



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GTL - 21
16 a 21 Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

**GRUPO XVI
GRUPO DE ESTUDO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO E TELECOMUNICAÇÃO PARA SISTEMAS
ELÉTRICOS - GTL**

ANÁLISE DE REDE WDM COM AMPLIFICAÇÃO ÓPTICA

Sandra Jorge Barboza

**FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S. A.
Departamento de Engenharia de Telecomunicações**

Maria Thereza Miranda Rocco Giraldo

**INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
Departamento de Engenharia Elétrica**

RESUMO

Este trabalho apresenta a análise de uma rede com multiplexação por divisão do comprimento de onda (WDM) e amplificação óptica. Foram realizadas medidas de espectro em uma rede WDM que são comparadas com resultados de simulação. Neste trabalho também é feita uma comparação do desempenho da rede WDM utilizando amplificadores EDFA e Raman. Os amplificadores Raman são apresentados como uma solução para aumento do alcance dos enlaces ópticos, sem a necessidade de utilização de amplificadores de linha.

PALAVRAS-CHAVE

Rede WDM, EDFA, Análise espectral, Amplificador Raman.

1.0 - INTRODUÇÃO

Nos sistemas com multiplexação por divisão do comprimento de onda - WDM (*Wavelength Division Multiplexing*), canais, em diferentes comprimentos de onda, são transmitidos em uma mesma fibra, simultaneamente, permitindo uma utilização eficaz da banda passante da fibra óptica. Esta técnica é transparente à taxa de transmissão e ao tipo de tráfego usado na transmissão de cada canal (1), (2).

O desenvolvimento dos amplificadores ópticos foi de fundamental importância para a consolidação dos sistemas WDM, pois são capazes de amplificar diversos canais ópticos simultaneamente, sem a necessidade de demultiplexação e conversões eletro-ópticas (1). O amplificador óptico a fibra dopada com Érbio (EDFA - *Erbium Doped Fiber Amplifier*) é o amplificador mais utilizado, pois trabalha na janela de 1530 a 1560 nm, região de baixa atenuação da fibra. Este amplificador apresenta como fator limitante o ruído da emissão espontânea amplificada (ASE - *Amplified Spontaneous Emission*). As não-linearidades do meio também limitam a amplificação, pois uma forma de se atenuar os efeitos da ASE é transmitir o sinal com potência elevada, o que leva a condições de aparecimento de efeitos não-lineares na fibra óptica (3).

O amplificador Raman, que está sendo inserido nas redes ópticas, apresenta ganho transparente às janelas de transmissão e depende apenas da diferença entre a frequência do bombeio e do sinal (1). A amplificação Raman é obtida através do efeito óptico não linear de espalhamento Raman estimulado, que consiste em converter uma fração da potência incidente do sinal óptico de bombeio para uma frequência menor, deslocada por uma diferença dos modos de vibração do meio (4). Quanto maior a potência do sinal de bombeio, maior é a transferência de energia entre o bombeio e o sinal (1). Nestes amplificadores não se faz necessário o uso de fibras dopadas, pois o efeito Raman acontece em todos os tipos de fibra. Também é possível conseguir um amplificador com largura de banda grande e plana, através do uso de diversos lasers de bombeio em frequências diferentes, onde é possível concatenar diversas bandas menores (4), (5).

Rua Real Grandeza, 219, Bl. B, Sala 303 - CEP 22283 -900 – Rio de Janeiro – RJ - BRASIL
Tel.: (21) 2528-5648 - Fax: (21) 2528-2004 - e-mail: sandrajb@furnas.com.br

Neste trabalho será analisado o desempenho de uma rede WDM com amplificação óptica. Foram realizadas medidas de espectro em uma rede WDM de 4 canais em 2,5 Gbps, com EDFAs e trechos de fibra padrão (STD), com coeficiente de dispersão de 17 ps/nm.km, e de dispersão deslocada não-nula (NZDSF), com coeficiente de dispersão de 7 ps/nm.km. Também serão apresentados os resultados de medidas de um enlace monocanal de 250 km, utilizando amplificador Raman. Os testes experimentais da rede WDM foram realizados nas instalações do Centro de Referência Tecnológica (CRT) da Embratel, no Rio de Janeiro, RJ e os testes com o amplificador Raman foram realizados no laboratório da Padtec, em Campinas, SP. Além disto, foram realizadas simulações utilizando o simulador VPI. Com o uso do simulador foi possível fazer um estudo variando-se diversos parâmetros dos componentes da rede WDM, verificar o desempenho dos dispositivos isoladamente e seus efeitos na rede WDM.

