

# Análise de Rede WDM com Amplificação Óptica

Sandra Jorge Barboza e Maria Thereza Miranda Rocco Giraldi

**Resumo** ¼ 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.

**Palavras-chaves** ¼ Rede WDM, EDFA, Análise espectral, Amplificador Raman.

## I. 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 passando 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. Diferentemente dos regeneradores, os amplificadores ópticos possuem uma grande largura de banda e são capazes de amplificar diversos canais ópticos simultaneamente, sem a necessidade de demultiplexação e conversão eletro-óptica [3]. 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*). A cada passagem do sinal por um EDFA a relação sinal-ruído óptica (OSNR - *Optical Signal to Noise Ratio*) diminui [3], [4]. 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 [5].

Um outro amplificador que está sendo inserido nas redes WDM é o amplificador Raman. O amplificador Raman 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 [6]. 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

de 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, onde é possível concatenar diversas bandas menores [6], [7].

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) e de dispersão deslocada não-nula (NZDSF). Os testes experimentais foram realizados nas instalações do Centro de Referência Tecnológica (CRT) da Embratel, no Rio de Janeiro, RJ.

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 II apresenta a rede WDM da Embratel/CRT. Na seção III são caracterizados os componentes desta rede. A seção IV apresenta a análise espectral realizada na rede. Na seção V é apresentada uma análise comparativa entre a rede WDM com amplificadores EDFA e a mesma com amplificadores Raman. Finalmente, na seção VI, são apresentadas as conclusões deste trabalho.

## II. REDE WDM DA EMBRATEL

A rede WDM de referência da Embratel/CRT é formada por dois anéis SDH ligados por um sistema WDM. A Fig. 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. Na rede original só estavam disponíveis os comprimentos de onda 1558,98 nm (canal 23), e 1557,36 nm (canal 25), sendo que o canal em 1558,98 nm é conseguido pela conversão opto-eletrônica de comprimento de onda de um sinal em 1310 nm. Foram adicionados mais dois comprimentos de onda à rede WDM: 1550,92 nm (canal 33) e 1547,72 nm (canal 37).

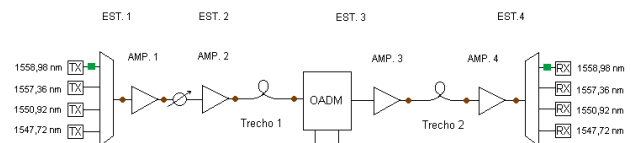


Fig. 1. Diagrama Simplificado da Rede WDM Embratel/CRT.

Na Fig. 1, 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 fi-

bras padrão e NZDSF, nos trechos 1 e 2 da Fig.1. A taxa de transmissão utilizada foi STM-16 (2,5 Gbps). Todos os amplificadores são EDFA's.

### III. CARACTERIZAÇÃO DOS COMPONENTES DA REDE WDM

A Tabela I apresenta os valores dos principais parâmetros das fibras STD e NZDSF, fornecidos pelos fabricantes, para a região espectral de 1550 nm. Na Tabela I, GVD é a dispersão de velocidade de grupo (GVD), PMD é o coeficiente de Dispersão do Modo de Polarização (PMD), Inclinação é a inclinação da GVD e  $A_{\text{eff}}$  é a área efetiva do núcleo da fibra óptica.

TABELA I CARACTERÍSTICAS DAS FIBRAS STD, NZDSF E DCF.

Tipo	Atenuação (dB/km)	GVD (ps/nm.km)	PMD (ps/km <sup>1/2</sup> )	Inclinação (ps/nm <sup>2</sup> .km)	$A_{\text{eff}}$ (μm <sup>2</sup> )
STD	0,19	16	0,05	-	-
NZDSF	0,20	8,2	0,08	0,06	63,0

O multiplexador e o demultiplexador da Fig. 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 este trabalho, foram realizadas medidas de ganho nos amplificadores EDFA da rede. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela II.

