

# Avaliação de Desempenho de Algoritmos RSA para Redes Ópticas Elásticas com Tolerância a Falhas em Cenário com Imperfeições de Camada Física

Jurandir Lacerda Jr.<sup>1,2</sup>, Alexandre Fontinele<sup>3</sup>, Igo Moura<sup>4</sup>, André Soares<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Computação  
Universidade Federal do Piauí (UFPI)  
Teresina – PI – Brasil

<sup>2</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí (IFPI)  
Corrente – PI – Brasil

<sup>3</sup>Centro de Informática (CIn)  
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)  
Recife – PE – Brasil

<sup>4</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão (IFMA)  
Coelho Neto – MA – Brasil

`jurandir.cavalcante@ifpi.edu.br`

**Abstract.** *With the growth of Internet traffic in recent years, new technologies emerge to support the increased demand in the infrastructure of transport networks. The Elastic Optical Networks are pointed at the literature as the main technology to meet this demand. In an elastic optical network, fault tolerance becomes an important criterion to be evaluated. However, most of the works that treat this theme does not take into account the imperfections of physical layer of Elastic Optical Networks. This paper studies the impact of these imperfections of physical layer in a routing algorithm and spectrum allocation, fault-tolerant, which makes use of multipath.*

**Resumo.** *Com o crescimento do tráfego na Internet nos últimos anos, novas tecnologias surgem para suportar o aumento da demanda na infraestrutura de redes de transporte. As Redes Ópticas Elásticas são apontadas na literatura como a principal tecnologia para suprir esta demanda. Em uma rede óptica elástica, a tolerância a falhas torna-se um importante critério a ser avaliado. Entretanto, a maioria dos trabalhos que tratam este tema não levam em conta as imperfeições de camada física inerentes das Redes Ópticas Elásticas. Este trabalho estuda o impacto destas imperfeições de camada física em um algoritmo de roteamento e alocação de espectro, tolerante a falhas, que faz uso de técnicas multipath.*

## 1. Introdução

Aplicações que utilizam a infraestrutura da Internet tornam-se cada vez mais frequentes. Uma das consequências disso é o aumento da demanda por banda passante. Dessa forma, é necessário o desenvolvimento de novas tecnologias capazes de suportar esta crescente necessidade.

A tecnologia de rede óptica é apontada como a alternativa mais promissora para fazer parte da infraestrutura de rede que suporta a Internet [Chatterjee et al. 2015]. Atualmente a tecnologia DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) é adotada para viabilizar a comunicação dentro de uma rede óptica. A tecnologia DWDM emprega a multiplexação por divisão de comprimento de onda. Com isso, o espectro óptico é dividido em vários canais de comunicação independentes, denominados comprimentos de onda. Cada comprimento de onda é utilizado para o estabelecimento de um circuito óptico [Ramaswami and Sivarajan 2009].

Entretanto, este tipo de divisão rígida pode causar um mau uso dos recursos da rede, visto que a necessidade de largura de banda de cada cliente pode variar de forma significativa. Há duas consequências que devem ser consideradas ao implantar a tecnologia DWDM em uma rede. A primeira é que caso a largura de banda exigida por um cliente seja maior do que a fixada pela tecnologia para cada canal, a demanda do cliente não é atendida. A segunda é que caso a largura de banda exigida pelo cliente seja menor que a largura disponibilizada, há um desperdício do uso destes recursos. Nesse sentido, a tecnologia OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*) surge como uma solução para tal problema. A tecnologia OFDM é capaz de dividir o espectro óptico em canais de menor granularidade. Estes canais, denominados *slots*, podem ser agrupados de tal forma que se ajuste um canal de comunicação de acordo com a largura de banda requisitada. A rede que faz uso da tecnologia OFDM é conhecida como rede óptica elástica [Jinno et al. 2009].

Em uma rede óptica elástica, existem desafios relevantes que devem ser tratados, como por exemplo o problema RSA (*Routing and Spectrum Assignment*). O problema RSA consiste em realizar a escolha da melhor rota para o tráfego das informações e alocar o conjunto de *slots* necessários para atender a uma certa demanda. Entretanto, para que uma rede atinja níveis de satisfação para os clientes que a usam, outro critério deve ser levado em consideração. Tal critério remete-se à disponibilidade da rede, ou seja, o quão ela estará preparada para contornar situações de falhas. Projetar uma Rede Óptica Elástica tolerante a falhas é um desafio que a literatura aborda com frequência e relevância.

Muitos algoritmos vêm tratando tolerância a falhas nos últimos anos [Chen et al. 2015] [Shen et al. 2014] [Wang et al. 2015c]. Porém, a grande maioria destes estudos acabam avaliando seus algoritmos em cenários que negligenciam as imperfeições de camada física.

O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho de técnicas de tolerância a falhas, em um cenário ciente de imperfeições de camada física. Desta forma poderemos avaliar tais técnicas em um cenário mais próximo do real e mensurar qual o impacto que estas imperfeições causam no desempenho destes algoritmos. Serão usadas técnicas de simulação computacional para a análise de desempenho e a probabilidade de bloqueio por circuito será a métrica de avaliação.

