

Algoritmo de roteamento com balanceamento de carga adaptado a redes ópticas elásticas

Ítalo Barbosa Brasileiro¹
André Castelo Branco Soares¹
José Valdemir dos Reis Júnior¹

Resumo: Com a evolução dos meios de transmissão de dados, surgem as Redes Ópticas que utilizam a tecnologia Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM), transportando o dados em slots de frequência, que podem ser agrupados para formar canais com maior capacidade de transmissão. Para estabelecer um lightpath entre dois nós da rede, é necessário escolher uma rota e um conjunto de slots, exigindo a criação de algoritmos de roteamento e alocação de espectro que melhor utilizem os recursos disponíveis na rede. O algoritmo proposto neste trabalho é uma adaptação do algoritmo de roteamento fixo LBR, permitindo escolher rotas para os pares de nós de modo a balancear a carga total da rede. O desempenho foi avaliado através de simulações, na qual o LBR é comparado ao Dijkstra e apresenta desempenho superior.

Palavras-chave: Redes Ópticas Elásticas. Roteamento. Simulação.

Abstract: From the evolution of data transmission devices, emerges Elastic Optical Networks, which uses Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM) technology, carrying data in frequency slots, which can be grouped to form higher transmission capacity channels. To establish a lightpath between two network nodes, it is necessary pick a route and a set of slots, implying the creation of routing and spectrum allocation algorithms which uses in a better way the network available resources. The algorithm proposed in this work is an adaptation of fixed routing LBR algorithm, allowing choose routes for network nodes to balance the network total load. The performance was evaluated through simulations, and the LBR was compared to Dijkstra and shows better performance.

Keywords: Elastic Optical Networks. Routing. Simulation

1 Introdução

O tráfego da Internet tem crescido cada vez mais: segundo o estudo global da CISCO® Visual Networking Index™, é previsto um aumento de quase três vezes nos próximos 5 anos. Até 2018, a expectativa é de um tráfego global de 1,6 zettabytes (1 trilhão de gigabytes)[1].

Esse crescimento se deve a diversos fatores, como o aumento do número de usuários na internet e de dispositivos móveis, taxas de dados mais rápidas, o surgimento de aplicações mais sofisticadas, aumentando a demanda por banda. Para atender essa crescente demanda, tem sido desenvolvida uma nova geração de redes de transporte, denominadas Redes Ópticas. As Redes Ópticas podem utilizar a tecnologia *Wavelength Division Multiplexing* (WDM) para realizar a multiplexação por divisão de comprimento de onda [2]. A tecnologia WDM permite estabelecer em uma única fibra, simultaneamente, múltiplos canais ópticos independentes operando em diferentes comprimentos de onda. Atualmente é viável estabelecer até 80 comprimentos em uma única fibra, com cada comprimento operando a uma taxa de 160Gbps [3].

Entretanto, as redes ópticas WDM alocam toda a capacidade de um comprimento de onda para fazer as transmissões, ocasionando subutilização dos recursos da rede, em casos nos quais é necessário alocar recursos

¹Universidade Federal do Piauí (UFPI), Teresina (PI) - Brasil

{italo.barbosabrasileiro@yahoo.com.br, andre.soares@ufpi.edu.br, valdemirreis@ufpi.edu.br}

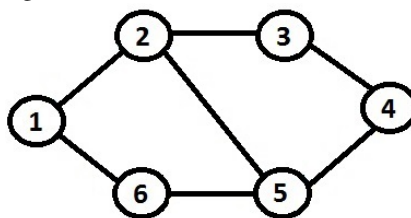
para transportar dados que tenham uma granularidade inferior a largura de banda oferecida por um comprimento de onda. Para superar esse problema e atender às necessidades futuras das redes de transporte, as tecnologias de redes estão evoluindo para se tornarem mais eficientes, flexíveis e redimensionáveis. Dentre as diversas soluções para transmissão óptica de alta velocidade, a *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing* (OFDM) é uma das mais promissoras. A OFDM permite a divisão do espectro óptico em menores intervalos de frequência, denominados "slots", que podem ser agrupados de forma contígua para permitir alocação de canais com maior capacidade de transmissão [4].

Com utilização da tecnologia OFDM, é proposto um novo tipo de rede de transporte, denominada Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Network (SLICE), ou Redes Ópticas Elásticas. Através da multiplexação OFDM, é possível gerenciar conexões com diferentes larguras de banda, utilizando apenas um intervalo de espectro necessário para atender à requisição. Também é possível utilizar diferentes tipos de modulação, possibilitando a transmissão de uma maior quantidade de bits por sinal. Assim, quanto menor a distância entre dos nós da rede, menor será a degradação sofrida pelo sinal, consequentemente possibilitando a transmissão de mais bits por sinal [5].

Para utilizar uma Rede Óptica WDM, é necessário encontrar uma solução para o problema RWA (*Routing and Wavelength Assignment*), que se resume em selecionar uma rota e um comprimento de onda para atender uma determinada requisição. As Redes Ópticas OFDM possuem um problema correspondente, denominado RSA (*Routing and Spectrum Allocation*). O problema RSA consiste em definir uma rota e uma faixa espectral para acomodar cada requisição de circuito [6].

