

Adaptação do Algoritmo BSR para Redes Ópticas SLICE

Alex F. Santos¹, Raul C. Almeida Jr², Karcus D. R. Assis¹, Gilvan M. Durães¹,
André Soares³ e William F. Giazza⁴

¹Universidade Federal da Bahia (UFBA)

²Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

³Universidade Federal do Piauí (UFPI)

⁴Universidade de Brasília (UnB)

{alex.ferreira,karcus.assis}@ufba.br, raul.almeidajunior@ufpe.br,
gilvanmd@dcc.ufba.br, andre.soares@ufpi.edu.br e giazza@unb.br

Abstract. In Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Network (SLICE), the problem of Routing and Spectrum Allocation (RSA) is essential for the insertion of optical paths in the network. RSA is an NP-Complete problem and therefore heuristics are used to maximize the use of resources. In order to reduce the complexity of RSA, it is common to initially define the set of paths between source-destination node pairs through which traffic demand will be routed and subsequently perform spectrum allocation. This paper presents an adaptation for SLICE optical networks of a routing algorithm recently proposed for conventional WDM networks, referred to as BSR (Best among the Shortest Routes). Simulations were performed for different topologies and the results suggest great benefits in terms of blocking probability of the new proposal in relation to traditional BSR.

Resumo. Em uma rede óptica SLICE (*Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Network*), o problema de roteamento e alocação de espectro (RSA -*Routing and Spectrum Allocation*) é essencial para a inserção dos caminhos ópticos na rede. RSA é um problema NP-Completo e, para resolvê-lo, empregam-se heurísticas com o intuito de maximizar a utilização dos recursos. A fim de reduzir a complexidade do RSA, é comum inicialmente definir os caminhos entre os nós (fonte, destino) por onde o tráfego (demanda de sub-portadoras) será encaminhado e, posteriormente, realizar a atribuição do espectro. Este artigo apresenta uma adaptação para redes ópticas SLICE de um algoritmo de roteamento proposto recentemente para redes WDM convencionais, denominado BSR (*Best among the Shortest Routes*). As simulações foram realizadas para diversas topologias e os resultados sugerem vantagens em termos de probabilidade de bloqueio da nova proposta em relação ao BSR tradicional.

1. Introdução

Na última década diversas pesquisas sobre planejamento e desempenho de redes ópticas foram realizadas e algumas perspectivas foram apontadas, como por exemplo, na 22^a edição do SBRC [Soares e Giozza 2004].

A tecnologia de redes ópticas com roteamento de comprimento de onda amadureceu e, atualmente, apesar de alguns limites [Essiambre *et al* 2010], é a forma mais apropriada para suportar a crescente demanda de tráfego nas redes de transporte (*backbones*) que compõem as infraestruturas de telecomunicações da Internet. Nessas redes, o tráfego é roteado inteiramente no domínio óptico mediante o uso da multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM – *Wavelength Division Multiplexing*), em que a largura de banda de uma fibra é loteada em diferentes raias espectrais com espaçamentos uniformes, chamadas de comprimentos de onda. Um caminho óptico é formado pela concatenação, nos nós roteadores, de alguns comprimentos de onda em diferentes fibras sem que o sinal saia do domínio fotônico. Com WDM, vários caminhos ópticos em diferentes comprimentos de onda podem ser estabelecidos de forma simultânea em uma mesma fibra óptica, possibilitando o uso da ampla largura de banda da fibra.

Recentemente, tem havido um crescente interesse na investigação de uma arquitetura de rede óptica sem a grade fixa de comprimentos de onda (denominada de *gridless*), onde o gerenciamento e os elementos da rede darão suporte para que a largura de banda dos caminhos ópticos seja flexível, ou seja, possa ocupar uma largura livre do espectro de acordo com o volume de tráfego e as requisições do usuário. Essas redes foram introduzidas em [Jinno *et al* 2009] e são conhecidas na literatura como redes de caminhos ópticos elásticos, redes ópticas elásticas ou, simplesmente, redes SLICE (*Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Network*).

Em redes SLICE, o espectro é atualmente assumido como um conjunto de *slots* de frequência de 6,25 GHz ou 12,5 GHz. A diferença maior para as redes WDM é que um caminho óptico pode ser agora estabelecido por meio de um determinado número de slots de frequência a depender da taxa de transmissão desejada e do formato de modulação utilizado. Para suportar o conceito desta nova arquitetura de rede, *transponders* com largura de banda variável (BVs), que podem variar a largura de banda na borda da rede, *Optical Crossconnects* (WXC), que podem variar a largura de banda a partir do núcleo da rede, e tecnologias de modulação eficientes como O-OFDM (*Optical Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*) têm sido propostos para permitir a flexibilidade na atribuição dos espectros no domínio óptico [Jinno *et al* 2009].

Para situar o leitor no problema abordado, a Figura 1(a) mostra a alocação de canais WDM, espaçados uniformemente, em que cada caminho óptico tem uma capacidade de 10 Gbps. (Evidentemente, esta capacidade ocupa espectro em Hz pela relação entre a taxa de transmissão e a frequência, a qual depende do formato de modulação e define a eficiência espectral).

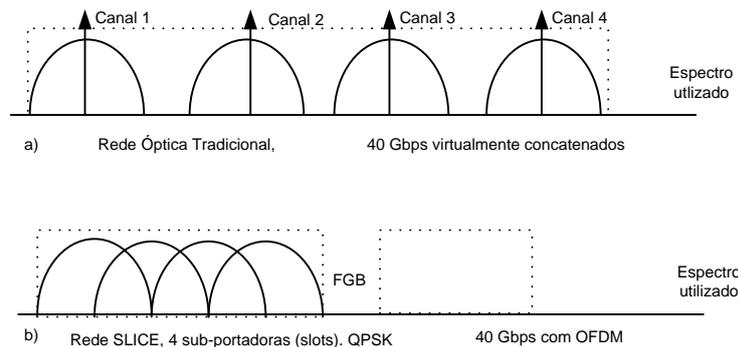


Figura 1. Espectro de redes WDM, a) Tradicional e b) SLICE com FGB (*Filter Guard Band*).

