

## Proteção Dedicada para Redes Ópticas Elásticas Considerando Efeitos de Camada Física

Jurandir Lacerda Jr<sup>1,2</sup>, Alexandre Fontinele<sup>3</sup>, Divanilson Campelo<sup>3</sup>, André Soares<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí - IFPI  
Corrente – PI – Brasil

<sup>2</sup>Departamento de Computação  
Universidade Federal do Piauí - UFPI  
Teresina – PI – Brasil

<sup>3</sup>Centro de Informática - CIn  
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

jurandir.cavalcante@ifpi.edu.br

**Abstract.** *Elastic Optical Network is a promising technology to compose the Internet infrastructure. For this network it is necessary to provide mechanisms that guarantee its availability even after the occurrence of a failure. It is also important to provide quality of the optical signal, which tends to degrade by the effect of the physical layer impairments. This paper proposes three algorithms that use the dedicated path protection strategy: DP-SNR, DP-BSNR and DP-RQoTO. These algorithms take into account the effects of physical layer impairments in their choices of routes. An evaluation was made with dynamic traffic and requisitions with variable band demands. The three algorithms presented in this paper were compared with other literature proposals, obtaining a reduction in the blocking probability in the order of 90%. Among the proposed algorithms, the DP-RQoTO obtained a decrease in the blocking probability of at least 36% in relation to the DP-SNR and 34% in the DP-BSNR in the EON topology. In the USA topology, the minimum gain of DP-RQoTO was 22% in relation to DP-SNR and 20% in relation to DP-BSNR.*

**Resumo.** *A Rede Óptica Elástica é uma tecnologia promissora para compor a infraestrutura do núcleo da Internet. Para este tipo de rede é necessário prover mecanismos que garantam a sua disponibilidade mesmo após a ocorrência de uma falha. Também é importante garantir a qualidade do sinal óptico, que tende a se degradar pelos efeitos de camada física. Este trabalho propõe três algoritmos que utilizam a estratégia de proteção dedicada de caminho: DP-SNR, DP-BSNR e DP-RQoTO. Tais algoritmos levam em consideração os efeitos de camada física nas escolhas de suas rotas. Foi realizada uma avaliação de desempenho com tráfego dinâmico e requisições com demandas de banda variáveis. Os três algoritmos apresentados neste artigo foram comparados com outras propostas da literatura, obtendo uma diminuição da probabilidade de bloqueio na ordem de 90%. Entre os algoritmos propostos, o DP-RQoTO obteve uma diminuição na probabilidade de bloqueio de no mínimo 36% em relação ao DP-SNR e de 34% para o DP-BSNR na topologia EON. Na topologia USA, o ganho mínimo do DP-RQoTO foi de 22% em relação ao DP-SNR e 20% em relação ao DP-BSNR.*

## 1. Introdução

O crescimento do número de aplicações que fazem uso da Internet vem exigindo maior eficiência das tecnologias adotadas na sua infraestrutura. Aplicações como *Stream* de áudio ou vídeo inserem uma quantidade de dados substancial na rede. Desta forma, é necessário um esforço da comunidade científica para propor melhorias nas redes de transporte. A rede óptica é a principal tecnologia para suportar tal demanda [Chatterjee et al. 2015].

Recentemente a tecnologia *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) vem sendo apontada como solução mais eficiente de multiplexação para redes ópticas de transporte. As redes ópticas de transporte que fazem uso da multiplexação OFDM são denominadas de *Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Network* (SLICE) ou redes ópticas elásticas [Jinno et al. 2009]. A rede óptica elástica proporciona uma maior eficiência no uso dos recursos ópticos, se comparada as atuais redes que adotam a tecnologia *Wavelength Division Multiplexing* (WDM). Tal eficiência é alcançada devido a divisão do espectro ópticos em pequenos intervalos denominados *slots* [Jinno et al. 2009].

No contexto das redes ópticas elásticas, um dos principais desafios é o problema *Routing, Modulation Level, and Spectrum Allocation* (RMLSA) [Costa and Drummond 2016] [Christodoulopoulos et al. 2011]. Tal problema consiste em realizar o roteamento e a alocação de espectro (alocação de um conjunto de *slots*), além da escolha do formato de modulação de maneira adaptativa.

A tolerância à falhas é uma capacidade fundamental no âmbito das redes ópticas elásticas. Essa capacidade é também conhecida como sobrevivência. Portanto, as operadoras fazem uso de técnicas de sobrevivência na tentativa de garantir o funcionamento da rede mesmo após a ocorrência de uma eventual falha.

Outro desafio no planejamento e operação da rede óptica elástica é reduzir os impactos das imperfeições de camada física na qualidade do sinal óptico. Apesar dos diferentes estudos da sobrevivência em redes ópticas e dos efeitos de camada física, são poucos os trabalhos que avaliam as técnicas de sobrevivência considerando as limitações de camada física em redes ópticas elásticas. Conforme demonstrado em [Lacerda Jr et al. 2016a, Lacerda Jr et al. 2016b], o uso de técnicas de sobrevivência sem considerar os efeitos de camada física ocasiona uma alta probabilidade de bloqueio de circuitos. O objetivo deste artigo é propor e avaliar três algoritmos RMLSA com proteção dedicada de caminho ciente dos efeitos de camada física.