Os algoritmos de roteamento nas Redes Ópticas são atualmente classificados como: roteamento fixo, roteamento alternativo e roteamento exaustivo [2]. No roteamento fixo (*offline*), cada par de nós(o,d) possui uma única rota que foi definida previamente (assumiremos a notação nós(o,d) para denotar um par de nós origem-destino). A Figura 1 ilustra um exemplo de topologia de Anel de 6 Nós com Enlace Transversal. Caso surja uma requisição de conexão para o par(1,5) e considerando que a rota 1 - 6 - 5 é a rota fixa definida para esse par, se os recursos da rota 1 - 6 - 5 estiverem todos ocupados, mesmo considerando a existência da rota 1 - 2 - 5 a requisição de conexão não será atendida, já que neste tipo de roteamento não são utilizadas rotas alternativas. O roteamento fixo apresenta menor complexidade de implementação e de execução, mas possui desvantagens como intolerância à falhas e maior probabilidade de bloqueio quando comparado a outras classes de roteamento, que utilizam mais de uma rota para cada par (roteamento alternativo) ou são executados durante a fase de funcionamento da rede (roteamento exaustivo).

Figura 1: Topologia A6NET (Anel de 6 Nós com Enlace Transversal).



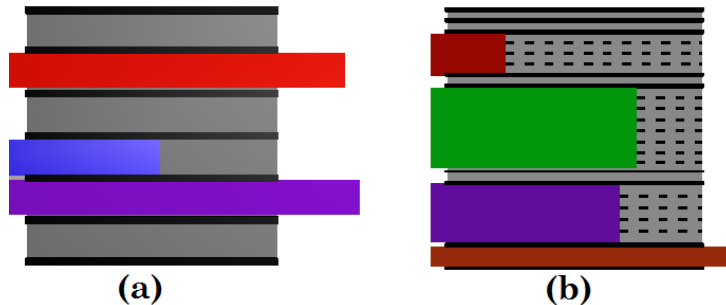
Como contribuição, este trabalho apresenta uma adaptação do algoritmo de roteamento fixo *Load Balanced Routing* (LBR) proposto em [7]. O algoritmo realiza um balanceamento de rotas na rede, selecionando rotas de forma gradual e levando em conta a distribuição daquelas que já foram escolhidas. O algoritmo foi implementado no simulador SNETS, e seu desempenho foi comparado ao Dijkstra [8] em duas topologias reais.

O restante do trabalho está organizado da seguinte forma. A Seção 2 sintetiza os principais conceitos presentes em Redes Ópticas Elásticas. A Seção 3 apresenta uma descrição da implementação do algoritmo LBR. A Seção 4 apresenta uma avaliação do desempenho do LBR em comparação ao algoritmo de Dijkstra. A Seção 5 apresenta as conclusões deste trabalho.

2 Redes Ópticas Elásticas

A tecnologia de Redes Ópticas OFDM permite dividir o espectro em intervalos de frequência denominados "slots", que apresentam menor granularidade quando comparados aos comprimentos de onda das Redes Ópticas WDM. A vantagem associada ao uso de Redes Elásticas está na possibilidade de agrupar slots vizinhos para compor maiores intervalos de frequência, permitindo o atendimento de requisições que exigem maior largura de banda. A Figura 2 ilustra uma comparação entre a divisão do espectro em redes WDM e Elásticas.

Figura 2: Enlaces de redes que utilizam as tecnologias (a) WDM e (b) OFDM.



Para atender a uma requisição que necessite de mais de um slot para estabelecer a conexão, as Redes OFDM precisam respeitar a restrição de contiguidade de espectro: os slots a serem alocados devem estar dispostos de forma contígua no espectro, de modo a não existir nenhum intervalo de slots ocupados internamente à faixa de espectro a ser alocada. Redes Elásticas também devem respeitar a restrição de continuidade de espectro, herdada das Redes Ópticas WDM: a faixa espectral selecionada para atender uma requisição deve ser a mesma em todos os enlaces pertencentes à rota utilizada pelo circuito que será estabelecido [9].

Além da capacidade de agrupar e desagrupar slots, as Redes Elásticas realizam a transmissão de dados utilizando diferentes níveis de modulação. A modulação está relacionada com a quantidade de bits transmitidos simultaneamente em um sinal óptico. Esse valor possui uma relação inversa com a distância a ser percorrida, pois maiores distâncias causam maior impacto na qualidade do sinal, tornando necessário a utilização de níveis mais baixos de modulação. Atualmente, através da análise de diferentes aspectos da onda portadora (amplitude, frequência e fase), é possível transmitir 4, 6 e até 8 bits por sinal [10].