A seção 2.0 apresenta a rede WDM da Embratel/CRT. Na seção 3.0 são caracterizados os componentes desta rede. A seção 4.0 apresenta a análise espectral realizada na rede. Na seção 5.0 é apresentada uma análise comparativa entre a rede WDM que utiliza amplificadores EDFA e a que utiliza amplificadores Raman. Na seção 6.0 são apresentados os resultados do teste do enlace com amplificador Raman. Finalmente, na seção 7.0, são apresentadas as conclusões deste trabalho.

2.0 - REDE WDM DA EMBRATEL

A rede WDM de referência da Embratel/CRT é formada por dois anéis SDH ligados por um sistema WDM. A Figura 1 apresenta um esquema simplificado da rede analisada neste trabalho, que consiste da ligação WDM dos dois anéis. O equipamento utilizado é capaz de multiplexar até 16 comprimentos de onda, que são estabelecidos pela grade da norma ITU G.692, com espaçamento de 200 GHz. Os comprimentos de onda utilizados foram 1558,98 nm (canal 23), 1557,36 nm (canal 25), 1550,92 nm (canal 33) e 1547,72 nm (canal 37), sendo que o canal em 1558,98 nm foi conseguido pela conversão opto-eletrônica de comprimento de onda de um sinal em 1310 nm.

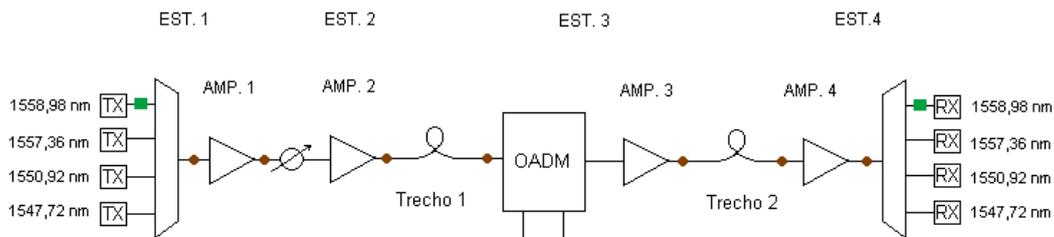


FIGURA 1 – Diagrama Simplificado da Rede WDM Embratel/CRT.

A estação 1 (EST. 1), além do multiplexador e dos transmissores (TX's) possui um amplificador de potência (AMP. 1). A EST. 2 é composta por um amplificador de linha (AMP. 2). A EST. 3 é composta por um multiplexador de inserção e derivação óptica (OADM) e um amplificador de saída (AMP.3). A EST. 4 é composta por um pré-amplificador (AMP. 4), um demultiplexador e pelos receptores (RX's). Para as medidas, foram utilizadas bobinas de fibras padrão e NZDSF, nos trechos 1 e 2 da Figura 1. A taxa de transmissão utilizada foi STM-16 (2,5 Gbps). Todos os amplificadores são EDFA's.

3.0 - CARACTERIZAÇÃO DOS COMPONENTES DA REDE WDM

Os resultados obtidos das medidas de ganho dos EDFAs da rede estão apresentados na Tabela 1.

TABELA 1 – Ganho dos Amplificadores da Rede WDM

Amplificador	Ganho (dB)
AMP. 1 – Potência	21
AMP. 2 – Linha	17
AMP. 3 – OADM	15
AMP. 4 – Pré-amplificador	35

O multiplexador e o demultiplexador da Figura 1 apresentam perda de inserção de 6,5 dB. O OADM apresenta perda de inserção entrada-saída de 9 dB, perda de inserção entrada-extração de 7 dB e perda de inserção inserção-saída de 4 dB. No OADM utilizado, é possível inserir/derivar até 4 canais ópticos. A atenuação entre o AMP. 1 e o AMP. 2 é de 20 dB.

Para caracterizar a rede WDM a ser simulada, foram definidos alguns parâmetros dos EDFAs utilizados pelas suas características de ganho. Os parâmetros do módulo do EDFA do VPI alterados foram o comprimento da fibra dopada (L) e a potência de bombeio (P_b), para um bombeio contra-propagante em 1480 nm, de forma que os

amplificadores utilizados na rede apresentassem um ganho próximo aos valores experimentais da Tabela 1. A Figura 2 mostra a variação do ganho em função da potência de entrada no amplificador.

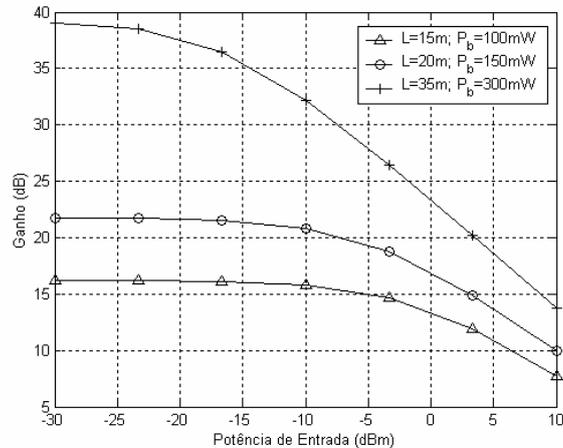


FIGURA 2 – Ganho em função da potência de entrada no EDFA.

