

EDFA com Controle Automático de Ganho Eletrônico para Aplicações em Redes WDM

J. C. R. F. de Oliveira, S.M. Rossi, J.B Rosolem, L.R. Monte, R. Arradi, C. Floridia, M.R.X. de Barros e
A. C. Bordonalli

Resumo — Neste trabalho são apresentados os resultados obtidos para um EDFA com controle automático de ganho eletrônico desenvolvido para aplicação em redes WDM. O EDFA desenvolvido pode operar como amplificador de potência (booster) proporcionando ganho fixo de 12 dB ou 20 dB, com variação de ganho máxima de 1 dB e tempo de resposta máximo de 15 ms ao longo de toda banda C. Também é realizada uma análise da influência da alocação do canal sobrevivente ao longo da banda C na variação de ganho, e por fim é analisado o impacto em termos de taxa de erro frente a variações na potência de entrada do amplificador.

Palavras-Chave—Amplificadores ópticos, redes ópticas, controle automático de ganho.

Abstract — In this work are presented the results obtained of an EDFA with electronic automatic gain control for WDM networks application. The developed EDFA can operate as booster amplifier with a fixed gain of 12 dB or 20 dB, a maximum gain variation of 1 dB and a maximum response time of 15 ms along C band. Also it is performed an analysis of the survival channel allocation influence in terms of the gain variation, and finally it is analyzed the impact in bit error rate to different input power levels.

Keywords— Optical amplifiers, optical networks, automatic gain control.

I. INTRODUÇÃO

A implantação de redes ópticas com roteamento por comprimento de onda proporciona aos sistemas de comunicações um grande aumento em sua capacidade de transmissão através da otimização da utilização das fibras ópticas disponíveis nos *backbones*. A Rede Experimental de Alta Velocidade do Projeto GIGA [1] é um testbed implementado para permitir o desenvolvimento e a demonstração de novas tecnologias e serviços para redes IP/WDM. Neste tipo de rede, o aprovisionamento, a proteção e a restauração de caminhos ópticos são processos dinâmicos e automáticos, através de elementos capazes de promover a inserção e remoção de sinais em determinados pontos da rede proporcionando um elevado grau de reconfigurabilidade da mesma.

Os elementos responsáveis pela adição e remoção de canais na camada óptica são os add – drops e os cross-connects, onde

J. C. R. F. de Oliveira, S.M. Rossi, J. B. Rosolem, L.R. Monte, R. Arradi, C. Floridia, Diretoria de Redes de Telecomunicações; Fundação CPqD, Campinas, Brasil. A. C. Bordonalli, Faculdade de Engenharia Elétrica, DMO, Unicamp. Emails: {julio; sandro; rosolem; lmonte; arradi; t_cf00; mbarros}@cpqd.com.br., aldario@dmo.fee.unicamp.br.

Este trabalho é parte do Projeto GIGA, financiado pelos Ministérios das Comunicações e da Ciência & Tecnologia, através do FUNTTEL-FINEP.

os add-drops são capazes de inserir ou remover canais em qualquer ponto da rede, já os cross-connects, que geralmente encontram-se nos nós da rede, são dispositivos compostos por chaves ópticas e possuem uma certa “inteligência” capaz de restaurar caminhos ópticos ou reconfigurar a rede de acordo com os algoritmos responsáveis por estas tarefas que se encontram em uma camada superior da rede.

Devido à atenuação apresentada pelas fibras ópticas que compõem a infra-estrutura destas redes torna-se estritamente necessária a utilização de amplificadores ópticos para a regeneração do sinal que se propaga a distâncias acima de algumas dezenas de quilômetros. Nos enlaces ponto-a-ponto os amplificadores à fibra dopada com érbio (EDFA) apresentam-se como uma solução muito satisfatória, pois proporcionam altos níveis de ganho aos sinais, podendo amplificar diversos comprimentos de onda ao mesmo tempo e ainda com baixa adição de ruído. No entanto, este tipo de amplificador possui uma particularidade que pode inviabilizar sua utilização em redes ópticas com roteamento por comprimento de onda: a dependência do ganho com a potência de entrada na região de saturação do amplificador.

Nas redes ópticas com roteamento por comprimento de onda, a dependência do ganho com a potência de entrada torna o ganho do amplificador dependente do número de canais na sua entrada. Dessa maneira, dependendo do número de canais, amplifica-se mais ou menos os canais, o que pode causar sérias penalidades devido ao excesso ou falta de potência dos canais transmitidos, em ambos os casos deteriorando e até impossibilitando a transmissão da informação [2-3].

