

6

Flutuações Dinâmicas de Ganho ao longo de uma Linha de EDFAs sob Tráfego de Pacotes

Como vimos no capítulo anterior, quando um EDFA com ganho controlado é usado em uma rede onde o tráfego é feito por rajadas ou pacotes, variações rápidas na sua potência de entrada podem ocorrer. Além disso, vimos também que os efeitos causados por estas variações, como as flutuações de ganho e as conseqüentes flutuações da potência dos pacotes, são dependentes do comprimento de onda, da potência, do tamanho e do atraso relativo entre os pacotes transmitidos através do EDFA nos diferentes canais, sendo que tanto o cabeçalho quanto o corpo dos pacotes podem ser afetados.

No entanto, quando vários EDFAs são usados em cascata, como ocorre nos lances de fibras intercontinentais, a amplitude das flutuações dinâmicas de ganho acumula-se ao longo da linha e os efeitos são tão maiores quanto maior for o número de amplificadores em cascata. De fato, o acúmulo linear das variações de potência com o número de amplificadores em virtude da realocação dos canais foi observado em [34]. Mas a situação pode se tornar ainda mais crítica se as flutuações de ganho (e conseqüentemente de potência) forem excitadas de forma ressonante pela transmissão sucessiva de pacotes ao longo da linha de EDFAs, especialmente se uma técnica de controle de ganho eficiente em prevenir o acúmulo dos efeitos não for empregada.

Neste capítulo investigamos os efeitos acumulados ao longo de uma linha de amplificadores idênticos, emulados através da *técnica do laço recirculante* [7].

6.1

Montagem Experimental Realizada para Estudar os Efeitos Acumulados ao Longo de uma Linha de EDFAs

A figura 25 abaixo mostra a montagem experimental implementada para a medida das flutuações dinâmicas de ganho ao longo de uma linha de EDFAs [35]:

