2
Aspectos Teóricos

2.1
Redes PON

Estas redes, como o nome diz, não precisam de componentes eletrônicos ativos na ODN (*Optical Distribution Network*) e utilizam uma topologia física P2MP (*Point to Multipoint*). O OLT (*Optical Line Terminal*) carrega todo o tráfego por uma fibra ate o RN (*Remote Node*) onde um dispositivo passivo de distribuição é utilizado para separar e distribuir os sinais nos diferentes ONUs (*Optical Network Units*) ou ONTs (*Optical Network Terminations*). O dispositivo varia dependendo da PON utilizada, numa TDM-PON este dispositivo é um divisor de potência tipicamente de 1:32, no caso de uma WDM-PON este dispositivo será um AWG (Arrayed Waveguide Grating). Nas figuras 2.1 e 2.2 pode-se ver as diferentes arquiteturas da rede TDM-PON e WDM-PON respectivamente. Este tipo de arquitetura abaixas o OPEX (*Operation-and-Maintenance Expences*) dado que os componentes eletrônicos são mais propensos a falhas na planta externa.

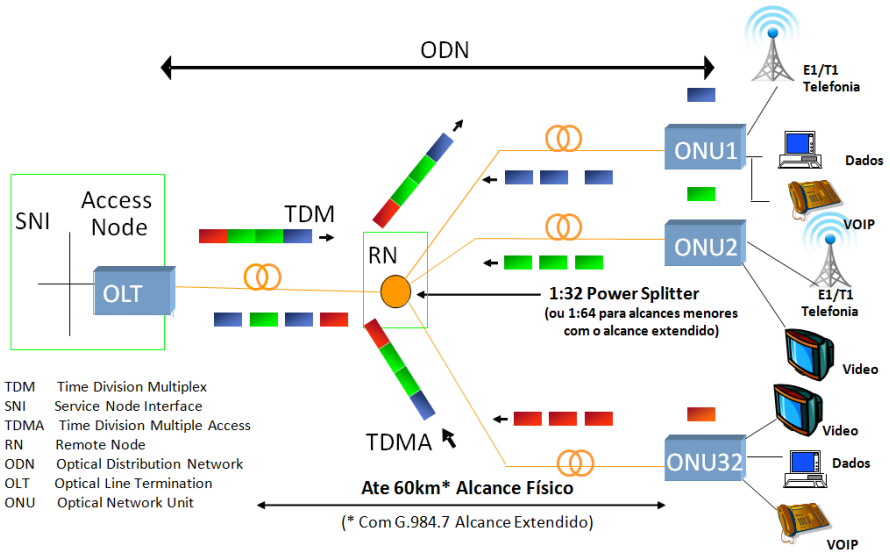

Figura 2.1: Arquitetura TDM-PON básica.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121516/CA

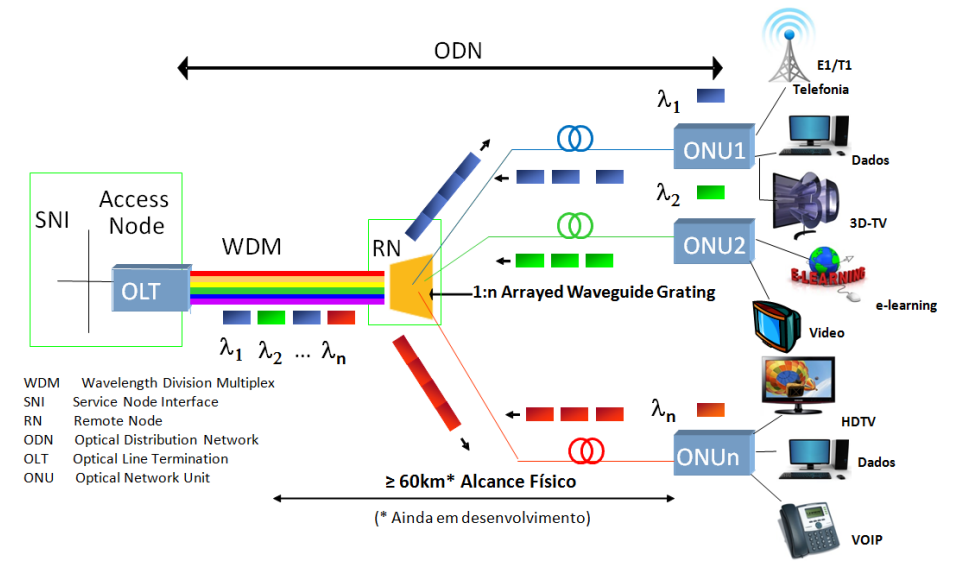

Figura 2.2: Arquitetura WDM-PON básica.

2.1.1 Arquitetura TDM-PON

Durante o passar dos anos um número importante de redes de acesso PON foram definidas e padronizadas. A ITU (*International Telecommunication Union*) e a IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) em conjunto com o grupo FSAN (*Full Service Access Network*) tem definido uma série de normas internacionais para implementação da arquitetura TDM-PON. Entre elas podemos mencionar: APON, BPON (ATM e *Broadband* PON respectivamente; ITU G983), GPON (*Gigabit-capable* PON; ITU G984), EPON (Ethernet PON; IEEE 802.3ah), XG-PON1/2 (*10 Gigabit-capable PON*; ITU G987), 10GEPON (*10 Gigabit* EPON; IEEE802.3av). Na tabela 2.1 pode-se observar as principais diferenças entre as tecnologias mais importantes utilizadas na atualidade[5], [6], [7], [8] e [9].

Arquiteturas e serviços

Estas tecnologias oferecem diferentes tipos de serviços dependendo da topologia física utilizada na rede de acesso, estas podem variar entre FTTC, FTTO, FTTH, FTTB.

1. FTTC - Fiber to the Cell.- Será capaz de oferecer conectividade para as estações base celulares:

   – Serviços de TDM simétricos (e.g., 2G *cell site backhaul*);
   – Serviços simétricos e assimétricos, baseados em pacotes de banda larga (e.g., 3G/4G *cell site backhaul*);

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121516/CA

Tabela 2.1: Tabela comparativa das tecnologias padronizadas que utilizam TDM-PON na atualidade.

Tecnologia		**BPON**	**EPON**	**GPON**	**10GEPON**	**XGPON**
Padrão		ITU G.983	IEEE 802.3ah	ITU G.984	IEEE 802.3av	ITU G.987
Frame		ATM	Ethernet	GEM/ATM	Ethernet	X-GEM
Velocidade de transmissão	*Downstream*	622Mb/s	1.25Gb/s	2.4Gb/s	10Gb/s	10Gb/s
	Upstream:	622Mb/s ou 155Mb/s	1.25Gb/s	1.2Gb/s ou 2.4Gb/s	1.25Gb/s ou 10Gb/s	2.5Gb/s ou 10Gb/s
Divisão		1:32	1:16	1:64	1:32	1:64
Distância máxima (Km)		20	10/20	20/60	10/20	≥ 20
Comprimento de Onda (nm)	*Downstream*	1480-1580	1480-1500	1480-1500	1575-1580	1550-1580
	Upstream	1260-1360	1260-1360	1260-1360	1260-1360	1260-1280
	Vídeo RF	1550	1550	1550	1550	1550
Coexistência		-	-	-	EPON	GPON

  - Hot spots.

2. FTTO - Fiber to the Office.- Estão dedicados a pequenos negócios, onde a rede será capaz de oferecer os seguintes serviços:

   - Serviços simétricos de banda larga (e.g. conteúdo *Broadcast*, e-mail, etc.);
   - POTS.- Serviços de telefonia de banda estreita que podem ser ou simulados ou emulados;
   - Linhas privadas a diferentes taxas de transmissão.

3. FTTH - Fiber to the Home.- Para este tipo de rede, os seguintes serviços são considerados:

   - Serviços de banda larga assimétricos (e.g., IPTV, serviços digitais de *broadcast*, VoD, etc.);
   - Serviços de banda larga simétricos (e.g., conteúdo *broadcast*, e-mail, *e-learning*, telemedicina, jogos-online, etc.);
   - POTS.- Serviços de telefonia de banda estreita que podem ser simulados ou emulados.

4. FTTC - Fiber to the Curb e Cabinet.- Para este tipo de rede, os seguintes serviços são considerados:

   - Serviços de banda larga assimétricos (e.g., IPTV, serviços digitais de *broadcast*, VoD, etc.);
   - Serviços de banda larga simétricos (e.g., conteúdo *broadcast*, e-mail, *e-learning*, telemedicina, jogos-online, etc.);

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121516/CA

- POTS.- Serviços de telefonia de banda estreita que podem ser simulados ou emulados;
- xDSL backhaul.

