

## 2. Aspectos Teóricos

### 2.1. Fontes Laser

LASER, é o acrônimo para Luz Amplificada pela Emissão Estimulada de Radiação, cunhado em 1957 pelo cientista americano Gordon Gould [18].

O efeito LASER é o resultado de três processos chaves: absorção, emissão espontânea e emissão estimulada de fótons. Estes processos são representados pelo diagrama de níveis de energia na Figura 2.1, onde  $E_1$  é o estado fundamental e  $E_2$  o estado excitado dos átomos do meio, formando um meio de absorção entre eles. De acordo com a lei de Planck, uma transição entre esses estados envolve a absorção ou emissão de um fóton de energia  $h_{12}=E_2-E_1$ . Quando um fóton, com energia aproximada à diferença  $h_{12}$ , incide sobre o meio, um elétron no estado  $E_1$  absorve a energia do fóton passando para o estado  $E_2$ . O elétron eventualmente retorna para seu estado fundamental emitido um fóton de energia  $h_{12}$  no processo.

A emissão de fótons pode ocorrer pela emissão espontânea ou pela emissão estimulada.

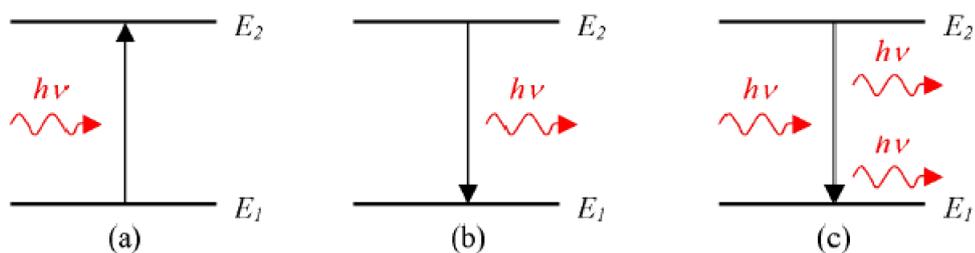


Figura 2.1 Três processos fundamentais ocorrendo entre dois níveis de energia em um átomo: (a) Absorção, (b) Emissão espontânea e (c) Emissão estimulada

No caso da emissão espontânea, os fótons são emitidos em direções aleatórias sem correlação de fase entre eles. A emissão estimulada se consegue incidindo um fóton de energia  $h_{12}$  enquanto o elétron está ainda no estado excitado. A principal característica de emissão estimulada é que os fótons

emitidos reproduzem os fótons originais não apenas na energia ou na frequência, mas em outras características, como na direção de propagação e fase.

Em equilíbrio térmico a densidade de estados excitados e não excitados (estado fundamental) estão relacionados de acordo com a distribuição Boltzman [1]:

$$N_2 / N_1 = \exp(-E_g / k_B T) \quad \text{Eq. 1}$$

onde  $E_g = E_2 - E_1$ . Neste caso a quantidade de elétrons excitados é muito pequena, de modo que a maioria dos fótons incidentes são absorvidos, por tanto a emissão estimulada é quase desprezível. A emissão estimulada será maior do que a absorção somente se a quantidade de estados excitados é maior do que os não excitados. Essa condição é chamada de "inversão de população". Já que a inversão de população não é uma condição de equilíbrio, a inversão é atingida usando técnicas de "bombeio". No caso de um LASER semiconductor, a inversão de população se consegue dentro da junção p-n a qual é chamada de Região Ativa [1]. Assim para formar uma região ativa o semiconductor tipo "p" e "n" devem ser fortemente dopados do forma que a separação do nível de Fermi seja maior do que  $E_g$ , sob polarização direta.

A radiação de um LASER semiconductor, como na maioria dos outros tipos de LASER, é gerada dentro de uma cavidade de Fabry-Perot, como apresentada na Figura 2.2.

Em um ressonador de Fabry-Perot, um par de espelhos planos são direcionados um em direção do outro para fechar a cavidade. O objetivo dos espelhos é produzir uma forte realimentação óptica na direção longitudinal da cavidade, tornando-se assim, a cavidade, em um oscilador com um mecanismo de ganho que compensa as perdas dentro dela. De modo geral, toda a luz produzida é liberada somente na parte frontal da cavidade. Assim um refletor dielétrico pode ser depositado na parte traseira, reduzindo as perdas na cavidade.