O problema de escolha de rota e alocação de comprimento de onda existente nas Redes WDM surge como o problema RSA nas Redes Elásticas. Portanto, é necessário estabelecer uma rota e designar um intervalo de slots alocáveis para o estabelecimento do circuito. Assim, surgem duas classes de algoritmos que atacam o problema RSA: sequencial e integrado. Os algoritmos da classe sequencial atacam separadamente o problema RSA, ou seja, utilizam uma heurística para escolha de rotas e outra para alocação de espectro. Já os algoritmos integrados utilizam uma única heurística, que realiza, simultaneamente, escolha de rota e alocação de espectro. Geralmente, os algoritmos sequenciais apresentam menor custo computacional, enquanto os algoritmos integrados, de maior complexidade, apresentam melhor desempenho. O algoritmo LBR Adaptado proposto neste trabalho está inserido na classe sequencial, e foi utilizado o *FirstFit* como técnica para alocação de espectro.

Frequentes alocações e liberações de slots ocasionam um problema importante nesse tipo de tecnologia: fragmentação do espectro. Isso ocorre devido ao surgimento de pequenos intervalos de slots vazios entre partes alocadas do espectro. Esses intervalos vazios se tornam subutilizados, pois eles se dispõem de forma dispersa no espectro, e seu menor tamanho não acomoda grande parte das requisições. Portanto, o problema de fragmentação se torna um ponto importante no estudo de Redes Ópticas Elásticas [9].

3 Load Balanced Routing

Esta seção apresenta o algoritmo Load Balanced Routing (LBR) [7]. Para um melhor funcionamento da rede, se faz necessário a utilização de um conjunto de técnicas que otimizem o processo de atendimento de requisições e estabelecimento de conexões. Uma das possibilidades de otimização está relacionada com a escolha de

um algoritmo de roteamento que maximize os níveis de *QoS* da rede. Para funcionar de modo eficiente, um algoritmo de roteamento deve evitar a criação de enlaces-gargalos, nos quais ocorre um grande acúmulo de circuitos estabelecidos, chegando a impossibilitar o atendimento de um novo circuito utilizador daquele enlace.

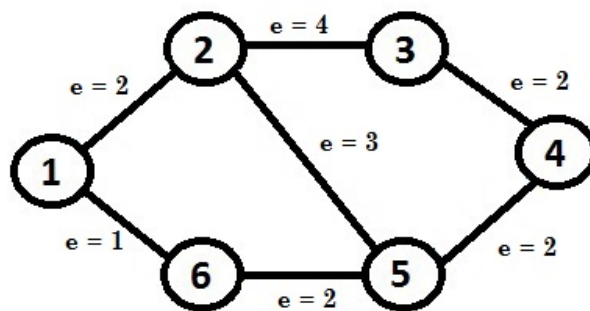
Levando em conta o problema de congestionamento de enlaces e surgimento de "gargalos" na rede, o algoritmo LBR é proposto para um cenário de Redes Ópticas WDM. Através de um contador *MAX*, o algoritmo define as rotas para cada par de nós da rede, sempre levando em conta o contador de rotas já estabelecidas em cada enlace e selecionando como nova rota aquela que possui os contadores dos enlaces dentro de um limite monitorado *MAX*.

Inicialmente, é realizada uma busca para se encontrar os menores caminhos entre todos os pares de rede. Assim, é montada uma lista *ParesSemRota* contendo todas as soluções de menor caminho para cada par de nós da rede. De mesmo modo, é criada uma lista vazia *ParesComRota*, que armazenará aqueles pares de nós que possuírem rota definida. Em seguida, é criado um contador *e* para cada enlace da topologia, que será inicializado com o valor 0. Também é criado o contador *MAX*, inicializado com 1, que será responsável por manter o balanceamento dos enlaces.

Durante a execução do algoritmo, a lista *ParesSemRota* é percorrida. Para cada par *p* da lista, são testadas as soluções de menor caminho *m* do seguinte modo: a solução é inserida na rede, e todos os enlaces que a compõem terão seu contador *e* incrementado em 1. Se todos os contadores *e* daqueles enlaces obtiverem um valor menor ou igual ao valor encontrado em *MAX*, então aquela solução de menor caminho é definida como rota para o par *p*, que será inserido na lista *ParesComRota*. Caso um dos contadores *e* apresente valor superior ao valor de *MAX*, então os contadores *e* utilizados naquela solução de menor caminho serão decrementados em 1 (voltando ao estado encontrado antes da inserção dessa solução), e a próxima solução de menor caminho é verificada. Se todas as possíveis soluções forem testadas, e nenhuma delas foi escolhida, então o par *p* permanece na lista de *ParesSemRota* e é feita a verificação do próximo par de nós. Após toda a lista *ParesSemRota* ser percorrida, se a mesma ainda apresentar algum elemento, então o contador *MAX* é incrementado em 1 e a lista *ParesSemRota* é percorrida novamente (os valores nos contadores *e* dos enlaces são mantidos). Caso a lista *ParesSemRota* estiver vazia ao fim da verificação, então significa que todos os pares de nós já possuem uma solução de rota definida, e o problema de escolha de rota já foi solucionado.