TABELA II 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

Para se caracterizar a rede WDM a ser simulada, foram definidos alguns parâmetros dos EDFAs utilizados, através de suas características de ganho. O ganho no EDFA é dado por [8]:

$$G(\text{dB}) = 4,343\Gamma[s_e(\mathbf{n})N_2 - s_a(\mathbf{n})I_1]L \quad (1)$$

onde,  $\Gamma$  é o fator de confinamento,  $s_e$  e  $s_a$  são, respectivamente, as seções eficazes de emissão e de absorção,  $N_1$  e  $N_2$  são, respectivamente, as populações dos níveis superior e inferior de energia,  $\mathbf{n}$  é a frequência óptica e  $L$  é o comprimento da fibra dopada. 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 II. A Fig. 2 mostra a variação do ganho em função da potência de entrada no amplificador.

Na Fig. 2, observa-se que o ganho é diretamente proporcional a variação do comprimento da fibra dopada 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;  $G = 22$  dB para  $L = 20$  m e  $P_b = 150$  mW e  $G = 38,5$  dB para  $L = 35$  m e  $P_b = 300$  mW.

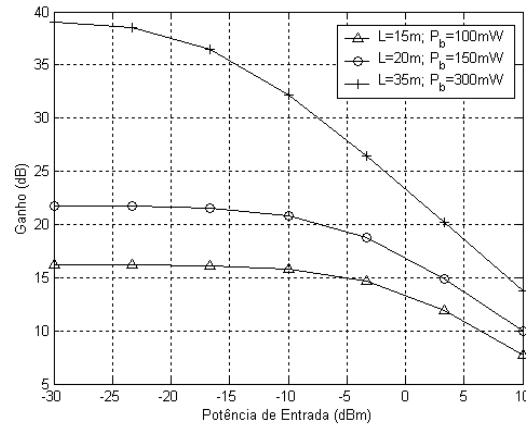


Fig. 2. Ganho em função da potência de entrada no EDFA.

A Fig. 3 mostra a variação da figura de ruído em função do comprimento de onda, no amplificador EDFA, para 4 configurações de comprimento de fibra dopada e potência de bombeio. A figura de ruído no EDFA é dada por [1]:

$$NF = \frac{OSNR_{\text{entrada}}}{OSNR_{\text{saída}}} = 2n_{sp} = 2 \frac{N_2}{N_2 - N_1} \quad (2)$$

onde,  $n_{sp}$  é o fator de inversão de população. Para uma inversão total, tem-se uma NF mínima de 2 (3 dB), no EDFA.

Como pode ser visto na Fig.3, para valores próximos a 1546 nm, a figura de ruído apresenta valores maiores que na região de 1553 nm, pois na região de 1546 nm, a ASE é maior. Para um mesmo comprimento de fibra dopada, o aumento do bombeio significa maior inversão de população e conseqüentemente, menor ruído. Quando se aumenta o comprimento da fibra dopada e não se aumenta o bombeio suficientemente, o ruído aumenta, como se nota da Fig. 3.

A Fig. 4 mostra a variação da figura de ruído em função do comprimento de onda, para os 4 amplificadores em cascata na rede WDM e os valores experimentais obtidos. 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, como mostra a Fig. 4.

Para se realizar uma comparação com o amplificador EDFA, foi realizada uma simulação para caracterizar o amplificador Raman. A Fig. 5 mostra a variação do ganho do amplificador Raman em função do comprimento de onda do sinal de entrada. O bombeio utilizado foi contra-propagante no comprimento de onda de 1500 nm. 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. O ganho não apresentou variações quanto ao tipo de fibra utilizado, se STD ou NZDSF ou quanto ao tipo de bombeio, se co-propagante ou contra-propagante. Isto já era de se esperar uma vez que o ganho

Raman independe do tipo de fibra e da direção de propagação do bombeio.

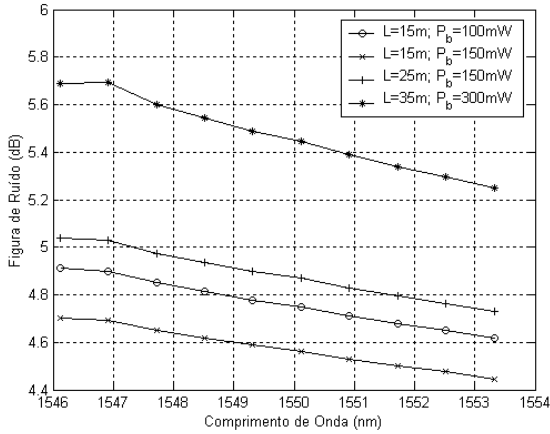


Fig. 3. Figura de ruído do EDFA em função do comprimento de onda.