Na Figura 2, observa-se que o ganho é diretamente proporcional a variação do comprimento da fibra e da potência de bombeio do EDFA. Por exemplo, para uma potência do sinal de entrada de -25 dBm, tem-se: $G = 16,5$ dB para $L = 15$ m e $P_b = 100$ mW; $G = 22,5$ dB para $L = 20$ m e $P_b = 150$ mW e $G = 38,5$ dB para $L = 35$ m e $P_b = 300$ mW. A figura de ruído no EDFA é dada pela razão entre a relação sinal-ruído na entrada e na saída do amplificador(1), para uma inversão total da população, tem-se uma NF mínima de 2 (3 dB), no EDFA.

Foi realizada a medida da figura de ruído em função do comprimento de onda, para os 4 amplificadores em cascata na rede WDM. Os resultados de simulação da figura de ruído do enlace WDM aproximam-se razoavelmente dos valores experimentais. Por exemplo, para o comprimento de onda 1547,7 nm, o valor da figura de ruído medido foi de 17,3 dB e o simulado de 16,2 dB. Para o comprimento de onda de 1552,7 nm, o valor de figura de ruído medido foi de 13 dB e o simulado de 13,7 dB.

Para realizar uma comparação com o amplificador EDFA, foi realizada uma simulação para caracterizar o amplificador Raman. A Figura 3 mostra a variação do ganho do amplificador em função do comprimento de onda do sinal de entrada. O bombeio utilizado foi contra-propagante no comprimento de onda de 1500 nm.

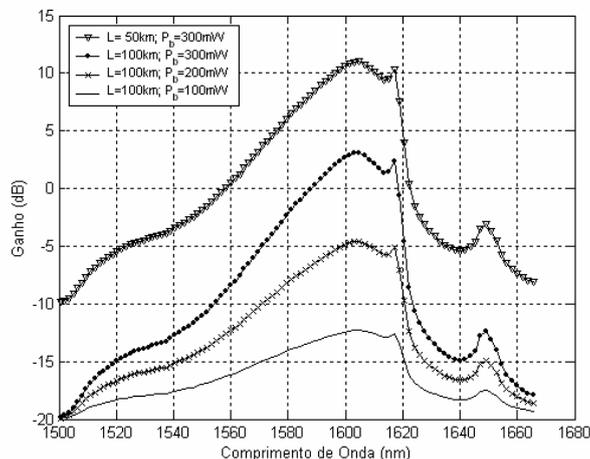


FIGURA 3 – Ganho em função da potência de entrada no amplificador Raman com bombeio contra-propagante.

O ganho Raman é máximo para uma diferença entre o comprimento de onda do sinal e do bombeio da ordem de 100 nm, e apresenta uma banda passante de aproximadamente, 45 nm (1), (6). Os parâmetros alterados no VPI foram a potência de bombeio e o comprimento da fibra. Observa-se que conforme se aumenta a potência de bombeio, o ganho aumenta e conforme se aumenta a distância, maior é a atenuação e conseqüentemente, menor é o ganho. A diferença entre o ganho para 50 km e 100 km, com uma potência de bombeio de 300 mW, é de 10 dB, que é a atenuação da fibra em 50 km.

A figura de ruído (NF) no amplificador Raman é dada por (1):

$$NF = \frac{1}{G} \{ [2(G-1)h\nu n_{sp}] / h\nu + 1 \} \quad (1)$$

onde, G é o ganho Raman e $h\nu$ é a energia do fóton e n_{sp} é o fator de inversão de população.

A Figura 4 mostra a variação da figura de ruído em função do comprimento de onda, para o amplificador Raman de bombeio contra-propagante. Uma figura de ruído negativa pode parecer incoerente a princípio. A razão para este desempenho se deve ao fato da amplificação Raman se estender ao longo da fibra, assim o nível do sinal é sempre melhor que no final de uma fibra sem bombeio (6). A potência de bombeio é transferida para o sinal, assim a OSNR de saída é superior a OSNR de entrada. Resultados semelhantes também são vistos em (5). Na região de maior ganho, conforme se aumenta a potência de bombeio e o comprimento da fibra, a figura de ruído diminui.