Com o intuito de evitar as variações de ganho em EDFA's, foram desenvolvidas técnicas de controle automático de ganho (AGC). Entre elas destacam-se as técnicas de controle de ganho totalmente ópticas [4-5] e as eletrônicas [6-7]. Ambas as técnicas são capazes de minimizar a dependência do ganho dos EDFA's com a potência de entrada, no entanto, melhorias ainda estão sendo desenvolvidas para torná-las ainda mais eficientes [8-9]. Neste trabalho são apresentados os resultados referentes ao desenvolvimento de um EDFA com controle automático de ganho utilizando uma técnica de controle eletrônico que se baseia em um controle digital das potências dos lasers de bombeio em resposta às variações de potência de entrada. O seu desempenho frente a situações encontradas em uma rede óptica são analisadas através de experimentos que simulam a inserção e retirada de canais na entrada do amplificador. São investigadas as influências dessa operação em termos de taxa de erro de bit, assim como, pela primeira vez segundo

conhecimento dos autores, é analisada a influência da posição do canal sobrevivente ao longo da banda C. O desempenho do controle eletrônico em termos de tempo de resposta também é apresentado.

II. EDFA AGC ELETRÔNICO

Em EDFAs com controle de ganho eletrônico, o ganho do amplificador é controlado através da potência dos lasers de bombeio. Através de um circuito de controle que monitora as potências de entrada e de saída do EDFA, o ganho é obtido e, caso haja uma diferença em relação ao ganho desejado, as potências dos lasers de bombeio são ajustadas de forma a manter o ganho do EDFA constante. A variação de ganho do amplificador é determinada principalmente por três fatores: a resposta do ganho do amplificador às variações no sinal de entrada antes do ajuste do bombeio, a resposta da eletrônica de controle e a velocidade da mudança do ganho do amplificador devido à atuação no bombeio. Destes três fatores, o tempo de resposta do circuito eletrônico é o único independente dos processos físicos ocorridos na fibra dopada com érbio. Os outros dois fatores variam em função do ganho, da potência, do comprimento de onda do bombeio, do nível de potência dos canais e da alocação destes canais [9].

O EDFA com controle automático de ganho eletrônico desenvolvido implementa o controle digital das potências dos lasers de bombeio através de um microprocessador. Este possui uma potência de saída de +17 dBm, com dois estágios de amplificação, onde um foi bombeado na direção co-propagante e o outro contra-propagante, sendo otimizado para operar como amplificador de potência, *booster*, permitindo até +5 dBm de sinal de entrada.

Devido ao fato do controle do ganho ser realizado pelo ajuste dos lasers de bombeio, não é possível a correção de ganho para variações na potência de entrada superiores a 11 dB, o que representa uma variação máxima de 9 de 10 canais. Isto ocorre pois os lasers de bombeio possuem um máximo e um mínimo bem definidos de potência de operação e a implementação do *firmware* garante a operação destes apenas dentro destes limites. Portanto, variações de ganho superiores à capacidade de correção dos bombeios não serão completamente corrigidas, e sim apenas minimizadas até o ponto de máximo ou mínimo de operação do bombeio. Dessa maneira, a operação do EDFA AGC Eletrônico foi subdividida em regiões, denominadas modos de operação, sendo a operação do EDFA para duas delas $G^*=12$ dB e $G^*=20$ dB apresentadas neste trabalho. Cada modo de operação é capaz de garantir o ganho G^* por canal durante toda a extensão de sua região de operação, que é dada em termos da potência total de entrada do amplificador. Para o modo $G^*=12$ dB, a região de operação do EDFA está entre +5 e -6 dBm, ao passo que para o modo $G^*=20$ dB está entre -5 e -16 dBm.

As figuras de 1 a 3 demonstram a operação do EDFA AGC Eletrônico para os modos de operação $G^*=12$ dB e $G^*=20$ dB

em toda extensão da banda C para uma variação de 10 dB na potência de entrada do sinal composta por oito canais com potência de entrada por canal de -4 dBm ($G^*=12$ dB) e -14 dBm ($G^*=20$ dB).

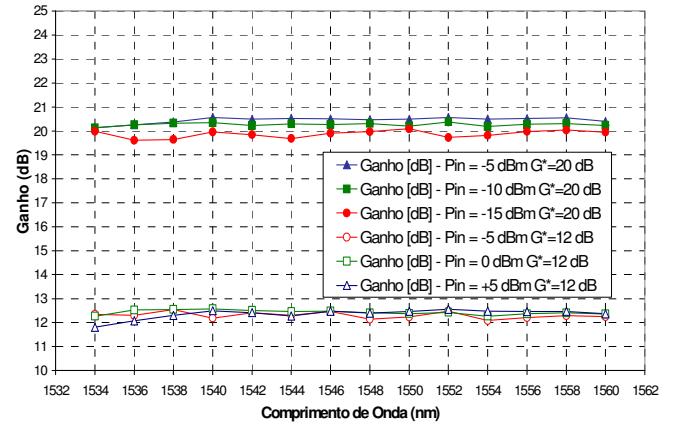


Fig. 1. Ganho versus comprimento de onda do EDFA AGC Eletrônico nos modos de operação $G^*=12$ e $G^*=20$ dB, para uma variação de potência de entrada de 10 dB em cada respectivo modo de operação.

