

# SUPRESSÃO DE INSTABILIDADES DINÂMICAS DE GANHO DE UM EDFA

D. H. Thomas, G. Vilela de Faria e J. P. von der Weid

**Resumo** - Em uma rede óptica, os amplificadores operam sob regime de forte saturação e por isso são afetados por constantes reconfigurações, seja em virtude da comutação dos canais passantes ou em virtude de alguma falha causadora da queda dos canais. Neste sentido, observamos as oscilações de ganho experimentadas pelo canal sobrevivente quando sete dentre oito canais da rede são adicionados ou removidos e avaliamos o desempenho do sistema de controle proposto em suprimir as instabilidades dinâmicas de ganho do EDFA (amplificador à fibra dopada com érbio).

**Palavras-chave:** Amplificadores a fibra dopada com érbio, multiplexação por divisão do comprimento de onda, espectro de ganho plano, cavidades ressonantes, realimentação óptica e dispositivos optoeletrônicos.

**Abstract** - In an optical network, the amplifiers work heavily saturated, so they are affected by the common network reconfiguration, because of channel switching or some failure that can drop one or more traveling channels. In this way, we look at the transient gain 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.

**Keywords:** Erbium doped fiber amplifiers, wavelength division multiplexing, flat gain, laser resonators, optical feedback and optical fiber devices.

## 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o aumento da demanda por banda passante de transmissão impulsionou o desenvolvimento das redes multiplexadas por divisão de comprimento de onda (WDM), cuja viabilidade está ligada à disponibilidade de amplificação óptica, particularmente por meio dos amplificadores a fibra dopada com érbio (EDFAs) [1]. Aliado à técnica WDM, o EDFA oferece vantagens econômicas e de desempenho de rede em virtude do aumento da capacidade, confiabilidade e transparência da comunicação [2].

Mesmo sendo o EDFA uma tecnologia chave na realização de comunicações WDM e apesar de seu desempenho singular, alguns desafios tecnológicos ainda restam. Neste aspecto, dentre os mais significantes desafios estão aqueles relaciona-

dos 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, do 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.

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 (BER), 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 a menos que a informação transmitida em um canal qualquer não seja prejudicada por alterações nos outros canais, a variação de ganho em toda a faixa passante do amplificador deve ser controlada [2].

Com o objetivo de estabilizar o ganho 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 realimentação óptica; [4] e [5] avaliam o desempenho de um controle de ganho por meio de um canal laser; [6] combate a oscilação do sinal por meio da realimentação 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 de ganho híbrido que emprega dois canais de realimentação, um óptico e outro elétrico; [9] utiliza um absorvedor saturável no laço de realimentação; [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 realimentação do sistema para eliminar as variações de ganho.

Em [3], [9], [7], [12], [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 e 1000  $\mu$ s e cujo ganho é de 21, 16, 25, 22, 23, 21 e 10 dB, respectivamente.

Buscando suprimir a variação de ganho e estudar a dinâmica de operação de um EDFA, construímos uma

Os autores são do Centro de Estudos em Telecomunicações da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, CETUC-PUC, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

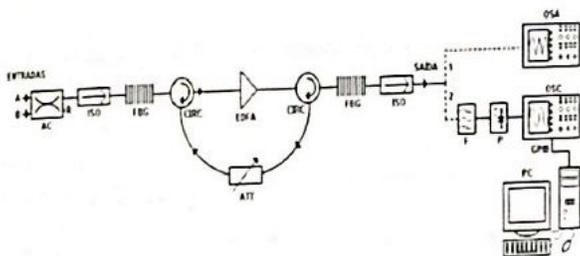
Emails: { thomas, gian, vdweid }@cetuc.puc-rio.br. Artigo submetido em 03/Dez/2003, revisado em 23/Mar/2004, aceito em 05/Abr/2004.

configuração de laser em anel diferenciada, baseada nas propriedades de transmissão de dois circuladores e duas grades de Bragg (FBG - Fiber Bragg Grating) [8].

Este trabalho está organizado da seguinte forma: a seção II descreve a configuração de controle utilizada; a seção III apresenta os resultados práticos obtidos; na seção IV expandimos nosso estudo das frequências naturais de oscilação do sistema; na seção V estão as conclusões e por fim são listadas as referências bibliográficas.

## 2. CONFIGURAÇÃO

A Figura 1 a seguir ilustra a configuração de laser em anel proposta.



