

FUNDAMENTOS DE COMUNICAÇÕES ÓPTICAS



Tania Regina Tronco
Luis Fernando de Avila
1ª Edição: Abril de 2007

Conteúdo

Conceitos Básicos

1. Introdução.....	1
2. Natureza da luz - O que é a luz?.....	2
3. Ondas eletromagnéticas.....	2
3.1 Ondas, frentes de onda e raios.....	7
3.2 Princípios da propagação da luz	8
3.2.1 O princípio de Huygens e a reflexão.....	8
3.3 Difração	10
3.4 Ângulo crítico e reflexão total	10
4. Fibras ópticas.....	11
4.1 Modos de propagação	15
4.2 Perdas nas fibras Ópticas	17
5. Tipos de fibras	20

Fontes e detectores de luz em Telecomunicações

1. Introdução.....	22
2. Semicondutores.....	25
3. Diodos emissores de luz	28
4. Lasers	29
5. Fotodiodos.....	35

Amplificadores Ópticos

1. Introdução.....	38
2. Amplificador Óptico Semicondutor	39

3. Amplificador Óptico de Fibra dopada com Érbio.....	42
4. Sistemas WDM.....	44
5. Técnicas de Multiplexação e demultiplexação.....	47
6. Transponder.....	54
7. OADM.....	55
8. Optical Cross Connect.....	57

Redes de comunicação Óptica

1. Introdução.....	58
2. Redes Ópticas.....	58
3. Exemplo de Projeto.....	61
3.1 Redes de Longa distância.....	61
3.2 Redes Metropolitanas	63
4. Longa Distância ("Long Haul").....	64
5. Metropolitanas (Metro).....	65
6. Ethernet Óptica.....	66
7. Ethernet 10 e 100 Mbit/s.....	71
8. Gigabit Ethernet.....	72
9. 10 Gigabit Ethernet ou Ethernet Óptica.....	72

Conceitos Básicos

1- Introdução

As comunicações ópticas constituem um grande avanço tecnológico na área de comunicações à distância. Desde cedo, o homem tem interesse em desenvolver sistemas para enviar mensagens entre lugares distantes. Os elementos básicos de qualquer sistema de comunicação estão indicados na figura 1.

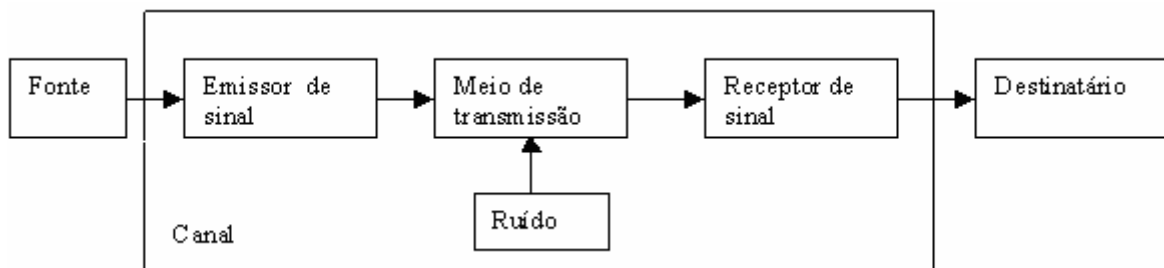


Figura 1 - Elementos de um Sistema de Comunicação.

Estes elementos incluem uma fonte de informação que gera as mensagens a serem transmitidas, um emissor de sinal (transmissor) que acopla a mensagem a um meio de transmissão (canal) e um receptor de sinal para receber as mensagens e entregá-las ao destinatário. O canal é o meio que conecta o transmissor ao receptor e pode corresponder a um fio, a um guia de onda ou à própria atmosfera. Quando o sinal atravessa o canal ele é progressivamente atenuado e distorcido com a distância devido a ruídos do meio. A função do receptor é extrair o sinal enfraquecido e distorcido, amplificá-lo e recuperá-lo antes de enviá-lo ao destinatário.

Diferentes sistemas de comunicação à distância, sistemas de telecomunicações, tem surgido e, a principal motivação para a inovação nesta área é melhorar a fidelidade da transmissão, aumentar a taxa de transmissão de informações ou aumentar a distância entre as estações terminais. Antes da invenção do telefone, por Alexandre Graham Bell em 1875, a distância alcançada pela voz humana estava limitada pela potência da voz do locutor e pela sensibilidade auditiva do ouvinte. Apesar dos grandes avanços na tecnologia das telecomunicações os princípios de transmissão a longas distâncias, continuam sendo o mesmo: Converte-se o sinal de voz em sinal elétrico. A pequena potência de voz do locutor é transformada em energia elétrica no ponto inicial de transmissão. Esta energia pode ser amplificada, digitalizada sendo transmitida até o ponto final por diversos meios: espaço livre (wireless), linha de transmissão (cabo coaxial, fibra óptica, fios metálicos, etc), onde é novamente transformada em energia sonora. A descoberta do telégrafo por Samuel F. B. Morse em 1844 deu início à era das comunicações elétricas. O uso de cabos

para transmissão de informação expandiu com a instalação da primeira central telefônica em 1878. Os cabos eram o único meio utilizado em telecomunicações até a descoberta da radiação eletromagnética de longos comprimentos de onda por Heinrich Hertz em 1887. Hertz comprovou experimentalmente a teoria ondulatória, usando um circuito oscilador.

2- Natureza da luz - O que é a luz?

Em 1672, o físico inglês Isaac Newton apresentou uma teoria conhecida como modelo corpuscular da luz. Nesta teoria a luz era considerada como um feixe de partículas emitidas por uma fonte de luz que atingia o olho estimulando a visão. Esta teoria conseguia explicar muito bem alguns fenômenos de propagação da luz.

No século XIX, o cientista francês L. Foucault, medindo a velocidade da luz em diferentes meios (ar/água), verificou que a velocidade da luz era maior no ar do que na água, contradizendo a teoria corpuscular que considerava que a velocidade da luz na água deveria ser maior que no ar (Newton não tinha condições, na época, de medir a velocidade da luz).

Na segunda metade do século XIX, James Clerk Maxwell, através da sua teoria de ondas eletromagnéticas, provou que a velocidade com que a onda eletromagnética se propagava no espaço era igual à velocidade da luz. Maxwell estabeleceu teoricamente que a luz é uma modalidade de energia radiante que se propaga através de ondas eletromagnéticas.

Quando parecia que realmente a natureza da luz era onda eletromagnética, essa teoria não conseguia explicar o fenômeno de emissão fotoelétrica, que é a ejeção de elétrons quando a luz incide sobre um condutor.

Einstein usando a idéia de Planck (1900) mostrou que a energia de um feixe de luz era concentrada em pequenos pacotes de energia, denominados fótons, que explicava o fenômeno da emissão fotoelétrica.

A natureza corpuscular da luz foi confirmada por Compton (1911). Verificou que quando um fóton colide com um elétron, eles se comportam como corpos materiais.

Atualmente, estuda-se a luz de um modo dual: os fenômenos de reflexão, refração, interferência, difração e polarização da luz podem ser explicados pela teoria ondulatória e os de emissão e absorção podem ser explicados pela teoria corpuscular.

3- Ondas Eletromagnéticas

Num sentido bastante amplo uma onda é qualquer sinal que se transmite de um ponto a outro de um meio com velocidade definida. A distância entre dois máximos sucessivos de uma onda é

denominada comprimento de onda λ (figura 2) e ele pode ser visto como o espaço percorrido durante um período T . Então a velocidade v da onda pode ser dada por:

$$v = \frac{\lambda}{T} \quad (1.1)$$

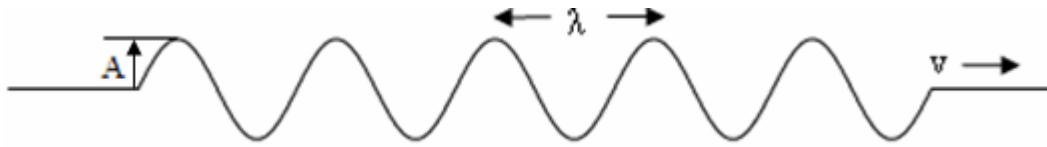


Figura 2 - Amplitude A, comprimento de onda λ e velocidade v de uma onda.

A frequência é o inverso do período e é a mais importante característica da onda eletromagnética usada em comunicações. A frequência é expressa em ciclos por segundo ou Hz.

$$f = \frac{1}{T} = \frac{c}{\lambda} \quad (1.2)$$

Observando a equação (1.2) vemos que quanto maior a frequência, menor o comprimento de onda e vice-versa.

No vácuo a velocidade da luz c é:

$$c = 2,9979 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Quando a luz passa de um meio para outro, sua velocidade aumenta ou diminui devido às diferenças das estruturas atômicas dos dois materiais, ou de seus índices de refração. O índice de refração absoluto de um meio pode ser obtido experimentalmente e é dado pela relação:

$$n = \frac{c}{v} \quad (1.3)$$

Onde, c = velocidade da luz no vácuo e v = velocidade da luz para um comprimento de onda específico num certo meio.

O índice de refração da luz no vácuo é igual a um, que é praticamente aquele obtido para o ar: 1,00029 (temperatura de 15°C e 1 atm de pressão). De fato, tratamos o índice de refração de um material de forma relativa, comparando-o com o do vácuo (ou ar), ou seja, quantas vezes o seu índice de refração é maior do que aquele do vácuo, e, portanto uma grandeza adimensional, que é derivado da expressão:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1.4)$$

Da equação (1.3) nota-se que o índice de refração de um material é inversamente proporcional à velocidade de propagação da luz em seu interior, ou seja, quanto mais denso opticamente for o material, menor será a velocidade de propagação da luz.

Ainda podemos relacionar o índice de refração, a velocidade de propagação e o comprimento da onda da luz:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \quad (1.5)$$

A Tabela 1-1 abaixo, mostra os índices de refração de diferentes materiais:

Material	Índice de refração (n)
água	1,333
gelo	1,3
vidro	1,46 – 1,96
quartzo	1,54
Silício	1,477
GaAs	1,537

Tabela 1 – Índice de Refração de alguns Materiais.

O índice de refração de uma substância difere para as várias cores que compõem a luz branca. Este fato pode ser facilmente demonstrado pela conhecida experiência do prisma. Um estreito feixe de luz branca, incidindo sobre a parede de um prisma de vidro ou de alguma outra substância transparente, decompõe-se em cores individuais que formam o espectro visível, uma vez que o prisma tem um índice de refração diferente para cada uma das cores, assim como ilustra a Figura 3.

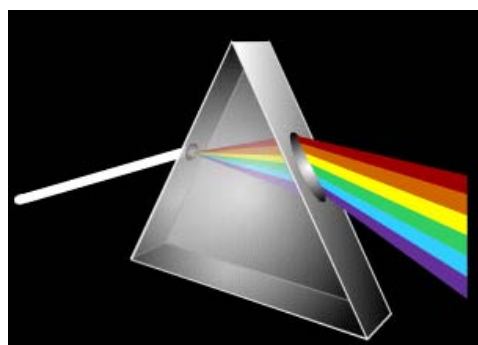


Figura 3 – Dispersão da luz num prisma.

A primeira demonstração da teoria eletromagnética foi a implementação de um sistema rádio em 1895 por Guglielmo Marconi. Ao longo dos anos, houve um aumento significativo da utilização do espectro eletromagnético para transportar informação de um local a outro. A razão para isto é

que em sistemas elétricos, os dados são transferidos sobre o canal através da superposição dos mesmos sobre uma onda eletromagnética senoidal denominada portadora (carrier). No local de destino, a informação é removida da portadora e processada. Desta forma, a quantidade de informação que pode ser transmitida está diretamente relacionada com o intervalo de frequência no qual a portadora opera, ou seja, aumentando-se a frequência da portadora, teoricamente aumenta-se também a largura de faixa de transmissão e, conseqüentemente, a capacidade de transporte de informação. O grande desafio de engenharia nestes sistemas é empregar progressivamente frequências mais altas (menores comprimentos de onda) que oferecem maior largura de faixa e aumentam a capacidade de transporte de informação.

O espectro eletromagnético que é utilizado em sistemas de comunicações está indicado na Figura 4. Ele apresenta vários tipos de ondas eletromagnéticas: ondas de rádio, microondas, radiação infravermelha, luz (radiações visíveis), ultravioleta, raios X e raios gama. As ondas diferem entre si pela frequência e se propagam com a mesma velocidade da luz no vácuo.

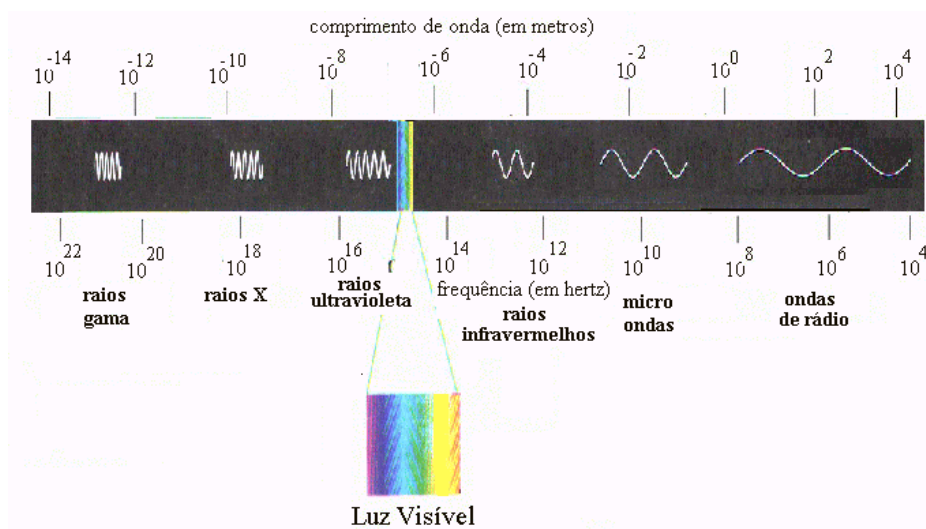


Figura 4 – Espectro eletromagnético .

O meio de transmissão usado neste espectro inclui guias de ondas para microondas, ondas de rádio, fios metálicos, etc. Entre os sistemas de comunicação mais comuns que utilizam estes meios está o telefone, radio AM e FM, televisão, enlaces de satélites, radar, etc. A frequência destas aplicações variam de 300Hz na faixa de áudio até 90 GHz na faixa de milímetros. Outra porção do espectro eletromagnético é da região óptica. Nesta região, é comum especificar a banda de interesse em termos de comprimento de onda ao invés de frequência como nos sistemas rádio. A faixa do espectro cuja radiação é visível ao olho humano varia entre 400 nm que corresponde a cor violeta e 700 nm correspondendo a cor vermelha. As fontes de luz utilizadas nas fibras ópticas possuem comprimentos de onda, acima de 850 nm, ou seja, na região de radiação infravermelha, que é invisível ao olho humano. Similar ao espectro de rádio frequência,

na faixa óptica, dois meios de transmissão podem ser usados: o atmosférico e o de ondas guiadas.

No meio atmosférico temos a tabela 2 que fornece a classificação de cada faixa:

300Hz-3 kHz	ELF Extremely Low Frequency
3 kHz - 30kHz	VLF Very Low Frequency
30kHz - 300kHz	LF Low Frequency
300kHz - 3MHz	MF Medium Frequency
3MHz - 30MHz	HF High Frequency
30MHz - 300MHz	VHF Very High Frequency
300MHz- 3GHz	UHF Ultra High Frequency
3GHz - 30GHz	SHF Super High Frequency
30GHz - 300GHz	EHF Extremely High Frequency

Tabela 2 Espectro de frequência utilizada na atmosfera.

As aplicações de cada faixa na propagação atmosférica são:

- ELF: Faixa de frequência em que as ondas penetram razoavelmente no solo e na água, portanto, possui aplicações em comunicação com submarinos e escavações de minas. Geralmente as aplicações operam nesta faixa com transmissores de alta potência e grandes antenas.
- VLF: Nesta faixa, o mecanismo de propagação utilizado é a reflexão ionosférica, sendo considerado um ótimo condutor, pois induz pequena atenuação na onda refletida.
- LF: Para esta faixa, até 100kHz, é empregado o mecanismo de reflexão ionosférica, muito embora a atenuação da onda seja maior que a observada na faixa VLF.
- MF: Para frequências acima de 100KHz, dentro da faixa de MF, o mecanismo de propagação empregado é o de ondas de superfície, que apresenta menor atenuação que o mecanismo de reflexão ionosférica.
- HF: Para essa faixa o mecanismo de propagação mais utilizado é o da refração ionosférica, sendo que em regiões mais próximas do transmissor ainda permanece a presença das ondas de superfície.
- VHF, UHF e SHF: Sistemas de propagação em visibilidade, uma vez que as antenas permitem focalizar as ondas, diminuem a influência do terreno na energia propagada. Utiliza-se também do fenômeno da difração, pois na faixa de VHF já não se torna mais possível o uso da refração ionosférica, uma vez que as ondas não retornam à superfície terrestre.

No meio óptico, temos a figura 3 que fornece a classificação de cada faixa:

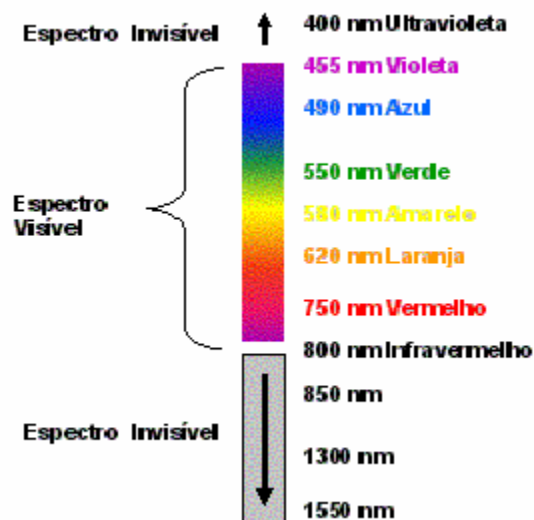


Figura 5 - Espectro de Radiação Luminosa.

O grande interesse das comunicações ópticas é devido à ordem das frequências que são utilizadas (5×10^{14} Hz), o que corresponde a capacidade de transporte de informação superior aos sistemas de microondas por um fator de 10^5 .

3.1- Ondas, frentes de onda e raios

A partir de um ponto luminoso, infinitos raios de luz são emitidos em todas as direções (Figura 6). Decorrido um período de tempo, estes raios terão percorrido uma distância a partir de sua origem. A linha ou superfície que une ou contém as extremidades destes raios denomina-se superfície de velocidade de onda ou frente de onda. Assim, em um meio isotrópico, onde a velocidade da luz é igual em todas as direções, a superfície de onda em qualquer instante será esférica. Observe que uma onda se propaga na direção do raio, mas a frente de onda avança na direção da normal à onda.

As ondas eletromagnéticas radiadas por uma pequena fonte de luz podem ser representadas por frentes de onda que são superfícies esféricas concêntricas (centros coincidentes) à fonte e a uma distância grande da fonte, como superfícies planas (Figura 6).

Considerando a teoria corpuscular, um raio é simplesmente a trajetória retilínea que um corpúsculo de luz percorre.

Considerando a teoria ondulatória, um raio é uma linha imaginária na direção de propagação da onda, ou seja, perpendicular à frente de onda.

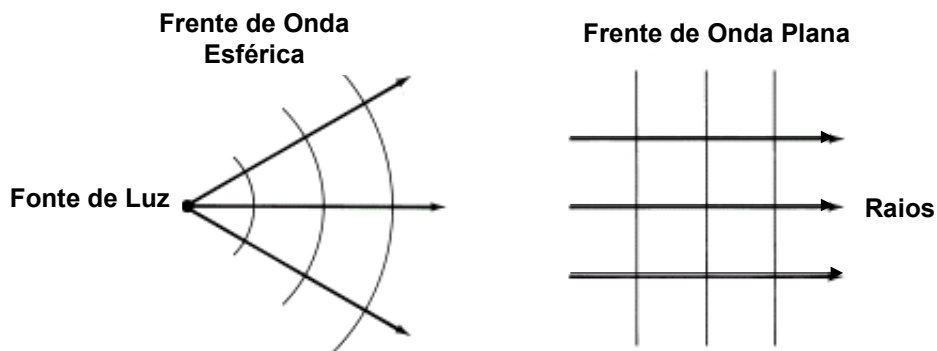


Figura 6 - Frentes de Onda Esféricas e Planas.

3.2- Princípios da propagação da luz

Como todo o espectro eletromagnético, a luz é uma forma de energia radiante, que apresenta natureza tanto ondulatória quanto corpuscular. No presente caso, a luz será tratada como uma onda em movimento harmônico contínuo, representada por sua componente elétrica, magnética, conforme ilustra a Figura 7.

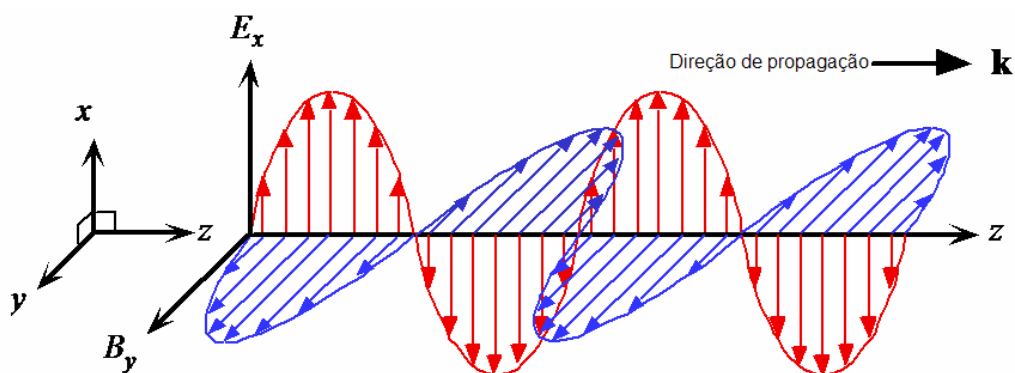


Figura 7 - Uma onda eletromagnética é uma onda propagante onde os campos elétrico e magnético variam no tempo, são perpendiculares entre si e à direção de propagação.

A frequência das oscilações não muda quando as ondas passam através de diferentes meios, ou seja, quando um raio de luz sofre refração poderá haver mudanças em sua velocidade e/ou em seu comprimento de onda, mas nunca na frequência.

3.2.1 - O princípio de Huygens e a reflexão

As construções geométricas mostrando como a luz é refletida ou refratada baseiam-se no Princípio de Huygens (1690), que afirma: "Qualquer ponto ou partícula excitado pelo impacto da energia de uma onda de luz, torna-se uma nova fonte puntiforme de energia". Então, cada ponto

sobre uma superfície refletora pode ser considerado como uma fonte secundária de radiação tendo a sua própria superfície de onda. A lei fundamental sobre a reflexão afirma que os ângulos de incidência e reflexão medidos a partir de uma normal à superfície refletora são iguais e situam-se no mesmo plano denominado plano de incidência, conforme ilustra a Figura 8.

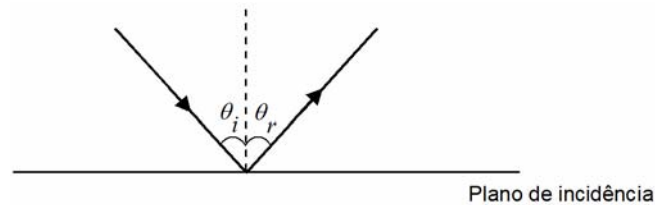


Figura 8 - Reflexão.

Segundo a Lei da reflexão temos:

$$\theta_i = \theta_r \quad (1.6)$$

Através do Princípio de Huygens também é possível afirmar que quando um raio de luz atinge uma superfície que separa dois meios com índices de refração diferentes, parte da luz é refletida e a outra penetra no meio sendo desviada ou refratada, assim como ilustra a Figura 9.

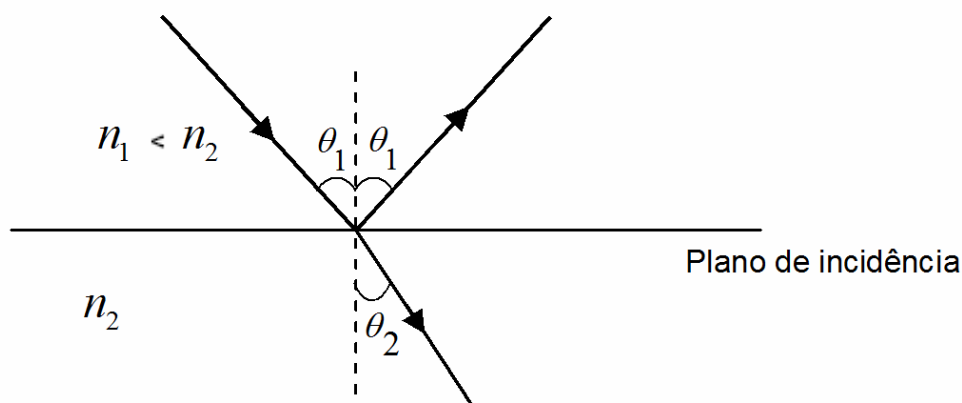


Figura 9 – Refração.

O raio incidente na superfície, além de parcialmente refletido, é refratado. A relação entre os ângulos de incidência, refração e velocidades de propagação nos dois meios é dada pela Lei de Snell:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1.7)$$

Onde, θ_1 é o ângulo do raio incidente com relação à normal à superfície, θ_2 é o ângulo do raio refratado, n_1 é o índice de refração do meio 1 de incidência, e n_2 é o índice de refração do meio 2.

Esta expressão mostra que a relação entre as velocidades das ondas em meios com índices de refração diferentes é proporcional à relação entre os senos dos ângulos dos raios incidentes e refratados. Assim, se o ângulo de incidência θ_1 for zero, θ_2 também será zero, ou seja, a luz incidindo normalmente sobre uma superfície plana não será refratada.