Na figura 1 pode-se verificar que independentemente do nível de potência de entrada, os ganhos do EDFA mantêm-se aproximadamente em G^* , com uma variação máxima de 0,6 dB frente a uma variação de 10 dB na potência de entrada.

Na figura 2 é apresentado o comportamento da figura de ruído (NF) do EDFA, onde se verifica baixos níveis de figura de ruído para $G^*=20$ dB e maiores níveis para $G^*=12$ dB, como já era esperado devido aos maiores níveis de potência de entrada a que o modo $G^*=12$ dB é submetido.

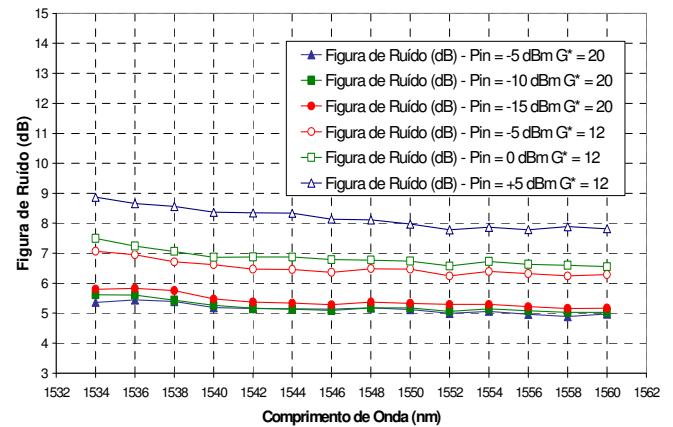


Fig. 2. Figura de ruído versus comprimento de onda do EDFA AGC Eletrônico nos modos de operação $G^*=12$ e $G^*=20$ dB, para uma variação de potência de entrada de 10 dB em cada respectivo modo de operação.

Na figura 3, o comportamento da potência de saída em cada um dos modos é apresentado. Pela figura pode-se claramente perceber a atuação dos lasers de bombeio frente às variações da potência de entrada. Ou seja, no modo $G^*=20$ dB, para uma potência total de entrada de -5 dBm, o EDFA exibe aproximadamente +15 dBm ($G=20$ dB) na saída; neste mesmo modo, para uma potência de -15 dBm, o EDFA exibe uma potência de saída de aproximadamente +5 dBm ($G=20$ dB), o que demonstra claramente a atuação (neste caso, diminuição)

do controle nos bombeios de modo a manter G^* constante.

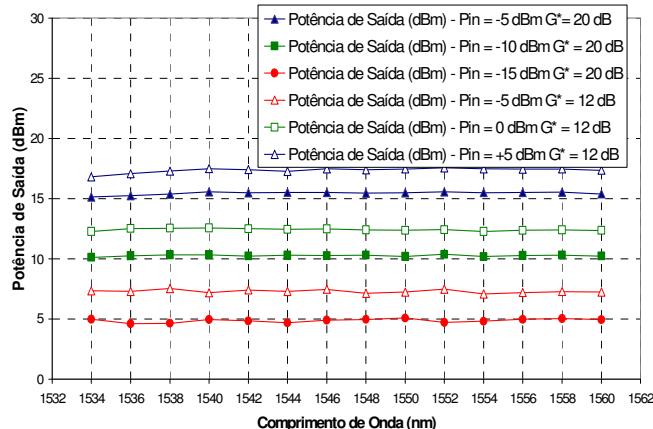


Fig. 3. Potência de saída versus comprimento de onda do EDFA AGC Eletrônico nos modos de operação $G^*=12$ e $G^*=20$ dB, para uma variação de potência de entrada de 10 dB em cada respectivo modo de operação.

III. ANÁLISE DO CANAL SOBREVIVENTE

Como citado anteriormente, o número de canais na entrada do EDFA varia de maneira dinâmica em função da inserção e ou a retirada de canais nos nós de rede efetuada pela gerência da rede óptica. Com o intuito de analisar a influência desta adição e ou remoção dinâmica de canais, utilizando-se do arranjo experimental da figura 4, submetemos o sistema à retirada de oito canais e analisamos a resposta do canal sobrevivente ao longo de toda banda C, comparando-a, para cada comprimento de onda, com a situação onde todos os

canais estavam sendo transmitidos. Foram utilizados oito canais modulados a 10 Gb/s igualmente espaçados (grade ITU) ao logo de toda banda C, sete deles são inseridos e retirados através de uma chave óptica com tempo de resposta de 180 ns, sendo então multiplexados com o canal sobrevivente (que não passa pela chave) e injetados a entrada do EDFA AGC Eletrônico.

