

Otimização do Desempenho do EDFA num Sistema Óptico de Armazenamento de Pacotes por Linha de Atraso

Nas redes WDM, os pacotes são encaminhados entre os diferentes nós da rede até o seu destino desde que exista um canal disponível que viabilize a transmissão. Por conseguinte, faz-se necessário um sistema para armazenar os pacotes por um certo tempo, em virtude de uma possível e temporária indisponibilidade de canais livres.

Em qualquer nó da rede, a comparação das informações contidas em uma tabela de endereços da chave (*switch*) com aquelas obtidas pela leitura do cabeçalho dos pacotes, permite encaminhá-los da porta de entrada para a porta de saída correta, sem a necessidade de uma conversão opto-elétrica.

A chave desempenha três importantes tarefas: o reconhecimento e o processamento das informações contidas nos cabeçalhos dos pacotes; o armazenamento dos pacotes até que um canal esteja disponível para prosseguir a transmissão, e a realocação propriamente dita, ou seja, o encaminhamento do pacote para a porta de saída correta. A propósito, caso o sistema de armazenamento não apresente capacidade suficiente em uma situação de alta densidade de tráfego, somente os pacotes mais importantes são armazenados. Os demais são descartados e, posteriormente, uma solicitação de novo envio é realizada.

Considerando-se a crescente demanda por tráfego dos dias atuais, percebe-se a importância da implementação de sistemas de armazenamento de elevadas capacidade e eficiência. Uma das técnicas mais difundidas para realizar o armazenamento (*buffering*) dos pacotes é o emprego de laços de fibra como linhas de atraso. Neste caso, para compensar a perda do caminho óptico costuma-se usar um EDFA dentro do laço [5].

Obviamente, existem outras técnicas para se realizar o armazenamento dos pacotes: um sistema baseado no ganho paramétrico e na modulação cruzada de

fase (*XPM – Cross Phase Modulation*) [37] e outro baseado em um interferômetro não-linear ultra-rápido [38] são dois bons exemplos.

Entretanto, no caso dos sistemas de armazenamento que empregam laços de fibra como linhas de atraso, pequenas flutuações de ganho do EDFA, em virtude de uma possível diferença entre o ganho e a perda no laço, podem resultar no acúmulo das excursões de potência dos pacotes, de tal forma a limitar o número máximo de ciclos (ou o tempo de armazenamento dos pacotes) e comprometer seriamente a eficiência do sistema de armazenamento [5].

Conseqüentemente, para dispor de um sistema de armazenamento de alta eficiência e evitar que pacotes sejam perdidos, é indispensável manter o ganho do EDFA constante, independentemente de qualquer variação de potência de entrada.

Vários foram os sistemas de armazenamento de pacotes implementados a partir da técnica dos laços recirculantes [34]: em um deles, uma diferença de 2 dB entre o ganho do EDFA e a perda do laço resultou em excursões da potência dos pacotes acumuladas em 3 dB depois de 10 ciclos de armazenamento [5]; em outro, a partir do mapeamento da envoltória dos pacotes na entrada do sistema para posterior compensação, os autores reduziram as excursões da potência dos pacotes para aproximadamente 2 dB após 10 EDFAs [39]; e em um terceiro caso [40], um sistema de armazenamento ainda melhor foi implementado, mas apenas conseguiu-se reduzir a penalidade de potência para um valor próximo de 1 dB quando ele foi usado para armazenar pacotes por um tempo equivalente a 10 ciclos.

Neste capítulo, discutimos qual o melhor comprimento de onda para controlar o ganho do EDFA e otimizamos o desempenho do amplificador para trabalhar em uma linha de atraso usada em um sistema de armazenamento de pacotes⁵⁴, de forma a conseguir um tempo de armazenamento correspondente a 9 ciclos com uma penalidade de potência menor do que 0,3 dB.

