

EDFA com Controle Automático de Ganho Híbrido-Serial: Uma Abordagem de Controle baseada em uma estrutura Totalmente Óptica e Eletrônica

Júlio. C. R. F. Oliveira, Juliano. R. F. Oliveira,

CPqD, Rodovia Campinas-Mogi Mirim, km 118.5, Campinas, SP, 13086-902, Brasil

Elnatan. C. Ferreira, A. C. Bordonalli

Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade de Campinas, Campinas, SP, 13083-970, Brasil

Resumo — Apresentamos uma abordagem de controle de ganho híbrido para EDFAs que habilita a operação do mesmo para próxima geração de redes ópticas, proporcionando extensão da faixa dinâmica e alto desempenho na supressão de transientes, eliminando os efeitos da saturação do amplificador.

Palavras-chaves — Amplificadores ópticos, Redes ópticas reconfiguráveis, processamento digital de sinais.

Abstract — We present an approach of hybrid gain controlled EDFAs enabled for the next generation of optical networks, providing extended dynamic gain range and superior transient suppression performance independently of the coupled input power, eliminating optical amplifiers saturation effects.

Keywords — Optical amplifiers, Reconfigurable optical networks, Digital signal processing.

I. INTRODUÇÃO

Amplificadores a fibra dopada com érbio (EDFAs) tem sido alvo de sucessivas melhorias desde sua concepção no final dos anos 80. Em uma breve lista podemos citar o desenvolvimento de novos tipos de fibras dopadas com alta concentração de érbio, primeiramente para uso na banda L [1], bem como fibras de érbio com revestimentos múltiplos suprimidos (*suppressed cladding*) para aplicações na banda S [2]. Junto, à disponibilidade do laser de bombeio de 980-nm com encapsulamento mini-DIL, estes avanços permitiram novas propostas de configurações de circuitos capazes de proporcionar os seguintes benefícios: maiores ganhos; menores figuras de ruído; compensação de dispersão cromática; operação multi-banda; entre outros [3]. O controle automático de ganho (AGC), desempenhado através de técnicas eletrônicas, ópticas ou ambas, foram outras importantes características adicionadas aos EDFAs [4-5].

De fato, o controle de ganho tornou-se crucial em amplificadores saturados quando variações freqüentes de sinal de entrada, induzidas por reconfigurações da rede ou operações de adição/remoção de canais óticos, passaram a ocorrer em maior escala, tornando o ganho do EDFA uma variável não mais controlada, penalizando severamente a transmissão devido ao excesso ou à ausência de potência nos canais. Várias técnicas de controle de ganho foram propostas, utilizando técnicas de controle totalmente óptico, eletrônico ou ambos os controles de ganho. Contudo, características fundamentais à operação em redes ópticas tais como, faixa de

potência de entrada, faixa dinâmica do EDFA e supressão de transientes, são severamente limitadas para estas técnicas, comprometendo a operação do EDFA em redes óticas reconfiguráveis. Para solucionar essas limitações e habilitar a adequada operação dos EDFAs em redes óticas reconfiguráveis, amplificadores com duplo estágio e atenuador óptico variável (VOA) entre os estágios são largamente utilizados [6]. Utilizando esta abordagem, o controle do VOA é responsável pelo ajuste da potência de acordo com a faixa de controle do segundo estágio (elevando ou reduzindo a atenuação no sinal de saída do primeiro estágio) assegurando o controle de ganho de EDFA. Contudo, a faixa dinâmica de um estágio do EDFA continua a mesma, não ampliando a faixa dinâmica de ganho do estágio, o que torna necessário a utilização de um EDFA de dois estágios, com VOA, para assegurar a faixa dinâmica adequada. As técnicas de controle de ganho anteriores, apresentavam como maior intuito a redução das oscilações de relaxação (ópticas) e o controle eletrônico rápido, porém cobrindo uma reduzida faixa de operação com limitada faixa dinâmica. Em [7], uma atuação paralela (simultânea) do controle óptico, com um rápido controle baseado em realimentação adiante foi empregado, reduzindo a contribuição da oscilação de relaxação através do controle eletrônico de alta velocidade. *Overshoots/undershoots* mais baixos e oscilação de relaxação com menor duração foram obtidas com o desenvolvimento de controles eletrônicos mais rápidos. Contudo, com essa abordagem, características como a faixa dinâmica de ganho e da potência de entrada, permanecem com as mesmas limitações observadas para os EDFAs com controle totalmente óptico ou eletrônico. A restrição da faixa dinâmica de ganho limita a operação do EDFA para um número reduzido de canais, impedindo que a rede suporte um aumento de canais mantendo um adequado controle de ganho.