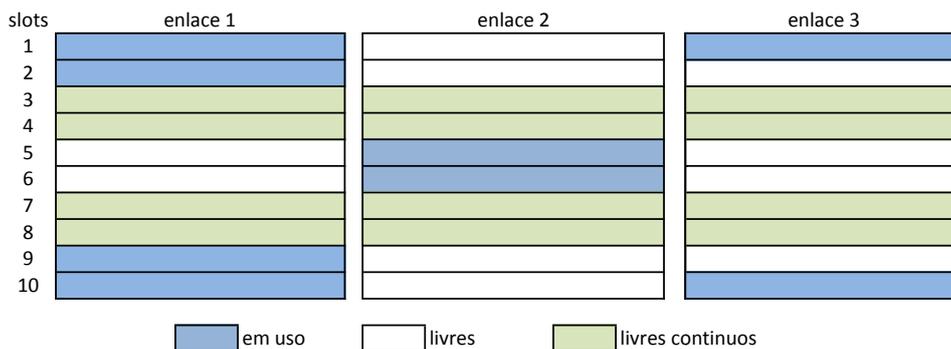
O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma. Na Seção 2 é apresentado os principais conceitos sobre redes ópticas elásticas. Uma revisão bibliográfica sobre algoritmos RSA tolerantes a falha é apresentada na Seção 3. A Seção 4 apresenta os conceitos de camada física. A avaliação de desempenho é apresentada na Seção 5. Por fim, as conclusões e trabalhos futuros são apresentadas na Seção 6.

## 2. Redes Ópticas Elásticas

As redes ópticas elásticas são caracterizadas pela sua capacidade em dividir os recursos espectrais em *slots* de frequência, na forma de sub-portadoras, através da multiplexação OFDM [Horota et al. 2014]. Em uma mesma fibra é possível operar com diversos circuitos ópticos. Cada circuito possui um conjunto de *slots* alocados para atender aos requisitos de banda passante. Para que um circuito óptico não interfira no sinal dos circuitos vizinhos que estão realizando transmissões simultâneas, estes são separados por um intervalo de frequência, denominado banda de guarda. Atualmente os *slots* de frequência possuem o tamanho de 12,5 GHz [Chatterjee et al. 2015].

Para viabilizar a comunicação dentro de uma rede óptica elástica é necessário determinar um caminho que os dados irão percorrer dentro da rede e especificar o conjunto de *slots* de frequências que serão utilizados. A literatura denomina RSA o problema de rotear e alocar espectro em uma rede óptica elástica [Christodoulopoulos et al. 2011]. Para satisfazer a restrição de contiguidade de espectro, um algoritmo RSA de alocação de espectro deve ser capaz de alocar um conjunto de *slots* que sejam adjacentes uns aos outros [Talebi et al. 2014]. Outra propriedade relevante que deve ser respeitada é a de continuidade do espectro óptico [Talebi et al. 2014]. Se um circuito óptico ocupa três *slots* contíguos em uma rota com três nós da rede, por exemplo, a propriedade de continuidade do espectro determina que esses mesmos *slots* deverão ser utilizados nos enlaces que conectam cada um dos nós da rota selecionada.

A medida que a rede opera, recursos são alocados e desalocados continuamente. Por conta do dinamismo no uso dos recursos há uma natural fragmentação do espectro [Talebi et al. 2014]. O problema de fragmentação do espectro influencia diretamente na eficiência de uma rede óptica elástica. A Figura 1 ilustra o problema de fragmentação do espectro.



**Figura 1. Cenário com fragmentação (Adaptada de [Santos 2015])**

No exemplo acima ilustra-se três enlaces com *slots* de frequência livres e outros ocupados. Ao tentar estabelecer um circuito que utiliza a rota que passa pelos três enlaces e que demanda três *slots* de frequência, deve-se, inicialmente, procurar por três *slots* livres adjacentes em cada um dos enlaces para garantir a contiguidade do espectro. Na Figura 1, há a existência de três *slots* livres adjacentes em cada enlace, são eles: *slots* 3 a 8 no enlace 1, *slots* 1 a 4 e 7 a 10 no enlace 2 e a 2 a 9 no enlace 3.

O próximo passo é procurar a mesma faixa de espectro livre em cada enlace. Ou seja, devem existir os mesmos três *slots* livres simultaneamente em todos os enlaces. Se

os *slots* 1, 2 e 3 forem selecionados no enlace 1, percebe-se que o *slot* 5 não estará disponível no enlace 2. Apesar do mesmo *slot* estar disponível no enlace 3, por conta da situação do enlace 2 o circuito não será estabelecido. Desta forma, no exemplo da Figura 1 não há a disponibilidade de três *slots* livres para respeitar a restrição da continuidade. Por conta disso a requisição de estabelecimento do circuito sofrerá bloqueio por fragmentação [Chatterjee et al. 2015]. O bloqueio por fragmentação ocorrerá sempre que as propriedades de continuidade e/ou contiguidade forem desrespeitadas.

Chama-se de fragmentação vertical a fragmentação que impede o estabelecimento de circuitos devido à restrição de contiguidade de espectro. Já a fragmentação que impede o estabelecimento de circuitos devido à restrição de continuidade de espectro é denominada de fragmentação horizontal [Talebi et al. 2014].

A arquitetura tradicional de uma rede óptica elástica é formada, basicamente, de BVT (*Bandwidth Variable Transponder*) e BV-WXC (*Bandwidth Variable Cross-connect*). O BVT é um transponder capaz de adaptar a largura de banda através do ajuste da taxa de bits a ser transmitido ou do formato da modulação. A modulação em uma rede óptica elástica é um fator relevante. Para transmissões de longas distâncias são utilizadas modulações que alcancem maiores distâncias. Porém, modulações dessa natureza são menos eficientes em termos de alocação do espectro, ou seja, necessitam alocar mais *slots*.

