

Benefícios da Eliminação da Variação de Ganho em EDFA's para Redes Óticas Dinâmicas

Victor A. P. Oliveira, Francisco A. O. Neto e Iguatemi E. Fonseca

Resumo—Este artigo apresenta um estudo sobre benefícios que o tratamento do efeito de saturação dos amplificadores óticos pode trazer para o desempenho de uma rede ótica transparente dinâmica. É apresentado um modelo analítico que pode estimar o comportamento das variações no ganho dos amplificadores com relação a sua potência de entrada e, indiretamente, com a dinâmica do tráfego na rede. Um algoritmo de atribuição de rota e comprimento de onda que leva em conta efeitos da camada física também foi implementado para avaliar o impacto das variações de ganho dos amplificadores sobre o desempenho da rede.

Palavras-chave—Redes óticas transparentes, Amplificadores óticos, Algoritmos RWA.

Abstract—This paper presents a study regarding the benefits of dealing with the Erbium-Doped Fiber Amplifier (EDFA) gain saturation problem on the performance of a transparent optical network. An analytical model to estimate the behavior of the EDFA gain variation considering amplifier input power and global network traffic was developed. An Impairment Aware Routing and Wavelength Assignment algorithm (IA-RWA) was also proposed as a form to evaluate the impact of the amplifiers gain saturation on the performance of the dynamic optical network.

Keywords—Transparent optical networks, Optical amplifiers, RWA algorithms.

I. INTRODUÇÃO

Caso o tráfego continue crescendo no ritmo atual, com o surgimento e consolidação aplicações como vídeo sob demanda, o esquema de eletrônica tradicional usada nos roteadores no núcleo da rede pode ser tornar um limitante para o crescimento da internet [1], [2]. Isto acontece não somente por causa da necessidade de altas taxas de transmissão, as quais podem ser inviáveis de serem realizadas pela eletrônica; mas também por causa do significativo consumo de energia que este roteadores podem empregar [1]. Redes Óticas Transparentes (TON – *Transparent Optical Networks*) usando Multiplexação por Divisão em Comprimento de Onda (WDM – *Wavelength Division Multiplexing*) tem sido encarado com uma estratégia interessante para resolver ambos os problemas [3], [4].

Todavia, apesar de todo o avanço alcançado nestes últimos anos, ainda existem desafios a serem vencidos para a implementação em massa de TON's e, conseqüentemente, o uso eficiente dos recursos destas redes [5]. Por exemplo, em uma TON com amplificadores óticos a fibra dopada com Érbium (EDFA – *Erbium-Doped Fiber Amplifier*), a admissão de uma nova conexão na rede pode causar flutuações na Taxa de Erro de Bits (BER – *Bit Error Rate*) dos caminhos óticos já presentes na rede. Essas flutuações ocorrem devido ao efeito de saturação dos EDFA's, o qual causa variações nos ganhos dos amplificadores, afetando a potência das conexões e, conseqüentemente, a relação sinal ruído ótica (OSNR - *Optical*

Signal Noise Rate) e, portanto, a BER destas conexões. Perceba que o efeito de saturação dos EDFA's funciona da mesma forma que um efeito não-linear em uma rede ótica. Ou seja, a admissão de uma conexão causa interferência em outras conexões já presentes na rede, portanto o seu tratamento no processo de admissão de conexões na rede possui considerável complexidade computacional [6].

Recentemente, algoritmos de atribuição de rota e comprimento de onda (RWA – *Routing and Wavelength Assignment*) mais sofisticados, denominados RWA conscientes de limitações da camada física (IA-RWA – *Impairment Aware RWA*), que levam em conta os efeitos da camada física têm sido estudados [7] – [16]. Em [7] – [10] a influência do Ruído de Emissão Espontânea (ASE – *Amplified-Spontaneous Emission*) de amplificadores óticos sobre a BER em uma TON foi investigada. Entretanto, o efeito da saturação de amplificadores tem sido pouco estudado [9]. Estratégias para minimizar o impacto de efeitos não-lineares, como Mistura de Quatro Ondas e Modulação (FWM – *Four-wave Mixing*) de Fase Cruzada (XPM – *Cross Phase Modulation*), sobre a qualidade de transmissão (QoT – *Quality of Transmission*) em uma TON, foram apresentadas em [11] – [14]. Em [15] – [16] foi averiguado o impacto do efeito de Dispersão de Modo de Polarização (PMD – *Polarization Mode Dispersion*).