⁵⁴ Considerando que o sistema de armazenamento tal qual o implementamos é equivalente a uma linha de EDFAs idênticos por ter sido concebido a partir da técnica dos laços recirculantes, os ótimos resultados obtidos neste capítulo em função da otimização da técnica de controle de ganho são gerais e se aplicam a ambos os casos.

8.1

Sistema de Armazenamento de Pacotes por Linha de Atraso

A figura 39 a seguir apresenta a montagem experimental realizada para a avaliação das flutuações dinâmicas de ganho induzidas dentro da linha de atraso em virtude da amplificação pelo EDFA dos pacotes ópticos armazenados.

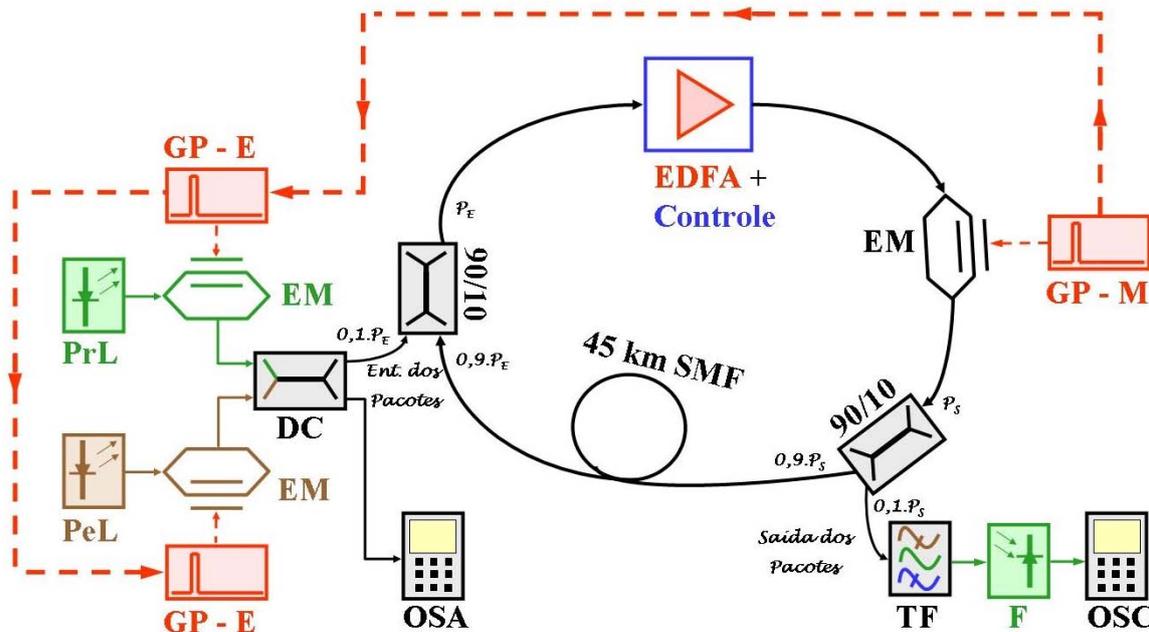


Figura 39 - Montagem experimental realizada para a medida das flutuações dinâmicas de ganho em um sistema óptico de armazenamento de pacotes por linha de atraso; PrL: Laser do canal de prova; PeL: Laser de perturbação; GP - E: Gerador de pulsos “escravo”; EM: Modulador Niobato de Lítio; DC: Acoplador de 3 dB; P_E : Potência de entrada; OSA: Analisador de Espectro Óptico; 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.

Os pacotes ópticos de 5, 2,5 e 1,25 μ s e as diferentes situações de interação entre eles foram emulados de forma análoga àquela descrita nos capítulos anteriores.

Entretanto, desta vez a potência do canal (potência média dos pacotes) foi ajustada para -25 dBm na entrada do EDFA, para todas as medidas e comprimentos de onda. Além disso, o tamanho do laço foi reduzido para aproximadamente 45 km de fibra monomodo padrão (desconsiderando-se os

cabos ópticos de conexão entre os dispositivos) e a frequência do gerador mestre, que serve de sinal de sincronismo para os demais geradores do circuito, foi reajustada de forma a permitir 9 ciclos de armazenamento dos pacotes na linha de atraso (*on time*).