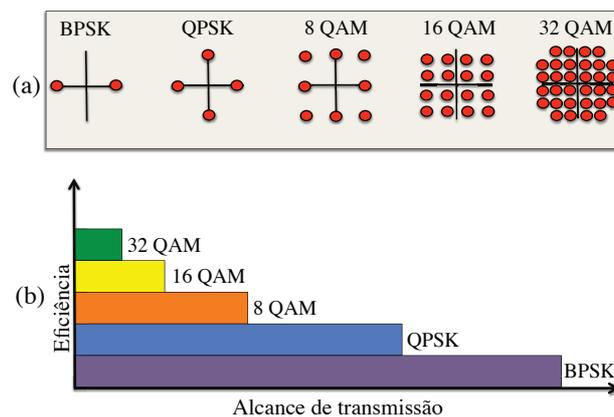
O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta os principais conceitos sobre as redes ópticas elásticas. A Seção 3 discute algumas técnicas de sobrevivência para este tipo de rede. A Seção 4 apresenta os problemas de camada física relevantes no contexto das redes ópticas elásticas. A Seção 5 apresenta os três algoritmos propostos neste trabalho. Já na Seção 6 é feita uma avaliação de desempenho dos algoritmos propostos e os comparam com outros dois algoritmos de sobrevivência. Por fim, na Seção 7 são apresentadas as conclusões deste trabalho.

## 2. Redes Ópticas Elásticas

A tecnologia OFDM potencializa a eficiência espectral das redes ópticas elásticas [Jinno et al. 2009]. Em uma rede de transporte OFDM, a divisão do espectro óptico é

feita em pequenos canais de comunicação, conhecidos como *slots* de frequência. Um conjunto destes *slots* é usado para o estabelecimento de um circuito óptico. Devido esta divisão de menor granularidade, os recursos são usados de forma mais eficientes, evitando desperdícios [Horota et al. 2014]. Este trabalho tem foco nas redes ópticas elásticas transparentes. Neste tipo de rede, todo o roteamento é feito no domínio óptico, dispensando o uso de conversores *Óptico-Eletró-Óptico* (OEO).

A quantidade de *slots* que cada circuito usa é definido pelo formato de modulação adotado. A modulação é a forma de representação das informações digitais do canal óptico em sinais que representam os *bits* [Tanenbaum and Wetherall 2011]. Em uma rede óptica elástica, para cada circuito deve ser escolhido o formato de modulação mais adequado. Alguns formatos de modulação tem a capacidade de transportar mais bits por símbolo, como por exemplo a 32QAM. Devido a sua densidade de informação, tais formatos de modulação estão mais suscetíveis a erros em rotas longas. Já os formatos de modulação mais simples, como a BPSK, são mais indicados para este tipo de rota. A Figura 1 exemplifica alguns formatos de modulação.



**Figura 1. Exemplo de modulação.**

A Figura 1 (a) mostra de forma simplista a quantidade de *bits* por símbolo que os formatos de modulação BPSK, QPSK, 8QAM, 16 QAM e 32QAM utilizam. A modulação 32QAM, apesar de ter uma maior eficiência espectral, está mais sujeita a erros durante a propagação do sinal ao longo da rota. O comportamento da relação entre eficiência óptica e alcance de transmissão pode ser exemplificada na Figura 1 (b).

Nas redes ópticas elásticas, o problema *Routing, Modulation Level, and Spectrum Allocation* RMLSA consiste em: (i) definir uma rota para um par de nós origem e destino; (ii) selecionar um formato de modulação que transporte mais *bits* por símbolo mas percorra toda a rota respeitando a qualidade do sinal óptico exigida pela rede; (iii) alocar uma faixa de espectro livre na rota definida para estabelecer o circuito óptico. A quantidade de *slots* é definida com base na largura de banda requisitada e na eficiência espectral do formato de modulação escolhido.

Para estabelecer um circuito na rede óptica elástica transparente, o algoritmo RMLSA deve obedecer duas restrições: (i) contiguidade espectral, que estabelece que os *slots* de um circuito devem ser adjacentes entre si; (ii) continuidade espectral, que define

que tal conjunto de *slots* seja o mesmo em todos os enlaces da rota. Tais restrições devem ser respeitadas pelos algoritmos RMLSA, caso contrário o novo circuito não poderá ser estabelecido, ocasionando um bloqueio.

### 3. Sobrevivência em Redes Ópticas Elásticas

As redes ópticas elásticas permitem transportar grandes volumes de informações e fornecem serviços para aplicações que exigem rigorosos requisitos. Além da sensibilidade ao atraso e a interrupções de suas conexões, estas aplicações geralmente funcionam 24 horas por dia, exigindo uma alta disponibilidade de serviços da rede. A falha de um enlace da rede óptica representa a interrupção de todos os circuitos ópticos que utilizam tal enlace. Isto pode provocar a perda de uma grande quantidade de informações e a parada de serviços críticos. Diante disto, as redes ópticas elásticas precisam implementar mecanismos para garantir que suas conexões sejam recuperadas de maneira rápida e eficiente. Esta capacidade de continuar operando na eventualidade de ocorrência de falhas é conhecida como sobrevivência em redes ópticas.

Diferentes autores vem propondo e avaliando técnicas de sobrevivência em redes ópticas [Ruan and Zheng 2014, Shen et al. 2014, Wei et al. 2014, Amar et al. 2015, Chen et al. 2015, Wang et al. 2015, Shen et al. 2016]. Tais técnicas de sobrevivência podem ser classificadas em: proteção ou restauração.

A proteção é uma técnica proativa, que consiste na computação e reserva prévia de recursos redundantes antes da ocorrência de falhas. Tais recursos redundantes somente serão efetivamente utilizados para recuperar uma eventual falha. A proteção dedicada e a proteção compartilhada são as duas principais formas de prover a proteção. Na proteção dedicada, ao se alocar a rota primária, denominada rota de trabalho, também é alocada uma rota de *backup* de igual capacidade. Já na proteção compartilhada, a rota de *backup* é compartilhada entre outras requisições disjuntas entre si. Isso diminui o desperdício no uso dos recursos da rede.