Neste trabalho, uma nova abordagem para o EDFA com controle de ganho híbrido baseado em uma atuação serial do controle totalmente óptico e do controle eletrônico é utilizada. Através desta, obtêm-se um aumento da faixa dinâmica de ganho do EDFA, além de inserir uma nova variável interna, junto ao bombeio, atuando no processo do controle de ganho, o nível de potência canal de controle, que é controlado pela atenuação do VOA na cavidade óptica. Como resultado, obtêm-se a generalização da faixa da potência de entrada e da faixa dinâmica de controle de ganho, com supressão de transiente, habilitando o EDFA a operar de

forma generalizada em qualquer potência de entrada com uma faixa dinâmica de controle adequada, mesmo quando submetido a condições extremas de reconfiguração dos canais da rede óptica.

II. EDFA COM CONTROLE DE GANHO HÍBRIDO SERIAL

A técnica de controle de ganho híbrida proposta (S-HGC - *Serial Hybrid Gain Control*), ilustrada esquematicamente na Fig. 1. Esta se baseia em um controle totalmente óptico capaz de controlar eficientemente o ganho do EDFA até um nível de sinal de entrada de -1 dBm, sendo, para o restante da faixa de operação (até +10 dBm), realizado um controle eletrônico rápido baseado em realimentação adiante. Uma análise detalhada do controle totalmente óptico é apresentada em [5]. Como se pode verificar na Fig. 1, um atenuador óptico variável (VOA) é utilizado na realimentação óptica. Este VOA têm a função de maximizar o ganho dos canais na banda de transmissão através do controle da eficiência do laser formado no comprimento de onda de 1528 nm. Como resultado desta alocação do canal, é verificada uma ausência de oscilações de relaxação, junto a um nível de figura de ruído reduzido e uma larga faixa de ganho ajustável. Para estender a potência de entrada acima do limite de -1 dBm, um controle eletrônico baseado em realimentação adiante é acoplado a esta configuração de controle.

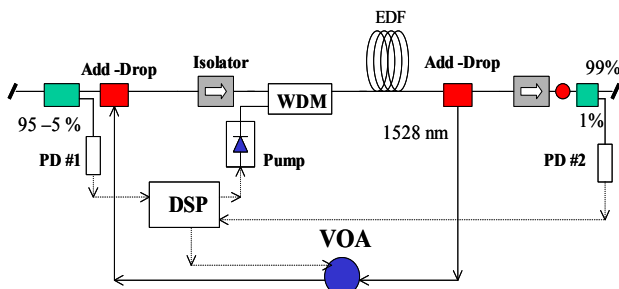


Fig. 1 – Diagrama em blocos do EDFA com controle de ganho híbrido serial.

O esquema do EDFA com controle de ganho proposto é ilustrado pela Fig. 1. Para execução do controle totalmente óptico, a realimentação óptica é composta por dois *add-drop* centrados no comprimento de onda de 1528 nm, e localizados antes e depois do estágio de amplificação. Um VOA é utilizado na realimentação óptica para controlar a perda da cavidade e controlar com maior eficiência o laser de controle (o ganho transmitido ao canal). Para realizar o controle de ganho baseado na realimentação adiante, primeiramente, são monitoradas as potências em dois fotodetectores (dispostos após os acopladores ópticos da entrada 95-5% e da saída 99-1%), sendo estas utilizadas pelo DSP (*Digital Signal Processor*) para cálculo do nível de bombeio adequado para manutenção do ganho constante.

O controle eletrônico ilustrado esquematicamente na Fig. 1 pelo bloco DSP, baseia-se em uma unidade processadora digital de sinais (DSP) de ponto fixo que monitora a potência de entrada e saída do EDFA e atua no laser de bombeio para manter o ganho ajustável constante, como mostra em detalhes a Fig.2.