5. FTTB - Fiber to the Building.- Este tipo de rede está dividido em dois tipos de usuários cada um com um tipo de serviço diferente:

   (a) Usuários residenciais:

   - Serviços de banda larga assimétricos (e.g., IPTV, serviços digitais de *broadcast*, VoD, etc.);
   - Serviços de banda larga simétricos (e.g., conteúdo *broadcast*, e-mail, *e-learning*, telemedicina, jogos-online, etc.);
   - POTS.- Serviços de telefonia de banda estreita ja sejam simulados ou emulados.

   (b) Usuários corporativos:

   - Serviços simétricos de banda larga (e.g. conteúdo *Broadcast*, e-mail, etc.)
   - POTS.- Serviços de telefonia de banda estreita já sejam simulados ou emulados.
   - Linhas privadas a diferentes taxas de transmissão.

Na Figura 2.3, pode-se observar um resumo dos cenários propostos pela norma ITU-T G.987 para redes de acesso XG-PON.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121516/CA

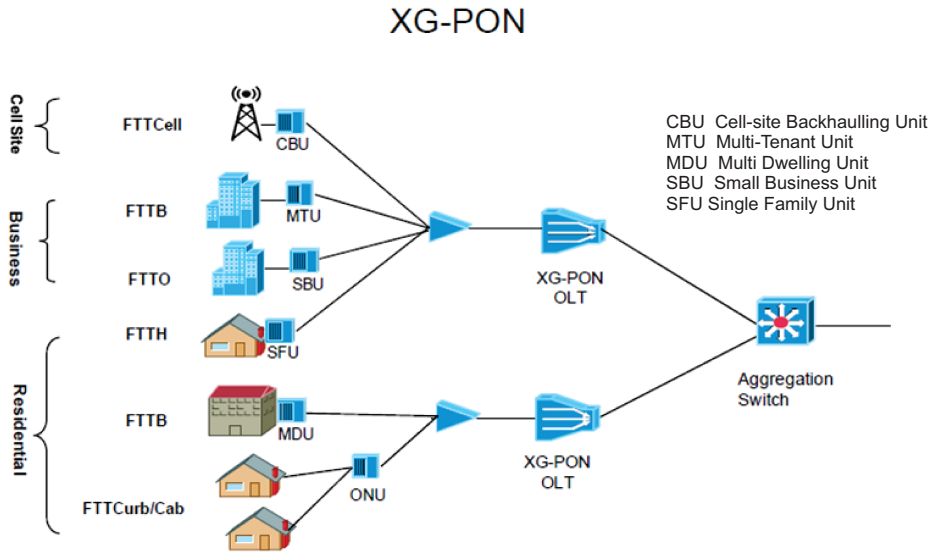

Figura 2.3: Resumo dos cenários propostos de XG-PON (G.987.1) [8].

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121516/CA

2.1.2 Arquitetura WDM-PON

O uso de uma arquitetura WDM-PON para redes de acesso foi proposto no final dos anos 80 por Wagner e Lemberg [10]. Mesmo assim, essas idéias não foram comercializadas por muitas razões: Inexistência de um mercado que exigisse taxas de transmissão muito altas, tecnologia e equipamentos imaturos e a falta de protocolos de rede e software adequados para suportar a mencionada arquitetura.

Com o passar dos anos, progressos significativos em tecnologias essenciais, tais como o AWG que não varia com a temperatura, o filtro WDM, o RSOA (*Reflective Semiconductor Optical Amplifier*) e o FP-LD (*Fabry-Perot Laser Diode*) alimentou o ressurgimento da pesquisa em redes WDM-PON, além de baixar os custos das ONU o que permitiu que esta arquitetura fosse explorada e proposta em muitos textos da literatura atual.

É um fato que novos serviços e aplicações que requerem altas taxas de transmissão geram um crescimento intenso do tráfico de internet. A Cisco fez a previsão de que, entre os anos de 2009 e 2014, o tráfego total de internet aumentará quatro vezes, sendo o tráfego de vídeo o predominante [11]. Serviços de vídeo por internet novos como o 3D vídeo, super HD vídeo, são projetados para aumentar em 23 vezes, enquanto o tráfego de comunicações por vídeo (e.g., teleconferência, vídeo ligações, etc.) aumentará em 7 vezes. Para o final do ano 2014, 66% do tráfego de dados móveis será de vídeo. Aplicações recentes

como o Ultra HD vídeo continuam aumentando a necessidade de banda de transmissão [12].

Todos os fatos mencionados acima prevêem uma pronta implantação mundial de redes WDM-PON. Na Figura 2.4 observa-se as tendências provisórias da evolução das redes PON para os próximos anos.

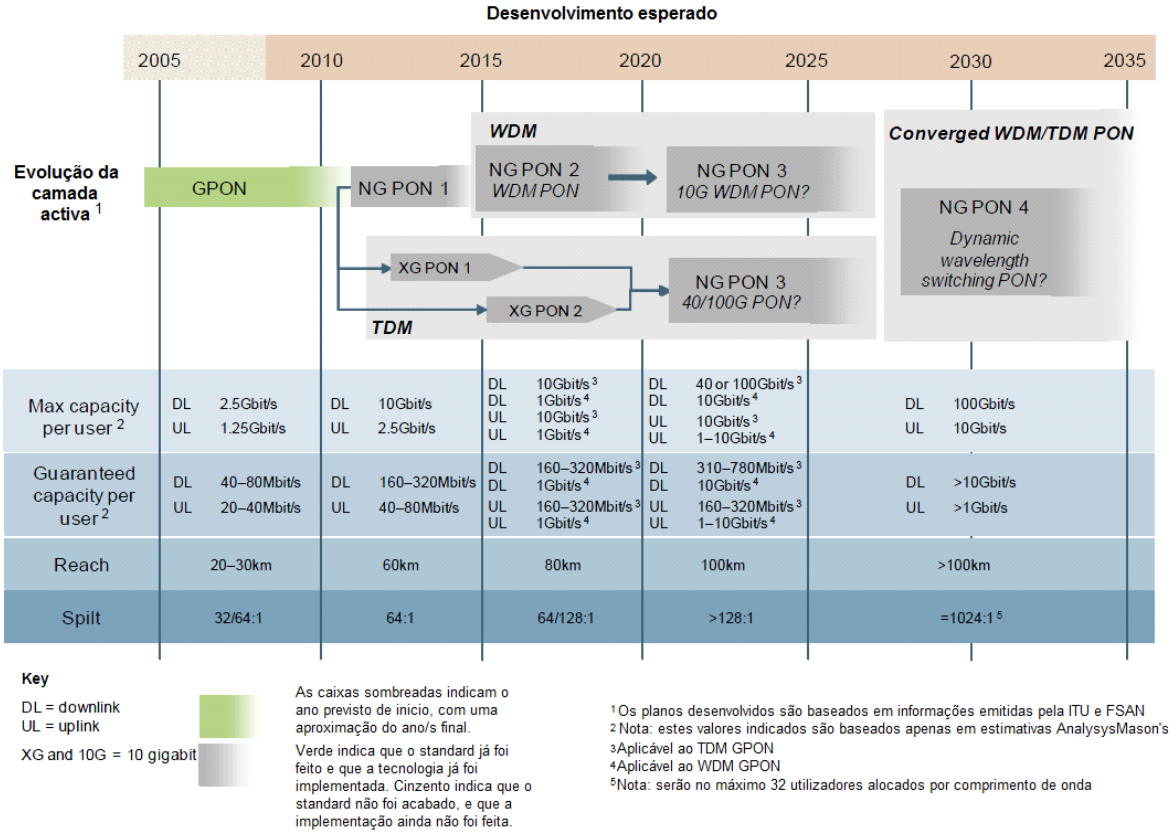

Figura 2.4: Tendências provisórias da evolução das redes PON [12].

A arquitetura WDM-PON acrescenta múltiplos comprimentos de onda numa fibra para aumentar a capacidade da rede de acesso. Apesar de ter uma topologia física similar às TDM-PON, a rede passa a um cenário ponto a ponto. Para cada ONT é dedicado um comprimento de onda e não se tem a necessidade de compartilhar a banda no domínio do tempo, por outro lado, tambem tem sido estudadas as posibilidades de utilizar redes WDM-PON sobre o legado TDM-PON atual. Neste caso pode-se multiplexar 4 canais XGPON numa rede fisica atingindo um maior numero de usuarios e capacidade. Um AGW é utilizado como roteador e dirige cada comprimento de onda para o ONT correspondente.

A rede de acesso passa a ter mais de uma vantagem quando é implementada uma arquitetura WDM-PON, a interoperabilidade de vários serviços, segurança máxima de uma rede ponto a ponto, transparência de protocolos, aumento significativo das taxas de transmissão, aumento do numero de usuários,

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121516/CA

etc. Está previsto que, para 2015, os seguintes requisitos gerais serão compridos:

- 40 Gbit/s de capacidade agregada;
- Simetria sustentável de 1Gbit/s por ONU;
- 1:64 divisões;
- 20 km básicos de alcance;
- 60 km de alcance de extensão;
- Maior segurança;
- Coexistência com GPON, XGPON1 e XGPON2.
- Redução dos custos energéticos.
- Redução de OPEX e CAPEX.