Usando a tecnologia O-OFDM, a largura de banda do canal advém da utilização de múltiplas subportadoras que enviam dados independentemente (por exemplo, QPSK com 4 subportadoras) e formam uma faixa espectral, como mostrado na Fig. 1(b). O uso de OFDM possibilita uma elevada compactação da largura de banda, já que a ortogonalidade permite que os sinais de cada subportadora se estendam para as adjacentes. A largura de banda correspondente às várias subportadoras utilizadas para o caminho óptico será alocada na rede em forma de uma quantidade de slots. A partir daqui, por simplicidade, a demanda de banda será quantificada em termos de número de slots requisitados.

Similar ao problema de roteamento e alocação de comprimentos de onda (RWA – *Routing and Wavelength Assignment*) em redes WDM, na rede SLICE existe o problema de roteamento e atribuição de espectro (RSA – *Routing and Spectrum Allocation*) [Wang, Cao, e Pan, 2011], [Almeida Jr. *et al* 2013]. Neste é alocado uma fatia do espectro ou um conjunto de *slots* para atender à demanda de tráfego. O RSA é diferente e mais desafiador do que o problema RWA, principalmente pelo fato de os caminhos ópticos (*lightpaths*) poderem utilizar diferentes granularidades espectrais. Adicionalmente, numa rede sem conversão espectral, a restrição de continuidade de comprimento de onda é transformada em restrição de continuidade de espectro e a fatia do espectro (número de *slots*) alocada para a conexão deve ser mantida ao longo dos enlaces da rota de forma contínua.

Neste trabalho, é considerada uma arquitetura de rede SLICE com BVs e OXCs de largura de banda variável, sob uma demanda de tráfego dinâmica. O problema RSA dinâmico deve ser resolvido com a rede em operação, onde as requisições de caminhos ópticos chegam aleatoriamente à rede. Caso não haja recursos suficientes para atender a uma determinada requisição de caminho óptico, ocorrerá um bloqueio. Por esta razão, o objetivo de um provedor de serviços de transporte via rede SLICE, face ao problema RSA dinâmico, é atender às requisições atuais de caminhos ópticos visando minimizar a probabilidade de bloqueio de futuras requisições de caminhos ópticos.

No RSA dinâmico, os algoritmos de roteamento, de forma similar ao RWA, podem ser separados em três classes: roteamento fixo, roteamento alternativo ou fixo alternativo, e roteamento exaustivo ou dinâmico [Murthy e Gurusamy 2002].

No roteamento fixo, cada par de nós (origem, destino) da rede óptica dispõe de apenas uma rota que é computada previamente. Assim, antes mesmo de surgir uma requisição de caminho óptico, o Plano de Controle responsável pelo roteamento já sabe qual rota deve ser utilizada. Isto significa que, após o surgimento da requisição, o desafio passa a ser a alocação de uma fatia de espectro para a requisição, levando em consideração a largura desta requisição.

No roteamento alternativo, um conjunto com mais de uma rota é definido previamente para cada par de nós (origem, destino). Isto representa mais de uma alternativa, em termos de rota, na tentativa de estabelecer um circuito óptico. O roteamento alternativo pode ainda ser classificado em roteamento fixo alternativo ou roteamento adaptativo alternativo. A diferença entre eles é a forma como é feita a seleção de uma rota do conjunto de rotas alternativas previamente definidas. No roteamento fixo alternativo [Murthy e Gurusamy 2002], [Lin, Wang e Tsai 2006], as rotas são previamente ordenadas, por exemplo, em função do número de saltos. A seleção da rota é feita seguindo a ordem previamente definida. Se a primeira rota não possui recursos disponíveis, as rotas seguintes são analisadas uma a uma até ser encontrada uma rota com recursos disponíveis. Por exemplo, no problema sob estudo, se nenhuma das alternativas de rotas pré-definidas tiver uma fatia de espectro contínua, livre, e de tamanho adequado em todos os enlaces da rota, a requisição é bloqueada. No roteamento adaptativo alternativo [Birman 1996], a seleção de uma rota do conjunto de rotas definido previamente é feita de acordo com informações do estado atual da rede. Essas informações servem de entrada para um critério desejado, como, por exemplo, alocar a rota com maior fatia espectral disponível.

Os algoritmos da classe de roteamento exaustivo têm como vantagem a capacidade de utilizar qualquer rota possível da topologia na tentativa de estabelecer o caminho óptico [Murthy e Gurusamy 2002]. Com isso, uma requisição de caminho óptico apenas será bloqueada se nenhuma rota, entre sua origem e destino, dispuser de pelo menos uma fatia do espectro contínua, livre, e da largura da requisição.

Em termos gerais, as classes de algoritmos de roteamento apresentam a seguinte ordem crescente de desempenho em termos de probabilidade de bloqueio: fixo, fixo alternativo e exaustivo [Zang, Jue e Mukherjee 2000], [Lin, Wang e Tsai 2006]. Entretanto, esse aumento do desempenho é acompanhado também pelo incremento da complexidade de suas soluções. Algoritmos de roteamento que dependem de informações globais sobre o estado da rede resultam em uma maior complexidade para os protocolos do Plano de Controle. Tal complexidade pode ser traduzida em um maior atraso no estabelecimento de um circuito óptico. Certamente, a solução prévia das rotas, com o uso de um algoritmo representante da classe de roteamento fixo, potencializa a redução do tempo requerido para o estabelecimento dinâmico do caminho óptico. O roteamento fixo proporciona uma menor complexidade para os protocolos do Plano de Controle, uma vez que a escolha da rota para cada par de nós origem e destino é feita na fase de planejamento da rede.