Por outro lado, se a luz incide obliquamente sobre um sólido opticamente mais denso, ou com maior índice de refração, o raio refratado se aproximará da normal e passará a se propagar com uma velocidade menor do que aquela em que vinha se propagando no outro meio.

3.3- Difração

Difração é um processo que faz com que a luz mude de direção sem a mudança de meio de propagação como ocorre na refração. A difração ocorre quando a frente de onda da luz passa através de uma fenda estreita ou de um buraco pequeno com dimensões comparáveis ao comprimento de onda, assim como ilustra a Figura 10.

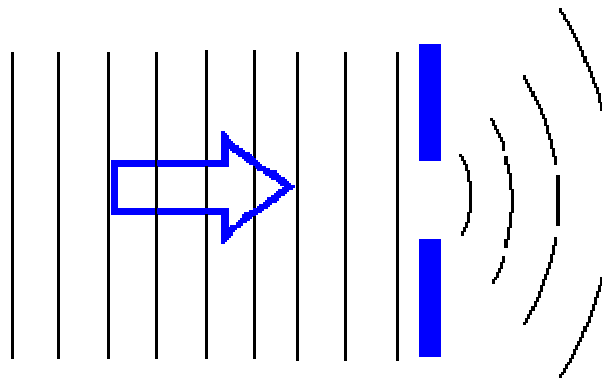


Figura 10 – Difração por uma fenda.

3.4- Ângulo crítico e reflexão total

De acordo com a equação (1.7) se n_1 for maior que n_2 a relação n_2 / n_1 será sempre menor do que 1 e, conseqüentemente, θ_2 será sempre maior que θ_1 , ou seja, sempre haverá refração com o raio refratado aproximando-se da normal.

Por outro lado, se o meio de incidência do raio de luz tiver um índice de refração n_1 menor que n_2 , a relação n_2 / n_1 será sempre maior do que 1,0 e, o ângulo refratado, será sempre maior que o ângulo incidente. Portanto para que haja refração, há necessidade que o ângulo θ_1 seja tal que leve θ_2 ser menor do que 90° , ou seja, que $\text{sen}\theta_2 < 1$.

Nesse caso, existe uma situação limite para a refração onde um raio incidente com um determinado ângulo menor que 90° , conhecido como ângulo crítico θ_c , implicando num raio

refratado que se propaga paralelamente à superfície entre os dois meios dielétricos. Então de acordo com a lei de Snell:

$$\text{sen}\theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (1.8)$$

Qualquer raio incidente com um ângulo superior ao ângulo crítico não será mais refratado, mas refletido totalmente. Esse efeito de reflexão interna total é o mecanismo básico de propagação da luz em fibras ópticas.

4- Fibras Ópticas

Em 1958, o físico Narinder Singh Kapany, com base nos estudos efetuados pelo físico inglês John Tyndall de que a luz poderia descrever uma trajetória curva dentro de um material (no experimento de Tyndall esse material era água), pode concluir suas experiências que o levaram à invenção da fibra óptica. O próximo desafio para os cientistas era desenvolver um vidro tão puro que somente 1% da potência da luz emitida fosse perdida no final de uma transmissão de 1 km, distância entre os repetidores dos sistemas de transmissão telefônicos já instalados. Os pesquisadores trabalharam com esta meta nos anos 60, mas, somente em 1970, os cientistas da Corning, Drs. Robert Maurer, Donald Keck e Peter Schultz criaram uma fibra com perdas menores que 1% em 1 km. Desde então, as pesquisas nesta área foram evoluindo até se atingirem os limites teóricos dos vidros baseados em sílica. Associando-se a isto as novas descobertas no campo da eletrônica, atualmente é possível transmitir um sinal digital numa fibra óptica a uma distância de 100 km sem amplificação. A fibra óptica é um excelente meio de transmissão utilizado em sistemas que exigem altas taxas, tais como: o sistema telefônico, videoconferência, redes locais (LANs), etc. Há basicamente duas vantagens das fibras ópticas em relação aos cabos metálicos: A fibra óptica é totalmente imune a interferências eletromagnéticas, o que significa que os dados não serão corrompidos durante a transmissão. Outra vantagem é que a fibra óptica não conduz corrente elétrica, logo não haverá problemas com eletricidade, como problemas de diferença de potencial elétrico ou problemas com raios. O princípio fundamental que rege o funcionamento das fibras ópticas é a reflexão total da luz. Para que haja a reflexão total a luz deve sair de um meio mais denso para um meio menos denso, e o ângulo de incidência deve ser igual ou maior do que o ângulo crítico.

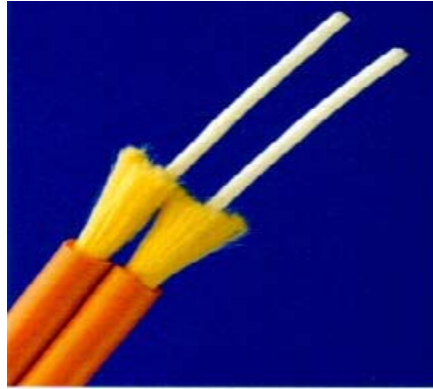


Figura 11 - Exemplo de fibra óptica.

As fibras ópticas são constituídas basicamente de materiais dielétricos (isolantes) (em geral, sílica ou plástico), segundo uma longa estrutura cilíndrica, transparente e flexível, de dimensões comparáveis às de um fio de cabelo humano, assim como ilustra a Figura 11. A estrutura cilíndrica é composta de uma região central, denominada núcleo, por onde passa a luz; e uma região periférica denominada casca que envolve o núcleo. O índice de refração do material que compõe o núcleo é maior do que o índice de refração do material que compõe a casca, conforme ilustra a Figura 12.

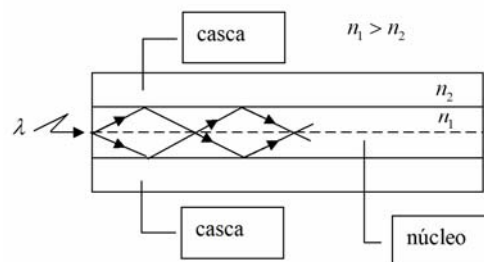


Figura 12 - Estrutura de uma Fibra Óptica.

Núcleo: O núcleo é um fino filamento de vidro ou plástico, medido em micrômetros ($1\mu m = 0,000001m$), por onde passa a luz. Quanto maior o diâmetro do núcleo mais luz ele pode conduzir.

Casca: Camada que reveste o núcleo. Por possuir índice de refração menor que o núcleo ela impede que a luz seja refratada, permitindo assim que a luz chegue ao dispositivo receptor.

Capa: Camada de plástico que envolve o núcleo e a casca, protegendo-os contra choques mecânicos e excesso de curvatura.

Fibras de resistência mecânica: São fibras que ajudam a proteger o núcleo contra impactos e tensões excessivas durante a instalação. Geralmente são feitas de um material chamado kevlar, o mesmo utilizado em coletes a prova de bala.

Revestimento externo: É uma capa que recobre o cabo de fibra óptica.

O princípio básico de transmissão da luz ao longo da fibra consiste num processo de reflexão interna total que ocorre quando um feixe de luz emerge de um meio mais denso para um meio menos denso. Para a luz ser transmitida na fibra óptica, ela deve atingir a interface entre o núcleo e a casca num ângulo θ_i maior que o ângulo crítico θ_c . Para que isto ocorra, a luz deve ser lançada nas terminações da fibra num ângulo θ_l que é menor que o ângulo crítico, conforme ilustra a Figura 13 (a). Isto resulta num cone de aceitação (Figura 13 (b)) dentro do qual a luz deve ser lançada. Tipicamente, uma lente é utilizada para focalizar a luz numa pequena área do núcleo (figura 14).

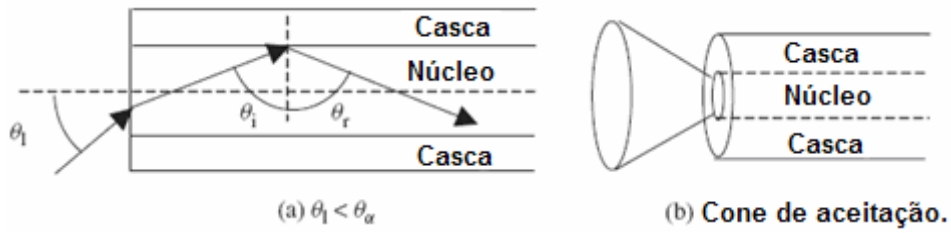


Figura 13 - Ângulo de Lançamento da Luz na Fibra.

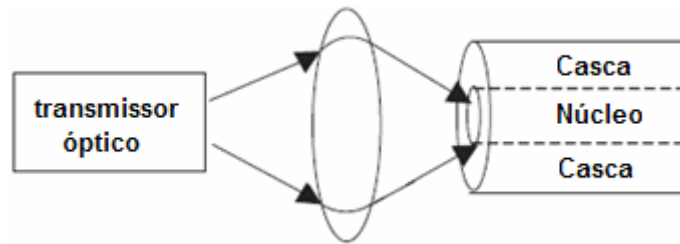


Figura 14 - Lente utilizada para Focalizar a Luz no Núcleo.

O ângulo de aceitação da fibra é deduzido aplicando-se a lei de Snell nas condições de reflexão interna total, o que resulta em:

$$\theta_a = \sin^{-1} \left[\frac{\sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}}{n_0} \right] \quad (1.9)$$

Onde, n_0 é o índice de refração do meio onde a fibra óptica está imersa.

A partir da noção de ângulo de aceitação, é definido um importante parâmetro de uma fibra óptica, a abertura numérica (AN), expressa por:

$$AN = n_0 \sin \theta_a = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} \quad (1.10)$$

Para o caso do ar ($n_0 = 1$) tem-se:

$$AN = \text{sen } \theta_a = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} \quad (1.11)$$

A abertura numérica de uma fibra costuma também ser expressa em termos da diferença relativa de índices de refração Δ entre o núcleo e a casca da fibra como sendo:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \quad (1.12)$$

Para $\Delta \ll 1$ (hipótese válida para a maioria das fibras ópticas de interesse em sistemas de transmissão):

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (1.13)$$

Combinando-se as equações (1.11) e (1.12) obtém-se a seguinte equação para AN:

$$AN = n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (1.14)$$

A abertura numérica de uma fibra óptica é muito útil para medir sua capacidade de captar e transmitir luz.

Existem dois tipos de perfis de índice de refração para fibras ópticas: Índice degrau e índice gradual. Nas fibras com índice do tipo degrau, o índice de refração do núcleo é constante em todo o diâmetro do núcleo, conforme ilustra a Figura 15 (a). Nas fibras do tipo índice gradual, o índice de refração varia ao longo do diâmetro do núcleo de acordo com uma função parabólica, conforme ilustra a Figura 15 (b).

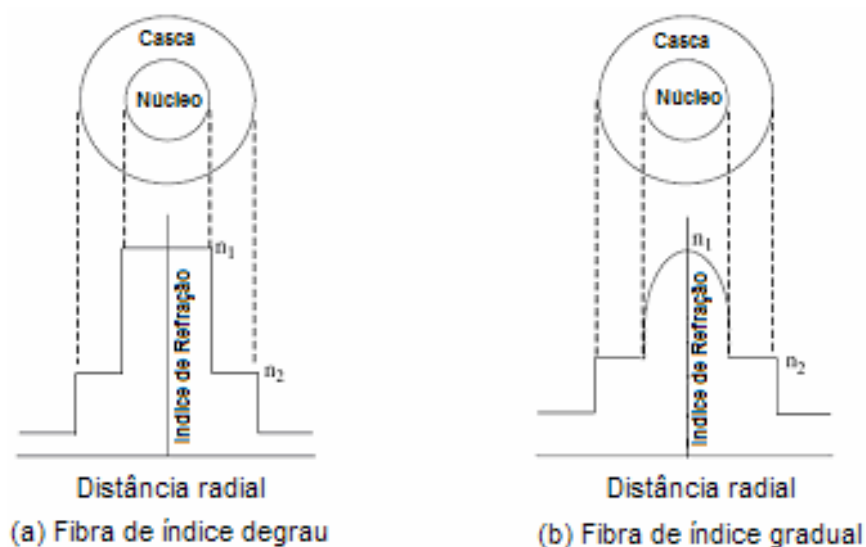


Figura 15 – Fibras Índice Degrau e Índice Gradual.

4.1 - Modos de propagação

Existem duas categorias de fibras ópticas: **Multimodo** e **Monomodo**. Essas categorias definem a forma como a luz se propaga no interior do núcleo.

Multimodo: As fibras multimodo possuem o diâmetro do núcleo maior do que as fibras monomodo, de modo que a luz tenha vários modos de propagação, ou seja, a luz percorre o interior da fibra óptica por diversos caminhos (ver Figura 16). As dimensões do núcleo variam de 50 μm a 200 μm e 125 μm a 400 μm para a casca (ver Figura 18). As fibras multimodo são mais baratas que as monomodo e são usadas para curta distância (LANs).



Figura 16 - Fibra óptica multimodo.

Monomodo: As fibras monomodo são adequadas para aplicações que envolvam grandes distâncias, embora requeiram conectores de maior precisão e dispositivos de alto custo. Nas fibras monomodo, a luz possui apenas um modo de propagação, ou seja, a luz percorre o interior do núcleo por apenas um caminho, conforme ilustra a Figura 17. As dimensões do núcleo variam entre 8 μm a 12 μm , e a casca em torno de 125 μm (ver Figura 18).

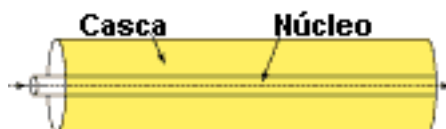


Figura 17 - Fibra óptica monomodo

Os diâmetros mais usados em fibras estão indicados na Tabela 3.

Tipos de fibra	Diâmetros núcleo/casca
Multimodo	50/125 μm , 62.5/125 μm , 100/140 μm
Monomodo	9 ou 10/125 μm

Tabela 3 – Diâmetros Mais Comuns do Núcleo/Casca das Fibras Ópticas

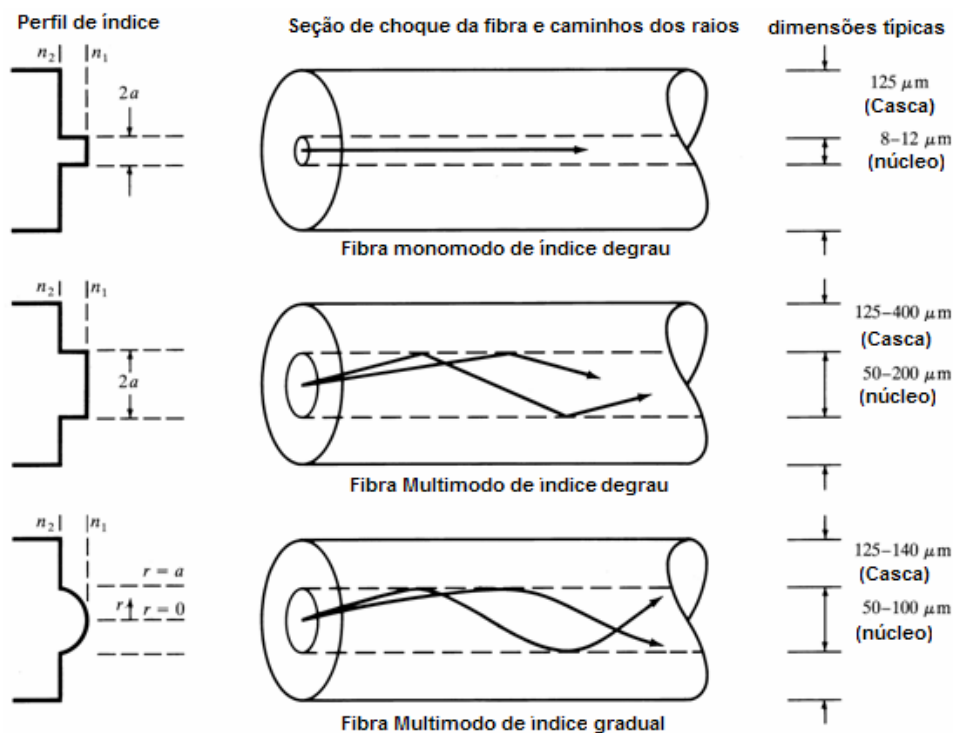


Figura 18 - Tipos de Fibras

Para compreender melhor a diferença entre monomodo e multimodo, é necessário compreender o conceito de modo nas fibras. Considerando-se dois raios incidentes, Raio 1 e Raio 2, lançados na mesma fibra, com o mesmo ângulo θ (ver Figura 19), o Raio 1 é refletido no ponto A e o raio 2 é refletido no ponto B. Os raios tem um campo elétrico vertical à sua direção de propagação. À medida que os raios são refletidos, os campos elétricos sofrem deslocamentos de fase e os mesmos podem ser reforçados (quando estão em fase) ou anulados (quando estão em fases opostas) em certos pontos da fibra. Quando os campos estão em fase, as ondas são guiadas na fibra e quando estão fora de fase as ondas são anuladas. As Figuras 20 e 21 ilustram os modos de propagação.

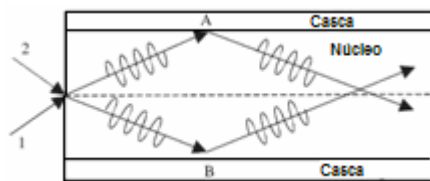


Figura 19 – Campo Elétrico

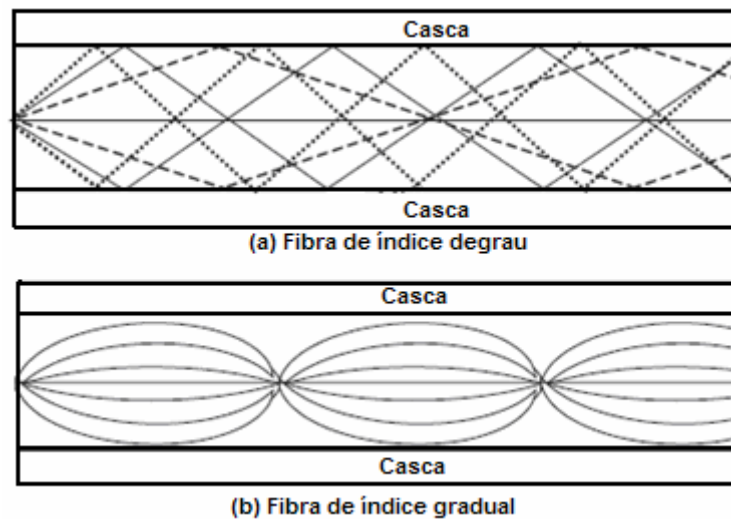


Figura 20 – Modos de Propagação

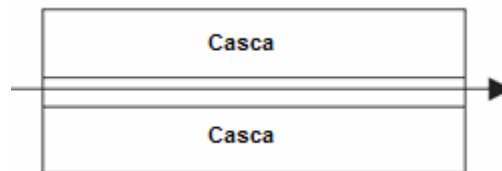


Figura 21 – Fibra Monomodo

O número de modos na fibra está diretamente relacionado ao diâmetro do núcleo, quando o diâmetro é grande, a luz se propaga em diferentes modos, quando o diâmetro é muito estreito, apenas um modo de propagação é permitido.

4.2 - Perdas nas Fibras Ópticas

A transmissão da luz nas fibras ópticas está sujeita às perdas devido a efeitos ópticos. Estes efeitos podem ser lineares e não lineares.

Os principais tipos de perdas relativas a efeitos lineares são: atenuação e dispersão. Atenuação refere-se à redução da potência óptica ao longo do comprimento da fibra. Dispersão é a distorção da forma do sinal óptico. Essas perdas são ditas lineares, pois são proporcionais ao comprimento da fibra.

As perdas devido a efeitos não-lineares ocorrem devido à dependência do índice de refração com a intensidade do campo elétrico aplicado. Os principais efeitos não lineares desta categoria são: auto-modulação de fase (SPM, *Self-Phase Modulation*), Mistura de Quatro Ondas (FWM, *Four Wave Mixing*), Espalhamento Brillouin Estimulado (*Stimulated Brillouin Scattering*) e Espalhamento Raman Estimulado (SRS, *Stimulated Raman Scattering*). Estes efeitos ocorrem

devido à interação das ondas de luz (campo elétrico) com os elétrons do material da fibra, mudando seu índice de refração. As fibras ópticas possuem uma resposta não linear a campos elétricos intensos.

Atenuação: Varia com o comprimento de onda e é expressa em decibel por quilômetro. Um decibel (dB) é a unidade usada para expressar a diferença relativa entre a potência de entrada P_i e a potência de saída P_o de um sinal e é calculado por:

$$\text{Número de decibéis} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_i}{P_o} \right) \quad (1.15)$$

A atenuação para um comprimento de fibra L é dada por $\alpha_{dB} L$, onde α_{dB} é a atenuação expressa em dB/km . Ela pode ocorrer devido à absorção, espalhamento ou reflexões nos conectores e emendas.

Absorção: A luz é absorvida quando passa através da fibra óptica devido à sua interação com a estrutura molecular do material.

Espalhamento: Ocorre devido às variações na densidade do material e do índice de refração do núcleo. Esta variação causa obstruções à passagem da luz e quando a mesma encontra estas obstruções, espalha-se em todas as direções e a maior parte continua a se propagar na direção original (energia perdida). Quando as obstruções são pequenas, menores que λ , o espalhamento é chamado Rayleigh. As perdas por este espalhamento são proporcionais a $1/\lambda^4$. Comprimentos de onda longos tem menos espalhamento.

Reflexão: Enlaces longos de fibras ópticas consistem de vários segmentos conectados por emendas. Existem também conectores nas terminações das fibras. Emendas e conexões refletem o sinal na direção oposta da fibra reduzindo a potência da luz à frente.

Conforme mencionado acima, a atenuação varia com o comprimento de onda. A Figura 22 ilustra a atenuação para uma fibra monomodo em função do comprimento de onda.

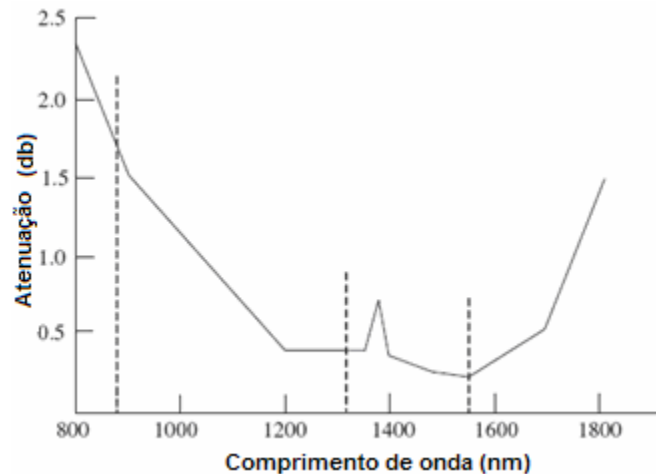


Figura 22 – Atenuação em Função do Comprimento de Onda.

Como ilustra o gráfico da Figura 22, a atenuação para comprimentos de onda curtos (em torno de 850 nm) é mais que três vezes maior que para comprimentos de onda longos (na faixa de 1300 nm a 1500 nm). As janelas de 850 nm, 1300 nm e 1550 nm são as utilizadas em telecomunicações devido às menores atenuações.

Dispersão: O termo dispersão é utilizado para descrever o efeito de alargamento dos pulsos que se propagam pelas fibras. A dispersão ocorre por diversas razões: dispersão modal, dispersão cromática e dispersão por modo de polarização.

A dispersão modal ocorre em fibras multimodo e é causada pela diferença dos tempos de propagação dos diferentes modos. A Figura 23 ilustra o espalhamento do pulso nas fibras índice degrau e índice gradual. Nas fibras índice gradual o espalhamento é menor.

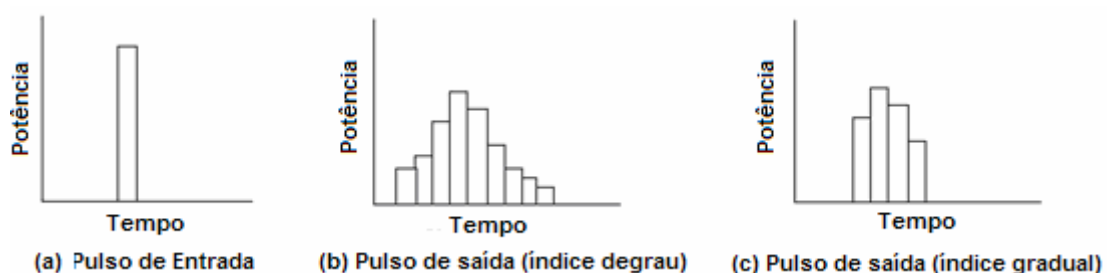


Figura 23 – Espalhamento do Pulso.

A dispersão cromática ocorre devido ao índice de refração da sílica (vidro) utilizado no núcleo da fibra, ser dependente da frequência óptica. Devido a isto, diferentes frequências atravessando a fibra a diferentes velocidades, resultam em diferentes atrasos, como na dispersão modal. Estes atrasos causam espalhamento na duração do pulso de saída. A dispersão cromática é medida em ps/nm.km, onde os refere-se ao tempo de espalhamento do pulso, nm é a largura espectral do pulso, e km é o comprimento da fibra.

A dispersão cromática pode ser corrigida utilizando-se uma fibra de compensação de distorção. O comprimento desta fibra deve ser proporcional à dispersão. Usualmente, um rolo de fibra de compensação de distorção de 15 km é colocado a cada 80 km de fibra de transmissão. No entanto, estas fibras ocasionam uma atenuação de aproximadamente 0,5 dB/km.

A dispersão no modo de polarização (PMD, Polarization Mode Dispersion) surge devido ao núcleo da fibra não ser perfeitamente redondo. Quando a luz atravessa uma fibra monomodo, ela atravessa polarizada em dois planos verticais entre si. Devido à fibra não ser perfeitamente simétrica, os dois planos não tem a mesma velocidade e geram dispersão nos pulsos de luz, assim como ilustra a Figura 24.