2.2 Supervisão de redes PON

Um sistema de supervisão é necessário durante a instalação da rede para que possam ser feitos os testes finais após a instalação, o monitoramento do funcionamento regular, a manutenção e a localização de falhas de qualquer rede de acesso.

Nas recomendações de instalação para as diferentes tecnologias, a ITU propõe uma série de recomendações para proteção em caso de falha ou corte. Na recomendação G.984.1, por exemplo, são propostos dois tipos de proteção para redes GPON, o primeiro duplica os equipamentos desde o OLT até o divisor de potência no RN, e, no segundo, toda a PON é duplicada.

Em caso de quebra ou falha do equipamento um alarme é ativado e o equipamento de reserva é posto em funcionamento. É importante mencionar que o alarme é ativado por um equipamento de camada 2 que testa a intensidade do sinal ou a qualidade desta, o que traz conseqüências importantes: primeiramente a camada física da rede não é totalmente visível para o NMS, segundo, as falhas da camada física podem gerar um corte do serviço sem ser detectadas, gerando perdas monetárias para a operadora e a insatisfação do cliente.

Devido a este tipo de problemas as operadoras procuram sistemas de supervisão que trabalhem na camada física da rede, a [4] e [13] são as recomendações essenciais que descrevem a manutenção preventiva e pos-falha em sistemas ópticos, além disso o primeiro destes é a primeira norma a definir especificamente a manutenção e supervisão das redes PON recomendando o

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121516/CA

uso de técnicas baseadas no OTDR. Estas técnicas são utilizadas para realizar a detecção e localização de falhas provendo uma maior visibilidade da camada física para a NMS, além de reduzir o OPEX e os grandes tempos de restauração da rede sem serviço. Desta maneira, os sistemas de supervisão provêm um serviço diferenciado e uma QoS (Quality of Service) garantida.

Algumas operadoras afirmam que mais de 80% das falhas em redes PON ocorrem depois do RN, nas fibras de distribuição [14]. Por isso é importante para o sistema poder realizar uma supervisão independente de cada uma das fibras que chegam até o ONU, em redes com arquiteturas como a TDM-PON isso é um problema conhecido como "o problema ponto-multiponto", onde o pulso emitido pelo OTDR é lançado dentro da fibra e distribuído pelo divisor de potência para cada uma das ramificações da rede. Neste caso, o resultado processado pelo OTDR é a luz retroespalhada de todas as ramificações juntas, o que dificulta a interpretação dos dados do OTDR e, sem nenhuma informação adicional, é impossível identificar uma falha. Este é só um dos desafios que as técnicas de supervisão tem que resolver.

Por outro lado, o marco ideal para que uma técnica de supervisão de redes PON possa ser utilizada tem os seguintes requisitos gerais [3]:

- Tem que fornecer uma supervisão contínua, centralizada, automática, e rentável da camada física da rede.
- É necessária uma detecção rápida e precisa da degradação do sinal, assim como da interrupção do serviço.
- Deve prover de forma inequívoca a localização da falha.
- A supervisão não deve afetar o tráfego normal de dados.
- Tem que distinguir entre uma falha no equipamento do usuário final e uma falha na rede do operador. Os resultados da supervisão têm que ser encaminhados para o NMS, onde este avalia eles em detalhes, permitindo as contramedidas preventivas (como a restauração, isolamento ou troca de equipamento).
- Tem que ter interoperabilidade com as muitas variáveis da rede (taxa de bits, protocolo, distância, etc.).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121516/CA

2.2.1 Técnicas de Supervisão para redes PON

Muitas técnicas de supervisão para PON's podem ser observadas na literatura, a maioria destas técnicas utiliza o OTDR como principal equipamento de trabalho, porém uma revisão do funcionamento do OTDR é apresentado a seguir.

OTDR

O Refletômetro Óptico no Domínio to Tempo é um equipamento muito utilizado para realizar a caracterização de enlaces ópticos. Baseado na luz retroespalhada, o OTDR é capaz de medir indiretamente a atenuação sobre um enlace de fibra óptica sendo necessário o monitoramento sobre apenas uma das entradas do enlace. Sendo assim, ele pode ser utilizado para uma supervisão centralizada.

Funcionamento do OTDR

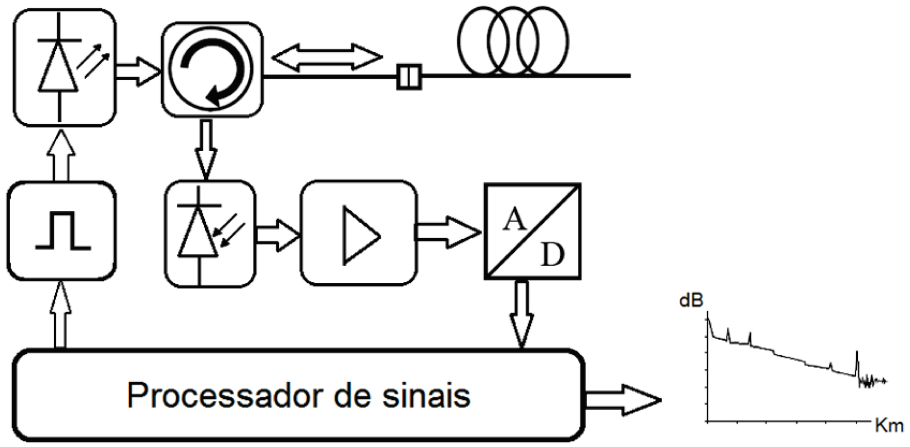

Figura 2.5: Diagrama de blocos do funcionamento do OTDR.

Um diagrama de blocos do OTDR é mostrado na Figura 2.5 e é explicado a seguir:

O funcionamento do OTDR começa no processador de sinais, onde este ativa um gerador de pulsos elétricos ao mesmo tempo que liga um cronômetro interno. O gerador de pulsos modula o laser do OTDR que envia a luz por um circulador. A luz é transmitida para a fibra de teste onde as imperfeições desta causam o espalhamento da luz em muitas direções. Uma pequena parte da luz

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121516/CA

volta na direção do circulador e posteriormente chega ao fotodetector. Depois disso o sinal é amplificado, digitalizado e processado. Dado que o OTDR só mede o tempo de vôo do sinal, ele utiliza o índice de refração (IOR) da fibra para calcular a velocidade da luz no meio e a distância na qual cada evento acontece. Além disso, a luz retroespalhada no OTDR experimenta uma viagem de ida e volta, ou seja, demora o dobro do tempo para chegar no fotodetector e o pulso experimenta o dobro de atenuação. Todos estes fatos são tomados à conta no momento de realizar o gráfico da atenuação em função da distância percorrida pela luz.

Na Figura 2.6 é possível observar os principais eventos mostrados pelo display do OTDR.

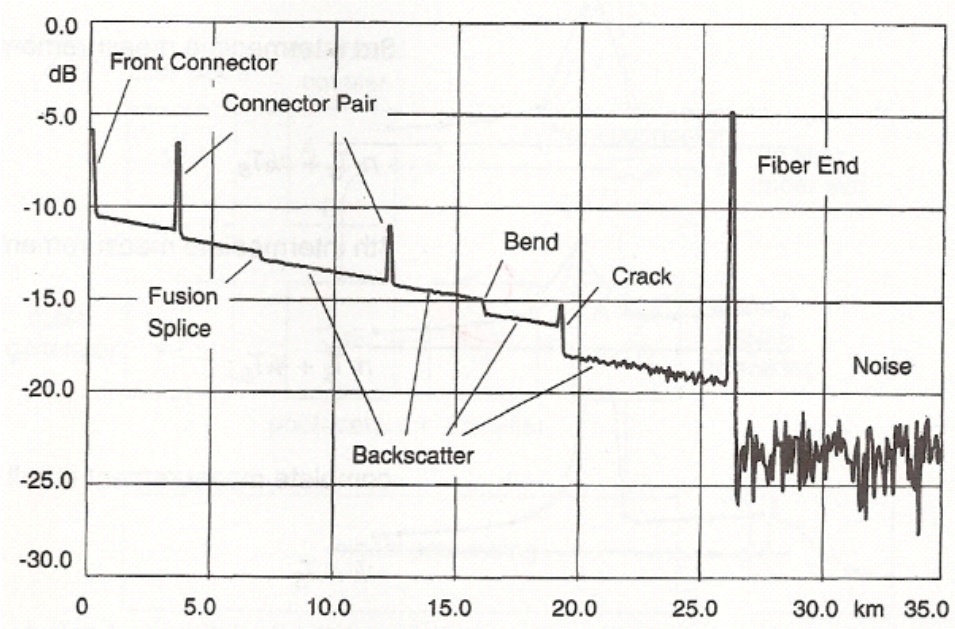

Figura 2.6: Traço típico de um OTDR com os principais eventos [15].