Um maior número de ciclos foi escolhido para que a eficiência do sistema fosse atestada de forma a satisfazer plenamente as necessidades de armazenamento de pacotes, mesmo considerando-se a crescente demanda por tráfego nas redes atuais. Por conseguinte, o tempo em que os sinais permaneceram desligados (*off time*) foi suficiente para evitar que o acúmulo de potência de ruído pudesse comprometer a clareza dos resultados.

Convém também ressaltar que nenhum efeito relacionado à dispersão foi considerado. Por isso, nenhum dispositivo de compensação ou de gerenciamento da dispersão foi incluído no laço.

Manteve-se aqui a técnica de controle de ganho descrita nos capítulos anteriores [41] (de modo que na figura 39 substituímos os componentes do controle por um único bloco *EDFA + Controle de Ganho*), mas buscou-se otimizá-la para a operação do EDFA nas linhas de atraso.

Como primeiro passo em busca de uma melhor eficiência e após observar que uma grande variação da temperatura da sala causava instabilidade de operação da técnica de controle de ganho proposta, trocamos os circuladores antigos, caracterizados por uma elevada PDL (perda dependente da polarização), por dispositivos de melhor qualidade, com ótimo desempenho independentemente da polarização da luz em sua entrada, ou seja, com baixa PDL.

Com esta troca, tornamos o sistema mais robusto e apto a operação em campo ou em locais mais hostis, onde a variação da temperatura ambiente e a conseqüente variação da temperatura do sistema causariam uma flutuação da polarização da luz na entrada [42], podendo levar o controle de ganho a trabalhar em um ponto muito diferente do ótimo previamente ajustado.

Além disso, duas redes de Bragg em comprimentos de onda diferentes, 1528 e 1564 nm, foram empregadas, cada uma a seu tempo, para estabelecer a oscilação *laser* na cavidade e controlar o ganho do EDFA. Pôde-se assim escolher aquela que proporcionou melhores resultados.

É importante lembrar que em sistemas reais de armazenamento de sinais ópticos por linha de atraso, o acoplador 90/10 que permite monitorar a potência de

saída dos pacotes da figura 39 é substituído por um sistema de chaveamento óptico com controle eletrônico, *optical switch*, capaz de direcionar os pacotes armazenados em um ou mais canais para a saída no instante pré-determinado.

Diferentemente do acoplador 90/10, que permite amostrar uma pequena parcela da potência dos pacotes para análise sem interromper o armazenamento, a chave óptica direciona os pacotes de um ou mais canais integralmente para a saída no instante pré-selecionado, de forma que neste instante os pacotes deixam de ser armazenados e são encaminhados ao destino ou ao próximo nó da rede, dependendo da disponibilidade de um canal óptico.

Convém observar ainda que em função daquele acoplador 90/10 situar-se antes do lance de 45 km de fibra na montagem da figura 39, foi possível monitorar também a potência de saída dos pacotes que não foram armazenados por um ciclo sequer e apenas tiveram sua potência regenerada pela passagem no amplificador. Isto permitiu uma análise completa de desempenho do sistema de armazenamento de sinais ópticos implementado, desde a entrada dos pacotes no *buffer* até o final do último ciclo de armazenamento considerado.

Na saída da linha de atraso, utilizou-se um filtro sintonizável (com banda-passante de 3 dB de 0.5 nm) para selecionar o comprimento de onda do canal de prova e poder analisar a potência correspondente aos pacotes ópticos em um osciloscópio digital.

8.2

Flutuações de Ganho do Sistema Óptico de Armazenamento de Pacotes por Linha de Atraso

Idealmente, para obter um sistema de armazenamento de pacotes com alta eficiência, é necessário garantir que nenhuma flutuação de ganho do EDFA ocorra em virtude da propagação dos pacotes dentro do laço ou linha de atraso.