**Figura 1.** Configuração de laser em anel diferenciada. EDFA: Amplificador à Fibra Dopada com Érbio, AC: Acoplador de 3 dB, ATT: Atenuador, CIRC: Circulador, FBG: Grade de Bragg, ISO: Isolador, F: Filtro Sintonizável, P: Fotodetector, OSA: Analisador de Espectro Óptico, OSC: Osciloscópio, GPIB: Interface de Comunicação, PC: Computador Pessoal.

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 realimentação através do circulador. Dois circuladores compõem o laço de realimentação 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 realimentação, 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 realimentação, verifica-se a oscilação dentro da cavidade no comprimento de onda característico e o ganho do EDFA é "grampeado" à potência de limiar desta oscilação [13], [11].

Por conseguinte, o EDFA opera como um amplificador para o comprimento de onda do sinal e como um laser em anel para o comprimento de onda do sinal de realimentação.

Conforme a Figura 1, o sinal de saída pode ser analisado de duas maneiras: no modo (1), conectando-se a saída diretamente a um OSA, pode-se medir o espectro de emissão do sistema e determinar os parâmetros necessários ao cálculo da figura de ruído; e no modo (2) observa-se apenas o comprimento de onda selecionado pelo filtro, faz-se a conversão deste sinal óptico em sinal elétrico com um fotodetector e as oscilações deste sinal elétrico são observadas em

um osciloscópio. Este último, por possuir uma interface de comunicação GPIB (Interface por Barramento de Propósito Geral), permite que os dados correspondentes aos gráficos exibidos em sua tela sejam capturados para posterior tratamento em um computador.

O emprego dos isoladores é justificado pelos sinais ópticos de elevada potência que viajam no interior do anel, cujas possíveis reflexões poderiam danificar os demais componentes e equipamentos de medida empregados. A propósito, o EDFA utilizado é um amplificador comercial fabricado pela Ericsson.

## 3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Uma vez definido o comprimento de onda do sinal de saturação (1564 nm) e objetivando avaliar o comportamento dinâmico do EDFA, observamos as oscilações de ganho experimentadas pelo canal sobrevivente do sistema quando a potência equivalente a sete dentre oito canais viajantes é adicionada ou removida, a exemplo do que ocorre em sistemas WDM reais sujeitos a reconfiguração.

Para tanto, injetamos um sinal de prova com potência de -25 dBm na entrada A do acoplador do sistema ilustrado pela Figura 1. Realizamos as medidas para dois sinais de prova diferentes, 1532 nm e 1554 nm.

Para simular o efeito da reconfiguração do sistema WDM, injetamos na entrada B do mesmo acoplador um sinal laser no comprimento de onda 1540 nm, modulado em amplitude na frequência de 200 Hz, com potência de -16.5 dBm. Considerando que a potência de entrada por canal é de -25 dBm, este sinal modulado representa a adição e remoção consecutivas da potência de sete dentre oito canais da rede.

Ainda com relação à Figura 1, vemos que uma das saídas do acoplador dos sinais de entrada está aberta e nomeada com a letra "R". O sinal desta porta serviu como referência de fase nas medidas de variação de ganho, indicando o momento exato da adição ou depleção dos canais (representado por uma linha pontilhada nas figuras a seguir).

Os gráficos mostrados nas figuras 2 a 5 ilustram a dinâmica de ganho do oitavo canal do sistema quando ocorrem a adição e a remoção dos outros sete canais para ambos os sinais de prova, 1532 nm e 1554 nm, respectivamente.

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 o desempenho do sistema ao refletir-se no aumento da figura de ruído [2].

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 realimentação para o melhor desempenho do sistema, com baixa figura de ruído. Os gráficos das figuras 6 e 7 facilitam esta tarefa, pois mostram o ganho e sua variação em função do nível de atenuação no laço de realimentação para ambos os sinais de prova, 1532 e 1554 nm respectivamente.

