

ANÁLISE COMPARATIVA DO ALGORITMO DIJKSTRA COM E SEM DESFRAGMENTAÇÃO NAS REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS

Selles Gustavo Ferreira Carvalho Araújo

Ênio Luciano Vieira Barbosa

José Valdemir dos Reis Júnior

André Castelo Branco Soares

Universidade Federal do Piauí – UFPI

Departamento de Computação

Campus Universitário Ministro Petrônio Portella, Teresina – PI

sellesgustavo@gmail.com

Resumo – As redes ópticas elásticas surgiram com o objetivo de lidar com o grande crescimento de tráfego de dados na Internet, utilizando os recursos da rede de forma eficiente. A eficiência acontece a partir da utilização da tecnologia *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*, que permite a divisão do espectro em intervalos de frequência denominados *slots*. Para o estabelecimento de um caminho óptico nas redes elásticas, é necessário a definição de uma rota e de um intervalo de espectro. Com o estabelecimento e encerramento dos circuitos em um cenário dinâmico, surge o problema da fragmentação, que impossibilita o atendimento de novas requisições. Para mitigar este problema, algoritmos de desfragmentação são executados com periodicidade. Neste trabalho, é proposto uma análise do algoritmo *Dijkstra* com e sem a utilização de desfragmentação, a fim de avaliar os benefícios relacionado às métricas de probabilidade de bloqueio de circuito, probabilidade de bloqueio de banda, fragmentação externa e utilização do espectro em duas topologias de rede distintas. Por fim, foi analisado também o consumo energético dos cenários.

Palavras-chave – Redes ópticas elásticas, desfragmentação do espectro, realocação de circuitos, algoritmo RMLSA.

Abstract – Elastic optical networks have emerged with the goal of dealing with the great growth of data traffic on the Internet, using the resources of the network efficiently. Efficiency happens through the use of Orthogonal Frequency Division Multiplexing technology, which allows the division of the spectrum into frequency ranges called slots. For the establishment of an optical path in the elastic networks, it is necessary to define a route and a range of spectrum. With the establishment and closure of circuits in a dynamic scenario, the problem of fragmentation arises, which makes it impossible to attend to new requests. To mitigate this problem, defragmentation algorithms are run periodically. In this work, an analysis of the Dijkstra algorithm with and without the use of defragmentation is proposed, in order to evaluate the loss and gain related to the metrics of circuit block probability, probability of blocking bandwidth, external fragmentation and spectrum usage in two distinct network topologies. Finally, the energy consumption of the scenarios was also analyzed.

Keywords – Elastic optical networks, spectrum defragmentation, circuit reallocation, RMLSA algorithm.

1. INTRODUÇÃO

O crescente aumento no número de usuários e o surgimento de diversos serviços na Internet, tem requerido uma maior largura de banda no núcleo dos sistemas de comunicações. Segundo a Cisco, por exemplo, estima-se que em 2021 cerca de 51% da população mundial estará conectada na rede [1]. Além disso, dentre as diversas aplicações existentes ou emergentes na Internet, o vídeo sob demanda será responsável por 82% do tráfego IP global [1]. No intuito de suportar toda a demanda gerada, infraestruturas de rede são propostas com o objetivo de gerenciar os recursos de forma eficiente, além de prover qualidade nos serviços de transmissão [2].

Dentre várias soluções propostas para lidar com o alto crescimento do tráfego, as redes ópticas elásticas (EONs - *Elastic Optical Networks*) [2–4] têm sido uma alternativa promissora. Pois, as EONs tem se destacado por atender a grandes volumes de transmissões de dados de forma eficiente [2, 5]. A eficiência ocorre devido a utilização da tecnologia de Multiplexação Ortogonal por Divisão de Frequência (*Orthogonal Frequency Division Modulation* - OFDM) [2], que divide o espectro em pequenos intervalos de frequência denominados *slots*. Essa divisão permite flexibilidade no atendimento de requisições com diferentes taxas de *bits*, evitando subutilização de recursos.

