

# Análise do Impacto do Ruído ASE em Redes Ópticas Elásticas Transparentes Utilizando Múltiplos Formatos de Modulação

Matheus A. Cavalcante, Helder A. Pereira, Daniel A. R. Chaves, Raul C. Almeida Jr.

**Resumo**— Este artigo apresenta uma modelagem analítica para quantificar o ruído de emissão espontânea amplificada, gerado pelos amplificadores ópticos (amplificadores de potência, de linha e pré-amplificadores), em redes ópticas elásticas transparentes. Adicionalmente, é proposta uma metodologia para se determinar a distância máxima entre amplificadores ópticos para garantir a transparência da rede. Diferentes formatos de modulação, taxas de transmissão, perdas nos dispositivos e ganhos nos amplificadores são considerados. Os resultados são apresentados para a metodologia proposta, bem como o desempenho de uma rede óptica elástica considerando diversas heurísticas para roteamento.

**Palavras-Chave**— Emissão Espontânea Amplificada, Rede Óptica Elástica Transparente, Relação Sinal-Ruído Óptica, Simulação Computacional.

**Abstract**— This paper presents an analytical model to quantify the amplified spontaneous emission noise generated by optical amplifiers (booster, line and pre-amplifiers) used in elastic transparent optical networks. In addition, we propose a methodology to determine the maximum distance between in-line amplifiers to guarantee the network transparency operation. Different modulation formats and transmission rates, losses on devices and amplifiers gains are considered. The proposed methodology is applied and the results are presented in terms of network performance considering some routing heuristics.

**Keywords**— Amplified Spontaneous Emission, Computational Simulation, Optical Signal-to-Noise Ratio, Transparent Elastic Optical Networks.

## I. INTRODUÇÃO

As redes ópticas elásticas transparentes têm se tornado uma alternativa interessante em comparação com as redes ópticas que utilizam multiplexação por comprimento de onda (WDM – *Wavelength Division Multiplexing*) [1]. O aproveitamento do espectro de frequência pode ser otimizado com a utilização da fibra óptica como meio de transmissão aliado a novas tecnologias de transmissão, como por exemplo multiplexação por divisão em frequências ortogonais (OFDM – *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) [1] e Nyquist WDM (N-WDM) [2]. Considerando que o sinal transmitido em uma rede óptica pode ter sua qualidade degradada pela adição de

ruídos e interferências ao se propagar nos nós e enlaces, deve-se avaliar a qualidade da transmissão (QoT – *Quality of Transmission*) em cada destino. Nesse caso, além da disponibilidade de recursos da rede, também é essencial que o sinal atenda a determinado critério de QoT [3].

Alguns modelos analíticos que consideram ruído de emissão espontânea amplificada (ASE – *Amplified Spontaneous Emission*) foram desenvolvidos na literatura. Morea *et al.* [4], determinaram a relação sinal-ruído (SNR – *Signal-to-Noise Ratio*) para cada sub-portadora de um sinal OFDM óptico. Para tal, é considerado que cada segmento de fibra de transmissão do enlace (*span length*) possui o mesmo comprimento, os amplificadores de linha compensam exatamente as perdas da fibra de transmissão, os amplificadores de potência e pré-amplificadores não estão presentes na configuração dos nós e considera-se um único formato de modulação na transmissão das sub-portadoras. Beyranvand *et al.* [5] propuseram uma modelagem analítica que considera a relação sinal-ruído óptica (OSNR – *Optical Signal-to-Noise Ratio*) devido ao ruído ASE, presença de não-linearidades na fibra óptica e penalidades devido à imperfeição do filtro óptico e geração de diafonia (*crosstalk*) nos elementos de comutação. No entanto, na consideração do ruído ASE, apenas é levado em conta o número de enlaces (*hops*), independentemente de seus comprimentos físicos. Pincemin *et al.* [6] descreveram uma relação entre OSNR e SNR considerando o ruído ASE e não-linearidades presentes na fibra óptica em termos de suas respectivas variâncias. Gao *et al.* [7] desenvolveram uma expressão para a SNR considerando sistemas que compensam a não-linearidade intracanal, sendo a densidade de ruído não-linear modelada como uma distribuição Gaussiana. Savory [8] propôs uma modelagem analítica simples que considera a SNR em função da eficiência espectral da rede, levando-se em conta o ruído ASE e considerando a modelagem da não-linearidade na fibra óptica como uma distribuição Gaussiana. A modelagem proposta neste artigo considera que os amplificadores de potência (*booster*), de linha (*in-line amplifiers*) e pré-amplificadores contribuem para a geração de ruído no sistema óptico de transmissão. A expressão da OSNR no nó destino é determinada, utilizando-se de transmissão do sinal óptico nas duas polarizações da onda eletromagnética.