A restauração é uma técnica reativa, que trata a falha apenas após o acontecimento da mesma. A restauração apesar de ter uma economia de recursos em relação a proteção, não consegue garantir que haverá recursos livres no momento da falha para alocar uma segunda rota. A Figura 2 mostra o funcionamento da proteção e da restauração.

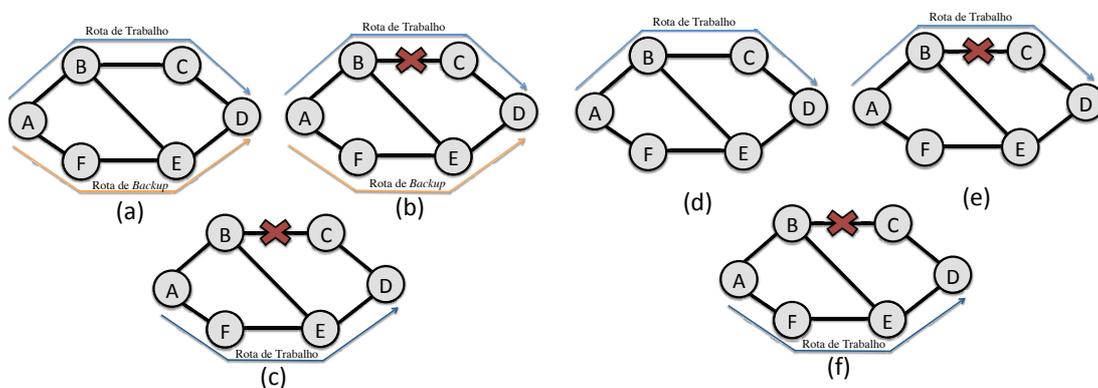


Figura 2. Exemplo de proteção dedicada e restauração dinâmica.

Na Figura 2 (a), (b) e (c) temos um exemplo de proteção dedicada, onde no momento de alocação do circuito (Figura 2(a)), são alocadas duas rotas: a rota de trabalho (A-B-C-D) e a rota de *backup* (A-F-E-D). A rota de trabalho é usada para o fluxo normal das informações e a rota de *backup* será usada caso algum enlace da rota de trabalho falhe. No momento exemplificado na Figura 2(b), ocorre uma falha no enlace B-C, que faz parte da rota de trabalho. Para a rede continuar operante, automaticamente o recurso alocado como *backup* passa a funcionar como a nova rota de trabalho, como mostrado na Figura 2(c). Já na restauração, exemplificada na Figura 2 (d), (e) e (f), no momento da alocação da rota de trabalho (Figura 2(d)), nenhuma rota de *backup* é alocada. No momento da falha, mostrado na Figura 2(e), o algoritmo de restauração irá entrar em ação e buscar uma rota alternativa, como mostra a Figura 2(f). Caso não exista recursos livres, a conexão será perdida. Devido a maior garantia de sobrevivência, a proteção é a classe de técnicas abordada por este trabalho. Em específico, a proteção dedicada.

#### 4. Efeitos de Camada Física

Naturalmente, ocorre uma degradação da qualidade do sinal óptico durante sua propagação. Isso ocorre devido aos efeitos de camada física, tanto nos dispositivos dos nós da rede, quanto nos próprios enlaces. A literatura classifica tais degradações em: efeitos lineares (*Linear Impairments* - LI) e efeitos não lineares (*Nonlinear Impairments* - NLI) [Rahbar 2012]. Os Efeitos Lineares são aqueles independentes da potência do sinal. A Dispersão Cromática (*Chromatic Dispersion* - CD), a Emissão Espontânea Amplificada (*Amplified Spontaneous Emission* - ASE) e a Atenuação da Fibra são efeitos desta categoria. Já os Efeitos Não Lineares são dependentes da potência dos sinais ópticos e podem causar interferências tanto no próprio circuito, como nos seus vizinhos. A Auto-Modulação de Fase (*Self-Phase Modulation* - SPM), a Modulação de Fase Cruzada (*Cross-Phase Modulation* - XPM) e a Mistura de Quatro Ondas (*Four-Wave Mixing* - FWM) são exemplos de efeitos não lineares.

Durante a transmissão de um sinal, quanto maior a distância percorrida deste na fibra, maior será a atenuação da potência do sinal. Isso ocorre de tal forma que gera uma necessidade em amplificar o sinal óptico para que este restabeleça sua potência e assim possa ser detectado no destino. Usualmente, a amplificação óptica é realizada pelo equipamento amplificador *Erbium Doped Fiber Amplifier* (EDFA). Amplificadores EDFA introduzem, naturalmente, o ruído ASE [Saradhi and Subramaniam 2009]. Este trabalho considera o ruído ASE.