O objetivo deste trabalho é estudar o impacto que o efeito de saturação dos EDFA's, o qual também pode ser entendido como um efeito de variação de ganho dos amplificadores, tem sobre uma TON. Para isso é proposto um modelo analítico que pode estimar o comportamento da variação do ganho dos EDFA's com relação a sua potência de entrada e, de maneira indireta, com a dinâmica do tráfego na rede. Além disso, foi implementado um algoritmo IA-RWA que leva em conta, no processo de admissão de uma conexão na rede, o efeito da saturação dos EDFA's. Os resultados das simulações numéricas apontam que o desempenho da rede pode ser melhorado se um controle das variações de ganho na rede é empregado. Foi também verificado que o modelo analítico apresentado captura de maneira satisfatória o comportamento das variações de ganho dos EDFA's.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. Na Seção II o efeito da saturação dos amplificadores é discutido. A Seção III mostra a proposta de um algoritmo IA-RWA com uma estratégia para cômputo das variações de ganho dos EDFA's. Na seção IV são discutidos os resultados das simulações numéricas e a Seção V traz as conclusões e proposta de trabalhos futuros.

II. VARIAÇÃO DE GANHO (SATURAÇÃO) EM EDFA'S

A. O ganho do EDFA

A Figura 1 plota o ganho do amplificador em função da potência de entrada em um EDFA típico. Observa-se que, para baixas potências de entrada, o ganho do amplificador é seu ganho linear. Para altas potências de entrada, o ganho tenderá a um ($G \rightarrow 1$), de forma que a potência de saída do amplificador será igual à potência de entrada ($P_{out} = P_{in}$). A Figura 1 possui algumas informações necessárias à compreensão do leitor. Observe que a marca do limiar na Figura 1 delimita a região de variação brusca do ganho. Na Subseção II.b este comportamento será analisado analiticamente, através do cálculo da derivada do ganho em função da potência de entrada (detalhe apresentado na Figura 1). O ganho de um EDFA pode ser expresso pela seguinte equação [17]

$$G = 1 + \frac{P_{sat}}{P_{in}} \ln \left(\frac{G_{max}}{G} \right), \tag{1}$$

em que, P_{sat} é a potência de saturação do amplificador, G_{max} é o ganho insaturado e P_{in} é a potência de entrada do amplificador, ou seja, a soma referente aos canais acoplados ao amplificador.

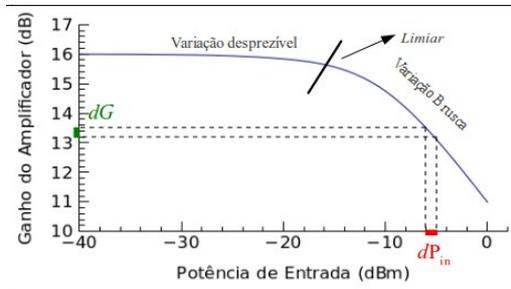


Fig. 1. Ganho de um EDFA típico.

B. O problema

O problema da variação do ganho de EDFA's em uma rede ótica pode ser explicado como segue. Considere uma rede, cujo estado inicial é composto somente pela conexão que ocupa o comprimento de onda Λ_1 , de acordo com a Figura 2 (a). Agora, considere que uma nova conexão é admitida no comprimento de onda Λ_2 , e que essa conexão compartilha um enlace (L_{25}) com a primeira. Como as duas conexões compartilham o mesmo amplificador (A_{25}^1), o seu ganho tende a diminuir devido ao aumento da potência de entrada no amplificador. Isso significa que a potência de saída nesse mesmo amplificador para a conexão em Λ_1 não é mais a mesma. Dessa maneira, todos os amplificadores que sucederem o amplificador A_{25}^1 no caminho da conexão em Λ_1 terão seus ganhos alterados, e.g., o amplificador A_{58}^1 , que mesmo não estando na rota na qual a nova conexão foi admitida, terá seu ganho alterado. O problema de variação de ganho também pode ocorrer quando uma conexão é retirada da rede, ou seja, se fosse considerado que o caminho ótico no comprimento de onda Λ_2 fosse retirado.