Este artigo está organizado da seguinte forma: na Seção II, descreve-se a modelagem analítica do ruído ASE proposta neste artigo. Na Seção III, apresenta-se a metodologia utilizada para se definir os cenários de simulação em que o impacto do ruído ASE, na topologia de rede considerada neste trabalho,

Matheus A. Cavalcante (estudante de Iniciação Científica/UFCG - Bolsista do CNPq-Brasil) e Helder A. Pereira, Departamento de Engenharia Elétrica, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB, Brasil, Email: helder.pereira@dee.ufcg.edu.br. Daniel A. R. Chaves, Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife - PE, Brasil. Raul C. Almeida Jr., Departamento de Eletrônica e Sistemas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife - PE, Brasil.

é analisado. Na Seção IV, os parâmetros das simulações são apresentados. Na Seção V, são discutidos os resultados e, por fim, na Seção VI, as conclusões deste artigo são apresentadas.

## II. MODELAGEM ANALÍTICA DO RUÍDO ASE

Considerando-se a arquitetura do nó denominada de *spectrum switching* [9], a relação sinal ruído óptica obtida no nó destino ( $OSNR_{out}$ ) pode ser calculada conhecendo-se os valores das perdas nos dispositivos, ganhos e cálculo do ruído ASE gerado nos amplificadores ópticos presentes nos nós e nos enlaces da rede.

Para isso, a Figura 1 ilustra um enlace com os seguintes dispositivos: transmissor óptico de largura de banda variável (Tx), elemento de comutação de *slots* de frequência (SSS – *Spectrum Selective Switch*), *booster*, fibra de transmissão em conjunto com amplificadores de linha, pré-amplificador, elemento de comutação de *slots* de frequência e, por fim, o receptor de largura de banda variável (Rx).

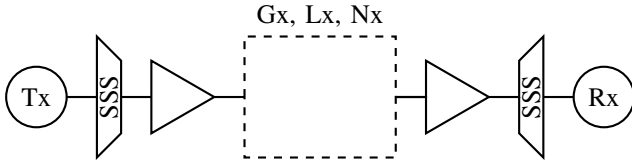


Fig. 1. Configuração de um enlace óptico considerando a arquitetura do nó *spectrum switching*.

O ruído ASE gerado pelo *booster* e pré-amplificador é quantificado por [10]

$$N_z = F_z h \nu B_{Ref} (G_z - 1), \quad (1)$$

em que  $z$  representa a posição do amplificador (1 para *booster* e 2 para pré-amplificador),  $N_z$  o ruído ASE gerado devido à transmissão do sinal em duas polarizações da onda eletromagnética,  $F_z$  o fator de ruído do amplificador,  $G_z$  o ganho linear do amplificador na posição  $z$ ,  $h$  a constante de Planck,  $\nu$  a frequência do sinal óptico e  $B_{Ref}$  a largura de banda de referência.

A modelagem analítica proposta do ruído ASE, gerado pelo conjunto de amplificadores de linha, considerando a transmissão do sinal óptico nas duas polarizações da onda eletromagnética, é dada por

$$N_x = n_{amp} F_x h \nu B_{Ref} \left[ 1 - L_{Fb} \left( -\frac{1}{1 + n_{amp}} \right) \right], \quad (2)$$

em que  $x$  representa o conjunto de segmentos de fibra óptica e amplificadores de linha,  $n_{amp}$  o número de amplificadores de linha e  $L_{Fb}$  a perda linear da fibra óptica. Neste trabalho, considera-se que os amplificadores de linha possuem o mesmo valor de fator de ruído e que estão espaçados igualmente ao longo do enlace.  $n_{amp}$  é dado por