Para a análise do canal sobrevivente, através do analisador de espectro óptico (OSA), são coletados os espectros do sinal na saída do EDFA com todos os canais e depois apenas com o canal sobrevivente. Com o intuito de analisar a alocação do canal sobrevivente, o mesmo é sintonizado em cada uma das oito posições dos canais transmitidos sendo realizada a remoção dos demais canais para cada posição do canal sobrevivente. Nas figuras 5 (a) e 5 (b) os espectros do sinal na saída do EDFA AGC Eletrônico para $G^*=12$ dB e $G^*=20$ dB são apresentados. Em cada uma destas figuras encontram-se plotados nove espectros de saída do EDFA, um referente à saída do EDFA com todos os oito canais transmitidos (escura), e outros oito referentes às saídas do EDFA apenas com a presença do canal sobrevivente em cada uma das posições dos canais transmitidos (claros). Como se pode verificar, em ambos os casos o amplificador minimiza de forma muito eficiente a variação de ganho induzida pela retirada de sete dos oito canais, que é de 9 dB. Nas figuras 6 e 7, as variações de ganho assim como o comportamento do perfil de ganho do EDFA são detalhadamente analisados.

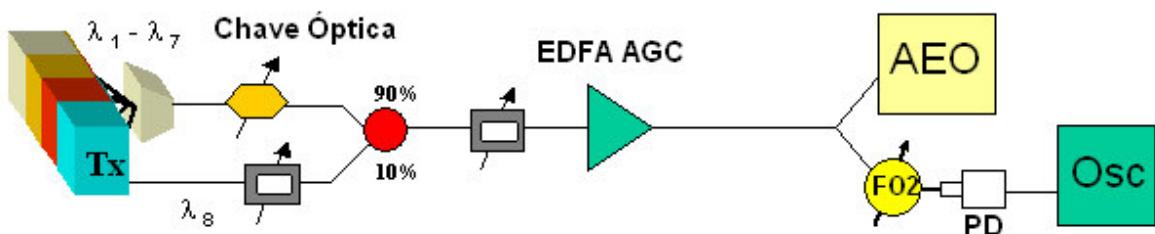
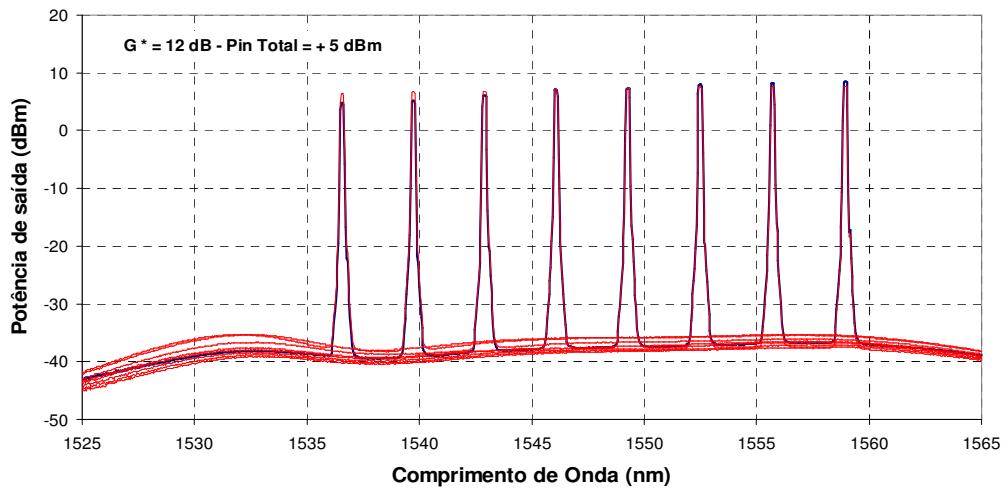


Fig. 4. Arranjo experimental utilizado nas análises de desempenho do EDFA AGC Eletrônico desenvolvido.



(a)