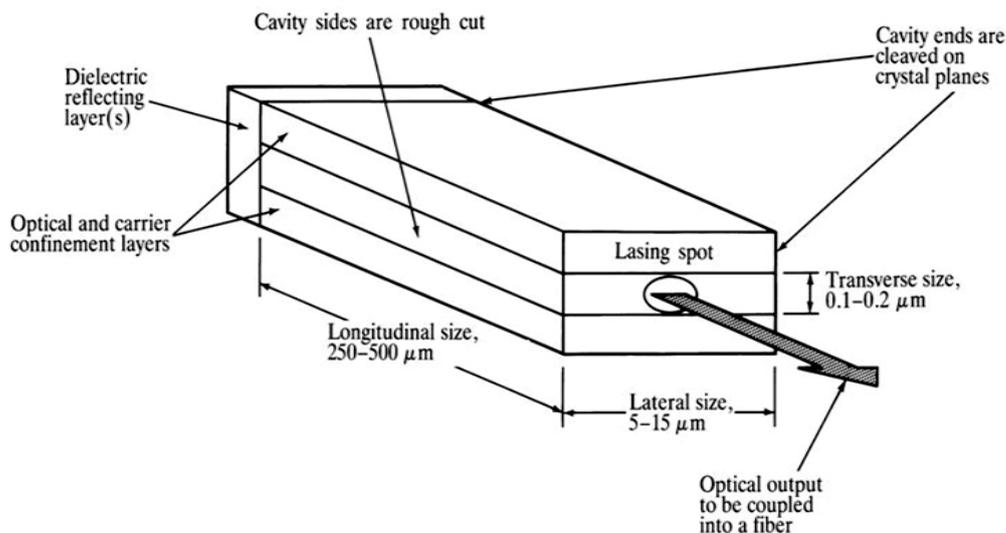


Figura 2.2 Resonador de Fabry-Perot em um diodo laser.

## 2.2. Fibras ópticas

As fibras ópticas são estruturas que guiam a luz devido ao fenômeno chamado de *reflexão interna total*, como consequência da diferença dos seus índices de refração. A reflexão interna total é um, dentre vários fenômenos, que a luz experimenta quando, no seu percurso, encontra um cambio abrupto de índices de refração, os quais são modelados pela lei de Snell, Eq. 2, e apresentados na Figura 2.3. O ângulo que um feixe, de luz incidente, forma com uma linha perpendicular ao plano de incidência além dos índices  $n_1$  e  $n_2$  são as variáveis que descrevem a interação.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad \text{Eq. 2}$$

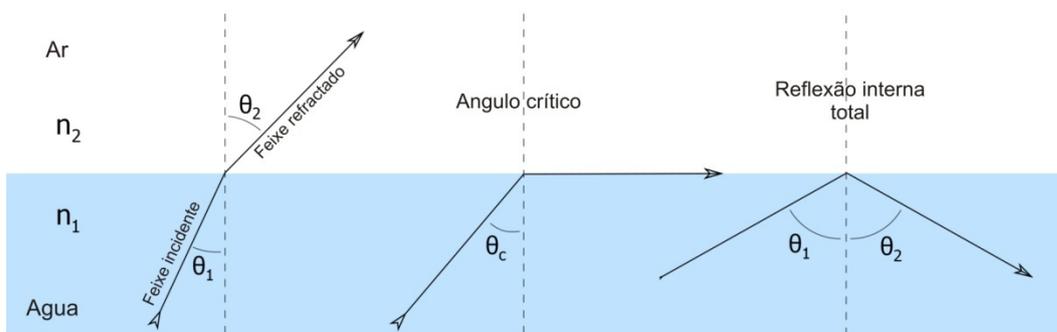


Figura 2.3 Diferentes resultados da interação da luz com o cambio brusco no índice de refração.

Se a primeira reflexão interna dentro do guia é garantida, reflexões posteriores são também garantidas já que o ângulo refletido é igual ao ângulo incidente e conseqüentemente, o comportamento, baixo certas condições, é repetido indefinidamente. Assim, para garantir a propagação, um ângulo mínimo de incidência na fibra é necessário, o qual define a chamada Apertura Numérica ( $NA$ ). A abertura numérica define o cone de aceitação da fibra, assim feixes dentro desse cone serão acoplados na fibra, como mostrado na Figura 2.4. O valor da  $NA$  é dado por:

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad \text{Eq. 3}$$

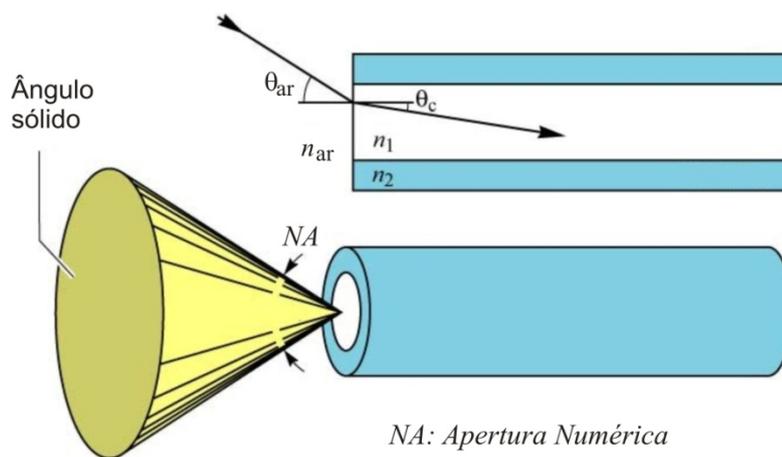


Figura 2.4 Cone de aceitação definido pela Apertura Numérica numa fibra de índice degrau standard.

