

Supressão de Instabilidades Dinâmicas em um EDFA Utilizando uma Nova Configuração de Laser em Anel

D. H. Thomas, G. V. de Faria, J. P. von der Weid, *Membro IEEE*

Resumo — Objetivando suprimir as instabilidades dinâmicas em um amplificador à fibra dopada com érbio (EDFA), uma nova configuração de laser em anel é apresentada e demonstrada. Neste trabalho, analisamos os efeitos da variação do nível de atenuação no laço de re-alimentação sobre a resposta transitória do EDFA. Particularmente, observamos as excursões de potência óptica experimentadas pelo canal sobrevivente quando sete dentre oito canais da rede são adicionados ou removidos. Sob esta análise, avaliamos o desempenho do sistema em suprimir as instabilidades dinâmicas de ganho do EDFA.

Palavras-Chave — Amplificadores à fibra dopada com érbio, multiplexação por divisão do comprimento de onda, planura de ganho, cavidades ressonantes, re-alimentação óptica e dispositivos optoeletrônicos.

Abstract — A new ring laser configuration to eliminate the output power dynamic instabilities of an erbium doped fiber amplifier is proposed and demonstrated. We examine the effect of the attenuation level in the optical feedback path over the transient response of the EDFA. In particular, we look at the transient power excursions experienced by surviving channel when seven of eight channels are added or dropped. Using this analysis as a guide, we highlight the robustness of the approach and evaluate its performance to gain stabilization.

Index Terms — Erbium doped fiber amplifiers, wavelength division multiplexing, flat gain, laser resonators, optical feedback and optical fiber devices.

I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a demanda por capacidade de transmissão tem aumentado, dentre outros motivos, em virtude do rápido desenvolvimento da telefonia e Internet. Conseqüentemente, verificou-se o crescimento do interesse no estudo das redes multiplexadas por divisão de comprimento de onda ópticas (WDM – óptico), que são flexíveis e permitem o gerenciamento da capacidade do sistema óptico.

Tais redes tornaram-se possíveis em virtude da disponibilidade da amplificação óptica, particularmente por meio dos amplificadores à fibra dopada com érbio (EDFAs).

Atualmente, os EDFAs estão entre as melhores alternativas de amplificação óptica na faixa de comprimentos de onda em torno de 1,5 μm , podendo ser utilizados tanto em sistemas de transmissão digital quanto analógica. O que o habilita a desempenhar bem estas funções são as suas características superiores tais como alto ganho, alta potência de saída, elevada linearidade, baixo ruído, baixa perda de inserção, ampla faixa de comprimentos de onda de operação e disponibilidade de operação em uma linha de transmissão por fibra óptica [1]. Aliado às técnicas WDM, os EDFAs oferecem vantagens econômicas e de performance de rede por meio do aumento da capacidade, confiabilidade e transparência da comunicação [2].

O advento dos EDFAs revolucionou o campo das comunicações ópticas, especialmente em dois aspectos: em primeiro lugar, o seu alto ganho permitiu a implementação de sistemas ópticos de longa distância onde os repetidores estão espaçados de mais de 100 km; em segundo lugar, eles disponibilizaram uma maior banda passante de sistema. Estas características permitem acomodar, simultaneamente, múltiplos canais, sem uma penalidade significativa por sobre-modulação (*crosstalk*).

Mesmo sendo o EDFA uma tecnologia chave na realização de comunicações WDM transparentes e apesar de sua performance singular, grandes desafios tecnológicos ainda restam. Estes desafios crescem exponencialmente com o aumento da complexidade das redes, alcançando grandes e reconfiguráveis redes, onde a dinâmica acentua as dificuldades e impõe um elevado desempenho tecnológico dos componentes ópticos. Neste aspecto, dentre os mais significativos desafios estão aqueles relacionados com a *dinâmica de ganho do EDFA*.

O número de canais passantes no EDFA em um determinado instante varia em função da reconfiguração da rede, ou seja, o aumento de sua capacidade para suportar um maior número de canais ou ainda em virtude de alguma falha causadora da queda de um ou mais canais da rede.