$$n_{amp} = \left\lceil \frac{d_{ij}}{d_{amp}} - 1 \right\rceil, \quad (3)$$

em que  $\lceil u \rceil$  representa o menor inteiro não menor do que  $u$ ,  $d_{ij}$  o comprimento físico da fibra óptica entre os nós  $i$  e  $j$  e  $d_{amp}$  a distância física desejada entre os amplificadores de linha. No entanto, para uma distância  $d_{ij}$  e o número de amplificadores dado pela eq. 3, a distância física efetiva entre os amplificadores de linha ( $d_{amp}^{ef}$ ) é dada por

$$d_{amp}^{ef} = \frac{d_{ij}}{n_{amp}}. \quad (4)$$

Em um cenário de rede, que constitui o objetivo do presente trabalho, o Tx e o Rx podem ser ligados através de uma rota com diversos enlaces. Para avaliar o valor da  $OSNR_{out}$ , deve-se considerar o cascadeamento das potências ópticas do sinal e do ruído gerados ao longo dos dispositivos. Dessa forma, suponha que uma rota seja composta por  $E$  enlaces e  $n = 1, 2, \dots, E$ , em que  $n$  representa o índice de um enlace na rota. A potência óptica do sinal no nó destino é calculada por

$$P_{out,n} = P_{out,n-1} \frac{G_{n,1} G_{n,x} G_{n,2}}{L_{SSS} L_{n,x} L_{SSS}}, \quad (5)$$

em que  $P_{out,0} = P_{in}$ ,  $P_{out,E} = P_{out}$  e, para cada  $n$ -ésimo enlace da rota,  $G_{n,1}$  e  $G_{n,2}$  representam os ganhos lineares do *booster* e do pré-amplificador,  $G_{n,x}$  é o ganho linear total do conjunto de amplificadores de linha presentes no  $n$ -ésimo enlace e  $L_{n,x}$  é a perda total dos segmentos de fibra óptica no  $n$ -ésimo enlace.

A potência óptica de ruído no nó destino pode ser calculada por:

$$N_{out,n} = N_{out,n-1} \frac{G_{n,1} G_{n,x} G_{n,2}}{L_{SSS} L_{n,x} L_{SSS}} + N_{n,1} \frac{G_{n,x} G_{n,2}}{L_{n,x} L_{SSS}} + N_{n,x} \frac{G_{n,2}}{L_{SSS}} + N_{n,2} \frac{1}{L_{SSS}}, \quad (6)$$

em que  $N_{n,x}$  é a potência de ruído gerada pelo conjunto de amplificadores de linha presentes no  $n$ -ésimo enlace, conforme descrito na eq. (2),  $N_{out,0} = N_{in}$  e  $N_{out,E} = N_{out}$ .

## III. METODOLOGIA PARA DIMENSIONAMENTO DO TAMANHO DOS *Spans* UTILIZADOS NOS ENLACES PARA GARANTIR TRANSPARÊNCIA DA REDE

Em redes ópticas elásticas transparentes, podem ser determinados, *a priori*, o número de *slots* por enlace, formatos de modulação, taxas de transmissão, potência óptica do transmissor, largura de banda do *slot* e largura de banda de referência. Nesse cenário, para se dimensionar a rede, é necessário considerar a relação sinal-ruído óptica na saída do transmissor ( $OSNR_{in}$ ) e a distância entre os amplificadores de linha ( $d_{amp}$ ). Sendo assim, propõe-se uma metodologia para a realização desse dimensionamento, cujo objetivo é projetar uma rede na qual seja possível o estabelecimento de pelo menos um caminho óptico com QoT suficiente entre qualquer par de nós (rede óptica totalmente transparente). A metodologia consiste dos seguintes passos: (1) especificar o intervalo de variação dos parâmetros  $OSNR_{in}$  e  $d_{amp}$ , e seus respectivos passos de variação; (2) utilizar um algoritmo de roteamento para encontrar uma rota considerando todos os pares fonte-destino da rede; (3) determinar a rota que apresente o menor valor de  $OSNR_{out}$  dentre as obtidas no passo (2); (4) classificar

a rede como transparente se a rota encontrada no passo (3) satisfizer o critério de QoT para o formato de modulação com menor eficiência espectral, utilizando a maior taxa de transmissão disponível na rede; e como não transparente caso contrário. Satisfazer o critério de QoT para uma determinada rota significa que a  $OSNR_{out}$  obtida, para a rota em questão, seja maior que o limiar ( $OSNR_{th}$ ) exigido para a referida taxa de transmissão e formato de modulação, conforme descrito nas eqs. (7) e (8); (5) traça-se o gráfico de  $OSNR_{in}$  em função de  $d_{amp}$ , em que cada par ordenado é representado como rede transparente ou rede não transparente. Esses casos são denominados, daqui por diante neste artigo, pelos termos: transparência total e transparência parcial, respectivamente.