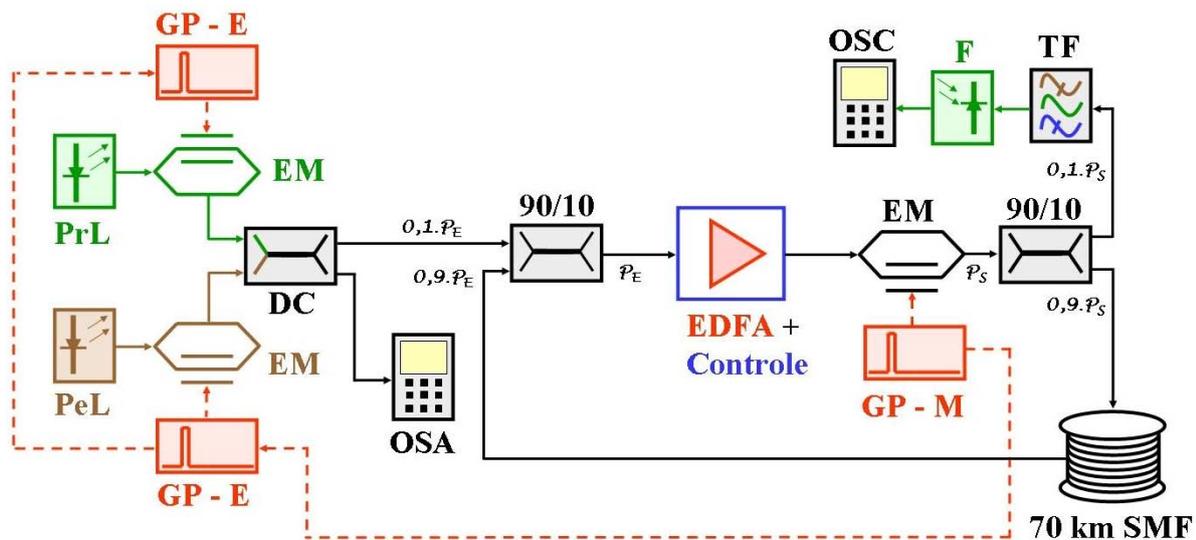


Figura 25 - Montagem experimental implementada para a medida das flutuações dinâmicas de ganho ao longo de uma linha de EDFAs; PrL: Laser do canal de prova; PeL: Laser de perturbação; GP - E: Gerador de pulsos “escravo”; EM: Modulador Niobato de Lítio; DC: Acoplador de 3 dB; OSA: Analisador de Espectro Óptico; P_E : Potência de entrada; GP - M: Gerador de pulsos “mestre”; P_S : Potência de saída; TF: Filtro sintonizável; F: Fotodetector; OSC: Osciloscópio; SMF: Fibra monomodo padrão. A linha pontilhada representa o sinal de sincronismo entre os geradores de pulso.

Para a obtenção das medidas apresentadas neste capítulo, o controle de ganho do EDFA foi realizado de forma idêntica àquela descrita no capítulo anterior, de modo que na figura 25 substituímos os componentes da técnica de controle⁴⁰ por um único bloco *EDFA + Controle de Ganho*.

⁴⁰ Os circuladores utilizados para a obtenção das medidas apresentadas até este capítulo, inclusive, tinham uma elevada PDL (*polarization dependent loss* - perda dependente da polarização), característica que limitou o desempenho da técnica de controle de ganho proposta.

Da mesma forma, a partir da comparação entre a figura 25 e a figura 20⁴¹ do capítulo anterior percebemos que a geração dos pacotes ópticos e as diferentes situações de colisão de tráfego entre eles também foram realizadas de forma idêntica àquela descrita no capítulo anterior. Da mesma forma, os comprimentos de onda empregados agora também são os mesmos, ou seja, observamos as flutuações de ganho dos pacotes em um canal de prova em 1547 nm, causadas pela propagação prévia de outro pacote idêntico (de mesmo tamanho e potência) no canal de 1532 nm.

Entretanto, diferentemente da situação anterior, da saída do acoplador de 3 dB os pacotes ópticos foram lançados à porta de 10% de um primeiro acoplador 90/10, e só então transmitidos ao EDFA com ganho controlado.

Por sua vez, o modulador de Niobato de Lítio (LiNbO₃) locado à saída da segunda rede de Bragg funcionou como uma chave para os sinais propagantes, ou seja, sua função foi encerrar (*off time*) e, após um certo número de ciclos, reiniciar (*on time*) a propagação dos sinais ópticos.

Este “chaveamento” foi realizado através da seleção da frequência do sinal do gerador de pulsos conectado àquele modulador, chamado “gerador mestre”. A frequência do “gerador mestre” foi ajustada de forma a permitir a propagação dos sinais ópticos no circuito por 2,7 ms (*on time*), mantendo-os apagados por 13,5 ms (*off time*). Estes intervalos de tempo significam uma carga de tráfego de aproximadamente 10^{-5} , considerando-se que o tamanho dos pacotes é da ordem de algumas unidades de microssegundos⁴². Evitamos desta forma que o acúmulo de potência de ASE pudesse resultar no surgimento de uma oscilação *laser* indesejada na cavidade e dificultar a leitura dos resultados⁴³.

Além de determinar o fluxo dos sinais ópticos propagantes, o gerador de pulsos “mestre” também forneceu o sinal de sincronismo para os demais geradores do circuito, seus “escravos”.

⁴¹ Ver página 87.

⁴² Dividindo-se o *on time* pelo *off time* chega-se ao percentual de tempo durante o qual se estabeleceu a comunicação, que no nosso caso é 20%. Já para encontrar o valor da carga de tráfego, basta dividir o tamanho do pacote em questão pelo valor percentual encontrado.

⁴³ Ver capítulo 3, seção 3.5.

Após o modulador, a totalidade dos sinais ópticos propagou-se por um segundo acoplador 90/10. 90% do seu sinal de saída foi lançado através de uma bobina de fibra monomodo padrão de 70 km de comprimento (desconsiderando-se os cabos ópticos de conexão entre os dispositivos) e então acoplado à porta de 90% do acoplador 90/10 de entrada.