Considerando que os amplificadores em uma rede óptica operam em um nível de potência próximo ou acima da saturação e, ainda mais, a potência total de saída do EDFA é aproximadamente constante, independentemente do número de canais passantes, o ganho de cada canal em particular dependerá do número de canais presentes em um instante de tempo específico. Assim, surgirão perturbações variantes no

D. H. Thomas, G. V. de Faria e J. P. von der Weid, Laboratório de Optoeletrônica, Centro de Estudos em Telecomunicações, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, E-mails: thomas@cetuc.puc-rio.br, gian@cetuc.puc-rio.br, vdweid@cetuc.puc-rio.br. Este trabalho foi financiado pela Ericsson Telecomunicações S/A e FAPERJ.

tempo ou transientes decorrentes da saturação cruzada em outros canais do amplificador.

O aumento do ganho dos canais remanescentes, em virtude da remoção de parte dos canais passantes (*saturação cruzada*) aumenta a taxa de erro do sistema, uma vez que a potência dos canais restantes ultrapassará o limiar que determina o surgimento de efeitos não-lineares, como por exemplo o espalhamento Brillouin [1].

Uma vez que um EDFA não será utilizado em uma rede óptica multicanal à menos que a informação transmitida em um canal qualquer não seja prejudicada por alterações nos outros canais, tanto os transientes na potência de saída quanto a planura do ganho em toda a faixa passante do amplificador devem ser controlados [2]. O objetivo principal da estabilização é manter constante a potência de saída dos canais individuais, sem degradação da relação sinal-ruído do sistema (*signal-noise ratio - SNR*), independentemente do número de canais passantes.

Com o objetivo de estabilizar a potência de saída dos canais passantes em um EDFA quando da reconfiguração da rede, [3] desenvolveu um sistema de controle de ganho que combina a ação de um circuito eletrônico que atua sobre o bombeio com um canal de re-alimentação óptica; [4] e [5] avaliam a performance de um controle de ganho por meio de um canal laser; [6] combate a oscilação do sinal por meio da re-alimentação da potência de ASE (*Amplified Spontaneous Emission - Emissão Espontânea Amplificada*) em um determinado comprimento de onda; [7] utiliza duas cavidades ópticas combinadas como controle de ganho; [1] emprega um circuito eletrônico compensador; [8] propõe um controle híbrido que emprega dois canais de re-alimentação, um óptico e outro elétrico; [9] utiliza um absorvedor saturável no laço de re-alimentação; [10] utiliza um controle de ganho passivo baseado em um sinal laser e [11] emprega uma grade de Bragg para injetar uma parcela da potência de ASE da *banda C* como sinal de re-alimentação do sistema.

Buscando alcançar o mesmo objetivo, construímos uma nova configuração de laser em anel, baseada nas propriedades de transmissão de dois circuladores e duas grades de Bragg (*FBG - Fiber Bragg Grating*) localizadas nas saídas do sistema. O sinal óptico da entrada se propaga através do EDFA e é refletido pela FBG da saída do sistema, em um comprimento de onda específico. Dois circuladores compõem o caminho de re-alimentação. A FBG localizada na entrada do sistema reflete a luz oriunda do laço de re-alimentação para dentro do EDFA, no mesmo comprimento de onda específico, completando a configuração em anel (veja figura 1 da próxima seção) [8].

Este trabalho está organizado da seguinte forma: a seção II descreve a configuração utilizada; a seção III apresenta os resultados práticos obtidos; a seção IV é a conclusão e por fim são listadas as referências bibliográficas.

II. CONFIGURAÇÃO

A figura 1 a seguir ilustra a nova configuração de laser em anel, baseada nas propriedades de transmissão de dois

circuladores e duas grades de Bragg, colocadas nas saídas do sistema.

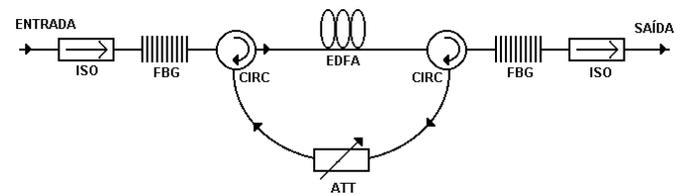


Fig. 1 Nova configuração de laser em anel. EDFA: Amplificador à fibra dopada com érbio, ATT: Atenuador, CIRC: Circulador, FBG: Grade de Bragg, ISO: Isolador.