De modo geral as fibras ópticas são guias de onda constituídas por um núcleo de sílica cilíndrico ( $n_1$ ), envolto por um revestimento com menor índice de refração ( $n_2$ ) permitindo que a luz seja guiada. A diferença entre os índices de refração é muito pequena o que permite a diminuição do fenômeno de dispersão por multi-trajetos. Uma outra técnica para diminuir essa dispersão é o uso de fibras de índices gradual, no qual o índice de refração muda gradativamente [1] a diferença das fibras de índice degrau previamente apresentada na Figura 2.4.

Uma característica importante nas fibras ópticas, que é uma característica de todos os guias de onda, é a capacidade para guiar mais de um modo de propagação. Isso resulta teoricamente das diferentes soluções particulares da

Equação de Onda [3] sob as condições de contorno do guia de onda. Devido à grande dispersão inerente à propagação multimodal, as fibras ópticas monomodo são preferíveis nas telecomunicações.

Na atualidade, as redes de fibra óptica são o meio de transporte por excelência, com taxas de transmissão de até 15 Tb/s na banda de 1550 nm em sistemas com multiplexação por comprimento de onda de alta densidade (DWDM), possibilitado graças ao desenvolvimento dos amplificadores ópticos [19]. A evolução dos sistemas de comunicações por fibra óptica se deve assim ao trabalho conjunto das tecnologias em fibras, transmissores, receptores e amplificadores, como detalhado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 Evolução dos sistemas de comunicação por fibra óptica [1]

Geração do sistema de comunicação por fibra óptica	Tecnologia de Fibra Óptica	Tecnologia de Transmissores, Receptores, e Amplificadores	Ano	Taxa de bits e Distância
Primeira geração	850 nm 4 dB/km	AlGaAs Laser 800 - 890 nm	1980	45 Mb/s 10 km
Segunda geração	1300 nm 0.5 dB/km	InGaAsP Laser 900 - 1700 nm	1987	1.7 Gb/s 50 km
Terceira geração	1550 nm 0.2 dB/km	InGaAsP Laser 900 - 1700 nm	1990	2.5 Gb/s 60-70 km
Quarta geração	1550 nm 0.2 dB/km	EDFA + WDM 900 - 1700 nm	1996	5.0 Gb/s 1300 km

Desde o ponto de vista da taxa de transmissão, a tendência da capacidade é aumentar 10 vezes cada 4 anos. Onde as tecnologias chaves foram o desenvolvimento das fibras monomodo de baixa perda (0.2 dB/km), os amplificadores de fibra dopada de érbio (EDFAs), os sistema WDM e a codificação com alta eficiência espectral. Estudos mais recentes indicam a multiplexação por divisão espacial (SDM) como uma tecnologia pronta para o próximo salto na capacidade de transmissão [20]. A evolução da capacidade de transmissão dos sistemas de comunicações ópticas é apresentado na Figura 2.5

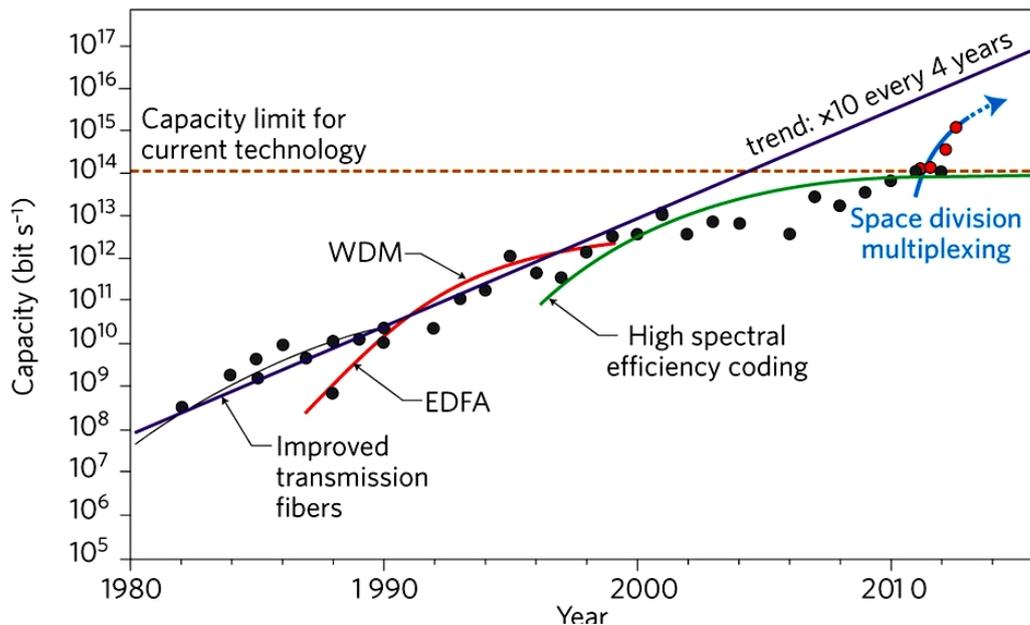


Figura 2.5 Evolução da capacidade de transmissão. Os pontos representam a maior capacidade reportada anualmente na *Optical Fiber Communications Conference* desde 1982 [20].

