

4 Resultados

4.1 Monitoramento WDM-PON utilizando a ASE de um OTDR comercial

Quando este trabalho foi pensado, varias técnicas de monitoramento foram experimentadas. Uma delas foi a utilização do espectro do OTDR comercial dentro da banda de monitoramento. Na Figura 4.1 é apresentado o espectro do OTDR na banda U, onde só alguns canais do AWG são cobertos pelo espectro.

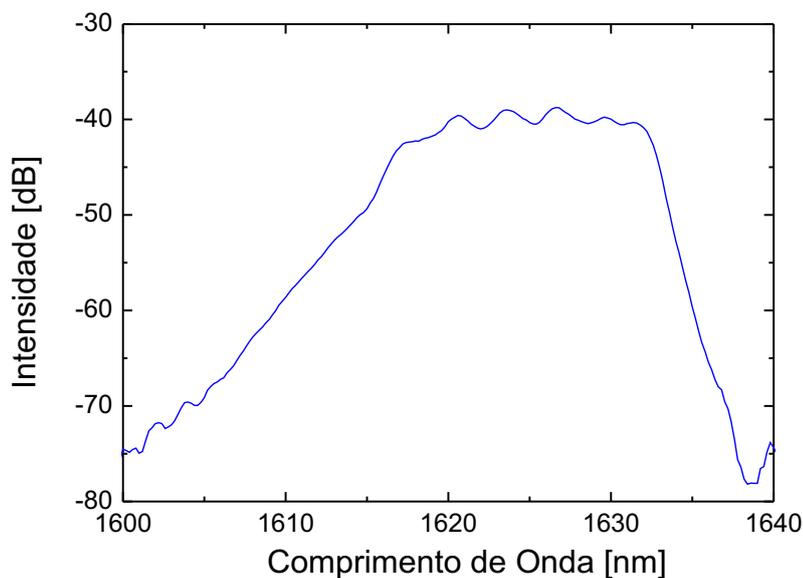


Figura 4.1: Espectro do OTDR na banda U.

A Figura 4.2 mostra a curva traçada pelo OTDR quando o seu pulso é utilizado. Foram monitorados apenas 8 canais do AWG e os problemas da análise global de monitoramento de redes TDM-PON, onde a luz retroespalhada de todos os canais é considerada pelo OTDR ao traçar a curva, são observados aqui.

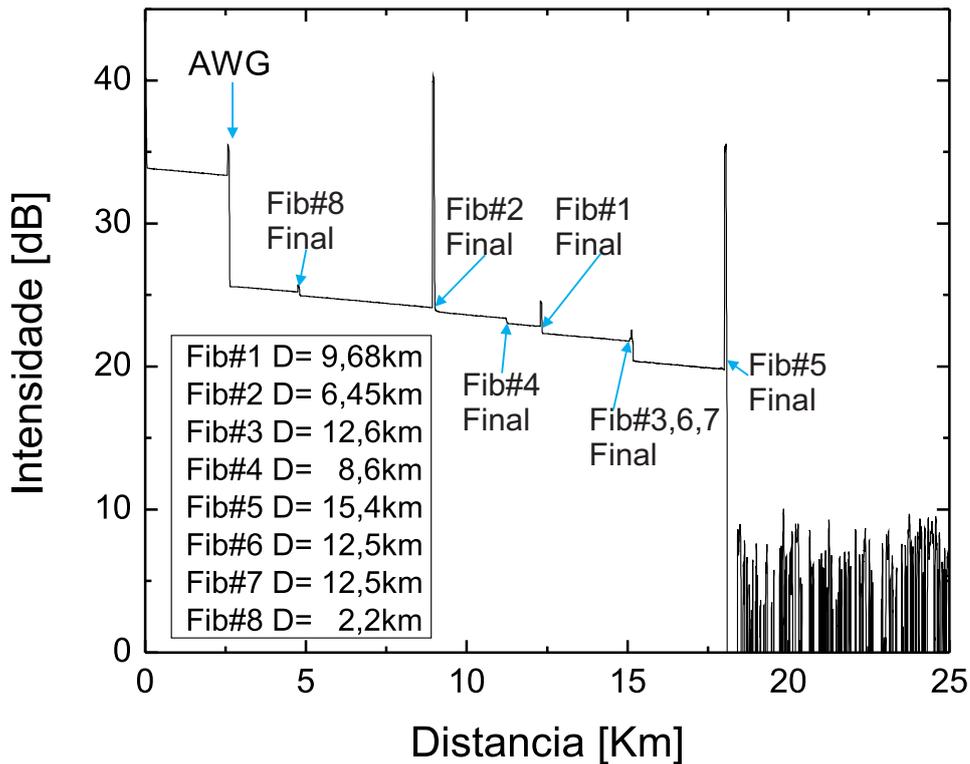


Figura 4.2: Monitoramento de uma rede WDM-PON utilizando um OTDR convencional.

Pode-se observar, na Figura 4.2, que a perda de inserção do AWG é de 7,7 dB, mas aproximadamente 1,5 dB são devido à passagem da luz do espectro total pelos 16 canais onde só 8 estão conectados. Assumindo uma distribuição uniforme, metade da potência é perdida (3 dB), mas dado que o OTDR considera o caminho de ida e volta (neste caso só a metade da luz volta pelos 8 canais) só 1,5 dB são considerados na curva traçada, deixando uma perda de inserção do AWG de aproximadamente 6,2 dB.

Podemos dizer que a situação neste método é melhor do que num monitoramento de redes TDM-PON onde a perda de um divisor de potência de razão de 1:32 com 8 fibras conectadas seria de 10,5 dB enquanto com as 32 fibras conectadas seria 7,5 dB. De qualquer forma o problema de identificação das ramificações persiste. Pode-se observar que a queda de 3 fibras com a mesma distância no final da rede é indistinguível (fibras #3, #6 e #7).

4.2

Monitoramento filtrando a ASE do OTDR comercial

Para evitar o problema da análise global, uma outra técnica foi testada e a montagem experimental desta pode ser observada na Figura 4.3.