O *hardware* eletrônico desenvolvido, Fig 2, realiza uma iteração do controle de ganho (aquisição de medidas, cálculos do controlador e atuação nos lasers de bombeio) com um tempo de aproximadamente 9 μ s. Como os EDFAs possuem tempo de vida do nível metaestável de aproximadamente 150 μ s, são realizadas aproximadamente 15 iterações do controle de ganho eletrônico, atuações estas capazes de proporcionar os requisitos de tempo de resposta que levam à supressão dos transientes dos EDFAs.

Na abordagem de controle de ganho híbrido proposta, as técnicas de controle se concatenam de forma serial, com uma atuação disjunta. Esta separação é definida por um ponto de potência de entrada responsável pela atuação de cada controle. O ponto de separação é definido experimentalmente considerando a capacidade de correção de ganho do controle totalmente óptico, e o limite mínimo de potência de entrada para atuação do controle eletrônico. Como resultado, a faixa dinâmica de ganho e de potência de entrada, associada individualmente às técnicas de controle totalmente óptico, e de controle eletrônico, são acopladas, habilitando o EDFA, mesmo que com apenas um único estágio, a operar com controle de ganho para qualquer potência de entrada, generalizando o uso deste dispositivo em redes ópticas reconfiguráveis.

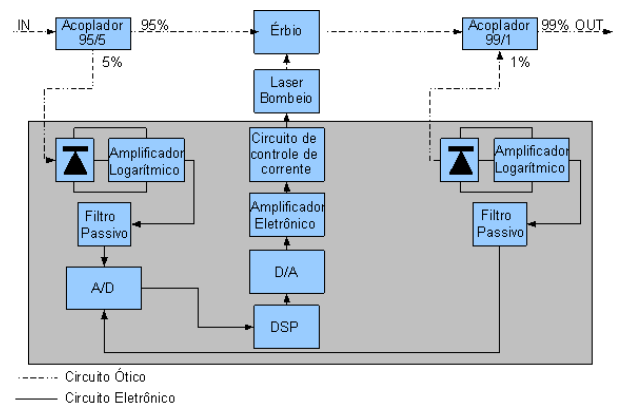


Fig. 2 – Esquema de controle de ganho eletrônico baseado em DSP capaz de prover supressão de transiente na faixa de controle eletrônico.

III. CARACTERIZAÇÃO E RESULTADOS

O EDFA com controle de ganho híbrido proposto foi primeiramente caracterizado em termos do ganho do amplificador para 32 canais acoplados da banda C que variam entre 1534 e 1559 nm. A Fig. 3 ilustra a faixa dinâmica de ganho resultante e a faixa de potência de entrada, assumindo como referência o canal em 1544,6 nm.

Como esperado, o ganho versus potência de entrada se encontra em torno do nível de ganho desejado, eliminando os efeitos da saturação do EDFA. Podemos observar uma faixa dinâmica de ganho acima de 30 dB quando o ganho do amplificador é de 15 dB. Para os demais ganhos verifica-se a generalização da fixa dinâmica de controle, ficando esta limitada apenas pela potência de saída máxima do EDFA, e não mais pela saturação, efeito este completamente removido. A limitação da faixa dinâmica pela potência de saída do EDFA é esperada, já que a potência total da entrada é

limitada pela máxima diferença entre a potência de saída que o amplificador pode prover e o ganho desejado. Isto ocorre pois a potência de saída encontra o seu limitante máximo quando o nível de bombeio é máximo. Nos experimentos realizados este controle de ganho mostra-se eficiente para faixas de potência de entrada que mantém a saída do amplificador abaixo de +20 dBm (potência nominal de saída do EDFA).

Como mencionado anteriormente, o controle de ganho híbrido foi concebido de forma que os controles ópticos e eletrônicos trabalham de maneira serial (disjunta). Desta maneira, um ponto estratégico de ganho foi definido para executar uma troca entre o esquema de controle de ganho óptico (abaixo do ponto escolhido) e o controle eletrônico (acima do ponto escolhido) provendo o controle de ganho. As Figs. 3 a 5 exibem os principais resultados de caracterização proposta pelo EDFA com controle de ganho híbrido serial (EDFA-SHGC).