Este trabalho é inspirado em um algoritmo recentemente proposto na literatura [Durães *et al*, 2010], que usa roteamento fixo e que procura balancear a carga da rede, conhecido como BSR (*Best among the Shortest Routes*). Aqui é proposta uma adaptação ao BSR, para dar suporte a redes que usam a arquitetura SLICE. Logo, o chamado BSR

adaptado tenta compor um Plano de Controle adequado para a rede SLICE, sendo que a ideia básica é dar liberdade, na fase de planejamento, a escolha de rotas diferentes para requisições de largura diferente, permitindo assim uma melhor justaposição de tráfegos com diferentes números de *slots* e, portanto, um melhor balanceamento da carga.

Assim como o BSR tradicional, o BSR adaptado também é da classe de roteamento fixo, o que representa uma menor complexidade para o algoritmo proposto.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. Na próxima seção são apresentados os trabalhos relacionados e as nossas contribuições. Na seção 3 são apresentados o BSR tradicional para redes ópticas WDM e o BSR adaptado para redes SLICE. Na seção 4 é realizado um estudo de avaliação de desempenho comparando o algoritmo BSR adaptado, o algoritmo BSR tradicional e o algoritmo clássico de Dijkstra (DJK). As considerações finais são feitas na seção 5.

2. Trabalhos Relacionados

O problema RSA tem sido bastante estudado nos últimos anos. Várias estratégias foram propostas visando melhorar o desempenho das redes SLICE em termos de probabilidade de bloqueio sob tráfego dinâmico ou outras métricas para tráfego estático [Christodoulopoulos, Tomkos e Varvarigos 2010], [Wang, Cao, e Pan 2011], [Santos *et al* 2012], [Christodoulopoulos, Tomkos e Varvarigos, 2011], [Durán *et al* 2012].

Em [Christodoulopoulos, Tomkos e Varvarigos 2010], o problema RSA é subdividido em Roteamento e Alocação de Espectro, onde são apresentadas heurísticas para resolvê-lo de forma separada. Uma formulação exata, através de Programação Linear Inteira, também é apresentada para resolver o problema completo. Entretanto, a mesma só é viável em redes de pequena dimensão. Em [Durán *et al* 2012] foram adaptados algoritmos tradicionais utilizados em redes WDM para aplicação em redes SLICE sob tráfego dinâmico, e os resultados mostraram que a ordem de desempenho dos algoritmos pode diferir nas duas arquiteturas.

A grande maioria dos trabalhos na literatura que estuda o problema RSA baseia-se na classe de roteamento fixo em função de sua menor complexidade. Tais trabalhos consideram o uso de algoritmos de menor caminho (menor número de saltos, isto é, o custo de cada enlace é igual a 1) para definir uma rota fixa para cada par de nós (origem, destino). Dentre os algoritmos de menor caminho, o algoritmo de *Dijkstra* [Dijkstra, 1959] é um dos mais citados. Por simplicidade, o termo algoritmo de menor caminho de *Dijkstra* será denotado por DJK.

A opção pelo uso de algoritmos tradicionais de menor caminho (*e.g.*, *Dijkstra*, *Bellman-Ford*, etc) tende a limitar a capacidade de uma rede óptica, seja esta tradicional ou com a arquitetura SLICE. Nesses algoritmos, a escolha da rota de menor caminho é feita sem avaliar o impacto que essa rota pode ocasionar em outras rotas que compartilhem os mesmos enlaces. Como esses algoritmos tradicionais não têm por objetivo balancear a carga entre os enlaces da rede óptica, é possível o surgimento de enlaces "gargalos" comprometendo o desempenho no atendimento à demanda de caminhos ópticos.

Como visto anteriormente, com o intuito de minimizar este problema, [Durães *et al.* 2010] propuseram o algoritmo BSR para redes ópticas WDM. O BSR é da classe de

roteamento fixo e portanto requer uma menor complexidade computacional. Simulações foram realizadas para redes WDM e os resultados comprovam sua eficiência quando comparado com DJK e uma proposta chamada RRT (*Restricted Routing Technique*), que também se propõe a descongestionar enlaces críticos da rede [Rajalakshmi e Jhunjhunwala 2008]. O BSR é caracterizado por escolher as rotas de menor caminho e, ao mesmo tempo, buscar um melhor balanceamento de carga entre os enlaces da rede. Cada requisição na rede WDM tem uma mesma largura, ou seja, solicita uma fatia do espectro de tamanho fixo. Entretanto, em uma rede SLICE, cada requisição que surgir para um par fonte-destino pode ter número diferente de *slots*, conforme visto na Figura 1. Conseqüentemente, a escolha da rota adequada para cada requisição sugere uma nova estratégia para o cálculo das rotas, aqui denominada BSR adaptado, e que também pertence à classe de roteamento fixo.

Este artigo apresenta as seguintes contribuições:

- a. Um algoritmo **BSR adaptado**, o qual dá liberdade ao planejamento de rotas de acordo com a largura de banda da requisição, visando ao balanceamento de carga entre os enlaces da rede e deixando capacidade aberta para futuras requisições que venham a surgir;
- b. Simulações que comparam o desempenho dos algoritmos de roteamento BSR adaptado, BSR e DJK, em termos de probabilidade de bloqueio, considerando as topologias das redes NSFNET, EON e Rede Hipotética Brasileira sob o plano de controle de uma arquitetura SLICE.

