao bastidor de ELO são denominados amplificadores de potência.
- Quando instalados no meio da linha são denominados amplificadores de linha.

Pode ocorrer, em enlaces curtos, que a atenuação total da fibra e conectores seja tão baixa que o sinal atinja o receptor com níveis acima dos especificados, com isto ocorre saturação. Portanto é necessário colocar no enlace um atenuador óptico.

Isto pode ocorrer com o ELO 140, pois temos: -5dbm de mínima potência transmitida e -6dbm a máxima potência recebida.

• **Proteção dos enlaces:**

Utilizado para garantir que as informações que estão trafegando pelo ELO fiquem protegidas, em caso de interrupção da rota (fibra rompida, placa defeituosa). A comutação das informações que estão trafegando pela rota de operação para a reserva é feita "com perda de bit".

Para os ELOs PDH é necessário uma fiação específica no bastidor para a configuração operação/reserva. A comutação é por seção.

Para os ELOs SDH a escolha da configuração é feita por meio de programação em computador. A comutação é por rota.

• **Utilização de acopladores ópticos:**

Em sistemas ópticos é possível utilizar apenas uma fibra para Tx e Rx. Esta implementação é realizada com acopladores ópticos (os quais são ainda uma barreira tecnológica pois tem atenuação alta). Os equipamentos têm que estar preparados para este tipo de implementação, pois dependendo onde foi o rompimento da fibra a **reflexão de Fresnel** pode "confundir" o receptor e este não indicará nenhum problema de rota.

Os ELOs 2/8/34 permitem esta implementação através da inversão dos bits da palavra de alinhamento de quadro em um dos sentidos.

10.1.2 Visão Geral Sobre Equipamentos.

Na direção de transmissão, o sinal elétrico é regenerado / equalizado no circuito de interface, combinado com as informações adicionais, embaralhado, codificado e convertido em um sinal óptico. Na recepção o sinal óptico é convertido em um sinal elétrico, decodificado, desembaralhado, as informações adicionais são retiradas e finalmente reconvertido para uma interface elétrica padrão. O circuito de monitoração coleta e processa as informações de erro dos sinais de entrada e dos circuitos internos e os retransmite a unidade de processamento de alarmes do sistema e ao sistema de telesupervisão. A fonte de alimentação transforma a tensão da bateria nas tensões necessárias ao funcionamento do sistema. Detalhamento das partes componentes

10.1.2.1 Interfaces elétricas:

Seguem a mesma padronização dos sistemas multiplex.

Taxa de erro de bits (Mbits/s)	Código de linha
2, 8, 34	HDB3
140,155	CMI

10.1.2.2 Codificador

Nos ELOs os sinais transformados em ópticos correspondem ao próprio sinal NRZ, com exceção do ELO 140 que utiliza o código CMI.

10.1.2.3 Embaralhador

É necessário para que o receptor possa recuperar relógio, já que a utilização de códigos pseudoternários não é possível. Os sistemas ELO 2/8/34 tem polinômios proprietários. O ELO 140 não realiza embaralhamento, pois utiliza o próprio código de linha CMI na linha óptica. O SL1/4/16 tem polinômios embaralhadores padronizados pelo ITU-T.

10.1.2.3 Conversor Elétrico > Óptico

Opções de escolha:

Fotoconversor	Nos sistemas atuais apenas versões com lasers estão disponíveis.
Potência	Estão disponíveis versões em baixa e alta potência. Apenas no caso do ELO 140 a escolha é feita por meio de estrapes.
Comprimento de onda de onda	1330nm ou 1550nm.
Tipos de lasers	FPR(1300nm) ou DFB(1550nm)
Tipos de fibra	Versões para fibras monomodo ou multimodo

10.1.2.4 Informações Adicionais

Além do sinal principal transmitido são adicionados sinais extras, por exemplo: canais de serviço, canais de dados de baixa velocidade, canais para telemetria e telecomandos. Para os ELO 2/8/34 a adição é feita por meio do aumento da taxa de bits. Para o ELO 140 é feita por meio de combinação. Portanto não ocorre um aumento na taxa de modulação (bauds). Nos SLse SMAs já existem posições padronizadas, para as informações adicionais, no quadro SDH.

10.1.2.5 Conversor Óptico > Elétrico

Para os sistemas ELO 2/8/34 e SL1 pode-se utilizar diodos PIN, para os demais ELOs apenas versões com APD são oferecidas.