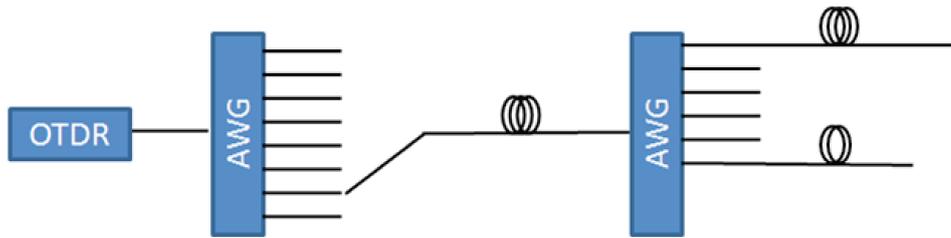


Figura 4.3: OTDR filtrado para monitoramento de redes WDM-PON.

Nesta técnica, o espectro do OTDR é filtrado por um AWG. Uma vez que a luz é filtrada, ela entra na rede WDM-PON onde o monitoramento de apenas um canal é realizado. Também foram observados alguns problemas associados à esta técnica. Devido à filtragem da luz feita pelo AWG, pouca potência é enviada para a rede. Um pulso de $1 \mu\text{s}$ teve que ser utilizado para obter uma faixa dinâmica razoável e, como o alargamento do pulso reduz a resolução espacial, a localização da falha foi dificultada, que é justamente o objetivo do trabalho. Os resultados obtidos desta medição para dois canais são observados na Figura 4.4. No canal B pode-se observar a simulação de uma falha realizada com um VOA (Variable Optical Attenuator).

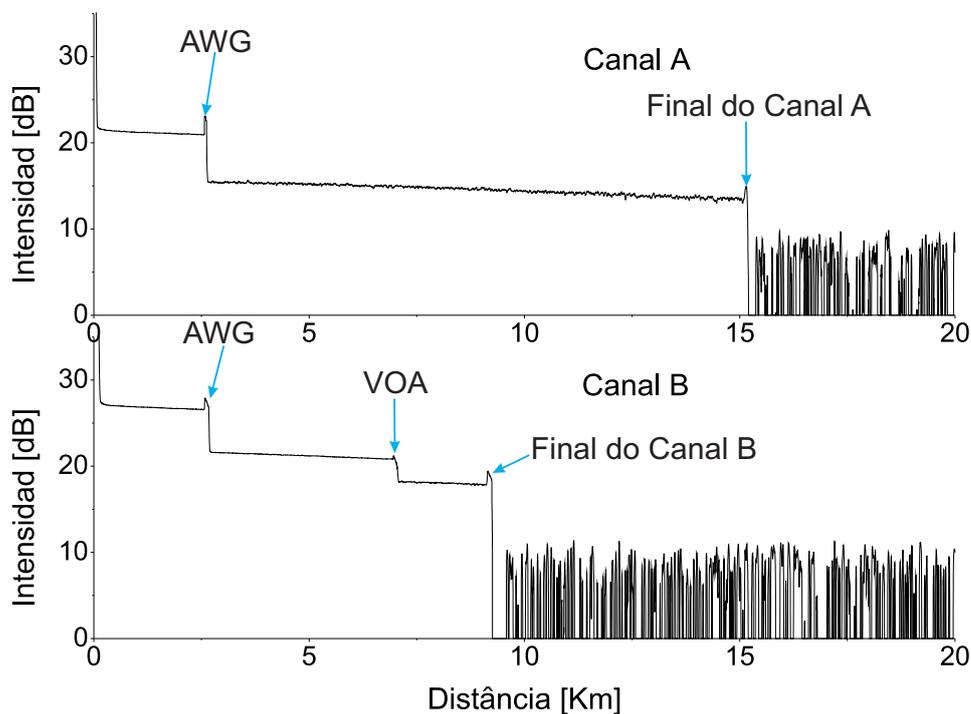


Figura 4.4: Traço do OTDR filtrado para uma WDM-PON de 32 canais com 2 canais conectados.

4.3 Monitoramento utilizando um OTDR sintonizável

Com o objetivo de resolver estes problemas uma nova técnica foi realizada, o OTDR sintonizável foi montado no laboratório. Esta configuração foi previamente apresentada no capítulo anterior e é mostrada novamente na Figura 4.5.

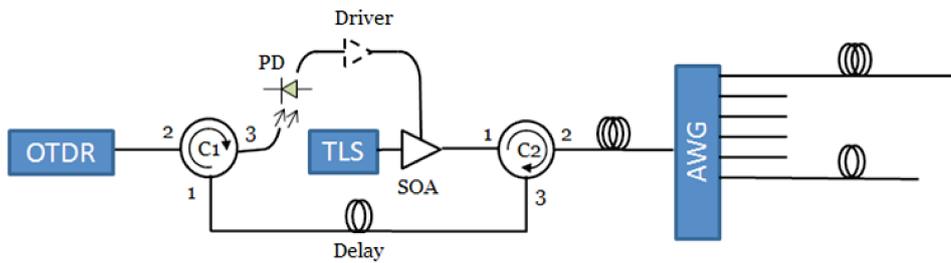


Figura 4.5: OTDR sintonizável para supervisão de redes WDM-PON.

O esquema mostrado acima foi testado com diferentes fontes LASER sintonizáveis. Diferentes larguras de linha (utilizando controle de coerência) foram utilizadas dentro do canal da AWG e, conforme o esperado, a largura de linha da fonte, assim como a largura de banda do receptor e a largura do pulso de prova, é um parâmetro importante para a suavização da curva do OTDR sintonizável. O CRN (*Coherent Rayleigh Noise*) ou ruído de desvanecimento (*Fading Noise*) foi observado nas medidas. Este ruído já tinha sido observado em medidas realizadas com C-OFDR (*Coherent Optical Frequency-Domain Reflectometry*) e C-OTDR (*Coherent Optical Time-Domain Reflectometry*) [31], [32], [33], [34] e [35]. Os resultados obtidos para diferentes fontes LASER e os gráficos estatísticos do desvio a partir dos dados medidos para a reta ajustada (traço ideal do OTDR) são apresentados nas Figuras 4.6 e 4.7 respectivamente. Para fins de comparação, foi realizada uma medida bypassando o AWG. Essa medida utiliza a largura de banda completa do OTDR comercial além da mesma largura do pulso de prova e tempo de medição.