As modulações QPSK (*Quadrature Phase-Shift Keying*) ou BPSK (*Binary Phase-Shift Keying*), são exemplos de formatos de modulação com essas características. Modulações como o 32-QAM e 64-QAM transportam mais símbolos por bits do que a QPSK e BPSK. A consequência disso é que modulações dessa natureza demandam menos *slots* alocados, porém alcançam distâncias menores. Com isso, um BVT deve ser capaz de selecionar o melhor tipo de modulação a ser utilizada ponderando distância e uso eficiente de espectros.

### 3. Tolerância a Falhas em Redes Ópticas Elásticas

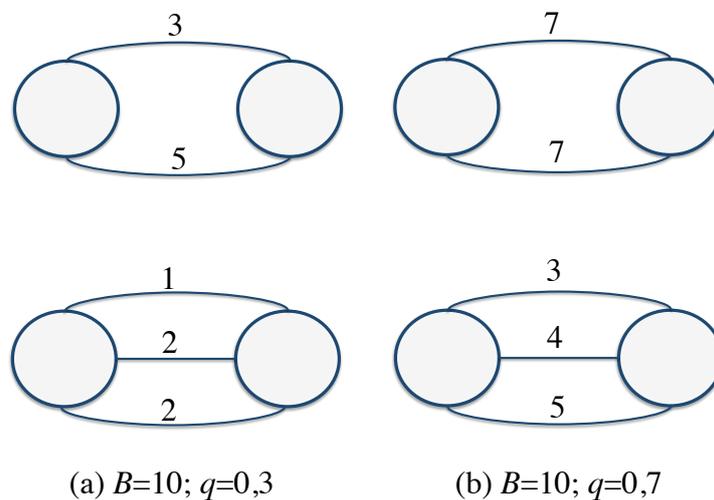
Nos últimos anos, várias técnicas têm sido propostas para tratar tolerância a falha em redes ópticas elásticas [Wang et al. 2015b], [Wei et al. 2014], [Amar et al. 2015] [Chen et al. 2015], [Shen et al. 2014]. Em geral, o objetivo é diminuir a probabilidade de bloqueio da rede e ao mesmo tempo conseguir garantir um nível de disponibilidade próximo a 100%.

Em [Oliveira and d. Fonseca 2014], são apresentados dois algoritmos para prover proteção de caminho através de uma técnica denominada *p-cycle*, que é uma estratégia que forma estruturas em anel para prover proteção. Tais algoritmos foram capazes de garantir 100% de proteção na ocorrência de falha simples, ou de até duas falhas simultâneas. Outros trabalhos também fazem uso de *p-cycle* para prover tolerância a falhas em redes ópticas elásticas como em [Wu et al. 2014] e [Ji et al. 2013].

Em [Wang et al. 2015a], os autores apresentam um algoritmo RSA tolerante a falha simples, que faz uso de proteção compartilhada de caminho. Neste algoritmo, é usado o conceito de SWP (*Spectrum Window Plane*), em que serão criados vários planos contendo subtopologias da topologia original. Desta forma o algoritmo pode tentar encontrar a melhor solução para cada plano, de forma a achar, ao final de várias iterações, uma rota

e um grupo de *slots* livres tanto para a rota principal, quanto para a rota de *backup*. Este algoritmo também escolhe modulações distintas para as duas rotas, visto que nem sempre a mesma modulação é compatível para as duas rotas encontradas, devido ao fato de suas distâncias serem diferentes.

Em [Ruan and Zheng 2014], os autores propõem um algoritmo baseado no conceito de *multipath*, que será referenciado no restante deste artigo como SM-RSA (*Survivable Multipath Routing and Spectrum Allocation*). No SM-RSA, as informações vão trafegar em vários caminhos disjuntos e simultâneos até chegar ao seu destino. Desta forma, dada um requisição  $r = o, d, B, q$ , onde  $o$  é o nó de origem,  $d$  é o nó de destino,  $B$  é a largura de banda requisitada e  $q$  é o nível de tolerância a falha da rede, onde  $0 \leq q \leq 1$ . Para este algoritmo, um conjunto  $N \geq 2$  de rotas é definido. Dada cada rota  $N$ , é necessário que cada uma dessas rotas tenha um nível de tolerância a falhas definido por  $q$ . A Figura 2 representa um exemplo de duas requisições com a mesma demanda ( $B = 10$ ).



**Figura 2. Exemplo de dois tipos de demandas, com a mesma quantidade de largura de banda requisitada e diferentes níveis de proteção garantidas pelo algoritmo SM-RSA**

Na Figura 2 (a), temos o nível de tolerância a falhas  $q = 0,3$  e um exemplo com dois caminhos ( $N = 2$ ) e outro com três caminhos ( $N = 3$ ). Para garantir o nível de tolerância a falhas requerido de  $q = 0,3$ , devemos garantir que com a falha de quaisquer caminhos de  $N$ , a soma dos caminhos restantes sejam maior ou igual a  $B * q$  ( $10 * 0,3 = 3$ ). Desta forma, a Figura 2 (a) com  $N=2$  (dois caminhos) consegue esta garantia visto que caso ocorra uma falha no primeiro caminho, o caminho restante está acima do nível de tolerância a falhas ( $5 \geq 3$ ). Neste mesmo exemplo, caso ocorra uma falha no segundo caminho, também garantiríamos a propriedade ( $3 \geq 3$ ). Os dois exemplos da Figura 2 (b) também estão obedecendo a propriedade, visto que na retirada de qualquer um dos enlaces, a soma dos restantes é maior que  $B * q$  ( $10 * 0,7 = 7$ ).