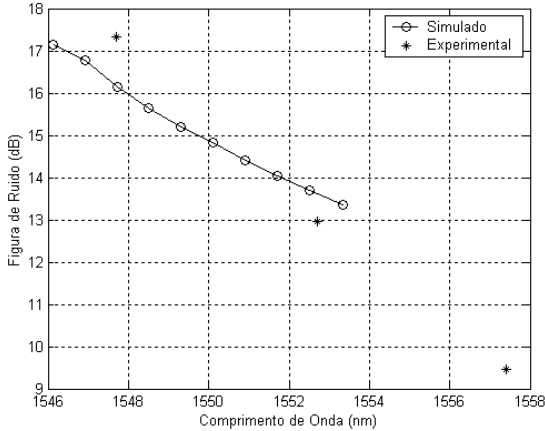


Fig. 4. Figura de ruído em função do comprimento de onda, para os 4 amplificadores EDFA em cascata.

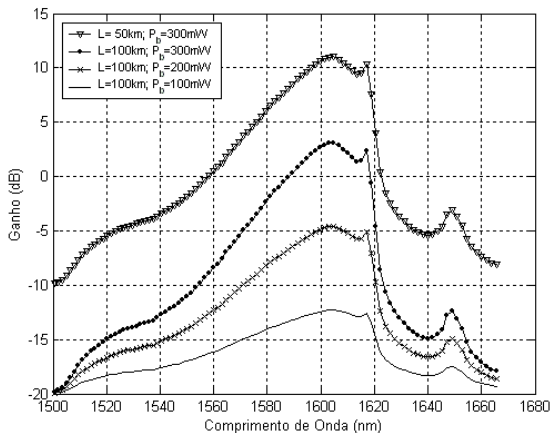


Fig. 5. Ganho em função da potência de entrada no amplificador Raman com bombeio contra-propagante

Observa-se, da Fig. 5 que, conforme se aumenta a potência de bombeio, o ganho aumenta. 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, conforme se aumenta a distância, maior é a atenuação e conseqüentemente, menor é o ganho.

A figura de ruído no amplificador Raman é dada por [6]:

$$NF = \frac{1}{G} \{ [2(G-1)hn n_{sp}] / hn + 1 \} \quad (3)$$

onde,  $G$  é o ganho Raman e  $hn$  é a energia do fóton.

A Fig. 6 mostra a variação da figura de ruído, 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 [9]. 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 [7]. Na região de maior ganho, conforme se aumenta a potência de bombeio e o comprimento da fibra, a figura de ruído diminui.

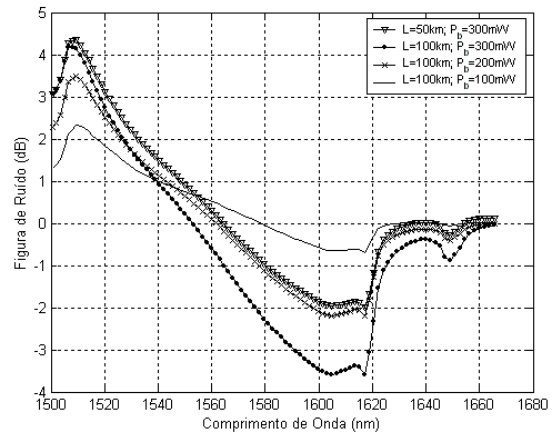


Fig. 6. Figura de ruído em função da potência de entrada no amplificador Raman com bombeio contra-propagante.

#### IV. SIMULAÇÃO E MEDIDAS ESPECTRAIS NA REDE WDM

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

1) *Medidas de Espectro:* Os resultados a seguir são as medidas de espectro tomadas nos diferentes pontos de monitoração da rede WDM. Os canais 23 e 25 são derivados de equipamento da Alcatel e possuem potências fixas de saída. Os canais 33 e 37 são originados no equipamento Multi Channel Box/ MT9812B da Anritsu, onde é possível atenuar a potência dos canais em até 6 dB. O sinal no comprimento de onda de 1544,5 nm é o canal de supervisão do equipamento.