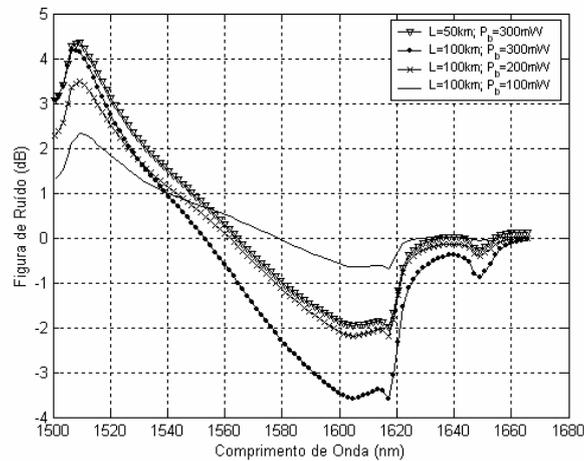


FIGURA 4 – Figura de ruído no amplificador Raman com bombeio contra-propagante.

4.0 - SIMULAÇÃO E MEDIDAS ESPECTRAIS NA REDE WDM

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos com a medida e a simulação espectral da rede WDM

4.1 - Medidas de Espectro

Os resultados a seguir são as medidas de espectro tomadas nos diferentes pontos de monitoração da rede WDM. Os gráficos apresentados neste item são de potência óptica (dBm) em função do comprimento de onda (nm).

A Figura 5 apresenta o espectro de entrada do OADM, após o trecho 1 com 50 km de fibra STD. Neste ponto, todo o espectro é atenuado de 16 dB para monitoração. A OSNR dos canais 23 e 25 está em torno de 24 dB enquanto que a OSNR dos canais 33 e 37 está em torno de 28 dB.

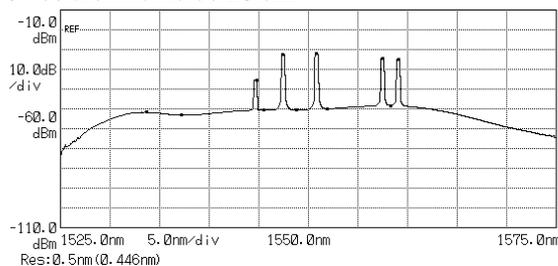


FIGURA 5 – Espectro de entrada do OADM (EST. 3) após trecho 1 com 50 km de fibra STD.

A Figura 6 apresenta o espectro de saída do amplificador do OADM (AMP. 3), após o trecho 1 com 50 km de fibra STD. Neste ponto, todo o espectro é atenuado de 23 dB para monitoração.

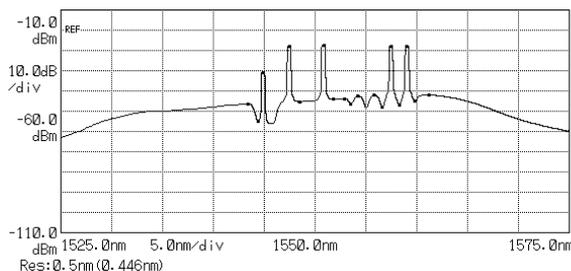


FIGURA 6 – Espectro de saída do AMP. 3 (EST. 3) após trecho 1 com 50 km de fibra STD.

Comparando-se a Figura 5 com a Figura 6 é possível notar que a OSNR dos canais 25 e 23 aumenta em torno de 5 dB. A variação na OSNR dos canais 25 e 23 é positiva, pois, com o filtro WDM no OADM, o nível de ruído diminui. Este filtro WDM do OADM é o responsável pelas ondulações nos espectros da Figura 6.

As Figs. 7 e 8 mostram o sinal na entrada do demultiplexador da rede WDM quando o tipo de fibra é variado. Neste ponto, todo o espectro é atenuado de 16 ± 2 dB para monitoração. O sinal passa por um filtro que elimina os comprimentos de onda menores que 1545 nm.

Comparando-se as Figs. 7 e 8 observa-se que a configuração com fibra STD apresentou um desempenho superior à configuração com fibra NZDSF, sendo a OSNR dos canais da Figura 7 em torno de 7 dB maior que a OSNR dos canais da Figura 8. Observa-se que, na Figura 8, devido aos efeitos não-lineares na fibra de menor dispersão, as ondulações diminuem e a potência do patamar de ruído aumenta.

Em (7) e (8) é realizado um estudo comparativo dos sistemas WDM com fibras STD e NZDSF. Os sistemas com fibra STD apresentaram um desempenho superior aos sistemas que utilizaram fibras NZDSF. Neste trabalho isto é confirmado, pois se observou que os canais nas configurações que utilizaram fibras NZDSF apresentaram uma relação sinal-ruído óptica menor que os canais nas configurações com fibras STD. Em (9) também é realizado um estudo comparativo entre sistemas que utilizam fibras STD e NZDSF. Em algumas condições de compensação de dispersão, os sistemas que utilizaram fibras STD também apresentaram um fator de qualidade maior do que os sistemas que utilizaram fibras NZDSF.