Desta forma, fêz-se com que os sinais retornassem à entrada do amplificador periodicamente, sendo o número de períodos determinado pela relação *on time/off time*, conforme descrito nos parágrafos anteriores. Por meio desta metodologia, conhecida como *técnica do laço recirculante* [7], conseguiu-se emular uma linha de amplificadores em que cada ciclo corresponde a um dos amplificadores da linha, seguido do lance de fibra que o separa do estágio seguinte.

Os 10% restantes do sinal de saída do segundo acoplador 90/10 foram filtrados (em um filtro óptico sintonizável cuja banda-passante de 3 dB é de 0,5 nm), permitindo que apenas a parcela de potência correspondente ao canal de prova, 1547 nm, fosse detectada e as flutuações do sinal elétrico resultante fossem analisadas em um osciloscópio digital.

Para todas as medidas apresentadas neste capítulo, a potência de cada canal (ou potência média do pacote) foi ajustada para -20 dBm na entrada do amplificador, ou seja, compensando-se a perda de inserção do acoplador 90/10.

Antes de medir os efeitos acumulados ao longo da linha de amplificadores, foi necessário realizar uma medida preliminar para que pudéssemos ajustar o nível de atenuação no caminho de realimentação, de forma a minimizar as flutuações e ao mesmo tempo dispor do ganho necessário à compensação das perdas ao longo do laço recirculante.

Para isso, medimos o ganho e a variação de ganho do EDFA no canal de prova em 1547 nm, causada pela realocação de sete dentre oito canais transmitidos, em função do nível de atenuação no caminho de realimentação [36], como nos capítulos anteriores, quando o comprimento de onda de 1564 nm foi usado para controlar o ganho do amplificador. A figura 26 a seguir mostra os resultados:

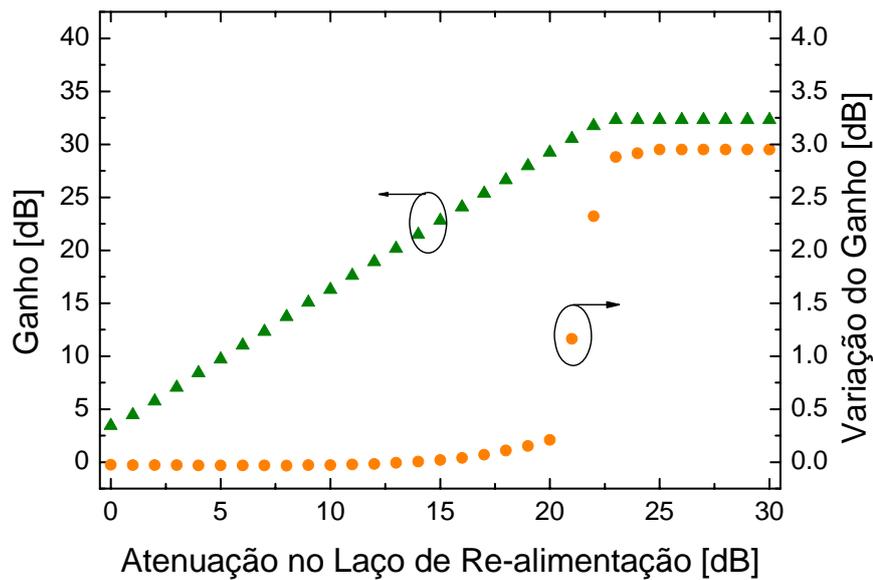


Figura 26 - Ganho e variações de ganho do EDFA em $\lambda_{\text{prova}} = 1547$ nm, em função da atenuação no caminho de realimentação, quando $\lambda_{\text{FBG}} = 1564$ nm.

De acordo com a figura 26, para grandes valores de atenuação no laço de realimentação, o ganho do amplificador no canal de prova é máximo, mas variações de ganho de aproximadamente 3 dB, geradas pela flutuação da potência de entrada do amplificador, também são observadas.