Outro problema com relação à variação do ganho é ilustrado através da Figura 2(b). Suponha que exista uma conexão admitida em Λ_1 e que seu caminho ótico passe através dos enlaces $L_{87} - L_{74} - L_{41} - L_{12}$. A condição de looping ocorre quando uma nova conexão admitida, em Λ_2 por exemplo, compartilhar quaisquer dois enlaces não consecutivos. Como exemplo, admita que o sentido da conexão em Λ_2 é $L_{12} - L_{25} -$

$L_{58} - L_{87}$. Dessa maneira, os enlaces L_{12} e L_{87} serão compartilhados; L_{12} e L_{87} como primeiro e último enlace, respectivamente, da conexão admitida em Λ_2 e, L_{87} e L_{12} como primeiro e último enlace, respectivamente, da conexão

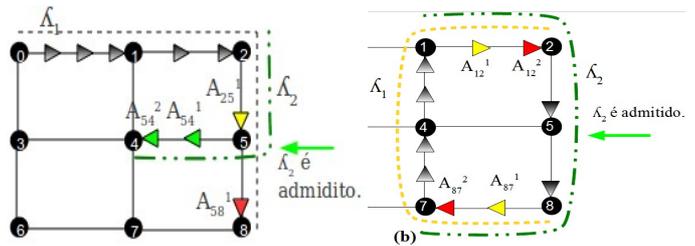


Fig. 2. Alterações nos ganhos dos EDFA's ao admitir conexões.

admitida em Λ_1 . O grande problema nessa situação é que ao admitir a conexão em Λ_2 , o amplificador A_{12}^1 sofrerá diminuição do ganho afetando portanto a potência que entra no amplificador A_{12}^2 do mesmo enlace (análogo ao esquema apresentado na Figura 2(a)). O problema maior nessa situação é a partir do outro enlace (L_{87}), cujo amplificador A_{87}^1 também sofrerá alteração em seu ganho, mas dessa vez devido à conexão em Λ_2 . Com o ganho do amplificador A_{87}^1 sendo alterado, todos os demais amplificadores que seguem a conexão em Λ_1 também serão alterados. Como o fim da conexão em Λ_1 coincide com o início da conexão em Λ_2 , todo o ciclo se inicia novamente.

Atente para o fato de que os problemas discutidos anteriormente não possuem o foco somente no nível da simulação computacional. Tais problemas também ocorrem na rede real, mas os próprios amplificadores se estabilizam e a rede entra em estado de equilíbrio depois de um dado tempo, quando uma conexão entra ou sai da rede. Todavia, essa instabilidade momentânea pode levar a perda da informação que está trafegando pela rede no momento da instabilidade. Em simuladores computacionais, esse tipo de problema precisa ser levado em consideração para que os resultados obtidos na simulação sejam o mais próximo possível de uma rede ótica real. Além disso, analisando-se esse problema em uma simulação numérica, pode-se apontar uma solução que minimize o impacto das variações de ganho dos amplificadores.

C. Modelagem Matemática

À primeira vista, somos tentados a crer que quando o tráfego na rede estiver alto, a variação do ganho nos amplificadores será grande, já que quanto maior o tráfego, maior o número de conexões passando pelos amplificadores e, portanto, maior a potência de entrada. Calculando-se a derivada do ganho em função da potência de entrada, pode-se obter informações sobre o comportamento da variação do ganho do EDFA com relação à potência de entrada.