3. Algoritmos BSRs

Esta seção apresenta os algoritmos BSR tradicional e BSR adaptado, da classe de roteamento fixo, os quais são propostos para redes ópticas transparentes tradicionais e redes SLICE, respectivamente. Os BSRs fazem uso de resultados de simulações iterativas na tentativa de encontrar a melhor solução para o planejamento da rede. O desafio dos algoritmos é balancear a carga entre os enlaces da rede de modo a diminuir a probabilidade de bloqueio das requisições de caminhos ópticos. É importante destacar que, por se tratarem de algoritmos de roteamento fixo, a execução dos BSRs não é feita com a rede em operação. Os BSRs são executados em uma fase de planejamento. Por isso, o tempo necessário para a realização de suas simulações iterativas não é algo impeditivo. Para uma explicação detalhada do conceito BSR, o leitor pode consultar [Durães et al, 2010].

A seguir são listadas algumas notações utilizadas na apresentação dos algoritmos BSRs:

- L é o conjunto de todos os enlaces da rede;
- l é um enlace que pertence a L ;
- $c(l)$ é o custo do enlace l ;
- $c(l)_i$ é o custo do enlace l na i -ésima iteração;
- $u(l)$ é a utilização do enlace l
- $u(l)_i$ é a utilização do enlace l obtida via simulação na i -ésima iteração;
- T é o número máximo de iterações dos BSRs
- R é o número máximo de slots que pode ser requisitado
- W é o número de slots atual requisitado para cada par fonte-destino

Baseado nas notações acima, uma explicação dos dois algoritmos, BSR tradicional, ou simplesmente BSR, e BSR adaptado é demonstrada nas subseções a seguir.

3.1 BSR

Cada iteração i do BSR simula uma solução de roteamento, S_i , do universo de M soluções possíveis. Os resultados da simulação realizada na i -ésima iteração são os valores de utilização de cada enlace da rede ($u(l)_i$) e o desempenho da rede em termos de probabilidade de bloqueio obtidos com a solução de roteamento S_i .

A ideia básica deste algoritmo é ajustar, na iteração $i+1$, o custo de cada enlace com uma pequena ponderação $(1-\alpha)$ proporcional ao valor da utilização do enlace obtido na simulação da iteração i . O ajuste no custo de cada enlace é dado pela equação,

$$c(l)_{i+1} = \alpha \cdot c(l)_i + (1 - \alpha) \cdot u(l)_i \quad (1)$$

com $1 \leq i \leq T$ e $\alpha = 0,9999$. Observe que o valor de α deve ser próximo de 1 para que os custos dos enlaces sejam minimamente alterados, em função da utilização dos mesmos, e para que as novas rotas encontradas continuem sendo rotas com o menor número de saltos. O valor de $\alpha = 0,9999$ foi determinado empiricamente, após análises dos resultados obtidos com diferentes valores.

Após obter os custos $c(l)_{i+1}$, utiliza-se um algoritmo de menor caminho simples (DJK) para encontrar a solução de roteamento S_{i+1} que será utilizada na simulação da iteração $i+1$. Esse pequeno ajuste serve como um critério de desempate para que o algoritmo DJK encontre uma solução S_{i+1} com rotas que representem um maior equilíbrio na utilização dos enlaces da rede e, conseqüentemente, diminua a probabilidade de bloqueio de uma requisição de caminho óptico.

Inicialmente, na iteração 1, aplica-se a solução de roteamento encontrada com o DJK assumindo a topologia de rede em questão com o custo dos seus enlaces igual a 1.

A seguir, é apresentado um resumo das etapas do algoritmo BSR.

Algoritmo BSR

- 1) Atribuir o custo 1 para cada enlace da topologia de rede em questão. Obter o conjunto de rotas fixas S_l obtida com o algoritmo de roteamento de menor caminho (DJK). Executar a simulação da iteração $i=1$ e para isto utilize a solução de roteamento S_l .
- 2) Atualizar os custos dos enlaces para a iteração $i+1$ de acordo com a Equação 1.
- 3) Encontrar a nova solução de roteamento S_{i+1} . Para isto utilize o algoritmo DJK e considere os custos dos enlaces da topologia da rede em questão obtidos no passo anterior. Simule a rede com a solução de roteamento S_{i+1} .
- 4) Se $i < T$ volte para o passo 2. Caso contrário vá para o passo 5.
- 5) Verificar dentre as T iterações qual a solução de roteamento que apresentou menor probabilidade de bloqueio. A solução de rotas fixas utilizadas na simulação desta iteração representa as rotas escolhidas pelo algoritmo BSR.

O BSR consegue obter resultados melhores que os algoritmos de DJK e RRT em redes ópticas WDM, ver [Durães *et al.* 2010]. Logo, a sua adaptação para redes SLICE

sugere uma melhora na probabilidade de bloqueio também para esta nova arquitetura, o que foi confirmado pelas simulações. Porém, melhoras adicionais podem ser alcançadas ao realizar um roteamento fixo que gere uma distribuição de carga mais efetiva. A próxima subseção abordará o algoritmo BSR adaptado, proposto neste trabalho.

3.2 BSR Adaptado

O BSR tradicional para redes WDM analisa cada requisição, a qual possui uma largura de banda fixa. O ponto chave é adaptar o BSR para realizar o roteamento (definir o conjunto de caminhos) para uma arquitetura SLICE, em que as requisições têm tamanho variável.

Logo, para cada conexão, é definida a quantidade de slots que deverá ser alocada, os quais devem ser contínuos ao longo da rota. Se esta condição for atendida ao longo da rota, a atribuição de espectro é realizada, caso contrário, a conexão é bloqueada.

A seguir, é apresentado um resumo das etapas do algoritmo BSR adaptado.