A probabilidade de erro de bit, para um esquema de modulação  $M$ -QAM, pode ser calculada em função do número de símbolos ( $M$ ) e do valor da relação sinal-ruído por bit ( $snr_b$ ) da seguinte forma [11]

$$P_b = \frac{2}{\log M} \left( \frac{\sqrt{M} - 1}{\sqrt{M}} \right) \operatorname{erfc} \left[ \sqrt{\frac{3snr_b \log M}{2(M-1)}} \right]. \quad (7)$$

Considerando uma taxa de erro de bit máxima tolerável de  $P_b = 10^{-3}$  e utilizando código corretor de erro (FEC – *Forward Error Correction*), para o formato de modulação 4-QAM, tem-se que  $snr_b = 6.8$  dB, 16-QAM,  $snr_b = 10.5$  dB, e 64-QAM,  $snr_b = 14.8$  dB [11]. Desse modo, para uma determinada taxa de transmissão e um respectivo formato de modulação, a  $OSNR_{th}$  é calculada por [11]

$$OSNR_{th} = \frac{1}{2} \frac{B}{B_{Ref}} snr_b, \quad (8)$$

em que  $B$  representa a taxa de transmissão.

O número de *slots* para uma dada requisição de chamada ( $n_{slot}$ ) é calculado por [11]

$$n_{slot} = \frac{B}{2B_{Slot} \log_2 M}, \quad (9)$$

em que  $B_{Slot}$  representa a largura de banda de um *slot*.

#### IV. CONFIGURAÇÃO DA SIMULAÇÃO

A Figura 2 ilustra a topologia de rede utilizada nas simulações. Os ganhos dos amplificadores são dimensionados de modo a compensar as perdas do nó e do enlace, considerando que o *booster* compensa exatamente a perda do SSS na saída do nó, cada amplificador de linha compensa um segmento de fibra óptica e o pré-amplificador compensa o último segmento de fibra óptica em conjunto com a perda associada ao SSS da entrada do nó.

Assume-se que os pedidos de requisição de chamadas seguem uma distribuição poissoniana, enquanto que a duração da chamada estabelecida segue uma distribuição exponencial. A seleção do par fonte-destino, bem como a seleção da taxa de transmissão para um dado pedido de conexão, segue uma distribuição uniforme e o número de requisições de chamadas simuladas é baseado no número de 1000 bloqueios obtidos para cada valor de carga da rede. Os valores dos parâmetros utilizados nas simulações estão descritos na tabela I.

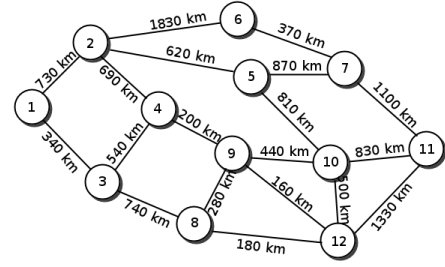


Fig. 2. Topologia de rede utilizada nas simulações.

TABELA I  
PARÂMETROS UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES.

| Parâmetro   | Valor                                      | Descrição   |
|-------------|--|---|
| -           | 4-QAM, 16-QAM e 64-QAM                     | Formatos de modulação utilizados nas simulações.  |
| $\nu$       | 193.4 THz                                  | Frequência central da grade.  |
| $B$         | 10, 40, 100, 160 e 400 Gbps                | Taxas de transmissão utilizadas nas simulações.   |
| $B_{Ref}$   | 12.5 GHz                                   | Largura de banda de referência.   |
| $B_{Slot}$  | 12.5 GHz                                   | Largura de banda do <i>slot</i> na frequência.  |
| $d_{amp}$   | 80 km                                      | Distância entre amplificadores de linha.  |
| $F_0$ (NF)  | 3.162 (5 dB)                               | Fator de ruído do amplificador (Figura de ruído).   |
| $h$         | 6.63 $\times 10^{-34}$ m <sup>2</sup> kg/s | Constante de Planck.  |
| $L_{SSS}$   | 5 dB                                       | Perda do elemento óptico de comutação.  |
| $N_{Slot}$  | 64   | Número de <i>slots</i> por enlace.  |
| $OSNR_{in}$ | 30 dB                                      | Relação sinal-ruído óptica de entrada.  |
| $P_{in}$    | 0 dBm                                      | Potência óptica de entrada considerando que a transmissão do sinal é realizada nas duas polarizações da onda eletromagnética. |