Note que a variável G está presente em ambos os lados da igualdade (1), significando portanto que esta é uma equação transcendental; ou seja, G está em função de P_{in} e do próprio G . Assim, para o cálculo da derivada, foi utilizado o método de derivação de funções implícitas [18], o qual pode ser expresso por

$$\frac{\partial G}{\partial P_{in}} = - \frac{\frac{\partial f(G, P_{in})}{\partial P_{in}}}{\frac{\partial f(G, P_{in})}{\partial G}} \quad (2)$$

A resolução da derivada foge do escopo deste trabalho. Portanto, a equação (3) mostra apenas o resultado final do cálculo da derivada.

$$\frac{\partial G}{\partial P_{in}} = \frac{-GP_{sat} \ln\left(\frac{G_{max}}{G}\right)}{GP_{in}^2 + P_{sat} P_{in}} \quad (3)$$

Perceba que a variação do ganho diminui com o quadrado da potência de entrada do EDFA. Dessa forma, pode-se esperar que quando a rede opera com alto tráfego, ou seja, quando potência de entrada dos EDFA's é maior, a instabilidade causada pela variação do ganho do EDFA diminuirá.

III. IA-RWA

Com o objetivo de avaliar o impacto da variação de ganho dos EDFA's sobre uma rede ótica dinâmica, dois algoritmos RWA foram implementados.

A. IA-RWA em uma rede com saturação de EDFA

O algoritmo IA-RWA que está sendo proposto nesse trabalho avalia a probabilidade de bloqueio de conexões não somente em função da continuidade, mas também em função de uma métrica de QoT pré estabelecida. Dessa maneira, se uma requisição necessitar de um dado nível de QoT, ela será admitida se e somente se: (a) ela não for bloqueada pela restrição da continuidade; (b) se ela possuir um nível de QoT igual ou superior ao nível de QoT solicitado na requisição; e (c) se a nova conexão não violar a qualidade das conexões já presentes na rede. Na realidade, os quesitos (b) e (c) poderiam ser fundidos em um só, uma vez que eles não podem ser medidos separadamente devido à saturação de EDFA's ser um efeito não-linear. Destarte, a nova conexão precisa ser estabelecida temporariamente para poder avaliar o comportamento dela e das outras conexões previamente estabelecidas.

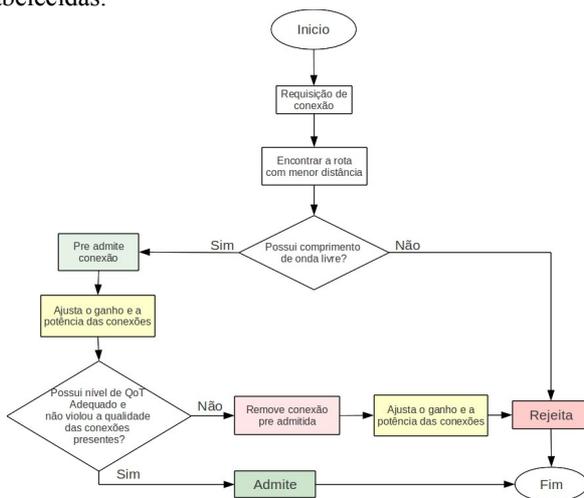


Fig. 3. IA-RWA que leva em conta a saturação de EDFA's.

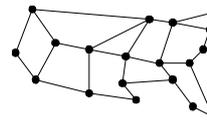


Fig. 4. Rede utilizada nas simulações

A Figura 3 apresenta o fluxograma do algoritmo proposto. Como pode ser observado, primeiramente é gerada uma requisição de conexão, depois é encontrada a rota considerando o menor caminho, em que o custo do enlace é a distância em quilômetros. Em seguida, o algoritmo realiza o teste da continuidade utilizando a heurística *First Fit* [19]. Nesse ponto, se não existir comprimento de onda livre, a conexão é imediatamente rejeitada. Em caso contrário, a conexão é pré admitida apenas para ser computado o QoT e em seguida é averiguado se tal conexão não interferiu de forma a degradar as conexões já estabelecidas na rede. Em caso positivo, a conexão deve ser retirada e rejeitada. Senão, a conexão é finalmente admitida. Observe também que, como mostrado no fluxograma, são ajustados o ganho e a potência das conexões logo que a conexão é pré admitida (e caso ela seja rejeitada). Pois, como foi visto na Seção II, o ganho do EDFA depende da potência de entrada total e essa atualização se faz necessária para se obter resultados coerentes com simulações na rede ótica real.