A solução do algoritmo SM-RSA garante um nível de disponibilidade da rede de até 100% e mostra-se eficiente se comparada a um cenário de caminho simples [Ruan and Zheng 2014]. Entretanto, não é avaliado o seu comportamento em termos de

probabilidade de bloqueio, em um cenário ciente de imperfeições de camada física. Este trabalho analisa o impacto da camada física no algoritmo SM-RSA, observando assim a eficiência da técnica em um contexto mais próximo da realidade.

#### 4. Modelo de Camada Física

O sinal óptico sofre degradação de qualidade ao ser transmitido, tanto nos dispositivos dos nós da rede, quanto nos próprios enlaces. Esta degradação pode ser dividida em duas classes: Efeitos Lineares (LI – *Linear Impairments*) e Efeitos Não Lineares (NLI – *Nonlinear Impairments*) [Rahbar 2012]. Os Efeitos Lineares são aqueles independentes da potência do sinal, como a Dispersão Cromática (CD - *Chromatic Dispersion*), a Emissão Espontânea Amplificada (ASE - *Amplified Spontaneous Emission*) e a Atenuação da Fibra. Já os Efeitos Não Lineares são dependentes da potência dos sinais ópticos e podem causar interferência tanto no próprio circuito, como nos seus vizinhos. A Auto-Modulação de Fase (SPM - *Self-Phase Modulation*), a Modulação de Fase Cruzada (XPM - *Cross-Phase Modulation*) e Mistura de Quatro Ondas (FWM - *Four-Wave Mixing*) são exemplos de efeitos não lineares.

Na região linear do OFDM óptico, o alcance de transmissão é limitado pelo ruído ASE, enquanto na região não linear ele é limitado pelos efeitos não lineares da fibra tais como o FWM, XPM e SPM [Beyranvand and Salehi 2013]. Os ruídos ASE e NLI são considerados neste trabalho pela adoção do modelo de camada física proposto em [Johannisson and Agrell 2014, Zhao et al. 2015].

Em uma rede óptica elástica, tais efeitos de camada física podem impactar na qualidade do sinal óptico, pois a sua taxa de erro de *bit* (BER – *Bit Error Rate*) pode se tornar intolerável. Neste sentido, se a BER chegar a níveis elevados, a qualidade de transmissão (QoT – *Quality of Transmission*) será impactada, o que poderá gerar um bloqueio por QoT [Beyranvand and Salehi 2013]. Os receptores ópticos possuem uma curva de desempenho que relaciona a SNR (*Signal to Noise Ratio*) diretamente com a BER, portanto, a SNR pode ser usada como critério de QoT de camada física de um circuito óptico.

O cálculo da SNR para um circuito  $i$  usando uma rota  $r_i$  é expresso por:

$$SNR_i = \frac{I}{I_{ASE} + I_{NLI}}. \quad (1)$$

A variável  $I$  é a densidade espectral da potência do sinal (PSD – *Power Spectral Density*),  $I = P_{TX}/\Delta_f$ , em que  $P_{TX}$  é potência de sinal e  $\Delta_f$  é a largura de banda do circuito. A PSD do ruído ASE é dada por:

$$I_{ASE} = \sum_{l \in r_i} N_l I_{ASE}^0, \quad (2)$$

em que  $N_l$  é o número de spans do enlace  $l$  e  $I_{ASE}^0 = (G_{AMP} - 1)Fh\nu$ . A variável  $F$  é o fator de emissão espontânea, que corresponde à metade da figura de ruído (NF – *Noise Figure*) do amplificador [Beyranvand and Salehi 2013],  $h$  é a constante de Planck,  $\nu$  é a frequência da luz e  $G_{AMP}$  é o ganho do amplificador óptico. A PSD do ruído dos efeitos não lineares (NLI – *Nonlinear Impairments*) é dada por:

$$I_{NLI} = \sum_{l \in r_i} N_l I_{NLI}^l, \quad (3)$$

em que  $I_{NLI}^l$ , a PSD do ruído NLI em um único span do enlace  $l$ , é expressa pela Equação 4 [Zhao et al. 2015]:

$$I_{NLI}^l = \frac{3\gamma^2 I^3}{2\pi\alpha|\beta_2|} \left( \operatorname{asinh} \left( \frac{\pi^2 |\beta_2|}{2\alpha} B_i^2 \right) + \sum_j \ln \left[ \left( \Delta_{f_{ij}} + \frac{B_j}{2} \right) / \left( \Delta_{f_{ij}} - \frac{B_j}{2} \right) \right] \right), \quad (4)$$

em que,  $j$  é outro circuito usando o enlace  $l$ ,  $B_i$  e  $B_j$  são, respectivamente, as larguras de bandas para os circuitos  $i$  e  $j$ ,  $\Delta_{f_{ij}}$  é o espaçamento da frequência central entre os circuitos  $i$  e  $j$ ,  $\gamma$  é o coeficiente não linear da fibra,  $\beta_2$  é o parâmetro de dispersão da fibra e  $\alpha$  é a atenuação de potência causada pela fibra.

Caso os níveis de QoT não sejam adequados, a requisição pode ser bloqueada por QoTN ou QoTO [Fontinele et al. 2016]. O QoTN é o bloqueio sofrido caso a nova requisição não atinja os níveis adequados de QoT. Mesmo que uma nova requisição atinja tal requisito, ela ainda poderá sofrer bloqueio caso o estabelecimento da nova requisição impacte na QoT dos circuitos já estabelecidos, ocasionando assim o QoTO. Estes dois tipos de bloqueio serão usados na avaliação de desempenho deste trabalho.