Quando a atenuação atinge valores menores do que 23 dB, a oscilação *laser* inicia-se dentro da cavidade, o ganho diminui progressivamente e as variações de ganho sofrem grande redução em virtude da atuação do sinal de controle.

Na figura 26 é possível verificar ainda que com um nível de atenuação de 16 dB⁴⁴ no laço de realimentação consegue-se reduzir as variações de ganho para menos de 0,04 dB, sem abrir mão de um ganho de 22,5 dB, necessário à compensação praticamente exata da perda por ciclo⁴⁵.

⁴⁴ É conveniente lembrar que este valor de atenuação foi escolhido sem que o sistema de controle de ganho tivesse sido otimizado, como já explicamos no capítulo anterior (ver página 88).

⁴⁵ Na verdade, ajustamos a atenuação na realimentação de forma que o valor do ganho fosse ligeiramente menor do que a perda no laço. Evita-se com isso oscilações *lasers* indesejadas dentro do laço. Ver capítulo 3, seção 3.5.

Já a frequência das oscilações de relaxação relacionadas a atenuação de 16 dB é de aproximadamente 50 kHz [24], valor este muito diferente de qualquer possível frequência de oscilação característica do laço recirculante, obviamente⁴⁶.

6.2

Efeitos Acumulados ao Longo de uma Linha de EDFAs

Para obter os resultados mostrados nas figuras restantes deste capítulo, ajustamos a frequência do gerador mestre de forma a permitir o acúmulo dos efeitos por sete ciclos consecutivos, ou seja, emulamos uma linha de amplificadores em que os elementos estão espaçados de 70 km, totalizando um enlace de aproximadamente 500 km. A figura 27 a seguir mostra a potência detectada no canal de prova em 1547 nm, correspondente à propagação de pacotes de 5 μ s e do ruído de ASE através da totalidade do enlace:

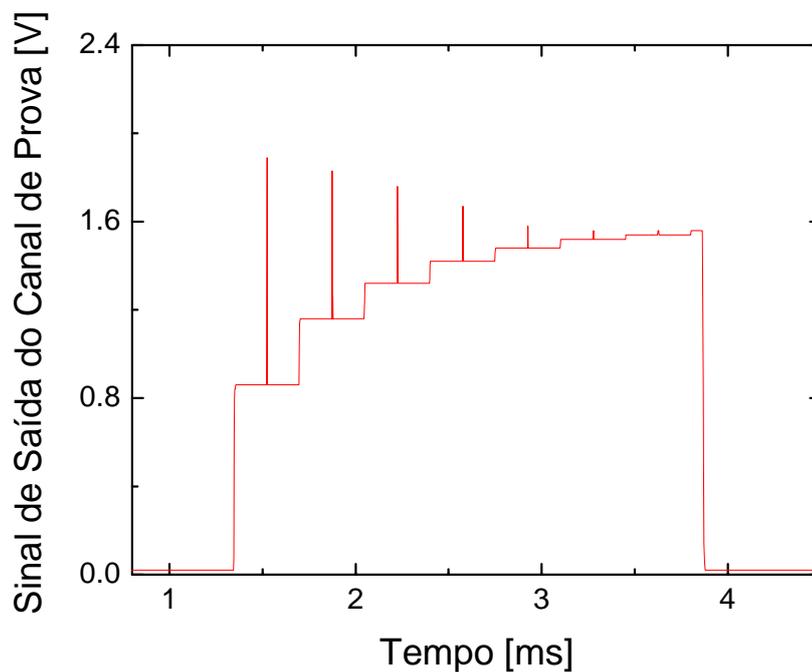


Figura 27 - Potência detectada em $\lambda_{\text{prova}} = 1547$ nm, correspondente à propagação de pacotes de 5 μ s (picos) e do ruído de ASE (degraus) através do enlace; $\lambda_{\text{FBG}} = 1564$ nm.

⁴⁶ Tendo em vista, principalmente, os diferentes tamanhos da cavidade ressonante e do laço de fibra usado para emular a linha de amplificadores.