O sinal oriundo da entrada viaja através do EDFA e, após amplificado, é refletido pela FBG posta na saída do sistema, em seu comprimento de onda característico (neste caso, 1564 nm). Por conseguinte, este sinal se propaga em sentido contrário e penetra no laço de re-alimentação através do circulador. Dois circuladores compõem o laço de re-alimentação e o nível de potência óptica do sinal viajante neste laço pode ser ajustado por meio de um atenuador programável. A FBG, localizada na entrada do sistema, reflete a luz oriunda do laço de re-alimentação, no mesmo comprimento de onda (1564 nm), para dentro do EDFA, completando a configuração em anel.

A partir do estabelecimento de um nível de potência adequado do sinal viajante no laço de re-alimentação, verifica-se a oscilação dentro da cavidade no comprimento de onda característico e a potência de saída do EDFA é grampeada à potência do limiar desta oscilação [12], [11].

No sistema implementado, fez-se uso de dois isoladores, tanto na entrada quanto na saída do sistema. Seu emprego é justificado pelos sinais ópticos de elevada potência que viajam no interior do anel, cujas possíveis reflexões poderiam danificar os demais componentes empregados. À propósito, o EDFA utilizado no desenvolvimento deste trabalho é um amplificador comercial, fechado, fabricado pela Ericsson Telecomunicações S/A, disponível no mercado.

III. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Objetivando avaliar o comportamento dinâmico do EDFA, examinamos o efeito do nível de atenuação no laço de re-alimentação sobre a resposta transitória do EDFA. Em particular, observamos as excursões de potência experimentadas pelo canal sobrevivente quando sete dentre oito canais viajantes através do EDFA são adicionados ou removidos, à exemplo do que ocorre em sistemas WDM reais sujeitos à reconfiguração.

Para tanto, injetamos um sinal de prova com potência de -25 dBm na entrada do sistema. Utilizamos dois sinais de prova em comprimentos de onda diferentes, 1532 nm e 1554 nm. Para simular o efeito da reconfiguração do sistema WDM, acoplamos à entrada um sinal no comprimento de onda 1540 nm, modulado na frequência de 200 Hz, com potência de -16,5 dBm. Este sinal de entrada modulado

representa a adição e remoção de sete dentre oito canais da rede (considerando a potência de entrada por canal de -25 dBm).

Procurando a condição de menor variação de ganho do sistema, estabelecemos diferentes níveis de potência de sinal no laço de re-alimentação, por meio do atenuador variável. Para cada condição, encontramos um ganho correspondente. Estas informações podem ser lidas nas figuras a seguir, que ilustram as excursões de potência sofridas pelo oitavo canal do sistema, quando os sete restantes são adicionados ou removidos. A linha pontilhada ilustra o momento exato da reconfiguração da rede.

Primeiramente, mostramos a dinâmica de ganho do oitavo canal do sistema quando ocorre a *adição* dos outros sete canais, para ambos os sinais de prova, 1532 nm e 1554 nm, respectivamente:

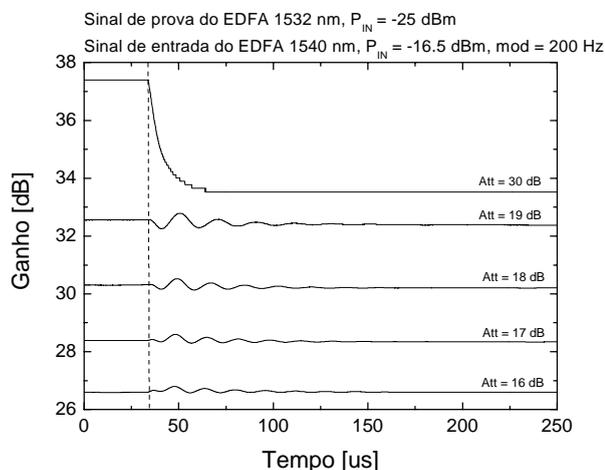


Fig. 2 Dinâmica de ganho do EDFA quando sete dentre oito canais são adicionados, sinal de prova 1532 nm.

