

# Análise de desempenho de redes óticas dinâmicas equipadas com EDFA's com saturação de ganho

Victor A. P. Oliveira<sup>1</sup>, Iguatemi E. Fonseca<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Semi-Árido (UFERSA)  
Av. Francisco Mota, 572 – 59.625-900 – Mossoró – RN – Brasil

victorcactusti@gmail.com, iguatemi@ufersa.edu.br

**Abstract.** *This paper presents a study about benefits that the elimination of EDFA gain saturation may have on the performance of a Transparent Optical Network. It is developed an analytical model to estimate the behavior of the EDFA gain variation considering amplifier input power and global network traffic. Impairment Aware RWA algorithm (IA-RWA) is also proposed as a form to evaluate the impact of the amplifiers gain saturation on the performance of the dynamic optical network.*

**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.*

## 1. Introdução

Caso o tráfego continue crescendo no ritmo atual, com o surgimento e a consolidação de aplicações como vídeo sob demanda, o esquema de eletrônica tradicional usada nos roteadores no núcleo da rede pode se tornar um limitante para o crescimento da internet (Harai 2008)-(Abbade et al. 2009). 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 estes roteadores podem empregar (Harai 2008). Redes Óticas Transparentes (TON – Transparent Optical Networks) usando Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda (WDM – Wavelength Division Multiplexing) tem sido encarado como uma estratégia interessante para resolver ambos os problemas (Tonkos et al. 2008)-(Yuang et al. 2008).

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 (Ramaswami 2006). 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 (Fonseca 2005).

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 (Ramamurthy 1999)-(Martins-Filho et al. 2003)-(Deng and Subraminiam 2004)-(Lima et al. 2004)-(Fonseca et al. 2004)-(Fonseca et al. B 2004)-(Raul et al. 2008)-(Filho et al. 2007)-(Gomes et al. 2009) e (Ali and Tancevski 2002). Em (Ramamurthy 1999)-(Martins-Filho et al. 2003)-(Deng and Subraminiam 2004)-(Lima et al. 2004) a influência do Ruído de Emissão Espontânea (ASE – *Amplified-Spontaneous Emission*) de amplificadores ópticos sobre a BER em uma TON foi investigada. Entretanto, o efeito da saturação de amplificadores tem sido pouco estudado (Deng and Subraminiam 2004). 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 (Fonseca et al. 2004), (Fonseca et al. B 2004), (Raul et al. 2008) e (Filho et al. 2007). Em (Gomes et al. 2009) e (Ali and Tancevski 2002) 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 o 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 o cômputo das variações de ganho dos EDFA's. Na seção IV são apresentados o ambiente de simulação, métricas de desempenho e discutidos os resultados das simulações numéricas. A Seção V traz as conclusões e proposta de trabalhos futuros.

## 2. Saturação de Amplificadores óticos EDFA's

### 2.1. Comportamento do ganho

A Figura 1 mostra 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 insaturado. 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 2.3 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 (Ramaswami and Sivarajan 2010)

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

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 da potência proveniente de todas as conexões.

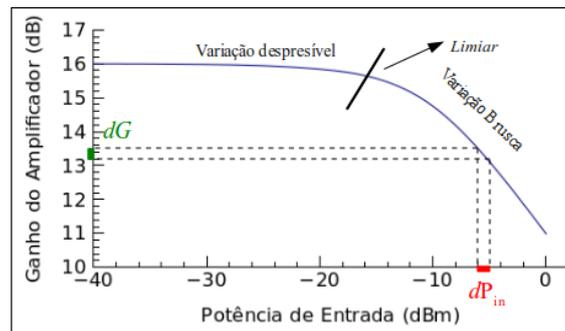
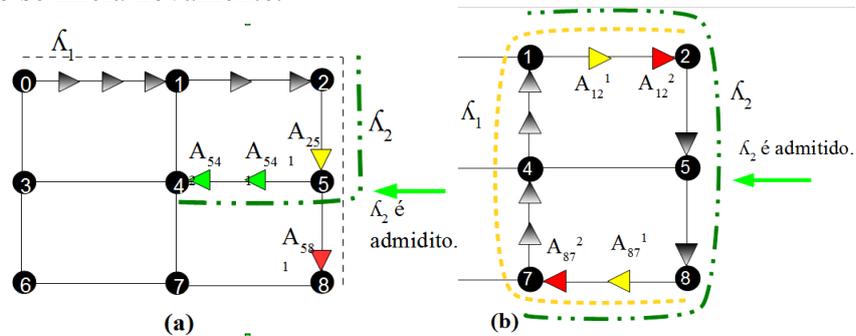


Figura 1: Ganho de um EDFA típico.