B. RWA Cego

Foi implementado também um algoritmo RWA Tradicional, também chamado de RWA Cego [6]. Note que ele é bem mais simples em relação ao IA-RWA e não verifica o QoT das conexões; simplesmente as admite caso encontre um caminho ótico disponível. RWA Cego usa roteamento baseado na menor distância em quilômetros e atribuição de comprimentos de onda usando o algoritmo *First-Fit*.

IV. RESULTADOS

A. Ambiente de simulação

Através de um ambiente de simulação, utilizando a linguagem de programação C e C++, foi simulado um cenário dinâmico, no qual foram geradas 1000000 requisições de conexões que possuem um padrão de tráfego uniforme entre os nós da rede e seguem uma distribuição poissoniana tendo duração com distribuição exponencial (média = 1s). A Rede Ótica utilizada é transparente, ou seja, não possui conversão ótica-elétrica-ótica, e possui 19 nós. Todos os enlaces são bidirecionais e têm comprimento variando entre 240 e 480 km. O comprimento de um *span*, ou seja, a distância entre dois amplificadores óticos é de 80 km. É utilizado um conjunto de $W=16$ comprimentos de onda em uma rede ótica sem conversão de comprimento de onda. A topologia da rede simulada é ilustrada na Figura 4. Foram feitas simulações com taxas de transmissão de 10 e 40 Gbps. O algoritmo IA-RWA utiliza $BER_{TH}=10^{-12}$ como critério de QoT para admitir ou rejeitar requisições de conexões na rede. A partir dos parâmetros apresentados na Tabela 1, a quantidade de conexões rejeitadas dentre o número total de pedidos de conexões que chegam na rede ótica é a Probabilidade de Bloqueio da rede.

Foi utilizada uma nova métrica que consiste basicamente em computar a variação média do ganho toda vez que uma

conexão entra e/ou sai da rede. Pois, como dito anteriormente, a variação do ganho é totalmente dependente da potência de entrada do amplificador ótico e, como as conexões chegam dinamicamente, a potência de entrada tende a variar intensamente. O ΔG_j é a média da variação do ganho referente à conexão que entra e/ou sai da rede, com ou sem atualizações dos ganhos dos amplificadores, e pode ser obtida por

$$\Delta G_j = \frac{\sum_{i=0}^A \Delta G_j^i}{A}, \quad (4)$$

em que, ΔG_j^i é variação do ganho do i-ésimo amplificador, j é o número de atualizações dos ganhos dos amplificadores e A é o número de amplificadores que sofrem variação de ganho durante a chegada ou saída de uma conexão. Note que A pode ser incrementado em mais de um. Para isso, basta que a conexão que entra (ou que sai) cause variação do ganho em mais de um enlace/amplificador. Note ainda que ΔG_0 , i.e para $j=0$, é a variação de ganho sem atualização dos amplificadores; ΔG_1 , i.e para $j=1$, é a variação de ganho após uma atualização dos ganhos dos amplificadores, e assim por diante.