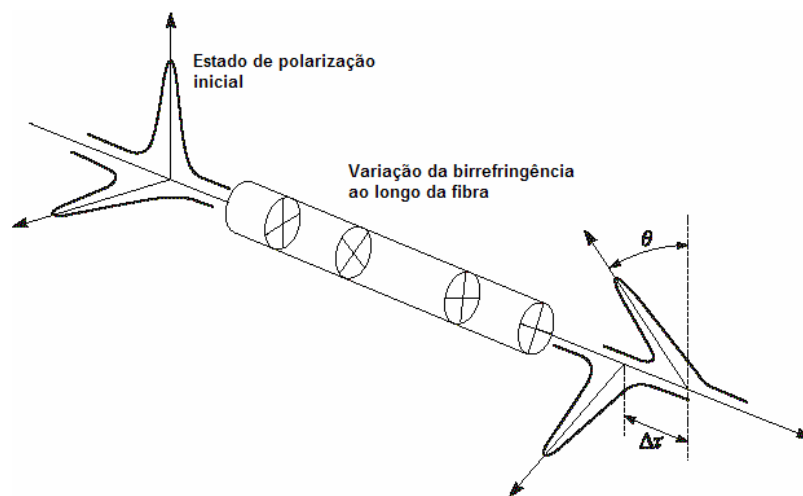


Figura 24 – Dispersão no modo de polarização.

Mistura de Quatro Ondas: Efeito não linear devido à interação entre três comprimentos de onda, f_1 , f_2 , e f_3 gerando um quarto comprimentos de onda, f_{fwm} , de tal forma que, $f_{fwm} = f_1 + f_2 - f_3$. Esta é a principal limitação em sistemas de multiplexação por comprimento de onda.

Espalhamento Brillouin Estimulado: Efeito não linear que ocorre devido à interação da luz com ondas acústicas no vidro. O comprimento de onda é deslocado de 0,08 nm.

Espalhamento Raman Estimulado: Efeito não linear devido à interação da luz com vibrações moleculares no vidro. O comprimento de onda é deslocado de 60 a 100 nm.

5- Tipos de Fibras

A seguir, diferentes tipos de fibras monomodo são classificados de acordo com suas perdas devido à dispersão.

Fibra Monomodo Padrão (SSMF, Standard Single-Mode Fiber): consiste na maior parte das fibras instaladas desta categoria pois suportam transmissões em longa distância e tem dispersão zero em 1310 nm.

Fibra com Dispersão Plana Próxima a Zero (DFF, Dispersion-Flattened Fiber): esta fibra tem dispersão próxima a zero no intervalo de 1310 nm a 1550 nm. Divide-se em várias categorias, dependendo se a curva de dispersão tem inclinação positiva ou negativa:

- Fibra DFF com Dispersão Zero (NZDF, Non-Zero Dispersion Fiber): esta fibra tem dispersão zero próximo a 1450 nm.
- Fibra DFF com Dispersão Negativa (NDF, Negative Dispersion Fiber): esta fibra tem curva de dispersão com inclinação negativa na região 1300 nm a 1600 nm.

Fibra com Pico de Água Baixo (LWPF, Low Water Peak Fiber): as fibras em geral têm um pico na curva de atenuação na região de 1385 nm, conhecido como pico de água. Nas fibras LWPF, este pico é eliminado, possibilitando o uso desta região.

Fibra com Dispersão Deslocada (DSF, Dispersion-Shifted Fiber): esta fibra tem o ponto de dispersão zero deslocado para 1550 nm.

A Figura 25 ilustra as curvas de perdas para vários tipos de fibras monomodo .

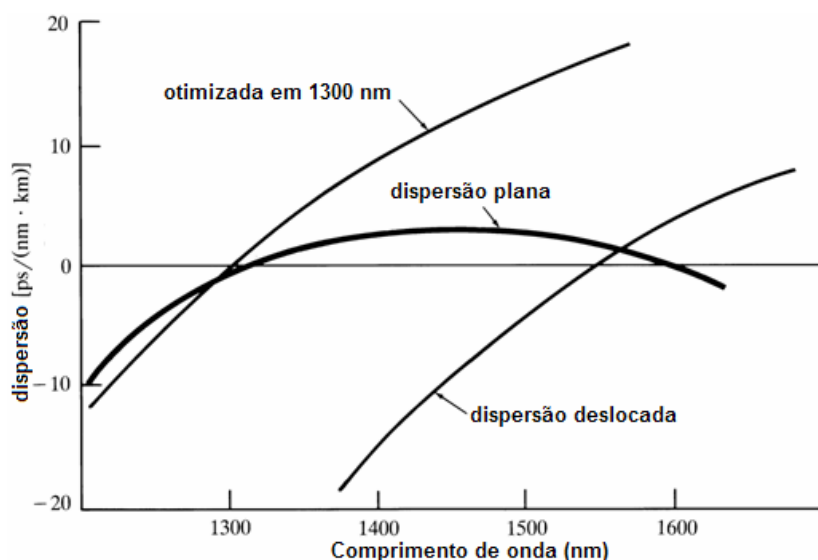


Figura 25 – Perdas em Fibra Monomodo.

As fibras monomodo e multimodo são caras e requerem um técnico especializado para instalá-las. Por outro lado, as fibras plásticas são mais baratas e podem ser instaladas por qualquer pessoa. Estas fibras foram introduzidas em 1960 e atingem distâncias menores que 30 metros. O núcleo de uma fibra de plástico é geralmente feito de uma resina denominada PMMA e a casca de um polímero. O núcleo tem um diâmetro bem grande (96% do diâmetro da casca). Estas fibras têm aplicação para conectar dispositivos em residências (redes residenciais) e em automóveis.

Fontes e detectores de Luz

Em Telecomunicações

1- Introdução

Nas comunicações ópticas, as fontes de luz ou “fontes ópticas” devem ser compactas, monocromáticas, estáveis e com as seguintes características:

- A intensidade da luz (potência óptica) deve ser tal que permita a comunicação por grandes distâncias;
- A estrutura deve permitir um acoplamento efetivo da luz na fibra;
- O comprimento de onda de emissão tem que ser compatível com os comprimentos de onda para o uso em fibras ópticas (0,85, 1,3 e 1,55 μm);
- O dispositivo deve produzir potência estável que não varie com a temperatura ou outras condições ambientais.

Na prática, não existem fontes de luz monocromática; existem fontes ópticas que geram luz dentro de uma faixa estreita de comprimentos de onda, denominada região espectral. Um espectro pode ser definido como uma sequência de radiação eletromagnética relacionada com determinados comprimentos de onda. Assim, o espectro completo de uma determinada fonte de luz consiste no conjunto de todas as frequências em que fonte emite. Dado que ainda não existe um equipamento que consiga resolver por completo todo o espectro conhecido, as regiões de interesse devem ser investigadas de maneiras diferentes.

A tecnologia de estado sólido tornou possível a confecção de fontes ópticas com as características acima citadas e, dois tipos de fontes são amplamente utilizados: os LEDs (Light Emission Diode) e os Lasers.

Os LEDs foram as primeiras fontes utilizadas em comunicações ópticas sobre fibras multimodo e, a seguir, foram desenvolvidos os Lasers para aplicação em fibras monomodo. Lasers têm tido um grande impacto nos mais importantes ramos da ciência: pesquisas de novos materiais na escala de femtosegundos, resfriamento de átomos, etc. Calcula-se que atualmente mais de um terço dos trabalhos científicos experimentais publicados nas áreas de física e química utilizem lasers. Também nas áreas tecnológicas lasers são cada vez mais importantes: aplicações industriais como corte e solda, comunicações óticas, cirurgia a laser, memórias óticas, e tecnologias emergentes como a ótica integrada.

LEDs e Lasers de semicondutor são basicamente junções p-n em semicondutor apropriado. Quando a junção p-n é polarizada positivamente, passa corrente pelo dispositivo e uma parte da energia fornecida ao dispositivo é emitida por ele na forma de luz. A figura 1 mostra esquematicamente um diodo eletroluminescente.

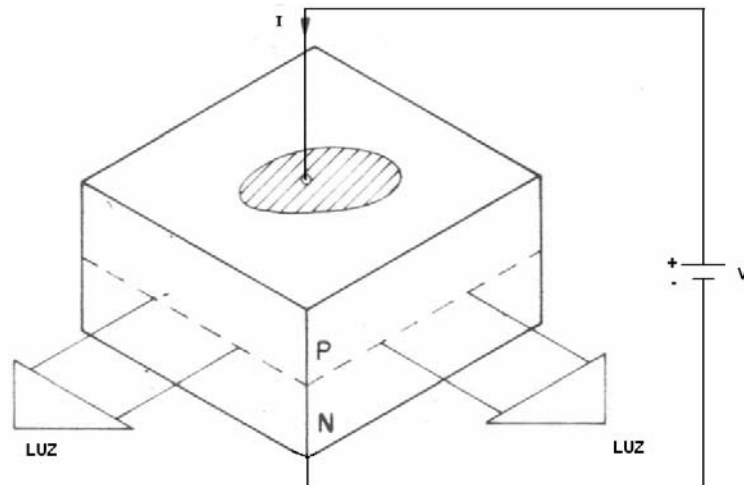


Figura 1- Diodo eletroluminescente.

A energia hf dos fótons emitidos, é determinada pelo valor E_g da banda proibida do semicondutor e é dada por:

$$E_g \approx hf \quad (2.1)$$

Um elétron no átomo pode ser excitado de um nível de energia para um nível de energia superior através da absorção de um fóton de energia. Quando um elétron de alta energia decai para um nível de energia inferior, ele emite um fóton. Existem duas possibilidades para o processo de emissão; emissão espontânea ou emissão estimulada. Na emissão espontânea o elétron muda de estado de energia espontaneamente. Na emissão estimulada um outro fóton estimula o processo de emissão de luz, induzindo o elétron a mudar de estado (fig. 2). A emissão de luz de um LED é resultante da emissão espontânea e a do laser da emissão estimulada.

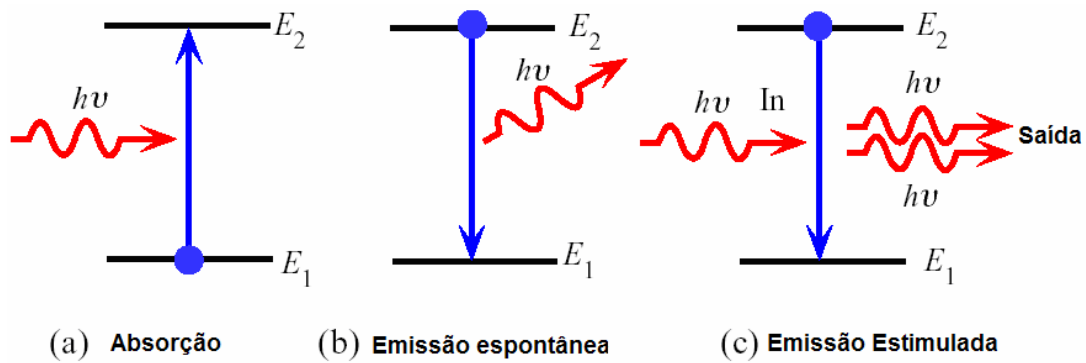


Figura 2 – Absorção, emissão espontânea e emissão estimulada.

A conversão "energia-corrente" → luz ocorre em uma "região ativa" muito fina (espessura da ordem de $1\mu m$) na vizinhança e paralela a junção p-n. A eficiência quântica interna η define basicamente a eficiência do processo da transformação de energia "energia-corrente" → "energia da luz gerada internamente no dispositivo". No GaAs, o semiconductor atualmente mais importante do ponto de vista de Comunicações ópticas, $\eta \approx 0,9$ a $1,0$. A emissão desta luz gerada na região ativa de um LED ou de um laser antes de atingir a corrente limiar para "lesamento", é isotrópica, quer dizer uniforme em todas as direções. A fração desta luz que consegue escapar para fora do dispositivo (e ser útil no caso do LED) depende da geometria do dispositivo. O material passivo (fora da região ativa) absorve fortemente a luz gerada na região ativa. Consequentemente em um dispositivo com a geometria ilustrada na figura 1, só a fração da luz emitida paralela à região ativa consegue escapar para fora.

Como a emissão interna é isotrópica, esta fração é muito pequena e consequentemente a eficiência quântica externa é muito baixa (da ordem de 1%). No caso do laser a geometria é a mesma da fig.(1), só que as duas faces clivadas do material formam uma cavidade óptica definido uma direção preferencial para o dispositivo perpendicular aos espelhos clivados. A emissão do dispositivo para correntes acima do limiar para lesamento, não é mais isotrópica, mas direcionada na região ativa perpendicular aos espelhos. A fração desta emissão que consegue escapar para fora é determinada basicamente pela transmitância ($T = 68\%$ no caso de GaAs) dos espelhos. Consequentemente nos diodos lasers, a eficiência quântica externa diferencial (quer dizer, válida somente para a parte da corrente acima do limiar) é da ordem de 50%. A figura 2 mostra a emissão externa pouco eficiente para correntes abaixo do limiar (e que se aplica também ao LED) e emissão eficiente acima do limiar.

Vemos que no caso de diodo laser, existe uma corrente de limiar I_L , a partir da qual o dispositivo funcionará como um laser.

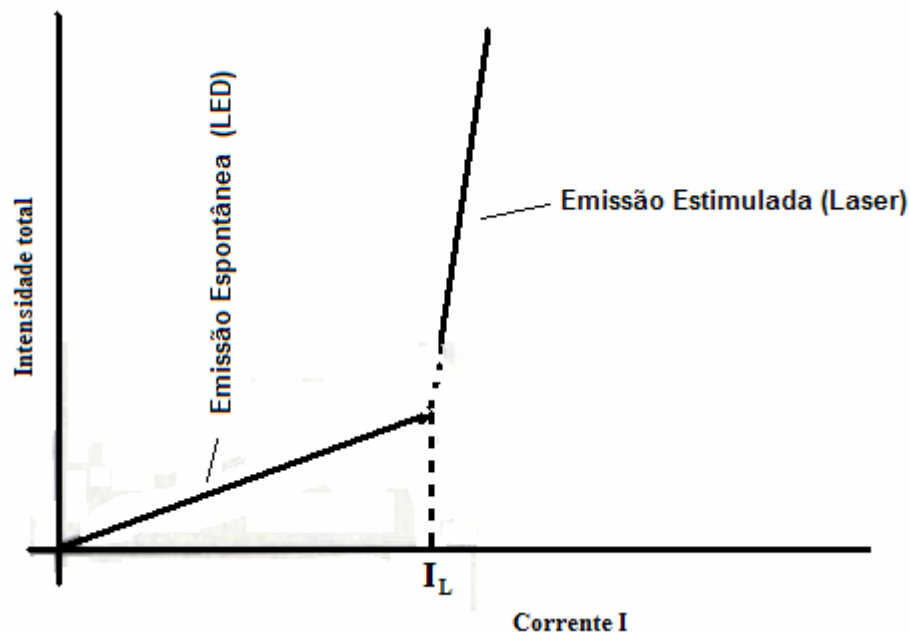


Figura 3 Intensidade de luz em função da corrente de um diodo.

2- Semicondutores

Num átomo os elétrons que estão em volta do núcleo ocupam níveis de energia bem definidos (quantizados). Em um cristal sólido, que é uma rede bem regular de átomos, estes níveis de energia se expandem em bandas de tal maneira que os elétrons agora não são mais ligados aos átomos individuais, e podem ocupar as energias definidas por estas bandas (figura 4).

Uma banda vazia não tem elétrons e não contribui para condução elétrica num sólido. Os elétrons numa banda cheia também não contribuem para condução elétrica porque, como não existem níveis vazios na banda, os elétrons não podem subir em energia, consequentemente não podem adquirir energia da fonte externa.

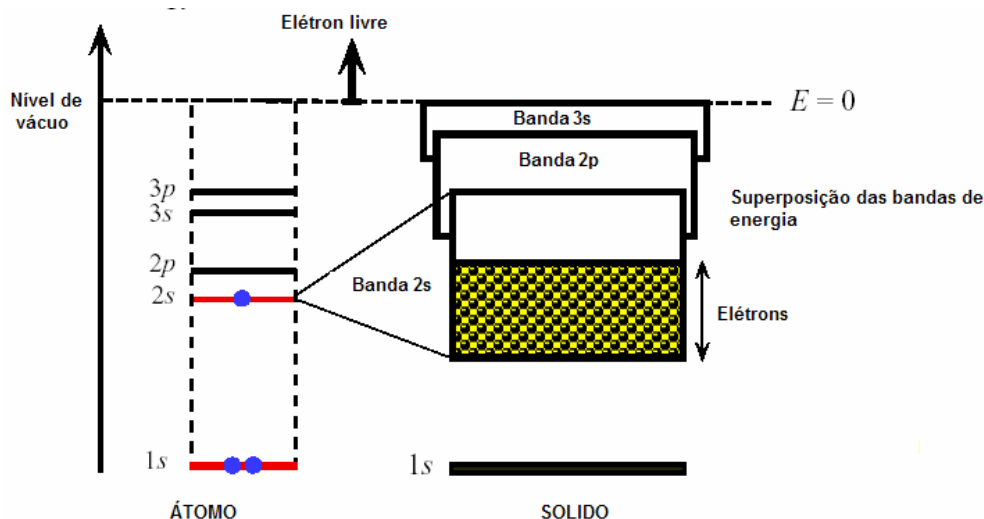


Figura 4 - Num metal as várias bandas de energia sobrepõem para dar uma única banda de energia que está parcialmente cheia de elétrons. Há estados com energias até nível de vácuo onde o elétron é livre.

Um semiconductor é um cristal sólido no qual a temperatura $T=0$ K todas as bandas de energia até certa banda estão cheias e as restantes estão vazias. Quando a temperatura está acima de 0 K, alguns elétrons da banda de valência (última banda cheia) possuem energia térmica suficiente para saltar para a banda de condução (primeira banda vazia), deixando atrás, buracos. Estes elétrons e buracos contribuem para a condução elétrica e o semiconductor é denominado semiconductor intrínseco.

Um semiconductor que contém impurezas (tipo doador) que fornecem elétrons à banda de condução é denominado tipo n, porque a condução elétrica no material é feita através dos elétrons (carga negativa) na banda de condução. Os elétrons neste caso são chamados portadores majoritários.

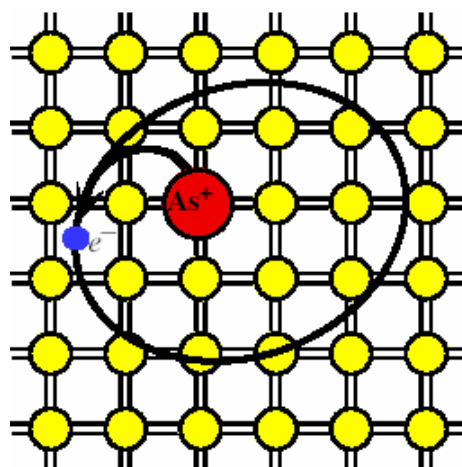


Figura 5 - Dopagem tipo n. Os quatro elétrons de valência de As permite ele se ligar ao Si mas o quinto elétron fica orbitando na rede cristalina.

Um semiconductor que contém impurezas (tipo aceitador) que recebe elétrons da banda de valência, deixando buracos nela, é denominado tipo-p porque a condução elétrica no material é feita através dos buracos (carga positiva) na banda de valência. Neste caso os numerosos buracos na banda de valência são portadores majoritários e os poucos elétrons na banda de condução são portadores minoritários.

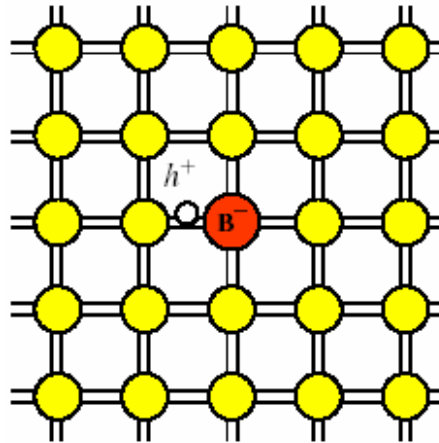


Figura 6 - Cristal de Silício (Si) dopado com boro. B tem somente três elétrons de valência. Quando o boro substitui o átomo de silício fica faltando um elétron, portanto um buraco.

Quando os materiais *p* e *n* que formam o diodo semiconductor são postos em contato, os níveis quasi-Fermi dos dois materiais estão desalinhados. Isto ocorre devido ao fato de que as concentrações de portadores livres (elétrons e buraco) para os dois materiais são diferentes. Contudo, um fluxo de portadores por difusão é rapidamente estabelecido próximo à região de junção para compensar os gradientes de concentração, deixando esta região praticamente vazia de portadores livres (região de depleção). Este fluxo continua até que um campo elétrico oposto à direção de deslocamento dos portadores é formado, devido à carga dos íons fixos das impurezas de dopagem doadoras e aceitadoras ficam para trás.

Quando isto acontece, um nível de equilíbrio é atingido, com os níveis quasi-Fermi se alinhando e uma barreira de potencial é estabelecida. Quando a junção é polarizada diretamente, o campo elétrico é reduzido permitindo um novo fluxo de portadores por difusão através da junção. Apesar da região de depleção se estreitar sob estas condições, é possível de se dizer que, durante este processo de difusão, tanto buracos como elétrons estarão simultaneamente presentes nesta região, tornando a probabilidade de recombinação radiativa maior. Contudo, existe também a probabilidade de que estes fótons possam ser absorvidos novamente pelo material, pois, normalmente, a população de elétrons na banda de valência é maior que àquela na banda de condução. Somente quando a tensão aplicada aos terminais exceder um determinado valor (limiar ou threshold) que o número de portadores livres na junção aumenta de tal maneira que o número de fótons gerados é suficiente para

contrabalançar as perdas (condição de inversão de população (ou transparência)), a população de elétrons na banda de valência fica ligeiramente menor que àquela na banda de condução. A partir deste momento, a junção pn é capaz de amplificar luz uma vez que a tensão aplicada seja maior que àquela de limiar, ou seja, o dispositivo passa a apresentar ganho óptico. Na verdade, esta tensão aplicada gera uma corrente elétrica nos terminais do dispositivo. Normalmente, a corrente é utilizada como parâmetro de referência para o laser.

3- Diodos emissores de luz

Um diodo emissor de luz (LED: light emitting diode) é essencialmente um diodo de junção pn na qual ocorre a recombinação do par elétron buraco resultando na emissão de um fóton. Numa recombinação um elétron da banda de condução desce para um estado vazio na banda de valência, quer dizer que recombina com um buraco. A diferença de energia entre o estado do inicial e final do elétron é liberada, Se esta energia é liberada na forma de emissão de um fóton (radiação eletromagnética ou luz) a recombinação é denominada radiativa, senão ela é não radiativa, e a energia é liberada na forma de calor (vibrações de rede do cristal).

O tipo de fonte de luz aceitável para as comunicações por fibra óptica depende não somente da distância de comunicação, mas também da largura de banda figura . Para aplicações de curta distância, por exemplo, redes locais, os LEDs são mais utilizados por serem mais simples, mais econômicos, possuem um longo tempo de vida e dão a potência de saída necessária ainda que seu o espectro de saída seja muito mais amplo que um diodo Laser.

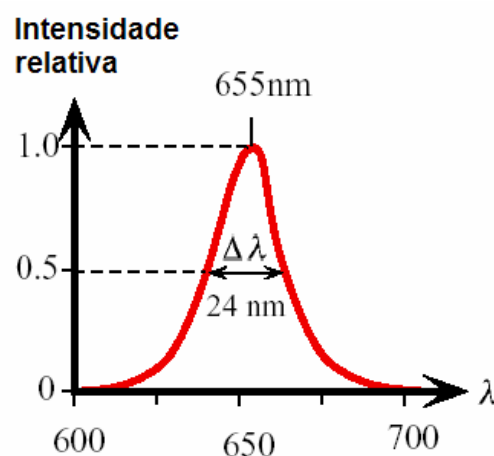


Figura 7 – Espectro de saída típico de um LED vermelho de GaAsP.

Os LEDs são frequentemente usados com fibras de índice gradual. Para comunicações a grandes distâncias e ampla largura de banda, os diodos Laser são usados devido à estreita largura espectral e alta potência de saída.

A figura 8 mostra os dois tipos de LEDs usados em telecomunicações. Se a radiação emitida emerge de uma área no plano da camada de recombinação como em (a) então o dispositivo é um LED emissor de superfície (SLED). Se a radiação emitida emerge de uma área numa borda do cristal, como em (b), isto é, de uma área na face perpendicular do cristal para a camada ativa, então o LED é de emissão de borda (ELED).

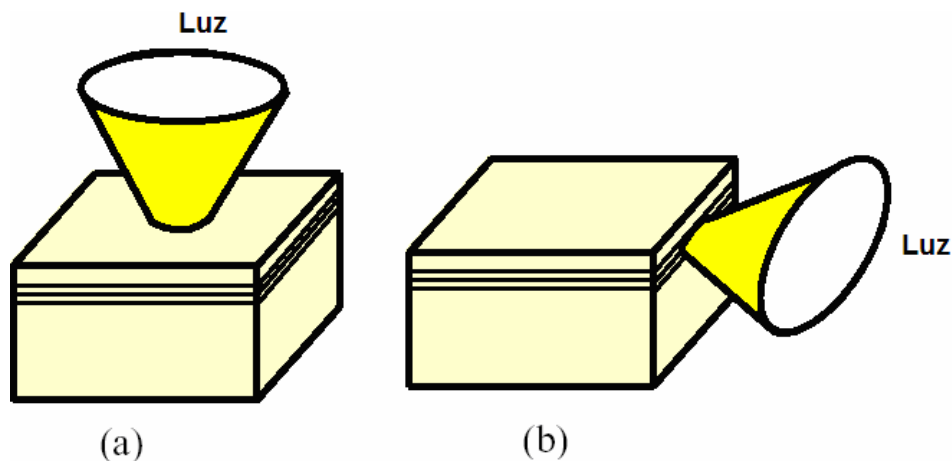


Figura 8 – (a) LED de emissão de superfície; (b) LED de emissão de borda;

O método mais simples de simples de acoplamento da radiação de um SLED na fibra óptica é colocar a fibra o mais próximo possível da região de emissão ativa do LED conforme ilustra a figura 9(a). Outro método é usar micro lentes esféricas para focalizar a luz na fibra (figura 9(b)).