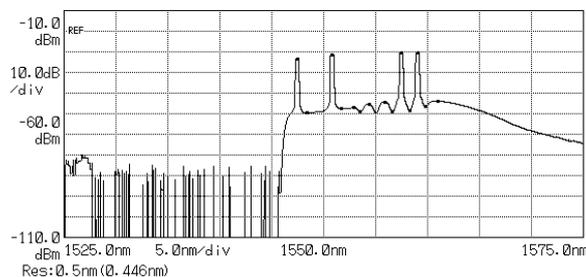


FIGURA 7 – Espectro de entrada do demultiplexador da EST. 4 (Trecho 1 = Trecho 2 = 50 km STD).

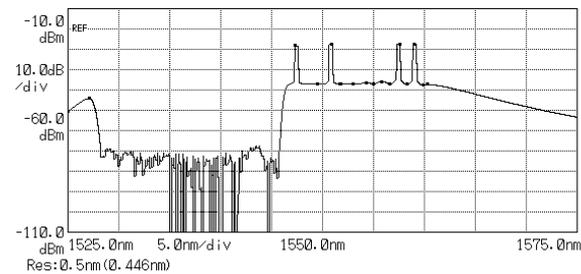


FIGURA 8 – Espectro de entrada do demultiplexador da EST. 4 (Trecho 1 = Trecho 2 = 50 km NZDSF).

4.2 - Resultados da Simulação

Para a simulação da rede WDM foi montado o esquema da Figura 1 no simulador VPI. Nas medidas de espectro, todos os canais passaram através do OADM, sem que fossem derivados. No simulador foi aplicado o valor de perda de inserção entrada-saída. A Tabela 2 mostra os valores de potência dos canais e do patamar de ruído médio na faixa de 1540 nm a 1560 nm, comparando os resultados de simulação (coluna Sim.) e experimentais (coluna Exp.).

TABELA 2 – Níveis de Potência na Rede WDM

	Potência da ASE (dBm)		Potência # 37 (dBm)		Potência # 25 (dBm)		Potência # 23 (dBm)	
	Sim.	Exp.	Sim.	Exp.	Sim.	Exp.	Sim.	Exp.
(a)	-64	-62	-31	-32	-35	-35,5	-37	-36
(b)	-48	-50	-19	-23	-23	-25	-25	-25
(c)	-53	-53	-23	-27,5	-33	-36	-35	-36,5

Foram realizadas medidas de espectro com 3 canais de informação e um de supervisão – **(a)** na saída do amplificador da EST. 2, **(b)** na entrada no amplificador da EST. 4 (Trecho 1 = 50 km STD e Trecho 2 = 50 km STD) e **(c)** na entrada no amplificador da EST. 4 (Trecho 1 = 50 km NZDSF e Trecho 2 = 50 km NZDSF). Analisando a Tabela 2 é possível observar que os valores medidos de potência dos canais estão bem próximos dos valores resultantes da simulação, apresentando uma diferença máxima de 4,5 dB, para o canal 37 na entrada do amplificador da EST. 4 (Trecho 1 = 50 km NZDSF e Trecho 2 = 50 km NZDSF).

5.0 - REDE WDM COM AMPLIFICADORES EDFA E RAMAN

Nesta seção são analisadas três configurações para a rede WDM. A configuração 1 corresponde à rede WDM da Figura 1 com o trecho 1 com 50 km de fibra NZDSF e o trecho 2 com 100 km de fibra NZDSF. A configuração 2 é semelhante à configuração 1, porém com o amplificador EDFA AMP. 2 substituído por um amplificador Raman com bombeio de 300 mW, na fibra do trecho 1. Na configuração 3, os amplificadores EDFA AMP. 2 e AMP. 3 são substituídos por amplificadores Raman com bombeio de 300 mW, nas fibras dos trechos 1 e 2, respectivamente. O comprimento de onda do bombeio é de 1463 nm. O ganho máximo para essas condições é de 11 dB para a fibra de 50 km e de 3,1 dB para a fibra de 100 km, no comprimento de onda de 1563 nm.

As Figuras 9 - (a), 10 - (a) e 11 - (a) mostram o espectro na entrada do pré-amplificador da EST. 4 (AMP. 4) para as configurações 1, 2 e 3, respectivamente. As Figuras 9 - (b), 10 - (b) e 11 - (b) mostram o diagrama de olho do canal 23, de comprimento de onda 1558,9 nm, nas configurações 1, 2 e 3 respectivamente.