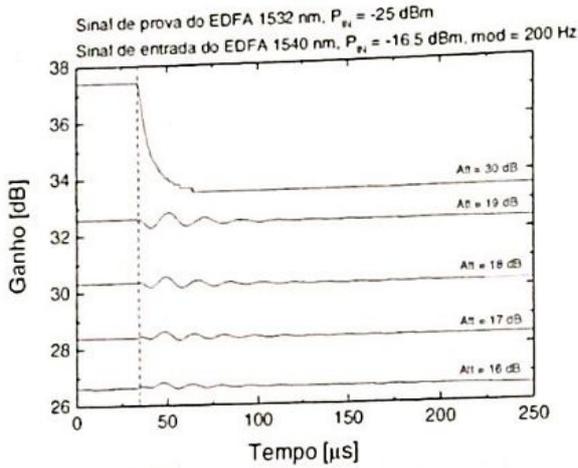


Figura 2. Dinâmica de ganho do EDFA quando sete dentre oito canais são adicionados, sinal de prova 1532 nm.

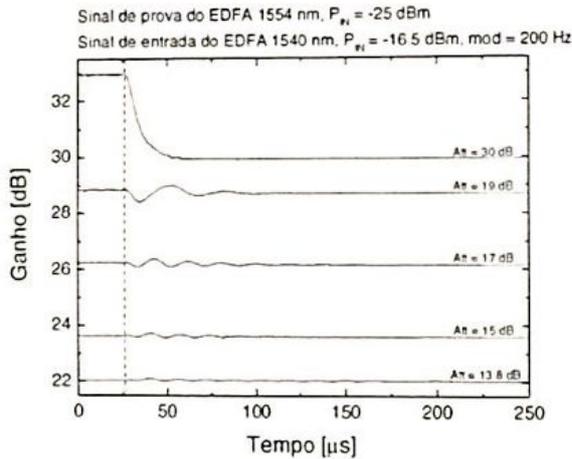


Figura 3. Dinâmica de ganho do EDFA quando sete dentre oito canais são adicionados, sinal de prova 1554 nm.

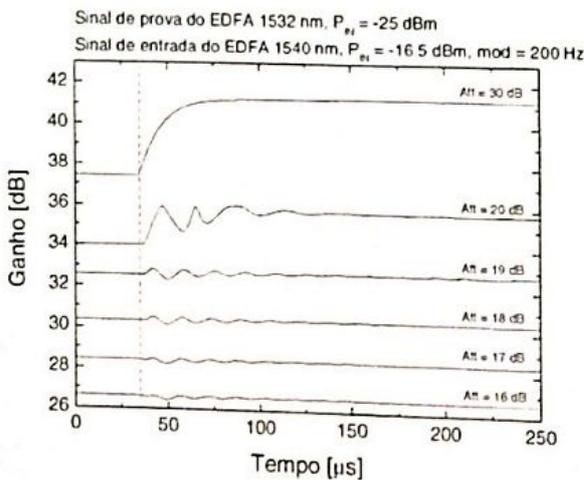


Figura 4. Dinâmica de ganho do EDFA quando sete dentre oito canais são removidos, sinal de prova 1532 nm.

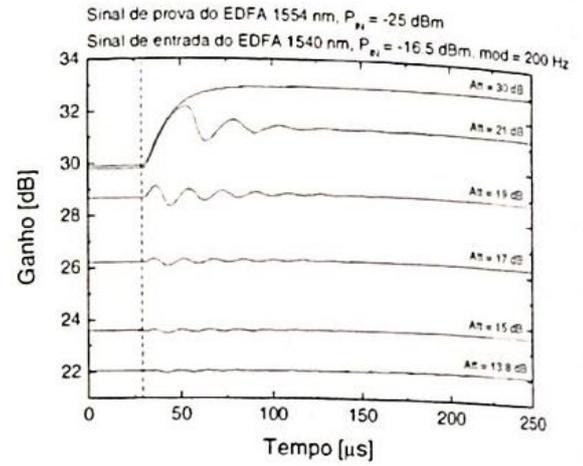


Figura 5. Dinâmica de ganho do EDFA quando sete dentre oito canais são removidos, sinal de prova 1554 nm.

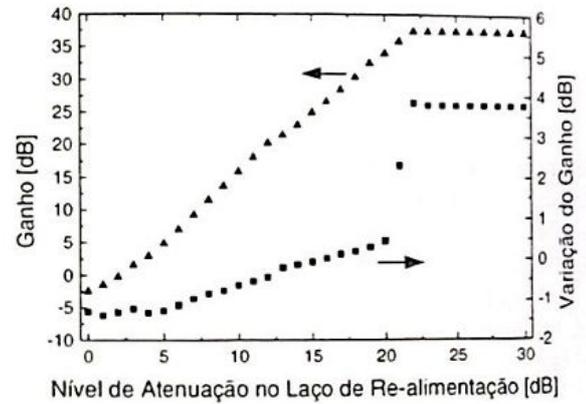


Figura 6. Ganho e variação do ganho do EDFA em 1532 nm.