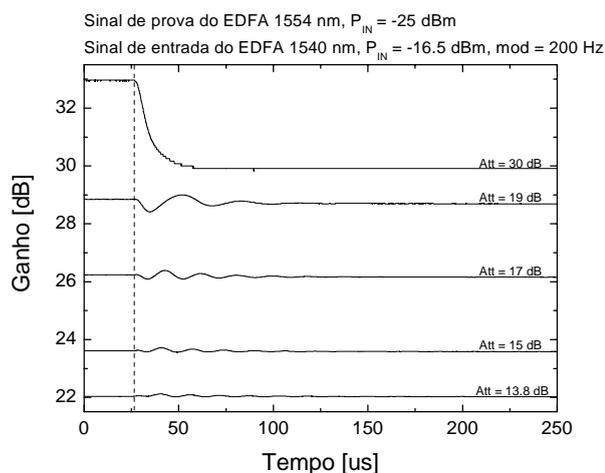


Fig. 3 Dinâmica de ganho do EDFA quando sete dentre oito canais são adicionados, sinal de prova 1554 nm.

Por sua vez, as figuras a seguir ilustram a dinâmica de ganho do oitavo canal do sistema quando ocorre a *remoção* dos outros sete canais, para ambos os canais de prova, como na situação anterior:

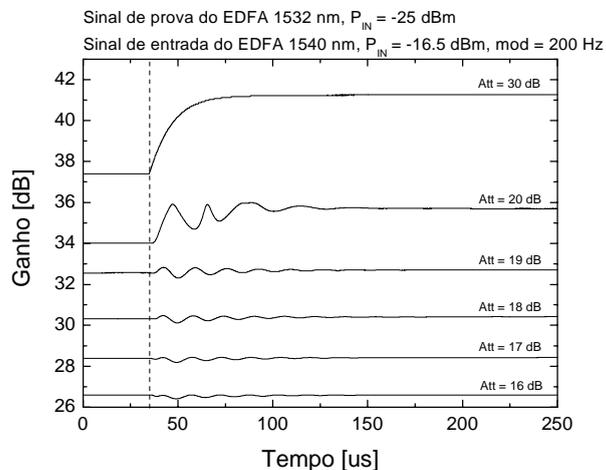


Fig. 4 Dinâmica de ganho do EDFA quando sete dentre oito canais são removidos, sinal de prova 1532 nm.

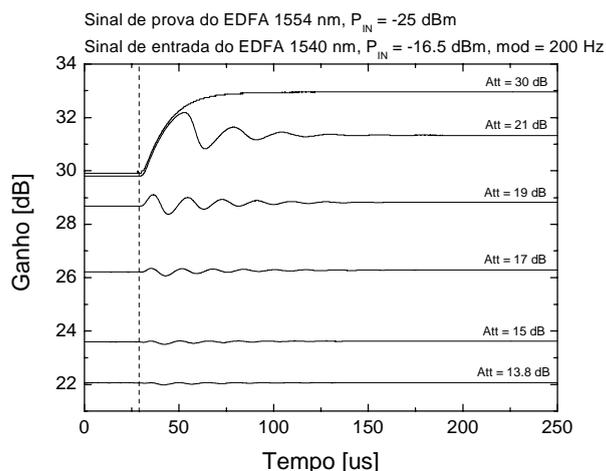


Fig. 5 Dinâmica de ganho do EDFA quando sete dentre oito canais são removidos, sinal de prova 1554 nm.

Quando ajustamos a atenuação ou perda do laço de re-alimentação, determinamos também a magnitude de ganho que será sacrificada, prejudicando a performance do sistema. Quando todos os canais da rede estão presentes, o sinal de re-alimentação não é emitido, o que significa que o seu crescimento inicia-se a partir do nível de potência da ASE. No princípio, o crescimento é lento e o sinal de re-alimentação não exerce influência significativa sobre a resposta dinâmica do sistema. À partir de um determinado nível, quando a perda no laço diminui, o sinal de re-alimentação é emitido mesmo quando todos os canais estão presentes. Quando um canal é removido, a potência do sinal de re-alimentação aumenta, mas desta vez o seu crescimento inicia-se a partir de um nível de

potência superior e o ganho é grampeado mais rapidamente, de forma que as ondulações dinâmicas de ganho diminuam.

Portanto, pode-se tornar a variação de ganho do canal sobrevivente insignificante, mas isto será alcançado às custas de uma redução do ganho disponível. Certamente, a menor variação de ganho possível para o canal sobrevivente é preferível, mas um ganho baixo poderá comprometer a performance do sistema ao refletir-se no aumento da figura de ruído.