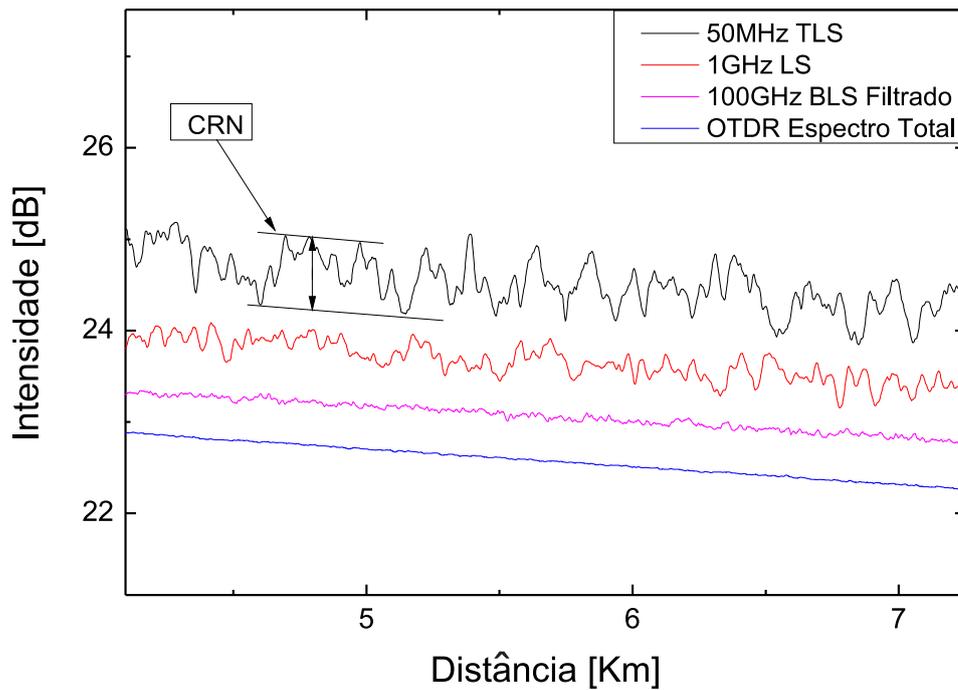


Figura 4.6: CRN para diferentes larguras de linha.

O ruído de desvanecimento que aparece nas medições é inerente ao retroespalhamento Rayleigh, e é provocado pela interferência entre um grande número de sinais gerados por diferentes pontos de reflexão vizinhos ou pela diferença no estado de polarização da luz. Esses fatores causam uma diferença entre a fase do sinal e sua intensidade, que se manifesta como flutuações na amplitude da curva do OTDR. Diferentemente do ruído provocado pelo receptor, o CRN não pode ser reduzido aumentando o tempo de medição, mas outras técnicas podem ser utilizadas [31], [34] e [35].

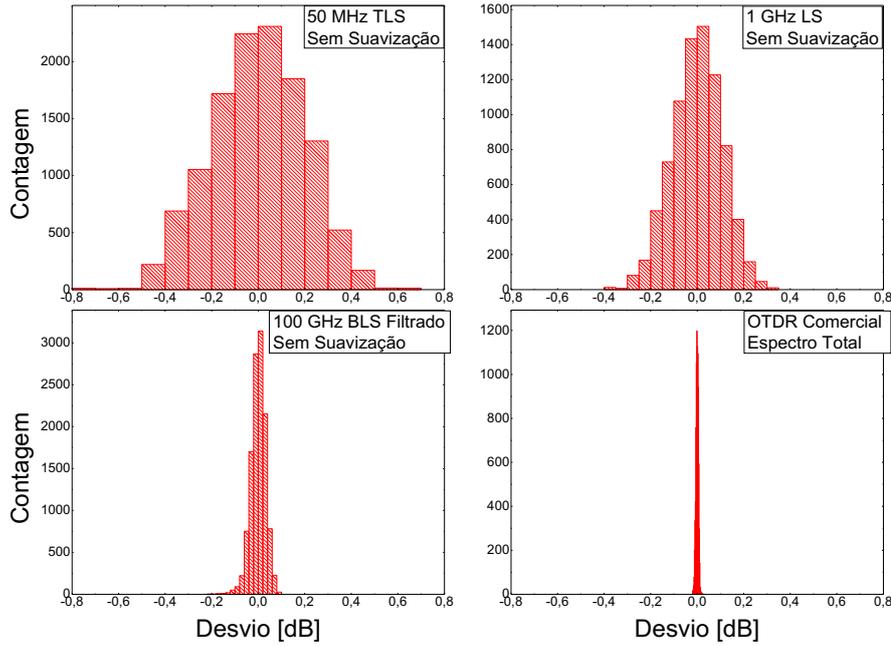


Figura 4.7: Distribuição estatística da intensidade do sinal de retrospalhamento Rayleigh para a reta ajustada com diferentes larguras de linha.

O desvio padrão do CRN gerado pela fração do sinal de Rayleigh é dada pela seguinte equação [35]:

$$f_{CRN} = \sqrt{\left(\frac{V_g}{4\Delta z \Delta \nu}\right)} \quad (4-1)$$

V_g , Δz e $\Delta \nu$ são a velocidade de grupo na fibra, a resolução espacial, e a largura de linha da fonte respectivamente. As porcentagens teóricas do CRN utilizando a equação mencionada acima para $V_g = 2 \times 10^8$ m/s, $\Delta z = 10$ m, $\Delta \nu = 50$ MHz, 1 GHz e 100 GHz são 31,6%, 7,07% e 0,71% respectivamente. Como pode-se observar nos resultados, algumas técnicas de melhoria são necessárias para reduzir os efeitos de ruído no sinal de retrospalhamento Rayleigh. Para atingir estes objetivos, conhecendo as origens do ruído, duas técnicas foram utilizadas, a varredura de frequências dentro do canal (frequency sweep) e o embaralhamento da polarização (polarization scrambling). Como foi provado em [35], o CRN pode ser reduzido de várias formas. Entre elas, podemos mencionar a redução da largura de banda do receptor e o aumento do comprimento do pulso de prova, mas estes métodos diminuem a resolução espacial do sistema de monitoramento que é muito importante na hora de localizar a falha na rede e, por isso, tem que ser a melhor possível. A varredura em frequências foi realizada dentro da janela dos 100 GHz do canal do AWG para que as medidas não interferissem nos canais vizinhos. Na Figura 4.8 pode-se observar o sinal de retrospalhamento Rayleigh para as diferentes técnicas

de mitigação do ruído. Para realizar estas medidas, foi utilizada uma largura de linha de 1GHz. A distribuição estatística em torno da reta ajustada destas técnicas é apresentada para diferentes larguras de linha na Figura 4.9.