Na figura 27 é possível ter uma visão geral dos pacotes na medida em que se propagam ao longo da linha de EDFAs. Como pode-se perceber, enquanto a potência dos pacotes diminui gradativamente com o número de ciclos, a potência de ruído de ASE aumenta enormemente, tanto que no último ciclo, em especial, a SNR encontra-se visivelmente comprometida.

Isto ocorre em virtude de a perda por ciclo ser ligeiramente maior do que o ganho disponível no EDFA. A figura 28 a seguir mostra o ganho disponível no canal de prova em 1547 nm e nos ajuda a compreender melhor a evolução da interação sinal-ASE ao longo dos amplificadores da linha:

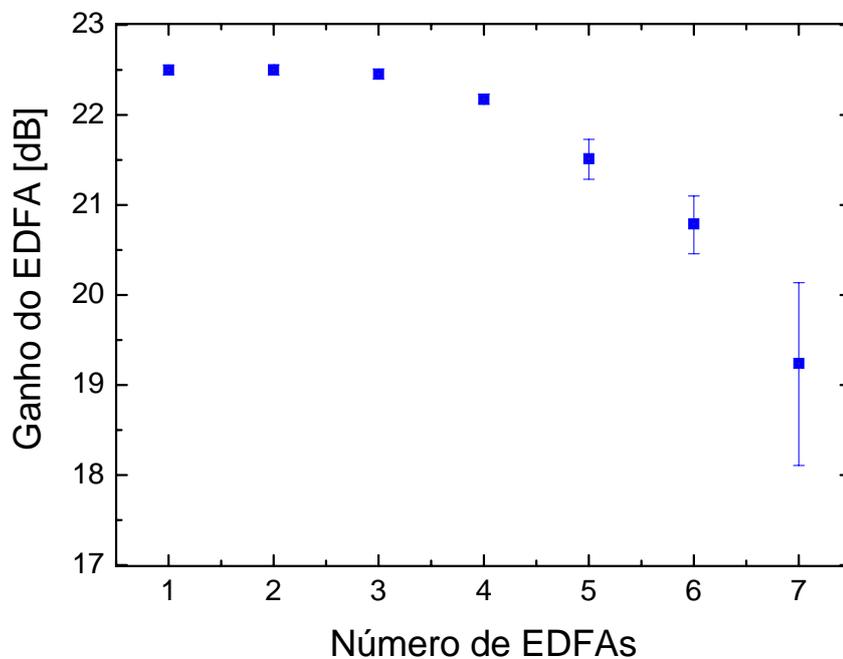


Figura 28 – Ganho dos amplificadores da linha em $\lambda_{\text{prova}} = 1547 \text{ nm}$; $\lambda_{\text{FBG}} = 1564 \text{ nm}$.

A figura 28 apenas quantifica o efeito que já havíamos observado qualitativamente na figura 27, ou seja, o grande acúmulo da potência de ASE resulta em uma saturação progressiva do ganho dos amplificadores da linha, principalmente a partir do quarto amplificador em diante.

A rápida degradação da SNR, ilustrada qualitativamente nas figuras 27 e 28, em função do acúmulo exagerado do ruído de ASE, foi o primeiro indício que tivemos de que alguns dos componentes que usamos não apresentavam

características compatíveis com o bom desempenho que buscávamos com o sistema de controle de ganho que implementamos.

Além disso, ao observarmos que apenas a potência do sinal diminuía enquanto a potência de ASE continuava a aumentar, estimamos que o principal componente a ser trocado estivesse acoplado à entrada do sistema, ou seja, antes do amplificador. Esta conclusão foi fundamental à otimização da técnica de controle de ganho.