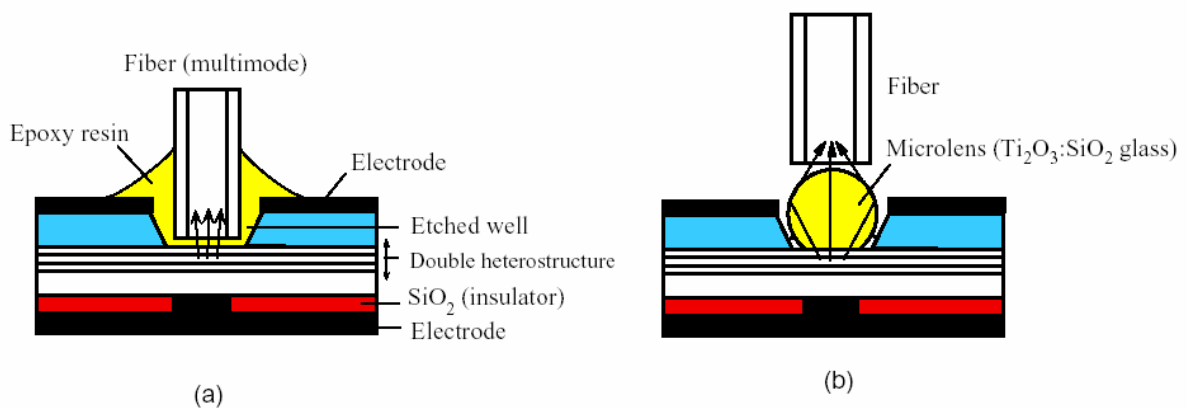


Figura 9 – Acoplamento da fibra no LED.

4- Lasers

A sigla LASER significa: “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”.

Para se obter a emissão estimulada é necessária alguma radiação inicial e um método de confinar os fótons gerados a uma pequena região para aumentar a probabilidade de colisão de fótons e

elétrons. Também é necessário escolher um material para o qual as transições de energia dos elétrons produzam radiação, como ilustra a figura 10.

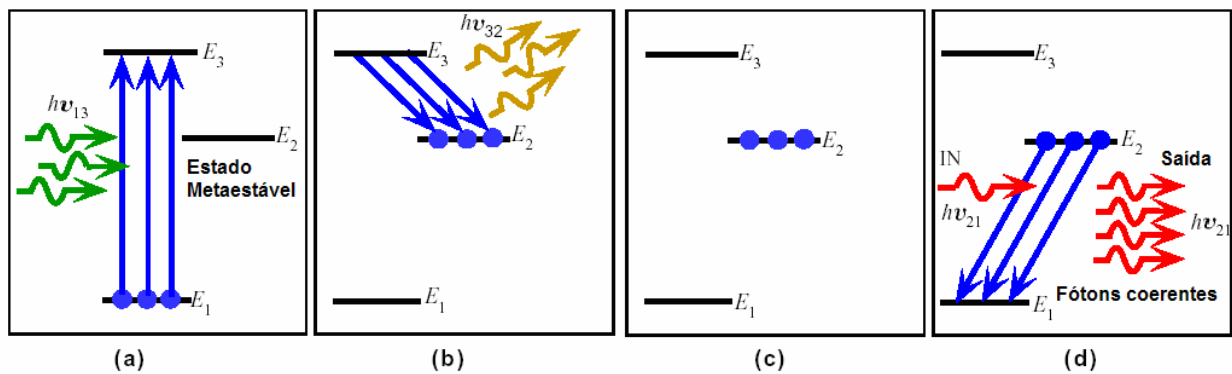


Figura 10 - Emissão estimulada.

Esta propriedade pode ser encontrada em alguns elementos na fase gasosa, por exemplo, Argônio, Kriptônio, Hélio-Neônio e outros na forma de cristais, onde podemos citar o rubi com 0,05% de cromo. Além de gases e rubídio existem alguns materiais sólidos que exibem o mesmo comportamento tais como AlGaAs e InGaAsP. Esses materiais são adequados, pois podem ser manufaturados a um custo adequado, geram luz nos comprimentos de onda compatíveis com a fibra de sílica e podem ser integrados com outros componentes ópticos. Esses são considerados lasers semicondutores. A radiação inicial é fornecida por uma fonte externa de bombeio que produza energia suficiente para a emissão estimulada. Essas fontes de bombeio para o caso dos lasers semicondutores são fontes de corrente, já outros tipos de laser tais como lasers de gás utilizam fontes de luz. A emissão estimulada produz luz coerente e com largura espectral estreita.

Os lasers de semicondutor foram desenvolvidos em 1962, apenas três anos após o surgimento do primeiro laser, o laser de rubi, conforme ilustra a fig. Este laser é composto de um núcleo de rubi e de um tubo contendo gás Xenônio, ambos envoltos por uma superfície refletora (ver figura 11). O gás Xenônio produz um flash de luz que dá início ao processo de “lasing” dentro da cavidade refletora.



Figura 11 - Theodore Harold Maiman e o primeiro laser de Rubi

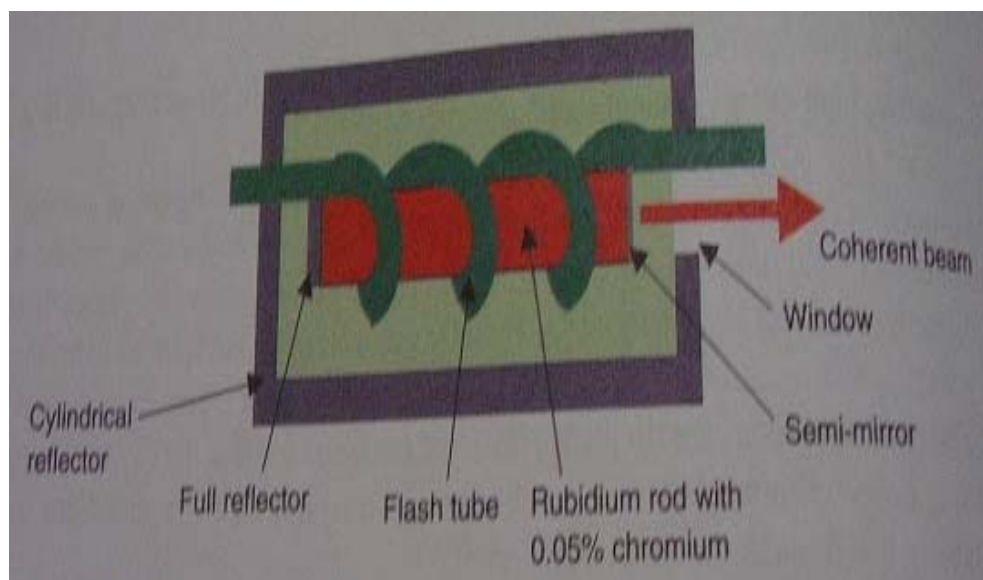


Figura 12 - Componentes do Laser de Rubi.

Esta tecnologia evoluiu muito para chegar ao estado atual. O alto desempenho e confiabilidade dos lasers de GaAs 0.8mm permitiu, no final da década de 70, seu uso no mercado de áudio em compact-disk"(CD). Este é até hoje o único mercado de produção em massa para lasers de semicondutor, absorve mais de 90% de todos os lasers produzidos no mundo e representa um mercado anual da ordem de 50 milhões de lasers. Outra aplicação importante dos lasers de semicondutor é em comunicações ópticas onde se deseja lasers em $1,3\mu\text{m}$ ou $1,5\mu\text{m}$, neste caso usa-se o sistema quartenário de InGaAsPO.

As vantagens da utilização de lasers semicondutores para comunicações em relação aos outros tipos de laser:

- Tamanho e configurações compatíveis com o processo de acoplamento de luz à fibra óptica. Além disso, seu tamanho é ideal para o desenvolvimento de circuitos ópticos integrados;
- Corno é operado por corrente, a modulação de sua intensidade pode ser obtida diretamente a partir da modulação desta mesma corrente. O dispositivo possibilita a modulação direta numa faixa bem ampla de frequências que vai de alguns kHz até dezenas de GHz;
- Além da intensidade, a variação da corrente elétrica de polarização do dispositivo pode alterar sua frequência de operação e, desta forma, sua fase. Assim, a utilização de técnicas coerentes com realimentação de corrente, por exemplo, possibilita a modulação da fase e da frequência do laser;
- Produz potência óptica suficiente para contrabalançar as perdas intrínsecas da fibra e perdas por emenda, entre outras, e ainda fornecer o suficiente para o fotodetector recuperar as informações enviadas, principalmente em sistemas de curta distância;
- O comprimento de onda da luz emitida pelo laser concorda com os pontos de mínima atenuação e dispersão da fibra;
- Seu custo tem caído consideravelmente nos últimos anos, enquanto que seu tempo de vida médio aumentado consideravelmente.

Os lasers semicondutores são as fontes luminosas mais frequentemente utilizadas para a transmissão de sinais ópticos.

A estrutura básica do laser semicondutor é bem semelhante à estrutura de um diodo e nada mais é do que uma junção *pn* que, para fornecer luz, é polarizada diretamente, conforme ilustra a fig..

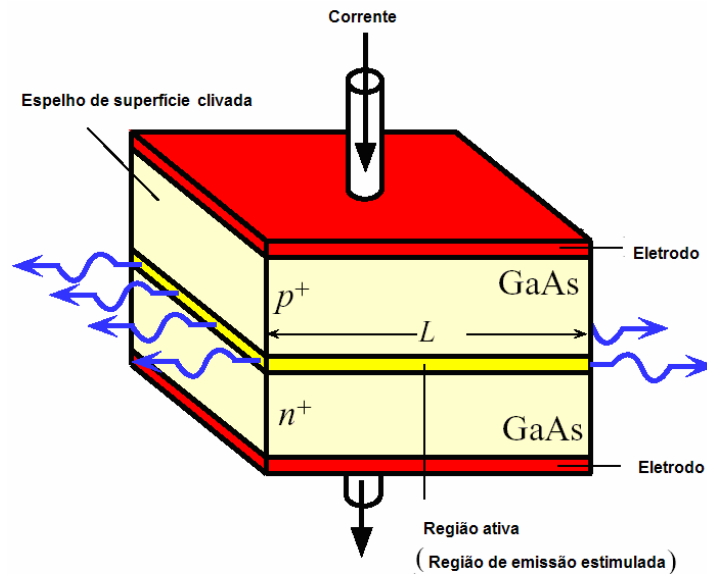


Figura 13 – esquema de um diodo laser de GaAs de homojunção. As superfícies clivadas atuam como espelhos refletores.

A saída de luz pela face da frente de um diodo laser possui uma forma elíptica com um feixe divergente como ilustra a figura 14.

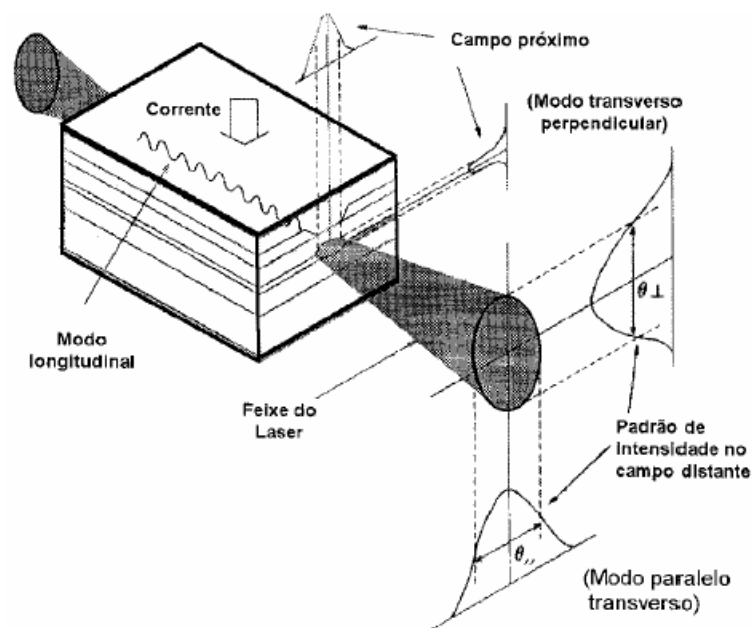


Figura 14- Laser semiconductor suas características ópticas.

A figura 15 ilustra o espectro óptico de um laser do tipo semiconductor.

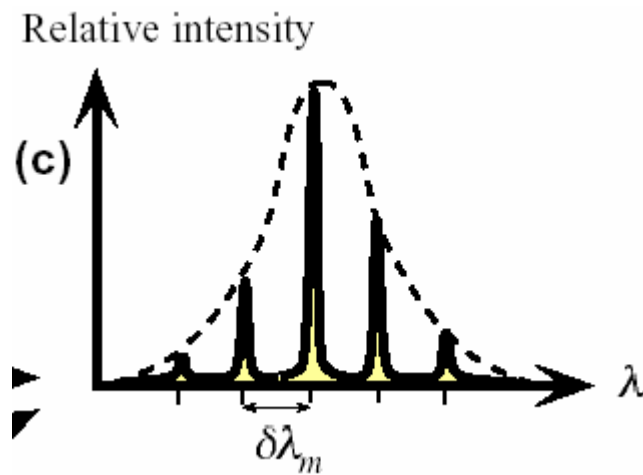


Figura 15 - Espectro de um laser

As figuras 16-18 ilustram algumas fotos de lasers utilizados em comunicações ópticas.



Figura 16- Diodo Laser com “pigtail” para fibra.

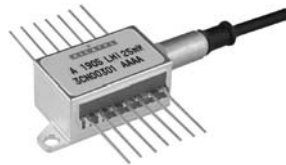


Figura 17 - Diodo Laser InGaAsP em 1550 nm.

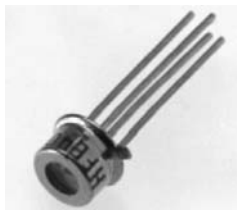


Figura 18 - Diodo Laser 850 nm VCSEL

A figura 20 ilustra o funcionamento do Laser VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) cuja emissão é cilíndrica, mais adequada para acoplamento na fibra.

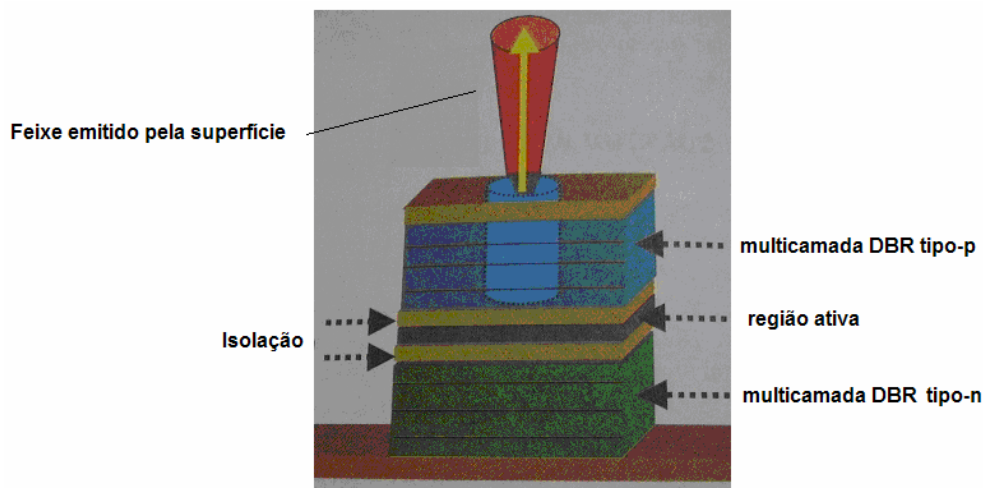


Figura 19 - Funcionamento do laser VCSEL.

5- Fotodiodos

Os fotodetectores são também dispositivos semicondutores, porém, com uma função inversa àquela dos lasers semicondutores, ou seja, em vez da geração de luz a partir de uma corrente elétrica, estes dispositivos convertem luz em corrente. A estrutura do dispositivo, no entanto, lembra a do laser. Estes diodos especiais absorvem a luz neles incidindo, gerando pares elétron-lacuna na região de junção do material. Ao se aplicar uma polarização reversa aos terminais do dispositivo, a largura da região de depleção próxima a junção é ampliada, bem como o campo elétrico nesta região. Assim, os portadores (elétrons e lacunas) fotogerados são acelerados em direção aos seus terminais, gerando uma corrente diretamente proporcional à potência óptica média incidente. Os fotodiodos podem ser divididos em dois tipos diferentes: PIN e avalanche.

Os fotodiodos do tipo PIN possuem uma região quase intrínseca tipo "n" entre duas regiões altamente dopadas "p" e "n" (por isso "pin"). A função desta região quase intrínseca é a de aumentar a região de depleção e, com isso, a região de geração de portadores.

Os fotodiodos de avalanche possuem uma estrutura "pin" mais sofisticada de maneira que possa produzir campos elétricos extremamente intensos. Assim, além de uma maior região para a produção de pares elétron-lacuna através da absorção de fótons, o intenso campo elétrico acelera os portadores gerados de tal maneira que eles podem adquirir energia suficiente para produzir novos pares elétron-lacuna por colisão com a rede cristalina. O único problema deste tipo de fotodetector é que o ruído é amplificado juntamente com a corrente, para um mesmo número de fótons incidente. A figura 20 ilustra alguns exemplos de fotodetectores.

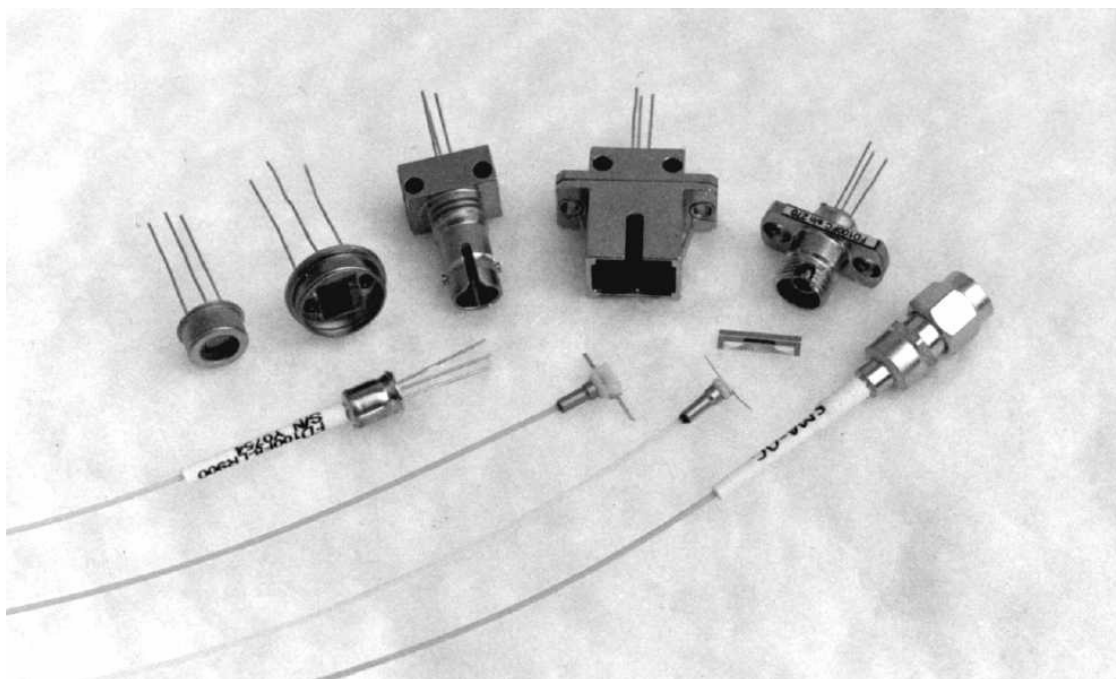


Figura 20 - Exemplos de fotodetectores.

Nem todos os fótons incidentes são absorvidos para criar pares de elétron buraco livres que podem ser coletados e dar uma fotocorrente. A eficiência do processo de conversão de receber fótons e gerar pares elétron-buraco é medido pela eficiência quântica (EQ) η do detector:

$$\eta = \frac{\text{Número de Pares Elétron-Buraco livres gerados e coletados}}{\text{Número de Fótons}} = \frac{I_{ph} / e}{P_0 / hf} \quad (2.2)$$

A responsividade R de um fotodiodo caracteriza sua performance em termos da fotocorrente gerada por potência óptica incidente num dado comprimento de onda,

$$R = \frac{\text{Fotocorrente } (A)}{\text{Potência Óptica incidente } (W)} = \frac{I_{ph}}{P_0} \quad (2.3)$$

Comparando (2.2) e (2.3) vemos que:

$$R = \eta \frac{e}{hf} = \eta \frac{e\lambda}{hc} \quad (2.4)$$

As figura 21 e 22 ilustram as curvas de responsividade em função do comprimento de onda de fotodiodos comerciais.

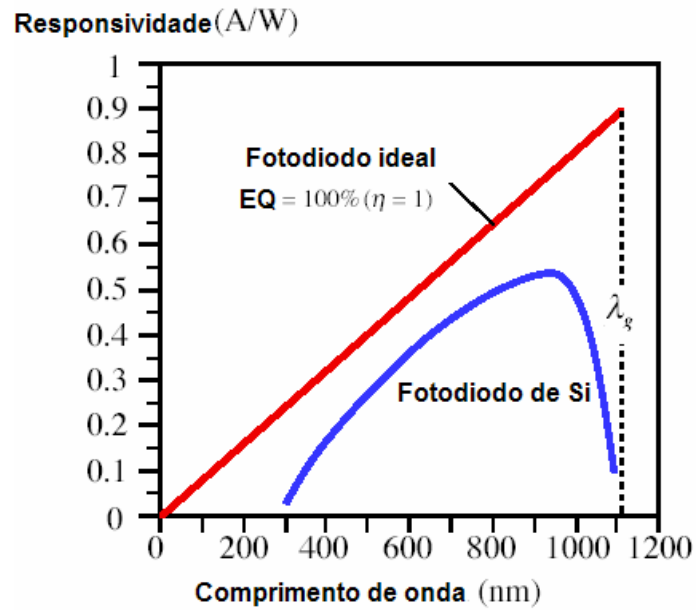


Figura 21 – responsividade em função do comprimento de onda para um fotodiodo ideal com EQ=100% ($\eta = 1$) e para um fotodiodo de Si comercial.

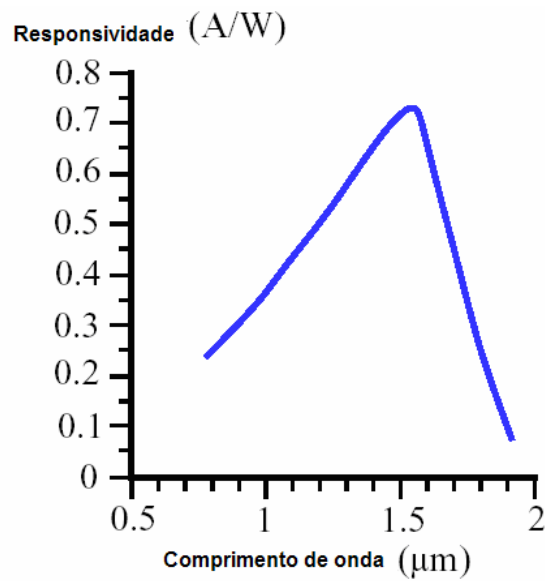


Figura 22 Responsividade de um fotodiodo de Ge comercial de junção pn.

Amplificadores Ópticos

1- Introdução

Um grande avanço na capacidade de transmissão das comunicações ópticas foi obtido devido ao surgimento dos amplificadores ópticos em escala comercial. No início, os sistemas ópticos utilizavam repetidores eletrônicos, que recuperavam o sinal, após uma determinada distância da fonte, a forma e a amplitude dos sinais transmitidos. O processo de funcionamento destes repetidores consistia em converter o sinal óptico para elétrico, onde ele era amplificado e reformatado, e do domínio elétrico para o óptico, onde o sinal eletrônico, gerado após a recuperação do sinal óptico inicial, modulava direta ou indiretamente a luz de um laser semiconductor de saída. De uma maneira técnica, o repetidor era eficiente, pois conseguia recuperar satisfatoriamente o sinal e aumentar a distância dos enlaces ópticos. Contudo, a complexidade dos circuitos optoeletrônicos do repetidor, particularmente daqueles projetados para a recuperação de sinais ópticos modulados digitalmente em altas taxas, fazia com que o custo final dos repetidores se tornasse muito alto, de forma a inviabilizar a transmissão de mais de um canal óptico (comprimento de onda) por fibra.

Com a melhoria dos processos de fabricação da fibra, que minimizaram a sua dispersão intrínseca, e, principalmente, o aparecimento dos amplificadores ópticos, a transmissão multicanal por uma única fibra óptica tornou-se técnica e economicamente viável. Em vista disso, e com a baixa dispersão das fibras, o processamento do sinal ficou resumido à sua amplificação, que pode, agora, ser realizada totalmente no próprio domínio óptico, descartando-se a necessidade de repetidores regenerativos. O amplificador óptico viabilizou a aplicação de técnicas de multiplexação por divisão em comprimento de onda (*Wavelength Division Multiplexing* - WDM), onde vários comprimentos de onda são agregados na mesma fibra (Figura 1) e, cada canal, pode ser amplificado com o mínimo de interferência, e utilizar, potencialmente, a ampla banda de transmissão da fibra óptica.