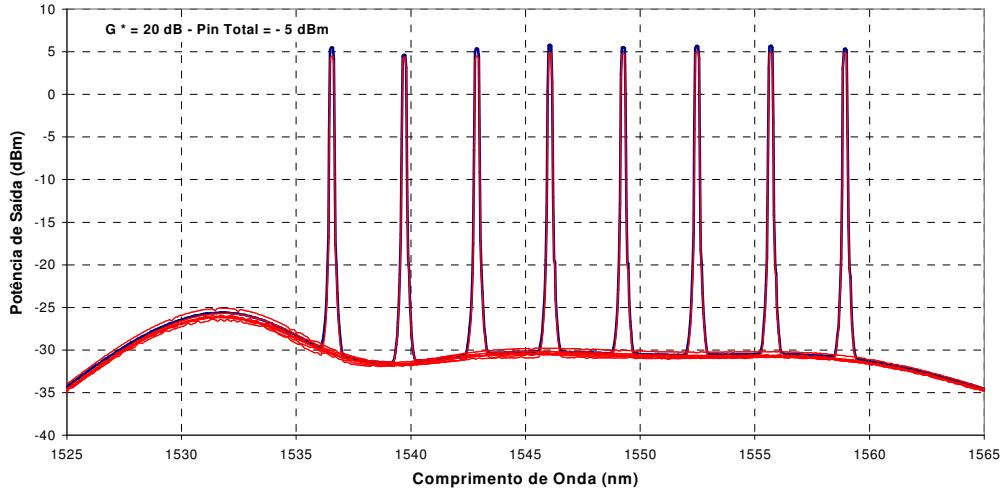


Fig. 5. Espectros de saída do EDFA AGC Eletrônico nos modos $G^*=12$ dB (a) e $G^*=20$ dB (b). Em cada gráfico encontram-se nove espectros correspondentes à saída do EDFA com todos os canais e para o canal sobrevivente em cada uma das posições correspondentes aos canais transmitidos.

Como se pode verificar na figura 5(a) e mais claramente na figura 6, como esperado, no modo de operação $G^*=12$ dB com todos os canais presentes ($Pin_{Tot}=+5$ dBm) a desequalização de ganho na banda C (*tilt*) é bastante significativa, aproximadamente 4 dB, nível este muito bom comparado a amplificadores comerciais que desequalizam bem mais os sinais para este nível de potência de entrada. No entanto, pode-se verificar na figura 6 que o ganho do canal sobrevivente apresenta uma variação máxima de 1 dB em relação ao ganho desejado ($G^*=12$ dB), com *tilt* também inferior a 1 dB ao longo da banda C. Dessa maneira a variação de ganho no EDFA em resposta à retirada de sete de oito canais possui níveis inferiores a 1 dB em toda banda C, demonstrando assim a eficácia do controle de ganho do EDFA operando como *booster*. Na figura 6 verifica-se que alguns comprimentos de onda exibem variação de ganho maior que 1 dB. Isto ocorre porque esta variação é calculada como a diferença entre o ganho do EDFA com todos os canais e o ganho com apenas o canal sobrevivente. No entanto, como para este nível de potência a saída do EDFA encontra-se desequalizada, é mais coerente tomar a variação de ganho como a diferença entre o ganho do canal sobrevivente e o ganho desejado.

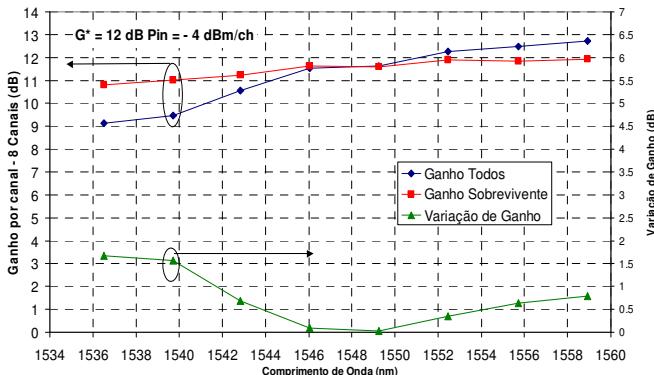


Fig. 6. Ganhos e variação de ganho para o EDFA AGC Eletrônico ($G^*=12$ dB).

Na figura 7, o ganho e a variação de ganho para o modo de

operação $G^*=20$ dB é ilustrado. Como se pode verificar há um grande acordo ao longo de toda banda C entre o ganho dos canais quando todos ou apenas um é acoplado à entrada do EDFA. Como resultado disto, uma variação de ganho menor que 1 dB ao longo de toda banda C é verificada frente à variação de 9 dB a qual o nível de potência de entrada do EDFA é submetido. Neste modo de operação foram utilizados 8 canais com potência de -14 dBm, resultando numa potência de entrada total de -5dBm.

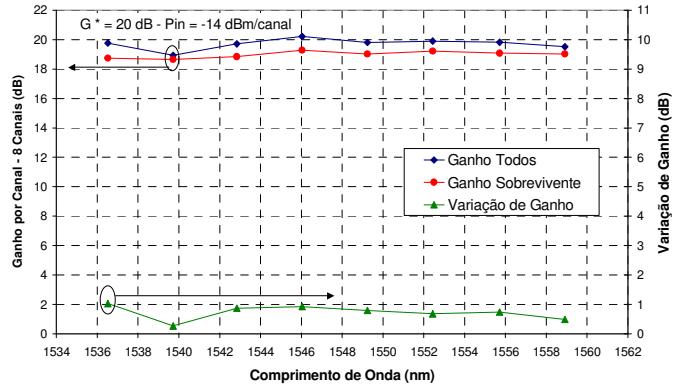


Fig. 7. Ganhos e variação de ganho para o EDFA AGC Eletrônico ($G^*=20$ dB).

Pode-se verificar, que independente da posição do canal sobrevivente, o EDFA AGC Eletrônico minimiza de forma bastante significativa a variação de ganho do EDFA. No entanto, para altas potências de entrada, a região preferível para a alocação dos canais a serem transmitidos na banda C encontra-se após 1540 nm, pois quanto maior a desequalização de ganho do EDFA, maiores serão as dificuldades para a eficiente correção do ganho.