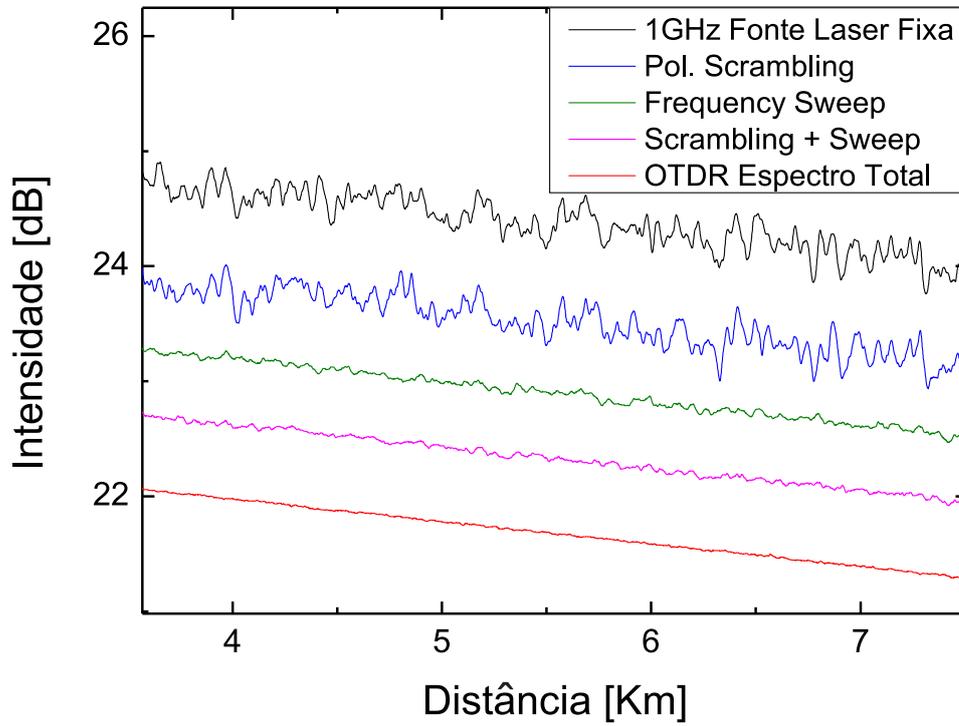


Figura 4.8: Retroespalhamento Rayleigh para diferentes técnicas de mitigação para o ruído com uma largura de linha da fonte de 1GHz.

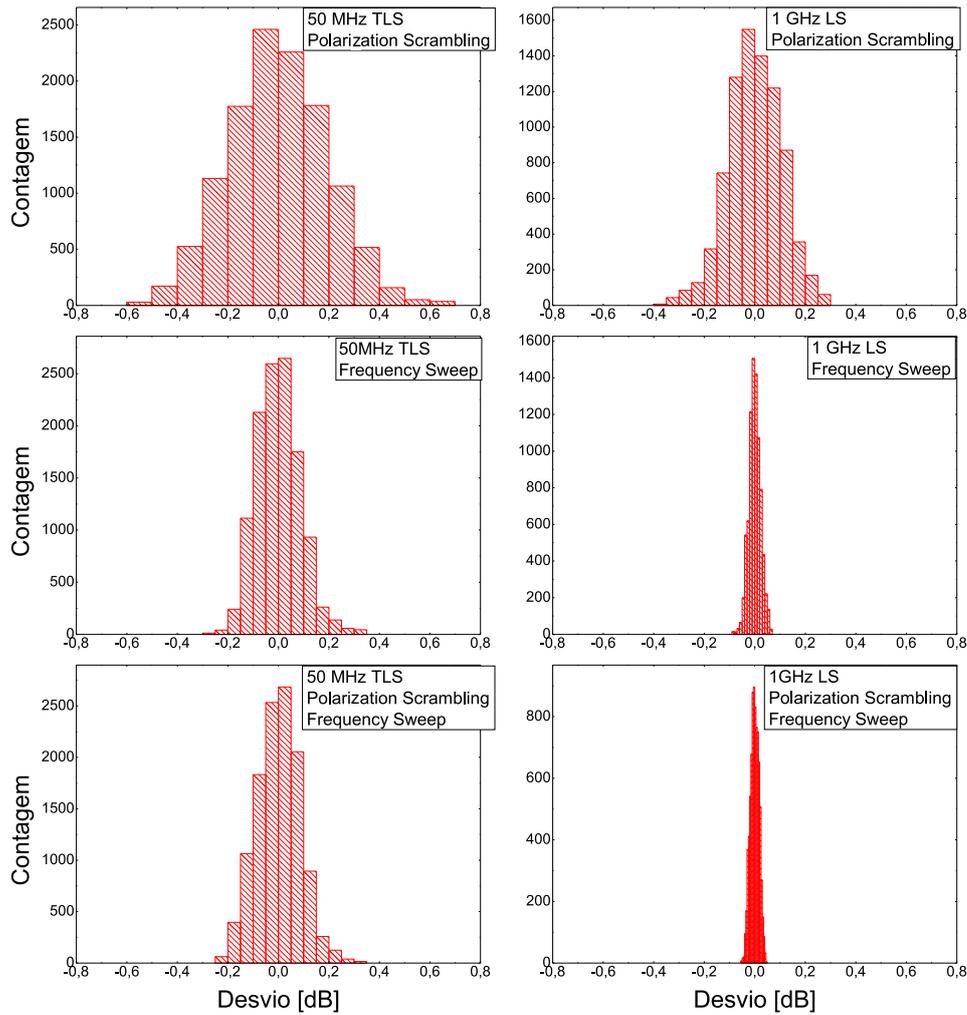


Figura 4.9: Distribuição estatística da intensidade do sinal de retroespalhamento Rayleigh para a reta ajustada, utilizando diferentes técnicas de mitigação para o ruído e diferentes larguras de linha.