### 2.3. Refletômetro óptico no domínio do tempo - OTDR

Uma das características mais limitantes num sistema de comunicações ópticas é a atenuação do sinal luminoso quando trafega a fibra. A luz, numa fibra, é atenuada devido a efeitos de absorção, espalhamento e defeitos no guia de onda. Assim é de grande importância conhecer a quantidade de luz perdida numa fibra antes e depois de colocá-la em serviço no sistema.

Atualmente o OTDR [6] é a técnica mais usada no monitoramento de enlaces ópticos permitindo a visualização da perda em função da distância ao longo da fibra, cuja medida só precisa da conexão em uma das pontas. Um OTDR emite periodicamente pulsos de luz muito curtos. A medida que esse pulsos, chamados de pulsos de prova, se propagam dentro da fibra encontram pontos de reflexão e espalhamento. Nestes pontos pequenas frações da luz emitida é refletida no sentido oposto. Assim a luz de volta pode ser detectada e usada para criar o perfil espacial da fibra de acordo com o nível de potencia recebido. Nesse sentido, se a atenuação de um guia de onda depende da distância, o perfil produzido pelo OTDR é uma linha com inclinação decrescente com coeficiente angular igual a atenuação da fibra; qualquer evento que possa causar uma perda na

potência é representada da mesma forma. Na Figura 2.6, é possível observar os principais eventos registrados por um OTDR.

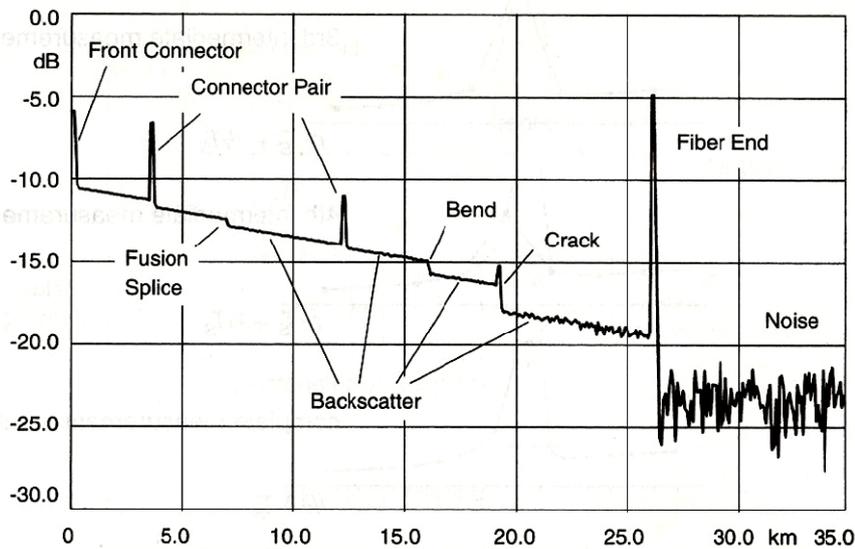


Figura 2.6 Traço típico de um OTDR [7]

Os eventos podem ser categorizados em dois tipos, eventos refletivos e não refletivos. Os eventos refletivos acontecem por mudanças abruptas no índice de refração do meio. Por exemplo, conectores, rachaduras, fibras abertas no final do enlace, etc. Os eventos não refletivos são geralmente causados por dobraduras ou curvas e soldas por fusão. Após o final da fibra nenhum sinal óptico é detectado e o traço da curva cai ao nível do ruído do detector, o qual limita o nível mínimo de detecção

O diagrama de blocos de um OTDR padrão é apresentado na Figura 2.7. O funcionamento do OTDR começa no processador de sinais, este ativa um gerador de pulsos elétricos e ao mesmo um timer interno. O gerador de pulsos modula o laser do OTDR que envia a luz por um circulador. A luz é transmitida para a fibra, onde as imperfeições desta causam espalhamento e reflexões. A luz que volta na direção oposta, passa pelo circulador e posteriormente chega ao fotodetector. Depois o sinal é amplificado, digitalizado e processado. O OTDR mede o tempo de vôo do sinal, utilizando o índice de refração (IOR) da fibra para calcular a velocidade da luz no meio e a distância na qual cada evento acontece.