A Figura 3 ilustra um exemplo de execução do LBR. É possível observar que, para o par (1, 4) existem três soluções de menor caminho: 1 - 2 - 3 - 4, 1 - 2 - 5 - 4 e 1 - 6 - 5 - 4. Considerando *MAX* = 3, a solução 1 - 2 - 3 - 4 é descartada, pois apresenta um contador no enlace 2 - 3 de valor superior a *MAX*. A solução 1 - 2 - 5 - 4 também é descartada, pois ao ser inserida na topologia, o contador *e* de 2 - 5 resultará em valor superior ao contador *MAX*. Já a solução 1 - 6 - 5 - 4 é admitida, pois o valor dos contadores *e*, após o incremento, ainda estarão limitados pelo valor de *MAX*. Assim, o par (1, 4) é removido da lista de *ParesSemRota* e inserido na lista *ParesComRota*, juntamente com a rota escolhida.

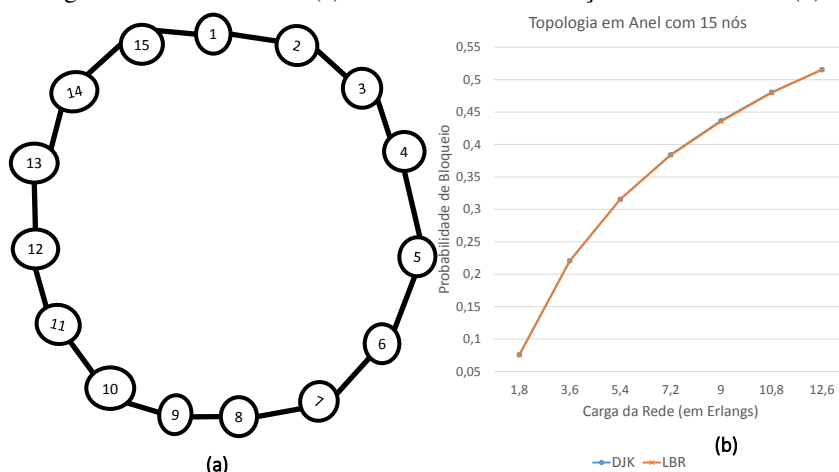
Figura 3: Exemplo de topologia A6NET com contadores de enlace *e*.



Após a implementação da heurística, foi realizado um estudo comparativo para verificar o desempenho do LBR Adaptado em topologias com apenas um menor caminho para cada par (o, d) . Assim, quando comparado ao algoritmo de Dijkstra, ambos devem apresentar desempenho semelhante, já que a escolha de rotas será feita sobre o único menor caminho entre cada par de nós. A figura 4 apresenta a topologia em anel de 15 nós utilizada para simular as heurísticas (LBR e DJK) e os resultados obtidos com a simulação. É possível observar a semelhança

dos resultados, e afirmar que em casos de pares de nós com apenas uma rota de menor caminho, o comportamento do algoritmo LBR se aproxima do algoritmo de Dijkstra.

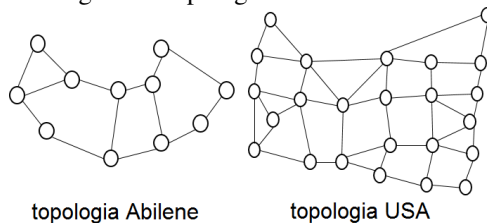
Figura 4: Anel de 15 nós (a) e resultados de simulação de LBR e DJK (b).



4 Avaliação de Desempenho

Esta seção apresenta um estudo de avaliação de desempenho do algoritmo LBR Adaptado e comparação com o algoritmo de Dijkstra [8]. Para verificar o desempenho dos algoritmos foi utilizado o simulador SNETS. Foram feitas 10 replicações, com um tráfego distribuído uniformemente entre os pares de nós. Em cada replicação foram geradas 100.000 requisições, seguindo um processo de Poisson com média λ e tempo de retenção distribuído exponencialmente com média $1/\lambda$. As requisições geradas possuem os seguintes tamanhos: 10 Gbps, 20Gbps, 40Gbps, 80 Gbps, 160 Gbps e 320 Gbps, distribuídas igualmente. A Figura 5 apresenta duas topologias reais utilizadas no estudo: Abilene e USA. Foi considerado que todos os enlaces são bidirecionais, e possuem espectro de 12,5 GHz dividido em 400 slots em cada sentido. Para alocação de comprimento de onda, é utilizado o algoritmo *First Fit*. Os resultados aparecem com nível de confiança de 95%.

Figura 5: Topologias Abilene e USA.