TABELA I. PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO

Parâmetro	Valor
Forma do bloqueio	Continuidade + QoT
Tipo de roteamento	Fixo
BER _{TH}	10 ⁻¹²
Atenuação da fibra	0,2 dB/km
Potência (P)	0 dBm
Ganho máximo do amplificador (G _{max})	16 dB
Potência de saturação (P _{sat})	10 dBm
Fator de emissão espontânea do amplificador (N _{sp})	4
Largura de banda do filtro ótico	50 GHz
Largura de banda do filtro elétrico	Taxa de Bits x 0,8

B. Análise da variação de ganho

As Figuras 5a-5b ilustram o resultado obtido da simulação com relação à variação do ganho inicial (G0) e após duas atualizações dos ganhos dos amplificadores e potência das conexões (G1 e G2). São considerados os algoritmos RWA-Cego e IA-RWA em uma rede operando a uma taxa de transmissão de 40 Gbps. Os resultados para 10 Gbps são semelhantes aos de 40 Gbps, portanto não são apresentados aqui. Como pode ser observado, o G0 se manteve praticamente o mesmo e seu comportamento pode ser capturado através da Equação 3. Quando o tráfego está baixo, a variação é maior e, à medida que o tráfego vai aumentando, a variação do G0 tende a diminuir de forma inversamente proporcional a potência de entrada no amplificador. Observe que, embora não esteja

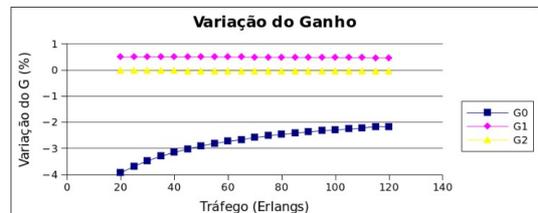
explícito a potência de entrada nos gráficos, entende-se que, quando o tráfego está intenso, a rede possui muitas conexões que permanecerão mais tempo na rede. Dessa maneira, conclui-se que, se o tráfego está baixo, significa que a potência de entrada nos amplificadores também está baixa, em caso contrário, se o tráfego estiver alto, a potência de entrada dos amplificadores também estará alta.

Mesmo que a variação do ganho diminua quando o tráfego está alto, faz-se necessário atualizar o ganho e a potência de entrada para que todas as conexões presentes na rede entrem em estado de equilíbrio, i.e., passem a “enxergar” o mesmo ganho. Esse comportamento foi capturado pelo G1, primeira atualização, e pelo G2, segunda atualização, ilustrado nas Figuras 5a – 5d. Note que foram necessárias duas atualizações para que a variação do ganho passasse a ser desprezível e garantir que as conexões presentes na rede fossem equilibradas.

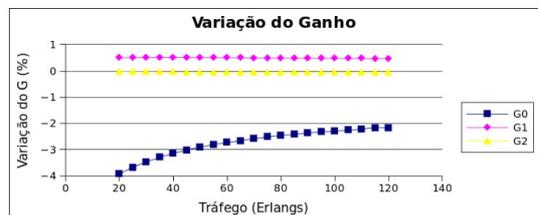
C. Benefícios para o desempenho da rede

Para ilustrar os benefícios que o processo de atualização de ganho dos EDFA’s pode trazer para o desempenho da rede, foram analisados cenários de rede com e sem atualização de ganho; e operando com os algoritmos IA-RWA e RWA-Cego e com taxas de transmissão de 10 e 40 Gbps.

As Figuras 6a – 6d mostram os resultados comparativos do IA-RWA proposto com o RWA-Cego, o qual serve apenas como referencial, já que não bloqueia conexões sem QoT. Ou seja, é possível que quando a rede opera com o algoritmo RWA-Cego, conexões sem QoT, ou seja com BER > 10⁻¹², podem ser admitidas na rede. Perceba que, nos cenários nos quais usa-se a atualização dos ganhos, o desempenho da rede melhorou. Por exemplo, comparando as Figuras 6c e 6d, verifica-se uma redução de aproximadamente 20% na probabilidade de bloqueio da rede quando o tráfego é algo (e.g. 100 Er), passando de 0,27 para 0,22. Melhora similar no desempenho acontece quando a rede opera a 10 Gbps, Figuras 6a e 6b. Note que quanto maior é a taxa de transmissão da rede, maior é a melhoria no seu desempenho.



a)



b)

Fig. 5. Variação do ganho em simulações sem atualizações (G0) e com uma e duas atualizações de ganho (G1 e G2) para 40 Gbps. a) RWA-Cego; b) IA-RWA.