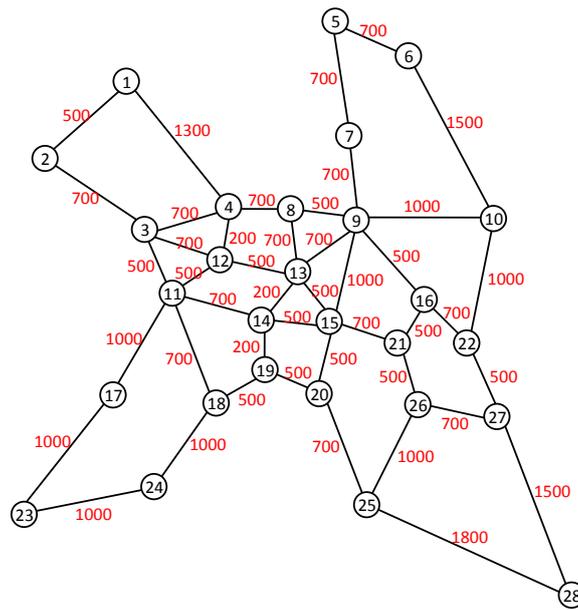
## 5. Avaliação de Desempenho

Para avaliação de desempenho, o algoritmo SM-RSA proposto em [Ruan and Zheng 2014] foi analisado em termos de probabilidade de bloqueio de circuitos em quatro cenários. O primeiro e o segundo cenários usam a topologia NSFNet (14 nós), sendo que no primeiro cenário será negligenciado o impacto da degradação dos efeitos da camada física e no segundo não. Já no terceiro e quarto cenário, a topologia usada será a EON (28 nós), sendo o terceiro sem considerar os impactos dos efeitos da camada física e o quarto com os impactos dos efeitos da camada física.

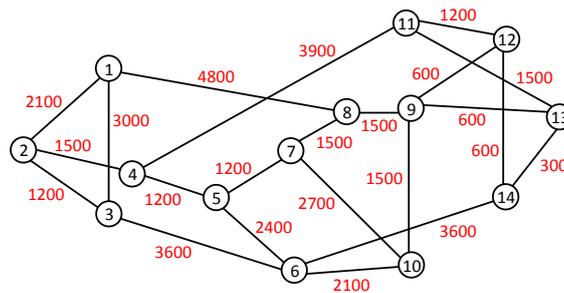
Nos cenários sem considerar os impactos dos efeitos da camada física, a escolha do formato de modulação para uma dada requisição de circuito é feita pelo seu alcance máximo de transmissão, como na maioria dos trabalhos apresentados na literatura [Gong et al. 2013, Talebi et al. 2014, Oliveira and d. Fonseca 2014, Wang et al. 2015c, Ruan and Zheng 2014, Chatterjee et al. 2015]. Já nos cenários que consideram os impactos dos efeitos de camada física, a QoT alcançada para cada formato de modulação é levada em conta para determinar qual deve ser o formato de modulação adequado. Essa estratégia é a mesma aplicado em [Beyranvand and Salehi 2013]. Onde, para uma dada requisição é aplicado cada formato de modulação para a rota seleciona e verifica-se a QoT alcançada para cada formato de modulação. Escolhe-se o formato de modulação com maior eficiência espectral que alcança uma QoT aceitável (SNR acima ou igual ao limiar de SNR exigido pelo formato de modulação).

A técnica de avaliação de desempenho adotada foi a simulação computacional. Foi utilizado o simulador SNetS (*SLICE Network Simulator*) [Santos 2015]. O SNetS é uma ferramenta de simulação desenvolvida para permitir a avaliação de desempenho de redes ópticas elásticas OFDM [Santos 2015]. Informações sobre a validação da ferramenta podem ser encontradas em [Santos 2015].

A Figura 3 mostra as duas topologias usadas neste estudo. O valor apresentado em cada enlace representa a distância do enlace em quilômetros.



(a) EON, 28 nós.



(b) NSFNet, 14 nós.

**Figura 3. Topologias usadas no estudo de avaliação de desempenho. O número em cada enlace corresponde a distância em km.**

Foram geradas 100000 requisições de circuitos em cada simulação. A geração de requisições é um processo de Poisson com taxa média de  $\lambda$  e o tempo médio de retenção dos circuitos é distribuído exponencialmente com média  $1/\mu$ . A carga de tráfego é distribuída uniformemente entre todos os pares de nós origem e destino. A carga em Erlangs pode ser definida por  $\rho = \lambda/\mu$ . Para cada simulação foram realizadas 10 replicações com diferentes sementes de geração de variável aleatória. Todos os resultados possuem nível de confiança de 95%.