Entretanto, para que pudéssemos dispor de todos os dados necessários à otimização da técnica, continuamos a medir os efeitos acumulados ao longo da linha de amplificadores. A figura 29 apresenta as flutuações dinâmicas de ganho do EDFA ao longo do tempo no canal de prova, medidas imediatamente depois da passagem de um pacote de 5 μs no comprimento de onda de 1532 nm, para quatro amplificadores da linha:

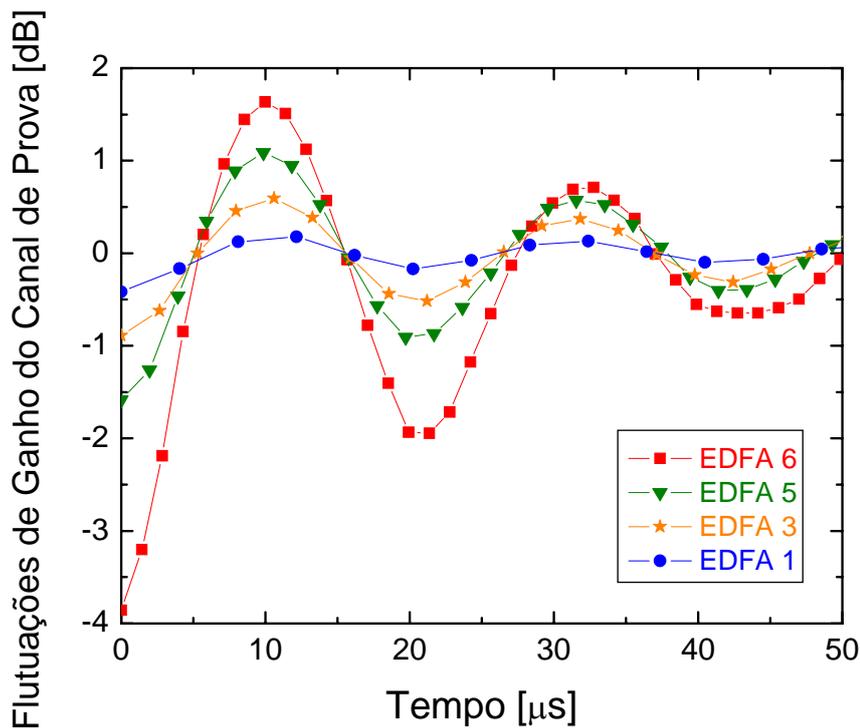


Figura 29 – Flutuações de ganho em $\lambda_{\text{prova}} = 1547 \text{ nm}$ para o primeiro, terceiro, quinto e sexto EDFAs da linha. As flutuações foram induzidas por um único pacote de 5 μs com potência de -20 dBm no canal de 1532 nm. Os dados estão normalizados para o nível de ganho estável de cada amplificador; $\lambda_{\text{FBG}} = 1564 \text{ nm}$.

Para obter os resultados da figura 29, o sincronismo⁴⁷ entre os geradores de pulso foi ajustado de forma a permitir a completa estabilização do ganho do amplificador em virtude da perturbação da potência de ASE realimentada em cada ciclo, antes que qualquer pacote fosse propagado. Os dados estão normalizados para o nível de ganho estável de cada amplificador.

Na figura 29, as flutuações de ganho em virtude das oscilações de relaxação são evidentes, assim como também o fato de que a amplitude das flutuações aumenta consideravelmente na medida em que um maior número de amplificadores é usado no enlace.

Além disso, é muito importante ter ciência de que não somente o ganho flutua em função das oscilações de relaxação, mas também a potência de ASE. Estas flutuações da potência de ASE são bem mais longas do que o tempo de duração de um pacote. Como a ASE propaga-se ao longo da linha de amplificadores juntamente com os pacotes ópticos, a sua flutuação acaba por aumentar ainda mais os efeitos acumulados.

Neste cenário, a expectativa é de que as flutuações dinâmicas de ganho cresçam ainda mais rápido com o número de amplificadores em linha do que o comportamento linear observado em [34]. Uma simples multiplicação da amplitude da flutuação medida na saída de um único amplificador pelo número de amplificadores em linha é uma representação que pode afastar-se da realidade para uma linha de amplificadores onde os efeitos acumulados não forem controlados de forma eficiente.