IV. TEMPO DE RESPOSTA E BER DO EDFA AGC ELETRÔNICO

Utilizando-se do arranjo experimental mostrado na figura 4, a resposta temporal do EDFA AGC Eletrônico foi analisada. Nesta análise, o mesmo mecanismo de adição e remoção de

sete dos oito canais foi utilizado, no entanto, foram feitas duas análises distintas para o sinal de saída do amplificador. Primeiro, a saída do EDFA foi acoplada a um fotodetector para análise da variação da potência de saída total do EDFA em resposta à variação da potência de entrada, figura 8 (a) e (b). Por fim, a saída do EDFA foi filtrada no comprimento de onda do canal sobrevivente escolhido, 1558,98 nm, sendo então acoplada ao fotodetector e realizada a mesma análise que para o caso anterior.

Como citado anteriormente, a variação de ganho em um EDFA com controle automático de ganho eletrônico depende de processos físicos (tempo de decaimento e nível de inversão de população) da fibra dopada com érbio, sendo apenas o tempo de resposta do circuito eletrônico independente destes [9]. Dessa maneira, no EDFA com controle eletrônico de ganho desenvolvido, um grande esforço foi realizado na otimização do tempo de resposta do *firmware* de controle. Foi obtido um tempo de resposta para o circuito eletrônico de aproximadamente 2 ms, sendo que a este deve ser somado o tempo necessário para a estabilização do ganho devido aos processos físicos da fibra dopada.

Nas análises seguintes, o EDFA AGC Eletrônico opera no modo $G^*=20$ dB com níveis de potência de entrada variando entre -14 dBm (1 canal) e -5 dBm (oito canais).

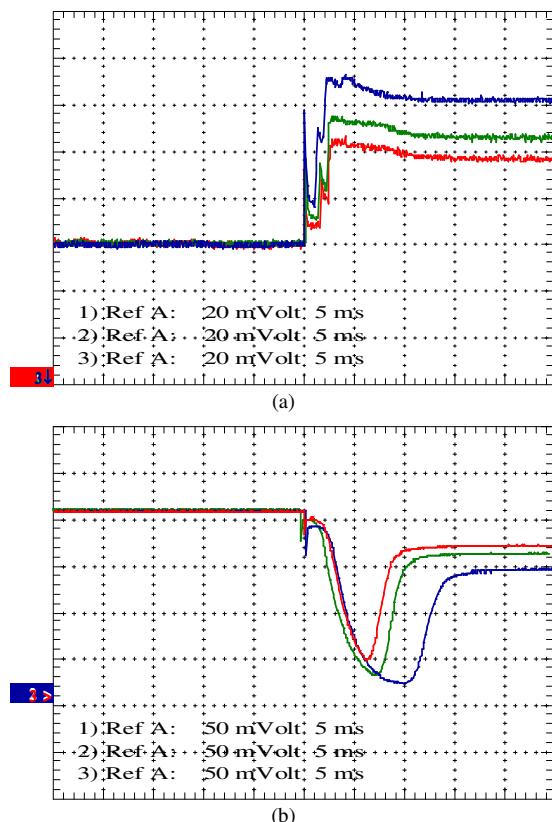


Fig. 8. Resposta temporal da potência de saída total do EDFA com controle de ganho eletrônico, ($G^*=20$) para: (a) acréscimos de potência de entrada de 10 dB (acima), 7 dB (meio) e 3 dB (abaixo); (b) decréscimos de potência de entrada de 10 dB (acima), 7 dB (meio) e 3 dB (abaixo).

Na figura 8, verificamos a variação da potência de saída frente às variações na potência de entrada. Como podemos verificar na figura 8 (a), quanto maior a variação na potência

de entrada, maior o ajuste realizado na potência de saída, e como consequência, maior nível de potência de bombeio. Isto ocorre, pois com o aumento da potência de entrada, o ganho nos canais sobreviventes diminui e, dessa forma, o controle atua aumentando a potência do bombeio para manter o ganho desejado constante. Na figura 8 (b), é verificado um comportamento contrário ao caso anterior, porém neste caso quanto maior o decréscimo na potência de entrada, maior o decréscimo na potência de bombeio.

No que diz respeito ao tempo de resposta, verifica-se na figura 8 (a), que, em 10 ms, o EDFA estabiliza a potência de saída no nível adequado para a manutenção do ganho independentemente da magnitude desta variação. Já na figura 8 (b), verifica-se que o tempo de resposta depende da magnitude da variação de potência de entrada, possuindo um tempo de resposta de aproximadamente 15 ms para uma variação de 10 dB e de 8 ms para uma variação de 3 dB.