Isto significa que alguma técnica eficiente de controle de ganho deve ser empregada. Caso um controle de ganho ineficiente seja empregado, a potência de entrada do EDFA irá variar na medida em que os pacotes propagarem-se dentro do laço e flutuações de ganho, tão graves como as que mostramos no capítulo 6, podem vir a ocorrer.

Estas flutuações de ganho causarão rápidas variações da potência dos canais, que resultarão em uma degradação da SNR e, por consequência, em um aumento da BER dos pacotes armazenados, limitando o número máximo de ciclos dos pacotes na linha de atraso, ou seja, comprometendo a eficiência do sistema de armazenamento [5].

Avaliamos o desempenho do controle de ganho proposto para dois conjuntos de redes de Bragg cujos comprimentos de onda de reflexão são espectralmente opostos, 1528 e 1564 nm, deixando toda a banda C livre para a comunicação.

Para descobrir o melhor nível de atenuação no caminho de realimentação e alcançar a eficiência máxima na supressão das flutuações de ganho, transmitimos pacotes de diferentes tamanhos através de um EDFA no comprimento de onda de 1532 nm e medimos as flutuações de ganho de pico-a-pico no canal de prova de 1547 nm, como mostra a figura a seguir:

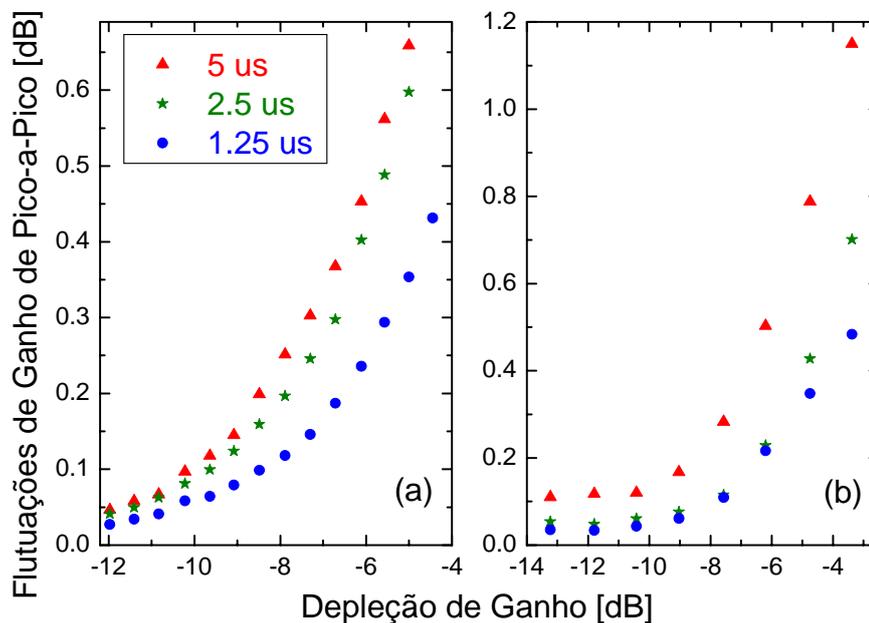


Figura 40 – Flutuações de ganho de um EDFA de pico-a-pico em $\lambda_{\text{prova}} = 1547$ nm, para a transmissão de pacotes de diferentes tamanhos; (a) $\lambda_{\text{FBG}} = 1528$ nm (b) $\lambda_{\text{FBG}} = 1564$ nm.

A figura 40 mostra as flutuações de ganho em função da depleção de ganho (em relação ao ganho máximo) para cada um dos comprimentos de onda do *laser* na cavidade, 1528 e 1564 nm.