Por isso, como existe um compromisso entre o ganho e sua variação, é necessário determinar o ponto de operação ótimo para o sistema. Isto significa ajustar o nível de atenuação no laço de re-alimentação para a melhor performance do sistema, com baixa figura de ruído. Os gráficos seguintes facilitam esta tarefa, pois mostram o ganho e sua variação em função do nível de atenuação no laço de re-alimentação para ambos os sinais de prova, 1532 e 1554 nm:

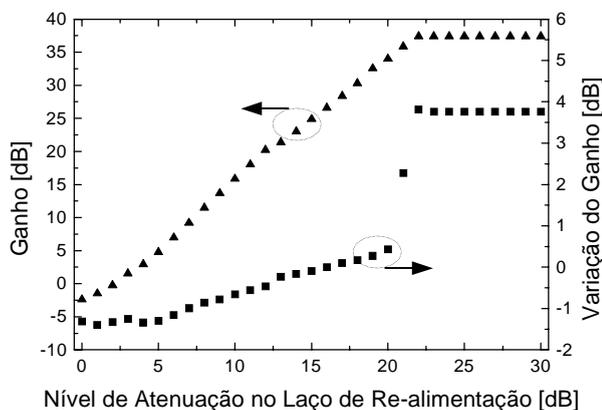


Fig. 6 Ganho e variação do ganho do EDFA em 1532 nm.

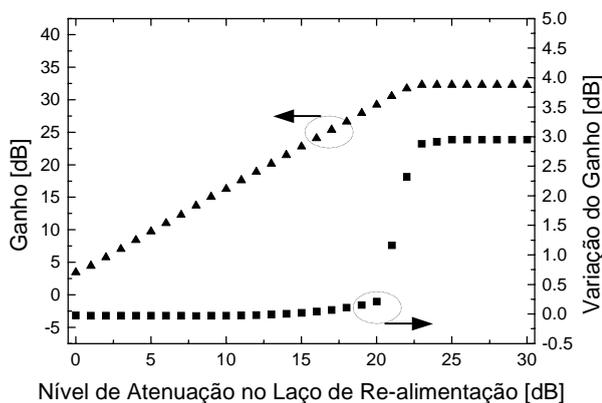


Fig. 7 Ganho e variação do ganho do EDFA em 1554 nm.

De acordo com as figuras 2, 4 e 6 acima, para o sinal de prova de 1532 nm, podemos ajustar o atenuador no laço de re-alimentação para 19 dB e trabalhar com um ganho de 32.55 dB, que significa uma compressão de ganho de 4.85 dB, cuja

variação do ganho associada é de 0.27 dB. Ou, caso a performance desejada para o sistema implique em ganho e variação de ganho menores, ajustamos o atenuador para 17 dB e trabalhamos com um ganho de 28.38 dB, que significa uma compressão mais acentuada de 9.02 dB e cuja variação do ganho correspondente é de 0.09 dB. Para o canal de prova em questão, o ganho plano ou variação de ganho nula é alcançada para uma atenuação de 16 dB e ganho de 26.59 dB.

Da mesma forma, as figuras 3, 5 e 7 nos mostram como escolher o ponto de operação quando o canal de prova for 1554 nm. Neste caso, uma perda de 19 dB no laço de re-alimentação permite alcançar um ganho de 28.8 dB para o sistema, com compressão de ganho de 3.7 dB e variação de ganho de 0.15 dB; por outro lado, com uma perda de 17 dB, o ganho alcançado é de 26.2 dB, a compressão de ganho é de 6.3 dB e a variação de ganho 0.06 dB. Para este canal de prova, o ganho plano ou variação de ganho nula é alcançada para uma atenuação de 13.8 dB e ganho de 22 dB.

De acordo com a análise acima, o controle de ganho proposto apresenta melhor eficiência para o canal de prova de 1532 nm, visto que o ganho plano obtido é 26.59 dB, enquanto para 1554 nm o ganho plano é 22 dB. Isto acontece porque a inversão de população, a emissão e, conseqüentemente, a potência óptica disponível para o canal de prova de 1532 nm são maiores. Esta é uma característica do espectro de emissão do EDFA.

Ao observarmos as figuras 6 e 7 anteriores, notamos uma relação linear entre o ganho e o nível de atenuação no laço de re-alimentação. Uma menor atenuação significa uma maior saturação do sinal no EDFA, ou seja, um regime de saturação mais acentuado, com menor ganho e menor variação do ganho; por outro lado, uma atenuação maior significa um sinal menos saturado, ou seja, um regime de saturação superficial, com ganho elevado e grande variação do ganho. A pequena discrepância ao comportamento linear observada na curva de ganho da figura 6 está relacionada à efeitos não-lineares de *hole burning*, característicos do comprimento de onda de 1532 nm.