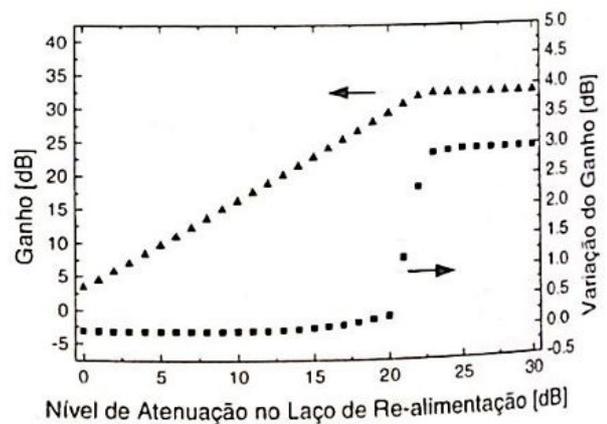


Figura 7. Ganho e variação do ganho do EDFA em 1554 nm.

De acordo com as figuras 2, 4 e 6 anteriores, para o sinal de prova de 1532 nm, podemos ajustar o atenuador no laço de realimentação 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 o desempenho desejado para o sistema implique em ganho e variação de ganho menores, ajustamos o atenuador para 17 dB e tra-

balhamos 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 sinal 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 sinal de prova for 1554 nm. Neste caso, uma perda de 19 dB no laço de realimentação 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 sinal 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 sinal 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 as seções de choque de emissão e absorção e, conseqüentemente, a inversão de população e a potência óptica disponível no sinal 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 realimentação. Uma menor atenuação significa uma maior saturação do EDFA com menor ganho e menor variação do ganho; por outro lado, uma atenuação maior significa um regime de saturação superficial do amplificador, com ganho elevado e grande variação do ganho.

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 laser na cavidade para o comprimento de onda de 1564 nm, ou seja, a atenuação no laço de realimentação permite que o nível de potência do sinal realimentado em 1564 nm ultrapasse o limiar para a oscilação laser. Tanto para o sinal de prova de 1532 nm como para o de 1554 nm, o limiar corresponde a uma atenuação de 21 dB no laço de realimentação. Este limiar também pode ser observado nas figuras 2 a 5, pois para atenuações maiores do que 21 dB nenhuma oscilação ocorre.

Além disso, ao compararmos as figuras 2 e 3 com as figuras 4 e 5, percebemos que as frequências características das oscilações 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 realimentação 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 ganho maiores na saída do EDFA.

Ainda mais, das frequências características da oscilação 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 a potência de

bombeio é elevada, a contribuição da emissão estimulada no meio amplificador é maior, permitindo uma resposta rápida do sistema; por outro lado, na medida em que a potência de bombeio diminui, a contribuição da emissão estimulada no meio amplificador torna-se progressivamente menor, fazendo com que o sistema responda lentamente.

Sob esta análise, as figuras 2 a 5 mostram que o sistema de controle de ganho proposto permite alcançar a estabilidade de ganho do amplificador em aproximadamente 100 ms (oscilações menores de 1 % do valor máximo), para ambos os sinais 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).

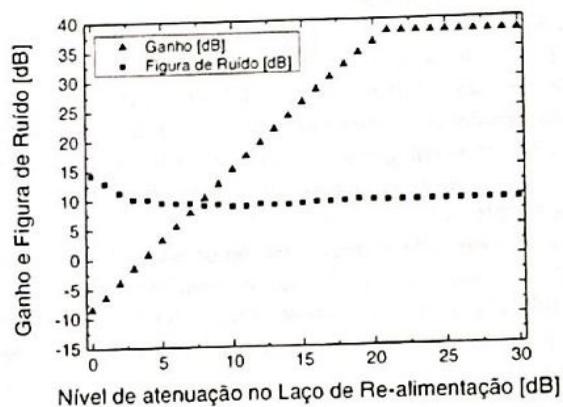


Figura 8. Ganho e figura de ruído do sistema em 1532 nm.