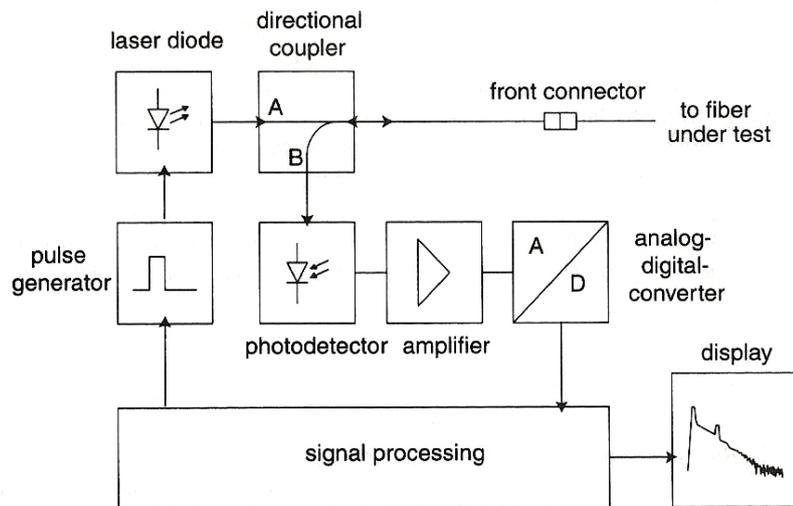


Figura 2.7 Diagrama de blocos de um OTDR [7]

Como resultado dos efeitos de atenuação, a luz dentro de uma fibra óptica experimenta um decaimento exponencial da sua potência em função da distância, isso pode ser expressado pela equação Eq. 4:

$$P(z) = P_0 e^{-\Gamma z} \quad \text{Eq. 4}$$

onde o coeficiente de atenuação,  $\Gamma$ , é medido em  $\text{km}^{-1}$ . Esse coeficiente é a composição dos coeficientes de absorção e espalhamento:

$$\Gamma = \Gamma_a + \Gamma_s \quad \text{Eq. 5}$$

Sendo que o coeficiente  $\Gamma_a$  em fibras óticas monomodo é pelo menos uma ordem de grandeza menor do que o coeficiente de espalhamento,  $\Gamma_s$  pode ser aproximado por  $\Gamma$ .

Se imaginarmos um pulso de luz atravessando a fibra, a potência retroespalhada  $dp_s$  na posição  $z$  dentro de um intervalo infinitesimal  $dz$  é proporcional á potência do pulso nessa posição,  $P(z)$ , de modo que:

$$dp_s = S \cdot \Gamma_s \cdot P(z) dz \quad \text{Eq. 6}$$

onde  $S$ , Eq. 7, é o coeficiente de captura de retroespalhamento, que descreve a

quantidade de luz espalhada e guiada de volta na fibra que pode detectada, sendo função da abertura numérica,  $NA$ , e do índice de refração do centro do núcleo,  $n_0$ .

$$S = \frac{1}{4.55} \left[ \frac{NA}{n_0} \right]^2 \quad \text{Eq. 7}$$

Imaginamos agora um pulso de luz de duração  $W$  se propagando dentro da fibra. A luz é espalhada por um pedaço de fibra de largura  $W$  que depende da duração do pulso, da velocidade da luz  $c$ , de o índice de refração de grupo  $n_{gr}$ .

$$W = \dagger \frac{c}{n_{gr}} \quad \text{Eq. 8}$$

A potencia total de volta, vinda de uma distância  $L$ , que chega ao OTDR é a integral da potencia espalhada dos intervalos infinitesimais  $dz$  ao longo do pedaço de fibra  $W$ :

$$P_s(L) = \int_0^W S \cdot r_s \cdot P_0 \cdot e^{-2r(L+z/2)} dz \quad \text{Eq. 9}$$

A equação Eq. 9 pode ser aproximada, com precisão suficiente para pulsos com larguras típicas em aplicações de OTDR [7], para:

$$P_s(L) = S \cdot r_s \cdot W \cdot P_0 \cdot e^{-2rL} \quad \text{Eq. 10}$$

Uma aproximação do valor de potencia retroespalhada,  $P_{init}$ , no primeiro pedaço de fibra pode ser descrita por:

$$P_{init} = S \cdot r_s \cdot W \cdot P_0 \quad \text{Eq. 11}$$

### 2.3.1. Faixa dinâmica e faixa de medição

A faixa dinâmica é definida como a diferença entre o nível inicial (no começo da fibra) da luz retroespalhada e o nível de ruído, depois de realizada uma medida de 3 minutos, expressado em decibéis. O nível de ruído pode ser definido de duas formas: pelo seu valor *rms* ou pelo 98% do seu valor pico [7].