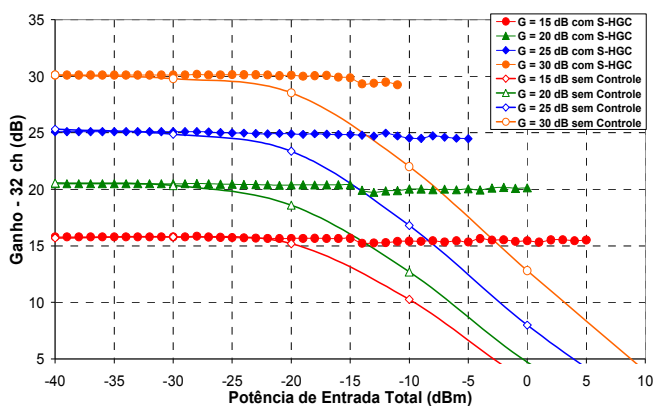


Fig. 3 – Ganho versus potência de entrada para o EDFA com o ganho controlado (S-HGC) e sem controle de ganho.

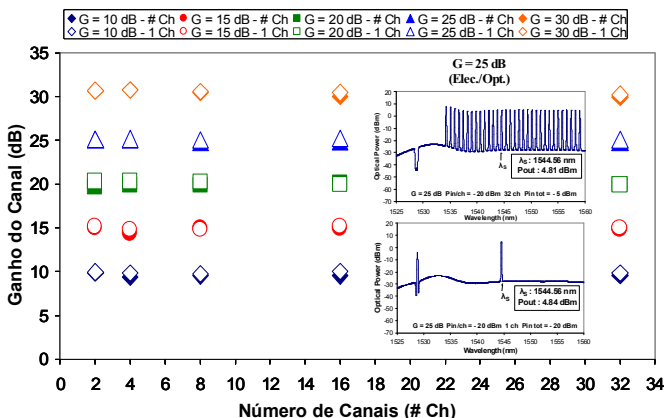


Fig. 4 – Variação de ganho versus número de canais para o EDFA com o ganho controlado (S-HGC). Pontos não preenchidos se referem a ganho com um canal e os pontos preenchidos ao ganho desejado com "N" canais.

A generalização da faixa dinâmica de ganho é ilustrada pelas Figs.3 e 4, enquanto as Figs. 5 e 6 mostram o desempenho da supressão do transiente utilizando o controle óptico e o eletrônico que compõem a estrutura híbrida proposta. Na Fig. 4, uma comparação entre o EDFA sem controle de ganho e o EDFA S-HGC é ilustrada baseado no ganho por canal. Para cada nível, o número de canais é

modificado de 1 (pontos não preenchidos) para 32, 16, 8, 4 e 2 canais (pontos preenchidos). Como se pode visualizar, uma variação máxima de ganho de 0,6 dB é observada, para o caso da variação de 1 para 32 canais, exibindo assim a eficácia do controle de ganho realizado.

Os espectros na Fig. 4 mostram a saída do EDFA com o nível de ganho de 25 dB para 32 canais (controle de bombeio eletrônico) e 1 canal (controle de bombeio totalmente óptico), respectivamente. Os resultados ilustrados nas Figs. 3 e 4 demonstram a generalização da faixa dinâmica de ganho e de potência de entrada, indicando os benefícios da atuação serial do controle totalmente óptico e eletrônico em contraste com as atuações paralelas reportadas anteriormente [7], onde essas características limitam o EDFA a operação na faixa somente da técnica de controle totalmente óptica.

As Fig. 5 e 6 ilustram o desempenho da supressão de transientes para os esquemas de controle totalmente óptico e eletrônico cobrindo toda faixa de potência de entrada das redes ópticas. Nas Figs. 5 e 6 o EDFA foi submetido a adição/remoção de 16 canais com intervalos de 500 μ s, para o ganho de 20 dB. Como pode ser visto na Fig. 5, para o controle totalmente óptico, é obtida uma total supressão de transientes, exibindo um diagrama de olho sem penalidade e um fator Q constante.