Como é possível observar nos resultados, a varredura de frequências dentro do canal do AWG e o alargamento da largura de linha de 1 GHz utilizando modulação em fase (coerência de controle) a qual é uma função do LASER, fornece resultados melhores em comparação a um laser de banda larga de 100 GHz (BLS filtrado). O embaralhamento da polarização teve um efeito pouco significativo devido ao tipo de detecção utilizada (detecção de intensidade incoerente). Esta técnica é muito mais efetiva em detecção coerente, onde o estado de polarização do sinal detectado varia enquanto a referência se mantém constante. Devido à melhoria no esquema ser pouco visível, o embaralhamento de polarização não foi utilizado na demonstração experimental, evitando assim a perda extra desse equipamento na configuração.

4.4 Supervisão de uma rede WDM-PON

A fim de completar os resultados e a demonstração da funcionalidade do esquema apresentado, uma rede WDM-PON foi simulada no laboratório. A rede possui uma fibra de alimentação de 2,3 Km e, no RN, o AWG (testado e apresentado em capítulos anteriores) distribui 32 canais. Destes 32 braços, só 4 serão utilizados para a demonstração do monitoramento. Eles possuem comprimentos de 12,45, 4,76, 8,57 e 15,3 Km respectivamente e são canais adjacentes do AWG. O número reduzido de canais monitorados não afeta na demonstração já que o ganho do espectro do SOA cobre todos os canais do AWG na banda utilizada para o monitoramento. Deixando as bandas C e L para realização da transmissão e recepção de dados, a banda S foi utilizada para realizar o monitoramento das diferentes ramificações. Um laser sintonizável com uma largura de linha de 50 MHz (uma vez que o controle de coerência seja ativado) foi utilizado para realizar a varredura em frequências dentro do canal do AWG. Os resultados obtidos para os canais 1 e 3 são apresentados nas Figuras 4.10 e 4.11 respectivamente.

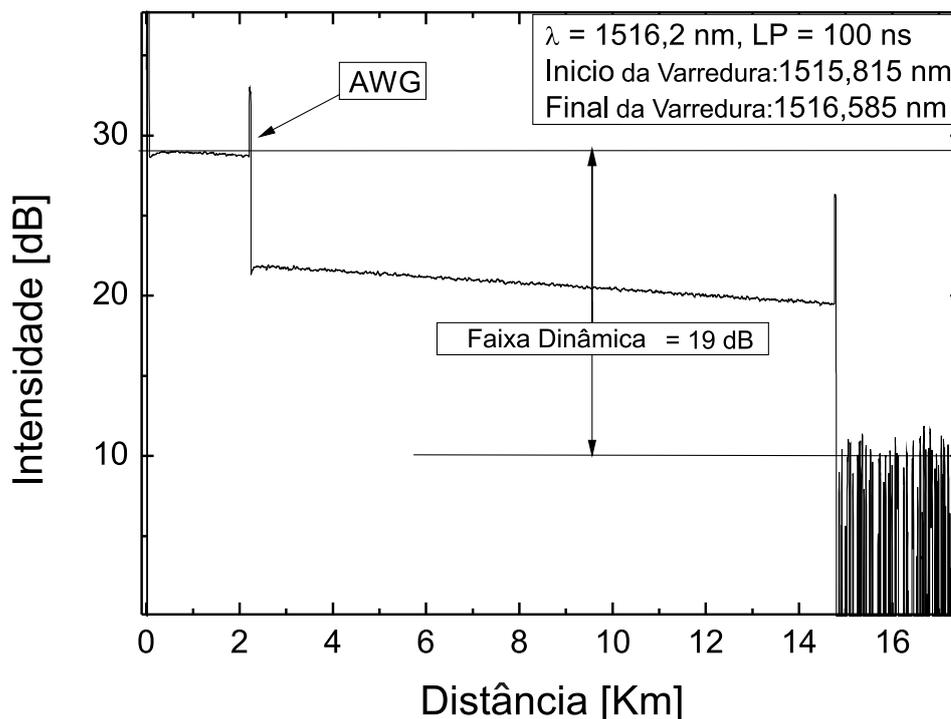


Figura 4.10: Curva de supervisão do canal 1 apresentando a faixa dinâmica e os parâmetros de medição.

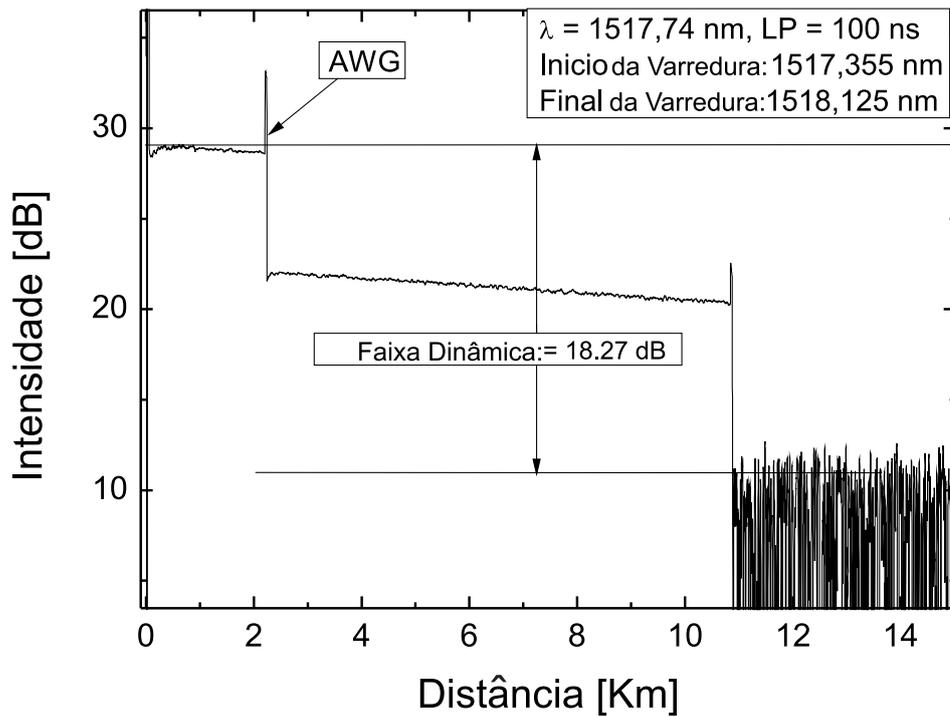


Figura 4.11: Curva de supervisão do canal 3 apresentando a faixa dinâmica e os parâmetros de medição.