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, fibras abertas no final do enlace, conectores mal acoplados ou sujos, fibras antigas, emendas, etc. O fator de potência refletida, r^2, que resulta de uma reflexão pode ser calculada pela seguinte fórmula:

$$r^2 = \frac{P_{refl}}{P_{inc}} = (\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2})^2 \leqslant 1 \qquad (2\text{-}1)$$

No caso da transmissão do vidro para o ar com um conetor FC/PC (Fiber Connector/Physical Contact) no final da fibra, por exemplo, onde o índice de refração do vidro ($n_1 = 1{,}5$) é maior que o do ar ($n_2 = 1$), o fator de potência refletida será de 4% ($r^2 = 0{,}04$) da potência incidente. Este tipo de reflexão de

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121516/CA

alta potência afeta o desempenho do OTDR que será explicado posteriormente.

Os eventos não refletivos são, geralmente, perdas de inserção em equipamentos ao longo do enlace, emendas e conectores bem feitos. Estes eventos afetam pouco o desempenho do OTDR.

Parâmetros de desempenho

O desempenho do OTDR pode ser observado a partir de alguns parâmetros os quais descrevem a qualidade da medida e ajudam a entender os limites e vantagens do aparelho para uma aplicação específica.

- **Faixa de Medida:** É a atenuação máxima que pode ser inserida entre a saída do OTDR e um evento, de forma que o evento possa ser medido pelo aparelho com precisão. Para realizar esta medida geralmente é considerada uma medida de referência com um evento de 0,5dB de perda.
- **Faixa Dinâmica:** É a diferença entre o nível inicial de luz retroespalhada na saída do OTDR e o ruído depois de realizada uma medida de 3 minutos 2.7. Neste caso, pode-se considerar o pico do ruído ou o seu valor RMS (Root Mean Square). Este último pode ser considerado como 1,8dB abaixo do pico medido.

  Na Figura 2.7 se apresenta um gráfico que identifica claramente os parâmetros explicados acima.

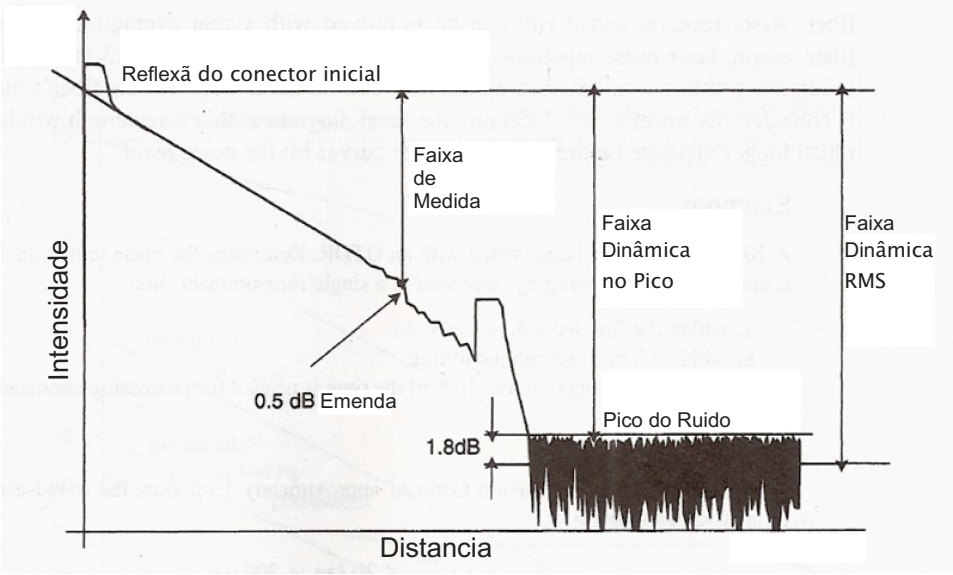

Figura 2.7: Faixa dinâmica e Alcance de Medida [15] (Pg.442).

- **Zona Morta:** Este parâmetro está sempre relacionado com eventos do tipo refletivo. Quando uma reflexão acontece, o receptor do OTDR é

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121516/CA

saturado pela potência de reflexão e demora um determinado tempo para voltar ao estado normal resultando na perda de informação durante esse período. Existem duas formas de especificar o valor da zona morta. O OTDR "Event Dead Zone"é a distância entre o início da reflexão e o ponto onde esta cai 1,5 dB. O OTDR "Atenuation Dead Zone"é a distância entre o início da reflexão e o ponto onde o sinal de retroespalhameto da luz é recuperado com um margem de 0,5dB. 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 2.8 são apresentadas as duas formas de especificar o valor da zona morta.

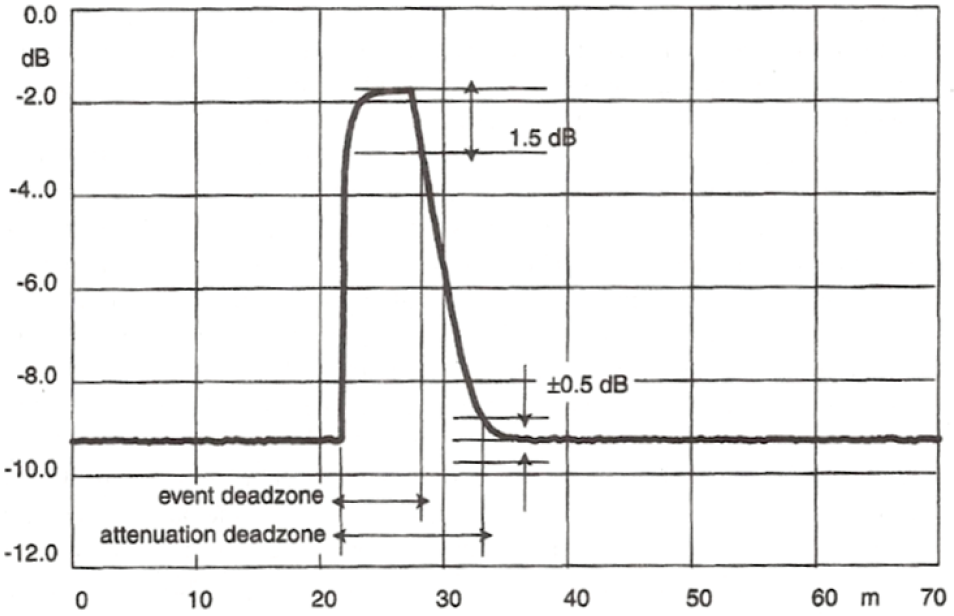

Figura 2.8: Zona morta de atenuação e zona morta do evento [15] (pg.443).

– **Resolução Espacial:** A resolução espacial do OTDR indica a capacidade do equipamento em mostrar dois eventos próximos com a máxima precisão. No caso de um evento único com menos de 1dB de perda a resolução espacial é de acordo com a duração do evento em termos de distância. Chamando a distância total durante a qual o evento ocorre de D e tomando os pontos $d_1 = D/10$ e $d_2 = 9D/10$ a partir do início do evento, a resolução espacial é a distância entre d_1 e d_2. Para um evento refletivo é considerado a metade da distância total (D/2).

  Uma limitação fundamental para qualquer OTDR convencional é o equilíbrio que tem que existir entre a faixa dinâmica e a resolução espacial, dado que o sinal recebido, s(t), é a convolução do sinal de prova,

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121516/CA

p(t), a resposta impulsional do receptor, r(t), e a resposta impulsional do retroespalhamento na fibra, f(t).

$$s(t) = p(t) * r(t) * f(t) \tag{2-2}$$

A resolução da medida é degradada dependendo do tempo da resposta impulsional do receptor (associado com a largura de banda do fotodetector) e do tempo do sinal de prova (o qual geralmente é um pulso quadrado). Neste caso, assumindo que o fotodetector não pode ser mudado, a melhor resolução é alcançada quando a duração do pulso é a menor possível. 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 pelo comprimento do pulso utilizado. Uma vez alcançada a máxima potência, o SNR (Signal-to-Noise-Ratio) só pode ser melhorado aumentando o comprimento do pulso, o que degrada a resolução do sinal medido. Técnicas conhecidas na literatura como a correlação ajudam a superar esta limitação [16]. Na Figura 2.9 é observada a diferença entre duas medidas com diferentes larguras de pulso para um mesmo detector. Pode-se observar em detalhe a diferença de resoluções e a SNR dependendo do comprimento do pulso.