Apesar de referirem-se a pacotes que não foram armazenados por um ciclo sequer e apenas tiveram sua potência regenerada pela passagem no amplificador, uma rápida comparação entre as figuras 40 (a) e 40 (b) sugere que o comprimento de onda de 1528 nm tem melhor desempenho para suprimir as flutuações de ganho causadas pelo tráfego de pacotes. Independentemente do tamanho dos pacotes, maiores flutuações de ganho foram medidas e uma maior depleção de ganho foi necessária para suprimi-las quando a rede de 1564 nm foi usada.

Para ambas as redes, otimizamos a atenuação no laço de realimentação de forma a minimizar as flutuações de ganho, de modo que uma maior saturação do amplificador implicaria apenas em uma depleção mais acentuada do ganho sem nenhuma vantagem na redução das oscilações. Como esperado, os efeitos são tão menores quanto menores forem os pacotes [4].

A figura 41 a seguir mostra a comparação entre as flutuações de ganho no canal de prova, causadas pela propagação de um único pulso e de um pulso duplo no comprimento de onda de 1532 nm, quando a rede de 1564 nm é utilizada para controlar o ganho do EDFA.

No caso do pulso duplo, o período entre os dois pulsos corresponde exatamente ao período de ressonância da cavidade para a atenuação ótima de 11 dB no caminho de realimentação.

Obviamente, considerando que a distribuição dos tempos de chegada dos pacotes nas redes ópticas é aleatória [32], esta não é uma situação muito comum. No entanto, ela representa o pior caso de similaridade de tráfego que pode ocorrer entre dois pacotes que dividem o meio amplificador, principalmente porque empregamos o comprimento de onda de 1564 nm para controlar o ganho do EDFA que, como vimos, tem pior desempenho quando o tráfego se faz por pacotes. Para facilitar a análise dos resultados, apresentamos apenas as medidas feitas para pacotes de 5 e 1,25 μ s:

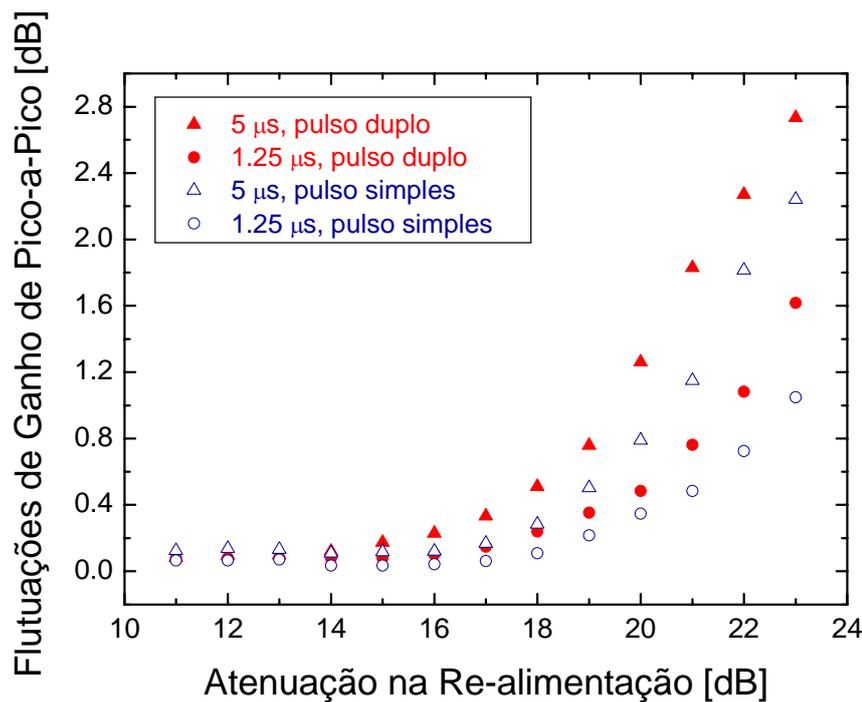


Figura 41 - Flutuações de ganho de um EDFA de pico-a-pico em $\lambda_{prova} = 1547$ nm, para a transmissão de pulsos simples e duplos com larguras de 5 e 1,25 μ s em 1532 nm; $\lambda_{FBG} = 1564$ nm.