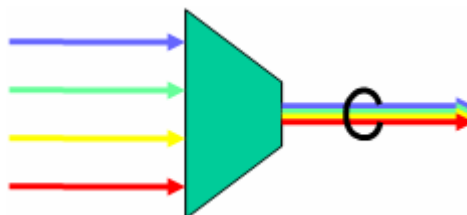


Figura 1 – Wavelength Division Multiplexing – WDM.

Esta prática aumenta a capacidade efetiva de transmissão e diminui o custo por canal, em relação a sistemas com repetidores. Em média, o limite de alcance de um enlace óptico que não utiliza amplificadores e opera com taxas de transmissão da ordem de Gb/s é de, aproximadamente, 200 km. Desta forma, para redes ópticas de longo alcance, como, por exemplo, enlaces transoceânicos, torna-se imperativa a utilização de amplificadores ópticos.

Dois são os tipos de amplificadores ópticos mais utilizados: o amplificador óptico semicondutor (*Semiconductor Optical Amplifier* - SOA) e o amplificador óptico de fibra dopada com Érbio (*Erbium-Doped Fibre Amplifier* - EDFA).

2- Amplificador Óptico Semicondutor

O amplificador óptico semicondutor é similar a um laser semicondutor com a refletividade de seus "espelhos" de face extremamente reduzida, devido à aplicação de uma camada química (material anti-refletor). A luz, ao passar pela junção p-n do dispositivo, quando ela está ativa, (Figura 2) é amplificada, de forma que a intensidade de luz na saída é maior que aquela na entrada. Assim, conclui-se que o dispositivo fornece um ganho líquido de intensidade para o sinal óptico a ele acoplado. Contudo, devido as suas fortes características de intermodulação (cross-talk), que proporcionam um efeito de mistura se diferentes comprimentos de onda, estão simultaneamente passando pelo dispositivo, o SOA é de pouco interesse como amplificador para sistemas WDM. Porém, seu efeito de mistura (mixing) tem sido estudado para a utilização do dispositivo como um misturador óptico (*optical mixer*), conversor de comprimento de onda (*wavelength converter*) e como regenerador de sinais (*optical signal regenerator*).

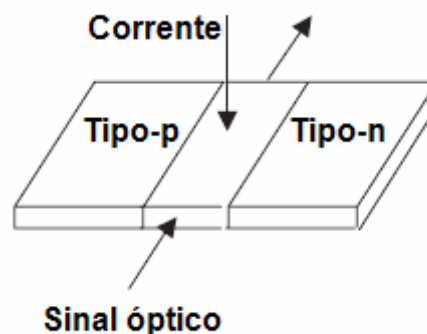


Figura 2- Amplificador Semicondutor.

Misturadores ópticos fazem parte da família dos acopladores que são componentes ópticos passivos multiportas utilizados ora para separar ou dividir um sinal em dois ou mais sinais,

denominado splitter; ora para combinar ou misturar dois ou mais sinais luminosos, denominado combinador (combiner) ou misturador. A distribuição ou combinação é baseada no coeficiente de acoplamento, independente do comprimento de onda, dentro da banda passante do componente óptico.

A Figura 3 ilustra um acoplador de fibra fundida construído a partir da torção, aquecimento e puxamento de duas fibras monomodo que são acopladas sobre uma seção de comprimento uniforme. As entradas e saídas de luz da fibra possuem uma longa seção nas quais as fibras são mais estreitas. Quando a luz passa através da região estreita em direção à região de acoplamento, uma parte do campo elétrico da entrada 1 se propaga para fora da fibra 1 e é acoplada na fibra 2. Uma porção irrelevante da potência óptica de entrada é refletida de volta para entrada. Este tipo de acoplamento é denominado unidirecional. A potência óptica acoplada de uma fibra para outra varia em função do comprimento da região de acoplamento, do tamanho da redução do raio do núcleo da fibra na região de acoplamento e da diferença entre os raios do núcleo das duas fibras na região de acoplamento. Há sempre uma perda de potência óptica quando a luz passa por um acoplador.

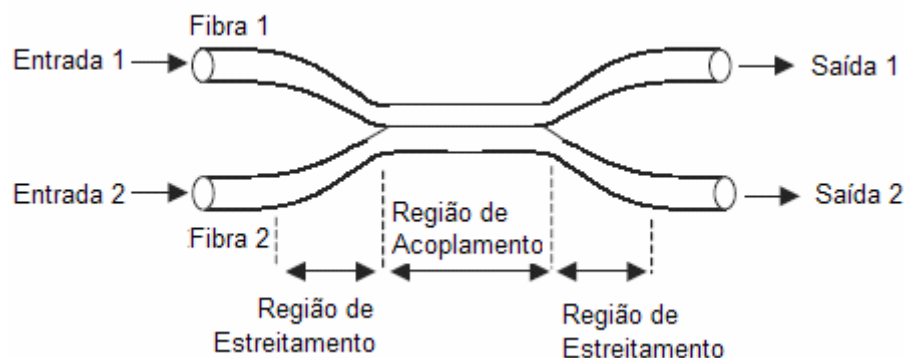


Figura 3- Acoplador de fibra fundida.

Um outro tipo de acoplador é ilustrado na Figura 4 baseado em guia de onda. Um guia de onda é um meio que confina e guia uma onda eletromagnética propagante. Um guia de onda acoplador tem dois guias idênticos paralelos na região de acoplamento. Do mesmo modo que os acopladores de fibra fundida, parte da luz de um guia é acoplada no outro guia. O grau de interação entre os dois guias varia em função da largura do guia, do espaçamento entre os dois guias e do índice de refração entre os dois guias.



Figura 4 – Acoplador baseado em guia de onda.

Os amplificadores do tipo SOA podem ser utilizados para a construção de chaves ópticas, assim como ilustrado na Figura 5 . Ela indica uma chave 2 x 2. Os guias de onda agem como splitters ou acopladores e são feitos de um material polimérico. Cada comprimento de onda de entrada (λ_1 e λ_2) é dividido em dois sinais ópticos e cada um destes sinais é dirigido para um SOA diferente. Os SOAs amplificam os sinais e permitem ou não que os sinais passem através dele. Os comprimentos de onda de entrada, λ_1 e λ_2 , saem da chave óptica na porta de saída superior ou inferior. O tempo de comutação de uma chave do tipo SOA é da ordem de 100 psec.



Figura 5 - Chave óptica.

A aplicação mais comum para acopladores e splitters é para distribuição de sinais em redes e sistemas. Um exemplo de splitter é indicado na Figura 6.



Figura 6 – Splitter.

Os conversores de comprimento de onda (Figura 7) possibilitam a realocação de canais ópticos, adicionando flexibilidade e eficiência em sistemas multi-comprimentos de onda. A conversão de comprimento de onda pode ser efetuada empregando-se os efeitos não lineares de certas junções de semicondutores.



Figura 7 - Conversor de comprimento de onda.

3- Amplificador Óptico de Fibra Dopada com Érbio

O EDFA pertence a uma família de amplificadores, obtidos a partir da dopagem de uma fibra óptica com elementos químicos pertencentes ao grupo das "terras-raras". Dentre estes elementos se destaca o Érbio em sua forma iônica sendo, atualmente, o mais utilizado nos amplificadores (1550 nm). Contudo outros possíveis dopantes, como o Praseodímio (usado para amplificação na faixa de 1.300 nm) e o Ítérbio (usado como co-dopante junto com o érbio) também estão sendo pesquisados.

O EDFA nada mais é do que um pedaço de fibra de sílica, de um determinado comprimento, cujo o núcleo (core) é dopado com átomos ionizados do elemento das terras raras Érbio. A esta fibra é fornecido um sinal óptico, chamado de sinal de bombeio, que opera em um comprimento de onda de 980 ou 1480 nm. Um acoplador direcional (wavelength-selective coupler) mistura o sinal de bombeio com o sinal sendo transmitido em 1550 nm, assim como ilustra a Figura 8. Um outro acoplador, também seletivo, separa o bombeio do sinal de transmissão na saída do EDFA. Isoladores são utilizados para evitar que reflexões indesejadas retomem ao amplificador.

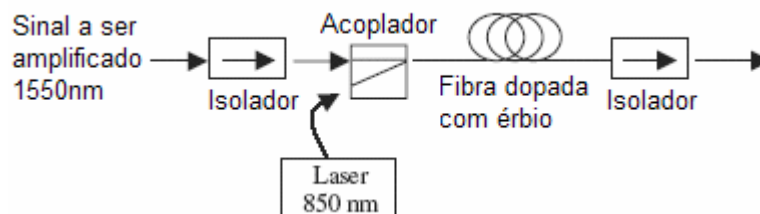


Figura 8- Amplificador EDFA

Para que o processo de funcionamento do EDFA possa ser explicado, o esquema dos níveis de energia do Érbio será utilizado. Apesar de não ser uma análise completamente correta, pois não leva em conta o que realmente acontece com os níveis de energia do elemento quando este é incorporado à estrutura da fibra, o esquema é mais simples e proporciona um melhor entendimento do efeito de amplificação. Quando o bombeio passa pelo interior da fibra dopada, os elétrons da última camada de valência dos íons de Érbio absorvem a luz do bombeio, ganham energia proporcional ao comprimento de onda deste sinal e "pulam" para níveis de energia maiores. No caso de um bombeio de 980 nm, o elétron "sobe" até um nível de energia mais alto (E_3) porém decai rapidamente para um nível de energia menor (E_2). Na natureza, a tendência é

de que todos os corpos ocupem um estado de energia mínima, ou seja, tudo tende a atingir ou voltar para um estado de equilíbrio estável. Assim, os elétrons no estado E_2 também devem decair para o nível E_1 de maneira a restabelecer o seu equilíbrio. Os elétrons perdem energia da mesma forma que ganharam, ou seja, emitindo luz. Porém, a transição do estado E_2 para o E_1 fornece luz cujo comprimento de onda está localizado exatamente na faixa de comprimentos de onda que proporcionam a mínima atenuação da fibra. Como o sinal de transmissão possui também um comprimento de onda localizado na mesma faixa, acontece o mesmo que para o laser, ou seja, a luz do sinal sendo transmitido estimula o aparecimento de luz sincronizada, obtida como resultado da passagem dos elétrons de E_2 para E_1 . No caso de um sistema WDM, isto acontece para os diferentes comprimentos de onda de transmissão localizados em torno de 1530 nm.

O EDF A ainda apresenta problemas que interferem no seu desempenho e causam problemas aos sistemas de comunicação:

- Saturação do ganho G com a potência óptica: o ganho do amplificador tende a cair se a potência óptica acoplada for muito alta, causando transientes de potência na rede;
- Homogeneidade do ganho: o ganho do amplificador varia de comprimento de onda para comprimento de onda, de forma que diferentes canais WDM são amplificados com ganhos diferentes. Este tipo de característica pode ser crucial em sistemas com amplificadores cascadeados, já que a saturação pode provocar discrepâncias ainda maiores na amplificação de canais de baixa potência;
- Ruído: uma outra característica do EDFA é a amplificação do ruído de emissão espontânea, principalmente em sistemas utilizando amplificadores cascadeados. Isto é um fator que limita a utilização do sistema por diminuir a razão sinal-ruído e, desta forma, a banda de transmissão dos canais.

O problema na falta de homogeneidade do ganho do EDFA leva a diferentes amplitudes para os canais de um sistema WDM. Uma maneira de compensar o problema é pré-selecionando a potência óptica de cada canal no transmissor de tal maneira que, no receptor, eles possuam uma distribuição de potência mais equalizada. Este processo requer um conhecimento da característica dos n amplificadores cascadeados. Em sistemas ponto-a-ponto, isto não é um problema muito grave. Porém, numa rede, que é, na maioria das vezes, multiponto, determinar o número de amplificadores entre transmissor e receptor é uma tarefa difícil, fazendo a pré-equalização tornar-se bem complicada. Uma outra solução é a utilização de equalizadores após cada amplificador. Estes dispositivos são filtros ópticos que possuem um comportamento de

atenuação distinto para diferentes canais, ou seja, comprimentos de onda.

A Figura 9 ilustra um EDFA produzido pelo CPqD no âmbito do Projeto Giga e transferido para produção à PadTec.

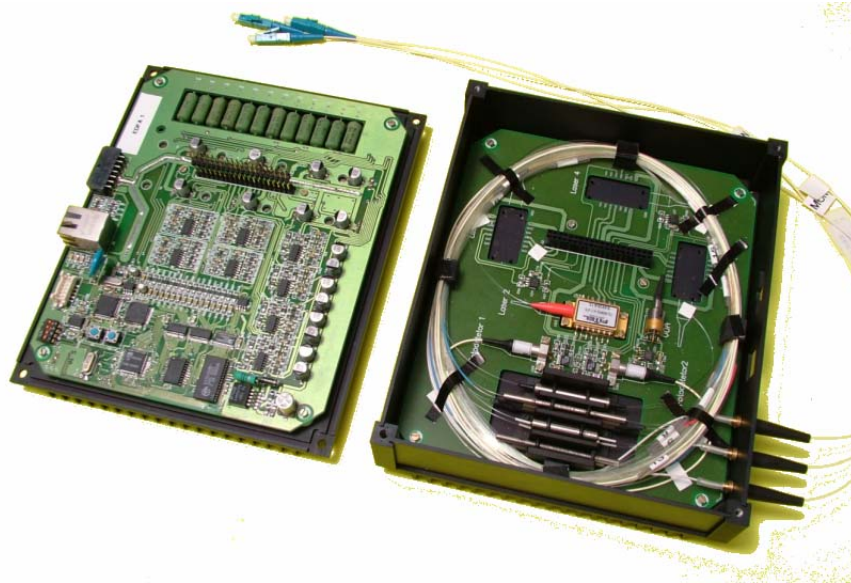


Figura 9 – Amplificador de fibra dopado com érbio.

4- Sistemas WDM

O fenômeno de propagação de somente um comprimento de onda numa fibra monomodo pode ser comprovado através uma configuração experimental, indicada na Figura 10, usando como fonte de luz um Laser e, na recepção um fotodetector.

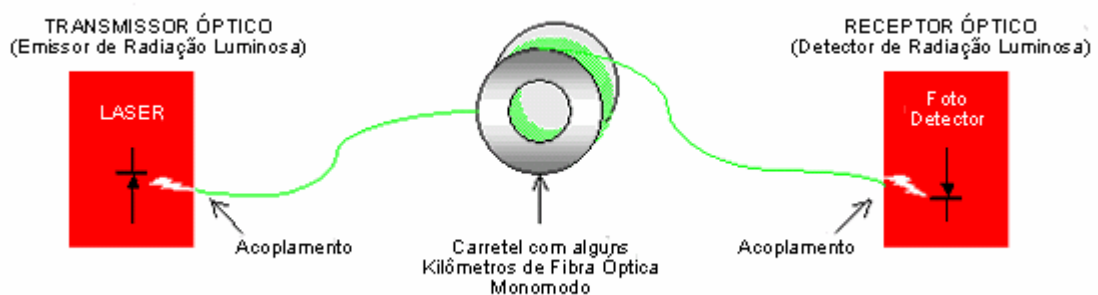


Figura 10 – Experimento de Transmissão de um Comprimento de Onda

No entanto, se injetarmos em uma fibra óptica, como a acima descrita, dois comprimentos de onda distintos λ_1 e λ_2 , com um razoável espaçamento entre eles, como por exemplo:

- Para λ_1 um Laser com comprimento de onda de 1310 nm, denominado Transmissor Óptico N.º 1.

- Para λ_1 , um Laser com comprimento de onda de 1550 nm, denominado Transmissor Óptico N.º 2.

Estes dois comprimentos de onda λ_1 e λ_2 se propagarão normalmente e sem interação nesta fibra óptica, usando uma analogia; seria como água e óleo percorrendo um mesmo cano, sem se misturar, conforme ilustra a Figura 11.

Note-se que os dois comprimentos de onda propagam-se em num mesmo direção e sentido e por esta razão denomina-se transmissão unidirecional em uma fibra óptica.

Na Figura 12, apresenta-se uma configuração experimental deste fato onde, na parte da recepção óptica são utilizados fotodiodos, para detecção dos comprimentos de onda λ_1 e λ_2 operando respectivamente em 1310 e 1550 nm.

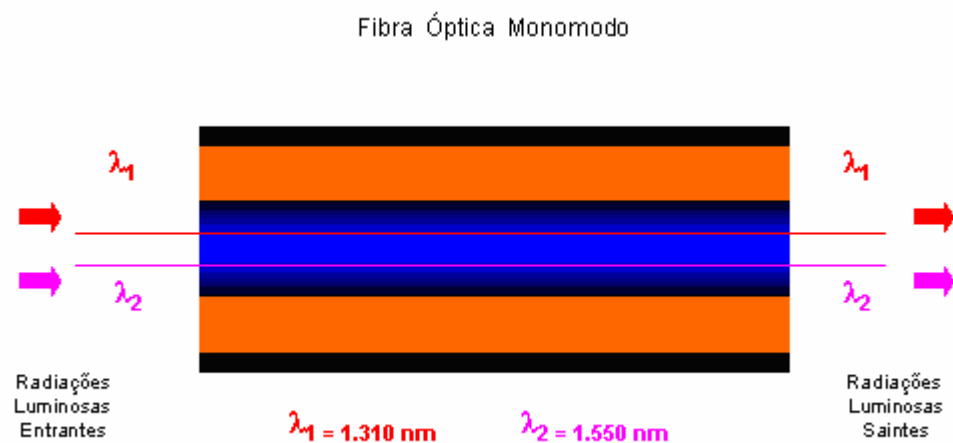


Figura 11 – Transmissão Unidirecional de dois Comprimentos de Onda

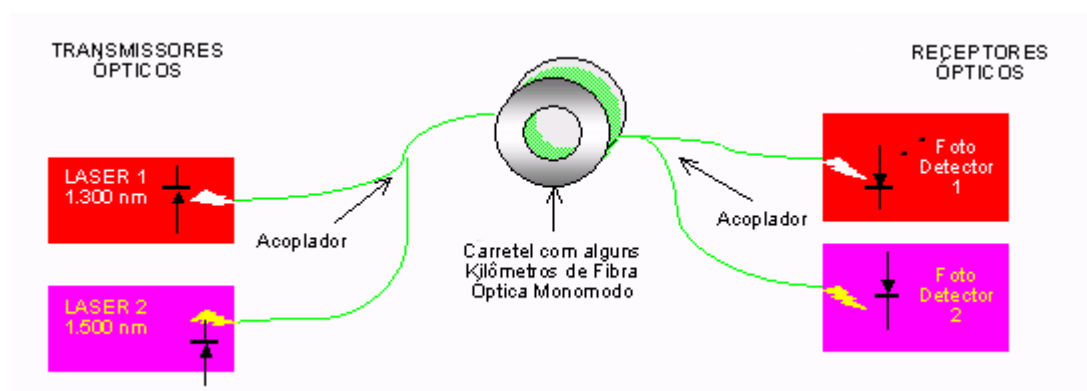


Figura 12 – Experimento para transmissão de dois comprimentos de onda

Neste caso, é também possível injetar um dos dois comprimentos de onda λ_1 e λ_2 em sentido ou direção oposta, sem haver qualquer perturbação. A Figura 13, ilustra este fato, que é denominado de transmissão bidirecional em uma fibra óptica.

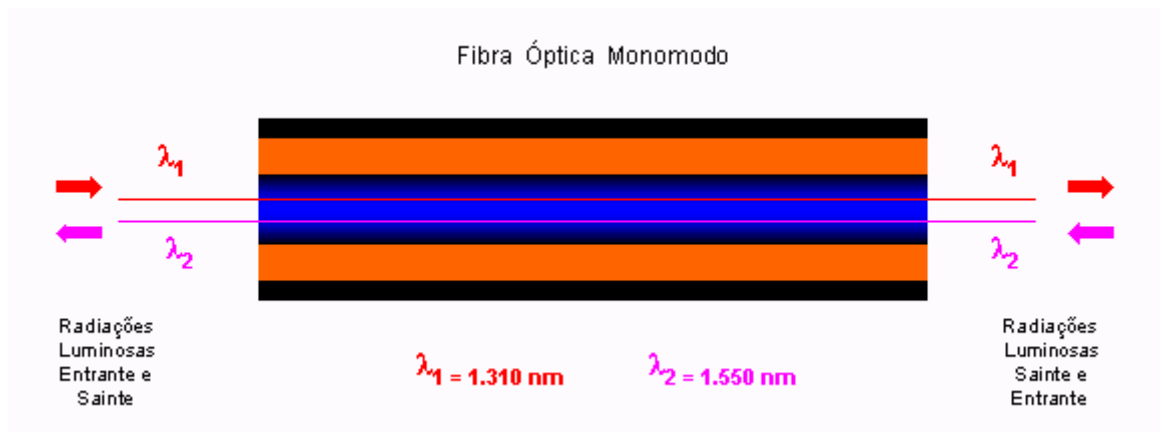


Figura 13 – Transmissão Bidirecional

A Figura 14 apresenta a configuração experimental para verificar esse efeito, onde sinais de comprimento de onda distintos de 1.310 e 1.550 nm trafegam em uma Fibra Óptica em sentidos opostos.

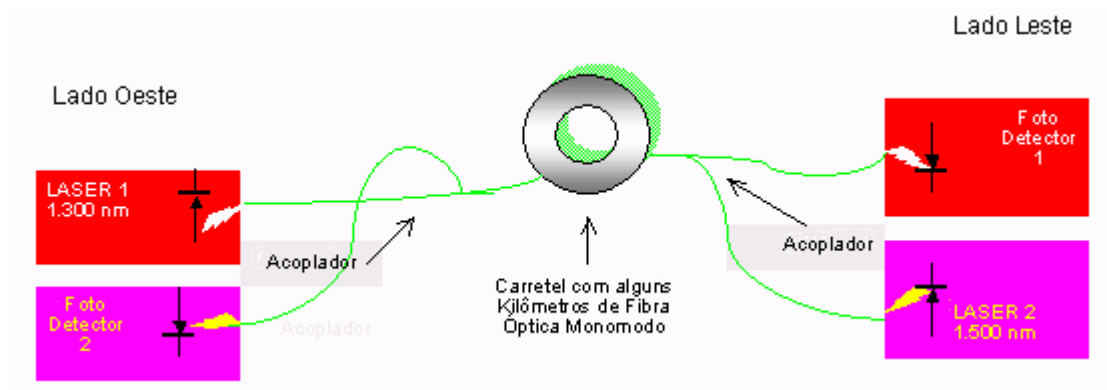


Figura 14 – Experimento para transmissão bidirecional

A tecnologia **WDM** é simplesmente a combinação de múltiplos sinais ópticos; com diferentes comprimentos de onda (cores), devidamente espaçados entre si, que são injetados e se propagam em uma mesma fibra óptica.

Ou seja, com a técnica **WDM**, podemos transmitir nas regiões denominadas **Bandas** ou **Janelas**, em que fibra óptica, apresenta menor atenuação, vários comprimentos de onda de forma simultânea, conforme mostra a Figura 15 .

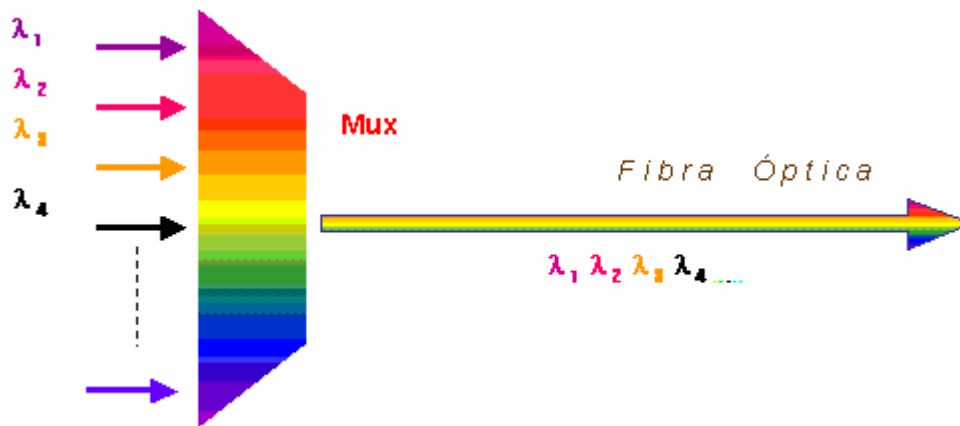


Figura 15 – Princípio do WDM.

O princípio básico desta tecnologia é o mesmo descrito acima, para mistura de dois comprimentos de onda, com a diferença de ao invés de serem utilizados apenas dois lasers, em uma fibra óptica, vários Lasers, com espaçamentos apropriados, entre os seus comprimentos de onda são empregados.

Para possibilitar a inserção destes vários lasers, um dispositivo óptico passivo, chamado de Multiplexador Óptico, ou Mux. Óptico, ou ainda simplesmente **Mux** é utilizado.

5- Técnicas de multiplexação e demultiplexação

Uma maneira simples de multiplexação ou demultiplexação da luz é realizada utilizando-se um prisma. Como o feixe de luz policromática incide paralelamente na superfície do prisma, durante a demultiplexação, cada comprimento de onda é refratado diferentemente. Assim, cada comprimento de onda é separado um do outro por um ângulo. Então, uma lente irá focalizar cada feixe, de maneira que entrem adequadamente na fibra. Essa mesma técnica pode ser feita para realizar a multiplexação de diferentes comprimentos de onda dentro de uma única fibra.