Acreditamos que este tempo de resposta mais lento e variável deve-se ao fato de que quando diminuímos o nível de bombeio do EDFA, o tempo levado para a despopulação do nível meta-estável depende da amplitude da diminuição de bombeio, portanto, menores variações levam menores tempos. Outro ponto é que quando da diminuição do bombeio, os portadores que já estavam no nível meta-estável apresentam um tempo de queda maior (devido ao processo de recombinação espontânea) que o tempo de inversão de população dos portadores quando do aumento do nível de bombeio.

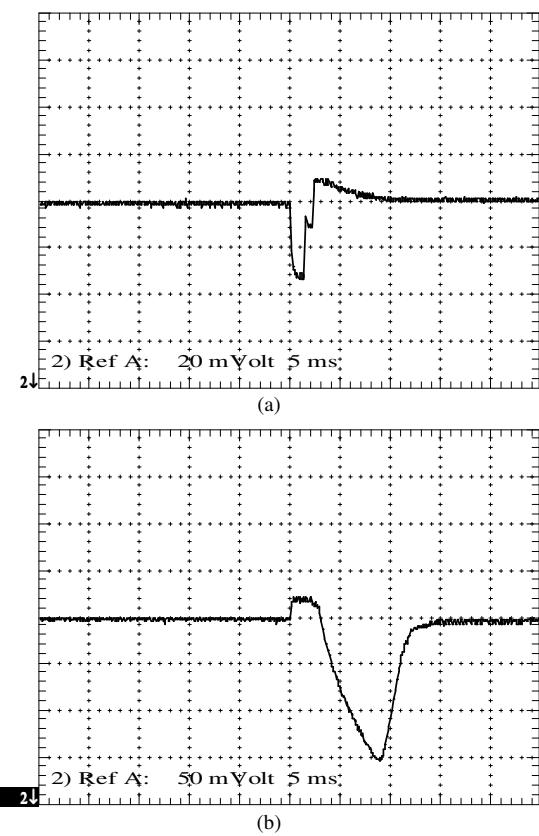


Fig. 9. Resposta temporal do canal sobrevivente na saída do EDFA com controle de ganho eletrônico, ($G^*=20$) para: (a) acréscimo de potência de entrada de 10 dB; (b) decréscimo de potência de entrada de 10 dB.

Na figura 9, apenas o canal sobrevivente é analisado. Desta maneira, como podemos verificar nas figuras 9 (a) e 9 (b), o nível de potência do canal sobrevivente é praticamente o mesmo antes e após o transiente levado pelo EDFA para corrigir o ganho do amplificador, demonstrando assim a eficácia do método de controle utilizado. Com relação ao tempo de resposta, como esperado, nada muda em comparação com figura 8, dessa maneira para uma variação de 10 dB (retirada de canais) um tempo de resposta máximo de 15 ms é verificado.

Na realidade, o ganho do canal sobrevivente após a correção de ganho pode variar até 1 dB (vide figuras 6 e 7). A figura 10 ilustra o impacto desta variação tanto para a inserção, figura 10 (a), quanto para a remoção, figura 10 (b), de sete canais. Nestas figuras, a taxa de erros foi mantida em 10^{-9} e após seis medidas nesta taxa, sete canais foram inseridos e retirados sendo verificado o impacto destas na taxa de erros. Uma variação máxima de uma ordem de grandeza para mais (inserção) e para menos (remoção) é verificada, para este sistema que utiliza oito lasers modulados a 10 Gb/s. Desta maneira, pode-se verificar que o EDFA AGC Eletrônico praticamente anula, em termos de taxa de erros, os efeitos da inserção e retirada de canais, sendo, portanto um dispositivo bastante adequado para utilização em redes ópticas com roteamento de comprimento de onda.

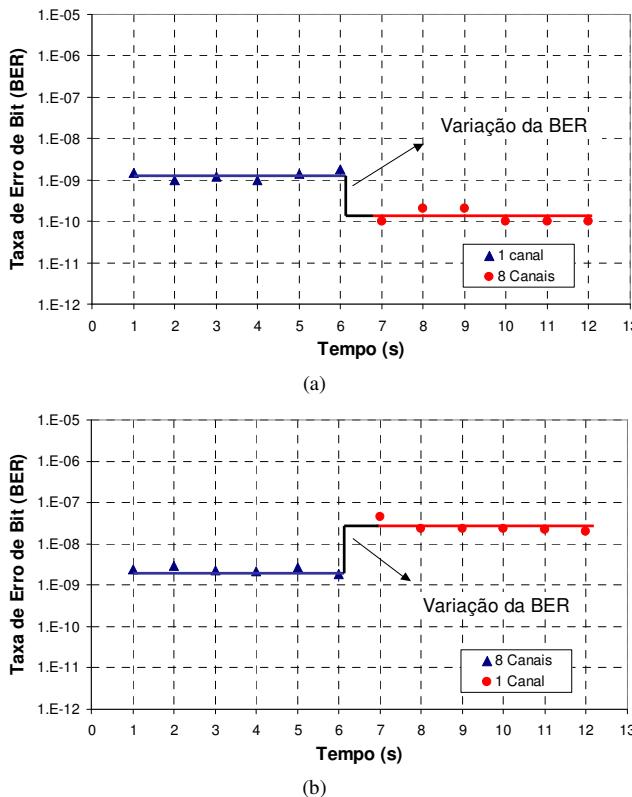


Fig. 10. Variação da taxa de erro de bit (BER): (a) inserção de 7 canais; (b) retirada de sete canais.