De acordo com a figura 41, na medida em que nos afastamos da atenuação ótima na realimentação, a existência do pulso duplo torna ainda mais crítica uma situação em que a qualidade da comunicação já se encontrava bastante deteriorada, pois aumenta as flutuações de ganho em mais de 0,5 dB em relação ao pulso simples, para ambos os tamanhos dos pacotes. Mesmo tratando-se de uma situação pouco esperada, a figura 41 confirma a importância de se dispor de uma técnica de controle de ganho do EDFA de boa eficiência e com ajuste fino, principalmente quando a carga de pacotes na linha de atraso se aproximar de sua capacidade máxima.

A próxima figura mostra outras diferenças de desempenho entre o comprimento de onda mais curto e o mais longo em controlar o ganho do EDFA:

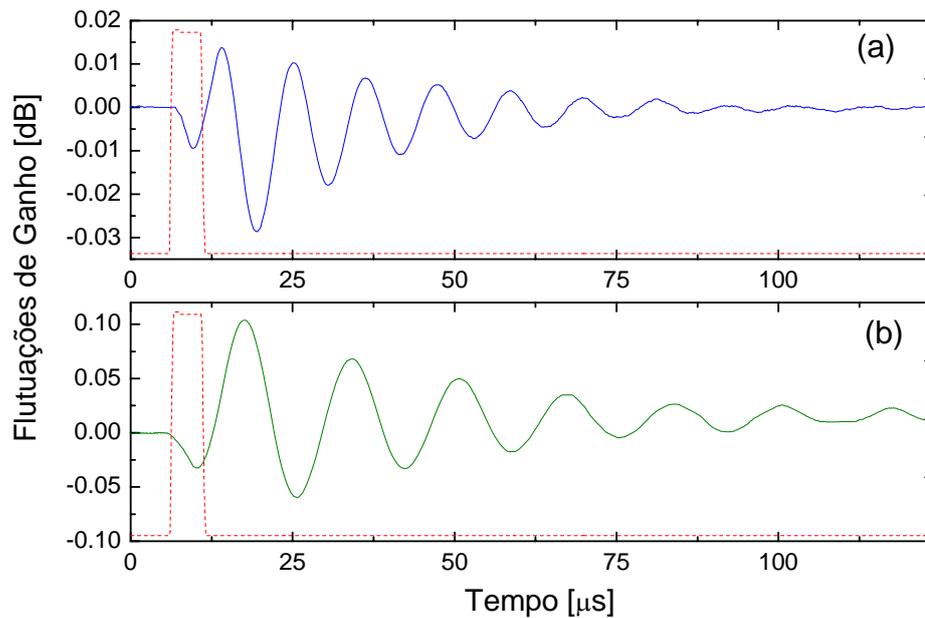


Figura 42 – Flutuações de ganho do EDFA em $\lambda_{\text{prova}} = 1547$ nm (linha cheia), depois da passagem de um pacote de 5 μs em 1532 nm (linha pontilhada); (a) $\lambda_{\text{FBG}} = 1528$ nm (b) $\lambda_{\text{FBG}} = 1564$ nm.

A figura 42 mostra as flutuações de ganho residuais no canal de prova, causadas pela passagem direta de um único pacote de 5 μs pelo EDFA, ou seja, um pacote que não foi armazenado. Após um a pequena redução no ganho em virtude do trânsito dos pacotes, grandes flutuações de ganho são observadas, alcançando aproximadamente 80 μs para o comprimento de onda de 1528 nm e além de 100 μs para 1564 nm. Estes resultados mostram perfeita concordância com [29], ou seja, os comprimentos de onda que resultam em variações de potência maiores caracterizam-se por longos tempos de estabilização do ganho (ou uma baixa frequência das oscilações).