### 2.2. O problema da variação de ganho

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  $\lambda_1$ , de acordo com a Figura 2 (a). Agora, considere que uma nova conexão é admitida no comprimento de onda  $\lambda_2$ , 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  $\lambda_1$  não é mais a mesma. Dessa maneira, todos os amplificadores que sucederem o amplificador  $A_{25}^1$  no caminho da conexão em  $\lambda_1$  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 da 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  $\lambda_2$  fosse retirado.

Outro problema com relação à variação do ganho é ilustrado através da Figura 2(b). Suponha que exista uma conexão admitida em  $\lambda_1$  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  $\lambda_2$  por exemplo, compartilhar quaisquer dois enlaces não consecutivos. Como exemplo, admita que o sentido da conexão em  $\lambda_2$  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  $\lambda_2$  e,  $L_{87}$  e  $L_{12}$  como primeiro e último enlace, respectivamente, da conexão admitida em  $\lambda_1$ . O grande problema nessa situação é que ao admitir a conexão em  $\lambda_2$ , 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  $\lambda_2$ . Com o ganho do amplificador  $A_{87}^1$  sendo alterado, todos os demais amplificadores que seguem a conexão em  $\lambda_1$  também serão alterados. Como o fim da conexão em  $\lambda_1$  coincide com o início da conexão em  $\lambda_2$ , todo o ciclo se inicia novamente.



**Figura 2: Alterações nos ganhos dos EDFA's ao admitir conexões.**

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.

### 2.3. 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 (Guidorizzi 2008), 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. Isso é confirmado nas simulações apresentadas na Seção 4.

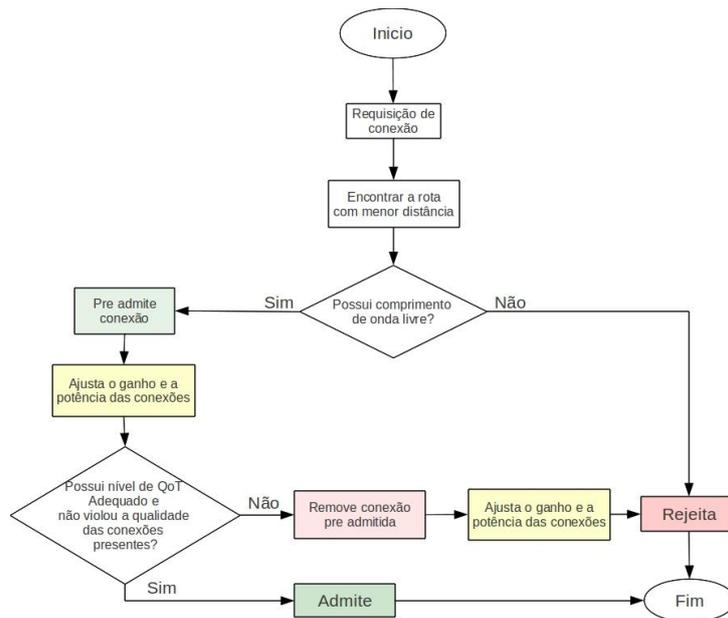
### 3. IA-RWA's

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

#### 3.1 IA-RWA em uma rede com saturação de EDFA's

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 QoS pré estabelecida. Dessa maneira, se uma requisição necessitar de um dado nível de QoS, ela será admitida se e somente se: (a) ela não for bloqueada pela restrição da continuidade; (b) se ela possuir um nível de QoS igual ou superior ao nível de QoS 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 integrados 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.