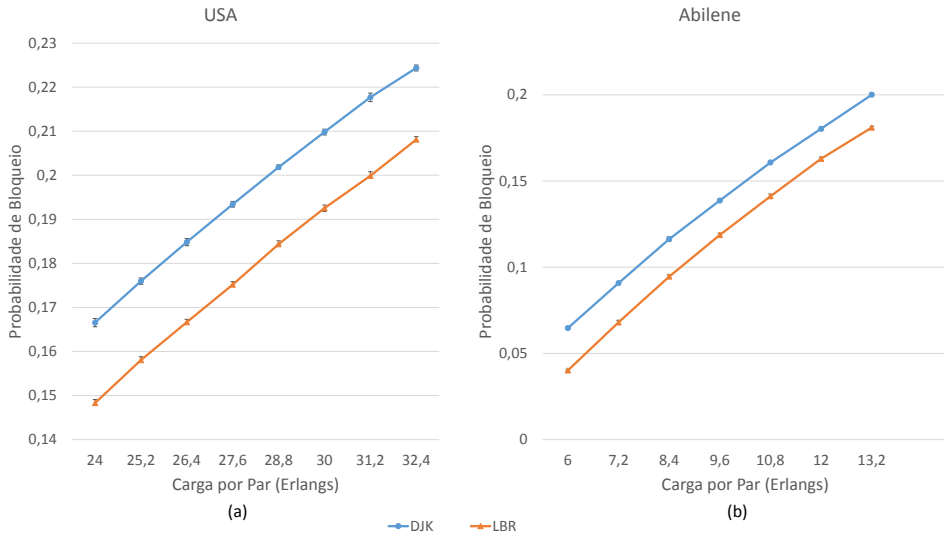


4.1 Probabilidade de Bloqueio por Circuito

Através da análise da métrica de Probabilidade de Bloqueio por Circuito pode-se verificar a porcentagem de requisições para estabelecimento de circuito que foram bloqueadas, ou seja, aquelas requisições que não foram atendidas por falta de recursos da rede ou por força das restrições de continuidade e contiguidade de espectro. A Figura 6 apresenta os resultados de Probabilidade de Bloqueio das simulações do DJK e LBR para as duas topologias em estudo.

Percebe-se que, para ambas as topologias, o LBR apresenta menor probabilidade de bloqueio por circuito. Ao realizar uma melhor distribuição das rotas na fase de planejamento da rede, o LBR resulta em menor congestionamento de enlaces e, conseqüentemente, menor quantidade de requisições bloqueadas por falta de recursos,

Figura 6: Probabilidade de Bloqueio por circuito para as topologias (a)USA e (b) Abilene.

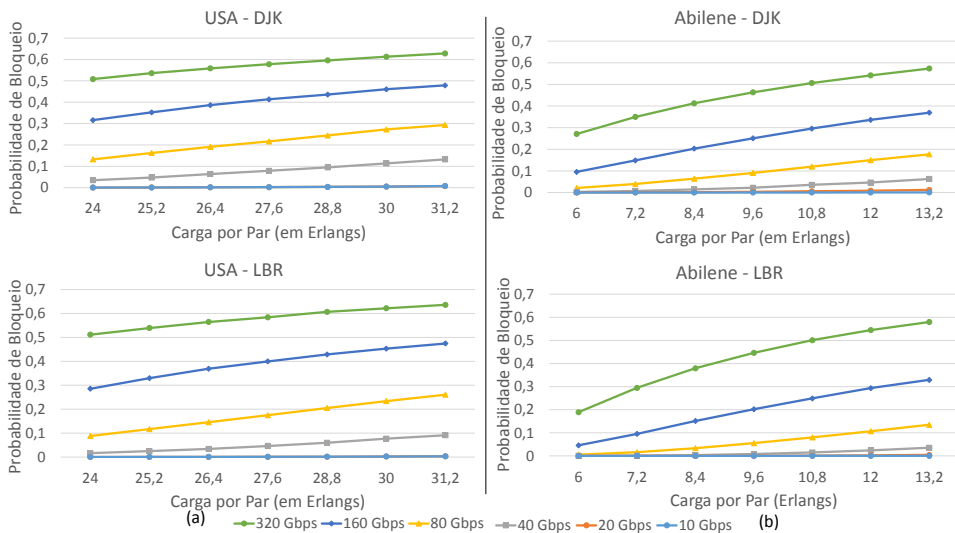


quando comparado ao DJK. Considerando as condições de carga e a largura de banda das requisições geradas no cenário estudado, para topologia USA o LBR apresenta ganho médio aproximado de 10,96% sobre o DJK, e para a topologia Abilene apresenta ganho médio aproximado de 45,99%.

4.2 Probabilidade de Bloqueio por Banda

A probabilidade de bloqueio por banda reflete a quantidade de bloqueio ocorrida para cada tamanho de requisição (10, 20, 40, 80, 160 e 320 Gbps). A Figura 7 exibe o valor de Probabilidade de Bloqueio para cada largura de banda das requisições utilizadas durante as simulações para ambas as topologias.