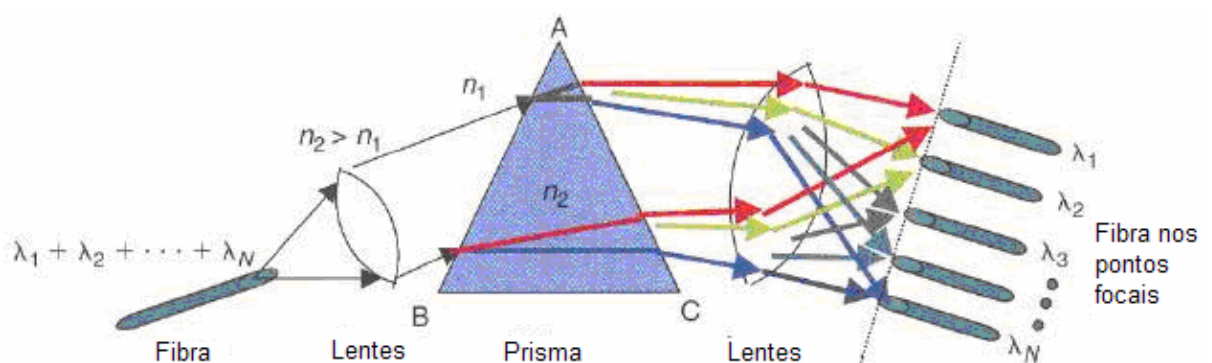


Figura 16 - Demultiplexação

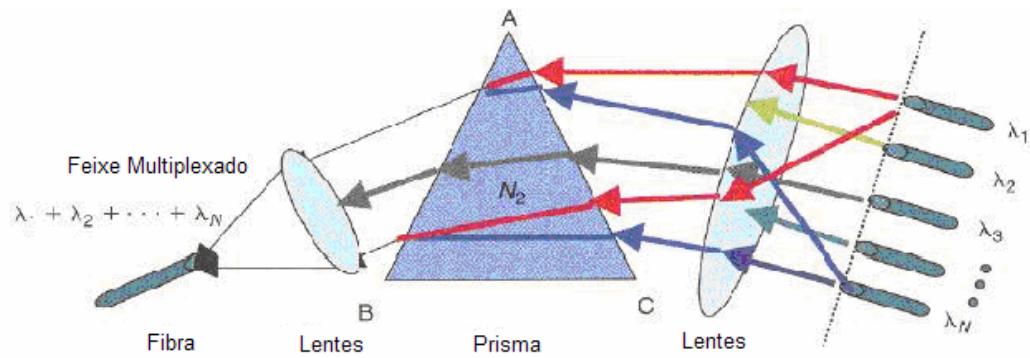


Figura 17- Multiplexação.

Uma outra técnica tem base nos princípios de difração e interferência óptica. Ao incidir numa grade de difração, cada comprimento de onda que compõe o feixe de luz policromática é difratado em diferentes ângulos e, assim, para pontos diferentes no espaço. Para focalizar estes feixes dentro de uma fibra, são utilizadas lentes.

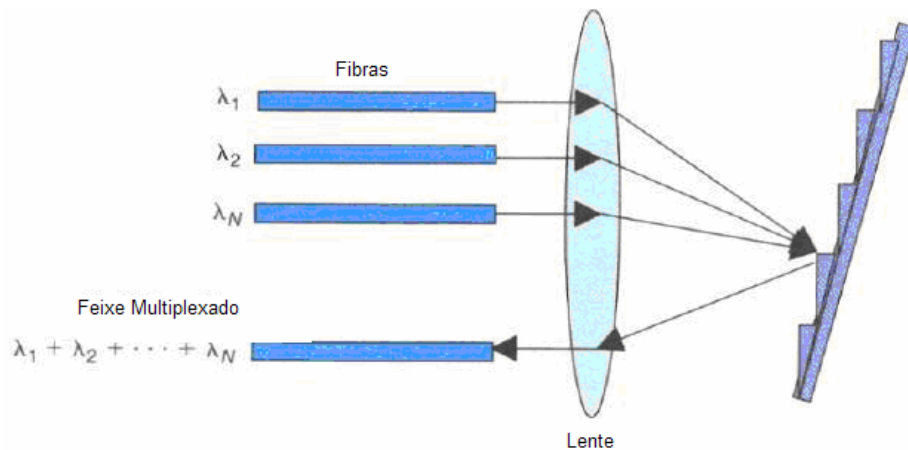


Figura 18- Multiplexação via grade de difração.

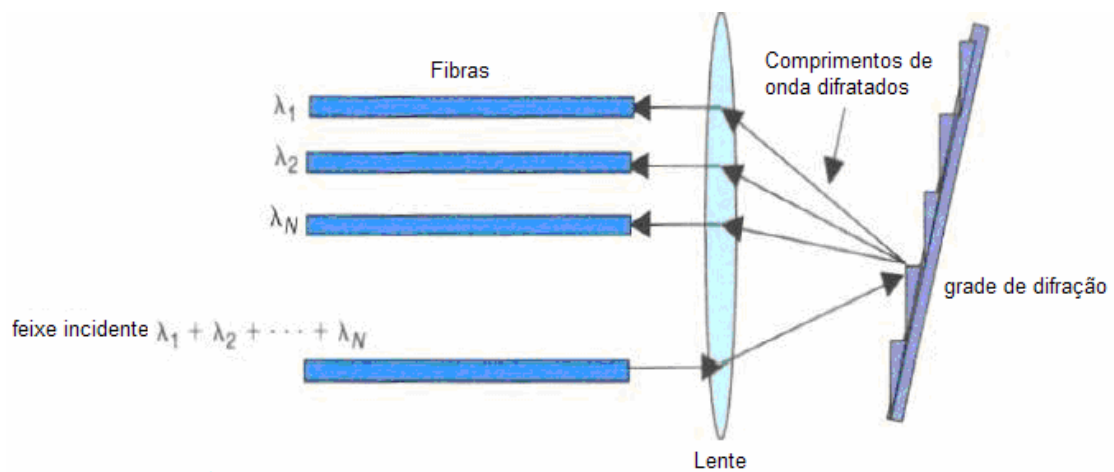


Figura 19 - Demultiplexação via grade de difração

Um outro modo de multiplexagem é através das grades de guias de ondas (AWGs - Arrayed WaveGuide). Os AWGs são dispositivos que também se baseiam nos princípios da difração e consistem numa matriz de canais curvados com uma diferença fixa no caminho entre canais adjacentes, assim como ilustra a Figura 20. Os AWGs são conectados aos terminais de entrada e saída. Ao incidir no terminal de entrada, a luz é difratada e entra na matriz de guia de ondas. Nessa matriz a diferença de comprimento óptico de cada guia de onda produz uma diferença de fase no terminal de saída. Isso resulta em diferentes comprimentos de onda possuindo máximos de interferência em lugares diferentes, que correspondem às portas de saídas.

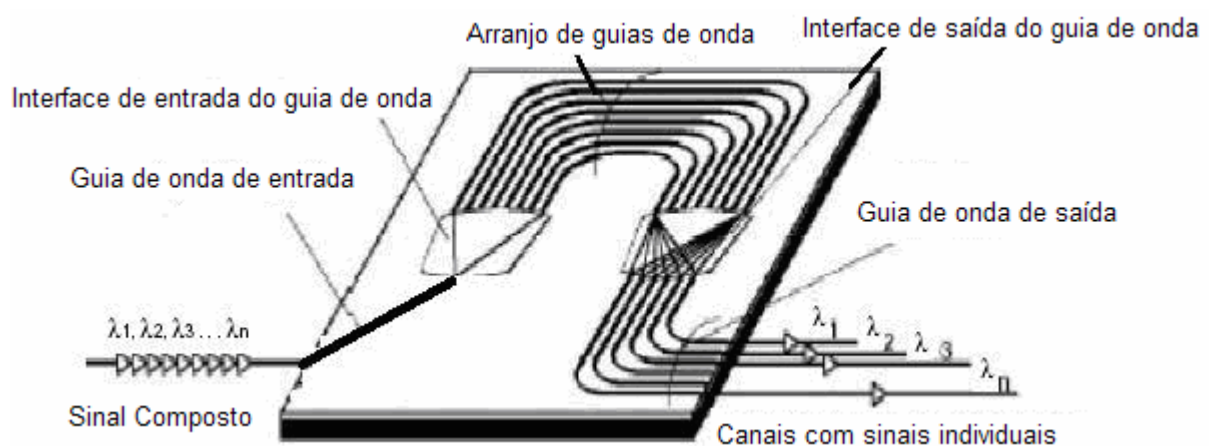


Figura 20 – Multiplexação via AWG

Por volta de 1980, foram apresentados vários Sistemas WDM experimentais, os quais operavam com grandes espaçamentos entre os comprimentos de onda. Inicialmente, devido à falta de tecnologia existente nesta época, tanto para as fibras ópticas, como para dispositivos ópticos como lasers; estes sistemas WDM funcionavam no em torno de 850 nm, na chamada 1.^a Janela, utilizada para fibras ópticas multimodo.

Nesta ocasião os valores, dos coeficientes de atenuação, no em torno desta janela, eram na faixa de - 2,0 á - 2,5 dB/km.

Posteriormente, com a disponibilidade das fibras ópticas monomodo, os sistemas WDM passaram a operar no em torno de 1310 nm, região esta chamada de 2.^a janela.

Porém, como podemos ver na Figura 21, os coeficientes de atenuação que se encontravam em 1.310 nm, eram da ordem de - 0,3 á - 0,4 dB/km, ao passo que, os coeficientes de atenuação em 1.550 nm, eram aproximadamente de - 0,17 á - 0,25 dB/km, praticamente a metade.

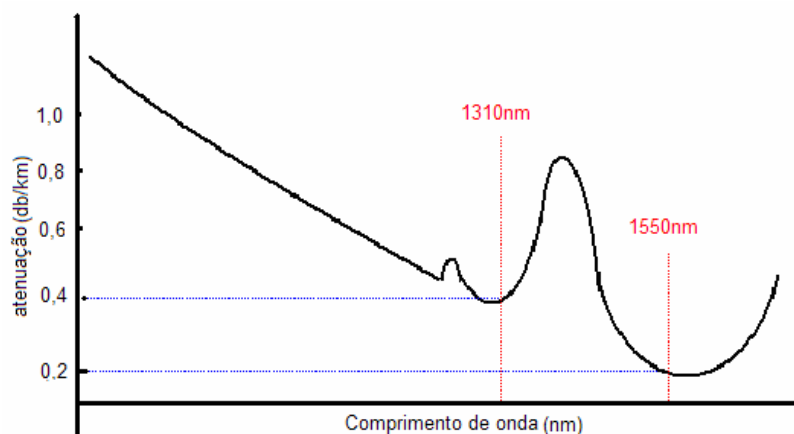


Figura 21- Atenuações a 1310 e 1550nm.

A redução dos coeficientes de atenuação implica em várias vantagens, como por exemplo, a de que com menores potências podemos atingir distâncias mais longas.

Sendo assim, houve um esforço, no intuito de se desenvolver Sistemas WDM que operassem no entorno de 1.550 nm, Região esta, chamada de 3.^a Janela, ou Banda C, que ocupa a Região do Espectro compreendida entre 1.530 nm á 1.565 nm, como ilustra a Figura 222, abaixo.

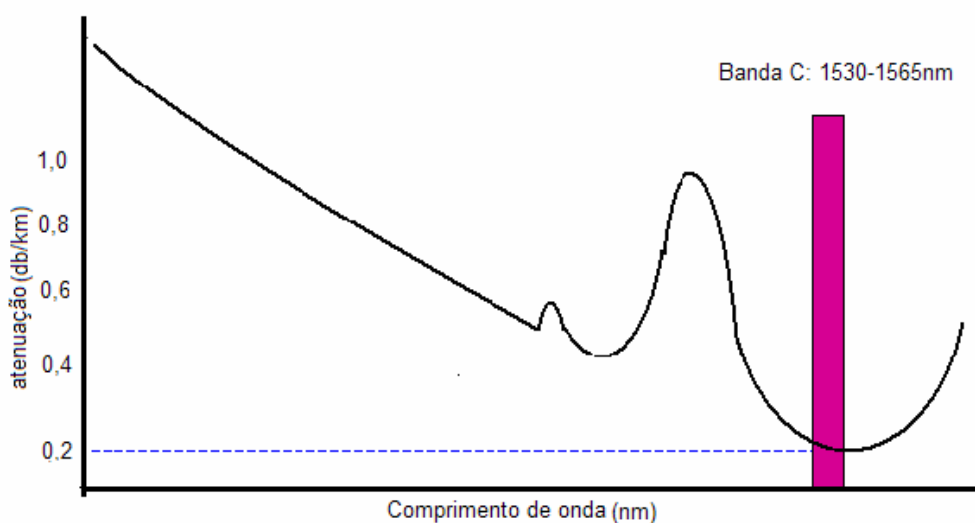


Figura 22 – Banda C

Em 1.990 surgiu a segunda geração experimental de Sistemas WDM, que já operavam na Região de 1.550 nm e, possibilitavam Transmissão Unidirecional de 4 e, até de 8 Canais ou Comprimentos de Onda, com amplo espaçamento entre eles.

Com a evolução das tecnologias, este espaçamento foi sendo reduzido de 1.000 GHz para 600 GHz, 400 GHz, 200 GHz e, 100 GHz.

Os sistemas WDM, com espaçamentos inferiores á 100 GHz, são considerados como Sistemas DWDM (Dense Wavelength Division Multiplex).

A ITU - T, para possibilitar a padronização, entre equipamentos de diferentes fabricantes, definiu para a Banda C, Frequências Centrais para Espaçamentos de 100 GHz e 50 GHz iniciando em 1.528,77 nm e terminando em 1.560,61 nm.

Na região de 1550nm, o ITU-T propôs uma banda de guarda de 0,8 nm ou 100 GHz e a grade é centrada em torno de 1552, 52 nm ou 193, 1 THz. Esta grade está ilustrada na Tab.

Channel code	λ (nm)	Channel code	λ (nm)	Channel code	λ (nm)	Channel code	λ (nm)
18	1563.05	30	1553.33	42	1543.73	54	1534.25
19	1562.23	31	1552.53	43	1542.94	55	1533.47
20	1561.42	32	1551.72	44	1542.14	56	1532.68
21	1560.61	33	1550.12	45	1541.35	57	1531.90
22	1559.80	34	1550.12	46	1540.56	58	1531.12
23	1558.98	35	1549.32	47	1539.77	59	1530.33
24	1558.17	36	1548.52	48	1538.98	60	1529.55
25	1557.36	37	1547.72	49	1538.19	61	1528.77
26	1556.56	38	1546.92	50	1537.40	62	1527.99
27	1555.75	39	1546.12	51	1536.61	–	–
28	1554.94	40	1545.32	52	1535.82	–	–
29	1554.13	41	1544.53	53	1535.04	–	–

Para um melhor aproveitamento, da Região do Espectro que apresentava baixos coeficientes de Atenuação, foi criada a **Banda L** ou **4.^a Janela** como mostra a Figura 23.

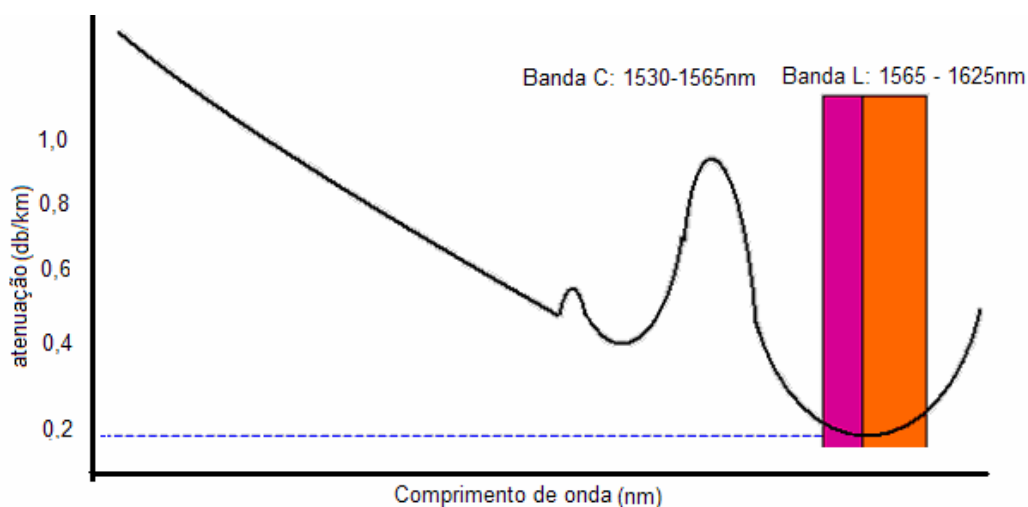


Figura 23 – Banda L

Posteriormente o Grupo de Estudos N.º 15 denominado: *Transport Network Systems and Equipment* da **ITU - T**, normalizou, para permitir não só um padrão, mas principalmente para assegurar interconexões com equipamentos de diferentes fabricantes, uma grade baseada em uma Frequência de referência estabelecida em 193.100 GHz, com espaçamentos de 100GHz, 50 GHz, 25 GHz e, 12,5 GHz que se estendia até o fim da 4.^a Janela ou Banda L, em 1.624,89 GHz.

Um grande avanço, que contribuiu para o aumento da relação custo / benefício, foi a introdução de Fibras Ópticas, com uma nova tecnologia que, não apresentavam o indesejável fenômeno da **Atenuação por Íons Oxidrila**, como ilustrado na Figura 24.

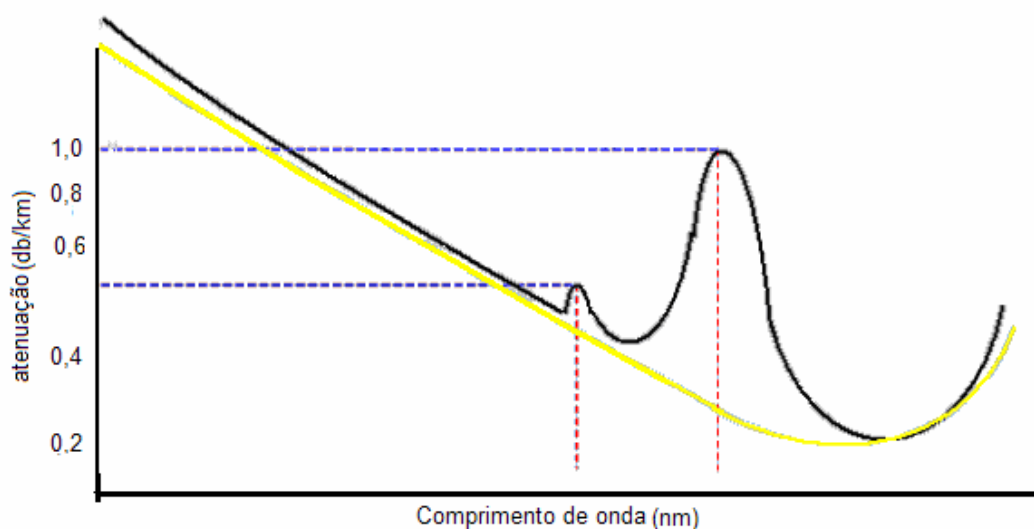


Figura 24 Curva característica de uma fibra monomodo sem a atenuação causada pelos íons oxidrila, comparada com uma fibra óptica monomodo convencional.

O Grupo de Estudos anteriormente citado normalizou uma divisão, em Bandas para todo o Espectro Fotônico, a qual encontra se na Tabela 1, abaixo:

BANDA	Significado	Espectro Óptico	Largura da Banda
O	Original	1 . 260 a 1 . 360 nm	100 nm
S	Short	1 . 360 a 1 . 460 nm	100 nm
E	Expanded	1 . 460 a 1 . 530 nm	70 nm
C	Conventional	1 . 530 a 1 . 565 nm	35 nm
L	Long	1 . 565 a 1 . 625 nm	60 nm
U	Ultra Long	1 . 625 a 1 . 675 nm	50 nm

Tabela 1 – Janelas do espectro Óptico.

A Figura 25 nos mostra todo o potencial das Novas Fibras Ópticas que, não tem os picos de **Atenuação por Íons Oxidril** . A limitação da utilização de apenas uma ou duas Bandas, geralmente a Banda C e, ou a Banda L, não mais existem.

Este avanço permitiu que fosse possível o aproveitamento máximo da faixa de transmissão disponível na curva destas Novas Fibras Ópticas.

Portanto podemos ampliar os Sistemas DWDM não só em número de canais e, Taxa de Transmissão, mas agora também no numero de Bandas.

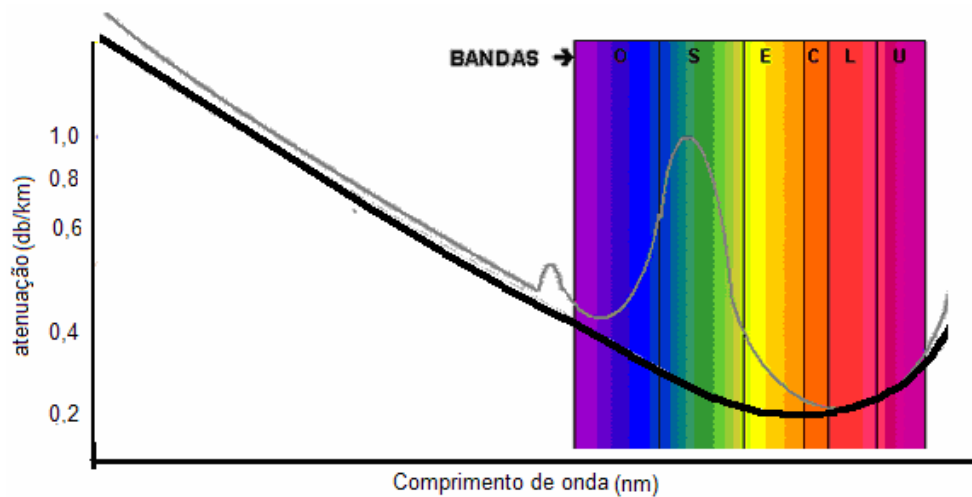


Figura 25 – Alocação de todas as bandas transmissão dentro das fibras

A tecnologia CWDM (*Coarse Wavelength Division Multiplexing*) apresenta um grande espaçamento entre canais, de 20 nm, no espectro que vai de 1.270 nm á 1.610 nm, permitindo atualmente, até 18 canais; é de baixo custo e de fácil fabricação, indicado preferencialmente para uso em Redes Metropolitanas e de Acesso.

A Figura 26 nos mostra a representação de um Sistema WDM, onde vários sinais ópticos de mesma intensidade, com espaçamento adequado e com comprimentos de onda altamente estáveis, são combinados em um dispositivo óptico passivo, denominado Multiplexador Óptico, ou Mux.Óptico, ou ainda simplesmente Mux.

Na outra extremidade da Fibra, um equipamento chamado Demultiplexador Óptico, ou Demux.Óptico, ou ainda simplesmente Demux.

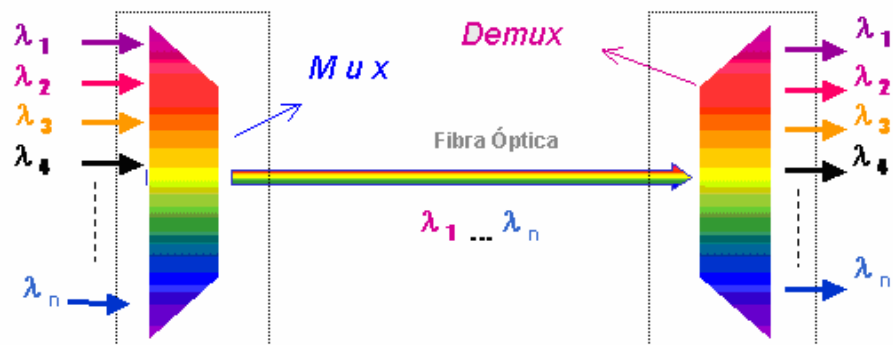


Figura 26 – Mux e demux.

6- Transponder

Na realidade é muito difícil obter comprimentos de onda entrantes em um Multiplexador Óptico, com sinais de mesma intensidade e, com espaçamento adequado entre eles.

Para resolver esta situação foi desenvolvido dentro do Sistema WDM um subsistema chamado de Transponder que se encontra de modo simplificado ilustrado na Figura 27, que tem por finalidade uniformizar a intensidade e comprimentos de onda dos sinais ópticos recebidos e, impor um espaçamento adequado.

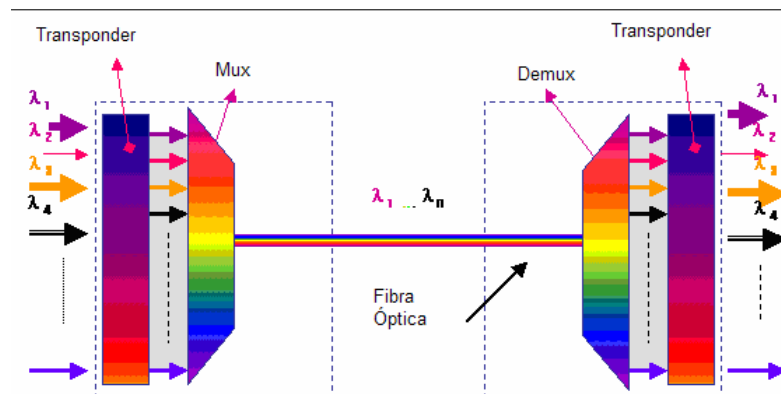


Figura 27 - transponder

Internacionalmente, os transponders, dependendo dos tipos das funções que internamente executam, como resumidamente encontra-se explicado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** abaixo, são designados como 1R, 2R e 3R.

TIPO	DESCRIÇÃO
1R	Do inglês: Re -amplification, termo usado para designar o transponder de um equipamento C/D/WDM, que executa somente a função de Re - amplificação.
2R	Do inglês: Re -amplification and Re -shaping, termo usado para designar o transponder de um equipamento C/D/WDM, que executa as funções de Re - amplificação e, de Re - Formatação (Shaping).
3R	Do inglês: Re -amplification, Re -shaping, and Re -timing, termo usado para designar o transponder de um equipamento C/D/WDM, que executa as funções de Re - amplificação, de Re - Formatação (Shaping) e, de Re - Temporização (Timing).

Tabela 2 – Tipos de transponders.

A figura 28 ilustra um sistema DWDM de 16 canais desenvolvido no CPqD e transferido para comercialização para a PadTec, AsGa e Digitel.

