

Conclusão

Neste criterioso trabalho experimental, estudamos e descrevemos o comportamento de um EDFA por meio de muitas e diferentes medidas em bancada, da forma mais abrangente possível, de acordo com os recursos tecnológicos de que dispúnhamos.

Em virtude da constante expansão do número de usuários da Internet e, conseqüentemente, da crescente demanda por tráfego das redes de comunicação atuais, uma ampla banda-passante passou a ser um requisito indispensável às aplicações WDM da rede óptica.

Entretanto, a disponibilidade de uma ampla banda-passante está associada à operação do EDFA sob forte saturação e, nesta condição, a sensibilidade do ganho do amplificador ante as variações de sua potência de entrada é maior.

Além disso, considera-se eficiente um EDFA que apresentar o maior ganho, a maior potência de saturação de saída e o menor ruído possível [6].

Por tudo isso e após comprovarmos em bancada, já nas primeiras medidas, a vulnerabilidade do amplificador ante as variações de sua potência de entrada, foi necessário implementar uma técnica de controle capaz de minimizar as instabilidades de ganho do EDFA.

Optamos por realizar o controle de ganho do EDFA a partir de uma oscilação *laser* em uma cavidade ressonante. Entretanto, diferentemente da topologia clássica [27], implementamos nossa cavidade óptica a partir de duas redes de Bragg e dois circuladores. Estes componentes possuem perda de inserção menor do que o filtro sintonizável, o que nos possibilitou uma maior versatilidade e ampliou nossa faixa de trabalho (em termos de níveis de saturação do amplificador).

Além disso, não bastasse a sua simplicidade por não serem necessárias conversões eletro-ópticas para efetuar o controle de ganho, a topologia que implementamos mostrou-se também mais eficiente, qualquer que seja a natureza

da variação da potência de entrada do EDFA, já que a compensação é instantânea e precisa.

Ainda mais, por realizarmos o controle nos comprimentos de onda de 1528 e 1564 nm, disponibilizamos o espectro de ganho do EDFA correspondente à banda C (1530 – 1560 nm) integralmente para a amplificação dos canais WDM, sem nenhum prejuízo à figura de ruído ao longo desta ampla faixa de comprimentos de onda.

De posse desta técnica de controle e após algumas medidas de caracterização do amplificador, passamos então a medir as respostas de um EDFA com ganho controlado à dois tipos principais de perturbação: variações lentas e rápidas da sua potência de entrada, correspondentes aos eventos de realocação de canais e propagação de pacotes nas redes ópticas, respectivamente. A cada nova medida, buscamos não apenas entender melhor o comportamento do amplificador, mas também encontrar parâmetros ou efeitos que permitissem otimizar a técnica de controle de ganho proposta. Neste sentido, os principais resultados que obtivemos foram os seguintes:

- O comprimento de onda de 1564 nm é mais eficiente para realizar o controle de ganho de um EDFA submetido a variações lentas de potência em sua entrada, como é o caso das situações de realocação de canais, muito frequentes nas redes ópticas;
- As oscilações de relaxação, características de um EDFA com ganho controlado por um *laser* em anel, podem ser reforçadas e manter-se de forma ressonante se o valor do atraso entre os pacotes a serem amplificados for próximo ao período das oscilações de relaxação, dando origem a flutuações de ganho ainda maiores;
- Ainda que esta excitação ocorra em frequências próximas dos sub-harmônicos das oscilações de relaxação, os efeitos ainda serão consideráveis e podem ser reforçados de forma ressonante. Isto mostra que as interações entre os pacotes podem ocorrer mesmo para baixas densidades de tráfego;
- No caso da propagação de um canal solitário, tanto a potência do cabeçalho (*header*) quanto do corpo (*payload*) do pacote podem

sofrer depleção, dependendo da frequência de repetição dos pacotes estar acima ou abaixo da frequência de ressonância, respectivamente;

- Já no caso da propagação multicanal, tanto a potência média do pacote pode sofrer depleção como também esta depleção pode ocorrer no cabeçalho ou no corpo do pacote, dependendo do atraso relativo entre os pacotes nos diferentes canais;
- As flutuações de ganho são maiores se excitadas pela variação do tráfego de um canal cujo comprimento de onda esteja próximo de 1532 nm, região espectral em que o ganho do EDFA é maior;
- Em geral, as respostas dinâmicas de um amplificador são dependentes do comprimento de onda dos canais, da potência dos pacotes e, como mencionado, do atraso relativo entre os pacotes transmitidos através do EDFA.

No entanto, nas redes ópticas atuais é muito comum encontrar várias unidades amplificadoras operando em cascata, seja para viabilizar um maior alcance de um enlace óptico, seja em um sistema óptico de armazenamento onde o amplificador é utilizado para compensar as perdas dos sinais após propagarem-se por vários ciclos na linha de atraso.

Logo, para que pudéssemos alcançar uma maior abrangência em nosso estudo, tornou-se indispensável analisar os efeitos acumulados ao longo de uma linha de amplificadores. Para isso e para que várias unidades não fossem necessárias, emulamos a linha de amplificadores através da técnica do *laço recirculante*. Os principais resultados que obtivemos são listados a seguir:

- 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, reduzindo significativamente a distância máxima de transmissão nos lances ópticos cujo tráfego se realiza na forma de pacotes;
- 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.

A partir destes resultados, concluímos que era necessário otimizar a técnica de controle de ganho para minimizar os efeitos acumulados ao longo da linha de EDFAs, como é o caso de um *buffer* óptico, no qual, em virtude da indisponibilidade de um canal óptico para encaminhamento dos pacotes ao seu destino, um longo tempo de armazenamento fosse necessário.

Entretanto, para que pudéssemos atestar a eficiência do controle de ganho que propusemos em um sistema de armazenamento de pacotes, seria necessário conhecer a BER e, por conseguinte, a penalidade de potência dos pacotes armazenados.

Em função desta necessidade e como não dispúnhamos de um equipamento capaz de realizar tal medida, desenvolvemos uma metodologia de cálculo simples para quantificar a BER e a penalidade de potência de um pacote, independentemente do seu tamanho e do tempo de armazenamento.

A concordância entre os resultados encontrados através da metodologia desenvolvida com aqueles obtidos diretamente das medidas da variação da potência de saída dos pacotes em um osciloscópio, nos habilitou a atribuir as medidas de flutuação de ganho à penalidade de potência que seria medida após os pacotes terem sido armazenados por um determinado número de ciclos na linha de atraso.

De fato, a magnitude das flutuações de ganho representa uma penalidade em virtude da oscilação da potência de saída dos pacotes em relação ao seu nível estável.

Para a otimização da técnica de controle de ganho a troca dos circuladores da alta PDL por dispositivos menos suscetíveis à polarização da luz foi essencial. Além disso, 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 excelente eficiência de controle de ganho que alcançamos com o emprego desta técnica diferenciada 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. Estas condições satisfazem as necessidades da grande maioria das aplicações das redes ópticas atuais e, possivelmente, futuras.

Enfim, com o desenvolvimento deste trabalho buscamos não apenas contribuir para a melhoria da qualidade de serviço oferecido pelas redes ópticas, de forma a satisfazer o crescente número de usuários da rede, mas também disponibilizar uma boa fonte de consulta quando o assunto de interesse for o *amplificador a fibra dopada com Érbio*.