

1

Introdução

Com o objetivo de avaliar o resultado de políticas de inclusão digital, como por exemplo, a redução dos impostos incidentes sobre os computadores pessoais (PCs), realizou-se uma pesquisa com o público das classes A, B e C, de 18 a 45 anos, do Brasil (São Paulo, Rio de Janeiro, Recife e Porto Alegre), México, Argentina e Colômbia. O levantamento foi realizado no segundo trimestre de 2006 e abrangeu cerca de 700 pessoas em cada país.

De acordo com esta pesquisa, cujos resultados na íntegra podem ser encontrados na página do Senado Federal na internet [1], quatro em dez famílias brasileiras planejam comprar um novo PC até meados de 2007, sendo que 80% desses consumidores pretendem comprar *desktop*, 14% *notebooks* e 6% ainda não se decidiram. Além disso, enquanto a conexão de *desktops* à internet permaneceu a mesma (80%), a conexão de *notebooks* passou de 5% para 10%. Aliado a isto, é significativo o aumento do uso de conexão de banda larga, que passa de 29% para 44% entre os entrevistados.

Dentre os usuários que não possuem computador houve um crescimento significativo do acesso em bares/cafês, passou de 10% para 26%.

Os resultados desta pesquisa mostram claramente a constante expansão do número de usuários da Internet e a crescente demanda por tráfego das redes de comunicação atuais. Naturalmente, para satisfazer todos estes usuários também é crescente a variedade dos serviços oferecidos.

Como consequência deste cenário extremamente versátil, o tráfego de dados das redes ópticas, que absorvem quase que a totalidade da demanda atual, varia dinamicamente.

Tais mudanças dinâmicas do tráfego significam variações rápidas da potência de entrada dos amplificadores da rede que, em sua maioria, são causadas pela transmissão de dados sob a forma de pacotes (*packet switching transmissions*) ou rajadas (*burst switching transmissions*), conforme a tendência

de discretização do tráfego das redes atuais. A variabilidade do tráfego também se manifesta na forma de alterações mais lentas da potência de entrada dos amplificadores, como aquelas originadas pela realocação de canais (*channel routing*) em uma rede óptica [2].

Em virtude de suas características diferenciadas como alto ganho, alta potência de saída, elevada linearidade, baixo ruído, baixa perda de inserção, ampla banda-passante, entre outras, os *amplificadores a fibra dopada com Érbio* (EDFAs) são os amplificadores mais comumente usados na faixa de comprimentos de onda em torno de 1500 nm, em especial na banda C de transmissão, de 1530 a 1560 nm.

Entretanto, apesar do desempenho singular do EDFA na realização de comunicações WDM, aquelas alterações lentas e rápidas do nível de potência na entrada do amplificador em função da variabilidade do tráfego causam uma depreciação do seu desempenho, pois alteram o ganho e a qualidade da transmissão de dados dos canais adjacentes.

Todavia, se ótimos resultados de controle de ganho do EDFA foram alcançados sob variações lentas do tráfego [3], um estudo mais criterioso do comportamento dinâmico do EDFA quando o tráfego nos canais fosse realizado sob a forma de rajadas (*bursts signals*) ou pacotes (*packet switching*) ainda necessitava ser realizado, a fim de que se pudesse propor uma técnica de controle de ganho com eficiência compatível a tal dinamismo. As rajadas ou pacotes dão origem a transientes rápidos que exigem uma eficiência que não pode ser alcançada com as técnicas de controle de ganho empregadas sob variação de tráfego lento.

Quando vários EDFAs são usados em linha, como é comum nos lances de fibras intercontinentais ou em sistemas de armazenamento ópticos (*optical buffers*), os efeitos relacionados à variabilidade do tráfego são tão maiores quanto maior for o número de amplificadores em cascata, especialmente se as flutuações de ganho (e conseqüentemente de potência dos canais) forem excitadas de forma ressonante pela transmissão sucessiva de pacotes ao longo da linha de EDFAs [4]. Estes efeitos acumulados podem limitar o comprimento máximo de enlace que se pode alcançar ou comprometer seriamente a eficiência de um sistema de armazenamento [5].

Conseqüentemente, para que possamos alcançar uma distância de enlace óptico maior ou dispor de um sistema de armazenamento de alta eficiência e evitar que dados sejam perdidos, é indispensável, a priori, conhecer a resposta do EDFA para qualquer variação de potência em sua entrada, seja ela lenta ou rápida. E, a partir deste conhecimento, implementar uma técnica de controle eficiente, capaz de manter o ganho do EDFA constante, de forma que a qualidade da informação transmitida em um canal qualquer não seja depreciada por alterações em outros canais que dividam o meio amplificador.