A faixa de medição é definida como a máxima atenuação entre o OTDR e um evento para o qual o OTDR é ainda capaz de medir com precisão o próprio evento. Uma atenuação de 0.5 dB é considerada como o evento a ser medido. A Figura 2.8, apresenta as definições expostas.

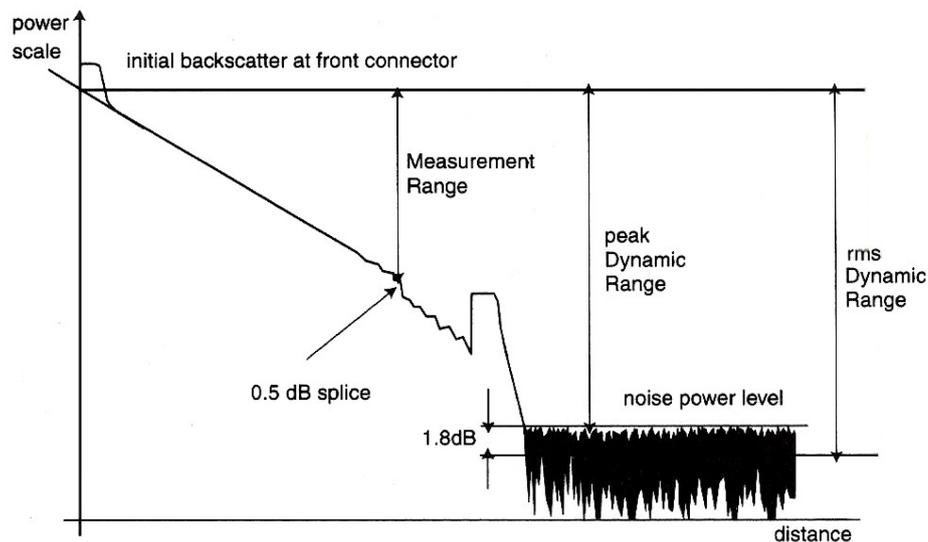


Figura 2.8 Faixa dinâmica e faixa de medição [7]

### 2.3.2. Zona morta:

Este parâmetro está sempre relacionado com eventos do tipo refletivo. Quando uma reflexão acontece, o receptor do OTDR é saturado pela potência da reflexão, precisando um tempo para voltar ao estado normal, resultando em perda de informação durante esse período.

Existem duas formas de especificar o valor da zona morta. A “*Event dead zone*” é a distância entre o início da reflexão e o ponto onde esta cai 1,5 dB. A “*Attenuation dead zone*” é a distância entre o início da reflexão e o ponto onde o receptor recuperou-se e pode detectar o sinal de retroespalhamento com um margem de  $\pm 0,5$  dB. O comprimento de uma zona morta depende muito dos parâmetros de medida utilizados, a largura do pulso, a largura de banda do receptor e o comprimento de onda do laser. Na Figura 2.9 são apresentadas as duas formas de especificar o valor da zona morta.

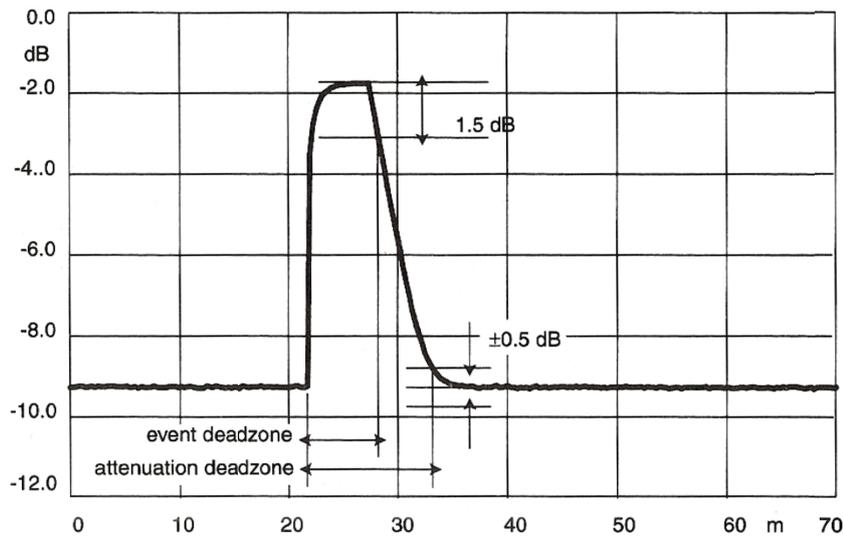


Figura 2.9 *Event deadzone* e *Attenuation deadzone* [7]

### 2.3.3. Resolução espacial:

A resolução espacial de um OTDR indica a capacidade de resolver dois eventos adjacentes. Se os eventos fossem refletivos a resolução é a mínima distância que o OTDR pode resolver entre as duas reflexões; isso é aproximadamente o valor do FWHM (*full-width half-maximum*) de uma única reflexão.