Para a transmissão de dados nas redes ópticas elásticas, é necessário estabelecer circuitos ópticos. Para o estabelecimento dos circuitos, resolve-se o problema de roteamento e atribuição de espectro (*Routing and Spectrum Assignment* - RSA) [6, 7]. Tal problema consiste da definição de uma rota e da seleção de um conjunto de *slots* livres que atenda a demanda de tráfego.

Em um ambiente de tráfego dinâmico nas EONs, o estabelecimento e finalização de circuitos causa o problema denominado fragmentação do espectro [5, 8]. A fragmentação consiste da distribuição de pequenos blocos de *slots* no espectro e, eventualmente, impossibilita o estabelecimento de novas requisições de circuitos.

Para mitigar a fragmentação do espectro, é necessário a execução periódica de algoritmos de desfragmentação [8–11]. Estes algoritmos são utilizados para reduzir a distribuição de pequenos blocos de *slots* livres no espectro, diminuindo a fragmentação na rede. O processo de desfragmentação do espectro contribui para que novas demandas de tráfego sejam atendidas, reduzindo a probabilidade de bloqueio geral de circuitos.

Neste contexto, este trabalho apresenta uma análise comparativa do desempenho do algoritmo *Dijkstra* (DJK) com e sem a utilização do processo de desfragmentação. O objetivo da análise é avaliar o impacto da desfragmentação além de apresentar suas vantagens. Para avaliar o desempenho, utilizou-se as seguintes métricas: i) probabilidade de bloqueio de circuito, ii) probabilidade de bloqueio de banda, iii) fragmentação externa, iv) utilização do espectro e v) consumo energético da rede. Além disso, considerou-se duas topologias de rede reais: NSFNet e EON.

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma. A Seção 2 apresenta conceitos e características das redes ópticas elásticas. Na Seção 3 é discutido os trabalhos relacionados além de apresentar as contribuições deste artigo. Já a Seção 4 apresenta a avaliação de desempenho do algoritmo DJK com e sem a desfragmentação do espectro, discutindo cada métrica considerada. E por fim, a Seção 5 apresenta as conclusões deste trabalho.

2. REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS

As redes ópticas elásticas utilizam a tecnologia OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) [2–4], no qual permite dividir o espectro em pequenos intervalos de frequência denominados *slots* (6,25GHz ou 12,5GHz) [12, 13]. Os *slots* podem ser agrupados para formar maiores canais de comunicação, permitindo o atendimento de requisições que exigem maior largura de banda. A Figura 1 apresenta a divisão dos recursos espectrais em uma rede óptica elástica com três circuitos estabelecidos.

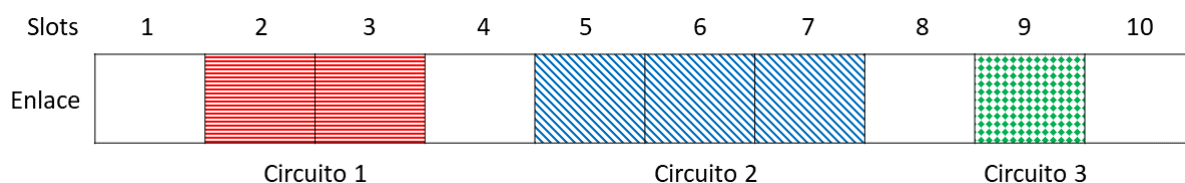


Figura 1: Divisão do espectro óptico em redes ópticas elásticas.

A Figura 1 ilustra um cenário de rede com um enlace composto de 10 *slots* de frequência. Os circuitos alocados na rede utilizam a quantidade de um (Circuito 3), dois (Circuito 1) e três (Circuito 2) *slots* para a transmissão dos dados. A necessidade de número de *slots* distintos está associado à taxa de *bits* de cada circuito e o tamanho de sua rota.

Para a transmissão de dados nas redes ópticas elásticas, é necessário a resolução do problema RMLSA (*Routing, Modulation Level and Spectrum Assignment*) [3, 6, 7]. O problema RMLSA pode ser dividido em três subproblemas: i) roteamento, ii) escolha do formato de modulação e iii) seleção da faixa de espectro para a requisição.