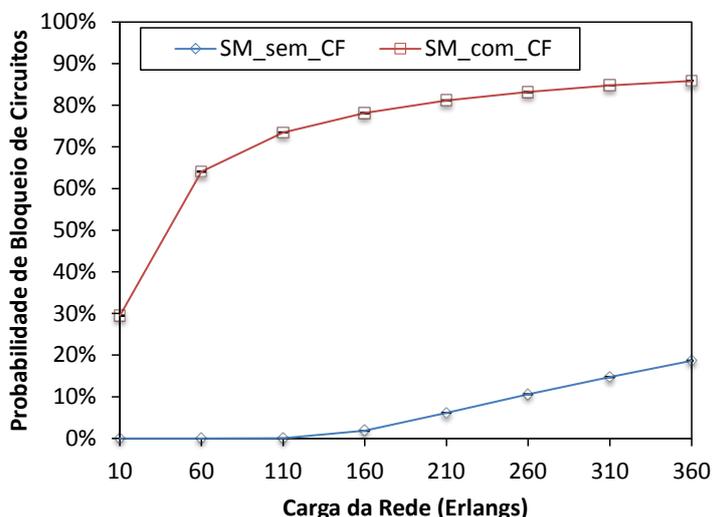
Para o algoritmo SM-RSA, o parâmetro  $q$  foi definido por  $q = 1$ , o que significa um nível de proteção de 100%. O valor de  $N$  foi definido como  $N = 2$ , que significa que para cada requisição serão usados dois caminhos disjuntos para o tráfego das informações. Os requisitos de taxas de *bits* para cada circuito requisitado variam uniformemente entre 10 Gbps, 40 Gbps, 80 Gbps, 100 Gbps, 160 Gbps, 200 Gbps e 400 Gbps. Os formatos de modulação considerados neste estudo foram BPSK, QPSK, 8QAM, 16QAM, 32QAM e 64QAM [Gong et al. 2013]. Todos os enlaces da rede são bidirecionais e possuem largura de banda do espectro dividida em 400 *slots* de frequência [Wang et al. 2015a], [Horota et al. 2014], sendo que cada *slot* de frequência possui largura de banda de 12,5

GHz [Chatterjee et al. 2015]. Outros parâmetros utilizados nas simulações estão listados na Tabela 1 [Beyranvand and Salehi 2013, Zhao et al. 2015]. Os limiares de SNR para cada formato de modulação são 6 dB (BPSK), 9 dB (QPSK), 12 dB (8QAM), 15 dB (16QAM), 18 dB (32QAM) e 21 dB (64QAM) [Beyranvand and Salehi 2013].

**Tabela 1. Parâmetros de camada física utilizados nas simulações.**

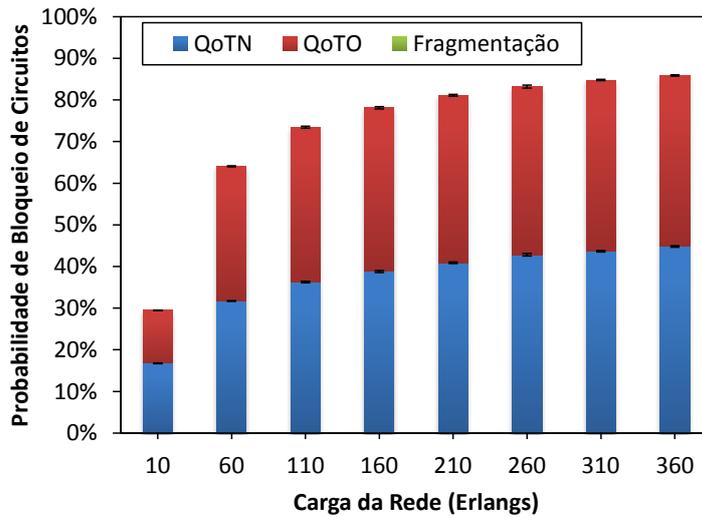
Descrição	Valor
Densidade espectral de potência do sinal	-17 dBm/GHz
Atenuação da fibra	0,2 dB/km
Parâmetro de dispersão da fibra	16 ps <sup>2</sup> /km
Coefficiente não linear da fibra	1,3 (Wkm) <sup>-1</sup>
Tamanho de um span	100 km

A Figura 4 mostra a probabilidade de bloqueio de circuito em função da carga da rede (em erlangs) para o primeiro e o segundo cenário. A nomenclatura SM\_sem\_CF refere-se ao algoritmo SM-RSA sem as restrições de camada física, enquanto SM\_com\_CF refere-se ao algoritmo SM-RSA com as restrições de camada física. Considera-se que uma rede para se tornar praticável operacionalmente deverá possuir no máximo 20% de bloqueio. Ao comparar as duas curvas, podemos observar um aumento expressivo da probabilidade de bloqueio em todos os pontos de carga. No quarto ponto, por exemplo, há um aumento de 77%. Dessa forma, ao inserir camada física a probabilidade de bloqueio cresce de tal forma que a rede torna-se inviável (probabilidade de bloqueio acima de 20%).



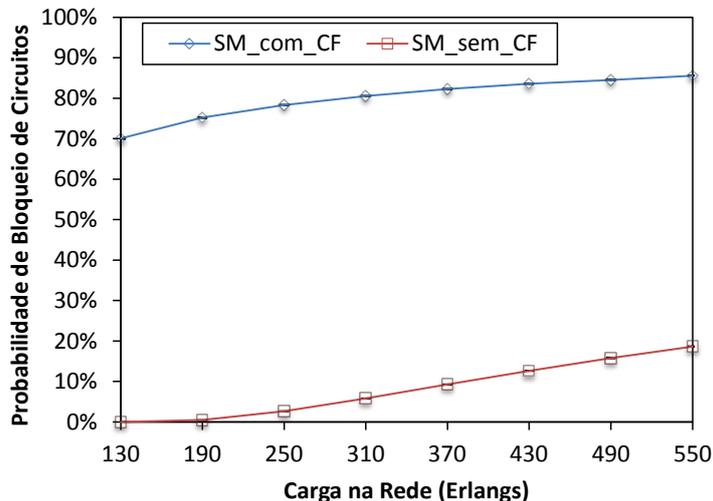
**Figura 4. Valores de probabilidade de bloqueio em relação a carga da rede para a topologia NSFNet.**

A Figura 5 apresenta a composição da probabilidade de bloqueio geral apresentada no cenário com restrições de camada física (segundo cenário). Observa-se que no último ponto de carga (360 erlangs), de um total de 86% de bloqueio, aproximadamente 45% foi causado devido a bloqueio de QoTN, aproximadamente 41% devido a bloqueio de QoT nos outros (QoTO) e menos de 1% devido ao bloqueio de fragmentação. Isto evidencia o peso das restrições de camada física na probabilidade de bloqueio geral da rede.