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 (Zang et al. 2000). 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 QoS e em seguida é averiguado se tal conexão não interferiu de forma a degradar as conexões já estabelecidas na rede. Em caso positivo, a



**Figura 3: IA-RWA que leva em conta a saturação de EDFA's.**

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 2, 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.

### 3.2 RWA Tradicional

Foi implementado também um algoritmo RWA Tradicional, também chamado de RWA Cego (Fonseca 2005). Note que ele é bem mais simples em relação ao IA-RWA e não verifica o QoT da 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*.

## 4. Simulações Numéricas

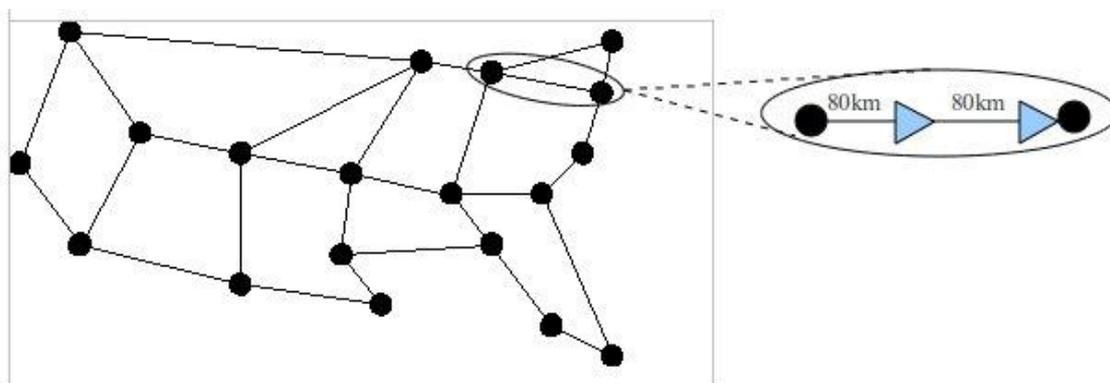
### 4.1. Ambiente de Simulação

Através de um ambiente de simulação implementado em C/C++ pelos próprios autores, foi simulado um cenário dinâmico, no qual foram geradas 100000 requisições de conexões. Tais conexões 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 (NFSNET-2 – modelo real da rede ótica americana, bastante usada na literatura) e detalhe de posicionamento dos amplificadores são ilustrados 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.

**Tabela 1: 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



**Figura 4: Rede com 19 nós usada nas simulações com detalhe de amplificadores.**

## 4.2. Métricas de desempenho

Neste trabalho foram utilizadas quatro métricas para avaliar o desempenho de uma rede ótica operando com os algoritmos RWA Tradicional e IA-RWA: i) a variação do ganho dos EDFA's; ii) Probabilidade de violação de limiar da QoT (TVP); iii) Probabilidade de violação crítica da QoT (CVP); iv) Probabilidade de bloqueio.

### 4.2.1 Variação do ganho dos EDFA's

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  $\Delta G_j$  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,  $\Delta G_j^i$  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  $\Delta G_0$ , i.e. para  $j=0$ , é a variação de ganho sem atualização dos amplificadores;  $\Delta G_1$ , i.e. para  $j=1$ , é a variação de ganho após uma atualização dos ganhos dos amplificadores, e assim por diante.

#### 4.2.2 Probabilidade de violação de limiar

A probabilidade de violação do limiar (TVP – *Threshold Violation Probability*) significa a probabilidade de pelo menos uma conexão ativa em toda a rede ter a sua BER acima do  $BER_{TH}$  após a mudança do estado de um caminho ótico na rede, i.e. após a ativação ou encerramento de uma conexão na rede (Fonseca 2005). Esta métrica pode ser expressa como: seja  $p_x = Prob\{X=x\}$  a probabilidade de se ter  $x=0,1,2,\dots$  conexões ativas com sua BER acima do máximo permitido depois que uma conexão é estabelecida ou encerrada na rede. O TVP representa a probabilidade de que pelos menos uma conexão ativa ser degradada, i.e.  $TVP = [1 - p_0]$ , com  $x=0$ . O TVP pode ser útil para dar uma representatividade global de QoT na rede, pois provê uma medida de preservação e fornecimento de QoT estatístico. QoT determinístico é atingido à medida que  $TVP \rightarrow 0$ , em outras palavras, o processo de estabelecimento e encerramento de conexões nunca violaria o OSNR de outras conexões ativas na rede inteira (além de satisfazer a sua própria exigência de qualidade).