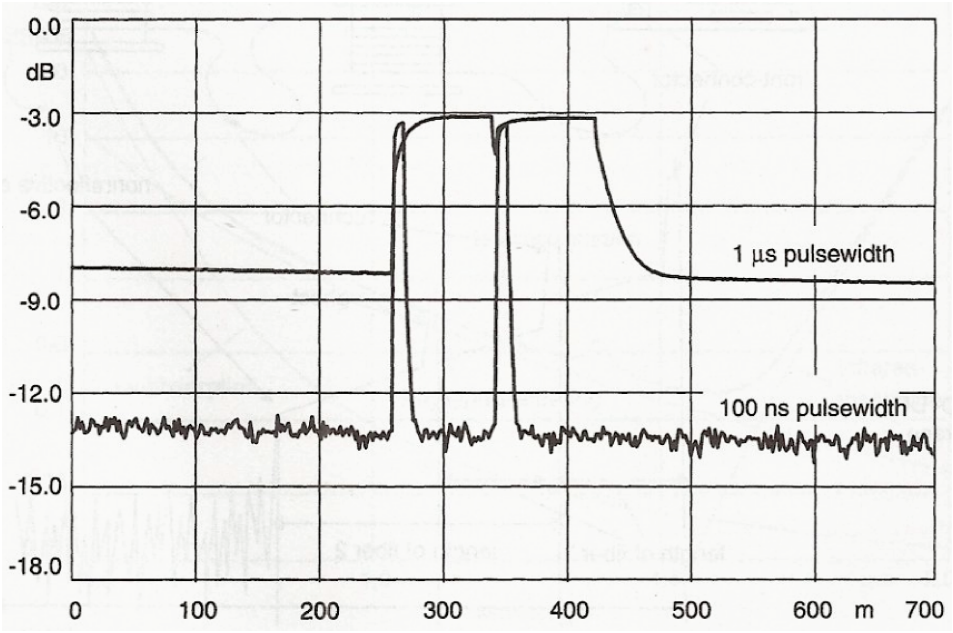

Figura 2.9: Diferença entre resolução e SNR para comprimentos de pulso diferentes [15] (pg.445).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121516/CA

Incertezas durante a medição

Quando são realizadas medidas com o OTDR, algumas irregularidades aparecem, seja por causa da rede física ou devido aos parâmetros utilizados na medida. Essa informação é de grande importância quando uma supervisão precisa é desejável.

Uma das incertezas que podem ser observadas durante uma medição é a reflexão fantasma. Essas reflexões se caracterizam como picos mostrados no display do OTDR num lugar onde não existe uma reflexão. As reflexões fantasmas aparecem devido a múltiplas reflexões num mesmo caminho. Por exemplo, quando um ponto de reflexão "L_2"reflete muita potência, no caminho de volta para o OTDR a luz pode encontrar um outro ponto de reflexão "L_1", que gera um pulso fantasma no caminho de ida. Quando este pulso fantasma reflete no ponto inicial "L_2", este volta para o OTDR novamente gerando uma reflexão fantasma. A posição de uma reflexão fantasma pode ser calculada com a seguinte equação:

$$l_{fantasma} = 2l_2 - l_1 \tag{2-3}$$

Na Figura 2.10 pode-se observar uma reflexão fantasma gerada pelos conectores [15].

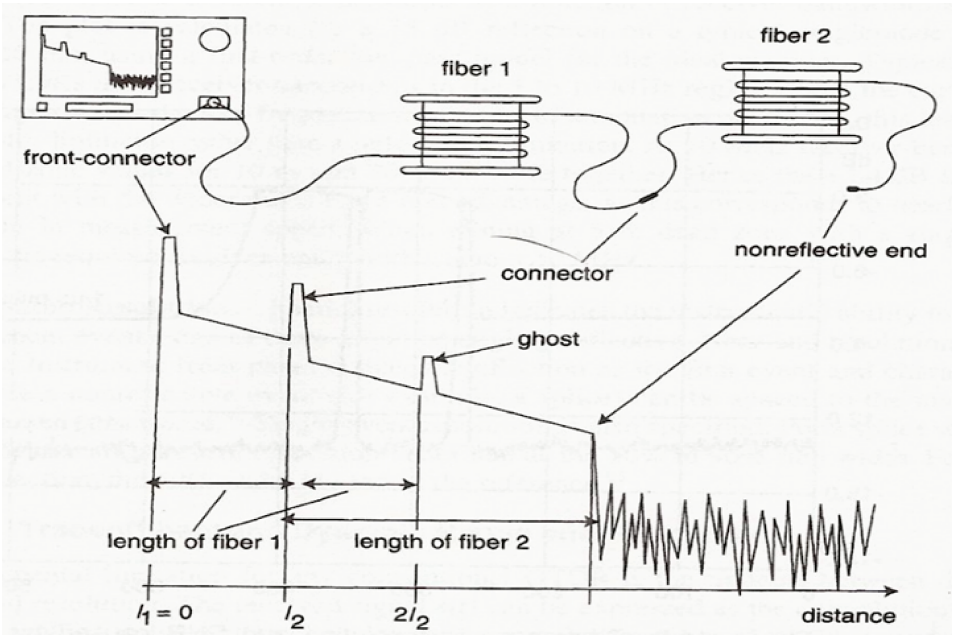

Figura 2.10: Exemplo de uma Reflexão Fantasma [15] (Pag.446).

Uma outra ambigüidade observada no momento de realizar medições com o OTDR acontece quando duas fibras com diferentes coeficientes de espalhamento são colocadas uma após a outra. Neste caso, se o coeficiente

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121516/CA

de espalhamento da primeira fibra é menor do que o da segunda, o display do OTDR mostrará um ganho que, na realidade, não acontece. É importante lembrar que o OTDR calcula a perda de acordo com a diferença de luz retroespalhada e não utilizando a potência real da luz.

Técnicas de supervisão para redes TDM-PON [3], [17]

As técnicas de supervisão de redes TDM-PON podem ser classificadas, devido às suas arquiteturas, como Técnicas Ponto a Ponto e Técnicas Ponto Multiponto.

Supervisão Ponto a Ponto

No caso de uma técnica ponto a ponto as ramificações são medidas individualmente. O Bypass pelo divisor de potência é feito com um equipamento ativo ou passivo. Utilizando este método, a quantificação e a localização se tornam tarefas fáceis de ser realizadas dado que as ramificações são observadas uma de cada vez.

Bypas ativo

O *Bypass* ativo pode ser realizado utilizando-se seletores ópticos como pode ser observado na Figura 2.11. Tais seletores podem ser posicionados na CO ou no RN e são controlados por um sinal de controle. A utilização de refletores no final das ramificações facilita a tarefa de supervisão.

No caso em que os divisores de potência são posicionados fora da CO ou RN o problema de energia para os seletores tem que ser solucionado. Para o acoplamento do comprimento de onda de monitoramento é utilizado um WDM ou um WINC (*Wavelength Insensitive Coupler*). Estas técnicas de supervisão dependem muito da topologia da rede.

Bypass Passivo

Como pode ser observado na Figura 2.12, cada ramificação tem um comprimento de onda diferente controlado por um OTDR sintonizável. Além disso, o bypass sobre o divisor de potência é feito utilizando um WDM (*wavelength Mux/Demux*). Dado que este método não utiliza componentes eletrônicos não é necessária uma alimentação elétrica.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121516/CA

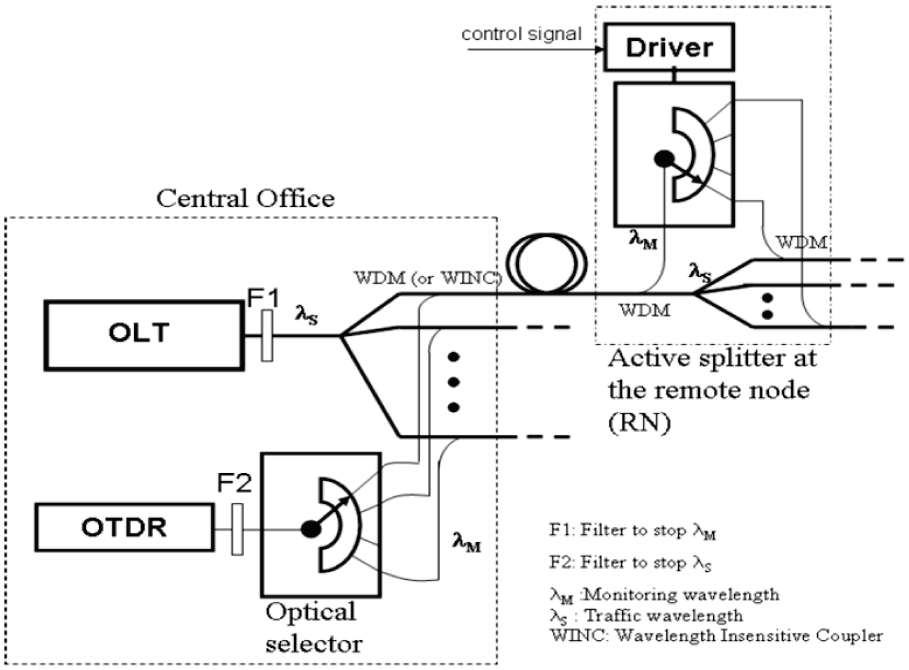

Figura 2.11: Bypass Ativo no CO e no RN [3].