Além disso, são considerados a ocorrência dos efeitos SPM, XPM e FWM. O SPM ocorre porque o índice de refração da fibra possui uma componente dependente da intensidade. Isso provoca um deslocamento da fase induzida que é proporcional à intensidade do pulso e faz com que diferentes partes do pulso sofram diferentes deslocamentos de fase [Ramaswami and Sivarajan 2009]. O XPM é o deslocamento de fase de um sinal causado pelas flutuações de intensidade de outros canais que compartilham a mesma fibra a diferentes frequências ópticas. Esse efeito pode ser reduzido aumentando o espaçamento entre os circuitos ou fazendo com que circuitos operem a taxas de bits diferentes [Saradhi and Subramaniam 2009]. Por fim, o FWM ocorre pela ação não linear entre três frequências ópticas que dão origem a uma quarta frequência. Caso a quarta frequência seja igual ou próxima a uma das outras três, esse sinal interferirá na largura de banda do circuito [Saradhi and Subramaniam 2009]. Considerar esses quatro efeitos está

em consonância com o que a literatura trata. Para este trabalho utilizaremos o 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* (*Bit Error Rate* - BER) pode se tornar intolerável. Neste sentido, se a BER chegar a níveis elevados, a qualidade de transmissão (*Quality of Transmission* - QoT) será impactada. Com isso, poderá gerar um bloqueio por QoT [Beyranvand and Salehi 2013]. Os receptores ópticos possuem uma curva de desempenho que associa a relação sinal ruído (*Signal to Noise Ratio* - SNR) diretamente com a BER, portanto, a SNR pode ser usada como critério de QoT de camada física de um circuito óptico. Detalhamentos sobre o cálculo de SNR adotado neste trabalho pode ser encontrado em [Johannisson and Agrell 2014, Zhao et al. 2015].

Caso os níveis de SNR não sejam adequados, a requisição pode ser bloqueada por QoTN (QoT no novo circuito) ou QoTO (QoT nos outros circuitos já estabelecidos) [Fontinele et al. 2016a]. 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 são considerados na avaliação de desempenho deste trabalho.

## 5. Algoritmos Propostos

Neste artigo, são propostos três algoritmos RMLSA com proteção dedicada de caminho ciente dos efeitos de camada física: (i) *Dedicated Protection with evaluation of SNR* (DP-SNR); (ii) *Dedicated Protection with evaluation of the Best SNR* (DP-BSNR); e (iii) *Dedicated Protection with Reduction of QoTO* (DP-RQoTO).

---

### Algoritmo 1 : DP-SNR

---

```

1: Computa  $K$  menores caminhos para par (Origem, Destino)
2:  $i = 0$ 
3: Calcula a Modulação e faixa de slots para a rota  $K_i$ 
4: if existe rota disjunta para a rota  $K_i$  then
5:   Calcula modulação e faixa de slots para a rota disjunta da rota  $K_i$ 
6:    $Info_{trabalho}$  = Informações de rota, modulação, slots referente a  $K_i$ 
7:    $Info_{backup}$  = Informações de rota, modulação, slots referente a rota disjunta da
   rota  $K_i$ 
8:   if  $SNR$  de  $Info_{trabalho}$  e  $Info_{backup}$  estão de acordo com os respectivos limiares
   dos formatos de modulação then
9:     return  $Info_{trabalho}$  e  $Info_{backup}$ 
10:  end if
11: end if
12:  $i++$ 
13: if  $i = K$  then
14:   return null
15: else
16:   Volte para a linha 3
17: end if

```

---

O algoritmo DP-SNR é uma evolução direta da proteção dedicada de caminho. A proteção dedicada de caminho tradicional busca encontrar duas rotas disjuntas. A primeira destas rotas é escolhida como rota de trabalho e a segunda como rota de *backup*. Ao escolher tais rotas, o DP-SNR analisa se os níveis de SNR estão de acordo com o limiar preestabelecido para o formato de modulação selecionado. Caso o SNR de uma rota candidata não esteja de acordo, a mesma será descartada e o algoritmo irá testar a rota seguinte. O DP-SNR irá buscar rotas até achar um par de rotas (trabalho e *backup*) que tenham limiares de SNR em concordância com os exigidos pelos formatos de modulação selecionados para as respectivas rotas, como é exemplificado no Algoritmo 1.

---

**Algoritmo 2 : DP-BSNR**


---

```

1:  $Info_{trabalho} = null$ 
2:  $Info_{backup} = null$ 
3: Computa  $K$  menores caminhos para par ( $Origem, Destino$ )
4: for (int  $i = 0; i < K; i++$ ) do
5:   Calcula a Modulação e faixa de  $slots$  para a rota  $K_i$ 
6:   if existe rota disjunta para a rota  $K_i$  then
7:     Calcula modulação e faixa de  $slots$  para a rota disjunta da rota  $K_i$ 
8:     if SNR da rota  $K_i$  e da rota disjunta da rota  $K_i$  estão de acordo com os respectivos limiares dos formatos de modulação e rota  $K_i$  tem valor de SNR melhor que  $Info_{trabalho}$  e rota disjunta da rota  $K_i$  tem valor de SNR melhor que  $Info_{backup}$  then
9:        $Info_{trabalho} =$  Informações de rota, modulação,  $slots$  referente a  $K_i$ 
10:       $Info_{backup} =$  Informações de rota, modulação,  $slots$  referente a rota disjunta da rota  $K_i$ 
11:     end if
12:   end if
13: end for
14: return  $Info_{trabalho}$  e  $Info_{backup}$ 

```

---

O algoritmo DP-BSNR é semelhante ao DP-SNR. Entretanto o DP-BSNR busca a melhor rota dentro de um conjunto de menores rotas, como mostrado no Algoritmo 2. O algoritmo irá selecionar um conjunto de  $k$  menores rotas de trabalho e, para cada uma destas rotas de trabalho, calcular uma rota disjunta (*backup*). O DP-BSNR irá percorrer todo o conjunto  $k$  e selecionar a rota com maior qualidade de sinal com base no valor de SNR. A rota de  $k$  selecionada será definida como rota de trabalho e sua respectiva rota disjunta será usada como *backup*.