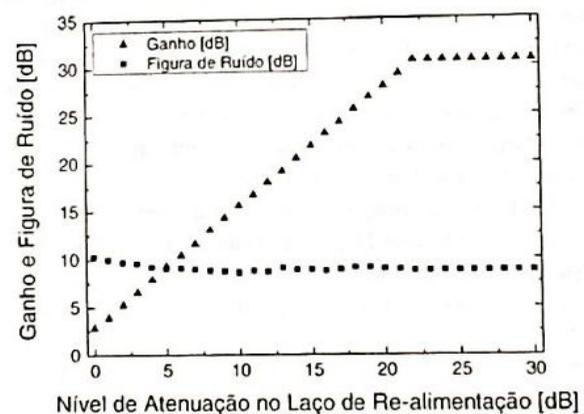


Figura 9. Ganho e Figura de Ruído do sistema em 1554 nm.

Na Figura 8, que ilustra a figura de ruído e o ganho do amplificador quando o sinal de prova utilizado é 1532 nm, para níveis de atenuação no laço de realimentação 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, um desempenho inadequado do sistema.

Por sua vez, para o sinal 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 sinal de prova 1554 nm retrata com maior fidelidade a realidade do sistema em questão, visto que ao canal de 1532 nm estão associados efeitos não-lineares de polarization hole burning.

Desta forma, é possível afirmar que a figura de ruído do sistema está em torno de 8.5 dB. Entretanto, este é um valor considerado muito elevado para a figura de ruído do EDFA. A literatura, em geral classifica este tipo de sistema como híbrido e a 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 emendas extras necessárias à sua inclusão, principalmente aquelas localizadas na entrada do sistema, pois seu efeito na degradação da figura de ruído é ainda maior.

Isto porque os isoladores e emendas da entrada do sistema "roubam" apenas potência de sinal, uma vez que antes do amplificador não há ASE, que constitui a maior parte do ruído de um sistema de amplificação óptica. Por conseguinte, em tais sistemas o efeito depreciativo da inclusão de componentes na entrada sobre a relação sinal-ruído (e conseqüentemente sobre a figura de ruído) não está restrito apenas ao valor nominal da perda de inserção especificada pelo fabricante (que neste caso é de 0,4 dB para os isoladores), mas geralmente é bem mais severo, podendo alcançar 2 a 3 dB, como no sistema em questão.

Portanto, descontadas estas penalidades extras, a nova figura de ruído obtida para o sistema se aproxima do valor previsto na literatura.

Logo, estes 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.

#### 4. ESTUDO DAS FREQUÊNCIAS CARACTERÍSTICAS DAS OSCILAÇÕES DE RELAXAÇÃO

Com o propósito de avaliar de forma mais criteriosa a dinâmica do sistema de equalização de ganho proposto, realizamos uma varredura em frequência buscando a ressonância com as frequências naturais de oscilação do laser na cavidade ressonante estabelecida no sistema de amplificação da Figura 1 (seus componentes estão dispostos entre a entrada e a saída do diagrama de blocos apresentado).

Para tanto, realizamos a montagem ilustrada na figura a seguir, onde acoplamos uma fonte laser CW (continuous wave) no comprimento de onda de 1547 nm (sinal de prova) com outra fonte laser CW no comprimento de onda de 1535 nm modulada externamente (sinal saturante). Os comprimentos de onda utilizados para o sinal de prova e o sinal saturante foram escolhidos de forma a minimizar a penalidade por crosstalk do filtro empregado e as potências do sinal de prova e do sinal saturante foram ajustadas para -25 e -16,5 dBm respectivamente, a exemplo das medidas anteriores.

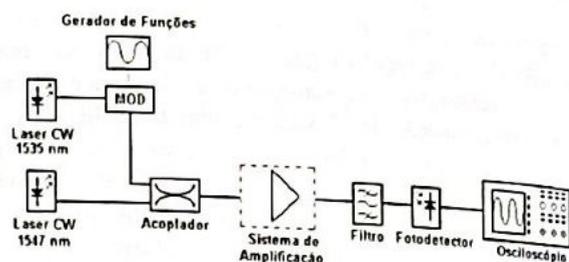


Figura 10. Montagem para avaliar as oscilações de relaxação do laser em anel. MOD: Modulador, Sistema de Amplificação: seus elementos estão dispostos entre a entrada e a saída do diagrama de blocos da Figura 1.

O sinal acoplado propaga-se pelo sistema de amplificação. Posteriormente realiza-se uma filtragem no comprimento de onda do sinal de prova (1547 nm) e a potência óptica proveniente do filtro é convertida em sinal elétrico, cuja dinâmica é analisada no osciloscópio.