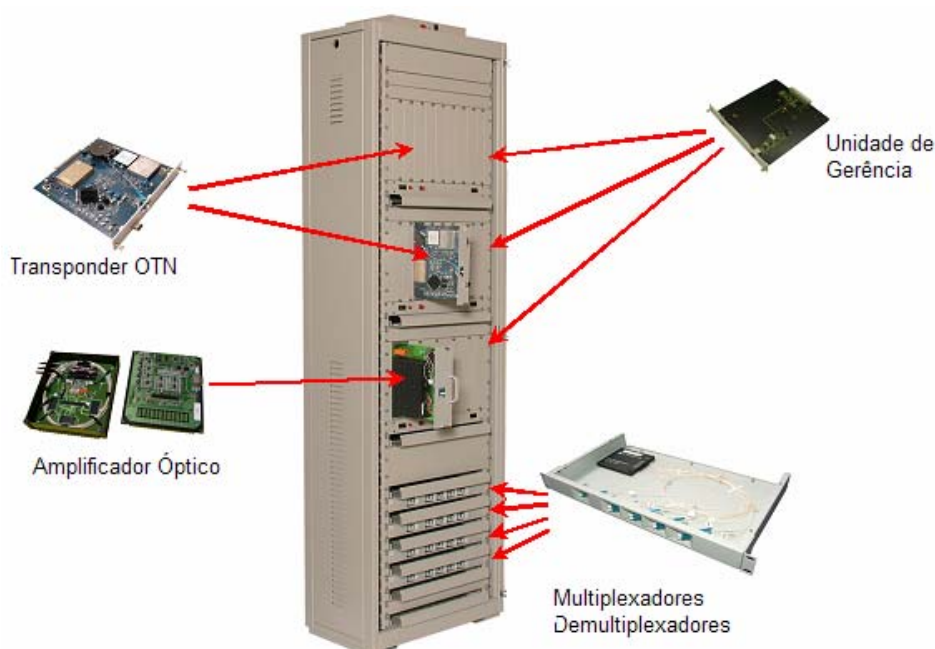


Figura 28- sistema DWDM de 16 canais.

7- OADM

No início, os sistemas DWDM em um enlace ponto a ponto, não podiam ser retirados ou adicionados ao longo deste enlace. Entretanto, em um curto espaço de tempo foram desenvolvidas novas técnicas denominadas OADM (do Inglês: *Optical Add and Drop*) permitindo que comprimentos de onda fossem retirados e, ou adicionados, em pontos ao longo de um enlace.

Estes primeiros sistemas eram do denominado tipo estático, isto é, os comprimentos de onda retirados e inseridos eram fixos. A Figura 29 nos ilustra um sistema DWDM, com um OADM deste tipo.



Figura 29 – OADM fixos.

Claro está, que este sistema, apesar de simples e, de custo relativamente baixo tem suas limitações ou sejam:

- No caso de se inserir ou derivar mais canais é necessária a presença de pessoal técnico no local onde será feita esta operação, para a colocação de módulos no equipamento, sendo que geralmente um modulo para cada Comprimento de Onda.
- Existe a necessidade de se ter em estoque todos estes módulos com os diferentes Comprimentos de Onda, utilizados no sistema, como partes de reposição.

Com o advento dos Diodos LASER's sintonizáveis, uma parte do problema acima descrito foi resolvido, pois não seria mais necessário ter em estoque, para fins de troca e reposição, unidades de *Add and Drop*, mas sim algumas unidades, que no caso de serem utilizadas, seriam sintonizadas em campo para o Comprimento de Onda desejado, como nos mostra a Figura 30.

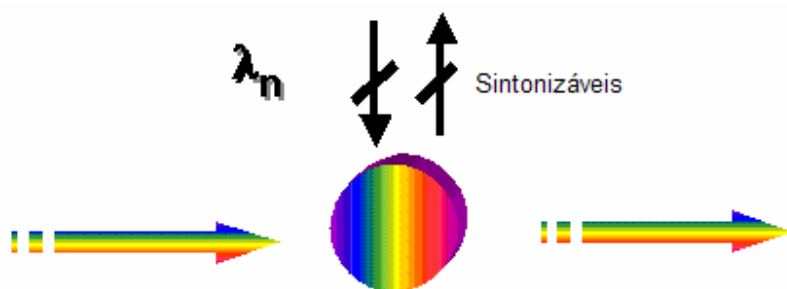


Figura 30 – OADM sintonizáveis.

Com o passar do tempo, alguns Fabricantes incorporaram em seus produtos a possibilidade de executar a inserção e retirada de Comprimentos de Onda, de forma remota, permitindo desta forma o chamado ROADM (do Inglês: *Reconfigurable Optical Add and Drop*) , ou seja, um OADM Reconfigurável.

Alguns equipamentos apresentam hoje, inclusive, a possibilidade da conversão de Comprimentos de Onda, característica esta extremamente desejável em Sistemas de Alta Complexidade, onde pode ocorrer o fenômeno indesejável, de dois Comprimentos de Onda iguais. A Figura 31 nos mostra a aplicação prática de um OADM, inserido em um Enlace.

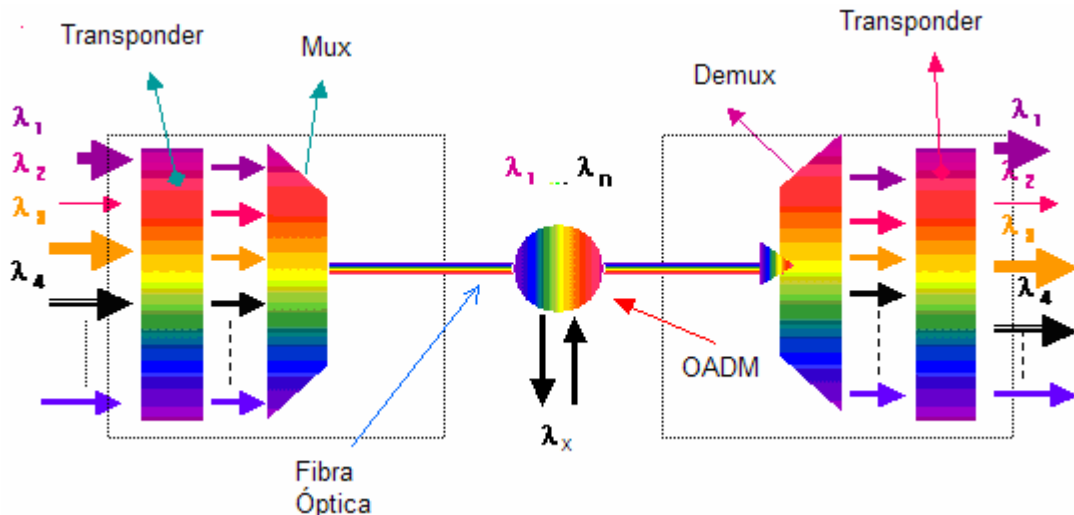


Figura 31 – Aplicação Prática OADM.

8- Optical Cross Connect

Outro elemento fundamental, a ser usado na arquitetura de uma Rede Totalmente Óptica (em inglês, *All Optical Network* : AON) é o chamado Optical Cross Connect, abreviado como OXC, ou seja, em uma tradução livre; Chave Óptica.

A Figura 32 ilustra o esquema de uma Chave Totalmente Óptica, que pode conectar qualquer Sinal Óptico, entre n portas de entrada e n portas de saída, não necessitando para isto, fazer conversão qualquer tipo de conversão Óptico - Elétrico - Óptico.

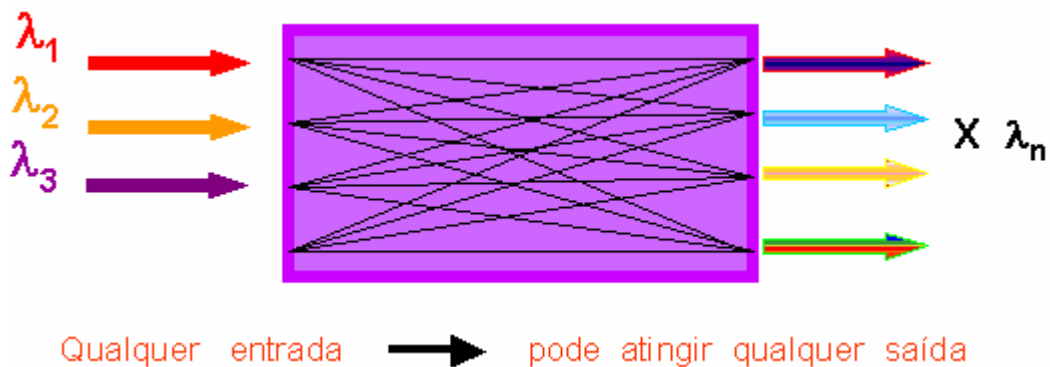


Figura 32- OXC - Optical cross-connect.

Redes de Comunicação Óptica

1- Introdução

Até aqui discutimos toda estrutura e princípios que regem as comunicações ópticas. Estávamos interessados em apresentar os conceitos associados aos fenômenos da luz. Eles incluem a geração de luz por LEDs e lasers que será guiada pela fibra, a eventual amplificação devido as perdas nas fibras, a multiplexação e demultiplexação dos comprimentos de onda através de elementos dispersivos (prismas) ou difrativos (grades de difração). E por fim essa luz será detectada e convertida em sinal elétrico novamente e assim a informação chega ao seu destinatário.

O transporte de informação por fibras ópticas apresentou evoluções consideráveis nos últimos anos e nas próximas seções iremos apresentar a evolução das redes de comunicação óptica bem como seus processos de otimização, levando a uma relação custo benefício adequada e qualidade de transporte de informação.

2- Redes Ópticas

Uma rede óptica é composta por:

Rede Física: é o meio de transmissão que interliga os equipamentos ópticos, composto pelos cabos de fibra óptica.

Equipamentos: são os multiplexadores, “transponders”, amplificadores e equipamentos de cross-conexão ópticos de diversas capacidades que executam o transporte de informações.

Sistema de Gerência: é o sistema responsável pelo gerenciamento da rede, contendo as funcionalidades de supervisão e controle da rede, e de configuração de equipamentos e provisionamento de facilidades.

Esta rede permite o transporte e/ou o roteamento de sinais de voz, dados e vídeo entre diferentes sites.

Na primeira geração de redes ópticas, os equipamentos e as fibras eram utilizados apenas como meio de transmissão e, todas as operações de chaveamento, roteamento e processamento de mensagens ou bits, eram realizados eletronicamente. Os sistemas WDM eram acoplados aos equipamentos de transmissão visando um aumento de capacidade do sistema, como ilustra a Figura 1.

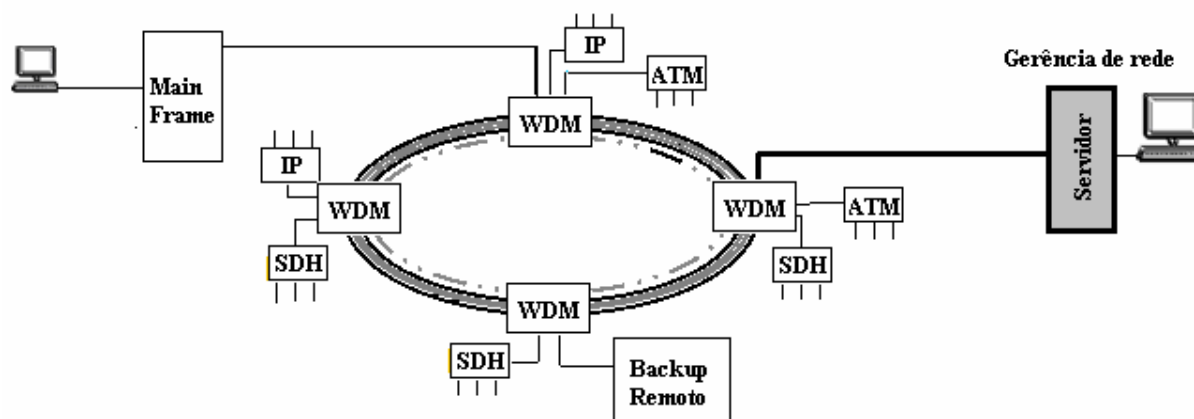


Figura 1 - sistemas WDM acoplados aos equipamentos de transmissão.

Nos últimos anos, pesquisas têm sido feitas com o intuito de mostrar que as redes ópticas podem oferecer mais do que apenas transmissão de dados. A rede poderia ganhar muito em desempenho se toda a parte de chaveamento e roteamento de mensagens, fosse realizada sem a utilização de eletrônica. Isto define a segunda geração de redes ópticas onde chaveamento e roteamento são feitos opticamente. Esta tecnologia depende do aprimoramento dos componentes ópticos. Neste curso nos limitaremos ao estudo das redes ópticas de primeira geração.

Neste caso, as redes ópticas fazem uso de equipamentos WDM para efetuar a Multiplexação Óptica visando compartilhar a mesma fibra com diversos sinais ópticos de diferentes comprimentos de onda, que são usualmente denominados de canais com “cores” distintas. A taxa de transmissão de cada canal pode variar de 2 Mbit/s (E1) até 10 Gbit/s (STM-64), dependendo da aplicação, sendo que a sua maior utilização ocorre nos sistemas que necessitam taxas de transmissão acima 155 Mbits/s (maior que STM-1).

Sua elevada flexibilidade para transportar diferentes tipos de hierarquias digitais permite oferecer interfaces compatíveis com as diversas aplicações existentes, entre elas as redes de transmissão PDH e SDH, as redes Multisserviços ATM, IP e Frame Relay, e aplicações específicas para redes de dados e de computadores de grande porte (Fast Ethernet, Gbit Ethernet, interfaces ESCON, FICON e Fiber-Channel, entre outras), **assim como ilustra a Figura.**

A tecnologia das redes WDM permite ainda implementar mecanismos ópticos de proteção nos equipamentos ou diretamente nas redes da camada de aplicação, oferecendo serviços com alta disponibilidade e efetiva segurança no transporte de informações.

As redes WDM oferecem vários benefícios, quando comparada com outras tecnologias:

- Permite utilizar equipamentos de aplicação para redes de transporte e multiserviços sobre a mesma infra-estrutura de meio físico óptico;
- Permite o tráfego de qualquer tecnologia, independente do fabricante;
- Permite a economia de equipamentos de aplicação ao longo das rotas, mediante a instalação destes apenas nos pontos de troca de tráfego;
- Permite a economia e até mesmo a otimização do uso de fibras ópticas em locais com alta densidade de redes e acessos.

As Redes WDM possuem algumas características importantes que devem ser levadas em consideração quando da elaboração de seus projetos. Abaixo são descritas as mais importantes.

- A energia luminosa presente nos diversos segmentos da rede WDM deve ser criteriosamente projetada, para garantir tanto a qualidade de serviço como a vida útil especificada para o sistema. Desta forma, o cálculo do balanço de potência representa um fator importante para o projeto de redes WDM.
- Para este cálculo torna-se importante ressaltar dois conceitos definidos para a rede WDM:
 1. "**Span**", que representa um trecho da rota física entre dois equipamentos WDM adjacentes na rede;
 2. **Enlace Óptico**, que representa uma rota completa da rede WDM.
- O balanço de potência é calculado levando-se em consideração os seguintes dados de projeto da rede WDM:
- Capacidade de Transmissão do Enlace Óptico;
- Número de comprimentos de onda (Lambdas), calculado em função da capacidade de transmissão;
- Tipo de Fibra Óptica a ser utilizada, considerando suas características de atenuação e dispersão cromática;
- Número de "span's" para cada Enlace Óptico;
- Atenuação de cada "span".

Como normalmente a capacidade de transmissão do Enlace Óptico, o tipo de fibra óptica e o número de comprimentos de onda (Lambdas) são prioritariamente definidos, cabe ao projetista trabalhar com o número de "spans" e a atenuação de cada "span" para garantir que o balanço de

potência, ou seja, a potência óptica disponível no Enlace permita que os diversos sinais transmitidos possam ter a qualidade esperada.

Fatores como atenuação e relação sinal /ruído do sinal óptico determinam os tipos de equipamentos WDM a serem usados para amplificar ou regenerar esse sinal.

Como as características dos equipamentos são completamente dependentes dos seus fornecedores, não existe uma padronização de projeto para a rede WDM. Os fatores a serem considerados são sempre os mesmos, mas o número de "spans" por enlace pode variar significativamente, dependendo do sistema adotado.

3- Exemplo de Projeto

As redes ópticas são utilizadas tanto em sistemas que compõem redes de Longa Distância com em rede Metropolitanas. A topologia típica dessas redes e o tipo de proteção utilizada são apresentados a seguir.

3.1 - Redes de Longa Distância

As redes de Longa Distância podem ter as seguintes topologias:

- **Ponto a ponto:** é composta por enlaces ópticos simples de grande distância, hoje superior a 500 km, divididos em trechos (ou span's) de aproximadamente 100km. Cada enlace é composto por Terminais nas duas pontas, amplificadores ópticos e OADM's (Optical Add/Drop) nas estações intermediárias.

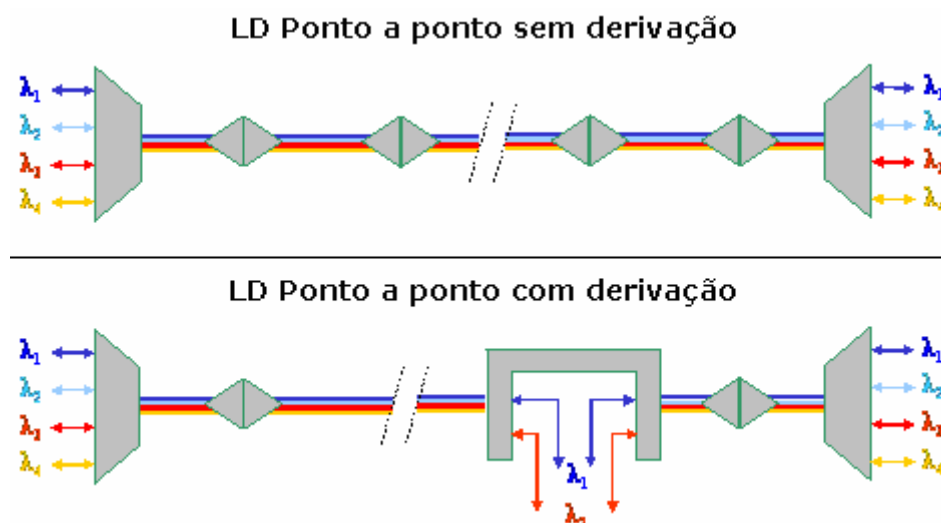


Figura 2 Topologia ponto a ponto.

- **Anel:** é composta por vários enlaces ponto a ponto, com ou sem a utilização de OADM's, sendo os anéis formados pela camada de aplicação, normalmente com uso de equipamentos SDH. Atualmente existem também alguns fornecedores que já possuem Terminais com a capacidade de realizar o chaveamento óptico do sinal de entrada para duas saídas distintas, permitindo a construção da topologia de rede física em anel usando apenas a rede WDM.

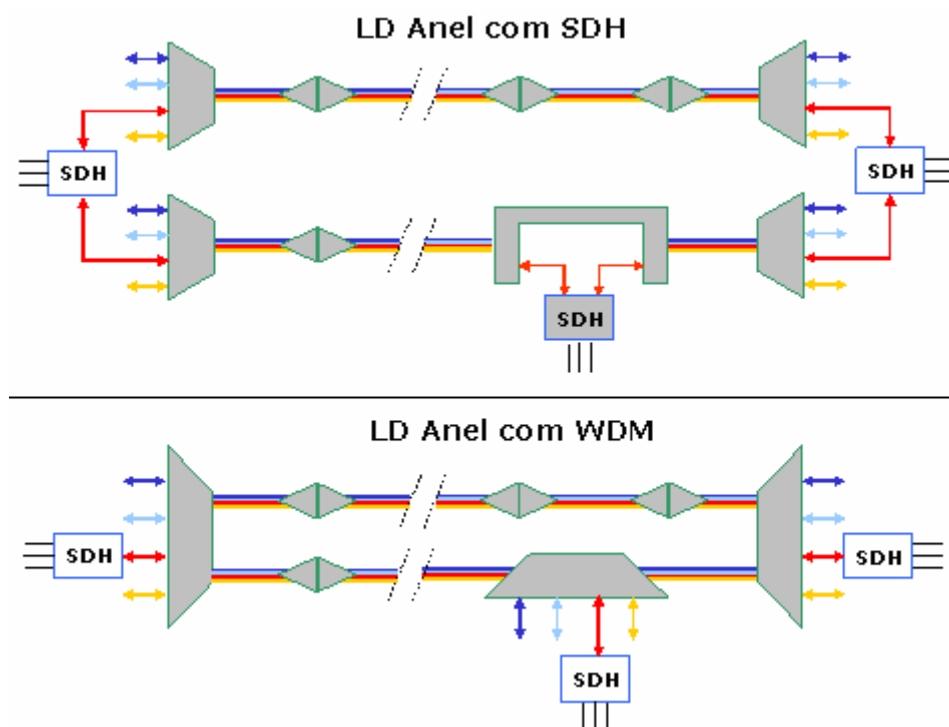


Figura 3 – Topologia Anel.

Quando as distâncias entre os pontos de interesse de tráfego são muito grandes, existe a necessidade de regeneração de todos os comprimentos de onda (Lambdas) em uma estação intermediária. Desta forma, torna-se necessário aplicar um sistema chamado de duplo terminal, onde uma seção do equipamento finaliza o enlace entrante e a outra seção do equipamento inicia o enlace saindo. Tudo se passa como se fossem colocados dois enlaces WDM ponto a ponto em série, sendo que se não houver a necessidade de troca de tráfego na camada de aplicação nessa estação, não será necessário instalar nenhum equipamento para extração / inserção de Lambdas, sendo possível utilizar somente os transponders regenerativos.

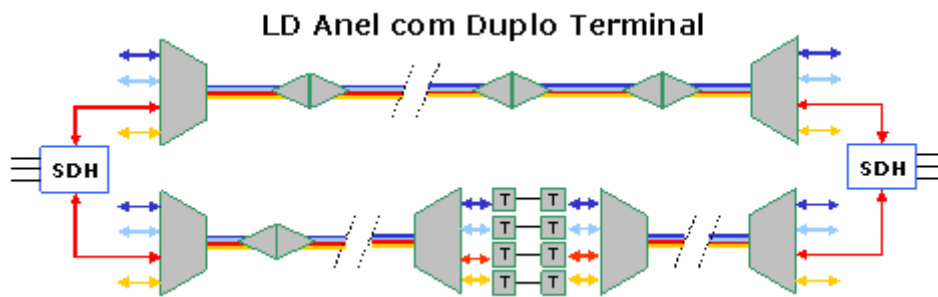


Figura 4

3.2 - Redes Metropolitanas

As redes Metropolitanas podem ter as seguintes topologias:

- **Ponto a ponto:** é composta por enlaces simples de curta distância, geralmente sem a necessidade de uso de amplificadores entre equipamentos terminais. Normalmente esta topologia é utilizada em situações onde há falta de fibras ópticas e excesso de enlaces entre os dois pontos em questão. A proteção, quando existe, é realizada pela camada de aplicação.

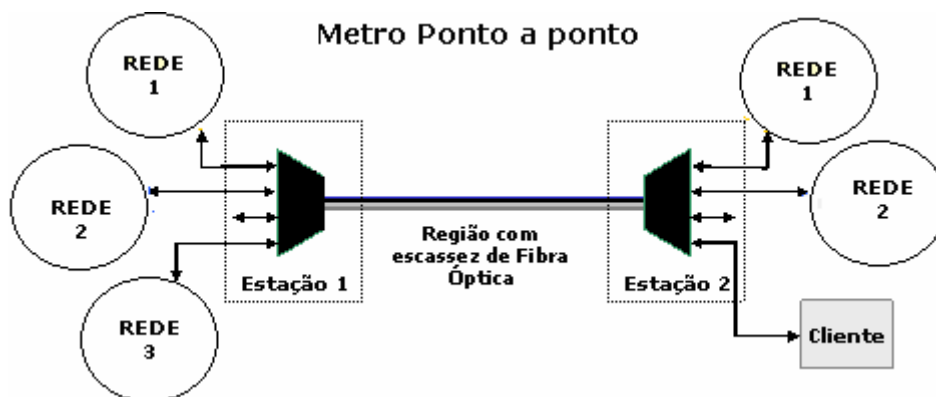


Figura 5 – Topologia ponto a ponto de uma rede metropolitana.

- **Anel:** Podem ser constituídos de duas formas:

A mais antiga foi a utilização de equipamentos "Long Haul" com amplificadores de menor potência em vários enlaces ponto a ponto, sendo os anéis formados pela camada de aplicação, normalmente com uso de equipamentos SDH.

A segunda forma utiliza equipamentos mais modernos projetados para esta finalidade, que permitem proteção através da própria rede WDM, sendo flexíveis quanto a permissão para que um determinado comprimento de onda não seja extraído em uma estação, minimizando de forma substancial o número de equipamentos envolvidos, e conseqüentemente o investimento aplicado.

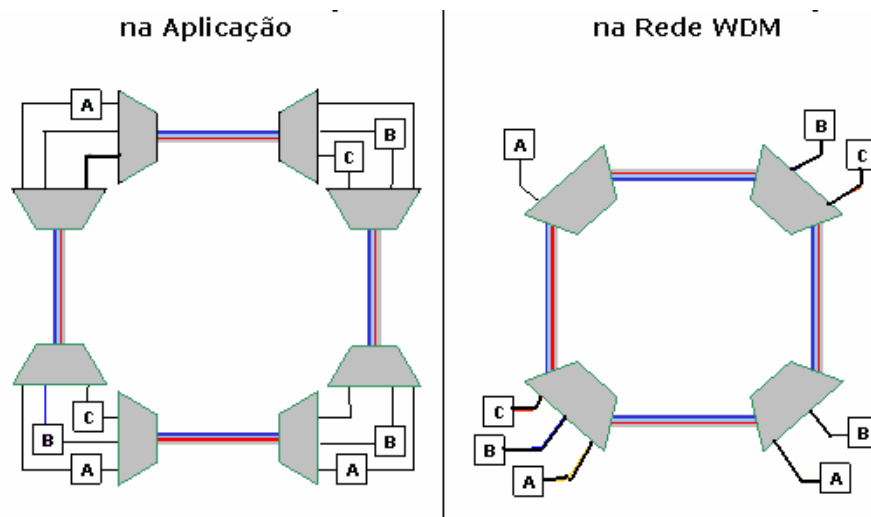


Figura 6

As redes ópticas, em seus diversos tipos, possuem aplicações tanto nas redes de Longa Distância, como nas redes Metropolitanas, conforme apresentado nos exemplos a seguir.