A Fig. 7 apresenta a medida do espectro no ponto de monitoração da saída do multiplexador. Neste ponto, a potência de todos os canais é atenuada de  $17 \pm 2$  dB para monitoração. A OSNR dos canais 23 e 25 é de 35 dB e a OSNR dos canais 33 e 37, de 38 dB.

A Fig 8 mostra a medida do espectro da saída do primeiro amplificador da rede (AMP. 1). De acordo com o manual do equipamento, neste ponto, todo o espectro está atenuado de 23 dB, para monitoração. Já é possível notar da Fig. 8 o nível de ruído do EDFA (ASE) diminuindo a relação sinal-ruído

dos canais, quando comparados com a Fig. 7. A OSNR dos canais 23 e 25 é de 26 dB e a OSNR dos canais 33 e 37, de 33 dB.

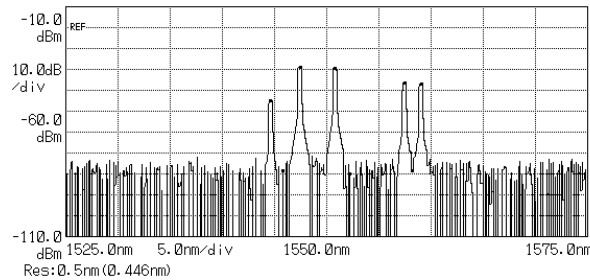


Fig. 7. Espectro de saída do multiplexador com quatro canais de informação e um de supervisão.

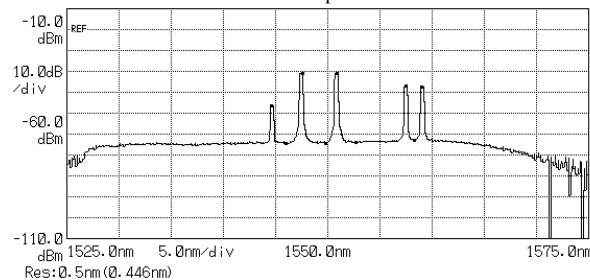


Fig. 8. Espectro de saída do amplificador da EST. 1 com quatro canais de informação e um de supervisão.

A Fig. 9 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.

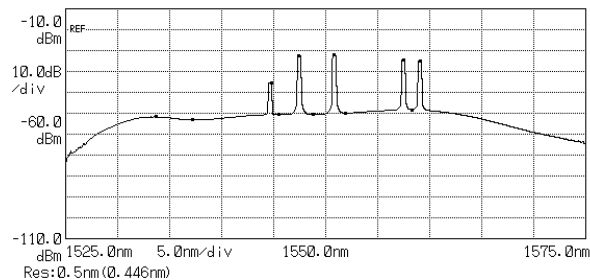


Fig. 9. Espectro de entrada do OADM (EST. 3) após trecho 1 com 50 km de fibra STD.

A Fig. 10 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.

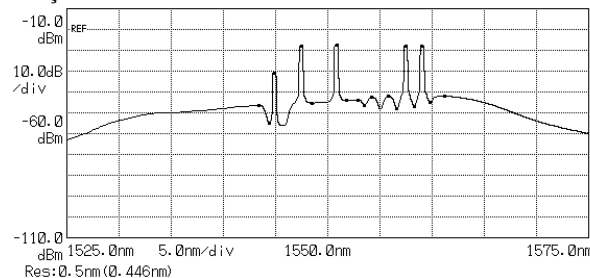


Fig. 10. Espectro de saída do AMP. 3 (EST. 3) após trecho 1 com 50 km de fibra STD.

Comparando-se a Fig. 9 com a Fig. 10 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 Fig. 10.

As Figs. 11 e 12 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  $16 \pm 2$  dB para monitoração. O sinal passa por um filtro que elimina os comprimentos de onda menores que 1545 nm. Comparando-se as Figs. 11 e 12 observa-se que a configuração com fibra STD apresentou um desempenho superior à configuração com fibra NZDSF, sendo a OSNR dos canais da Fig. 11 em torno de 7 dB maior que a OSNR dos canais da Fig. 12. Observa-se que, na Fig. 12, devido aos efeitos não-lineares na fibra de menor dispersão, as ondulações diminuem e a potência do patamar de ruído aumenta.