Algoritmo BSR adaptado

Para a explicação do BSR adaptado, suponha que cada fibra na rede possa transportar no máximo B slots, e que os pedidos de conexão são para $k = 1, 2, \dots, M$ slots, sendo M o número máximo de slots requisitados. Seja $R_{(s,d)}^k$ a rota fixa para todas as requisições entre os nós s e d com pedido de k slots. Visto que o BSR adaptado busca uma melhor distribuição de carga na rede pela definição de um roteamento fixo para cada demanda de tráfego, $R_{(s,d)}^m$ pode ser diferente de $R_{(s,d)}^n$ se $m \neq n$. As etapas do BSR adaptado estão elencadas a seguir:

- 1) Assuma $i = 1$ e atribua o custo 1 para cada enlace da topologia de rede em questão.
 - 2) Para $k = 1$ até M faça:
 - 2.1) Obter o conjunto de rotas mais curtas com o algoritmo de roteamento de menor caminho (DJK), para as requisições de k slots entre todos os pares de nós da rede. Defina este conjunto como $\{R^k\}$ e guarde-o na memória.
 - 2.2) Atualize os custos dos enlaces de acordo com a Equação 1, sendo agora $u(l)$ o número de slots ocupados no enlace l .
 - 3) Simule a rede com a solução de roteamento de todas as menores rotas encontradas no passo 2.1 ($S_i = R^1 \cup R^2 \cup \dots \cup R^m$). Faça $i = i + 1$.
 - 4) Se $i < T$, volte para o passo 2. Caso contrário vá para o passo 5.
 - 5) Verificar dentre as T iterações qual o conjunto de solução de roteamento S_i que apresentou menor probabilidade de bloqueio. A solução de rotas fixas utilizadas na simulação desta iteração representa as rotas escolhidas pelo algoritmo BSR adaptado para as diferentes larguras de requisições.
-

Logo, após serem definidas as rotas por onde os caminhos ópticos poderão passar, o próximo passo é atribuir slots contínuos para estes caminhos ópticos que surgem dinamicamente. Esta atribuição pode ser feita aleatoriamente ou através de algum algoritmo de alocação. Neste artigo, escolheu-se um algoritmo de alocação de prioridade fixa, o *First-Fit*, por ser simples e bastante utilizado na literatura, tanto para redes ópticas WDM quanto para redes SLICE. O objetivo é comparar os algoritmos: BSR adaptado, BSR e DJK em uma arquitetura SLICE em termos da probabilidade de bloqueio. Observe que o foco do trabalho é comparar algoritmos de roteamento e não algoritmos de alocação de espectro, logo a escolha de algoritmos de alocação mais sofisticados se torna marginal.

4. Resultados Numéricos

Para verificar a eficiência do BSR adaptado para redes ópticas SLICE, foram realizadas simulações em cenários e topologias distintas como NSFNet [Wang, Cao, e Pan, 2011], EON [Mahony, 1994], Brasileira [Assis *et al.*, 2009] e Abilene [Abilene Network, 2005]. Para cada simulação são realizadas cinco replicações com diferentes sementes de geração de variável aleatória. São geradas um milhão de requisições para cada replicação. Os resultados gráficos apresentam os intervalos de confiança calculados com um nível de confiança de 95%. Cada simulação é realizada em média de 55 segundos, dependendo da topologia da rede, utilizando o computador Pentium Dual Core 1.86GHz, 2GB de RAM com Windows 7.

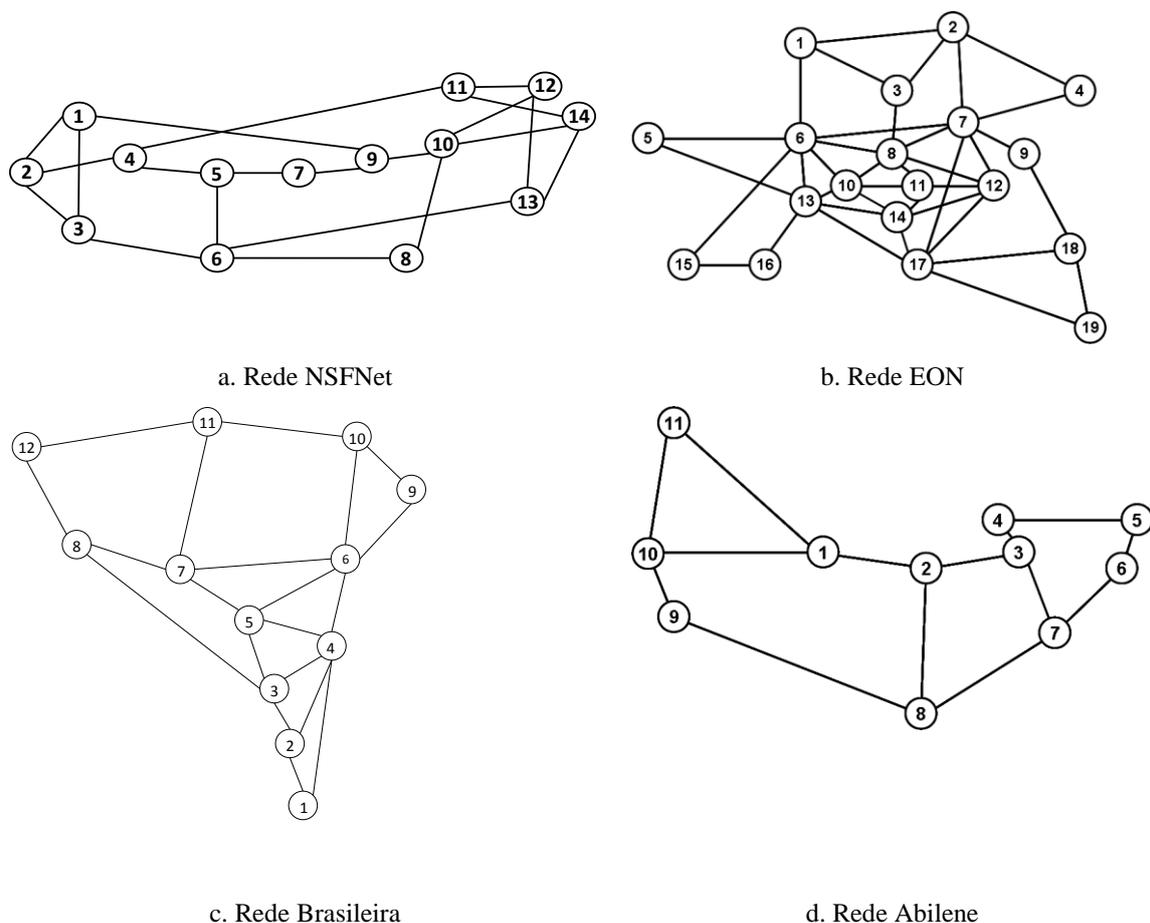


Figura 2. Topologias de rede estudadas.