Para um determinado pedido de requisição de chamada, o algoritmo de seleção de rota e atribuição espectral que considera penalidades físicas (IA-RSA – *Impairment Aware-Routing and Spectrum Assignment*) deve ser utilizado para verificar se a chamada pode ser estabelecida. O algoritmo IA-RSA, após selecionar uma rota, verifica, por meio do algoritmo de atribuição espectral de primeiro da lista (*First Fit*), se a chamada pode ser estabelecida utilizando o formato de modulação que possui maior eficiência espectral (neste trabalho, 64-QAM). Caso não seja possível atender ao pedido de estabelecimento da chamada devido à falta de QoT no nó destino, tenta-se utilizar o próximo formato de modulação de maior eficiência espectral, até que o último seja o 4-QAM. Se, para algum formato de modulação, a QoT seja satisfeita, porém não seja possível estabelecer um conjunto contínuo, ou contíguo, de *slots*, o pedido de conexão da chamada é bloqueado.

#### A. Algoritmos de Roteamento

Neste trabalho, as simulações foram realizadas utilizando algoritmos presentes na literatura, com adaptações para o uso em redes ópticas elásticas transparentes. São eles: menor

número de enlaces (MH – *Minimum Hops*) [12], menor distância física (SP – *Shortest Path*) [12], distância e disponibilidade [12] adaptado para disponibilidade de *slots* (LORa – *Lenght and Availability Routing*) e distância e disponibilidade adaptado para contiguidade de *slots* (LORc – *Length and Contiguity Routing*). Para isso, o algoritmo de Dijkstra foi modificado em termos de sua função custo. Dessa forma, tem-se os seguintes algoritmos, bem como suas funções-custo correspondentes, descritos na tabela II.

TABELA II  
ALGORITMOS E SUAS FUNÇÕES CUSTO.

| Algoritmo        | Função Custo ( $f(i, j)$ )                     |
|------------------|--|
| MH               | 1  |
| SP               | $d_{i,j}$                                      |
| LOR <sub>a</sub> | $1 + \frac{d_{i,j}}{D} - \frac{a_{i,j}}{A}$    |
| LOR <sub>c</sub> | $1 + \frac{d_{i,j}}{D} + \frac{1}{sr_{i,j}+1}$ |

em que  $a_{i,j}$  representa o número de *slots* disponíveis no enlace analisado,  $D$  a maior distância física de um enlace da rede,  $A$  o número máximo de *slots* por enlace e  $sr_{i,j}$  representa o número de possibilidades de como se encaixar o conjunto de *slots* solicitados na grade de *slots* disponíveis [13].

## V. RESULTADOS

### A. Aplicação da Metodologia de Dimensionamento

A Figura 3 ilustra a aplicação da metodologia descrita na Seção III. A decisão se a rede é totalmente, ou parcialmente, transparente é baseada na maior rota, dentre as mais curtas obtidas pelo algoritmo SP, utilizando o formato de modulação 4-QAM e  $B = 400$  Gbps. Na Figura 3, os símbolos cheios representam os pontos nos quais a rede é transparente. Os símbolos abertos representam pontos nos quais há pelo menos um par de nós da rede para o qual não há uma rota, utilizando o algoritmo SP, com QoT satisfatória. Os 4 pontos:  $P_1, P_2, P_3$  e  $P_4$ , ilustrados na figura 3, representam pontos de simulação escolhidos. Tais pontos foram selecionados com o intuito de averiguar o desempenho da rede em situações em que a mesma apresenta transparência total ( $P_1, P_2$  e  $P_3$ ) e parcial ( $P_4$ ).

De acordo com a Figura 3, observa-se que existe um compromisso de custo (*tradeoff*) entre o valor da  $OSNR_{in}$  (custo associado ao transmissor óptico) e  $d_{amp}$  (custo associado ao número de amplificadores de linha presentes no enlace óptico). Um transmissor de melhor qualidade (maior valor de  $OSNR_{in}$ ) pode levar a um aumento do menor valor de  $d_{amp}$  que garante uma rede transparente acarretando assim em uma diminuição no número de amplificadores necessários em um enlace.