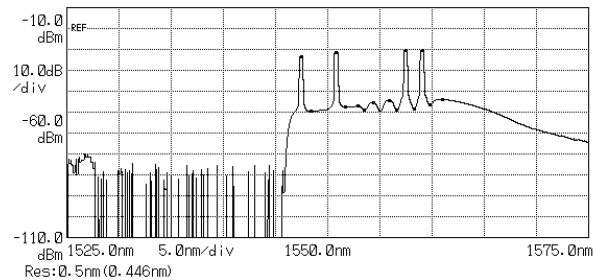


Fig. 11. Espectro de entrada do demultiplexador da EST. 4 (Trecho 1 = 50 km STD e Trecho 2 = 50 km STD).

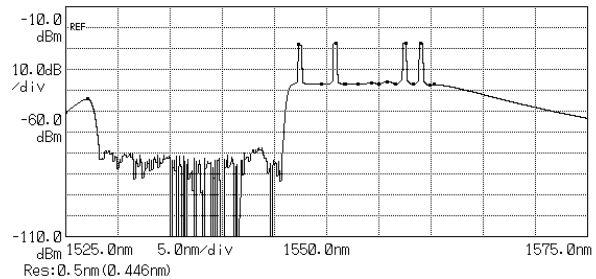


Fig. 12. Espectro de entrada do demultiplexador da EST. 4 (Trecho 1 = 50 km NZDSF e Trecho 2 = 50 km NZDSF).

Em [10] e [11] 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 [12] 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.

2) *Resultados da simulação:* Para a simulação da rede WDM foi montado o esquema da Fig. 1 no simulador VPI. A Fig. 13 mostra o espectro de saída do AMP. 2.



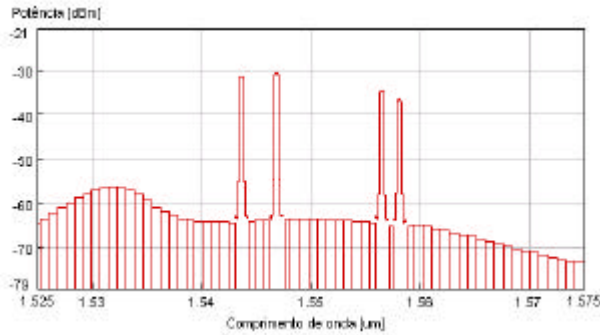


Fig. 13. Espectro de saída do amplificador da EST. 2 com 3 canais de informação e um de supervisão.

As Figs. 14 e 15 mostram espectro na entrada do amplificador da EST. 4, resultantes da simulação no 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.

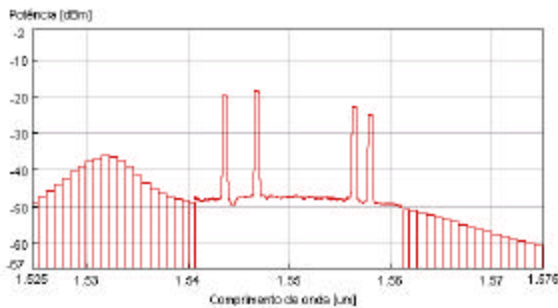


Fig. 14. Espectro de entrada no amplificador da EST. 4 (Trecho 1 = 50 km STD e Trecho 2 = 50 km STD) com 3 canais de informação e um de supervisão.

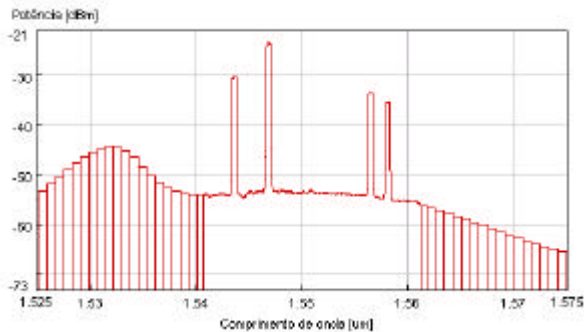


Fig. 15. Espectro de entrada na amplificador da EST. 4 (Trecho 1 = 50 km NZDSF e Trecho 2 = 50 km NZDSF) com 3 canais de informação e um de supervisão.

A Tabela III mostra os valores de potência dos canais e do patamar de ruído médio na faixa de 1540 nm a 1560 nm. Foram realizadas medidas de espectro nos pontos equivalentes das FIGs. 13, 14 e 15, cujos resultados são apresentados nas colunas "Exp", da Tabela III.