Ainda com relação às figuras 6 e 7, tanto a curva de ganho quanto de variação de ganho apresentam um "joelho". Este joelho representa o ponto a partir do qual inicia-se a oscilação na cavidade para o comprimento de onda de 1564 nm, ou seja, a perda no laço de re-alimentação, ajustada no atenuador, permite que o nível de potência do sinal re-alimentado em 1564 nm ultrapasse o limiar para a oscilação laser. Este limiar também pode ser observado nas figuras 2 a 5 acima, onde para uma perda de 30 dB nenhuma oscilação ocorre. Para o canal de prova de 1532 nm, o limiar corresponde à uma atenuação entre 22 e 20 dB e para 1554 nm este limiar corresponde à uma atenuação entre 23 e 20 dB no laço de re-alimentação. Como pode ser observado naquelas figuras, para atenuações menores há oscilação.

Além disso, ao compararmos as figuras 4 e 5 com as figuras 2 e 3, percebemos que as frequências características das excursões de ganho do canal sobrevivente são maiores quando

os demais canais são removidos do que quando os mesmos canais são adicionados. Isto ocorre porque o sinal oriundo do laço de re-alimentação tem menor eficiência em compensar as variações de ganho causadas pela remoção dos canais e, não sendo sua compensação tão eficiente, são observadas variações de potência maiores na saída do EDFA.

Ainda mais, das frequências características da variação do ganho do canal sobrevivente, é possível ler o tempo de resposta do sistema em questão.

Entretanto, a velocidade de resposta varia com o nível de inversão da população dos íons de Érbio (Er^{3+}) ao longo do meio amplificador. Experimentalmente, pode-se aumentar e reduzir o tempo de resposta do amplificador através do controle da potência de bombeio. Quando o nível de potência de bombeio é elevado, a inversão de população é total e o limiar para a oscilação diminui consideravelmente, permitindo uma resposta rápida do sistema; por outro lado, quando a potência de bombeio diminui, a inversão de população é apenas parcial e o limiar para a oscilação aumenta bastante, fazendo com que o sistema responda lentamente.

Sob esta análise, as figuras 2 a 5 acima mostram que o sistema de controle de ganho proposto permite alcançar a estabilidade de ganho do amplificador em, aproximadamente, 100 μ s, para ambos os canais de prova, 1532 e 1554 nm.

Complementarmente às figuras 6 e 7 acima, as figuras 8 e 9 a seguir ilustram o resultado da medida de figura de ruído para o sistema óptico em questão.

O método empregado para realizar tais medidas é o *Método de Subtração da Fonte (Source-Subtraction Method)*.

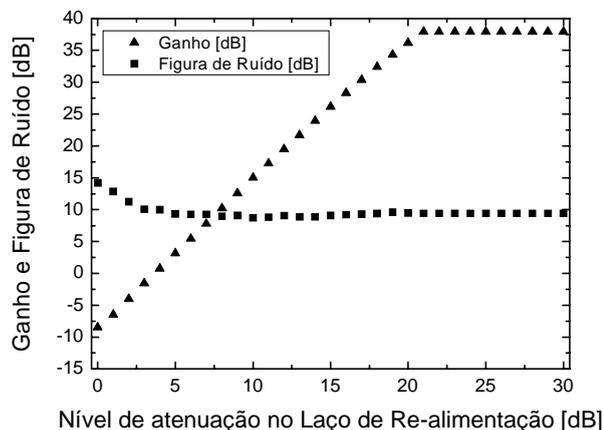


Fig. 8 Ganho e figura de ruído do sistema em 1532 nm.

Na figura acima, que ilustra a figura de ruído e o ganho do amplificador quando o canal de prova utilizado é 1532 nm, para níveis de atenuação no laço de re-alimentação acima de 20 dB, a figura de ruído é de aproximadamente 9.4 dB; já para uma atenuação de 10 dB, a figura de ruído medida é de 8.7 dB; para atenuações abaixo de 10 dB, a figura de ruído aumenta gradualmente, até atingir um valor máximo de 14 dB para uma atenuação nula. Neste último caso, o valor

encontrado para a figura de ruído é considerado muito elevado, porém previsível. Para atenuações menores do que 10 dB, o sistema opera sob um regime de profunda saturação, onde a compressão de ganho é muito acentuada, de forma que o nível de ruído gerado pelo amplificador é equivalente ao do sinal amplificado, situação que determina uma elevada figura de ruído e, conseqüentemente, uma péssima performance do sistema.