#### 4.2.3 Probabilidade de violação crítica

Com o objetivo de monitorar degradações excessivas da BER, é utilizada a Probabilidade de Violação Crítica (CVP – *Critical Violation Probability*). CVP é uma métrica similar ao TVP, mas com  $BER_{TH}$  igual a  $10^{-3}$  para todos os caminhos óticos e de acordo com métricas já definidas para o SDH por meio do Defeito por Erro Excessivo (dEXC – *Excessive Error Defect*) em ITU-T G.806 (ITU-T 2000). Considera-se que CVP deve ser menor do que 0,01% para que os mecanismos de proteção e restauração da rede não sejam ativados com muita frequência.

#### 4.2.4 Probabilidade de bloqueio

Uma das métricas que é utilizada para medir o desempenho dos algoritmos propostos é a probabilidade de bloqueio da rede, a qual representa o número de caminhos óticos rejeitados perante o número total de requisições de caminhos óticos que chegam à rede

ótica. A probabilidade de bloqueio é a métrica mais utilizada na literatura para avaliar o desempenho de algoritmos RWA em redes óticas dinâmicas.

### 4.3. Análise da variação de ganho

As Figuras 5a-5b ilustram o resultado obtido da simulação com relação à variação do ganho inicial ( $G_0$ ) e após duas atualizações dos ganhos dos amplificadores e potência das conexões ( $G_1$  e  $G_2$ ). 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  $G_0$  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 aumenta, a variação do  $G_0$  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.

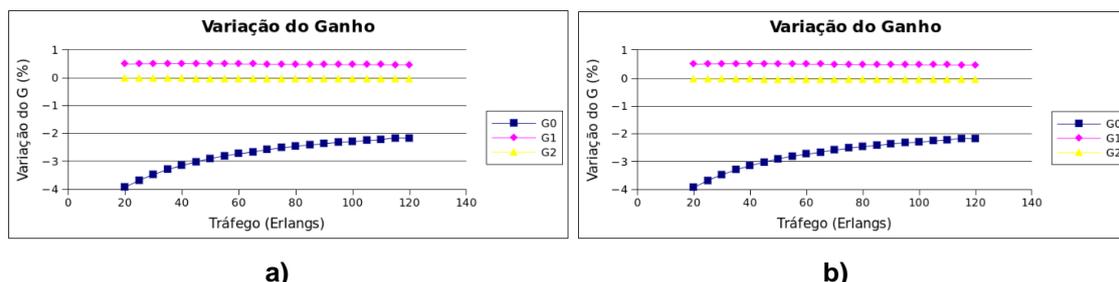


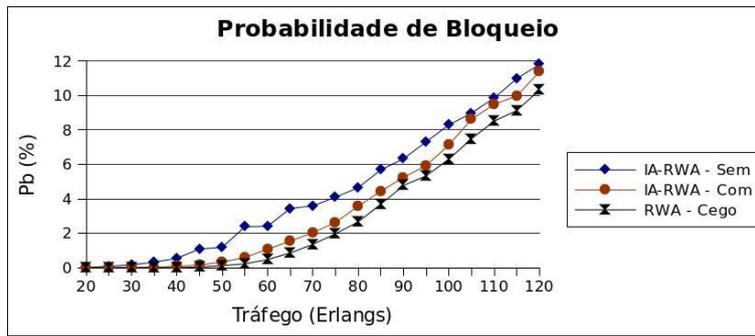
Figura 5: Variação do ganho em simulações sem atualizações ( $G_0$ ) e com uma e duas atualizações de ganho ( $G_1$  e  $G_2$ ) para 40 Gbps. a) RWA-Cego; b) IA-RWA.