10.1.2.6 Filosofia Básica dos Alarmes

Diferente dos multiplexadores, os ELO não monitoram o sinal de alinhamento de quadro do sinal F1 entrante. Tanto o sinal F1 como o sinal F2 são monitorados quando a ocorrência de "sem sinal" ou $TEB \geq 10^{-3}$. Quando um desses erros ocorrem é inserido SIA na mesma direção do sinal e gerado alarme urgente.

É indicado alarme não urgente se o sinal de entrada F1 está com $TEB \geq SD$ (taxa de erro escolhida pelo operador ou 10^{-6}).

Existe também, o controle do correto funcionamento do laser, monitorando as seguintes informações;

- potência de saída muito alta
- potência de saída muito baixa
- corrente de modulação muito alta
- corrente de polarização muito alta
- temperatura muito alta

10.1.2.8 Desligamento Automático do Laser

A finalidade deste procedimento é evitar que ocorram acidentes com o laser. Se não forem recebidos sinais ópticos (significa que a fibra óptica foi rompida em algum ponto) o receptor envia um comando para o transmissor para que ele desligue o Laser. O receptor da outra ponta deixa de receber sinal óptico e também desliga o transmissor, portanto as duas "pontas" ficam desligadas.

Como as duas pontas ficam desligadas, não basta apenas consertar a fibra para que o sistema volte ao funcionamento normal, é necessário uma chave de religamento do laser. Quando a fibra está consertada automaticamente o laser emite um pulso de curta duração (~1,5s), este pulso trafega pela fibra e ao chegar

na outra ponta religará o Tx, que passará a emitir sinais ópticos religando o Tx de onde partiu o pulso inicial. Existe também uma chave de religamento manual do laser, que pode gerar também, pulso óptico longo (~90s), para que os técnicos possam executar medições de potência, largura espectral, perda de extinção, etc).

10.1.3 Testes realizados

Em fábrica:

1. Potência de transmissão
2. Potência recebida (sensibilidade mínima e máxima)
3. Largura espectral
4. Comprimento de onda transmitida
5. Razão de extinção
6. Diagrama de olho

Em campo:

1. Potência de transmissão
2. Potência recebida (sensibilidade mínima e máxima)

10.2 Sistemas e Equipamentos de Acesso.

10.2.1 Aplicações

O objetivo da rede de distribuição é permitir também aos usuários residenciais e pequenos negócios (comerciais e industriais) o acesso aos diversos serviços prestados pelas empresas telefônicas e de CATV.

Estes serviços são basicamente:

- telefonia básica
- comunicação de dados em alta taxa
- vídeo-tetefone
- televisão difusiva a cabo (CATV)
- televisão interativa:
 - Vídeo on Demand
 - Near Vídeo on Demand
 - Home Shopping
 - Teleeducar
 - Home Banking
- Videoconferência
- TV de alta definição
- correio eletrônico

10.2.2 Características

Para que esta larga escala de serviços possa ser atendida há a necessidade de que o sistema tenha as seguintes características:

- Interatividade;
- Largura de banda (vozes, textos, gráficos, imagens, vídeos);
- Flexibilidade da largura de banda: variação conforme demanda;
- Computação, armazenamento;
- *Integração de serviços, voz, dados, imagens (vídeo);*
- Resistência a distorções do tipo multi-caminhos;
- Robustez;
- Possibilidade de migração para sistemas digitais (ATM);
- Compatibilidade com a rede existente e a antiga;
- Justificar o custo extra para os assinantes.

10.2.3 FITL

Fibra óptica na Linha do Assinante ou Fiber In The Loop (FITL) é a solução técnica que tem como premissas para a integração de serviços, viabilizar o acesso pleno da rede externa com a substituição do par metálico pela fibra óptica e a introdução na rede de equipamentos inteligentes, antes de atingir o assinante propriamente dito.

10.2.4 Tecnologias de Equipamentos

No projeto de uma rota estratégica pode-se empregar quatro tipos de tecnologias de sistemas ópticos: PDH, SDH, ATM e TDM/TDMA.