Desta forma, contribui-se para a melhoria da qualidade de serviço oferecido pelas redes ópticas e, por conseguinte, para a diversificação das funções e facilidades da Internet, de forma a absorver e satisfazer o crescente número de usuários da rede.

1.1

Apresentação do Trabalho

A descrição computacional do comportamento de um EDFA é um trabalho muito dispendioso, não somente em virtude da necessidade de uma grande disponibilidade de tempo, mas principalmente em virtude dos grandes e sofisticados recursos necessários. No caso geral, os recursos de tempo de processamento e memória computacional necessários à solução das equações diferenciais não-lineares acopladas estão além da capacidade de um computador pessoal de configuração comum. O tempo computacional torna-se um fator ainda mais proibitivo quando as condições de entrada do amplificador, como as potências de sinal e de bombeio ou os comprimentos de onda, são variados dentro de uma certa faixa ou quando o objetivo do programa for otimizar os parâmetros do EDFA, como comprimento de fibra e os níveis de potência óptica a propagarem-se nesta fibra [6].

Por isso, como o leitor perceberá ao longo das páginas subseqüentes, 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. Trata-se, portanto, de um criterioso trabalho experimental, o qual referenciamos de forma conveniente, na

teoria resultante de simulação computacional e em outros resultados experimentais compatíveis, apresentados na literatura disponível.

Com base neste criterioso estudo realizado, propomos a técnica de controle de ganho do EDFA por *laser* em anel e mostramos que bons resultados podem ser alcançados sob variações lentas ou rápidas do tráfego, desde que alguns parâmetros da técnica sejam ajustados de forma correta para cada uma das situações.

A partir da técnica dos laços recirculantes (*recirculating loop technique*) [7], que permite emular uma linha de amplificadores ou um sistema de armazenamento de sinais ópticos por linha de atraso a partir de um único EDFA, analisamos as flutuações de ganho acumuladas para que pudéssemos otimizar a atuação do controle de forma a maximizar a distância do enlace ou o tempo de armazenamento dos pacotes sem prejuízo à qualidade da informação transmitida.

A seguir apresentamos a organização do trabalho.

O desenvolvimento teórico foi dividido em duas partes, capítulos 2 e 3. No capítulo 2 serão apresentadas as equações de taxa que caracterizam o processo de amplificação em fibras dopadas com Érbio e, por conseguinte, a viabilidade teórica da construção de um sistema de controle das instabilidades de comportamento de um EDFA.

Já no capítulo 3 analisamos quais os fatores que efetivamente limitam o desempenho do EDFA e, a partir disso, como melhorar a sua eficiência. Mostramos a dinâmica de funcionamento de um sistema de armazenamento de sinais ópticos baseado em uma linha de atraso e, para que tenhamos uma noção da degradação da qualidade do sinal após propagar-se várias vezes por um mesmo amplificador, como em um sistema de armazenamento, ou por vários amplificadores diferentes, estimamos a evolução da figura de ruído na medida em que o sinal se propaga por vários EDFAs em cascata.

No capítulo 4 apresentamos as principais características estáticas de um EDFA, como sua curva de ganho para o regime de pequenos sinais, seu ganho espectral e sua figura de ruído. Além disso, investigamos as respostas do amplificador às variações lentas de potência em sua entrada, como aquelas causadas pela realocação de canais em uma rede óptica.

Por sua vez, o capítulo 5 mostra a avaliação do comportamento dinâmico de um EDFA submetido ao tráfego de pacotes característico das redes WDM atuais.

No capítulo 6 investigamos os efeitos acumulados ao longo de uma linha de amplificadores idênticos, emulados através da técnica dos laços recirculantes.

O capítulo 7 descreve uma metodologia de cálculo simples para quantificar a BER (*Bit Error Rate* – Taxa de Erro de Bit) de um pacote no canal de prova e, por conseguinte, uma forma alternativa de obter a penalidade de potência relativa a um pacote.

No capítulo 8 otimizamos o desempenho do amplificador para trabalhar em uma linha de atraso usada em um sistema de armazenamento de pacotes (*optical buffer*) e comprovamos a eficiência da técnica de controle de ganho em minimizar os efeitos acumulados ao longo de muitos amplificadores em cascata.

Por fim, após as conclusões e as referências bibliográficas apresentadas nos capítulos 9 e 10, apresentamos em um apêndice a descrição pormenorizada de todos os cálculos realizados, quando necessário, para obter os resultados apresentados ao longo do trabalho.