A Tabela 3 mostra a relação sinal-ruído óptica dos canais nas 3 configurações.

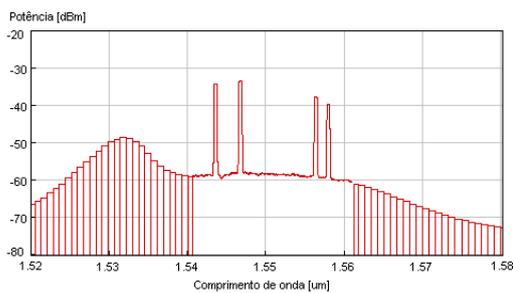


FIGURA 9 - (a)

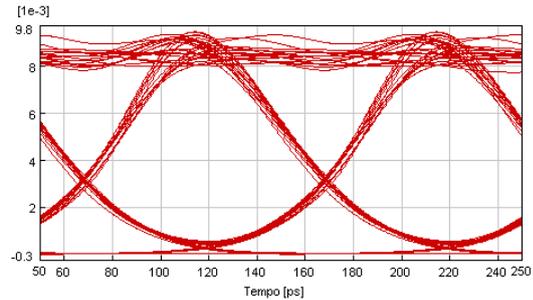


FIGURA 9 - (b)

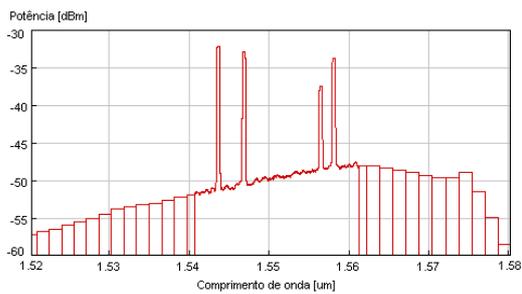


FIGURA 10 - (a)

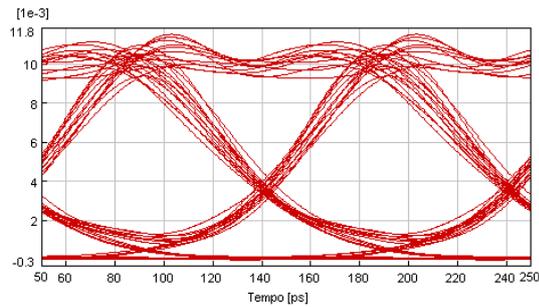


FIGURA 10 - (b)

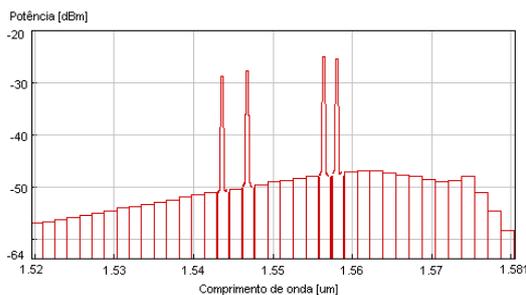


FIGURA 11 - (a)

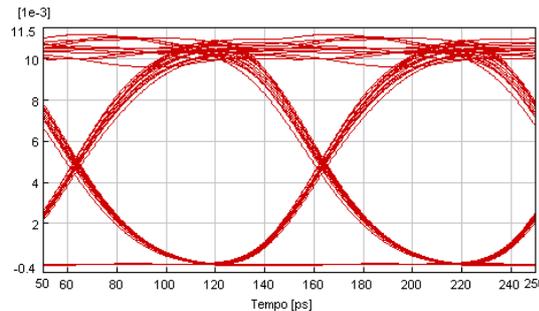


FIGURA 11 - (b)

TABELA 3 – OSNR dos canais nas 3 configurações

Configuração	OSNR (dB)	OSNR (dB)	OSNR (dB)
	# 37	# 25	# 23
1	25	22	20
2	18	11	15
3	22,5	22,5	22

O nível de potência dos canais, conseqüentemente o ganho, é maior para as configurações que utilizam amplificadores Raman, porém o patamar de ruído da ASE entre 1540 nm e 1560 nm também é superior. Nas configurações com Raman, o ganho para os comprimentos de onda dos canais 23 e 25 são maiores que para o canal 37, a OSNR do canal 37 para a configuração 1, com EDFA, é maior que a OSNR do canal 37 para a configuração 3, com Raman. Comparando-se as Figuras 10 - (a) e 11 - (a), observa-se que a OSNR dos canais é

superior na configuração com dois amplificadores Raman na rede. Ao se comparar as Figs. 9 – (b), 10 – (b) e 11 – (b), também se observa que o diagrama de olho para a configuração 3, com dois amplificadores Raman na rede, está mais aberto que os das outras configurações. Apesar da OSNR dos canais na configuração 2 ser menor que na configuração 1, o diagrama de olho das duas configurações apresentam uma abertura similar, pois na configuração 2, o nível de potência dos canais é superior ao da configuração 1.