O algoritmo DP-RQoTO é uma evolução do algoritmo KSP-RQoTO (*K-Shortest Path with Reduction of QoTO*), proposto em [Fontinele et al. 2016b]. O KSP-RQoTO é um algoritmo RMLSA ciente de camada física mas não provê sobrevivência, já o DP-RQoTO é capaz de garantir sobrevivência e tratar efeitos de camada física. O DP-RQoTO computa os  $k$  menores caminhos para cada par de nós origem e destino da rede em uma fase *off-line*. No momento que a rede está em operação, o algoritmo proposto busca alocar uma das  $k$  rotas alternativas de forma a minimizar o bloqueio do tipo QoTO (QoT inadequada para os outros circuitos ópticos já ativos na rede). Para isso, é exigido um limiar de SNR acima do limiar exigido pelo formato de modulação selecionado para um

determinada rota. Este valor de limiar adicional é chamado de  $\sigma$ . A adição do valor  $\sigma$  ajuda a selecionar um formato de modulação que torna o circuito em estabelecimento mais resistente a interferências de outros circuitos, que podem ser os já ativos ou que serão estabelecidos.

---

**Algoritmo 3 : DP-RQoTO**


---

```

1:  $Info_{trabalho} = null$ 
2:  $Info_{backup} = null$ 
3:  $M =$  Formatos de modulação em ordem crescente de eficiência espectral
4: Computa  $K$  menores caminhos para par ( $Origem, Destino$ )
5: for (int  $i = 0; i < K; i++$ ) do
6:   for (int  $j = 0; j < M; j++$ ) do
7:     if existe espectro livre e a QoT está aceitável para a rota  $K_i$  then
8:       Computa o  $\Delta SNR_{mod}$  e atribui como avaliação da modulação  $M_j$ 
9:     end if
10:  end for
11:  Seleciona o formato de modulação com  $\Delta SNR_{mod} \geq \sigma$  para a rota  $K_i$ 
12:  Calcula a faixa de  $slots$  para a rota  $K_i$ 
13:  if existe rota disjunta para a rota  $K_i$  then
14:    for (int  $j = 0; j < M; j++$ ) do
15:      if existe espectro livre e a QoT está aceitável para a rota disjunta da rota  $K_i$ 
16:        then
17:          Computa o  $\Delta SNR_{mod}$  e atribuí como avaliação do formato de modulação
18:             $M_j$ 
19:          end if
20:        end for
21:      Seleciona o formato de modulação com  $\Delta SNR_{mod} \geq \sigma$  para a rota disjunta da
22:        rota  $K_i$ 
23:      Calcula a faixa de slots para a rota disjunta da rota  $K_i$ 
24:      if SNR da rota  $K_i$  e da rota disjunta da rota  $K_i$  estão de acordo com os respectivos
25:        limiares dos formatos de modulação e o índice de  $slot$  para a rota  $K_i$  é menor que
26:        o índice de  $slot$  da  $Info_{trabalho}$  e o índice de  $slot$  para a rota disjunta da rota  $K_i$  é
27:        menor que o índice de  $slot$  da  $Info_{backup}$  then
28:         $Info_{trabalho} =$  Informações de rota, modulação,  $slots$  referente a rota  $K_i$ 
29:         $Info_{backup} =$  Informações de rota, modulação,  $slots$  referente a rota disjunta a
30:           $K_i$ 
31:      end if
32:    end for
33:  end if
34: end for
35: return  $Info_{trabalho}$  e  $Info_{backup}$ 

```

---

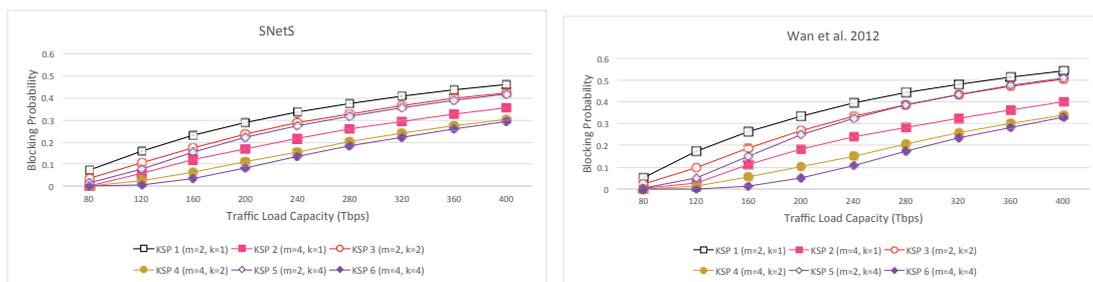
Como apresentado no Algoritmo 3, o DP-RQoTO também tenta selecionar um formato de modulação para a rota de *backup* que permita estabelecer circuitos mais resistentes a interferências de outros circuitos. Para isso, o algoritmo busca selecionar formatos de modulação que possuem valor de  $\Delta SNR$  que respeite a margem de segurança ( $\sigma$ ). O valor do  $\sigma$  é definido previamente na fase de planejamento da rede, como é discutido

na Seção 6. Caso nenhum formato de modulação respeite o  $\sigma$  é selecionado o formato de modulação com a maior eficiência espectral que for possível estabelecer o circuito.

## 6. Avaliação de Desempenho

Para o estudo de avaliação de desempenho deste trabalho, foi utilizado o simulador *SLICE Network Simulator* (SNetS) [Santos 2015]. O SNetS é uma ferramenta de simulação desenvolvida para a avaliação de desempenho de redes ópticas elásticas OFDM [Santos 2015].