### B. Análise de Desempenho da Rede

A Figura 4 descreve a probabilidade de bloqueio das requisições de chamada em função da variação de carga na rede quando se utiliza os algoritmos de roteamento MH, SP, LOR<sub>a</sub> e LOR<sub>c</sub>, considerando  $OSNR_{in} = 30$  dB.

Analisando as Figuras 4(a), 4(b) e 4(c), que representa o caso em que há transparência total, observa-se que o algoritmo de roteamento LOR<sub>c</sub> supera os demais. Isso ocorre porque o

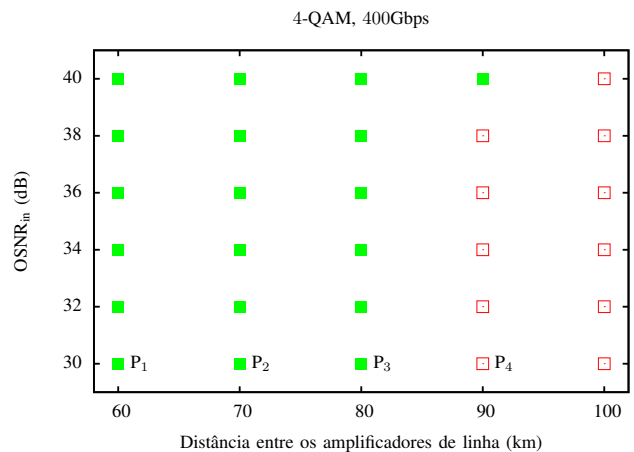


Fig. 3. Relação sinal-ruído óptica de entrada em função da distância entre os amplificadores de linha, considerando o algoritmo SP. Os símbolos cheios representam pontos de entrada de simulação que atendem ao critério de QoT, enquanto que os símbolos abertos não atendem ao critério de QoT.

LOR<sub>c</sub> usa, no cômputo do custo do enlace, além da distância normalizada, uma métrica de disponibilidade de recursos bem adaptada ao fato das redes elásticas apresentarem conexões com diferentes número de *slots* [13]. Observa-se ainda que o algoritmo LOR<sub>a</sub> apresenta o segundo melhor desempenho. Isso ocorre porque o LOR<sub>a</sub> utiliza uma métrica que quantifica, além da distância normalizada, o número de *slots* livres no enlace. No entanto, o LOR<sub>a</sub> não considera como os *slots* disponíveis estão organizados no enlace, *i.e.*, a contiguidade desses *slots* livres. Por fim, entre o MH e o SP, observa-se uma inversão em seus desempenhos para determinado valor de carga. Isso se explica pelo fato do MH, ao reduzir a quantidade de enlaces utilizados pelas conexões, prioriza a redução do uso dos recursos da rede, enquanto o SP procura a rota mais curta na tentativa de conseguir uma rota pouco ruidosa. Assim, para baixas cargas, em que os recursos da rede tornam-se mais disponíveis, o SP supera o MH, enquanto que, para altas cargas, observa-se o inverso.

No ponto  $P_4$ , por outro lado, há transparência parcial. Os resultados da probabilidade de bloqueio das requisições de chamada em função da variação de carga na rede, quando se utiliza os algoritmos de roteamento MH, SP e LOR<sub>a</sub> não consideram como os *slots* disponíveis estão organizados no enlace, *i.e.*, a contiguidade desses *slots* livres. Por fim, entre o MH e o SP, observa-se uma inversão em seus desempenhos para determinado valor de carga. Isso se explica pelo fato do MH, ao reduzir a quantidade de enlaces utilizados pelas conexões, prioriza a redução do uso dos recursos da rede, enquanto o SP procura a rota mais curta na tentativa de conseguir uma rota pouco ruidosa. Assim, para baixas cargas, em que os recursos da rede tornam-se mais disponíveis, o SP supera o MH, enquanto que, para altas cargas, observa-se o inverso.