Na figura 30 apresentamos os valores das flutuações de ganho de pico-a-pico no canal de prova para os 6 primeiros amplificadores da linha, obtidas diretamente da análise da figura 29 e dos dados correspondentes às medidas das flutuações de ganho dos demais amplificadores da linha:

⁴⁷ Representado pela linha pontilhada na figura 25, página 98.

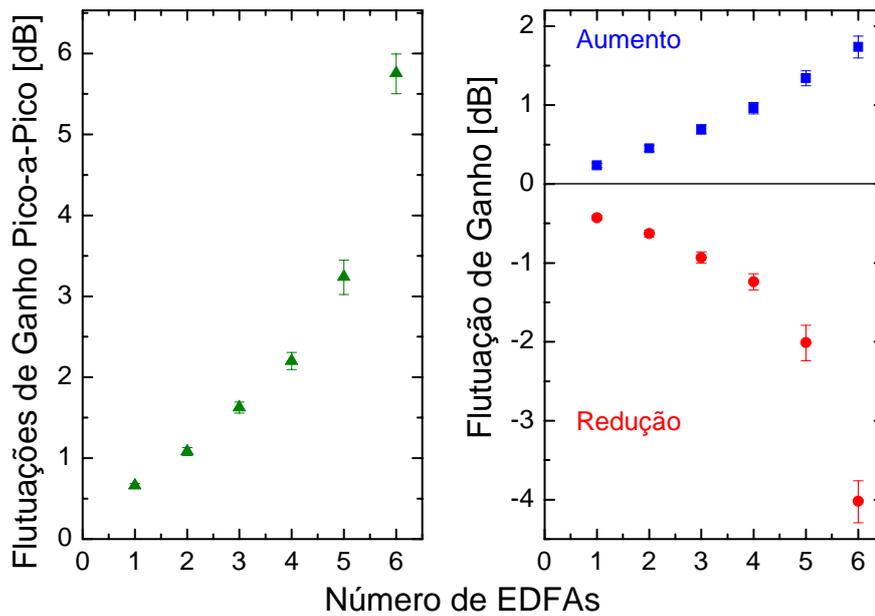


Figura 30 - (a) Flutuações de ganho de pico-a-pico em $\lambda_{prova} = 1547$ nm para os 6 primeiros amplificadores da linha; (b) Aumento e depleção máximos de ganho correspondentes em cada EDFA da linha; $\lambda_{FBG} = 1564$ nm.

Mesmo tendo observado 7 ciclos consecutivos, somente pudemos quantificar as flutuações de ganho dos 6 primeiros amplificadores da linha em virtude da baixa SNR do sétimo amplificador, como vimos na figura 27.

De qualquer forma, a figura 30 (a) mostra que, efetivamente, as flutuações de ganho podem acumular-se de forma muito mais rápida ao longo da linha de EDFAs do que a resposta linear esperada [34], como já havíamos constatado a partir da observação da figura 29⁴⁸.

No entanto, os resultados apresentados na figura 30 evidenciam a influência da potência total de ASE acumulada sobre o comportamento dinâmico dos amplificadores da linha. Os efeitos provocados pela interação entre os pacotes propagantes na fibra são reforçados pelas longas flutuações da potência de ASE, que se propaga juntamente com os pacotes ópticos.

⁴⁸ Como veremos no capítulo 8, é possível otimizar a técnica de controle de ganho por *laser* em anel a tal ponto de manter a amplitude dos efeitos acumulados abaixo até do comportamento linear observado em [34].

Desta forma, mesmo que a característica do tráfego dos pacotes nas redes ópticas atuais seja aleatória [32], a influência da potência de ASE acumulada pode resultar em flutuações de ganho (e, conseqüentemente de potência) muito maiores na medida em que os pacotes se propagam ao longo da linha, tão significativas quanto aquelas provocadas pela excitação ressonante em um único amplificador [4].