4- Longa Distância ("Long Haul")

As redes ópticas de Longa Distância (LH) são usadas para interligar cidades, grupos de cidades (regiões) ou estados, ao longo de um mesmo país, ou para interligar países, por terra ou mar.

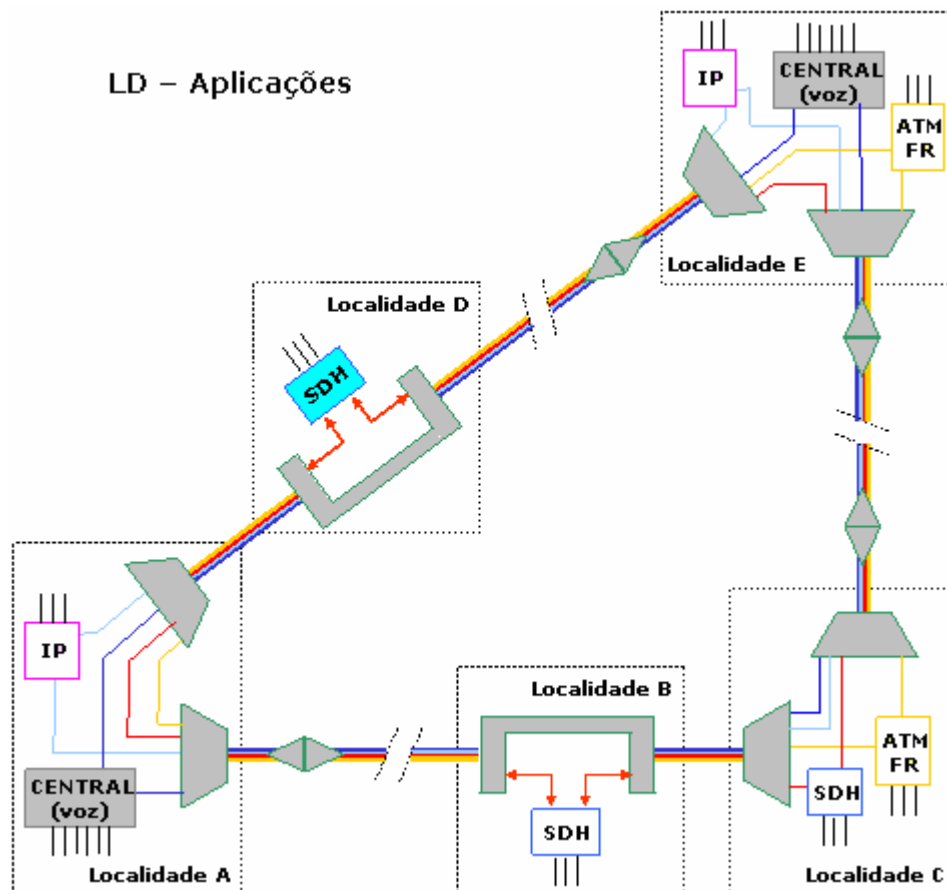
Elas são utilizadas nos seguintes tipos de aplicações:

- Meio físico para redes de Transporte, baseadas nas tecnologias PDH e SDH;
- Meio físico para redes Multisserviço, baseadas nas tecnologias ATM, Frame Relay e IP;
- Meio físico para interligação de Centrais Telefônicas para serviços de Voz de Longa Distância;
- Meio físico para interligação de equipamentos "Cross-connect" para redes de Transporte com alto grau de proteção automática.

Essas redes WDM possuem as seguintes características:

- Grandes distâncias físicas entre equipamentos, demandando cabeças ópticas de maior potência ("Long Haul") e / ou amplificadores ópticos (ILA) / elétricos (Terminais) para regenerar o sinal transmitido;

- Uso de equipamentos de derivação óptica (OADM), para extrair ou inserir poucos comprimentos de onda para tráfego local para uma determinada cidade ou região;
- Uso de proteção na camada de aplicação, através dos mecanismos existentes nas redes de transporte ou multiserviço e, mais recentemente, com opção de proteção na camada óptica (WDM).



5- Metropolitanas ("Metro")

As redes ópticas Metro são utilizadas para interligar Pontos de Presença (PoP's) concentradores de operadoras de serviços de Telecomunicações em uma determinada região metropolitana.

Elas são usadas nos seguintes tipos de aplicações:

- Meio físico para redes de Transporte Metro, baseadas nas tecnologias PDH e SDH;
- Meio físico para redes Multisserviço Metro, baseadas nas tecnologias ATM, Frame Relay e IP;
- Meio físico para interligação de Centrais Telefônicas para serviços de Voz Local;
- Meio físico para interligação de equipamentos "Cross-connect" para redes de Transporte Metro com alto grau de proteção automática;

- Meio físico para interligação de CPD's, em conexões dedicadas ou compartilhadas, com interfaces dos tipos ESCON, FICON, Fast Ethernet, Gigabit Ethernet e Fiber Channel, entre outras.

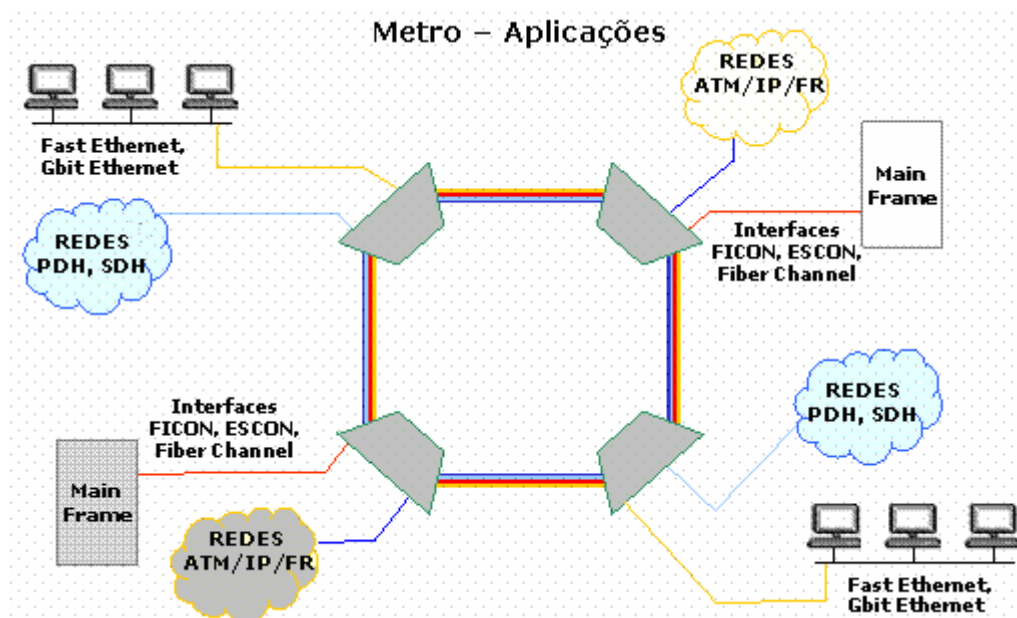
Essas redes possuem as seguintes características:

- Pequenas distâncias físicas entre equipamentos, demandando amplificadores ópticos de baixa potência.

Para os equipamentos de nova geração a camada de aplicação passa a ser inserida no próprio WDM através do uso de transponders que possuem interfaces dedicadas para esse tipo de serviço. Hoje existem transponders com interfaces Fast Ethernet, Gbit Ethernet, ESCON, FICON, Fiber Channel, e outros com interface óptica variável (STM-1 a STM-16), com a configuração de banda da porta executada de forma remota a partir do sistema de gerência.

Uso de equipamentos de derivação óptica, para extrair ou inserir poucos Lambdas (comprimentos de onda) definindo segmentos de rede com maior concentração de tráfego entre origem e destino.

Uso de proteção na camada de aplicação, através dos mecanismos existentes nas redes de transporte ou multisserviço e, mais recentemente, com opção de proteção na camada óptica (WDM).

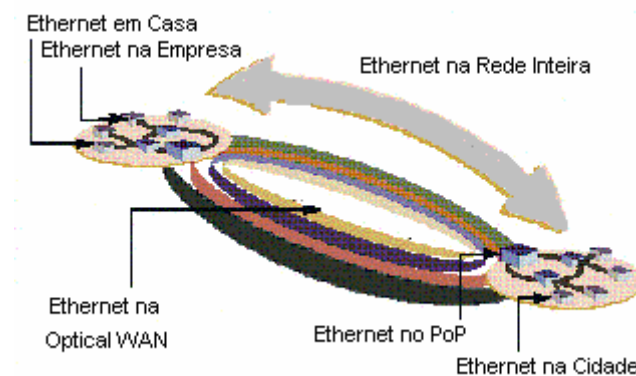


6- Ethernet Óptica

A Ethernet Óptica representa a combinação e a extensão de duas tecnologias existentes, a Ethernet e os Sistemas Ópticos. Esta união agrega o melhor de ambos e amplia suas

potencialidades para criar um novo paradigma que fundamentalmente muda a maneira que os provedores de serviços e as corporações planejam, controlam, e operam suas redes. É uma tecnologia que combina a onipresença, a flexibilidade e a simplicidade do Ethernet com a confiabilidade e a velocidade dos Sistemas Ópticos. Os atributos resultantes da Ethernet Óptica (simplicidade, velocidade, e confiabilidade) removem o estrangulamento da largura de faixa entre a LAN, a MAN e a WAN.

A Ethernet Óptica fornece também versatilidade à rede, o que vai de encontro às necessidades dos clientes. A Ethernet Óptica pode ser implementada em redes privadas ou públicas; pode ser configurada em topologias ponto-a-ponto, malha, ou anel; e pode ser utilizada para aplicações LAN, MAN e WAN. Se oferecida como um serviço gerenciado por um provedor de serviços ou operada como uma rede privada pela corporação, a Ethernet Óptica transforma a rede corporativa em uma vantagem competitiva importante como apresentado na figura.



A Ethernet atual veio de um longo caminho desde que foi primeiramente implementada nos anos 1970s, onde a Ethernet funcionou originalmente sobre um cabo coaxial espesso e forneceu aos usuários uma conexão compartilhada da largura de faixa de 10 Mbit/s.

A Ethernet logo progrediu e passou a funcionar sobre um par trançado metálico oferecendo conexões dedicadas de 10 Mbit/s usando comutação. Hoje, a Ethernet comutada permite conexões dedicadas de 100 Mbit/s ao computador com troncos de 1 Gbit/s e, dentro de alguns anos, os peritos da indústria predizem 1 Gbit/s ao computador com troncos de 10 Gbit/s.

Em aproximadamente trinta anos de existência, a Ethernet tornou-se onipresente; uma tecnologia plug and play amplamente padronizada, que é usada em mais de noventa por cento das redes locais (LANs) corporativas que utilizamos. A Ethernet alcançou este nível de aceitação porque é simples de usar, barata, e provou seu valor.

A Ethernet Óptica, entretanto, é mais do que apenas a Ethernet mais os Sistemas Ópticos. Os participantes dos padrões da indústria assim como os fabricantes têm desenvolvido soluções de Ethernet Óptica específicas que são mais do que meramente transportar Ethernet sobre Sistemas Ópticos. Em consequência, a Ethernet Óptica redefine o desempenho e a economia de ambos, o provedor de serviços e as redes corporativas em diversas maneiras.

Atributo Chave de Rede	Redes Atuais	Ethernet Óptica
Complexidade	Maior, múltiplos protocolos da LAN para WAN	Menor, Ethernet da LAN para WAN
Largura de faixa de acesso	Fracionada E1s E3s E4s Dias para provisionar	Até 10 Gbit/s, 2 Mbit/s a qualquer instante Horas para provisionar
Desempenho	Maior latência Maior jitter	Desempenho fim-a-fim da LAN
Pessoal Técnico	Especialistas de rede para cada protocolo	Generalistas de rede

A Ethernet Óptica simplifica a rede. Como uma tecnologia sem conexão de camada 2, a Ethernet Óptica remove as complexidades de endereçamento da rede e outros problemas de complexidade da rede, tais como os existentes com as redes baseadas em Frame Relay (FR) e em Asynchronous Transfer Mode (ATM) .

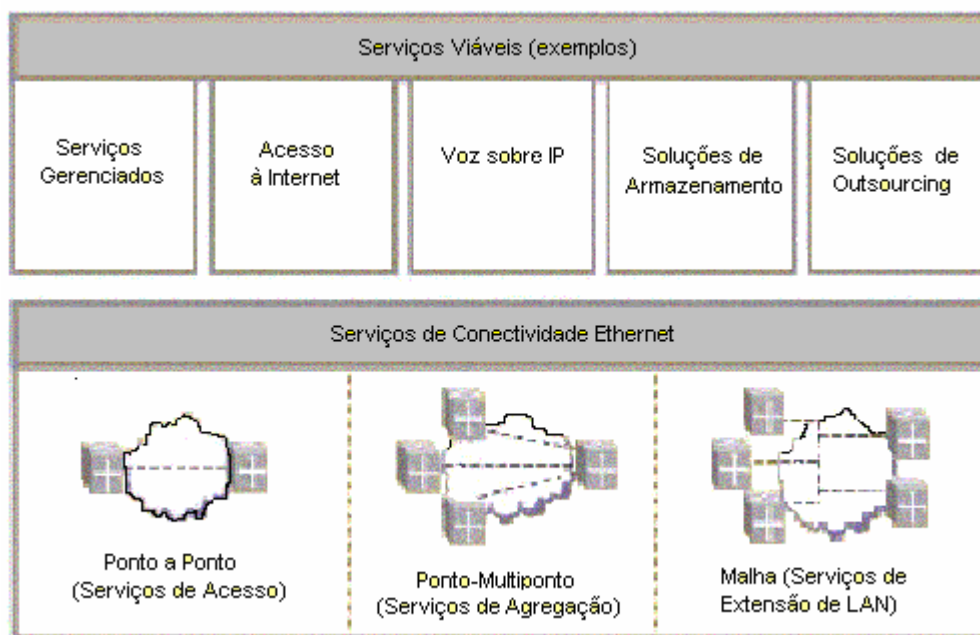
Também, a Ethernet Óptica remove a necessidade de múltiplas conversões de protocolos e simplifica a gerência - porque é Ethernet fim-a-fim. As múltiplas conversões de protocolos também impedem o bom desempenho da rede introduzindo a latência e o jitter na rede. A latência e o jitter são dois atributos importantes que descrevem o prognóstico e o atraso em uma rede e determinam quais serviços e aplicações podem ser oferecidas eficazmente.

A simplicidade da rede Ethernet Óptica também se estende para o provisionamento e a reconfiguração da rede. Não mais por muito tempo os negócios têm que esperar dias por nE1s adicionais ou gastar tempo reconfigurando a rede cada vez que uma mudança seja feita. A largura de faixa da Ethernet Óptica pode ser aumentada ou diminuída sem um atendimento técnico e permite mudanças da rede sem reconfigurar cada elemento da rede.

Além da simplicidade, a velocidade é um atributo chave da Ethernet Óptica. Com a Ethernet Óptica o estrangulamento da largura de faixa é eliminado. A conectividade da Ethernet Óptica permite velocidades de acesso de até 10 Gbit/s (gigabits-por-segundo), ordem de grandeza bem superior que os nE3s atuais. A largura de faixa também está disponível em fatias mais granulares. Não mais por muito tempo os funcionários das equipes da Tecnologia de Informação (TI) serão forçados a saltar de um E1 a um E3 (2 Mbit/s a 34 Mbit/s) quando tudo que necessitam realmente é um outro E1 de largura de faixa. Os enlaces de acesso Optical Ethernet podem ser aumentados/diminuídos em incrementos/decrementos de 2 Mbit/s para fornecer a largura de faixa de 2 Mbit/s até 10 Gbit/s ou qualquer valor intermediário.

Além disso, as topologias da Ethernet Óptica permitem uma maior confiabilidade do que as redes de acesso atuais podem fornecer. Por exemplo, os seguintes tipos de soluções de Ethernet Óptica: Ethernet sobre SDH (Synchronous Digital Hierarchy), Ethernet sobre DWDM (Dense Wave Division Multiplex) e Ethernet sobre RPR (Resilient Packet Ring) fornecem a recuperação do tráfego em menos de 50 mili-segundos no evento de uma falha catastrófica, tal como uma interrupção do enlace óptico. Esta disponibilidade elevada garante um tempo superior nas redes que fornecem aplicações de missão crítica.

Finalmente, a Ethernet Óptica é significativamente mais barata do que as redes atuais. As economias de custos podem ser vistas em ambos, as economias de custos operacionais e investimentos. O instituto Merrill Lynch, de fato, estima economias de custos de aproximadamente 4:1 para o Gigabit Ethernet contra o ATM (Asynchronous Transfer Mode). Um exemplo simples das economias da infraestrutura vem do fato que as placas de interface Ethernet custam uma fração das placas de interface ATM.



As soluções que utilizam a Ethernet Óptica fornecem e permitem um número extraordinário de novos serviços e aplicações. Estes serviços geralmente são classificados em duas categorias: serviços tipo conectividade Ethernet e serviços viáveis.

Os serviços tipo conectividade Ethernet incluem serviços básicos de Ethernet tais como serviços de linha privativa e acesso Ethernet, agregação e transporte Ethernet, e extensão de LAN.

Adicionalmente, a Ethernet Óptica possibilita uma segunda categoria de serviços e aplicações geralmente chamados serviços "viáveis". Os exemplos destes serviços e aplicações incluem serviços gerenciados (hospedagem de aplicações, desastre/recuperação e soluções de armazenamento) e aplicações específicas da indústria (gerência da cadeia de suprimento, gerência do relacionamento com o Cliente, baseadas em transações e aplicações de comércio eletrônico).

Estes serviços "viáveis" podem incluir qualquer aplicação ou serviço que requer um alto nível de desempenho da rede. Por exemplo, voz sobre IP é uma aplicação idealmente apropriada para o Optical Ethernet pois requer baixos níveis de latência e jitter da rede. Os serviços de armazenamento e desastre/recuperação são outros exemplos de serviços que requerem o desempenho da rede Optical Ethernet. Estes serviços, ambos requerem o desempenho em

“tempo-real” da rede fim-a-fim, a disponibilidade abundante da largura de faixa, e os mais altos níveis de confiabilidade e segurança da rede.

Adotar a Ethernet Óptica nas suas redes permitirá as operadoras, aos provedores de serviços e as empresas escolherem uma variedade de novos serviços especializados que podem ser rapidamente fornecidos, facilmente provisionados, e mantidos remotamente pelas operadoras, pelos provedores de serviços ou pelas próprias empresas.

As vantagens provenientes dos novos serviços com a Ethernet Óptica são:

- Simplicidade (transparência fim-a-fim),
- Velocidade (2Mbit/s até 10Gbit/s), e
- Confiabilidade (proteções das redes ópticas).

A Ethernet Óptica fornece a conectividade necessária para permitir aplicações e serviços inovadores que ajudam a maximizar a lucratividade da empresa.

As empresas poderão implementar ou contratar uma nova série de serviços que incluem os seguintes exemplos:

Serviços de conectividade Ethernet: linha alugada Ethernet, Virtual Private Ethernet (VPE), acesso à Internet, acesso ao Internet Data Center (IDC), etc.

Serviços viáveis: recuperação centralizada de desastre/armazenamento, outsourcing de rede, consolidação de aplicação, voz sobre IP, etc.

7- Ethernet 10 e 100 Mbit/s

A evolução da Ethernet do centro de pesquisas de Xerox em Palo Alto a 10 Mbit/s e então a 100 Mbit/s levou aproximadamente 20 anos para acontecer. Esta progressão lenta foi em parte devido às velocidades computacionais menores que não conseguiam atingir o ritmo do primeiro padrão aprovado, a Ethernet a 10 Mbit/s. Isto colocou o estrangulamento da transmissão no computador e não na rede.

Quando o IEEE concordou com a necessidade para 100 Mbit/s, o padrão oficial requereu somente 2,5 anos de desenvolvimento. Os anos 1990s mostraram um crescimento incrível na velocidade da tecnologia do PC e, então com o advento do Fast Ethernet (100 Mbit/s), o

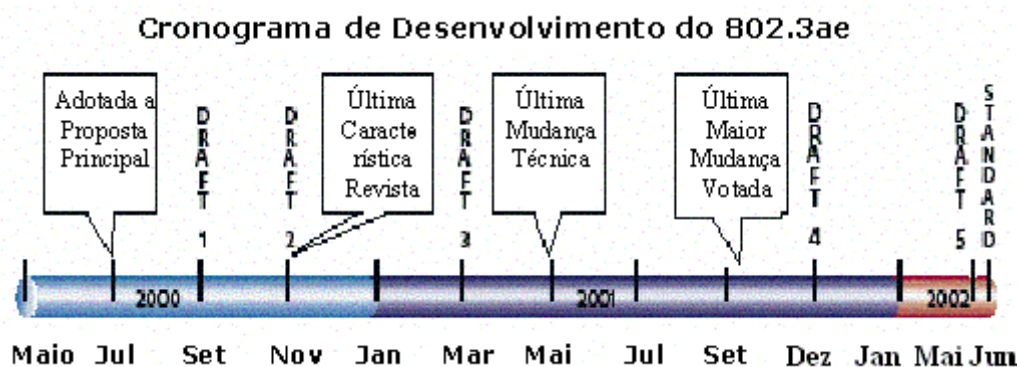
estrangulamento da transmissão moveu-se da unidade central de processamento (CPU) para a rede.

8- Gigabit Ethernet

O Gigabit Ethernet (GE) foi mencionado inicialmente em novembro de 1995 e foi um padrão inteiramente ratificado em menos de três anos mais tarde. Embora isto movesse o estrangulamento da transmissão para o computador, não demorou muito tempo para o PC alcançá-lo, e outra vez, novamente o mercado viu a necessidade por redes mais rápidas. Este ritmo rápido de desenvolvimento e de adoção para as tecnologias de computação e de rede pavimentaram o caminho para que os produtos 10 GE (pré-padrão) fossem fabricados muito tempo antes que o padrão estivesse ratificado inteiramente em junho de 2002 .

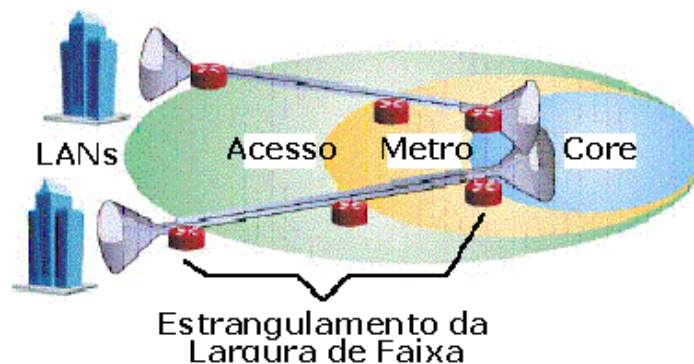
9- 10 Gigabit Ethernet ou Ethernet Óptica

Em junho de 1998, a força de trabalho do IEEE 802.3z finalizou e aprovou formalmente o padrão Gigabit Ethernet. Menos que um ano mais tarde, em março de 1999, o grupo de estudo de mais alta velocidade (HSSG) realizou uma "chamada para discussão" para o 10 GE com 140 participantes, representando pelo menos 55 companhias. O grupo HSSG determinou que havia ampla necessidade para a próxima velocidade mais alta da Ethernet baseada em um crescimento rápido da rede e do tráfego da Internet e em uma forte pressão para soluções de 10 Gbit/s, tais como a agregação do GE, os canais da fibra óptica, os roteadores de terabit, e as interfaces de próxima-geração (NGN I/O). Possivelmente, a razão mais convincente que o grupo HSSG recomendou ao IEEE, a adoção de um padrão de 10 GE foi o seu desejo de evitar a proliferação de Usuários não padronizados, e conseqüentemente, provavelmente soluções não interoperáveis.



Conseqüentemente, em janeiro de 2000, o Conselho de Padronização do IEEE aprovou um pedido de autorização de projeto para o 10 GE, e a força de trabalho do IEEE 802.3ae começou imediatamente o trabalho com o seguinte propósito: O compromisso para este novo desenvolvimento aumentou consideravelmente, e então mais de 225 participantes, representando pelo menos 100 companhias, foram envolvidos neste esforço técnico.

De fato, um progresso incrível foi feito com o draft inicial do padrão que foi liberado em setembro de 2000 e o draft 2.0 foi liberado em novembro de 2000. Estes primeiros drafts representaram um marco significativo no processo de desenvolvimento, desde as versões mais pesadamente debatidas, a camada física (PHY) e suas interfaces dependentes dos meios físicos (PMD), foram concordadas e definidas. O processo de desenvolvimento do IEEE 802.3ae foi realizado com sucesso e alcançou seu objetivo de ser um padrão ratificado em junho de 2002



A Ethernet Óptica fornece hoje o que poderia somente ser imaginado antes. Muda fundamentalmente a maneira que as redes estão sendo projetadas, construídas, e operadas criando uma solução nova de interligação que estende os limites do ambiente LAN para abranger a MAN e a WAN.

A Ethernet Óptica fornece um trajeto de transmissão transparente permitindo que os provedores de serviços aumentem seu faturamento e diminuam os custos enquanto continuam a suportar os serviços legados.

A Ethernet Óptica permite que as corporações ganhem a vantagem competitiva de suas redes reduzindo seus custos, fornecendo informação mais rápida, aumentando a produtividade dos empregados e melhorando a utilização dos recursos.

A revolução vinda da Ethernet Óptica será limitada somente por nossas imaginações, fornecendo em uma única solução, uma rede mais rápida, simples, e confiável.