Na rede NSFnet (Figura 2a), que contém 14 nós e 42 enlaces, as simulações foram realizadas com requisições de 1, 2, 3,..., 8 slots e um total de 128 slots disponíveis por enlace. A requisição é bloqueada se não existe slots contíguos disponíveis no caminho entre os pares (fonte, destino) para acomodar a mesma. Define-se a probabilidade de bloqueio de caminhos como o número total de requisições bloqueadas divididas pelo número total de requisições geradas. De forma similar define-se a probabilidade de bloqueio de slots.

Então, para a rede NSFNET, a Figura 3a ilustra a probabilidade de bloqueio de caminhos e a Figura 3b a probabilidade de bloqueio de slots. Como se pode observar, o BSR adaptado consegue uma menor probabilidade de bloqueio que o DJK e o BSR. Em média obtêm-se uma melhora na probabilidade de bloqueio de caminhos de 36,1% e 17,5% quando se compara o algoritmo BSR adaptado com o DJK e o BSR, respectivamente. Para a probabilidade de bloqueio de slots, obtêm-se desempenho de forma alinhada com o bloqueio de caminhos, só que os percentuais são de 35,6% e 17,2%.

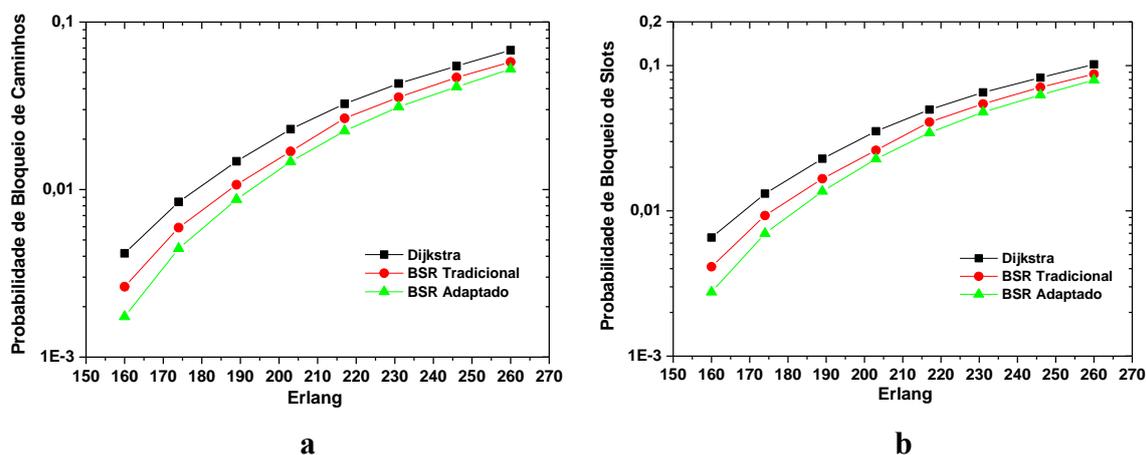


Figura 3. Probabilidade de Bloqueio de Caminhos (a) e Probabilidade de Bloqueio de Slots (b) em função da carga da rede para os algoritmos Dijkstra, BSR tradicional e BSR Adaptado na rede NSFNet. As requisições são de 1, 2, 3, ..., 8 slots e há um total de 128 slots disponíveis por enlace.

Para a rede EON (Figura 2b), que contém 19 nós e 76 enlaces, realizaram-se as simulações num cenário diferente, onde as requisições agora são de 1, 2, 4 ou 8 slots e há um total de 128 slots disponíveis por enlace. As Figuras 4a e 4b apresentam a probabilidade de bloqueio de caminhos e a probabilidade de bloqueio de slots, respectivamente. Para esta topologia, o BSR adaptado consegue novamente uma menor probabilidade de bloqueio do que os algoritmos *DJK* e BSR. Em média, a melhora na probabilidade de bloqueio de caminhos foi de 73,9% e 26,9% quando se compara o BSR adaptado com o *DJK* e o BSR, respectivamente. Para a probabilidade de bloqueio de slots, os percentuais de desempenho foram semelhantes. Devido sua topologia ser muito mais conectada e, portanto, permitir um conjunto maior de soluções (rotas), o BSR adaptado operando na rede EON obteve melhores percentuais do que na NSFNet.