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  $G_1$ , primeira atualização, e pelo  $G_2$ , segunda atualização, ilustrado nas Figuras 5a – 5b. Note que foram necessárias duas atualizações para que a variação do ganho passasse a ser desprezível e garantir que os ganhos dados pelos EDFA’s às conexões presentes na rede fossem equilibrados.

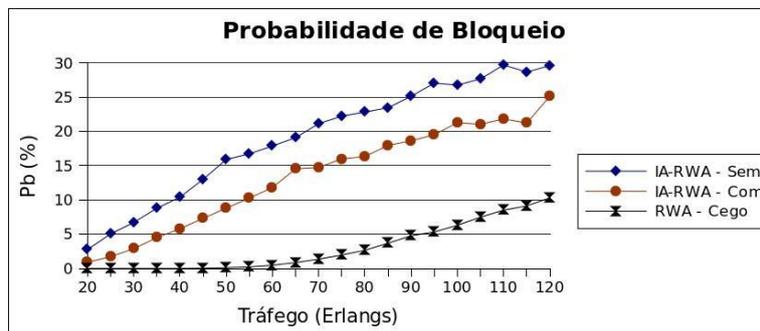
### 4.4 Benefícios para o desempenho da rede

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

As Figuras 6a – 6b 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,

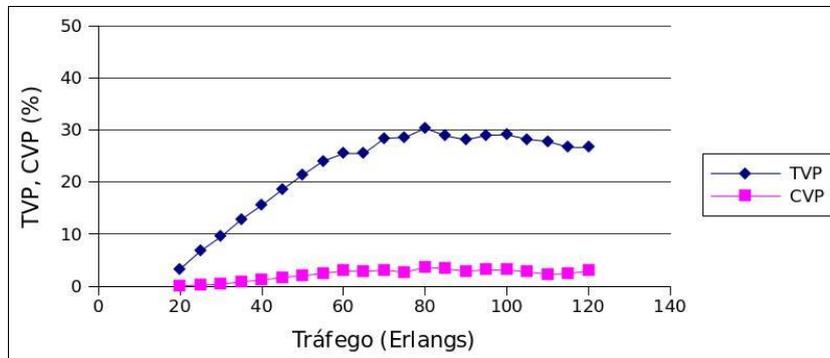


a)

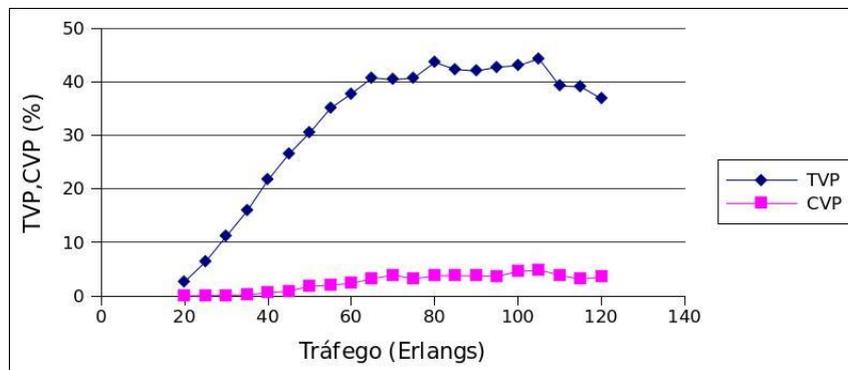


b)

Figura 6: Probabilidade de bloqueio em cenários sem e com atualização de ganho. a) 10 Gbps; b) 40 Gbps.



a)



b)

Figura 7: TVP e CVP para RWA Cego a 40 Gbps. a) sem atualização de ganho; b) com atualização de ganho.

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 curvas as Figura 6b, verifica-se uma redução de aproximadamente 20% na probabilidade de bloqueio da rede quando o tráfego é alto (e.g. 100 Er), passando de 0,27 para 0,22. Melhora similar no desempenho acontece quando a rede opera a 10 Gbps (Figura 6a). Note que, quanto maior é a taxa de transmissão de bits da rede, maior é a melhoria no seu desempenho.