**Figura 5. Composição da probabilidade de bloqueio geral para a topologia NSF-Net. Destacando os bloqueios QoTN, QoTO e por Fragmentação**

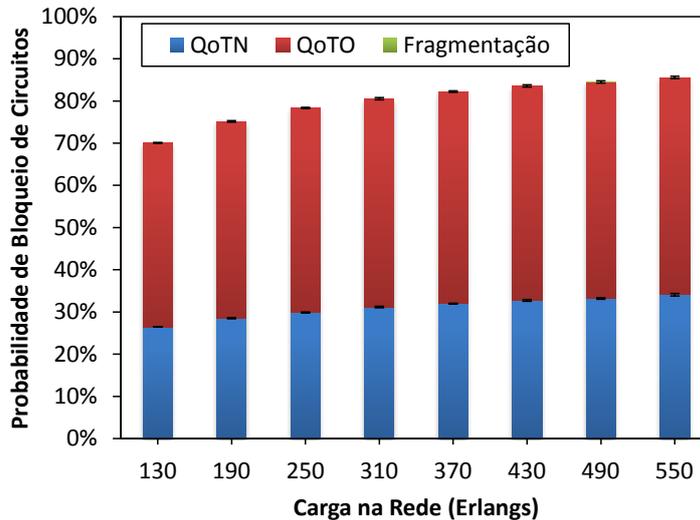
A Figura 6 mostra a probabilidade de bloqueio de circuito para a topologia EON, terceiro e quarto cenário. Podemos observar pela Figura 6 um aumento de máximo aproximado de 75%, na carga de 250 Erlangs, quando consideramos um cenário que apresenta restrições de camada física. No cenário sem as restrições de camada física a grande maioria dos bloqueios ocorre devido à fragmentação do espectro. E a menor parte dos bloqueios ocorre por não existir espectro livre de forma alguma para o estabelecimento do circuito óptico requisitado.



**Figura 6. Valores de probabilidade de bloqueio em relação a carga da rede para a topologia EON.**

A Figura 7 apresenta a composição da probabilidade de bloqueio geral apresentada no cenário com restrições de camada física, quarto cenário. Observa-se que no último ponto de carga (550 erlangs), de um total de 86% de bloqueio, aproximadamente 34% foi causado devido a bloqueio de QoTN, 52 % devido a bloqueio de QoTO e menos de

1% devido ao bloqueio de fragmentação, o que também evidencia o peso das restrições de camada física na probabilidade de bloqueio geral da rede. Assim como ocorreu no segundo cenário, o bloqueio por fragmentação é bem inferior aos bloqueios por QoTN e QoTO. Isto acontece porque os bloqueios por QoTN e QoTO levam a uma baixa utilização da rede, gerando pouca utilização do espectro no enlaces.



**Figura 7. Composição da probabilidade de bloqueio geral para a topologia EON. Destacando os bloqueios QoTN, QoTO e por Fragmentação**

Ao mudar a topologia de rede, observa-se uma inversão no tipo de bloqueio mais impactante. Na topologia NSFNet, temos o bloqueio QoTN sendo o que mais impacta na probabilidade de bloqueio geral, com 47% no ultimo ponto de carga. Já na topologia EON, o bloqueio QoTO aparece como o que mais influencia no desempenho da rede, chegando a taxas de 52%. O tamanho médio das rotas na topologia EON é maior que o tamanho médio das rotas na topologia NSFNet. Circuitos ópticos que tendem a possuir rotas com muitos saltos (ou que percorrem grandes distâncias) são mais propícios a possuírem uma maior probabilidade de bloqueio geral (comporta por fragmentação, QoTN, QoTO e por ausência de espectro livre). Quando circuitos com rotas com muitos saltos são estabelecidos são geradas degradações em uma quantidade maior de circuitos, em comparação a circuitos com rotas com poucos saltos. O estabelecimento de circuitos com rotas com muitos saltos pode levar a uma maior probabilidade de bloqueio por QoTO.

## 6. Conclusões

A principal contribuição deste trabalho é evidenciar o impacto que a degradação de camada física causa no desempenho dos algoritmos RSA tolerante a falhas. Isso porque a grande maioria dos trabalhos relacionados acabam por deixar de lado este cenário. Como as limitações de camada física são inerentes à tecnologia de redes ópticas, é crucial que elas sejam levadas em consideração para que a avaliação de desempenho seja realizada de forma mais fidedigna.

Observou-se que nas duas topologias analisadas, quando inserida as restrições de camada física, a probabilidade de bloqueio teve um aumento considerável. Tal aumento, devido aos bloqueios de QoT, chegou a aproximadamente 77% quando submetido

a 160 erlangs para a topologia NSFNet e aproximadamente 76% quando submetido a 250 erlangs na topologia EON. O que reforça a necessidade de considerar as degradações de camada física no planejamento de redes ópticas elásticas tolerante a falhas.