Para reforçar os resultados deste trabalho, também foi realizado um estudo de validação do simulador SNetS. Tal estudo é importante para comprovar que o simulador, de fato, reproduz os comportamentos e resultados que estão de acordo com outros trabalhos apresentados pela literatura. Para a realização deste estudo de validação, foram realizadas simulações de seis algoritmos distintos, apresentados em [Wan et al. 2012]. Para a realização de tais simulações, foram usados os mesmos parâmetros e a mesma modelagem definidos em [Wan et al. 2012]. Os resultados destas simulações apresentaram semelhanças aos obtidos em [Wan et al. 2012], como mostra a Figura 3.

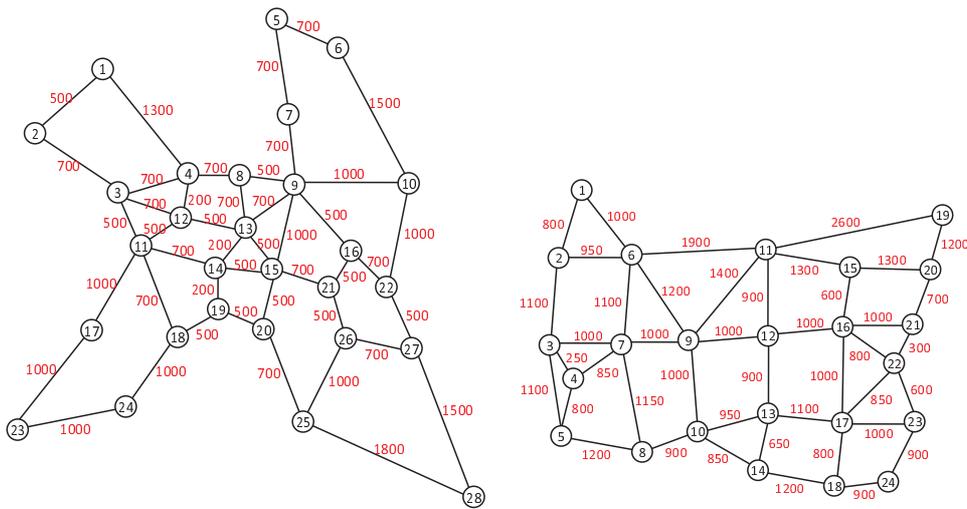


**Figura 3. Probabilidade de bloqueio do KSP obtido pelo SNetS e em [Wan et al. 2012].**

A partir dos gráficos da Figura 3, observa-se que o comportamento dos seis algoritmos, que são variações da técnica KSP (*K Shortest Path*), têm tanto o seu comportamento quanto os seus valores similares aos resultados obtidos em [Wan et al. 2012]. Esta semelhança é um forte indicio de que o simulador SNetS reproduz um resultado condizente com outros simuladores usados na literatura.

Para as simulações deste trabalho, 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%. As topologias consideradas nas simulações são a EON e a USA (Figura 4). O valor apresentado em cada enlace da topologia indica a distância do enlace em km.

Os requisitos de taxas de bits para cada circuito requisitado variam uniformemente entre 10, 40, 80, 100, 160, 200 e 400 Gbps. Os formatos de modulação considerados neste estudo foram BPSK, QPSK, 8QAM, 16QAM, 32QAM e 64QAM, seus respectivos limites de SNR são 6 dB, 9 dB, 12 dB, 15 dB, 18 dB e 21 dB [Beyranvand and Salehi 2013].



**Figura 4. Topologia EON e USA.**

Os respectivos níveis dos formatos de modulação são 2, 3, 4, 5, 6 e 7. Para se calcular a largura de banda de uma requisição  $i$  para uma dada taxa de bits  $B_n$ , com nível de modulação  $L_m$  e sobrecarga de FEC (*Forward Error Correction*)  $F$ , é utilizada a Equação 1 [Gao et al. 2014]:

$$B_i = \frac{1.1B_n(1 + F)}{2 \log_2 L_m}. \tag{1}$$

Em seguida, encontra-se um número inteiro de slots de frequência que cubra a largura de banda requisitada acrescentada da banda de guarda. Neste estudo, foi considerada uma FEC de 7%, que corresponde a um limiar de BER de  $3,8 \times 10^{-3}$  [Gao et al. 2014].

Todos os enlaces da rede são bidirecionais e possuem largura de banda do espectro dividida em 400 slots de frequência. Um slot de frequência possui largura de banda de 12,5 GHz e a banda de guarda possui largura de banda de 6,25 GHz [Gao et al. 2014]. Os ganhos dos amplificadores são ajustados para compensar as perdas dos dispositivos e da fibra. Outros parâmetros utilizados nas simulações estão listados na Tabela 1 [Beyranvand and Salehi 2013, Zhao et al. 2015].