No caso de um evento único não refletivo com menos de 1 dB de perda a resolução espacial é definida de acordo com a duração do evento em termos de distância. Se chamarmos  $L$  à distância total durante a qual o evento ocorre, a resolução espacial é definida como a distância entre o 10% até o 90% da distancia  $L$ .

### 2.3.4. Relação de compromisso entre a faixa dinâmica e a resolução:

Uma limitação fundamental de um OTDR convencional é o compromisso entre a faixa dinâmica e a resolução espacial. O sinal recebido  $s(t)$  pode ser descrito como a convolução ( $\otimes$ ) do pulso enviado,  $p(t)$ , a resposta ao impulso de retroespalhamento da fibra,  $f(t)$ , e a resposta ao impulso do detector,  $r(t)$ .

$$s(t) = p(t) \otimes f(t) \otimes r(t)$$

Eq. 12

A resolução espacial, assim, é limitada pela resposta do detector e a largura do pulso enviado. Para conseguir uma alta resolução o pulso (o qual é geralmente um pulso quadrado) tem que ser suficientemente pequeno (associado a uma largura de banda maior no receptor). Isto leva a uma redução da relação sinal ruído (SNR). Por outro lado, o nível de potência detectado aumenta em função do tempo de sinal de prova utilizado, embora este degrade a resolução. Isso se deve ao fato da amplitude do sinal recebido ser proporcional à energia do sinal de prova, que é o produto da potência de pico pela largura do pulso utilizado. Assim, uma vez alcançada a potência máxima de pico, o SNR só pode ser melhorado aumentando-se a largura do pulso, dando como resultado a degradação da resolução.

### 2.3.5. Coherent Rayleigh Noise (CRN)

O CRN (ou “*fading noise*”) é o maior problema quando usado uma fonte laser de banda estreita. Essa incerteza ocorre quando a resolução espacial torna-se comparável com o comprimento de coerência da fonte laser [7]. Assim, à medida que o tamanho do pulso diminui (a resolução aumenta) a incerteza na amplitude do retroespalhamento cresce e se torna mais ruidosa. OTDRs convencionais não experimentam este comportamento já que eles usam fontes de banda larga (comprimento de coerência muito pequeno) e pulsos ópticos maiores.

## 2.4. Redes Ópticas passivas (PON)

As *redes ópticas passivas* (PON) tradicionais são as chamadas TDM-PON (*Time Division Multiplexed* - PON). Uma TDM-PON usa um único comprimento de onda e aproveita a alta capacidade da fibra, conjuntamente com os baixos custos de implantação (CAPEX) e manutenção (OPEX), que uma infraestrutura passiva oferece. A portadora óptica é compartilhada usando um divisor passivo (PS: *Power Splitter*). Como consequência o número de ONUs (*Optical Network Unit*) ou ONTs (*Optical Network Termination*) é limitado pela atenuação na divisão da potência e pela taxa de transmissão nos transceptores da CO (*Central Office*) e das ONUs [21].

Uma rede WDM-PON (*Wavelength Division Multiplexed - PON*) oferece melhor desempenho e escalabilidade pelo fato de suportar múltiplas portadoras (comprimentos de onda) em uma fibra só. Sendo assim transparente á taxa de transmissão e não apresenta atenuação por divisão de potencia. Cada ONU pode operar até a taxa máxima de transmissão permitida pela portadora. Ainda, diferentes portadoras podem operar a diferentes taxas se for necessário, assim, muitos serviços podem ser suportados sobre a mesma rede.

Uma rede WDM-PON usa um comprimento de onda desde a OLT (*Optical Line Termination*), no CO, para cada uma das ONUs, como apresentado na Figura 2.10. Com isto é criada uma topologia física P2P (*Point to Point*) entre o CO e cada ONU, que é diferente comparado com a topologia P2MP (*Point to Multipoint*) de uma TDM-PON. As portadoras são transmitidas por uma única fibra desde a OLT até o RN (*Remote Node*), onde um dispositivo de distribuição passivo, AWG (*Arrayed Waveguide Grating*), separa e distribui as portadoras para cada uma das ONUs. O AWG é um dispositivo óptico passivo com uma propriedade especial, a "periodicidade", pela qual cada porta pode conter ao mesmo tempo vários comprimentos de ondas em diferentes bandas do espectro.