Empregando esta montagem, procuramos a ressonância com a frequência natural de oscilação do laser em anel (1564 nm, ver Seção 2). Entretanto, como podemos observar nas figuras 2 a 5, cada nível de atenuação no laço de realimentação caracteriza uma oscilação de relaxação do laser com frequência característica diferente. Logo, realizamos a investigação de ressonância para cinco níveis de atenuação diferentes, 15,4, 15, 14,6, 14,2 e 13,8 dB, sendo este último o ponto de operação ótimo do sistema. Para cada situação, variamos a frequência de modulação do sinal saturante na faixa de 200 Hz a 120 kHz, observando continuamente no osciloscópio a evolução das oscilações do sinal de prova e buscando seus valores máximos, que correspondem à ressonância da frequência natural característica do laser em anel com a frequência de modulação do sinal saturante.

Na Figura 11 é mostrado o resultado obtido, em que se observa a tensão pico-a-pico proporcional à potência óptica detectada e a frequência de excitação correspondente. Nesta figura, os valores máximos de tensão pico-a-pico correspondem às frequências de ressonância características de cada ponto de operação do sistema. Observamos também que cada curva apresenta dois picos, ou seja, cada ponto de operação é caracterizado por uma frequência natural de oscilação e um sub-harmônico desta frequência. Quantitativamente temos: para atenuação de 15,4 dB, frequência natural de 51,5 kHz e sub-harmônico de 26 kHz; para atenuação de 15 dB, 53,7 e 27,7 kHz; para atenuação de 14,6 dB, 56,6 e 29 kHz; para atenuação de 14,2 dB, 58,6 e 30,3 kHz e para atenuação de 13,8 dB, 61 e 30,6 kHz são as frequências natural de

oscilação e sub-harmônico, respectivamente.

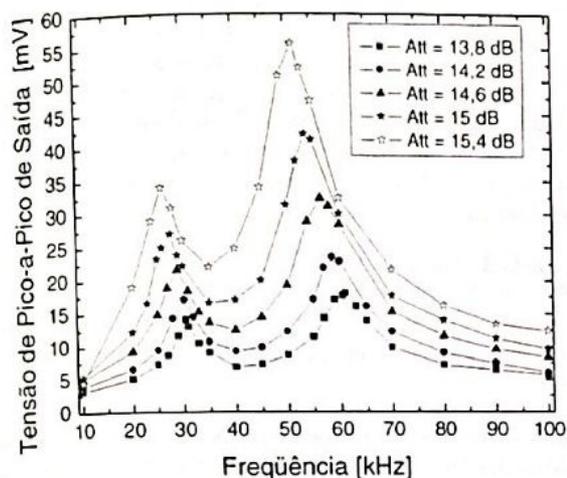


Figura 11. Frequências de ressonância correspondentes aos diferentes pontos de operação do sistema.

Portanto, à medida que diminuimos a atenuação, a frequência de ressonância que caracteriza as oscilações do laser em anel aumenta. Na realidade, quando diminuimos a atenuação no laço de realimentação permitimos que a potência efetiva do laser em anel aumente e seu efeito na saturação do ganho do amplificador seja mais acentuado, fazendo com que as frequências das oscilações de relaxação que refletem a "reação" do sistema à "ação" do laser em anel tornem-se cada vez maiores.

Como sabemos, estas oscilações de relaxação implicarão em um aumento da taxa de erro do sistema, ou seja, resultarão em uma penalidade na BER. No entanto, convém lembrar que muitos equipamentos empregados para medir a BER emitem um sinal modulado em uma frequência próxima de 50 kHz, com o objetivo de combater a penalidade de potência causada pelo espalhamento Brillouin, cujo efeito depreciativo torna-se bastante significativo a partir de um determinado nível de potência emitida.

Mas observando a Figura 11 e lembrando as frequências de ressonância que enunciamos anteriormente, vemos que a frequência do sinal com modulação anti-Billouin praticamente coincide com a frequência de ressonância quando a atenuação for de 15,4 dB no laço de realimentação do sistema proposto.

Na primeira medida que fizemos para investigar as frequências de ressonância utilizamos como sinal de prova o sinal emitido pelo medidor de BER, cujo comprimento de onda também é 1547 nm. Verificamos que ocorria um batimento entre a frequência natural de oscilação do sistema e o sinal com modulação anti-Brillouin, resultando em uma frequência de ressonância deslocada espectralmente e que não refletia com fidelidade a dinâmica do sistema. Logo, para realizar as medidas que verdadeiramente refletem a resposta do sistema, mostradas na Figura 11, tivemos que utilizar uma fonte laser CW, como comentamos anteriormente.