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

Descrição	Valor
Densidade espectral de potência do sinal	-17 dBm/GHz
Atenuação da fibra ( $\alpha$ )	0,2 dB/km
Parâmetro de dispersão da fibra ( $\beta_2$ )	16 ps <sup>2</sup> /km
Coefficiente não linear da fibra ( $\gamma$ )	1,3 (Wkm) <sup>-1</sup>
Tamanho de um span ( $L_s$ )	100 km
Figura de ruído do amplificador ( $NF$ )	6 dB
Potência de saturação do amplificador ( $P_{SAT}$ )	16 dBm

Neste cenário, os algoritmos DP-SNR, DP-BSNR e DP-RQoTO foram comparados com os algoritmos de Proteção Dedicada de Caminho (*Dedicated Protection* -

DP) e o algoritmo *Survivable Multipath Routing and Spectrum Allocation* (SM-RSA) [Ruan and Zheng 2014]. O algoritmo SM-RSA pode ser configurado para trabalhar com um nível de sobrevivência variado. Para este trabalho, o SM-RSA foi analisado com exigências de sobrevivência de 100%, para que esteja de acordo com os demais algoritmos. Também foi realizado um estudo para decidir qual o valor de  $\sigma$  ideal para o algoritmo DP-RQoTO. A partir deste estudo, foi definido que o valor ideal para este cenário é  $\sigma = 0.3$ . Por questões de adequação ao limite de páginas, a análise do  $\sigma$  não será mostrada neste artigo. A Figura 5 apresenta os resultados, em termos de probabilidade de bloqueio, para a topologia EON.

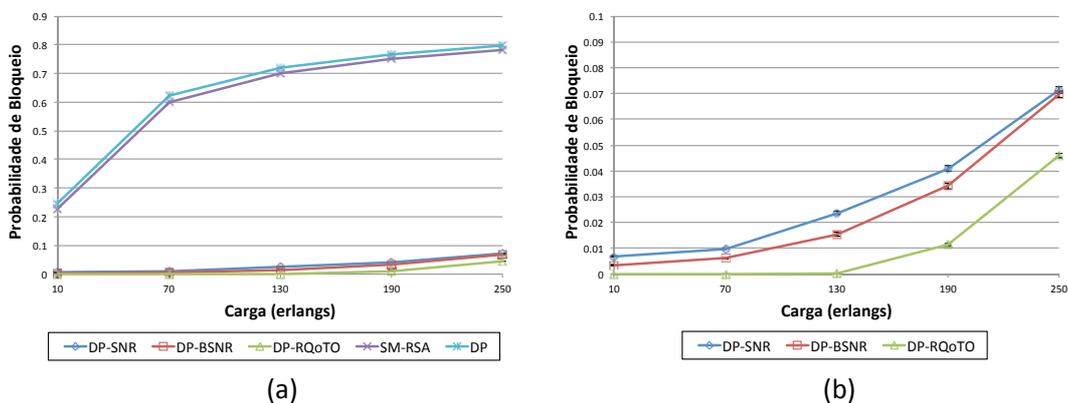


Figura 5. Probabilidade de bloqueio para a topologia EON.

A Figura 5(a) apresenta a probabilidade de bloqueio geral dos cinco algoritmos na topologia EON. É perceptível a melhora que os três algoritmos propostos obtiveram em relação aos concorrentes. Esta melhora é devido ao fato deste cenário levar em consideração os efeitos de camada física e os respectivos bloqueios por ausência de QoT. Visto que comumente as técnicas de sobrevivência não levam em consideração esta problemática, os bloqueios por QoTN e QoTO apresentaram um impacto significativo nos algoritmos DP e SM-RSA, como apresentado em [Lacerda Jr et al. 2016b]. Para os algoritmos DP e SM-RSA, a partir de 130 *erlangs* de carga na rede, a probabilidade de bloqueio ultrapassou 70%. Neste mesmo cenário, os algoritmos DP-SNR, DP-BSNR e DP-RQoTO obtiveram probabilidade de bloqueio abaixo de 8%. Para melhor visualização da diferença de desempenho das estratégias propostas, a Figura 5(b) apresenta apenas estes algoritmos. O DP-RQoTO obteve o melhor resultado dentre todos os algoritmos analisados, com 4,6% de probabilidade de bloqueio no maior ponto de carga (250 *erlangs*), contra 7,1% do DP-SNR e 7,0% do DP-BSNR. O que representa uma diminuição da probabilidade de bloqueio de 34% (DP-BSNR) e 36% (DP-SNR). Os resultados são similares para a topologia USA, apresentada na Figura 6.

A Figura 6(a) apresenta a probabilidade de bloqueio geral dos algoritmos na topologia USA. Novamente, as estratégias propostas obtiveram um resultado superior quando comparadas aos algoritmos de proteção dedicada de caminho tradicional (DP) e o algoritmo SM-RSA. Para o maior ponto de carga (270 *erlangs*) a probabilidade de bloqueio do SM-RSA aproximou-se de 80% e a do DP ficou acima de 80%, enquanto os algoritmos propostos ficaram abaixo de 9% de bloqueio. A Figura 6(b) apresenta os resultados dos algoritmos propostos de forma isolada, para melhor visualização. A estratégia DP-

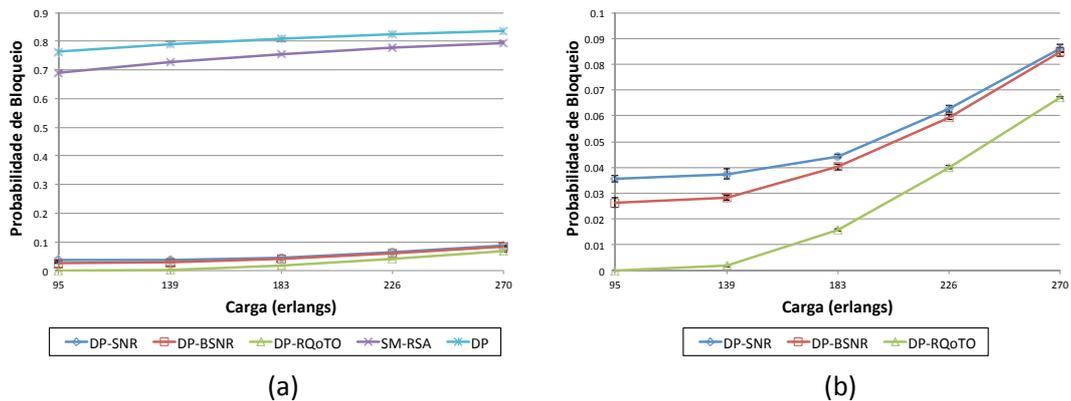


Figura 6. Probabilidade de bloqueio para a topologia USA.