## VI. CONCLUSÕES

Neste artigo, foi proposta uma modelagem analítica para quantificar o ruído ASE gerado pelo conjunto de amplifi-

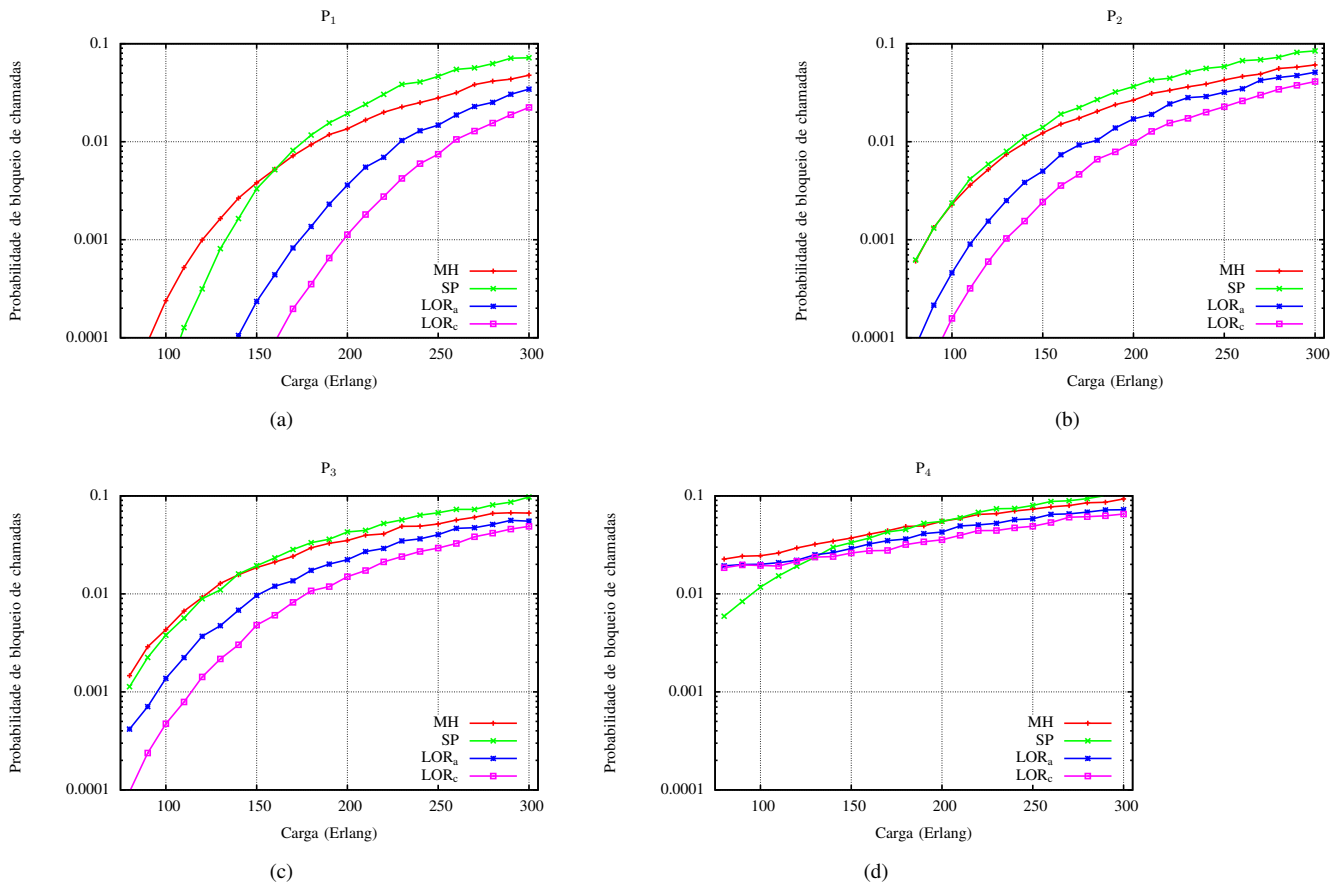


Fig. 4. Probabilidade de bloqueio de chamadas, utilizando os algoritmos de roteamento SP, MH,  $LOR_a$  e  $LOR_c$ , em função da variação de carga na rede, considerando  $OSNR_{in} = 30$  dB e: (a)  $d_{amp} = 60$  km ( $P_1$ ); (b)  $d_{amp} = 70$  km ( $P_2$ ); (c)  $d_{amp} = 80$  km ( $P_3$ ) e (d)  $d_{amp} = 90$  km ( $P_4$ ).