O roteamento consiste em encontrar uma rota para o par de nós origem-destino da requisição de circuito. A escolha da rota depende do critério adotado no algoritmo de roteamento. Um exemplo disso é o algoritmo de *Dijkstra* [3], no qual considera a menor distância física dos enlaces para a definição da rota. Já em [14], por exemplo, a rota escolhida será aquela que apresenta menor quantidade de *slots* utilizados.

Após a escolha da rota, define-se o formato de modulação adequado para o estabelecimento do circuito. A modulação determina a quantidade de *slots* necessários para a requisição e é escolhida conforme a distância de propagação do sinal óptico [7, 12, 13]. A partir desta distância, seleciona-se um formato de modulação adequado que permita a transmissão dos dados de modo que o sinal seja interpretado corretamente no receptor. Cada formato de modulação suporta uma quantidade de *bits* por símbolo. Quanto mais *bits* são transmitidos em um único símbolo, mais informações são transportadas, menos recursos espectrais são necessário para a propagação do sinal e, portanto, a modulação se torna mais eficiente espectralmente. Na Figura 2, é apresentada uma relação entre a distância de propagação do sinal e a eficiência espectral dos formatos de modulação considerados neste trabalho.

Observa-se na Figura 2 que quanto maior a distância de propagação do sinal óptico, os formatos de modulação possuem menor eficiência espectral. Considerando um circuito com rota de distância 900km, por exemplo, os três formatos de modulação poderiam ser utilizados. No entanto, o 16QAM seria a modulação que necessitaria do menor número de *slots* para a transmissão dos dados, consumindo a menor quantidade de recursos da rede em relação aos formatos de modulação BPSK e QPSK.

Com o formato de modulação adequado definido, tem-se a quantidade de *slots* de frequência necessária para o estabelecimento do circuito. A partir da quantidade de *slots*, busca-se uma faixa de espectro livre nos enlaces da rota selecionada. A faixa de espectro escolhida deve atender a duas restrições do meio óptico: i) contiguidade e ii) continuidade de espectro. Para o atendimento da restrição de contiguidade, os *slots* devem ser adjacentes. Já na restrição de continuidade, a faixa de espectro escolhida deve ser a mesma em todos os enlaces da rota [4, 7, 12, 13, 15].

Por fim, é importante avaliar as redes elásticas quanto ao consumo energético, que consiste da utilização dos recursos consumidos durante o funcionamento da rede. Para uma análise do consumo, adotou-se o modelo de consumo energético proposto

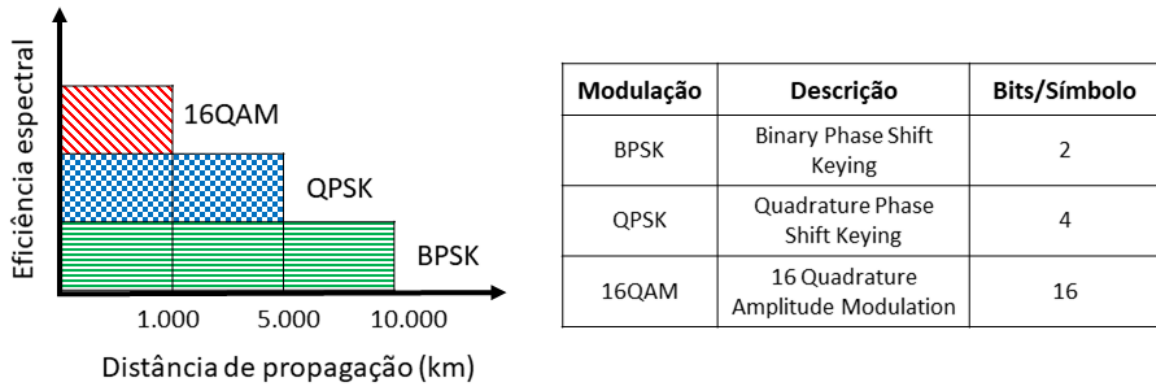


Figura 2: Relação entre a distância de propagação do sinal óptico e eficiência espectral dos formatos de modulação considerados neste trabalho.

em [16, 17], no qual foram utilizados os *transponders*, comutadores ópticos e amplificadores. O consumo de um *transponder* varia conforme o formato de modulação, largura de banda e quantidade de *slots* da requisição [16]. O consumo do comutador óptico depende do grau do nó, além de uma adição de 150 *Watts* para sua localização [17]. Já o consumo para um amplificador, considerou-se 60 *Watts* por direção (par de fibras) do enlace, além da adição de 140 *Watts* pela localização do amplificador [17].