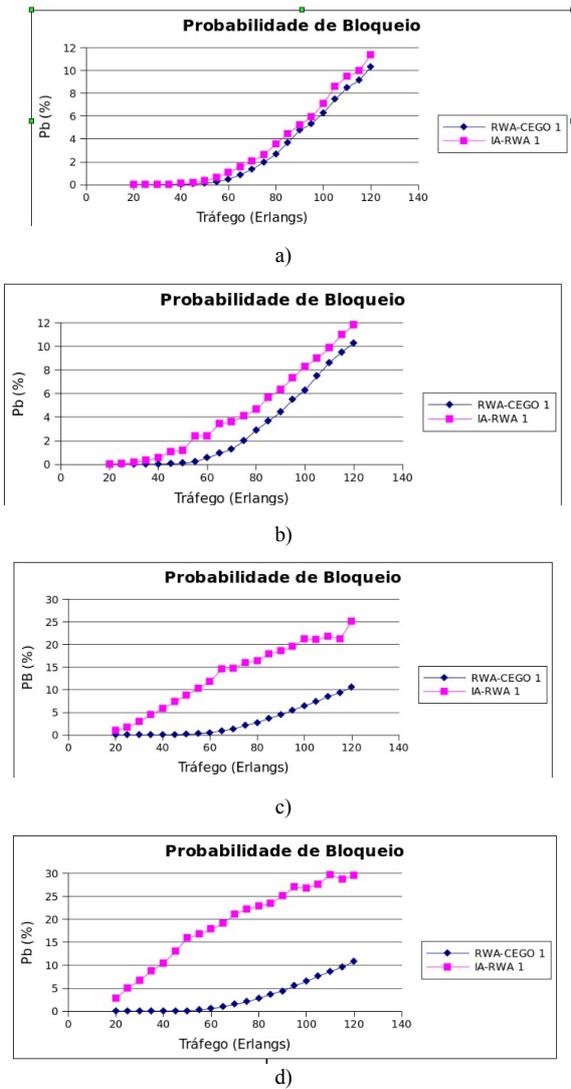


Fig. 6. Probabilidade de bloqueio em cenários sem e com atualização de ganho. a) 10 Gbps com atualização; b) 10 Gbps sem atualização; c) 40 Gbps com atualização; d) 40 Gbps sem atualização.

V. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou um estudo sobre benefícios que a eliminação das variações do ganho dos EDFA's pode trazer para o desempenho de uma rede ótica. Para que o ganho dos EDFA's não sofra variações, amplificadores óticos equipados com controle automático de ganho podem ser utilizados na rede [20]. Os resultados das simulações numéricas sugerem que o desempenho da rede pode ser melhorado com a eliminação das variações do ganho dos amplificadores. Como trabalhos futuros serão investigadas outras possibilidades de IA-RWA e a possibilidade de redução no número de amplificadores equipados com controle automático de ganho.

REFERÊNCIAS

[1] H. Harai, "Optical Packet & Path Integration for Energy Savings toward New Generation Network", in *Proc. IEEE SAINT 2008*, pp. 389 – 392, August 2008.

[2] M. L. F. Abbade, J. D. Marconi, R. L. Cassiolato, V. Ishizuca, I. E. Fonseca, and H. L. Fragnito, "Field-Trial Evaluation of Cross-Layer Effect Caused by All-Optical Wavelength Converters on IP Network Applications", *aceito para o IEEE/OSA J. Lighthwave Technology* que será publicado em junho/2009.

[3] I. Tomkos, S. Azodolmolky, D. Klonidis, M. Aggelou, M. Margariti, "Dynamic impairment aware networking for transparent mesh optical networks: Activities of EU project DICONET", in *Proc. 10th IEEE IC-TON 2008*, pp. 6 – 12, June 2008.

[4] M. Yuang, I. Chao, Bird Lo, P. Tien, W. J. Chen, Yu-min Lin, S. S. W. Lee, and Ching-yun Chien, "HOPSMAN: An Experimental Testbed System for a 10-Gb/s Optical Packet-Switched WDM Metro Ring Network", *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, pp. 158 – 166, July 2008.