Por conseguinte, o primeiro pacote a ser armazenado (ou o segundo a passar pelo EDFA) sofrerá flutuações de ganho de 0,16 dB quando a rede de 1564 nm for empregada, mas de apenas 0,04 dB quando o comprimento de onda do *laser* na cavidade for 1528 nm. Tanto o cabeçalho quanto o corpo dos pacotes podem ser afetados [4], mas os efeitos serão muito menores quando a rede de 1528 nm for empregada.

Entretanto, considerando-se a crescente demanda por tráfego nas redes ópticas atuais, as situações mais comuns são aquelas em que os pacotes são armazenados por um tempo maior. Logo, é indispensável avaliar a eficiência do controle de ganho em evitar o acúmulo dos efeitos após um número razoável de ciclos. A figura abaixo mostra as flutuações de ganho acumuladas ao longo de 9 ciclos de armazenamento de pacotes de 5 μ s:

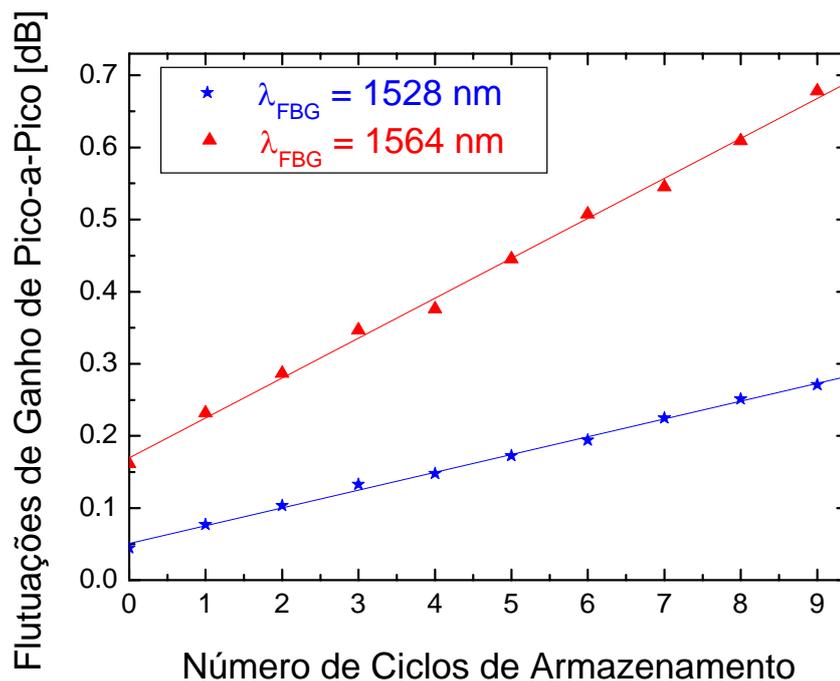


Figura 43 – Flutuações de ganho em $\lambda_{\text{prova}} = 1547 \text{ nm}$, vs. Número de ciclos de armazenamento de pacotes de 5 μ s, para ambos os conjuntos de redes de Bragg.

A figura 43 mostra as flutuações de ganho acumuladas em função do número de ciclos de armazenagem dos pacotes. Mesmo que para os pacotes não-armazenados as flutuações de ganho observadas sejam pequenas independentemente do comprimento de onda do *laser* na cavidade, a escolha correta de qual comprimento de onda usar para estabilizar o ganho do EDFA torna-se fundamental quando uma maior capacidade do sistema de armazenamento se faz necessária.

Através dos resultados na figura 43 pode-se perceber, mais uma vez, o desempenho superior do comprimento de onda de 1528 nm: as flutuações de

ganho sofridas pelo pacote no canal de prova após 9 ciclos de armazenamento podem alcançar até mesmo 0,7 dB quando a rede de 1564 nm for usada, mas apenas 0,3 dB quando a rede de 1528 nm for empregada. O tempo de armazenagem correspondente a cada um dos 9 ciclos mostrados na figura 43 é de 225 μ s, que é um tempo de armazenamento característico das linhas de atraso [37].