2.1 DESFRAGMENTAÇÃO DO ESPECTRO

A desfragmentação do espectro [9–11, 18] consiste da realocação de circuitos ativos da rede com objetivo de mitigar a fragmentação. A fragmentação é mitigada quando blocos de *slots* distribuídos no espectro tornam-se contíguos e contínuos nos enlaces ópticos [8]. Este processo minimiza os bloqueios causados por fragmentação e portanto maximiza a admissão de requisições na rede. A Figura 3 apresenta o estado da rede antes e após o processo de desfragmentação do espectro.

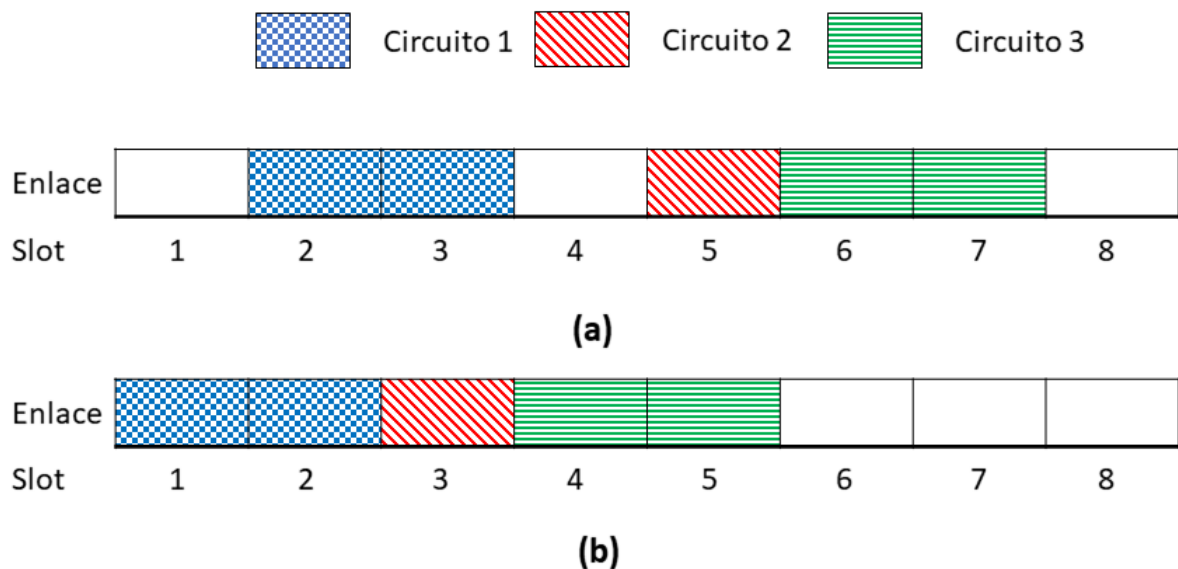


Figura 3: Estado do espectro óptico (a) antes e (b) após o processo de desfragmentação.

Na Figura 3 é apresentado o estado da rede em um enlace composto de oito *slots* de frequência com três circuitos estabelecidos (Circuito 1, Circuito 2 e Circuito 3). A Figura 3(a) exibe o espectro óptico fragmentado e, portanto, impossibilitado de atender requisições que necessitam de dois ou três *slots*. A impossibilidade de atendimento é devido aos *slots* não estarem contíguos no espectro. No intuito de minimizar bloqueios para uma requisição com três *slots*, o processo de desfragmentação é ativado e executado na rede. O resultado da aplicação da desfragmentação na Figura 3(a), segundo uma estratégia, é a geração de três *slots* contíguos, conforme apresentado na Figura 3(b). Logo, após a realocação dos três circuitos ativos, é possível o atendimento de uma requisição com três *slots* de frequência.