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121516/CA

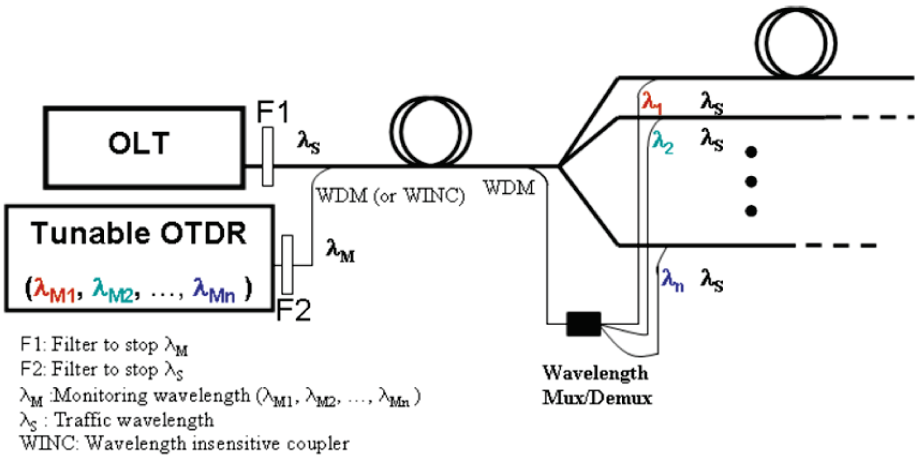

Figura 2.12: Bypass Passivo utilizando um T-OTDR [3].

Função de OTDR Integrada

A idéia por trás desta solução é medir o sinal de retroespalhamento causado pela luz no sentido *upstream* do laser localizado na ONU/ONT. Com isto, o comprimento de onda utilizado para o monitoramento é o mesmo utilizado no "upstream", e a necessidade de conectar equipamentos separados para a supervisão é eliminada.

Esta técnica pode utilizar as rajadas de dados transmitidos no *upstream´* como o sinal de supervisão ou pode utilizar pulsos como um OTDR conven-

cional. O monitoramento tem que ser feito quando não há tráfego na rede de *upstream*.

Dado que a técnica não é centralizada, a identificação de uma quebra na fibra se torna uma tarefa mais difícil neste esquema.

Supervisão Ponto-Multiponto

Neste caso o OTDR é usado na rede diretamente desde o OLT sem realizar o *bypass* sobre o divisor de potência. A supervisão da rede com tráfego é realizada em comprimentos de onda diferentes aos de transmissão e recepção. A banda recomendada é, tipicamente, a banda U [18].

Análise Global

A Análise Global é a forma mais simples de realizar o monitoramento da rede. Neste caso é feita a comparação de duas curvas do OTDR, uma curva que é medida na hora e uma outra de referência. Essa última pode ter sido medida tanto no final da instalação da rede quanto no momento em que o serviço foi ativado. Na Figura 2.13 pode-se observar o diagrama para uma análise global.

Nesta análise é possível a identificação de falhas realizando uma comparação das amostras obtidas, mas a resolução espacial e a faixa dinâmica limitam o desempenho da técnica.

Em princípio, a diferença das amostras poderia indicar a posição da falha, mas quando se tem uma razão de divisão alta na rede o sinal das diferentes ramificações podem cobrir inclusive uma quebra na fibra. Sabe-se que, para uma divisão de 1:16, uma quebra é invisível com esta técnica.

Técnica Baseada em Refletores de Referência

Esta técnica implica no uso de refletores ópticos na ONU/ONT. Estes refletores podem ser adicionados na rede de diferentes formas. Em um primeiro caso, os refletores são parte do conector final na ONU atuando como FBG (Fiber Bragg Grating) para o sinal de monitoramento na banda U, já em outro, são acionados utilizando um WDM e um conector refletivo como pode ser observado na Figura 2.14.

Basicamente esta técnica nos permite observar a diferença nos picos das reflexões causadas por atenuações ao longo da fibra. A posição do pico refletivo indica a distância da ONT em relação ao CO. Claramente, quando as distâncias entre as ONT são muito parecidas, os picos refletivos confundem o operador.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121516/CA

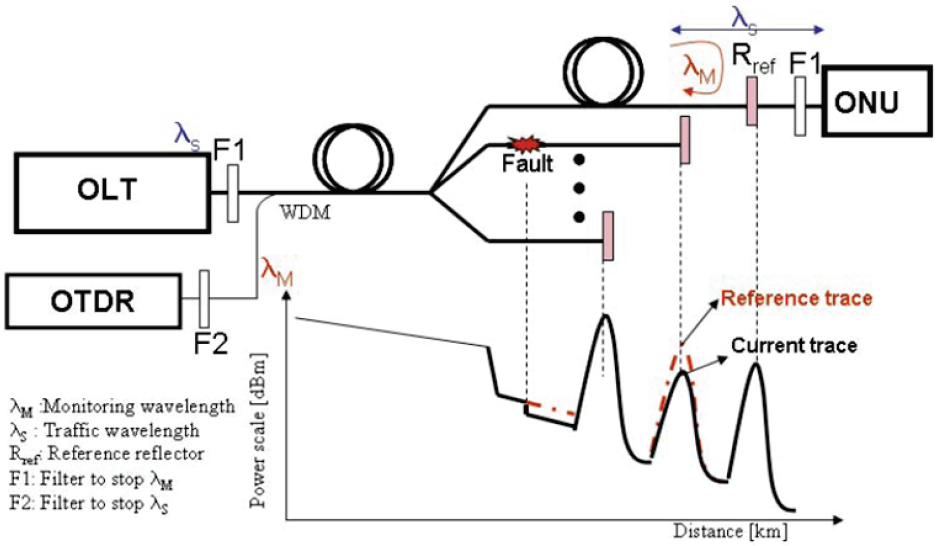

Figura 2.13: Análise Global [3].

Para resolver este problema, um OTDR com alta resolução espacial é utilizado [19]. Por outro lado, esta técnica não permite a localização exata da falha dentro da rede devido à superposição dos sinais nas ramificações.

Apesar de todos os inconvenientes desta técnica, ela é uma das mais utilizadas na supervisão de redes TDM-PON, devido à simplicidade e fácil implementação.

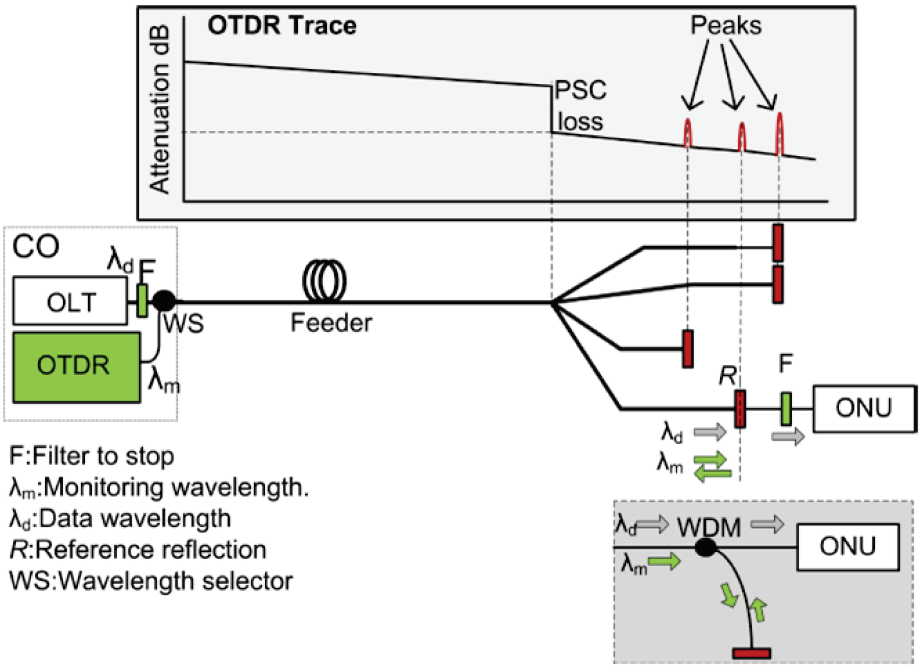

Figura 2.14: Sistema de Supervisão Baseado em Refletores de Referência [17].