V. CONCLUSÃO

Foram apresentadas as medidas de desempenho de um EDFA desenvolvido com controle automático de ganho eletrônico.

Foi verificado que o EDFA apresenta um controle de ganho muito eficiente (variação de ganho inferior a 1 dB) ao longo de toda banda C frente a variações de potência de entrada de 10 dB. O valor de ganho proporcionado pelo EDFA foi de 12 dB ou 20 dB, onde para níveis de potência de entrada entre +5 e -5 dBm utiliza-se um ganho fixo de 12 dB e para potência de entradas entre -14 dBm e -5 dBm utiliza-se um ganho fixo de 20 dB. Foi analisado o impacto da alocação do canal sobrevivente ao longo de toda banda C, onde foi verificado que independentemente da posição do canal sobrevivente, o EDFA consegue proporcionar variações no ganho inferiores a 1 dB, com tempo de resposta máximo de 15 ms. Por fim, verificou-se que utilizando este EDFA, a BER é praticamente inalterada (no máximo uma ordem de grandeza) frente à inserção ou à retirada de sete de oito canais na entrada do amplificador. Por estes fatores, o EDFA AGC Eletrônico desenvolvido apresenta um grande potencial para aplicação em redes ópticas com roteamento por comprimento de onda, podendo ser utilizado inclusive como amplificador de potência (*booster*), ou em qualquer outra forma de aplicação em redes óptica. Este amplificador faz parte dos dispositivos desenvolvidos para a Rede Experimental de Alta Velocidade do Projeto GIGA.

REFERÊNCIAS

- [1] R. R. Scarabucci, A. Paradisi, M. R. X. de Barros, A. E. Reggiani, F. D. Simões, S. M. Rossi, J. B. Rosolem, M. R. Salvador, A. C. Sachs, T. R. T. Fudoli, J. Fanton, M. L. Rocha, R. F. da Silva, E. Mobilon, V. Corso, L. Pezzolo, E. Bastida, J. M. D. Mendes, A. M. O. Cabral, J. A. Matiuso, M. C. Ide, R. Arradi, J.C. Said, J.C.R.F. de Oliveira, M.R. Horiuchi, M.A.D. Santos, M.F. Oliveira, A.A. Juriollo, B.J.G. Aragão, G. Carvalho, M. Montoya, "GIGA Project: A Brazilian high-speed optical network testbed", *30th European Conference on Optical Communication - ECOC'2004*, paper W44.P150, pp. 768. Setembro/2004. Estocolmo. Suécia.
- [2] S. Kuwano and H. Wematsu, "Two-fiber unidirectional OADM ring system for L-band", in Proc. NFOEC 2000, pp. 74-85, 2000.
- [3] D. Richards, J. Jackel, and M. Ali, "A theoretical investigation of dynamic all-optical automatic gain control in multichannel EDFAAs and EDFAAs cascades," *IEEE J. of Select. Topics Quantum Electron.*, vol. 3, no. 4, pp. 1027-1036, 1997.
- [4] M. Zirngibl, "Gain control in erbium-doped fibre amplifiers by an all optical feedback loop", *Electron. Lett.*, vol. 27, no. 7, pp. 560-561, 1991.
- [5] C. Kim, H. Yoon, S. Lee, C-H. Lee e Y. Chung, "All-Optical gain controlled bi-directional add-drop amplifier using fiber Bragg gratings," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol.12, pp. 894-896, July 2000.
- [6] S. Y. Park, H. K. Kim, Gap. Y. Lyu, S.M. Kang e S-Y. Shin, "Dynamic gain and output power control in gain-flattened Erbium-Doped fiber amplifier", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 10, no. 6, pp. 787-789, 1998.
- [7] N. Jolley, F. Davis e J. Mun, "Out-of-band electronic gain clamping for a variable gain and output power EDFA with low dynamic gain tilt", em *Proc. OFC'97*, pp.134-135, paper WF7, 1997.
- [8] J.C.R.F de Oliveira, J.B. Rosolem e A. C. Bordonalli, "Design Requirements of All-Optical Gain Controlled EDFAAs for WDM Network Applications", *Frontiers in Optics 2004*, Rochester, NY.
- [9] C.Tian e S. Kinoshita, "Analysis and Control of Transient Dynamics of EDFA Pumped by 1480- and 980-nm Lasers", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 21, No. 8, pp. 1728-1734, Agosto, 2003.