O processo de desfragmentação consiste da execução de uma estratégia de desfragmentação quando uma condição denominada gatilho é satisfeita [9]. Após a condição de gatilho ser atendida, é necessário escolher quais os circuitos ativos serão submetidos ao processo de realocação [11]. Em seguida, define-se uma nova solução RMLSA para cada circuito selecionado

e aplica-se uma técnica de migração de tráfego. A técnica utilizada neste trabalho é a *Make-Before-Break* (MBB) [10] por ser comumente usada na literatura. O funcionamento da técnica MBB consiste em estabelecer um circuito em uma nova solução RMLSA antes de desativá-lo da solução RMLSA original, não interrompendo o tráfego de dados [9–11, 18]. Além disso, o gatilho utilizado é baseado na proposta de [19], no qual o processo de desfragmentação ocorre quando a quantidade de circuitos finalizados na rede atingir um limiar. Foram gerados três cenários com desfragmentação e limiares de 10, 50 e 100.

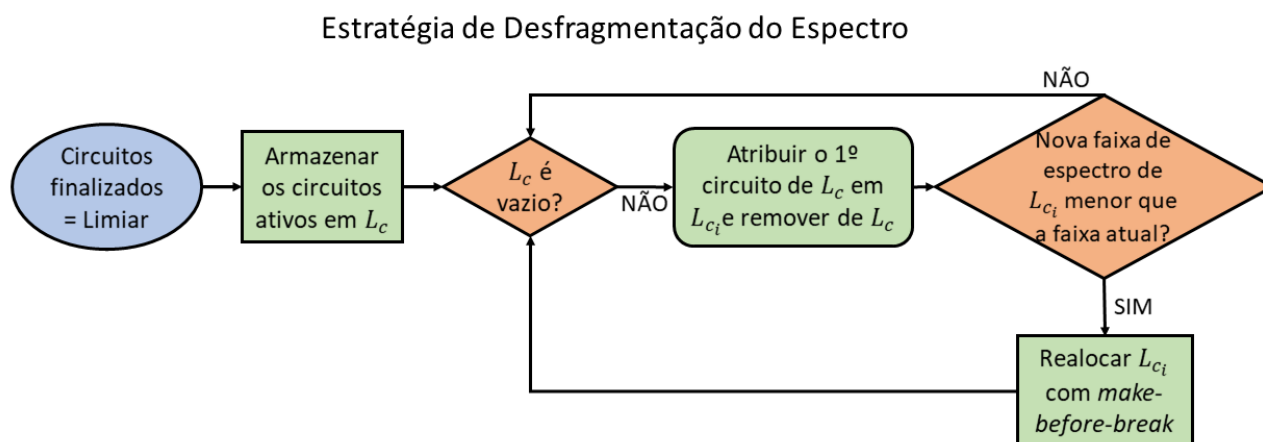


Figura 4: Estratégia de desfragmentação do espectro utilizada nos estudos.

A Figura 4 exibe o fluxograma de funcionamento da estratégia de desfragmentação utilizada nos estudos. Os circuitos selecionados para realocação são armazenados na lista L_c e cada um (L_{c_i}) é submetido ao processo de encontrar uma nova solução RMLSA. A definição da nova solução RMLSA ocorreu da seguinte forma: os circuitos ativos são realocadas para uma das três menores rotas de um par origem-destino e a rota selecionada será a que apresentar o conjunto de *slots* mais próximo do início do espectro. O tráfego de dados para um circuito é efetivado apenas se a nova faixa espectral é mais próxima do início do enlace comparado à faixa atual. Caso contrário, o circuito permanece em sua solução RMLSA original.

3. TRABALHOS RELACIONADOS

No contexto das redes ópticas elásticas, o problema da fragmentação do espectro se torna comum. Em um cenário dinâmico, a fragmentação ocorre em decorrência do estabelecimento e finalização dos circuitos a todo momento. Isto permite a geração de pequenos blocos de *slots* livres distribuídos no espectro. Esta distribuição contribui consideravelmente para o bloqueio de requisições de circuitos. Trabalhos na literatura tem sido proposto para mitigar a fragmentação a partir da execução periódica do processo de desfragmentação do espectro [8–11, 18, 20–22].