6.0 - TESTE DO ENLACE COM AMPLIFICADOR RAMAN

Foi realizado um teste experimental nos laboratórios da PADTEC de um enlace utilizando o amplificador Raman de bombeio contra-propagante. Na figura 12 é mostrado o esquema de montagem do teste realizado.

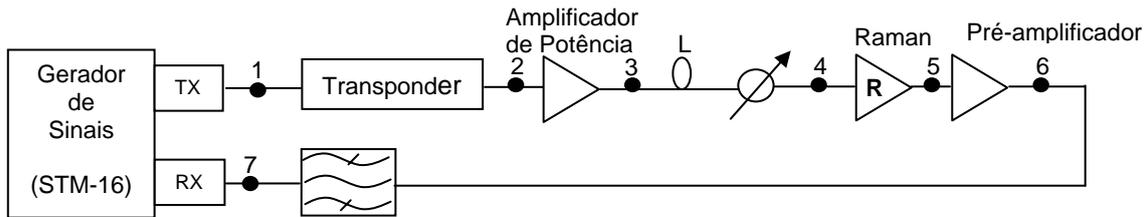


FIGURA 12 – Esquema de montagem do enlace com amplificador Raman

O amplificador Raman utilizado possui dois lasers de bombeio no comprimento de onda de 1435 nm, com potência igual a 300 mW. O comprimento de onda do sinal (λ) é igual a 1535 nm e o comprimento de fibra (L) é igual a 250 km STD. Para realizar a caracterização do amplificador Raman foi realizada a medida do sinal óptico utilizando o analisador de espectro óptico com o amplificador Raman ligado e, em seguida, com o amplificador Raman desligado. As Figuras 13 e 14 mostram os espectro da entrada do pré-amplificador com o amplificador Raman desligado (ponto 5 = ponto 4) e a entrada do pré-amplificador com o amplificador Raman desligado (ponto 5), respectivamente.

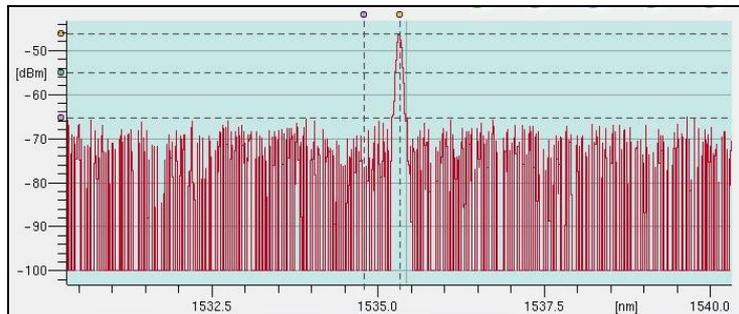


FIGURA 13 – Espectro de entrada no pré-amplificador após 250 km de fibra sem bombeio Raman – ponto 4

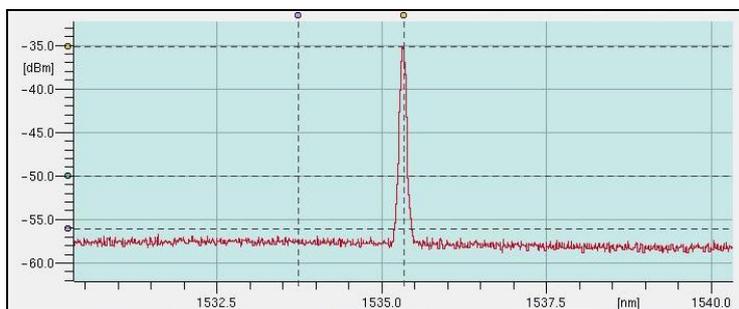


FIGURA 14 – Espectro de entrada no pré-amplificador após 250 km de fibra com bombeio Raman – ponto 5

Para a leitura dos valores no OSA foi aplicado um fator de correção de 8 dB, devido à calibração do instrumento.

- Valores medidos com o amplificador Raman ligado: $P_4 = -38,2$ dBm; $SNR_4 = 19,12$ dB
- Valores medidos com o amplificador Raman desligado: $P_5 = -27,24$ dBm; $SNR_5 = 20,85$ dB
- Cálculo do ganho (G) e da figura de ruído (NF) do amplificador Raman:
 $G = P_5 - P_4 = 10,96$ dB
 $NF = SNR_4 - SNR_5 = -1,73$ dB

Observou-se que o amplificador Raman apresentou uma baixa figura de ruído e um ganho de quase 11 dB na recepção do enlace.