- **Hierarquia Digital Plesiócrona (PDH):** sistema de transmissão baseado na técnica de multiplexação por divisão de tempo (TDM) de sinais plesiócronicos.
- **Hierarquia Digital Síncrona (SDH):** sistema que permite compatibilidade entre equipamentos de diversos fornecedores, facilidade de "drop/insert", transporte de sinais em PDH e compatibilidade com a ATM.
- **Modo de transferência Assíncrono (ATM):** sistema de multiplexação de conexões virtuais baseadas na divisão de tempo assíncrona e comutação de pacotes de células em tamanho fixo. Permite alocação dinâmica de banda e protocolos simples sem controle de fluxo.
- **Multiplexação por Divisão de Tempo/Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo(TDM/TDMA):** Esta tecnologia permite que diversos assinantes compartilhem uma mesma fibra, cuja separação/união de sinais se dá por meio de *componentes ópticos passivos ou ativos*.

10.2.5 Tipos de Configuração

Independentes do tipo de topologia ou arquitetura utilizada para as redes ópticas de assinantes (ROA), é possível a adoção de distintas configurações. Estas configurações são relacionadas ao tipo de usuário e o tipo de meio físico que chegará até. o mesmo e são basicamente:

- **FTTC (Fiber to the Curb):** Nesta configurado há um ponto de conversão opto-eletrônica próximo a um pequeno grupo de assinantes, sendo que a conexão final é feita por meio de cabos metálicos, que apresentam *comprimentos típicos de algumas dezenas de metros*.
- **FTTH (Fiber to the Home):** Nesta configuração a fibra óptica chega até as instalações do usuário, onde estarão localizados os conversores eletro-ópticos.
- **FTTO (Fiber to the Office):** Esta configuração corresponde ao uso de fibras ópticas desde a central telefônica até as instalações dos grandes clientes. É totalmente transparente ao tipo de topologia selecionada e pode apresentar três subclasses:
 - **FTTB (Building)** - quando a conversão O/E (opto-eletrônica) É condomínios ou edificações e mantém-se a rede interna metálica realizada na entrada dos edifícios,
 - **FTTB (Business):** corresponde ao atendimento de grandes clientes que não ocupam prédios inteiros, mas somente alguns andares. Neste caso, a conversão O/E é realizada diretamente ao usuário, o que implica em instalação de rede interna mista (metálica convencional e óptica).
 - **FTTR (Riser)** - quando utiliza-se a rede interna totalmente óptica e conversão O/E diretamente nos andares atendidos e/ou usuários.

11 Planejamento de Sistemas de Transmissão por Fibras Ópticas

Após termos considerado tanto os aspectos físicos das fibras ópticas, como os sistemas de transmissão por fibras ópticas, é apropriado considerarmos agora os aspectos de planejamento, tanto do ponto de vista do projetista como da empresa operadora (concessionária). Para esta, a transmissão por fibras ópticas abre um leque de possibilidades completamente novas em termos, por exemplo, de flexibilidade. Uma vez que os custos de instalação de cabos sempre representaram uma parte considerável dos custos totais, o planejamento, construção e instalação de uma rota usando cabos coaxiais era uma tarefa de responsabilidade, envolvendo uma decisão de investimentos a longo prazo. Ao especificar o *número de pares coaxiais para o cabo* e o número de repetidores subterrâneos a serem instalados, de forma a permitir atender aos requisitos de crescimento, era necessário estimar o volume de tráfego futuro com a maior precisão possível e pondera-lo em relação aos custos iniciais de investimento.

Com cabos de fibras ópticas, que são relativamente leves e flexíveis, a situação é diferente. Se dois ou mais dutos vazios são instalados e um primeiro cabo de fibras ópticas é instalado em um deles, qualquer mudança nos requisitos de capacidade não prevista pode ser facilmente acomodada mediante a instalação de um segundo cabo ou a substituição do primeiro, sem necessidade de escavação.

Um enlace por fibras ópticas pode ser limitado por potência ou dispersão. Na maioria dos casos práticos com a tecnologia atual, usando fibras monomodo de índice degrau, os enlaces são limitados por potência.

As limitações por dispersão podem ocorrer apenas acima de 500 Mbit/s em enlaces muito longos.) tipo de dispersão será a cromática.