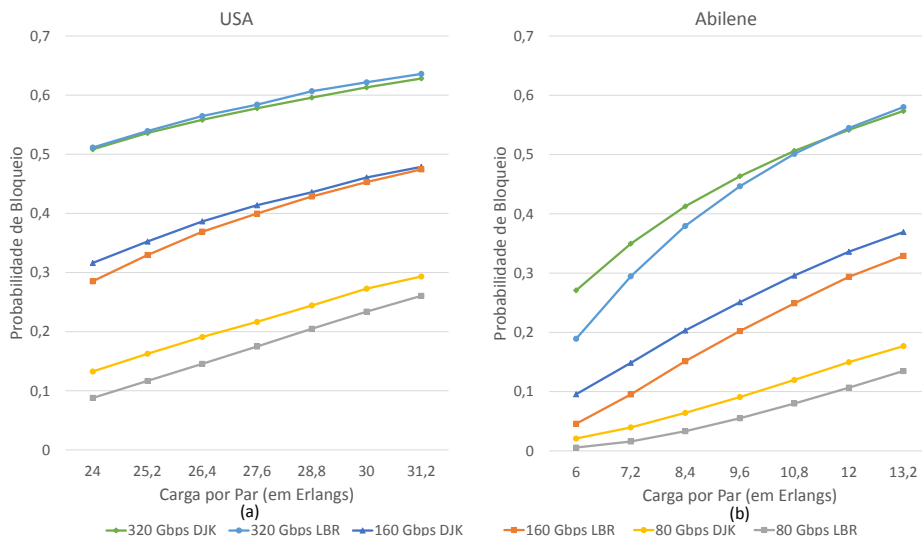
Figura 7: Probabilidade de Bloqueio por Banda para cada largura de banda das requisições nas topologias (a) USA e (b) Abilene.



Por necessitar de uma grande quantidade de slots contíguos, as requisições de 320 Gbps sofrem maior bloqueio. Percebe-se uma atenuação no valor de bloqueio a medida que se diminui a largura de banda das requisições. Pode-se observar que as requisições de menor largura de banda (10 Gbps) possuem bloqueio igual a zero em uma

baixa carga, pois sempre haverá 1 slot disponível, considerando que os enlaces não estejam sobrecarregados de circuitos estabelecidos (alta carga na rede). A Figura 8 exibe uma comparação entre a Probabilidade de Bloqueio por Banda do LBR e DJK para as requisições de maior largura de banda nas duas topologias.

Figura 8: Probabilidade de Bloqueio por banda para requisições de maior tamanho (320 Gbps, 160 Gbps e 80 Gbps) nas topologias (a) USA e (b) Abilene.



Nota-se um desempenho superior do LBR Adaptado quando comparado ao desempenho do DJK, em relação à Probabilidade de Bloqueio para requisições de mesma banda. Para ambas as topologias, com o aumento da carga, é perceptível graficamente a convergência dos valores de Probabilidade de Bloqueio. Isso ocorre pelo aumento da fragmentação geral da rede, que impossibilita o estabelecimento de circuitos de maior largura de banda, levando a maior bloqueio dessas requisições. Para amenizar esse problema, é necessário a utilização de técnicas de desfragmentação.

4.3 Fragmentação Externa

O valor de Fragmentação Externa retrata a razão entre o maior intervalo contíguo de slots desocupados e a quantidade total de slots desocupados [11]:

$$F_{ext} = 1 - \frac{\text{maiorIntervaloContíguo}}{n^{\circ} \text{ SlotsLivres}} \tag{1}$$

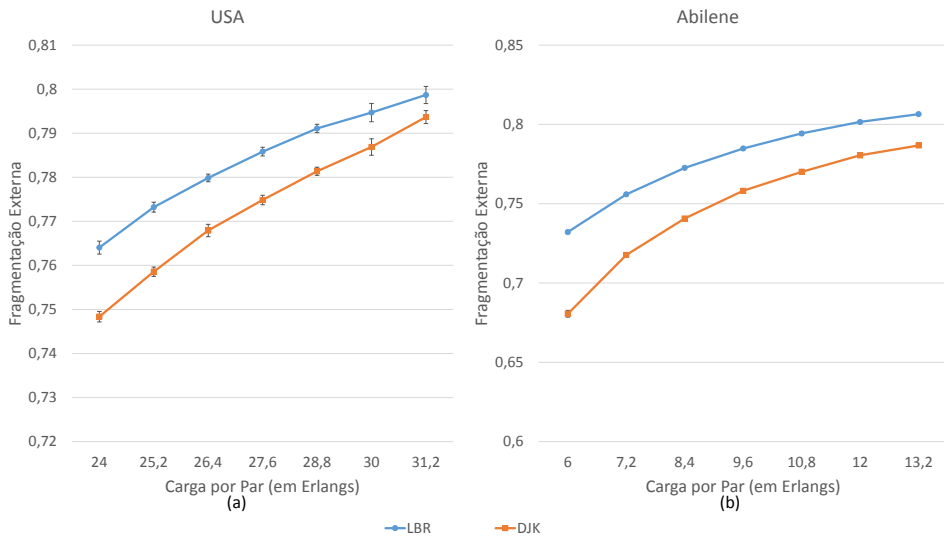
A Fragmentação Externa é uma métrica normalizada. Quanto maior o valor de Fragmentação Externa, menor será o maior intervalo de slots contíguos, reduzindo a possibilidade de atendimento de requisições de maior tamanho de banda. A Figura 9 exibe os resultados se Fragmentação Externa média para as topologias em estudo.