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121516/CA

Técnica de Supervisão utilizando o Brillouin OTDR (BOTDR)

Nesta técnica utiliza-se o BFS (*Brillouin Frequency Shift*) para distinguir as diferentes ramificações da rede. Uma BFS é utilizada para cada uma das ramificações existentes controlando a concentração de dopagem em cada uma das fibras. Quando a potência de pico de uma das ramificações difere da referência, esta é analisada independentemente com o BFS específico desta. Em [20] a técnica é avaliada experimentalmente para uma PON 1x8.

Infelizmente, esta técnica requer uma fabricação de fibra diferente para cada usuário e, por isto, não pode ser utilizada em qualquer PON. Além disso, o CAPEX é extremamente alto. Na Figura 2.15 pode-se observar princípio de funcionamento desta técnica.

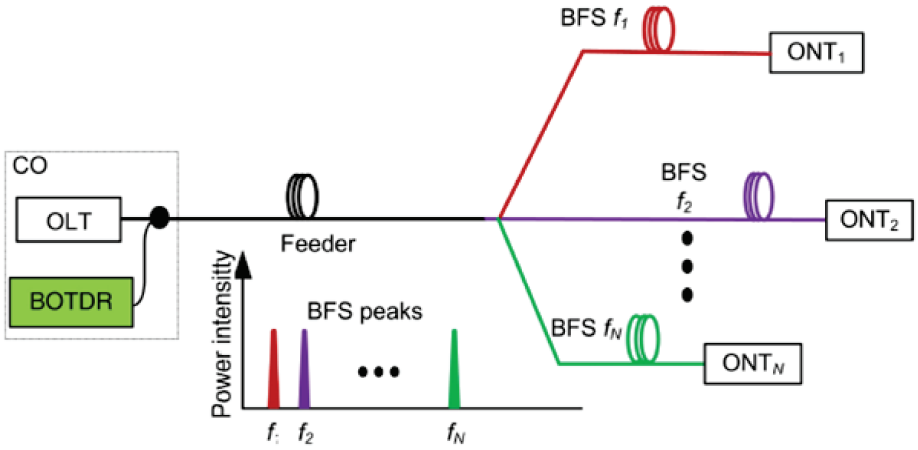

Figura 2.15: Principio de Funcionamento do Sistema de Supervisão utilizando um BOTDR [17].

Técnicas de supervisão para redes WDM-PON

As redes WDM-PON continuam em desenvolvimento, logo, ainda não possuem uma normatização, o que gera diversos trabalhos na literatura propondo diferentes arquiteturas de rede. Uma questão chave para a padronização destas redes é o tranceptor. Tanto no OLT como no ONU/ONT ele deve ser independente do comprimento de onda (sem cor). Diversas fontes sem cor foram propostas para sistemas WDM-PON, são elas: (ASE)-*injected Fabry-Perot Laser-Diode* (FP-LD) [21]; *Reflective Semiconductor Optical Amplifier* (RSOA) [22],[23]; e *Tunable Lasers* [25],[24].

Por outro lado, a variação na rede geralmente não afeta o ODN. Conseqüentemente, as técnicas de supervisão para redes WDM-PON são compatíveis com a maioria dos trabalhos propostos na literatura.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121516/CA

Na supervisão de redes WDM-PON o problema ponto multiponto é resolvido através da utilização de um AWG. Contudo, o monitoramento é feito diretamente numa ramificação da rede e, a seguir, encontra-se uma revisão de algumas técnicas observadas na literatura.

Supervisão em tempo real incorporando um filtro DWDM [26]

Esta técnica é baseada na filtragem do espectro do OTDR (dado que este é banda larga) com um DWDM. Depois da filtragem do sinal o comprimento de onda é selecionado com um OSW (*Optical Switching Wavelength*) e acoplado para o ODN na CO. Foi demonstrado [26] que os resultados podem ser avaliados, com uma transmissão de 2,5 Gb/s, para uma distância máxima de 27km. Nesta técnica, a penalidade do BER é desprezível quando o monitoramento é realizado desde que alguns cuidados para não afetar o tráfego normal da rede sejam levados em conta, como por exemplo a utilização de um isolador na saída do canal de transmissão e a utilização de um comprimento de onda diferente para o monitoramento. Além disso, um filtro passa banda é utilizado em cada ONU. Na Figura 2.16 pode ser observado o cenário proposto pela técnica.

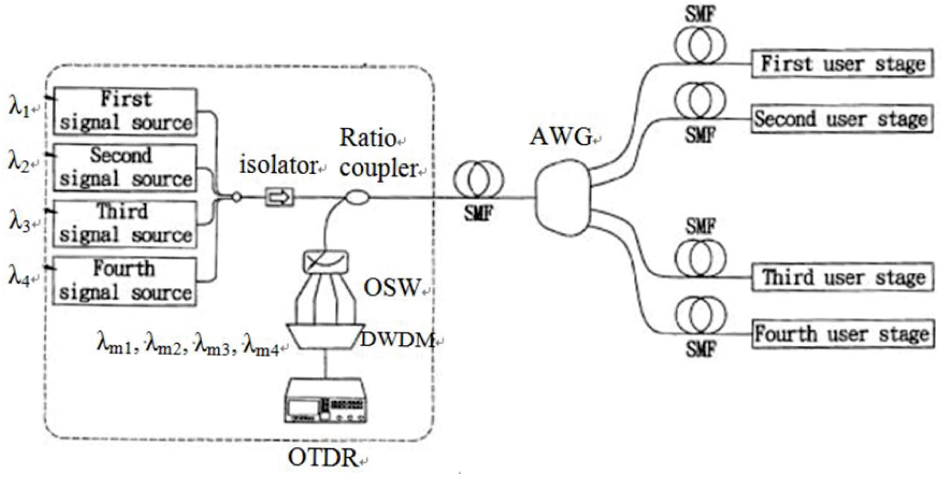

Figura 2.16: Supervisão utilizando um filtro DWDM [26].

Localização da falha reutilizando a fonte de downstream [27]

Nesta técnica o módulo de supervisão é instalado no CO. São utilizados um TBPF (*Tunable Bandpass Filter*), uma unidade de controle, um gerador de pulsos e um OTDR receptor. Quando a unidade de controle detecta uma perda de potência na luz de upstream o canal de downstream é comutado

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121516/CA

para transmitir os pulsos do OTDR. A diferença de freqüência entre o sinal de monitoramento e o sinal de dados é menor que 4GHz, porém a mudança de freqüência é desprezível para o canal do AWG. Quando uma falha acontece na fibra de alimentação, a unidade de controle seleciona um canal aleatoriamente e realiza o teste de supervisão. Este método interrompe o tráfego normal da rede quando uma falha acontece, mas é um método rentável já que o mesmo transmissor é utilizado como fonte para a realização do monitoramento. Cabe mencionar que esta técnica é atualmente utilizada pela KT na rede WDM-PON na Coréia do Sul [28]. Na Figura 2.17 pode-se observar o diagrama de blocos proposto pela técnica.

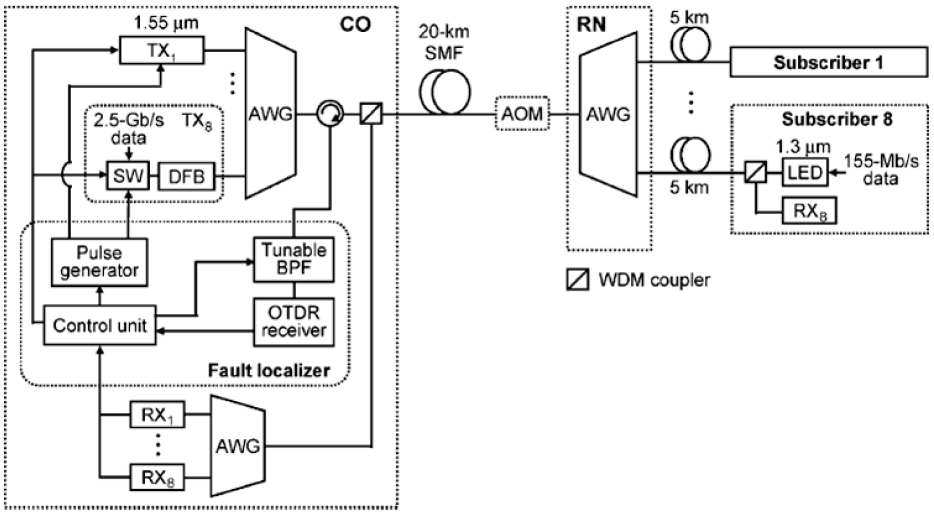

Figura 2.17: Diagrama de blocos para o monitoramento reutilizando as fontes de downstream [27].