11.1 Representação dos Enlaces Ópticos

Os sistemas de enlace óptico podem ser representados como:

S: ponto na fibra óptica imediatamente após ao conector do transmissor óptico

R: ponto na fibra óptica imediatamente antes ao conector do receptor óptico

C: conector que existe no equipamento de linha óptica

DIO: distribuidor intermediário óptico

BEO: bastidor de emendas ópticas

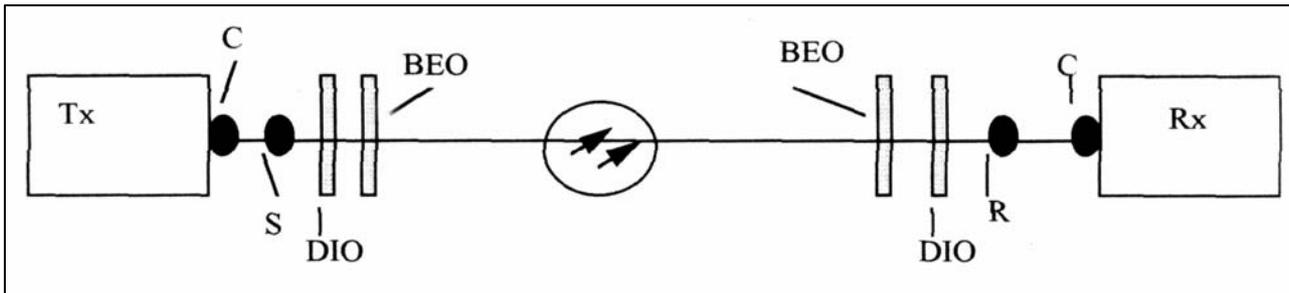


Figura 11-1: Enlace óptico

Normalmente nas características técnicas dos fabricantes de equipamentos ópticos os níveis de potência de Tx e Rx são definidas para os pontos S e R. A potência de recepção é especificada em função de uma TEB aceitável, normalmente de 1×10^{-9} .

11.1.1 Fatores Inerentes ao Equipamento

Estes fatores a serem levados em consideração devido ao equipamento:

- **Margem do equipamento:** cobre os efeitos do tempo e fatores ambientais no desempenho do equipamento, por exemplo: potência transmitida, sensibilidade de recepção, degradação dos conectores dos equipamentos. O ITU-T especifica 3 dB para sistemas que utilizam lasers com estabilidade em temperatura e detectores PIN. Margens maiores são necessárias para sistemas com LED ou lasers não estabilizados em temperatura ou para sistemas que trabalham ao ar livre.
- **Níveis de transmissão.** É dado por dBm
- **Níveis de recepção.** É dado por dBm
- **Máxima dispersão suportada pelo receptor.** É dado em ps/nm

Estes dados normalmente são encontrados nas especificações técnicas dos manuais de equipamentos dos clientes.

11.1.2 Fatores Inerentes aos Cabos Ópticos

Estes fatores s a serem levados em consideração devido ao cabo óptico utilizado:

- **Coefficiente de atenuação:** É dado por dB/km
- **Dispersão:** Para fibras multimodo é especificado a dispersão modal. Para fibras monomodo é especificado a dispersão cromática dados por ps/(nm.km) Estes dados são encontrados nas especificações técnicas dos fabricantes fibras ópticas.

Com relação aos cabos ópticos em alguns casos a rede já está instalada, portanto os valores de atenuação total (dB) já estão especificados pela concessionária. Sendo necessário verificar apenas se o equipamento de linha óptica conseguirá operar com a rede já instalada.

11.2 Metodologia de Cálculo de Enlace por Fibras Ópticas

Devem ser seguidos os seguintes passos:

a) Obter os seguintes dados do equipamento:

Transmissor

- Mínima potência de saída (ponto s): **Ptxmin**
- Máxima potência de saída (ponto s): **Ptxmax**

Receptor

- Máxima potência de recepção (ponto r) **Prxmax**
- Mínima potência de recepção (ponto r) **Prxmin**
- Dispersão cromática tolerada: **De**

b) Obter os seguintes dados do cabo óptico:

- Atenuação: **A**
- Dispersão: **Df**
- Comprimento da bobina de cabo (para estimar o número de emendas): **Lc**

c) obter os seguintes dados do enlace:

- Distância entre Tx e Rx: **L**
- Número de conectores entre TX e Rx (DIOs): **n**
- Atenuação considerada para os DIOs
- Atenuação considerada para as emendas: **e**
- Atenuação entre Tx e Rx (para redes de cabos ópticos já instalados)

11.2.1 Cálculos a Serem Executados

Devem ser efetuados os seguintes cálculos:

a) estimar a atenuação devido a fibra

$$A_f = A \cdot L$$

b) atenuação devido as emendas

$$A_e = L \cdot e / L_c + 4xe$$

Utilizar apenas a parte inteira da divisão, desprezar valores decimais.