TABELA III NÍVEIS DE POTÊNCIA NA REDE WDM

Figura	Potência da ASE (dBm)		Potência # 37 (dBm)		Potência # 25 (dBm)		Potência # 23 (dBm)	
	Sim.	Exp.	Sim.	Exp.	Sim.	Exp.	Sim.	Exp.
Fig. 13	-64	-62	-31	-32	-35	-35,5	-37	-36
Fig. 14	-48	-50	-19	-23	-23	-25	-25	-25
Fig. 15	-53	-53	-23	-27,5	-33	-36	-35	-36,5

Analisando a Tabela III 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.

VI. 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 Fig. 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 Figs. 16, 17 e 18 mostram o espectro na entrada do amplificador da EST. 4 (AMP. 4) para as configurações 1, 2 e 3, respectivamente. A Tabela IV mostra a relação sinal-ruído óptica dos canais nas 3 configurações.

As Figs. 19, 20 e 21 mostram o diagrama de olho do canal 23, nas configurações 1, 2 e 3 respectivamente.

TABELA IV 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

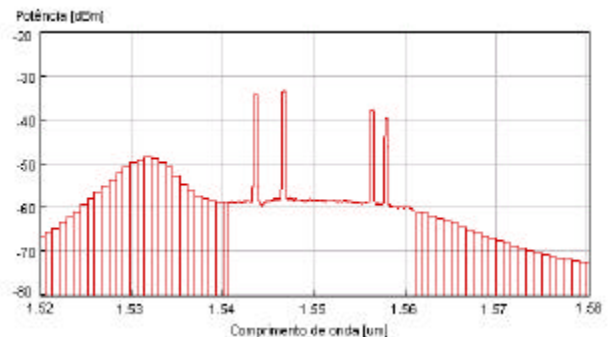


Fig. 16. Medida do espectro na entrada do AMP.4 na configuração 1.

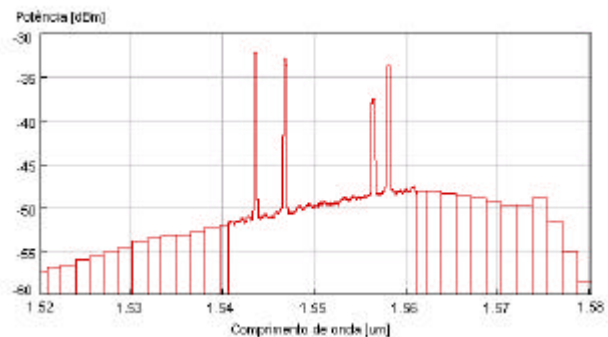


Fig. 17. Medida do espectro na entrada do AMP.4 na configuração 2.

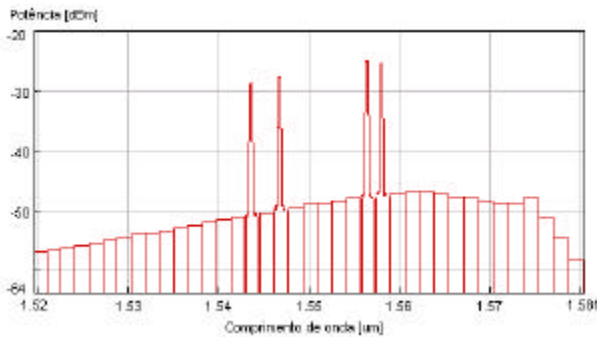


Fig. 18. Medida do espectro na entrada do AMP.4 na configuração 3.

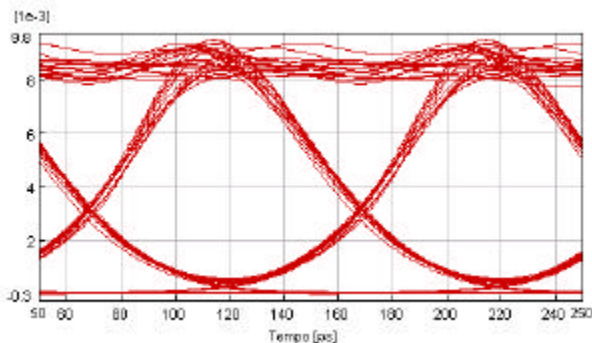


Fig. 19. Diagrama de olho na recepção do canal de comprimento de onda 1558,9 nm, na configuração 1.