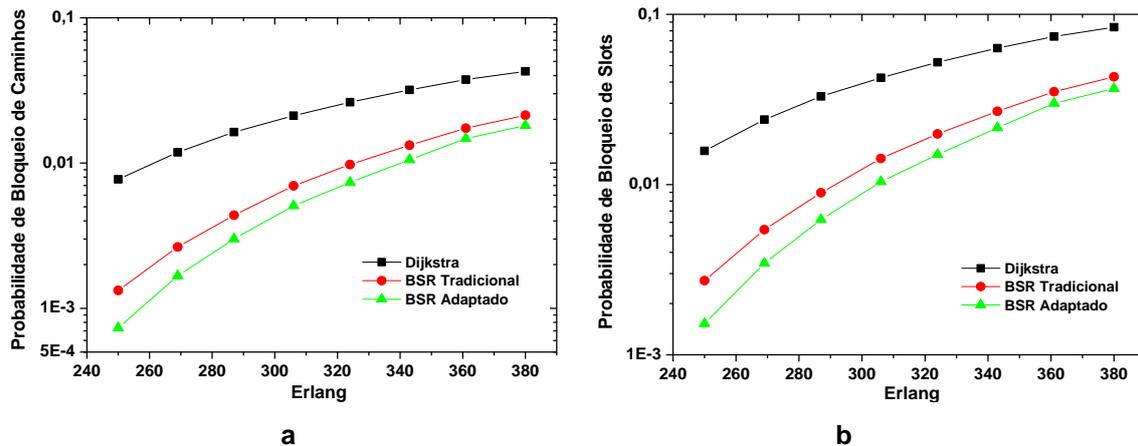


Figura 4. Probabilidade de Bloqueio de Caminhos (a) e Probabilidade de Bloqueio de Slots (b) em função da carga da rede para os algoritmos Dijkstra, BSR tradicional e BSR Adaptado na rede EON. As requisições são de 1, 2, 4 ou 8 slots e há um total de 128 slots disponíveis por enlace.

Na rede Brasileira (Figura 2c), que contém 12 nós e 40 enlaces, realizaram-se simulações com requisições de 1, 2, 3, ..., 16 slots e um total de 256 slots disponíveis por enlace. Novamente, observa-se na Figura 5 bons desempenhos da probabilidade de bloqueio de caminhos e de probabilidade de bloqueio de slots, atingindo ganhos do BSR adaptado, nas duas métricas, de 37% e 18% em relação ao DJK e BSR, respectivamente.

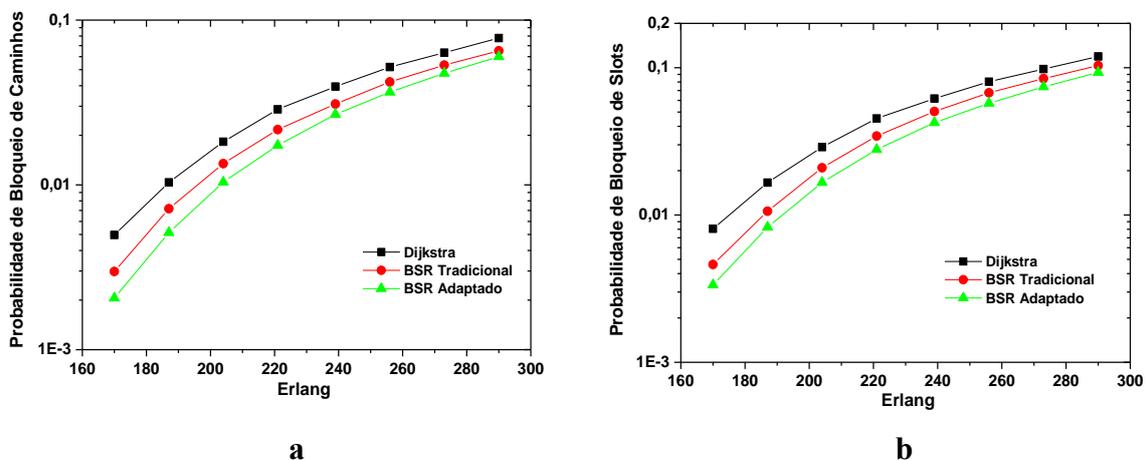


Figura 5. Probabilidade de Bloqueio de Caminhos (a) e Probabilidade de Bloqueio de Slots (b) em função da carga da rede para os algoritmos Dijkstra, BSR tradicional e BSR Adaptado na rede Brasileira. As requisições são de 1, 2, 3, ..., 16 slots e há um total de 256 slots disponíveis por enlace.

Por fim, foram realizadas simulações para a rede Abilene (Figura 2d), que contém 11 nós e 28 enlaces, com requisições de 1, 2, 4, 8 ou 16 slots e um total de 256 slots disponíveis por enlace. Em média, a melhora na probabilidade de bloqueio de caminhos, quando se usa o BSR adaptado, foi de 47,9% e 21,2% em relação ao DJK e BSR, respectivamente (Figura 6a). De forma alinhada ao bloqueio de caminhos, o desempenho para a probabilidade de bloqueio de slots obteve percentuais de melhora de 46,6% e 20,5% (Figura 6b).

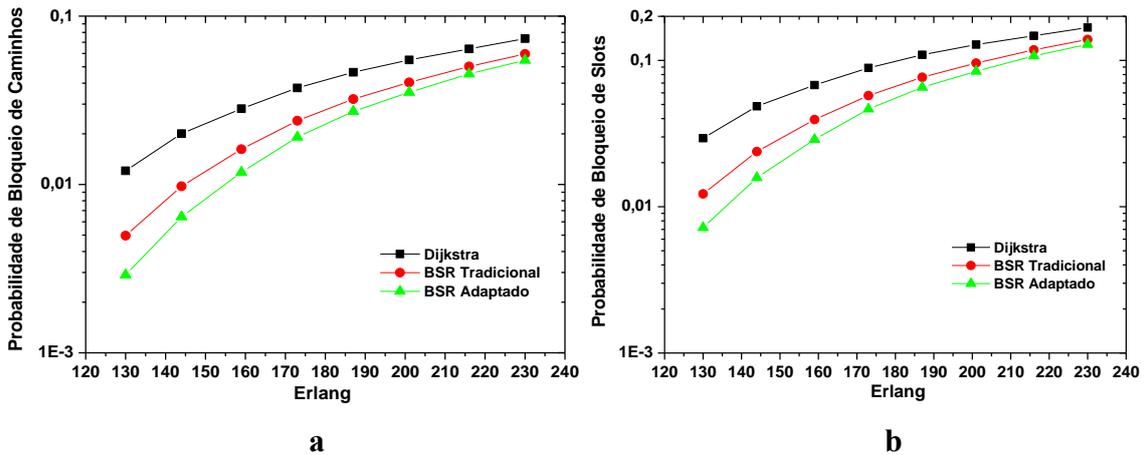


Figura 6. Probabilidade de Bloqueio de Caminhos (a) e Probabilidade de Bloqueio de Slots (b) em função da carga da rede para os algoritmos Dijkstra, BSR tradicional e BSR Adaptado na rede Abilene. As requisições são de 1, 2, 4, 8 ou 16 slots e há um total de 256 slots disponíveis por enlace.