A resolução espacial atingida utilizando uma largura de pulso (LP) de 100 ns é de 10 m [36] e [37]:

$$\tau \leq \left(\frac{2n\Delta z}{c} \right) \quad (4-2)$$

Na equação acima, τ é a duração do pulso de prova, Δz é a resolução espacial atingida, n é o índice de refração da fibra e c é a velocidade da luz no vácuo. Finalmente, foi realizada a localização de uma falha na rede. Para simular a falha, um VOA (Variable Optical Attenuator) foi conectado no final do canal 3 seguido de 2,5 Km de fibra. O VOA tem uma perda de inserção < 1.3 dB, e a curva obtida pelo OTDR sintonizável pode ser observada na Figura 4.12.

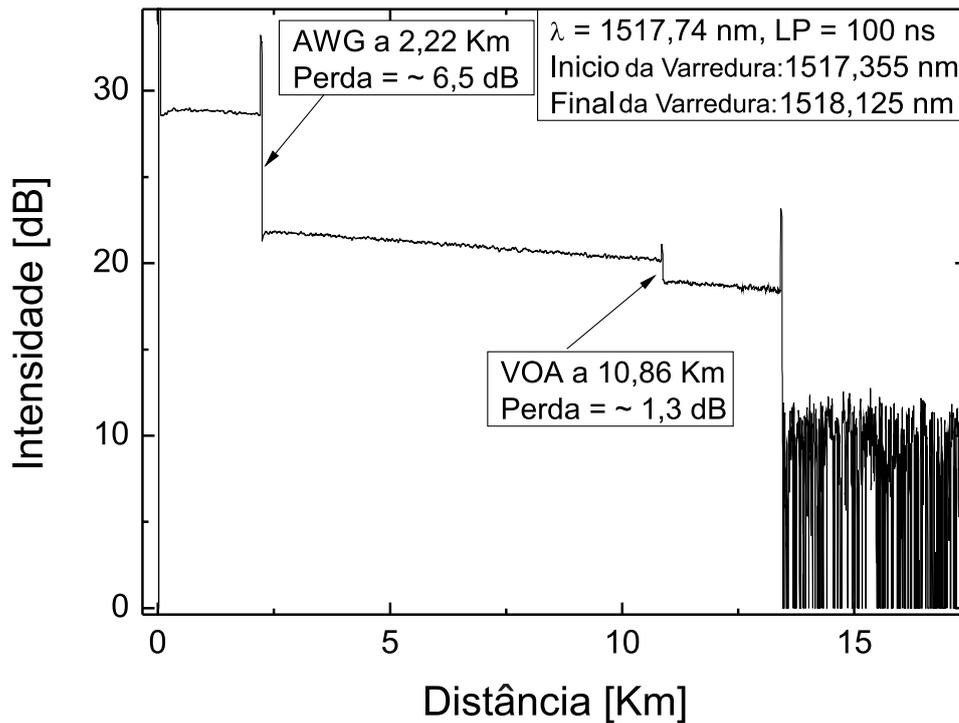


Figura 4.12: Localização da falha utilizando o OTDR sintonizável.

4.5

BER durante a Medição

Realizou-se a medida do BER para 3 tipos de monitoramento diferentes. Para realizar as medidas do BER, uma rede WDM-PON com transmissão de dados a 2,488 Gbps gerada por uma seqüência binária pseudo randômica (PRBS) foi montada no laboratório, por outro lado, para a primeira medida a configuração de monitoramento utiliza o OTDR sintonizável. O diagrama de blocos é apresentado na Figura 4.13. Pode-se observar que o sinal de monitoramento e o sinal de transmissão são vinculados por um acoplador WDM e, na recepção, o sinal de monitoramento é filtrado por um TBPF (Tunable Bandpass Filter). Vale a pena mencionar que foi utilizado um EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier), 2 VOA's e um OPM (Optical Power Meter) para atingir os parâmetros requeridos na medição.

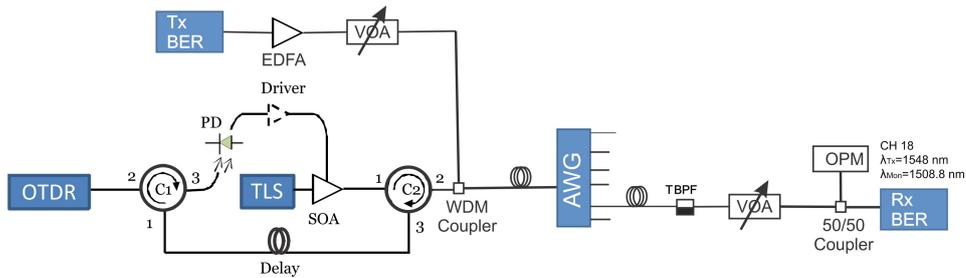


Figura 4.13: Diagrama de blocos do OTDR sintonizável para medir o BER.

Um canal comercial em 1548 nm na banda C foi utilizado para realizar a transmissão de dados enquanto o monitoramento na banda S foi feito em 1508,8 nm. Os resultados obtidos do BER são observados na Figura 4.14.

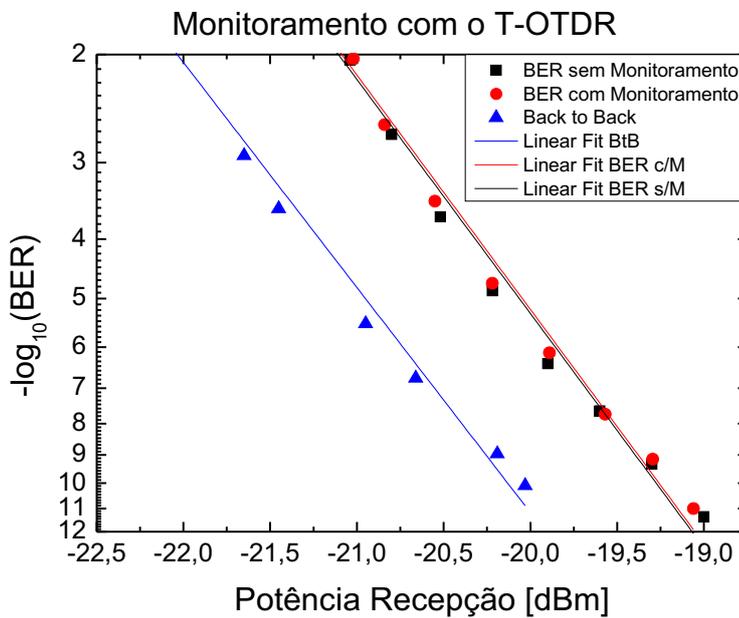


Figura 4.14: Curvas do BER medidas e ajustadas para as diferentes condições de transmissão utilizando o OTDR sintonizável como sinal de monitoramento.