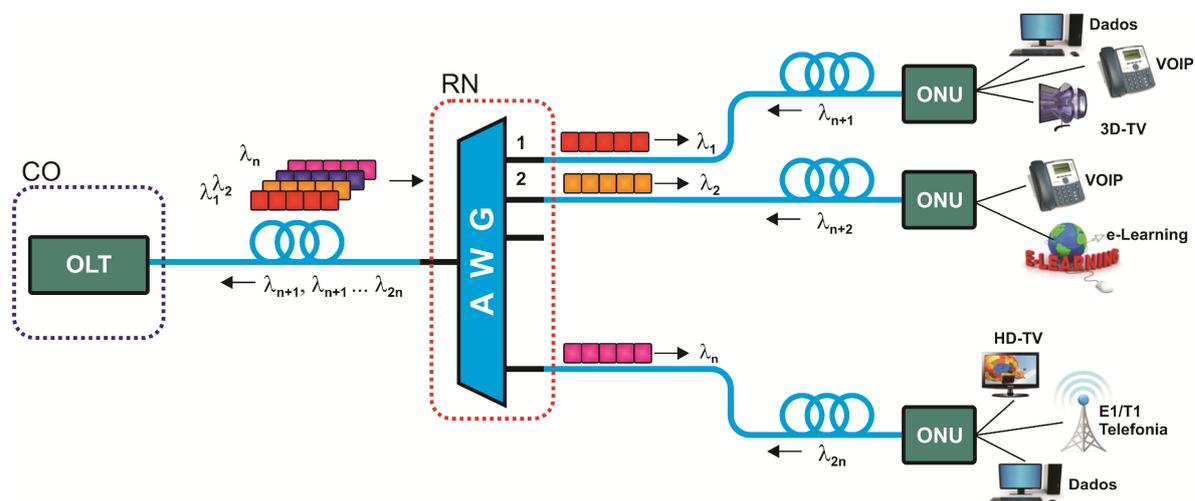


Figura 2.10 Arquitetura básica de uma rede WDM-PON

A supervisão em redes passivas de altas taxas é um problema delicado devido a uma superposição dos sinais das varias derivações da rede, dando origem a uma ambigüidade na identificação do sinal e das falhas. Nas redes WDM-PON a

ambigüidade é resolvida pela identificação espectral do usuário, mas o monitoramento tem a dificuldade de não poder usar o mesmo comprimento de onda do sinal de dados. Numa rede WDM-PON onde são transmitidas taxas muito altas de bits (e.g. 10 Gb/s) o problema é ainda maior dado que a queda de uma fibra pode implicar na suspensão de serviços de muitos usuários.

Assim o método mais usado na supervisão de redes ópticas é a Reflectometria Óptica no Domínio do Tempo (OTDR). A utilização do OTDR na análise de enlaces ópticos já foi muito estudada e é utilizada por empresas de telecomunicações na atualidade. A tecnologia atual para realizar a supervisão da camada física recomenda, para as operadoras das redes PON, usarem o OTDR na banda U combinando diferentes estratégias para identificar a ramificação da rede e sua possível falha [22]. O número elevado de divisões (>1:32) e o alcance estendido (60 km) são um problema na supervisão de redes TDM-PON, devido a exigências de resolução e faixa dinâmica.

Uma arquitetura básica [23] para a supervisão de redes WDM-PON é apresentada na Figura 2.11. O OTDR é localizado no CO, e o seu sinal de monitoramento é vinculada com a fibra de distribuição através de um acoplador óptico (OC: *Optical Coupler*). Note-se que o OTDR precisa de um módulo EWAM (*External Wavelength Adaptation Module*) para selecionar o comprimento de onda correspondente ao canal que será monitorado. No lado das ONUs um filtro passa-faixa (BPF: *Band Pass Filter*) é sintonizado no comprimento de onda de dados com o objetivo de bloquear o sinal de monitoramento.

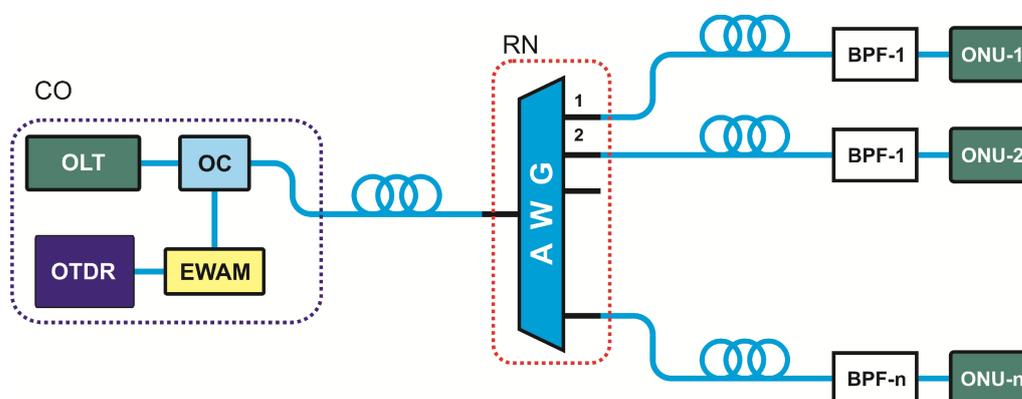


Figura 2.11 Diagrama de blocos para a supervisão de uma rede WDM-PON