Outra característica observada nos cenários de rede operando com e sem variação de ganho é que os valores da TVP mudam de um cenário para outro. As Figuras 7a – 7b mostram a TVP e CVP para a rede operando com o algoritmo RWA Tradicional e com uma taxa de transmissão de bits de 40 Gbps. Os resultados para 10 Gbps são similares. Note que no cenário com atualização de ganho, o TVP apresenta resultado bem superior ao cenário sem atualização de ganho. Por exemplo, quando o tráfego na rede é alto (e.g., 100 Er), o TVP para o cenário sem atualização é aproximadamente 29% e 43% para o cenário com atualização de ganho, ou seja, um aumento de 48%. Isto significa que, quando a rede opera com um algoritmo RWA Tradicional, se os ganhos dos EDFA's não são atualizados, a probabilidade de se ter conexões na rede sem QoT pode ser bem maior do que a medida pelo algoritmo RWA Tradicional. Isto pode ter implicações negativas para o serviço oferecido às redes clientes. Um alto valor de TVP significa que existe uma alta probabilidade de que a QoT das conexões presentes na rede estejam violadas, ou seja, suas BER's podem ser altas e comprometer a qualidade da informação transmitida pela rede.

As Figuras 7a – 7b também trazem outra informação interessante. Perceba que a partir de 80 Er, i.e. alto tráfego na rede, os valores de TVP estabilizam em torno de 30% para o caso sem atualização de ganho e 42% para o caso com atualização de ganho. Ou seja, embora o número de conexões esteja aumentando na rede, a probabilidade de se ter conexões sem QoT não é alterada. A explicação para isso está no fato de que quando o tráfego é alto, as variações de ganho dos EDFA's também estabilizam em um certo valor, conforme pode ser visto na Figura 5a e também está previsto pela equação (3). Note na Figura 5a que entre 80 e 120 Er a variação de ganho dos EDFA's praticamente permanece em torno de  $-2,2\%$ . Esta parece ser uma característica do efeito da saturação de EDFA's, o qual pode ser encarado como um efeito não-linear. A TVP causada na rede devido a outros efeitos não-lineares, como por exemplo, a FWM, aumenta de forma proporcional ao aumento do tráfego na rede, não apresentando pontos de estabilização de valores (Fonseca 2005). Em outras palavras, o crescimento da curva é monotônico.

## 6. Conclusão

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 dinâmica transparente. Um modelo analítico para estimar as variações de ganho com relação à sua potência de entrada também é apresentado. Para que o ganho dos EDFA's não sofra variações, amplificadores óticos equipados com controle automático de ganho podem ser utilizados na rede (Oliveira 2007). Os resultados das simulações numéricas sugerem que o desempenho da rede pode ser melhorado com a eliminação das variações do ganho dos amplificadores. Isso, porque eles resolveriam a questão da instabilidade

momentânea e, conseqüentemente, evitariam a perda das informações que estariam trafegando pelo enlace no momento da aquisição/remoção de conexões. 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.