Como pode ser observado, o sinal de monitoramento não afeta o tráfego, o que significa que o equipamento pode ser utilizado para monitorar redes em serviço. As técnicas consideradas num princípio desta dissertação, as quais utilizam o sinal de monitoramento na banda U também foram testadas, o diagrama de blocos, o BER e a curva do OTDR são apresentadas nas figuras 4.15, 4.16, 4.17, 4.18, 4.19 e 4.20.

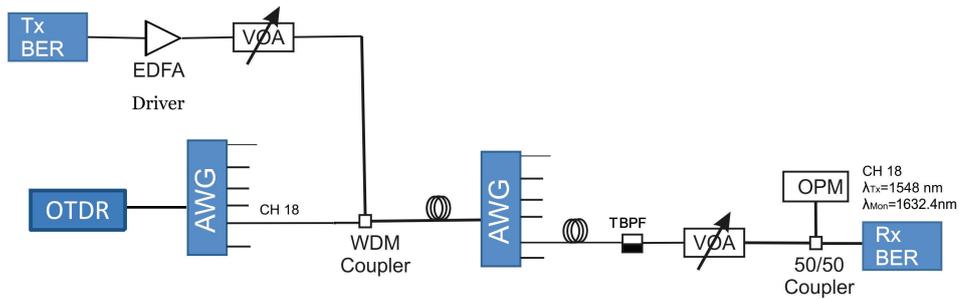


Figura 4.15: Diagrama de blocos do OTDR filtrado para medir o BER.

O canal da banda C em 1548 nm é conservado. Por outro lado, o espectro do OTDR é filtrado na banda U, pelo qual temos um canal de monitoramento com uma largura de linha de 0,8 nm centrado em 1632,4 nm.

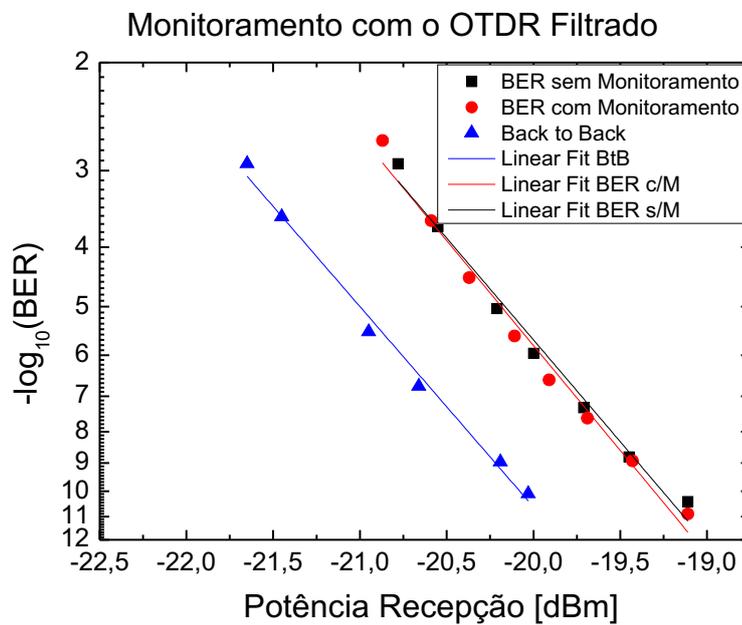


Figura 4.16: Curvas do BER medidas e ajustadas para as diferentes condições de transmissão utilizando o OTDR filtrado como sinal de monitoramento.

As curvas do BER mostram que o sinal de dados não é afetado pelo sinal de monitoramento, porém este sistema pode ser utilizado para monitorar redes em serviço.

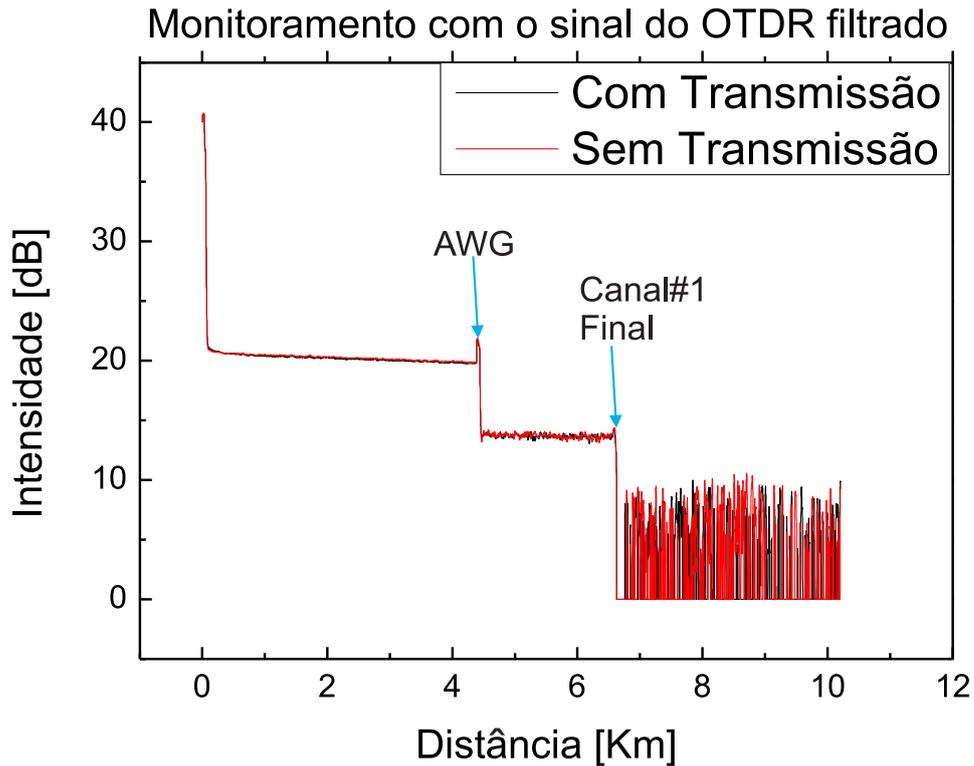


Figura 4.17: Curvas do OTDR com e sem transmissão utilizando os mesmos parâmetros de medição.