Percebe-se um maior valor de Fragmentação Externa média por parte do LBR. Isso ocorre como uma consequência da menor taxa de probabilidade de bloqueio, pois com a menor taxa apresentada pelo LBR, e considerando que são geradas a mesma quantidade de requisições (100.000), é possível inferir que mais conexões são atendidas quando o LBR é utilizado, levando a uma maior utilização dos recursos da rede, o que resulta em maior Fragmentação Externa média para ambas as topologias em estudo.

4.4 Fragmentação Relativa

A Fragmentação Relativa leva em conta o tamanho da banda exigida pela requisição, fornecendo o valor de fragmentação para circuitos daquele determinado tamanho[11]:

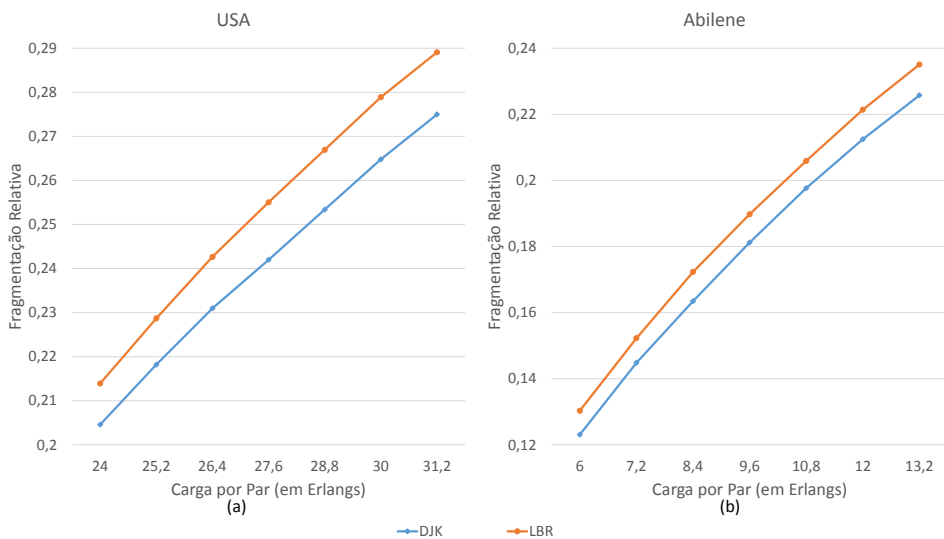
Figura 9: Resultados de Fragmentação Externa média para as topologias (a) USA e (b) Abilene.



$$F(c) = 1 - \frac{c * Livre(c)}{slotsLivres} \quad (2)$$

Onde c é a quantidade de slots da requisição e $Livre(c)$ indica a quantidade de intervalos de slots livres que suportam a requisição de tamanho c . A figura 10 apresenta o resultado gráfico de Fragmentação Relativa média para as topologias em estudo.

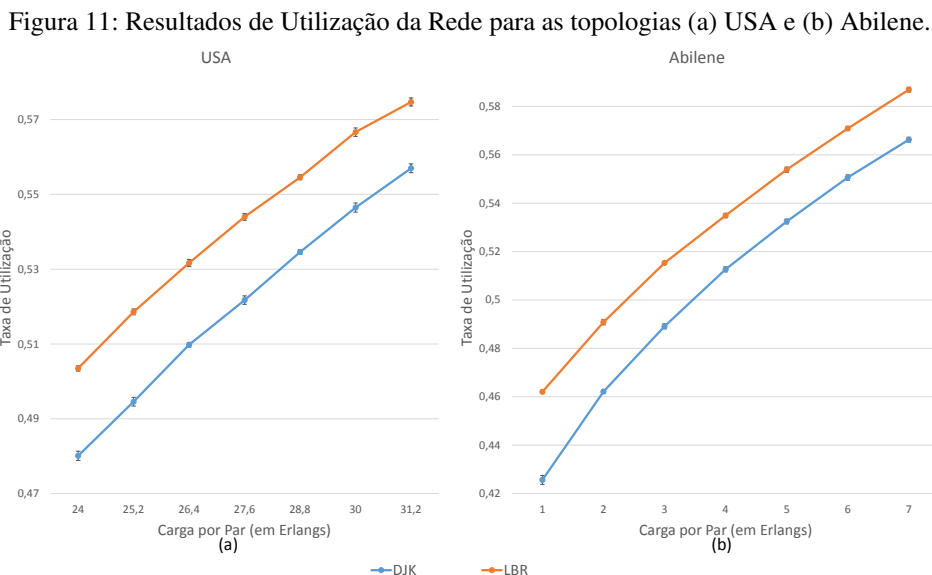
Figura 10: Resultados de Fragmentação Relativa média para as topologias (a) USA e (b) Abilene.