cadres presentes nos nós e enlaces de uma rede óptica elástica transparente. Desenvolveu-se ainda uma metodologia de dimensionamento de parâmetros de rede, analisando o desempenho da rede óptica, em termos de probabilidade de bloqueio de chamadas, considerando algoritmos de roteamento, que combinam aspectos indiretos da camada física e de rede, presentes na literatura e dois cenários específicos de simulação da rede óptica (transparente e não transparente). Diferentes formatos de modulação e taxas de transmissão, perdas nos dispositivos e ganhos nos amplificadores foram considerados. Os resultados obtidos mostraram que algoritmos de roteamento que consideram aspectos indiretos da camada física ( $LOR_a$  e  $LOR_c$ ) podem fornecer melhor desempenho frente aos algoritmos clássicos de roteamento (MH e SP).

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem à FACEPE e ao CNPq o apoio financeiro, e às universidades UFCG, UFPE e UPE o apoio institucional.

REFERÊNCIAS

[1] K. Christodouloupoulos, I. Tomkos, and E. A. Varvarigos, "Elastic bandwidth allocation in flexible ofdm-based optical networks," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 29, no. 9, pp. 1354 – 1366, 2011.  
 [2] G. Bosco, A. Carena, V. Curri, P. Poggiolini, and F. Forghieri, "Performance limits of nyquist-wdm and co-ofdm in high-speed pm-qpsk systems," *Ph. Tech. Let.*, vol. 22, no. 15, pp. 1129 – 1131, Agosto 2010.

[3] C. V. Saradhi and S. S. Subramaniam, "Physical layer impairment (pli) in wdm optical networks: Issues and challenges," *IEEE Comm. Surveys And Tutorials*, vol. 11, no. 4, pp. 109 – 130, 2009.  
 [4] A. Morea, A. Chong, and O. Rival, "Impact of transparent network constraints on capacity gain of elastic channel spacing," in *Optical Fiber Comm. Conf. and Exposition*. IEEE, Marco 2011, pp. 1 – 3.  
 [5] H. Beyranvand and J. Salehi, "A quality-of-transmission aware dynamic routing and spectrum assignment scheme for future elastic optical networks," *J. of Light. Tech.*, vol. 18, no. 31, pp. 3043 – 3054, 2013.  
 [6] E. Pincemin, M. Song, Y. Loussouarn, G. Thouenon, and C. Betoule, "Towards 400g/1t flexible optical transport networks," in *Int. Conf. on Transparent Optical Networks*. IEEE, Junho 2013, pp. 1 – 13.  
 [7] G. Gao, J. Zhang, L. Wang, W. Gu, and Y. Ji, "Influence of physical layer configuration on performance of elastic optical ofdm networks," *IEEE Communications Letters*, vol. 18, no. 4, pp. 672 – 675, 2014.  
 [8] S. J. Savory, "Congestion aware routing in nonlinear elastic optical networks," *Ph. Tech. Letters*, vol. 26, no. 10, pp. 1057 – 1060, 2014.  
 [9] D. Simeonidou, N. Amaya, and G. Zervas, "Infrastructure and architectures on demand for flexible and elastic optical networks," in *European Conf. and Exhibition on Opt. Comm.*, Setembro 2012, pp. 1 – 3.  
 [10] D. A. A. Mello, A. N. Barreto, T. C. Lima, P. T. F., L. Beygi, and J. M. Kahn, "Optical networking with variable-code-rate transceivers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, no. 2, pp. 257 – 266, 2014.  
 [11] R. Essiambre, G. Kramer, P. Winzer, G. Foschini, and B. Goebel, "Capacity limits of optical fiber networks," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, no. 4, pp. 662 – 701, Fevereiro 2010.  
 [12] D. A. R. Chaves, D. O. Aguiar, C. J. A. Bastos-Filho, and J. F. Martins-Filho, "A methodology to design the link cost functions for impairment aware routing algorithms in optical networks," *Photonic Networking Communications*, vol. 22, pp. 133 – 150, 2011.  
 [13] J. Almeida, R.C., A. Santos, K. Assis, H. Waldman, and J. Martins-Filho, "Slot assignment strategy to reduce loss of capacity of contiguous-slot path requests in flexible grid optical networks," *Electronics Letters*, vol. 49, no. 5, pp. 359 – 361, Fevereiro 2013.