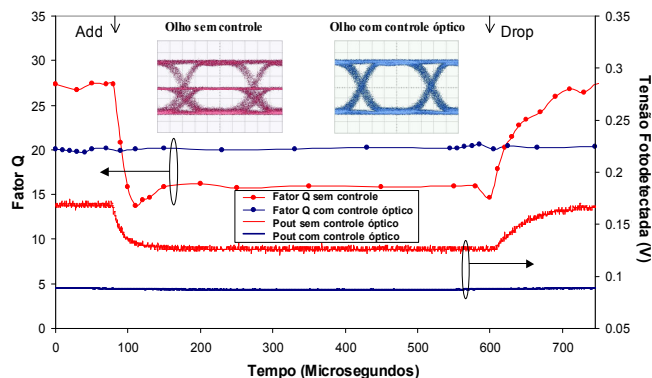


Fig. 5 – Análise transiente para o controle de ganho totalmente óptico (G=20dB) que compõe o S-HGC desenvolvido.

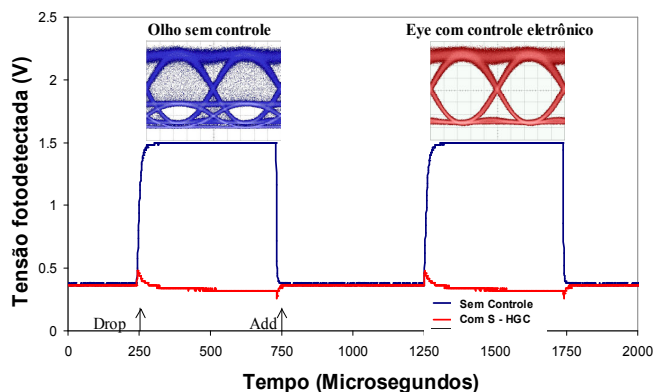


Fig. 6 – Análise transiente para o controle de ganho eletrônico (G=20dB) que compõe o S-HGC desenvolvido.

Na Fig. 6, para um nível de potência de entrada que garante a operação na faixa de controle eletrônico. Utilizando um controle eletrônico com realimentação adiante baseado em

um DSP, foi verificada uma máxima variação de 0,9 dB quando o S-HGC foi submetido a uma adição/remoção de 16 canais, não sendo verificada penalidade ao diagrama de olho resultante. Baseados nestes resultados, e em outras análises similares executadas em torno da faixa de potência de entrada do EDFA S-HGC, a supressão de transiente pode ser generalizada com um desempenho similar e uniforme para qualquer nível de potência de entrada.

Após os resultados apresentados, pode-se confirmar que a técnica de ganho híbrida serial proporciona a generalização da faixa dinâmica e da supressão de transientes dos EDFAs, habilitando a operação destes em redes ópticas reconfiguráveis. Através desta técnica de controle foram alcançados requisitos de desempenho ao longo das análises transientes que demonstram que a inserção e remoção de canais não causaram variações de ganho para qualquer nível de sinal de entrada.

IV. CONCLUSÃO

Uma nova abordagem para o controle híbrido de ganho em EDFAs baseado na atuação serial do controle de ganho totalmente óptico e eletrônico foi apresentada. O desempenho mostrado pela caracterização mostra que o EDFA proposto generaliza a faixa de ganho dinâmica e a faixa de potência de entrada. Também foram obtidos os requisitos de supressão de transiente ao longo de toda faixa de potência de entrada independente do esquema de controle, habilitando o EDFA a operação adequada dos EDFAs na próxima geração de redes ópticas reconfiguráveis.

REFERÊNCIAS

- [1] D. R. Zimmerman et. al, J. Lightwave Technol., vol. 22, no. 1, pp. 63-70, 2004.
- [2] M. A. Arbore et. al, OAA'02, paper PD-4-1, Vancouver, Canada, 2002.
- [3] J. B. Rosolem et. al, J. Lightwave Technol., vol. 24, no. 10, pp. 3691-3697, 2006.
- [4] A. K. Srisvastava et. al, "Fast gain control in erbium-doped fiber amplifier", Proc. of OAA'96, 1996.
- [5] J. C. R. F. Oliveira et. al, Microwave Opt. Technol. Lett., vol. 48, no. 6, pp. 122-1225, 2006.
- [6] L. Qiao et. al, J. Lightwave Technol., vol. 25, no. 3, pp. 771-778, 2007.
- [7] M. Fukutoku et. al, OAA'98, pp. 32-35, 1998, Colorado, Canadá.