[5] R. Ramaswami, "Optical Networking Technologies: What Worked and What Didn't", *IEEE Communications Magazine*, pp. 132 – 139, Sept. 2006.

[6] I. E. Fonseca, "Uma abordagem para Aprovisionamento e Diferenciação de QoS Óptico na Presença de FWM em Redes Ópticas Transparentes", Tese de Doutorado, FEEC/Unicamp, Abril 2005.

[7] B. Ramamurthy, et al., "Impact of transmission impairments on the teletraffic performance of wavelength-routed optical networks," *IEEE/OSA J. Lighthwave Technology*, vol. 10. pp. 1713-1723, Oct. 1999.

[8] J. F. Martins-Filho, C. J. A. Bastos-Filho, E. A. J. Arantes, S. C. Oliveira, L. D. Coelho, J. P. G. Oliveira, R. G. Dante, E. Fontana, F. D. Nunes, "Novel Routing Algorithm for Transparent Optical Networks Based on Noise Figure and Amplifier", in *Proc. IEEE IMOC2003*, Sept 2003.

[9] T. Deng, S. Subramaniam, "Source Power Management in Transparent Wavelength-Routed Mesh Networks", in *Proc. IEEE ICC'04*, Jun 2004.

[10] M. A. C. Lima, A.F.R. Araújo, A.C César, "Agregação Dinâmica de Tráfego em Redes Ópticas WDM Utilizando Algoritmo Genético", in *Proc. MOMAG'04*, Aug 2004.

[11] I. E. Fonseca, M. R. N. Ribeiro, R. C. Almeida Jr., and H. Waldman, "Preserving Global Optical QoS in FWM Impaired Dynamic Networks", *IEE Electronics Letters*, Vol. 40, pp. 191-192, Feb 2004.

[12] I. E. Fonseca, M. R. N. Ribeiro, R. C. Almeida Jr., and H. Waldman, "Meeting Optical QoS in Dynamic Networks with Reduced Complexity", in *Proc. IEEE ECOC'04*, Sept 2004.

[13] Raul C. Almeida Jr., Divanilson R. Campelo, Adolfo V. T. Cartaxo, Kenneth M. Guild, and Helio Waldman, "Efficient Wavelength Assignment Policy for XPM-Impaired WDM Networks", *IEEE Communication Letters*, vol. 12, pp. 791 – 793, Oct. 2008.

[14] U. S. P. Filho, M. R. N. Ribeiro, C. P. Maioli, M. Freitas, and I. E. Fonseca, "Cost functions for cac/rwa in dynamic optical networks under gvd, spm and xpm", *Journal of Microwave and Optoelectronics*, vol. 6, pp. 249–262, jun. 2007.

[15] A. F. Gomes, C. E. M. Fernandes, V. A. P. Oliveira, I. E. Fonseca, "Estratégia de Roteamento em Algoritmos IA-RWA para Redes Ópticas – Uma avaliação da Dispersão de Modo de Polarização," in *Proc. SBRT 2009*, Blumenau-SC, Sept. 2009.

[16] M. Ali, L. Tancevski, "Impact of Polarization-Mode Dispersion on the Design of Wavelength-Routed Networks", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 14, pp. 720-722, May 2002.

[17] R. Ramaswami, K.N. Sivarajan, "Optical networks: a practical perspective", Academic Press, Third Edition, 2010.

[18] H. L. Guidorizzi, "Um curso de cálculo", LTC, Rio de Janeiro, LTC, 2008.

[19] H. Zang, J. P. Jue, and B. Mukherjee, "A Review of Routing and Wavelength Assignment Approaches for Wavelength-Routed Optical WDM Networks", *SPIE Optical Network Magazine*, Vol. 1, pp. 47-60, Dec 2000.

[20] J. C. R. F. Oliveira, "Amplificadores Ópticos com Controle Automático de Ganho para Aplicação em Redes Ópticas", Tese de Doutorado, FEEC/Unicamp, 2007.