RQoTO obteve novamente o melhor desempenho, com um bloqueio máximo de 6,7%. O maior bloqueio apresentado para o algoritmo DP foi 8,6%, para o DP-BSNR este valor foi de 8,4%. Em 270 *erlangs*, a diminuição da probabilidade de bloqueio do DP-RQoTO em relação ao DP-SNR e DP-BSNR foi de 22% e 20% respectivamente. Um ganho de desempenho maior do DP-RQoTO pode ser observado nos dois primeiros pontos de cargas (95 e 139 *erlangs*), onde a diminuição da probabilidade de bloqueio em relação aos outros dois algoritmos ultrapassou 90%.

O ganho do algoritmo DP-RQoTO em relação aos demais está estritamente relacionado com a sua proposta em reduzir o bloqueio por QoTO. Ao escolher rotas levando em consideração o valor de  $\sigma$ , essas rotas terão uma qualidade de sinal bem acima do exigido. Desta forma, os circuitos estabelecidos serão mais robustos e resistentes à alocação de novos circuitos. Com isso, circuitos em estabelecimento irão sofrer menos bloqueio por QoTO, impactando na probabilidade de bloqueio geral da rede. Isso aponta para a importância de criar soluções de sobrevivência ciente de camada física, que diminuam o bloqueio por QoT.

## 7. Conclusão

O objetivo deste artigo é a proposta de três algoritmos RMLSA com proteção dedicada de caminho e que levem em consideração as imperfeições da camada física. Foram propostos os algoritmos DP-SNR, DP-BSNR e DP-RQoTO e todos obtiveram um bom resultado, em termos de probabilidade de bloqueio, quando comparados a proteção dedicada de caminho tradicional e ao algoritmo SM-RSA. Isso se deve ao fato de que a maioria dos algoritmos de sobrevivência não considerarem os efeitos de camada física e consequentemente os bloqueio por baixa qualidade de sinal.

O Algoritmo DP-RQoTO obteve o melhor resultado tanto na topologia EON quanto na USA. Tal algoritmo usa um valor de  $\sigma$  predefinido para escolher rotas mais robustas, a fim de amenizar o impacto do estabelecimento de novos circuitos na qualidade dos outros circuitos já estabelecidos. Desta forma, o algoritmo diminui o bloqueio por QoTO e também por QoTN.

Para trabalhos futuros pretende-se melhorar a função de escolha do par de rotas de trabalho e *backup* do algoritmo DP-RQoTO. Uma otimização nesta escolha pode diminuir ainda mais a probabilidade de bloqueio. Também pretende-se adaptar o DP-RQoTO

para compartilhar rotas de *backup*, com o intuito de economizar recursos e consequentemente diminuir a probabilidade de bloqueio. Busca-se também o amadurecimento de novas técnicas para este cenário, pois o mesmo apresenta uma maior similaridade com um sistema real, ao levar em consideração tanto as imperfeições de camada física quanto a possibilidade de ocorrência de falhas 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.
- Christodouloupoulos, 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.
- Costa, L. R. and Drummond, A. C. (2016). Novo algoritmo rmlsa com roteamento multihop em redes Ópticas elásticas. In *XXXIV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Sistribuídos SBRC 2016*.
- Fontinele, A., Santos, I., Durães, G., and Soares, A. (2016a). 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.
- Fontinele, A., Santos, I., Neto, J., Campelo, D., and Soares, A. (2016b). Um novo algoritmo rsa ciente de imperfeições de camada física para redes Ópticas elásticas. In *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)*.
- Gao, G., Zhang, J., Wang, L., Gu, W., and Ji, Y. (2014). Influence of physical layer configuration on performance of elastic optical ofdm networks. *IEEE Communications Letters*, 18(4):672–675.
- 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*.
- 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.

- Lacerda Jr, J., Fontinele, A., Moura, I., and Soares, A. (2016a). Avaliação de desempenho de algoritmos rsa para redes Ópticas elásticas com tolerância a falhas em cenário com imperfeições de camada física. In *XVII Workshop de Testes e Tolerância a Falhas (WTF) - (SBRC)*.
- Lacerda Jr, J., Fontinele, A., Moura, I., and Soares, A. (2016b). The impact of physical layer impairment in survivability algorithms of elastic optical networks. In *XLII Latin American Computing Conference (CLEI)*.
- 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.
- Saradhi, C. V. and Subramaniam, S. (2009). Physical layer impairment aware routing (pliar) in wdm optical networks: issues and challenges. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 11(4):109–130.
- Shen, G., Guo, H., and Bose, S. K. (2016). Survivable elastic optical networks: survey and perspective (invited). *Photonic Network Communications*, 31(1):71–87.
- 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.
- Tanenbaum, A. S. and Wetherall, D. J. (2011). *Redes de Computadores*. Pearson Education - Br, 5th edition.
- Wan, X., Hua, N., and Zheng, X. (2012). Dynamic routing and spectrum assignment in spectrum-flexible transparent optical networks. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 4(8):603–613.
- Wang, C., Shen, G., Chen, B., and Peng, L. (2015). 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.
- 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.
- 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.