4xe: refere-se às emendas nos BEOs e as emendas no cabo interno com o externo.

Em caso de não ter sido especificado um "e" pode-se utilizar 0, 15 dB

c) perdas em emendas de reparo:

Para enlaces curtos utiliza-se $A_r = 2dB$ (por exemplo até 20km).

Para enlaces longos utiliza-se $A_r = 3dB$. (>20 km)

d) margem para re-roteamento ou reparo:

E necessário verificar se o cliente quer que este parâmetro seja levado em consideração.

e) margem para envelhecimento (hidrogênio)

É necessário verificar se o cliente quer que este parâmetro seja levado em consideração.

f) perda de inserção por painel de distribuição:

São considerados os DIOs que possam ter entre Tx e Rx.

Normalmente se estima 0,75 dB para cada ligação por conectores em DIO

$$A_{dio} = n \cdot 0,75$$

g) total das perdas

$$A_t = A_{dio} + A_r + A_f + A_e$$

h) total da dispersão na fibra

$$D_t = L \cdot D_f$$

i) estimar a perda teórica máxima do sistema

$$P_{ts} = P_{txmin} - P_{rxmin}$$

j) considerar a margem do sistema

$$M_s = 3$$

k) estimar a perda máxima do sistema

$$P_{smax} = P_{ts} - M_s$$

l) estimar a perda mínima do sistema

$$P_{smin} = P_{txmax} - P_{rxmax}$$

m) comparar a perda do sistema P_{smax} com a A_t , se

$P_{smax} > A_t$, então o sistema está bem dimensionado do ponto de vista de atenuação máxima

$P_{smax} < A_t$, então necessário redimensionar o sistema, que pode ser feito da seguinte forma:

- mudando o transmissor
- mudando o receptor
- mudando a fibra

n) comparar a perda do sistema P_{smin} com a A_t , se

$P_{smin} < A_t - A_r$, então o sistema está bem dimensionado do ponto de vista de atenuação mínima

$P_{smin} > A_t - A_r$, então é necessário redimensionar o sistema

o) Compare a máxima dispersão do equipamento com a máxima dispersão da fibra, se:

$D_e > D_t \rightarrow$ então o sistema está bem dimensionado do ponto de vista de dispersão

$D_e < D_t \rightarrow$ então é necessário redimensionar o sistema

11.3 Exemplo Interativo

Rota:

Sistema:

a) Obtenção de dados

Transmissor óptico - ponto S			
Tipo de fonte			
Comprimento de onda		nm	
Largura espectral (3dB)		nm	
Mínima potência de saída (após conector)	Ptxmin	dBm	
Máxima potência de saída (após conector)	Ptxmax	dBm	

Receptor óptico - ponto R			
Diodo receptor			
Mínimo nível recebido P/ BER $\leq 10e^{-10}$ (antes do conector)	Prxmin	dBm	
Máximo nível recebido (antes do conector)	Prxmax	dBm	
Dispersão tolerada	De	ps/nm	

Características o cabo óptico			
Tipo de fibra			G.652
Comprimento de onda nominal		nm	
Atenuação total da fibra	A	dB/km	
Dispersão cromática	Df	ps/nm.km	
Comprimento da bobina de cabo	Lc	km	

Características do enlace			
Distância entre Tx e Rx	L	km	
DIOs	n		
Atenuação nos DIOs		dB	
Atenuação para emendas	e	dB	

b) Cálculos:

Enlace			
Atenuação total da fibra	Af	dB	
Total de perdas devido as emendas	Ae	dB	
Perdas em emendas de reparo	Ar	dB	
Margem para re-roteamento ou reparo		dB	
Margem para envelhecimento (hidrogênio)		dB	
Total de perdas nos DiOs	Adio	dB	
Total de perdas entre os pontos S e R	At	dB	
Total de dispersão cromática entre os pontos S e R	Dt	ps/nm	

Sistema ELO			
Perda teórica do sistema	Pts	dB	
Margem do sistema	Ms	dB	
Perda máxima na secção de regeneração	Psmax	dB	
Perda mínima na secção de regeneração	P Amin	dB	
Dispersão tolerada	De	ps/nm	

c) Conclusões

Comparação das perdas do sistema com o do enlace					
		Sistema		Enlace	Resultado
		Máximo	Mínimo		
Atenuação	dB				
Dispersão	ps/nm		XXXXXXXXXX		