Uma das alternativas para alcançar longas distâncias seria aumentar a potência de saída do amplificador de potência na entrada da fibra. Na Figura 15 é mostrada a medida do sinal após o filtro (ponto 7). A curva em vermelho representa o sinal com a potência de saída do amplificador de 21 dBm. A curva em preto representa o sinal com a potência de saída do amplificador de potência de 24 dBm. É possível perceber a grande distorção do sinal devido ao efeito de auto-modulação de fase (SPM) com o aumento de potência de 3 dB. Por isso, é interessante que a potência de saída do amplificador de potência não seja tão alta, evitando os efeitos não-lineares e aumentando o ganho na recepção, com o uso de amplificadores Raman e pré-amplificadores.

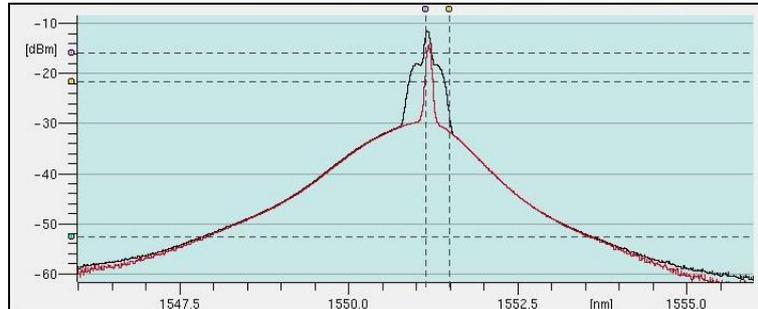


FIGURA 15 – Efeito de auto-modulação de fase.

7.0 - CONCLUSÕES

Os resultados obtidos nos testes experimentais foram confirmados pela simulação da rede WDM. A fibra NZDSF, para a rede WDM deste trabalho, apresentou um desempenho inferior ao da fibra STD. A Rede WDM com 2 amplificadores Raman apresentou melhor desempenho do que com amplificadores EDFA.

A utilização do amplificador Raman é bastante interessante em enlaces longos, pois permite que não seja necessária a utilização de um amplificador de linha. A tecnologia de sistemas ópticos com a utilização de fibras ópticas no interior dos cabos para-raio vem se consagrando como melhor solução para as empresas de energia elétrica. São sistemas de alta confiabilidade e que, associados à nova tecnologia de amplificadores Raman, permitem a transmissão em longas distâncias, sem a necessidade do uso de repetidoras. Em um cenário de crescentes taxas de roubo de equipamentos, é de fundamental importância a diminuição do número de estações repetidoras, o que também permite uma redução nos custos de implantação e manutenção do sistema.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Embratel e à Padtec pela infra-estrutura fornecida na realização das medidas deste trabalho, à Universidade Presbiteriana Mackenzie, pelo uso do simulador VPI e ao Instituto Militar de Engenharia.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Agrawal, G. Fiber-Optic Communication Systems, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., USA, 1997.
- (2) Jourdan, A., Bakhti, F., Berthelon, L., Bruyère, F., Chbat, M. et al., Key Building Blocks for High-Capacity WDM Photonic Transport Networks, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 16, pp. 1286-1297, September 1998.
- (3) Agrawal, G., Non-Linear Fiber Optics, 3rd ed., Academic Press, USA, 2001.
- (4) Islam, M., Raman Amplifiers for Telecommunications, IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 8, pp. 548-559, May/June 2002.
- (5) Fludger, C. and Henderik, V. Fundamental Noise Limits in Broadband Raman Amplifiers, OFC Conf. OSA Tech. Dig., 2001
- (6) Hansen, P. et. al, Rayleigh Scattering Limitations in Distributed Raman Pre-Amplifiers, IEEE Photonics Technology Letters, vol. 10, pp. 159-161, January 1998.
- (7) Demarest, K., Richards, D., Allen, C. and Hui, R. Is standard single-mode fiber the fiber to fulfill the needs of tomorrows long-haul networks? http://www.ittc.ku.edu/publications/documents/Demarest2002_Demarest2002NFOECpp939.pdf, 2002.
- (8) Eiselt, M., Garret, L. D. and Tkach, R. W. Experimental Comparison of WDM System Capacity in Conventional and Nonzero Dispersion Shifted Fiber, IEEE Photonics Technology Letters, vol. 11, pp. 281-283, February 1999.
- (9) Mauro, J. and Chowdhury, D. Impact of Parametric Mixing of ASE and Signal on High-Power Fesoon Systems with Random Dispersion Variation, IEEE Photonics Technology Letters, vol. 13, pp. 212-214, March 2001.