A curva gerada pelo OTDR não é afetada pelo sinal de transmissão.

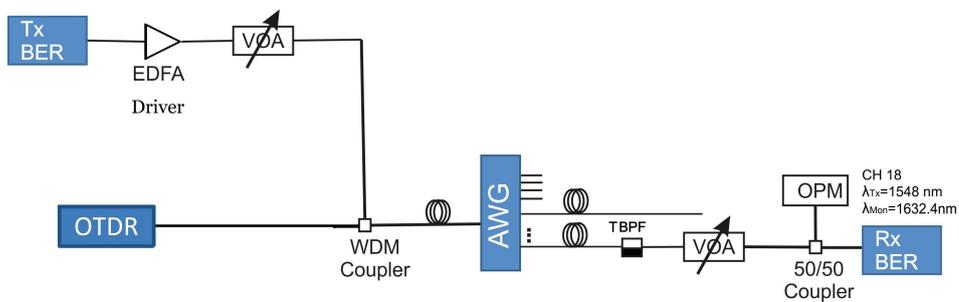


Figura 4.18: Diagrama de blocos do OTDR para medir o BER.

O monitoramento é feito utilizando todo o espectro na banda U do OTDR, o sinal de monitoramento atinge mais de um canal, porém os problemas do monitoramento de redes TDM-PON estão presentes. Por outro lado, o BER não é afetado pelo sinal de monitoramento como pode-se observar na Figura 4.19.

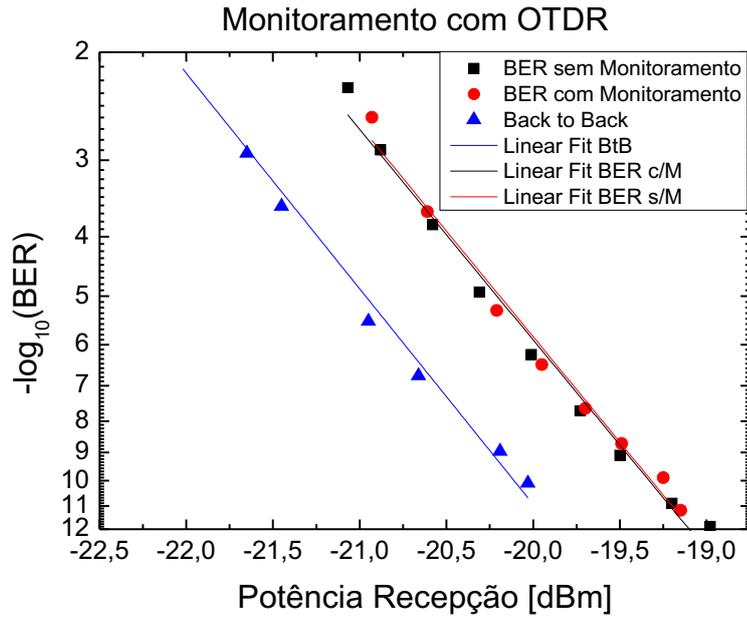


Figura 4.19: Curvas do BER medidas e ajustadas para as diferentes condições de transmissão utilizando todo o espectro do OTDR como sinal de monitoramento.

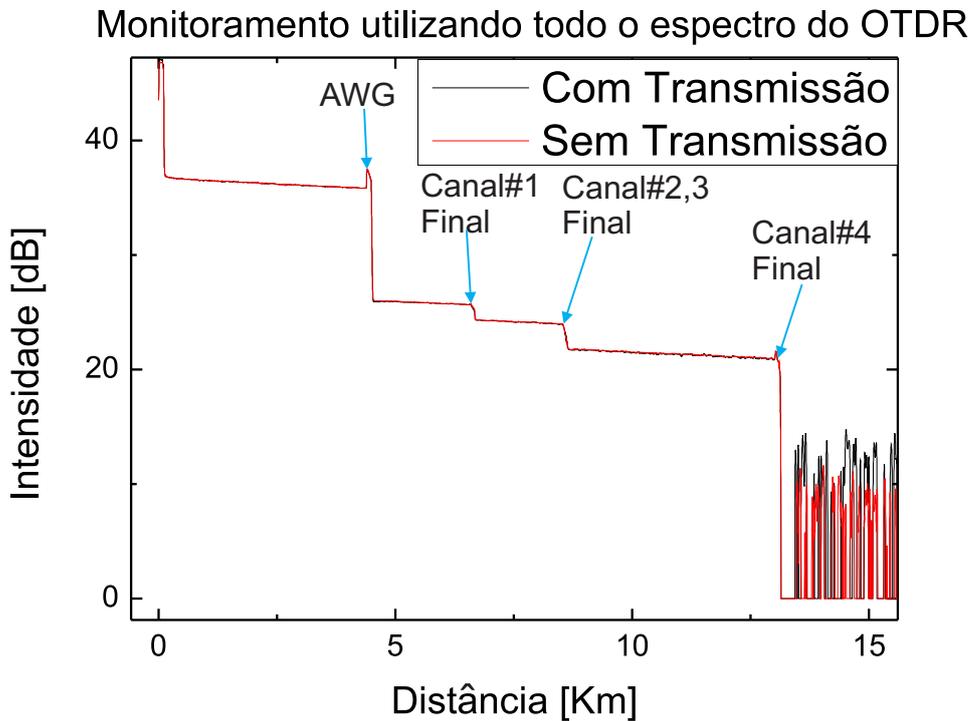


Figura 4.20: Curvas do OTDR com e sem transmissão utilizando os mesmos parâmetros de medição.

Pode-se observar que a curva de monitoramento não é afetada pelo sinal de transmissão.