Convém lembrar que o atraso entre os dois pacotes ópticos permanece constante na medida em que eles se propagam ao longo da linha, de forma a facilitar o acúmulo dos efeitos resultantes da sua interação.

Como aprendemos no capítulo anterior, em situações como a apresentada na figura 29, onde o ganho do EDFA flutua em função das oscilações de relaxação características da cavidade, um pacote óptico pode ter seu ganho (e conseqüentemente a sua potência) aumentado ou reduzido, dependendo do seu atraso em relação ao pacote óptico que o precedeu na transmissão ao longo da linha.

Por conseguinte, na figura 30 (b) apresentamos os valores máximos e mínimos da flutuação de ganho dos pacotes, correspondentes às piores situações de tráfego em cada um dos 6 primeiros amplificadores da linha, obtidos a partir da leitura da evolução temporal mostrada na figura 29 e dos dados correspondentes às medidas das flutuações de ganho dos demais amplificadores da linha.

Por exemplo, se considerarmos a situação em que dois pacotes atrasados de 10 μ s se propagam por seis EDFAs, o segundo pacote teria o seu ganho aumentado em 2 dB; por outro lado, se o atraso fosse de 20 μ s uma redução de 2 dB poderia ser observada na saída do sexto amplificador. Atrasos intermediários poderiam resultar em flutuações de ganho de 2 dB entre o cabeçalho e o corpo do segundo pacote.

Nem um ganho excessivo e muito menos a escassez de ganho representam boas condições de propagação dos pacotes, principalmente se o receptor não for caracterizado por uma faixa dinâmica suficientemente larga, de forma a cobrir a conseqüente divergência da potência de saída dos pacotes em relação ao seu nível de detecção normal. Esta divergência certamente causaria um aumento da BER e da penalidade de potência do sistema.

6.3

Considerações Finais

Neste capítulo apresentamos os efeitos acumulados ao longo de uma linha de amplificadores idênticos, emulados através da *técnica do laço recirculante*.

Como vimos, o aumento da potência de ASE pode resultar em flutuações de ganho cujo valor acumulado ao longo da linha de EDFAs é ainda maior do que a superposição linear dos efeitos usualmente esperada, causando um acréscimo também excessivo da BER do sistema e reduzindo significativamente a distância máxima de transmissão nos lances ópticos cujo tráfego se realiza na forma de pacotes.

A partir dos resultados apresentados neste capítulo percebemos que, apesar da eficiência do controle de ganho proposto ser suficiente para suprimir as flutuações de ganho originadas por situações de realocação de canais na rede óptica (permitiu reduzir as flutuações de ganho assim geradas para menos de 0,04 dB), uma otimização se faz necessária quando o EDFA é submetido a perturbações mais rápidas e aleatórias em sua potência de entrada, como aquelas originadas pelo tráfego de pacotes ou rajadas.

Como mostramos, as flutuações dinâmicas de ganho acumuladas podem chegar a 6 dB e tanto a potência correspondente ao cabeçalho quanto ao corpo do pacote podem ser afetadas em uma linha de amplificadores onde os efeitos acumulados não forem controlados de forma eficiente.

Em especial, alguma técnica de controle de ganho eficiente se faz necessária quando o EDFA faz parte de um laço de fibra usado para armazenar pacotes (*optical buffer*) nos nós da rede óptica. Uma vez que pode haver a necessidade de um longo tempo de armazenamento em virtude da indisponibilidade de um canal óptico para encaminhamento dos pacotes ao seu destino, vários ciclos de propagação no laço de fibra podem ser necessários e efeitos acumulados, como os que vimos neste capítulo, podem inviabilizar o armazenamento.

Logo, não somente uma otimização da técnica de controle de ganho se faz necessária, mas também deve-se poder atestar a eficiência do sistema de armazenamento de pacotes através das medidas convenientes, como a BER dos pacotes armazenados. Por isso, no próximo capítulo apresentamos uma metodologia de cálculo simples para quantificar a BER e, por conseguinte, a

penalidade de potência de um pacote, independentemente do seu tamanho e do tempo de armazenamento.