Por isso, em sistemas de equalização de ganho como o proposto, a modulação anti-Brillouin pode ser prejudicial e o seu

emprego como sinal de prova na medida deve ser criteriosamente avaliado.

## 5. CONCLUSÕES

Apresentamos uma configuração de laser em anel diferenciada, com ótimo desempenho em eliminar as instabilidades de ganho de um EDFA.

Por sua vez, a configuração de controle de ganho proposta fornece ganho plano de 26.59 e 22 dB para os sinais de prova 1532 e 1554 nm respectivamente. Entretanto, tamanha compressão de ganho pode comprometer o desempenho do sistema, sendo aconselhável trabalhar em um regime de saturação menos acentuado. Por exemplo, podemos ajustar o atenuador do laço de realimentação em nosso sistema para 18 dB, obtendo o ganho de 30.31 dB e variação de ganho de 0.17 dB para o sinal de prova 1532 nm e ganho de 26.62 dB com variação de ganho de 0.11 dB para o sinal 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 ms, aproximadamente (para comparação ver parâmetros na introdução).

Quando comparada ao método convencional de equalização de ganho, que emprega um filtro sintonizável no laço de realimentação, a configuração apresentada é vantajosa na medida em que possibilita alcançar níveis mais elevados de potência a ser realimentada, a partir da qual o ganho do amplificador é "grampeado", ou seja, oferece uma maior faixa de trabalho. Isto porque a transmitância das grades empregadas é de -28 dB, o que representa uma reflectividade de praticamente 100% da potência incidente no comprimento de onda característico da grade.

Na montagem convencional, o emprego do filtro exige a utilização de acopladores para compor o laço de realimentação, fato que por si só impede que alcancemos os mesmos níveis de potência de sinal realimentado. Além disso, é importante lembrar que o filtro representa uma perda por sua inserção, o que limita ainda mais a faixa de trabalho.

O filtro foi utilizado previamente para determinar qual o comprimento de onda ótimo a ser empregado na saturação do ganho do amplificador, sendo depois substituído pelas grades de Bragg atualmente empregadas.

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 um melhor desempenho do sistema de comunicação.

A seguir pretende-se aprofundar o estudo da dinâmica do sistema e observar as suas frequências naturais de oscilação através da medida da penalidade de BER.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Ericsson Telecomunicações S/A e à FAPERJ pelo suporte financeiro, indispensável ao desenvolvimento deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- [1] N. Takahashi, T. Hirono, H. Akashi, S. Takahashi, and 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, and 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, and 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, and 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, and 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, and 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 and 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, and 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, and 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, and R. Lebréf, "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, and 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] M. Karásek and 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.
- [13] Seong Yun Ko, Myong Wook Kim, Dong Hwan Kim, Sang Hyuck Kim, Jae Cheol Jo, and 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.

D. H. Thomas graduou-se em Engenharia Elétrica, em 2002, pela Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul. No mesmo ano, fixou-se no Centro de Estudos em Telecomunicações da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, onde iniciou seu mestrado em Telecomunicações, na área de Eletromagnetismo Aplicado. Desde então desenvolve pesquisa em optoeletrônica e comunicações ópticas, estudando o comportamento dinâmico dos amplificadores ópticos, assim como os efeitos não-lineares a eles relacionados. Atualmente, é doutorando na mesma instituição de ensino superior.

G. Vilela de Faria graduou-se em Engenharia Elétrica pela PUC-Rio em 2002. Atualmente é mestrando e engenheiro de pesquisa no Centro de Estudos em Telecomunicações da PUC-Rio atuando nas áreas de comunicações ópticas, metrologia óptica, optoeletrônica e instrumentação.

J. P. von der Weid é Professor Titular da PUC-Rio. Recebeu os graus de Bacharel e Doutor em Física pela PUC-Rio, em 1970 e 1976, respectivamente. É coordenador do grupo de optoeletrônica e instrumentação do Centro de Estudos em Telecomunicações da PUC-Rio. Seus principais interesses em pesquisa são interferometria e metrologia óptica, sistemas ópticos de comunicações, instrumentação e sensoriamento óptico.