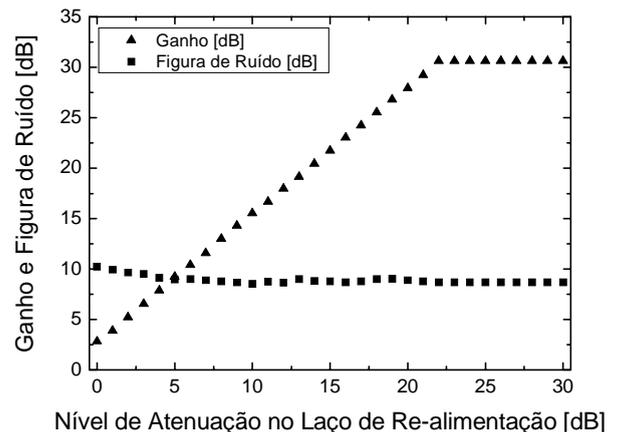


Fig. 9 Ganho e Figura de Ruído do sistema em 1554 nm.

Por sua vez, para o canal de prova de 1554 nm, vemos que para níveis de atenuação acima de 20 dB, a figura de ruído medida é de 8.7 dB, alcançando o valor de 8.5 dB para uma atenuação de 10 dB. Para atenuações abaixo de 10 dB, por motivos idênticos àqueles do caso anterior, a figura de ruído aumenta gradualmente, até atingir um valor máximo de 10.2 dB.

No caso da figura de ruído, especialmente, o canal de prova 1554 nm retrata com maior fidelidade a realidade do sistema em questão, visto que ao canal 1532 nm estão associados efeitos não-lineares de *hole burning*.

Desta forma, é possível afirmar que a figura de ruído do sistema é, aproximadamente, 8.5 dB. Entretanto, este é um valor considerado elevado para a figura de ruído. A literatura, em geral, classifica este tipo de sistema como *híbrido* e à ele associa uma figura de ruído que pode variar de 4 a 5.5 dB. A diferença de 3 dB em relação ao valor estimado é creditada aos isoladores do circuito e às emendas extras necessárias à sua inclusão, principalmente àquelas localizadas na entrada do sistema, pois seu efeito na degradação da figura de ruído é ainda maior. Descontadas estas penalidades extras, a nova figura de ruído obtida para o sistema se aproxima do valor previsto na literatura.

Logo, os resultados experimentais comprovam que o sistema de controle de ganho implementado tem grande capacidade para eliminar as variações e assim estabilizar o ganho do EDFA.

IV. CONCLUSÕES

Neste trabalho, apresentamos uma nova configuração de laser em anel com ótimo desempenho em eliminar as instabilidades de potência de saída de um EDFA.

Em [3], [9], [7], [13], [5], [10], [6], a configuração de controle de ganho empregada permitiu alcançar a variação de ganho de 1.0, 0.4, 0.3, 0.24, 0.31, 0.3 e 0.8 dB, de forma a suprimir a resposta transitória do sistema depois de 300, 200, 300, 300, 200, 150 and 1000 μ s e cujo ganho é de 21, 16, 25, 22, 23, 21 and 10 dB, respectivamente.

Por sua vez, a configuração de controle de ganho proposta neste trabalho fornece ganho plano de 26.59 e 22 dB para os canais de prova 1532 e 1554 nm respectivamente. Entretanto, tamanha compressão de ganho pode comprometer a performance do sistema, sendo aconselhável trabalhar em um regime de saturação menos acentuado. Por exemplo, podemos ajustar o atenuador do laço de re-alimentação em nosso sistema para 18 dB, obtendo o ganho de 30.31 dB e variação de ganho de 0.17 dB para o canal de prova 1532 nm e ganho de 26.62 dB com variação de ganho de 0.11 dB para o canal de prova 1554 nm. Além disso, de acordo com as figuras 2 a 5 dos resultados experimentais, o sistema proposto neste trabalho permite suprimir a resposta transitória do EDFA em 100 μ s, aproximadamente.