Para trabalhos futuros vamos analisar o comportamento do algoritmo SM-RSA em cenários que utilize um maior número de caminhos, além de diferentes níveis de tolerância a falhas. Serão avaliados outros algoritmos RSA tolerantes a falha em cenário ciente de camada física, para que se possa identificar de forma mais concisa o impacto causado pelas restrições de camada física. Além de propor um novo algoritmo RSA que garanta disponibilidade e sofra menos impacto das restrições de camada física, para que seja garantida baixas taxas de probabilidade de bloqueio na rede.

## Referências

- Amar, D., Rouzic, E. L., Brochier, N., and Lepers, C. (2015). Multilayer restoration in elastic optical networks. In *2015 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, pages 239–244.
- Beyranvand, H. and Salehi, J. (2013). A quality-of-transmission aware dynamic routing and spectrum assignment scheme for future elastic optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, 31(18):3043–3054.
- Chatterjee, B., Sarma, N., and Oki, E. (2015). Routing and spectrum allocation in elastic optical networks: A tutorial. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 17(3):1776–1800.
- Chen, X., Zhu, S., Chen, D., Hu, S., Li, C., and Zhu, Z. (2015). On efficient protection design for dynamic multipath provisioning in elastic optical networks. In *2015 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, pages 251–256.
- Christodoulopoulos, K., Tomkos, I., and Varvarigos, E. A. (2011). Elastic bandwidth allocation in flexible ofdm-based optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, 29(9):1354–1366.
- Fontinele, A., Santos, I., Durães, G., and Soares, A. (2016). Achievement of fair and efficient regenerator allocations in translucent optical networks using the novel regenerator assignment algorithm. *Optical Switching and Networking*, 19, Part 1:22 – 39.
- Gong, L., Zhou, X., Liu, X., Zhao, W., Lu, W., and Zhu, Z. (2013). Efficient resource allocation for all-optical multicasting over spectrum-sliced elastic optical networks. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 5(8):836–847.
- Horota, A., Figueiredo, G., and Fonseca, N. (2014). Algoritmo de roteamento e atribuição de espectro com minimização de fragmentação em redes ópticas elásticas. *XXXII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*.
- Ji, F., Chen, X., Lu, W., Rodrigues, J. J. P. C., and Zhu, Z. (2013). Dynamic p-cycle configuration in spectrum-sliced elastic optical networks. In *2013 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pages 2170–2175.
- Jinno, M., Takara, H., Kozicki, B., Tsukishima, Y., Sone, Y., and Matsuoka, S. (2009). Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: architecture, benefits, and enabling technologies. *IEEE Communications Magazine*, 47(11):66–73.

- Johannisson, P. and Agrell, E. (2014). Modeling of nonlinear signal distortion in fiber-optic networks. *Journal of Lightwave Technology*, 32(23):4544–4552.
- Oliveira, H. M. N. S. and d. Fonseca, N. L. S. (2014). Protection in elastic optical networks against up to two failures based fipp p-cycle. In *2014 Brazilian Symposium on Computer Networks and Distributed Systems (SBRC)*, pages 369–375.
- Rahbar, A. G. (2012). Review of dynamic impairment-aware routing and wavelength assignment techniques in all-optical wavelength-routed networks. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 14(4):1065–1089.
- Ramaswami, R. and Sivarajan, K. N. (2009). *Optical Network - A Practical Perspective*. Morgan Kaufmann Publishers, 3th edition.
- Ruan, L. and Zheng, Y. (2014). Dynamic survivable multipath routing and spectrum allocation in ofdm-based flexible optical networks. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 6(1):77–85.
- Santos, I. (2015). *Alocação de Recursos para o Estabelecimento de Circuitos em Redes Ópticas WDM e OFDM*. Universidade Federal do Piauí, Teresina.
- Shen, G., Wei, Y., and Bose, S. K. (2014). Optimal design for shared backup path protected elastic optical networks under single-link failure. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 6(7):649–659.
- Talebi, S., Alam, F., Katib, I., Khamis, M., Salama, R., and Rouskas, G. N. (2014). Spectrum management techniques for elastic optical networks: A survey. *Optical Switching and Networking*, 13:34 – 48.
- Wang, C., Shen, G., and Bose, S. K. (2015a). Distance adaptive dynamic routing and spectrum allocation in elastic optical networks with shared backup path protection. *Journal of Lightwave Technology*, 33(14):2955–2964.
- Wang, C., Shen, G., Chen, B., and Peng, L. (2015b). Protection path-based hitless spectrum defragmentation in elastic optical networks: Shared backup path protection. In *2015 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, pages 1–3.
- Wang, X., Brandt-Pearce, M., and Subramaniam, S. (2015c). Impact of wavelength and modulation conversion on translucent elastic optical networks using milp. *J. Opt. Commun. Netw.*, 7(7):644–655.
- Wei, Y., Shen, G., and Bose, S. K. (2014). Span-restorable elastic optical networks under different spectrum conversion capabilities. *IEEE Transactions on Reliability*, 63(2):401–411.
- Wu, J., Liu, Y., Yu, C., and Wu, Y. (2014). Survivable routing and spectrum allocation algorithm based on p-cycle protection in elastic optical networks. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 125(16):4446 – 4451.
- Zhao, J., Wymeersch, H., and Agrell, E. (2015). Nonlinear impairment-aware static resource allocation in elastic optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, 33(22):4554–4564.