Fisicamente, a maior eficiência do comprimento de onda de 1528 nm para compensar variações dinâmicas da potência de entrada do EDFA está relacionada ao fato de a frequência de oscilação associada a este comprimento de onda ser maior, tornando-o mais ágil em compensar as oscilações de relaxação e as flutuações de ganho geradas pela transmissão de pacotes ou rajadas de dados. Em suma, por oscilar em uma frequência maior, o comprimento de onda menor tem uma maior velocidade de resposta.

No entanto, para que possamos atestar o bom desempenho de nosso sistema óptico de armazenamento de pacotes, é indispensável conhecer a BER e a penalidade de potência relacionadas às flutuações de ganho medidas, pois elas indicam a degradação da qualidade do sinal de cada pacote com o número de ciclos de armazenamento.

Para isto, fazemos uso da ótima concordância verificada entre os valores de penalidade de potência obtidos diretamente da variação de pico-a-pico da potência de saída dos pacotes com aqueles encontrados através de medidas da BER média de um canal contínuo, conforme descrito no capítulo 7.

Por conseguinte, passamos então a atribuir as medidas de flutuação de ganho obtidas à penalidade de potência que seria medida após os pacotes terem sido armazenados por um determinado número de ciclos na linha de atraso.

Conseqüentemente, os resultados apresentados na figura 43 confirmam o ótimo desempenho de nosso sistema óptico de armazenamento, pois ele permite que pacotes sejam armazenados por um período maior do que 2 milissegundos (correspondente a 9 ciclos de armazenamento), com uma penalidade de potência menor do que 0,3 dB se o comprimento de onda de 1528 nm for utilizado para controlar o ganho do EDFA.

Além disso, é muito importante perceber a flexibilidade da técnica de controle de ganho proposta, que permitiu um ajuste preciso do nível de potência

do *laser* na cavidade, de tal forma a manter a potência de ASE reduzida independentemente do número de ciclos de armazenamento.

Em um cenário diferente, onde o envelhecimento de algum dos componentes ópticos, como por exemplo um *laser* de bombeio, fizesse com que o ganho do amplificador não mais estivesse perfeitamente controlado, a potência de ASE começaria a acumular, causando flutuações de ganho que aumentariam rapidamente com o número de ciclos. Como vimos no capítulo 6, estas flutuações poderiam alcançar valores acumulados muito superiores do que aqueles da figura 43, especialmente quando a rede de 1564 nm fosse usada.

8.3

Considerações Finais

Neste capítulo, apresentamos os resultados da otimização da técnica de controle de ganho proposta para suprimir as flutuações de ganho do EDFA causadas pelo tráfego de pacotes e minimizar os efeitos acumulados ao longo de uma linha de amplificadores.

Um sistema de armazenamento de pacotes eficiente depende do comportamento estável do amplificador usado para compensar a perda intrínseca da linha de atraso, independentemente do tempo necessário ao armazenamento dos pacotes, ou seja, do número de ciclos de armazenamento.

Como mostramos, para garantir o comportamento estável do EDFA na linha de atraso, é indispensável dispor de uma técnica de controle de ganho eficiente e precisa.

Nesta técnica de controle de ganho por oscilação *laser* dentro de uma cavidade ressonante e considerando-se os comprimentos de onda e potências escolhidas, as medidas mostraram que o comprimento de onda de 1528 nm é mais eficiente para suprimir as flutuações dinâmicas de ganho do EDFA e minimizar os efeitos acumulados, permitindo alcançar uma elevada eficiência do sistema de armazenamento por linha de atraso.

De fato, a eficiência de controle de ganho que alcançamos com o emprego desta técnica permitiu que implementássemos um sistema óptico de armazenamento de sinais com desempenho singular, pois nele os pacotes podem

ser armazenados por um período maior do que 2 milissegundos, sem que a penalidade de potência alcance 0,3 dB [43].

Estas condições satisfazem as necessidades da grande maioria das aplicações das redes ópticas atuais e, possivelmente, futuras.