5. Conclusão

Neste artigo, foi apresentado um algoritmo de roteamento para dar suporte ao planejamento de redes ópticas. O BSR adaptado teve sua eficiência demonstrada através de comparações com o BSR tradicional e o algoritmo de *Dijkstra* em diversos cenários. Percebe-se que a estratégia adaptada serve para balancear a carga (em termos de número de slots) melhorando a eficiência e roteando a demanda de tráfego em redes ópticas elásticas de forma apropriada.

Referências

- Abilene Network (2005), "Internet2 network," Internet2, Ann Arbor, MI [Online]. Available: <http://www.internet2.edu/pubs/200502-IS-AN.pdf> (accessed 26.11.2012).
- Almeida Jr, R. C.; Santos, Alex Ferreira dos; K.D.R. Assis; Waldman, H.; Martins Filho, J. F. (2013) "Slot assignment strategy to reduce loss of capacity of contiguous-slot path requests in flexible grid optical networks". *Electronics Letters (Online)*, v. 49, p. 359-361, 2013.
- Assis, K.D.R.; Maranhao, J.; Ferreira, A. e Giozza, William. (2009) "Heuristic to Maximize the Open Capacity of OBS Networks with Initial Static Traffic". *Telecomunicações (Santa Rita do Sapucaí)*, v. 12, p. 18-23.
- Birman, A., (1996) "Computing Approximate Blocking Probabilities for a Class of All-optical Networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 14, ed. 5, pp. 852-857, Junho.
- Christodoulopoulos, K., Tomkos, I. e Varvarigos, E. A., (2010) "Routing and Spectrum Allocation in OFDM-based Optical Networks with Elastic Bandwidth Allocation", *IEEE Globecom 2010*

- Christodoulopoulos, K., Tomkos, I., e Varvarigos, E. A., (2011) “Elastic bandwidth allocation in flexible OFDM-based optical networks”, *J. Lightw. Technol.*, vol. 29, no. 9, pp. 1354–1366, May.
- Dijkstra, E. W. (1959) “A Note on Two Problems in Connection with Graphs”. *Numerical Mathematics*, 1: 269–271.
- Durães, Gilvan M., Soares, André, Amazonas, José R., e Giozza, William. (2010) “The choice of the best among the shortest routes in transparent optical networks”. *Computer Networks*, 54(14):2400 – 2409.
- Durán, R.J., Rodríguez, I., Fernández, N., Miguel, I. de, Merayo, N., Fernández, P., Aguado, J.C., Jiménez, T., Lorenzo e R.M., Abril, E.J., (2012) “Performance Comparison of Methods to Solve the Routing and Spectrum Allocation Problem”, 14th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON).
- Essiambre, R. J. et al., (2010) “Capacity Limits of Optical Fiber Networks,” *J. Lightwave Technol.* 28,662.
- Jinno, M., Takara, H., Kozicki, B., Tsukishima, Y., Sone, Y., e Matsuoka, S., (2009) “Spectrum-Efficient and Scalable Elastic Optical Path Network: Architecture, Benefits, and Enabling Technologies,” *IEEE Comm. Mag.*, vol.47, pp. 66-73.
- Lin, H. C., Wang, S. W. e Tsai, C., (2006) “Traffic Intensity Based Fixed-Alternate Routing in All-Optical WDM Networks”, in *Proceedings of the IEEE ICC’2006*, Istanbul, Turkey, Junho 11 – 15.
- Mahony, M. J., (1994) “A european optical network: design considerations”, in: *IEEE Colloquium on Transparent Optical Networks*, pp. 1–16.
- Murthy, C. S. R. e Gurusamy, M., (2002) “WDM Optical Networks - Concepts, Design and Algorithms”. Prentice Hall PTR.
- Rajalakshmi, P. e Jhunjhunwala, A., (2008) “Load Balanced Routing to Enhance the Performance of Optical Backbone Networks”, in *5th IFIP International Conference on— Wireless and Optical Communications Networks(WOCN 2008)*, Surabaya, Indonésia.
- Santos, Alex Ferreira dos; Santos, C. C. ; Durães, Gilvan Martins; Assis, K.D.R.; Almeida Jr, R. C. (2012) “Roteamento e Alocação de Espectro em Redes Ópticas: O Conceito SLICE”. In: *XXX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBrT’12)*, 2012, Brasília - DF. SBrT 2012.
- Soares, André Castelo Branco; Giozza, W. F. (2004) “Avaliação de Desempenho de Algoritmos para Alocação Dinâmica de Comprimento de Onda em redes Ópticas Transparentes”. In: *22^o SBRC, 2004*, Gramado. *Anais de 22^o Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*. Gramado, RS: UFRGS, LARC, SBC, 2004. v. 1. p. 661-672.
- Wang, Y., Cao, X., e Pan, Y., (2011) “A study of the routing and spectrum allocation in spectrum-sliced elastic optical path networks,” in *Proc. of IEEE INFOCOM*.

Zang, H., Jue, J. P., e Mukherjee, B., (2000) "A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical WDM networks," Opt. Networks Mag., vol. 1, no. 1.