## References

- Abbade, M. L. F., Marconi, J. D., Cassiolato, R. L., Ishizuca, V., Fonseca, I. E. and Fragnito, H. L. (2009) "Field-Trial Evaluation of Cross-Layer Effect Caused by All-Optical Wavelength Converters on IP Network Applications", In: IEEE/OSA J. Lighthwave Technology.
- Ali, M. and Tancevski, L. (2002) "Impact of Polarization-Mode Dispersion on the Design of Wavelength-Routed Networks", In: IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 14, p. 720-722.
- Almeida Jr., R. C., Campelo, D. R., Cartaxo, A. V. T., Guild, K. M. and Waldman H. (2008) "Efficient Wavelength Assignment Policy for XPM-Impaired WDM Networks", In: IEEE Communication Letters, vol. 12, p. 791 – 793.
- Deng, T. and Subramaniam, S. (2004) "Source Power Management in Transparent Wavelength-Routed Mesh Networks", In: Proc. IEEE ICC'04.
- Filho, U. S. P., Ribeiro, M. R. N., Maioli, C. P., Freitas, M. and Fonseca, I. E. (2007) "Cost functions for cac/rwa in dynamic optical networks under gvd, spm and xpm", In: Journal of Microwave and Optoelectronics, vol. 6, p. 249–262.
- Fonseca, I. E. (2005) "Uma abordagem para Aprovisionamento e Diferenciação de QoS Óptico na Presença de FWM em Redes Ópticas Transparentes", Tese de Doutorado, FEEC/Unicamp.
- Fonseca, I. E., Ribeiro, M. R. N., Almeida Jr., R. C. and Waldman, H. (2004) "Preserving Global Optical QoS in FWM Impaired Dynamic Networks", In: IEE Electronics Letters, Vol. 40, p. 191-192.
- Fonseca, I. E., Ribeiro, M. R. N., Almeida Jr., R. C. and Waldman, H. (2004) "Meeting Optical QoS in Dynamic Networks with Reduced Complexity", In: Proc. IEEE ECOC'04.
- Gomes, A. F., Fernandes, C. E. M., Oliveira, V. A. P., Fonseca, I. E. (2009) "Estratégia de Roteamento em Algoritmos IA-RWA para Redes Ópticas – Uma avaliação da Dispersão de Modo de Polarização," In: Proc. SBrT 2009, Blumenau-SC.
- Guidorizzi, H. L. (2008) "Um curso de cálculo", In: LTC, Rio de Janeiro.
- Harai, H. (2008) "Optical Packet & Path Integration for Energy Savings toward New Generation Network", In: Proc. IEEE SAINT 2008, p. 389–392.

- ITU-T Rec. G.806 (2000) "Characteristics of Transport Equipment - Description Methodology and Generic Functionality".
- Lima, M. A. C., Araújo, A.F.R. and César, A.C (2004) "Agregação Dinâmica de Tráfego em Redes Ópticas WDM Utilizando Algoritmo Genético", In: Proc. MOMAG'04.
- Martins-Filho, J. F., Bastos-Filho, C. J. A., Arantes, E. A. J., Oliveira, S. C., Coelho, L. D., Oliveira, J. P. G., Dante, R. G., Fontana, E. and Nunes, F. D. (2003) "Novel Routing Algorithm for Transparent Optical Networks Based on Noise Figure and Amplifier", In: Proc. IEEE IMOC2003.
- Oliveira, J. C. R. F. (2007) "Amplificadores Ópticos com Controle Automático de Ganho para Aplicação em Redes Ópticas", Tese de Doutorado, FEEC/Unicamp.
- Ramamurthy, B. et al., (1999) "Impact of transmission impairments on the teletraffic performance of wavelength-routed optical networks", In: IEEE/OSA J. Lighthwave Technology, vol. 10. p. 1713-1723.
- Ramaswami, R. and Sivarajan, K.N. (2010) "Optical networks: a practical perspective", In: Academic Press, 3<sup>a</sup> Edition.
- Ramaswami, R., (2006) "Optical Networking Technologies: What Worked and What Didn't", In: IEEE Communications Magazine, p. 132 – 139.
- Tomkos, I., Azodolmolky, S., Klionidis, D., Aggelou, M. and Margariti, M. (2008) "Dynamic impairment aware networking for transparent mesh optical networks: Activities of EU project DICONET", In: Proc. 10<sup>a</sup> IEEE ICTON 2008, p. 6 – 12.
- Yuang, M., Chao, I., Bird Lo, Tien, P., Chen, W. J. , Yu-min Lin, Lee, S. S. W. and Ching-yun Chien (2008) "HOPSMAN: An Experimental Testbed System for a 10-Gb/s Optical Packet-Switched WDM Metro Ring Network", In: IEEE Communications Magazine, vol. 47, p. 158 – 166.
- Zang, H., Jue, J. P. and Mukherjee, B. (2000) "A Review of Routing and Wavelength Assignment Approaches for Wavelength-Routed Optical WDM Networks", In: SPIE Optical Network Magazine, Vol. 1, p. 47-60.