12 – TABELAS DE CABOS E EQUIPAMENTOS

13.1 Cordão Óptico - Monofibra ou Duplex

Características	Unidade	Monomodo	Multimodo	Multimodo
isolamento das fibras	Tipo	Tight	Tight	Tight
Diâmetro do núcleo	µm	—	50 +/- 3	562,5 +/- 3
Diâmetro do campo modal a 1300nm	µm	9,3 +/- 1	—	—
Não circularidade do núcleo (máxima)	—	—	6	6
Diâmetro da casca	µm	125+/-2	125+/-2	125+/-2
Não circularidade da casca (máxima)	%	2	2	2
Offset entre núcleo e casca (máxima)	µm	1	3	3
Diâmetro do revestimento primário	µm	250+/-15	250+/-15	250+/-15
Abertura numérica	—	0,110+/-0,015	0,200+/-0,015	0,275+/-0,015
Largura de banda mínima a 850nm	MHz.km	—	400	160

PEDRO DE ALCÂNTARA NETO – REDE TELEFONICA OPTICA

Largura de banda mínima a 1300nm	MHz.km	—	500	400
Atenuação máxima a 850nm	dB/km	—	3,5	40
Atenuação máxima a 1310nm	dB/km	0,40	1,5	1,7
Atenuação máxima a 1550nm	dB/km	0,30	—	—
Dispersão cromática máxima	ps/n m.km	3,5	—	—

13.2 Características Técnicas - ELO140

Line equipment LA 140 LWLOH	Unit	Fiber Type		
		Multimode fiber ($d_k = 50 \mu\text{m}$)	Single-mode fiber ($d_k = 10 \mu\text{m}$)	
Optical transmitter				
Laser Diode (InGaAsP)		FPR ¹⁾	FPR ¹⁾	FPR ¹⁾
Light wavelength	nm	1270 to 1320	1285 to 1330	1500 to 1570
Spectral Half-power width of source diode	nm	< 2	< 2	< 1
Minimum transmit level (after connector)	dBm	- 5 (-9) ³⁾	- 5 (-9) ³⁾	- 5
Maximum transmit level (after connector)	dBm	- 2 (-6) ³⁾	- 2 (-6) ³⁾	- 2
Optical receiver				
Receive level (before connector) for a bit error rate $\leq 10^{-10}$	dBm	- 38	- 38	- 40
Automatic level regulation up to a receive level of	dBm	- 6	- 6	- 10
Regenerator section				
Maximum theoretical optical loss	dB	33	33	35
System margin, e.g. for dispersion, aging, temperature-dependent influences, non-quantifiable influences	dB	3	3	3
Maximum practical optical loss	dB	30	30	32
Regenerator section bandwidth and dispersion requirements				
Optical transmission bandwidth	MHZ	≥ 200	≥ 400	-
Chromatic Dispersion	ps/nm.km	-	< 300	< 5000

13.3 Equipamento STM-4 — características de transmissão

Sinal Digital	STM-4		
Taxa de transmissão	622,080 Mbit/s		
Código	NRZ		
$\lambda_{\text{tmin}} - \lambda_{\text{tmax}}$	1273 – 1355 nm	1294 – 1324 nm	1525 – 1575 nm
Transmissor (Ponto S) Fonte óptica	Laser FP	Laser FP	Laser DFB
Modo de oscilação do laser	MLM	MLM	SLM
$P_{\text{tmin}} - P_{\text{tmax}}$	-15 a -8 dBm	-3 a 0 dBm	-3 a 0 dBm
Max. Largura Espectral	2,5 nm	1,7 nm	0,3 nm
SSR_{min}	-	-	30
r_{emin}	0,15	0,1	0,1
Caminho Óptico Atenuação	0 – 18 dB	5 – 30 dB	8 – 33 dB
DSR_{max}	90 ps/nm	200 ps/nm	2300 ps/nm
Max. Reflet. entre S e R	-	-20 dB	-20 dB
Receptor (Ponto R) Detector óptico	APD – Ge	APD – Ge	APD III/IV
P_r (TEB= 10^{-10})	-34 dBm	-34 dBm	-37 dBm
R_{max}	-8 dBm	-5 dBm	-8 dBm
Max. Refletância	-14 dB	-14 dB	-14 dB
P_d	1 dBm	1 dB	1 dB