Portanto, com base nestes resultados afirmamos que a nova configuração de controle de ganho implementada e demonstrada neste trabalho apresenta desempenho superior na estabilização de ganho de um EDFA, uma vez que, independentemente do comprimento de onda do sinal de prova, nosso sistema permitiu alcançar um nível de ganho mais elevado (menor compressão), menor variação de ganho e menor tempo de resposta, possibilitando uma melhor performance do sistema de comunicação.

Como próximo desafio, pretende-se eliminar os componentes que causam maior degradação à figura de ruído, principalmente aqueles localizados na entrada do sistema, e otimizar o desempenho dos componentes essenciais, possivelmente através da alteração de sua posição no circuito, de forma a aprimorar a eficiência do sistema.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Ericsson Telecomunicações S/A e à FAPERJ pelo incentivo ao desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] N. Takahashi, T. Hirono, H. Akashi, S. Takahashi, T. Sasaki, "An Output Power Stabilized Erbium-Doped Fiber Amplifier with Automatic Gain Control", *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 3, No. 4, p. 1019-1026, 1997.
- [2] D. H. Richards, J. L. Jackel, Mohamed A. Ali, "A Theoretical Investigation of Dynamic All-optical Automatic Gain Control in Multichannel EDFA's and EDFA Cascades", *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 3, No. 4, p. 1027-1036, 1997.
- [3] S. V. Sergeev, E. Vanin, S. Popov, "Suppression of dynamic instabilities in erbium-doped fiber amplifiers with a combined gain control system", *Optics Letters*, vol. 27, No. 13, p. 1117-1119, 2002.
- [4] G. Luo, J. L. Zyskind, Y. Sun, A. K. Srivastava, J. W. Sullhoff, C. Wolf, M. A. Ali, "Relaxation oscillation and spectral hole burning in laser automatic gain control in EDFAs", *OFC'97 Technical Digest*, p. 130-131, 1997.
- [5] G. Luo, J. L. Zyskind, Y. Sun, A. K. Srivastava, J. W. Sullhoff, C. Wolf, M. A. Ali, "Performance Degradation of All-Optical Gain-Camped EDFA's Due to Relaxation-Oscillations and Spectral-Hole Burning in Amplified WDM Networks", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 9, No. 10, p. 1346-1348, 1997.
- [6] E. Desurvire, M. Zirngibl, H. M. Presby, D. DiGiovanni, "Dynamic Gain Compensation in Saturated Erbium-Doped Fiber Amplifier", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 3, No. 5, p. 453-455, 1991.
- [7] Y. Liu, M. F. Krol, "Transient Gain Control in EDFA's by Dual-Cavity Optical Automatic Gain Control", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 11, No. 11, p. 1381-1383, 1999.
- [8] M. Hashimoto, H. Sawada, M. Yoshida, Y. Imada, "A New Method for Low Noise Automatic Gain Control of EDFA's for Systems in Metropolitan Networks", *Mitsubishi Cable Industries, JAPAN*.
- [9] C. Wang, G. J. Cowle, "Optical Gain Control of Erbium-Doped Fiber Amplifiers with a Saturable Absorber", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 12, No. 5, p. 483-485, 2000.
- [10] B. Landoussies, T. Georges, E. Delevaque, R. Lebef, "Low Power Transient in Multichannel Equalised and Stabilised Gain Amplifier Using Passive Gain Control", *IEE Electronics Letters*, vol. 32, No. 20, p. 1912-1913, 1996.
- [11] S. W. Harun, S. K. Low, P. Poopalan, H. Ahmad, "Gain Clamping in L-Band Erbium-Doped Fiber Amplifier Using a Fiber Bragg Grating", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 14, No. 3, p. 293-295, 2002.
- [12] Seong Yun Ko, Myong Wook Kim, Dong Hwan Kim, Sang Hyuck Kim, Jae Cheol Jo, Jung Ho Park, "Gain control in erbium-doped fibre amplifiers by tuning center wavelength of a fibre Bragg grating constituting resonant cavity", *IEE Electronics Letters*, vol. 34, No. 10, p. 990-991, 1998.
- [13] M. Karásek, F. W. Willems, "Suppression of Dynamic Cross Saturation in Cascades of Overpumped Erbium-Doped Fiber Amplifiers", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 10, No. 7, p. 1036-1038, 1998.