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121516/CA

TOTDR para monitoramento de redes WDM-PON baseado em modulação direta no SL-RSOA (Self-Injection-Locked RSOA) [29]

Esta técnica propõe um OTDR sintonizável em 30 nm com uma resolução espacial de 50m. O espectro do RSOA (*Reflective Semiconductor Optical Amplifier*) é filtrado por um TFBG (*Tunable Fiber Bragg Grating*) e refletido. Este sinal de retroalimentação, por sua vez, é recebido pelo RSOA, amplificado e acoplado ao ODN para realização do monitoramento da rede. Além disso, um controle de polarização é utilizado na saída do RSOA para que possa ser realizada uma estatística da potência do sinal. Na Figura 2.18 pode-se observar a configuração descrita acima. Para a demonstração experimental um pulso de 500ns foi utilizado obtendo uma faixa dinâmica de 18.8dB. A montagem experimental pode ser observada na Figura 2.19.

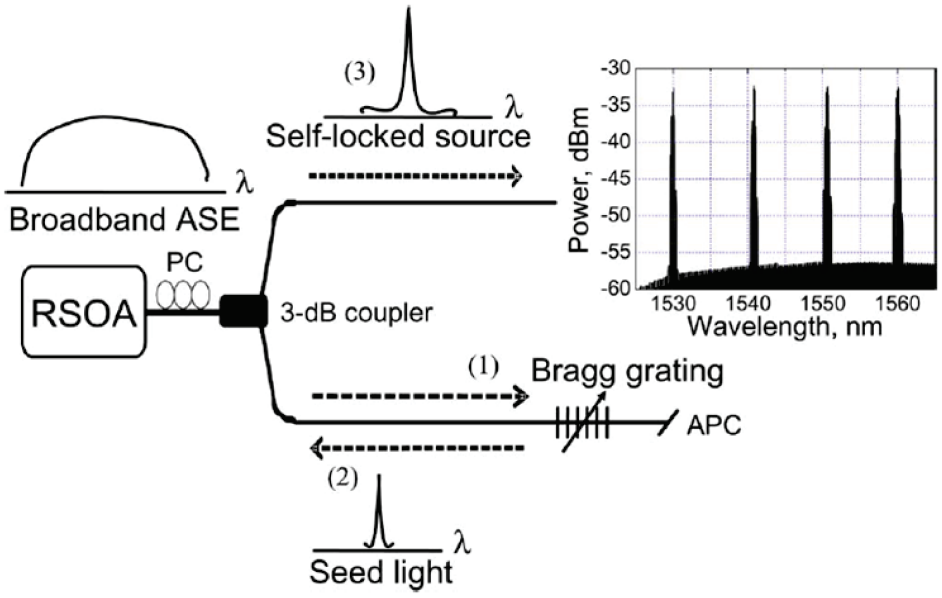

Figura 2.18: Sintonização e amplificação do comprimento de onda do SL-RSOA [29].

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121516/CA

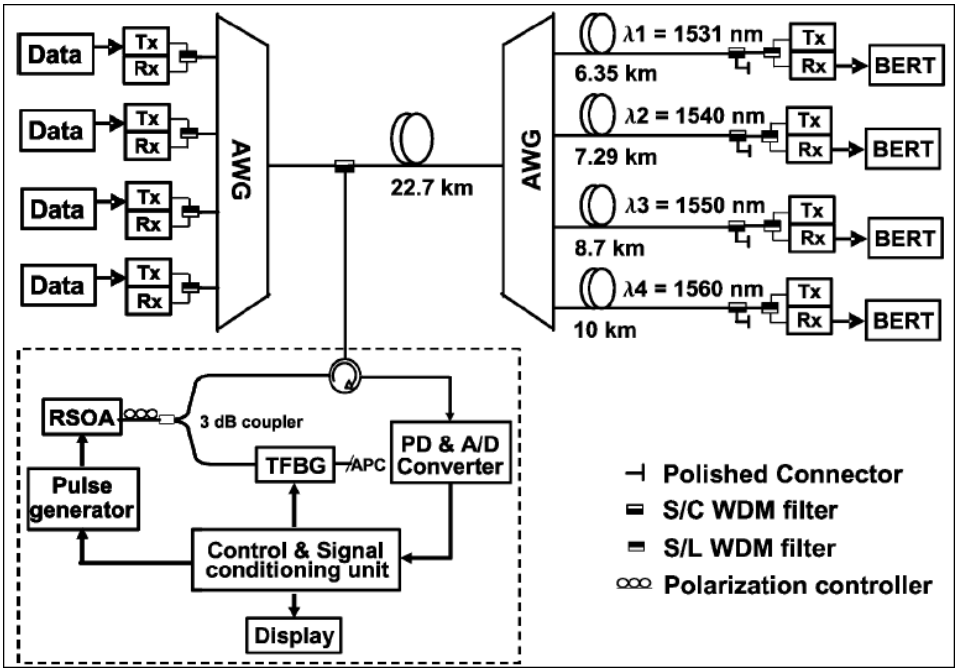

Figura 2.19: Montagem experimental do TOTDR baseado em SL-RSOA [29].

Técnica de localização de falha utilizando um F-P LD como luz de prova [30]

Esta técnica propõe um TOTDR utilizando o WL F-P LD (*Wavelength-locked Fabry-Perot Laser Diode*) como fonte de luz [21]. O cenário proposto consiste numa fonte de luz de faixa larga, um circulador, um TBPF (*Tunable Bandpass Filter*), o F-P LD, um gerador de pulsos, um sistema de controle, um

fotodetector PIN, um amplificador elétrico, um conversor A/D, um processador de sinais e um display. O TBPF é utilizado para selecionar o comprimento de onda do sinal de prova e é controlado pelo sistema de controle. A luz do BLS (*Broadband LASER Source*) é filtrada e injetada no F-P LD, esta é modulada pelo gerador de pulsos e inserida no ODN. A luz retroespalhada, passa pelo circulador e é detectada pelo fotodiodo PIN. Posteriormente, este sinal é amplificado, processado e mostrado no display. A Figura 2.20 mostra detalhadamente o diagrama explicado à cima. A técnica foi avaliada experimentalmente utilizando uma largura de pulso de 1us e uma freqüência de repetição de 2KHz, obtendo uma faixa dinâmica de 13dB e uma resolução espacial de 100m.

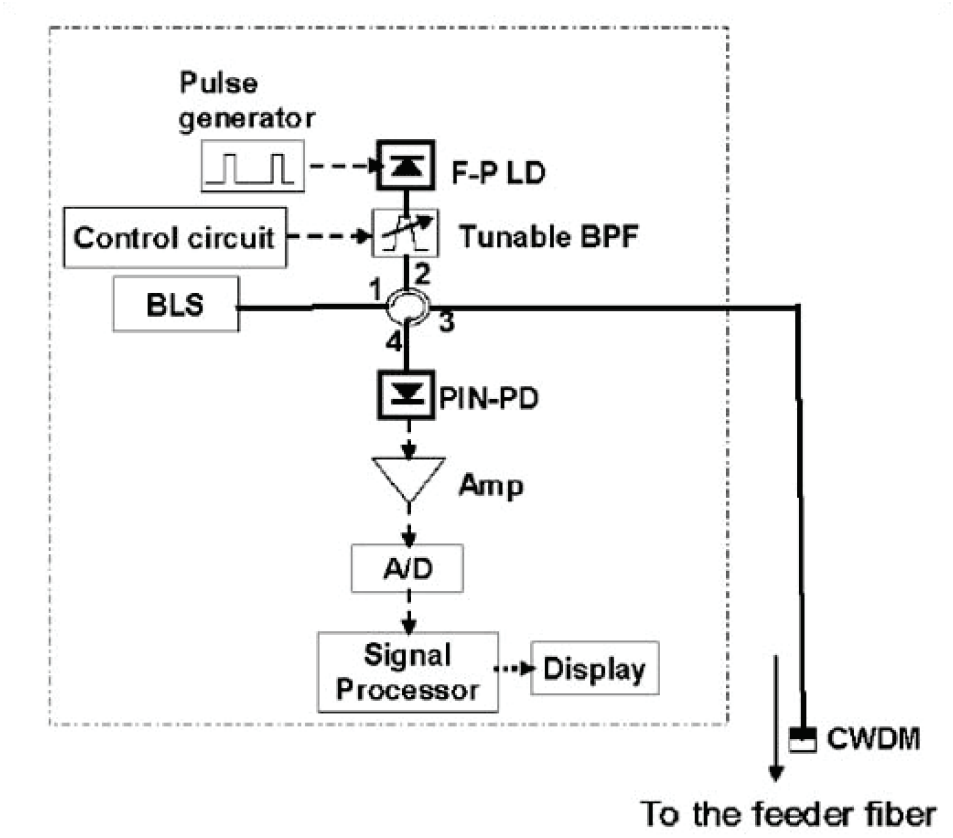

Figura 2.20: Cenário proposto para localização de falha com um F-P LD como luz de prova [30].

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121516/CA