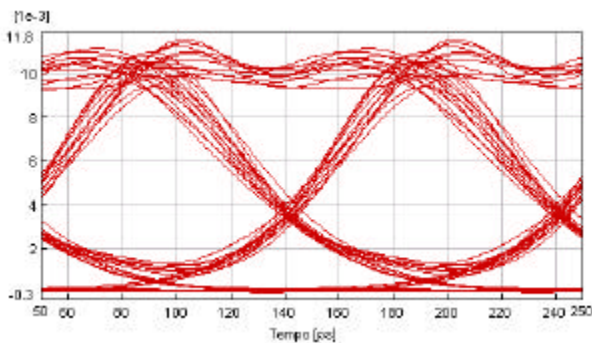


Fig. 20. Diagrama de olho na recepção do canal de comprimento de onda 1558,9 nm, na configuração 2.

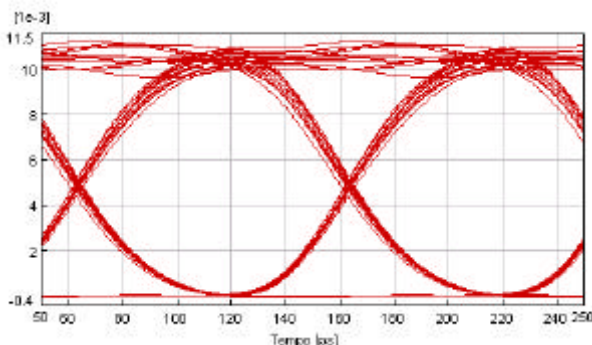


Fig. 21. Diagrama de olho na recepção do canal de comprimento de onda 1558,9 nm, na configuração 3.

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 ampli-

ficadores 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 Figs. 17 e 18, observa-se que a OSNR dos canais é superior na configuração com dois amplificadores Raman na rede. Ao se comparar as Figs. 19, 20 e 21, também observa-se 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.

## VII. CONCLUSÃO

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.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Embratel pela infra-estrutura fornecida na realização das medidas deste trabalho e à Universidade Presbiteriana Mackenzie, pelo uso do simulador VPI.

## REFERÊNCIAS

- [1] G. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., USA, 1997.
- [2] A. Jourdan, F. Bakhti, L. Berthelon, F. Bruyère, M. Chbat *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] M. Yadlowsky, E. Deliso, and V. Silva, "Optical Fibers and Amplifiers for WDM Systems", *Proceedings of the IEEE*, vol. 85, pp. 1765-1779, November 1997.
- [4] A. Girard *et al.*, *Guide to WDM Technology and Testing*. EXFO, Canada, 2000.
- [5] G. Agrawal, *Non-Linear Fiber Optics*, 3rd ed., Academic Press, USA, 2001.
- [6] M. Islam, "Raman Amplifiers for Telecommunications", *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 8, pp. 548-559, May/June 2002.
- [7] C. Fludger, and V. Henderek, "Fundamental Noise Limits in Broadband Raman Amplifiers", *OFC Conf. OSA Tech. Dig.*, 2001
- [8] E. Dersuvire, *Erbium-Doped Fiber Amplifiers*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1994.
- [9] P. Hansen *et al.*, "Rayleigh Scattering Limitations in Distributed Raman Pre-Amplifiers", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 10, pp. 159-161, January 1998.
- [10] K. Demarest, D. Richards, C. Allen, and R. Hui, "Is standard single-mode fiber the fiber to fulfill the needs of tomorrows long-haul networks?" [http://www.itc.ku.edu/publications/documents/Demarest2002\\_Demarest2002\\_NFOECpp939.pdf](http://www.itc.ku.edu/publications/documents/Demarest2002_Demarest2002_NFOECpp939.pdf), 2002.
- [11] M. Eiselt, L. D. Garret and R. W. Tkach, "Experimental Comparison of WDM System Capacity in Conventional and Nonzero Dispersion Shifted Fiber", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 11, pp. 281-283, February 1999.
- [12] J. Mauro, and D. Chowdhury, "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.