Assim como ocorre com a Fragmentação Externa, observa-se aqui um maior valor médio de Fragmentação Relativa para as execuções com LBR, visto que este admite maior número de conexões. Nota-se um ganho médio do DJK sobre LBR de 4,8% para a topologia USA e 4,5% para a topologia Abilene.

4.5 Utilização da Rede

A Utilização da Rede informa a porcentagem de espectro utilizado durante a execução das técnicas. Quanto maior o valor de Utilização da Rede, menor é a quantidade de recursos disponíveis. A Figura 11 exibe os valores de Utilização da Rede para as topologias estudadas.



O fator Probabilidade de Bloqueio também atinge a Utilização da rede: maiores valores de utilização para execuções do LBR mostram que este faz maior aproveitamento dos recursos fornecidos pela rede. Por não realizar um melhor balanceamento de rotas durante a fase de planejamento, o algoritmo DJK acaba subutilizando uma parte dos recursos da rede.

5 Conclusão

Para garantir atendimento a níveis adequados de QoS , é necessário uma adaptação das redes de transporte atuais, de modo a suportar o crescente tráfego de dados previsto para um curto espaço de tempo. Assim, surgem as Redes Ópticas, que utilizam a luz como vetor de dados, através de uma divisão do espectro em intervalo de frequência que operam de forma independente.

Como uma maneira de melhor aproveitar os recursos da rede, surge a tecnologia OFDM, que divide o espectro em intervalos de frequência denominados slots, os quais podem ser agrupados para atender requisições que necessitem de maior largura de banda. A possibilidade de alocar e desalocar diferentes intervalos de espectro ocasiona o problema de fragmentação, que se torna frequente alvo de estudo nos trabalhos relacionados a Redes Ópticas Elásticas.

A fim de reduzir os impactos da fragmentação, o problema RSA passa a ser tratado de modo a considerar possíveis bloqueios por fragmentação do espectro. O algoritmo LBR busca realizar um balanceamento durante a fase da escolha de rotas para os pares da rede. Assim, com rotas distribuídas de modo mais uniforme, ocorre um aumento nos níveis de fragmentação da rede, pois serão estabelecidas uma quantidade maior de conexões.

Foram realizadas simulações através da ferramenta SNETS, nas quais foi avaliado o desempenho do LBR comparado ao algoritmo DJK, em duas topologias reais: USA e Abilene. Foi constatado que, para o mesmo cenário de estudo, o LBR apresenta menor Probabilidade de Bloqueio de Circuito, permitindo o estabelecimento de maior número de circuitos quando comparado ao DJK. Conseqüentemente, observa-se um aumento do valor de fragmentação e de utilização da rede (pois mais requisições serão admitidas). Portanto, observa-se que a utilização do LBR Adaptado se fez eficaz no cenário de Redes Ópticas Elásticas, tornando-se uma alternativa viável para aplicação em cenários reais.

Referências

- [1] CISCO. Cisco visual networking index. <http://corporate.canaltech.com.br/noticia/internet/Trafego-IP-mundial-devera-atingir-16-zettabytes-ate-2018-aponta-Cisco/>, Dezembro 2014.
- [2] RAMASWAMI, R.; SILVARAJAN, K. N. *Optical Network - A Practical Perspective*. 2nd. ed. [S.l.: s.n.], 2002.
- [3] BERTHOLD A. SALEH, L. B. J.; SIMMONS, J. *Optical networking: Past, present, and future*. 2008.
- [4] SANTOS, A. F. et al. Roteamento e alocação de espectro em redes ópticas: O conceito slice. *XXX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBrT)*, September 2012.
- [5] PEREIRA, P. M. Redes ópticas elásticas. *Trabalho de Conclusão de Curso. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo*, 2013.
- [6] PAGES, A.; PERELLÓ, J.; SPADARO, S. Lightpath fragmentation for efficient spectrum utilization in dynamic elastic optical networks. In: *Optical Network Design and Modeling (ONDM), 2012 16th International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–6.
- [7] CHATTERJEE, M.; SHARMA, A.; BHATTACHARYA, U. Congestion optimized routing in unidirectional de bruijn wdm networks in presence of node faults. In: *Ultra Modern Telecommunications Workshops, 2009. ICUMT '09. International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–6.
- [8] DIJKSTRA, E. W. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische mathematik*, Springer, v. 1, n. 1, p. 269–271, 1959.
- [9] SOCRATES-DANTAS, J. et al. A study in current dynamic fragmentation-aware rsa algorithms. In: *Transparent Optical Networks (ICTON), 2014 16th International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–4.
- [10] JINNO, M. et al. Distance-adaptive spectrum resource allocation in spectrum-sliced elastic optical path network [topics in optical communications]. *Communications Magazine, IEEE*, v. 48, n. 8, p. 138–145, August 2010. ISSN 0163-6804.
- [11] HOROTA, A. K.; FIGUEIREDO, G. B.; FONSECA, N. L. S. da. Algoritmo de roteamento e atribuição de espectro com minimização de fragmentação em redes óticas elásticas. In: *Anais do 32 Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC 2014)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 895–908.