O processo de desfragmentação do espectro pode ser categorizado em reativo ou proativo, segundo a condição de gatilho [9, 11]. Esquemas reativos [10, 18] propõem a execução da estratégia de realocação quando, por exemplo, uma nova requisição de circuito é bloqueada. Em contrapartida, nos esquemas proativos [11, 19, 23] a desfragmentação ocorre sempre que, por exemplo, o nível de fragmentação atinge um determinado limiar predefinido. O objetivo dos esquemas proativos é o de prevenção de bloqueios.

Os trabalhos de desfragmentação podem ainda ser classificados em duas classes de algoritmos relacionadas à interrupção do tráfego de dados, são elas: *hitless* e *non-hitless* [24]. Algoritmos de desfragmentação *hitless* utilizam técnicas que permitem a migração do circuito, como *make-before-break* [10], para a nova solução RMLSA sem perda de dados. Já estratégias de desfragmentação que causam interrupção do tráfego durante a realocação do circuito são chamadas de algoritmos *non-hitless*. Um exemplo de *non-hitless* é a técnicas *reoptimization* [18] que é uma forma de realocação mais otimizada em relação às demais técnicas e comumente utilizada para fins comparativos.

Os autores em [19] propõem uma estratégia de desfragmentação de espectro que busca realocar apenas os circuitos ativos que compartilham o enlace mais fragmentado da rede. A equação utilizada para representar a métrica de fragmentação foi descrita e detalhada no respectivo trabalho. Para a execução da estratégia proposta, foi proposto e definido um gatilho, no qual consiste da quantidade de circuitos finalizados na rede. O processo de desfragmentação é iniciado quando o gatilho atingir um limiar (10, 50 e 100 utilizados) predefinido no trabalho.

Já em [25], foi proposto um algoritmo *hitless* considerando a informação de *holding time* dos circuitos. A estratégia do algoritmo consiste em reorganizar os circuitos ativos em ordem decrescente de tempo de permanência na rede, do menor índice de *slot* para o maior no espectro. Consequentemente, os circuitos serão finalizados seguindo da extremidade final do espectro para a extremidade do início. A avaliação de desempenho do algoritmo foi realizado sob os aspectos da probabilidade de bloqueio de circuito geral da rede.

A desfragmentação também é foco de trabalhos envolvendo sobrevivência de redes [23, 26, 27]. Em [23], por exemplo, é apresentado uma estratégia de desfragmentação utilizando proteção dedicada, onde cada circuito óptico possui uma rota *backup*

no qual trafega os mesmos dados transmitidos na rota principal. A partir desta abordagem, tanto os circuitos principais como os de *backup* poderão ser realocados sem a interrupção do tráfego de dados. Assim, quando o circuito principal for realocado, é realizado uma troca de funções do caminho, no qual o circuito *backup* passa funcionar como principal. A avaliação de desempenho foi realizada comparando um cenário sem e com a utilização da estratégia de desfragmentação proposta sob a métrica de probabilidade de bloqueio de circuito e probabilidade de bloqueio de banda.

Os trabalhos na literatura propõem algoritmos de desfragmentação para mitigar a fragmentação do espectro e, por consequência, reduzir os bloqueios de requisições. Para cada algoritmo, apresenta-se uma estratégia combinando-a com diferentes gatilhos ou técnicas de migração do tráfego. Neste contexto, este trabalho tem como propósito avaliar o impacto da desfragmentação do espectro quando aplicada em um cenário de rede. Além disso, o impacto da utilização de uma estratégia de desfragmentação é analisado através de um amplo conjunto de métricas de avaliação de desempenho.

4. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Nesta seção é apresentado os resultados obtidos via simulações computacionais utilizando o simulador SNetS (*SLICE Network Simulator*) [28]. Para a avaliação de desempenho da rede, adotou-se as seguintes métricas: i) probabilidade de bloqueio de circuito, ii) probabilidade de bloqueio de banda, iii) fragmentação externa, iv) utilização do espectro e v) consumo energético. Além disso, os experimentos foram realizados considerando as topologias de rede EON e NSFNet, apresentadas na Figura 5(a) e Figura 5(b), respectivamente.

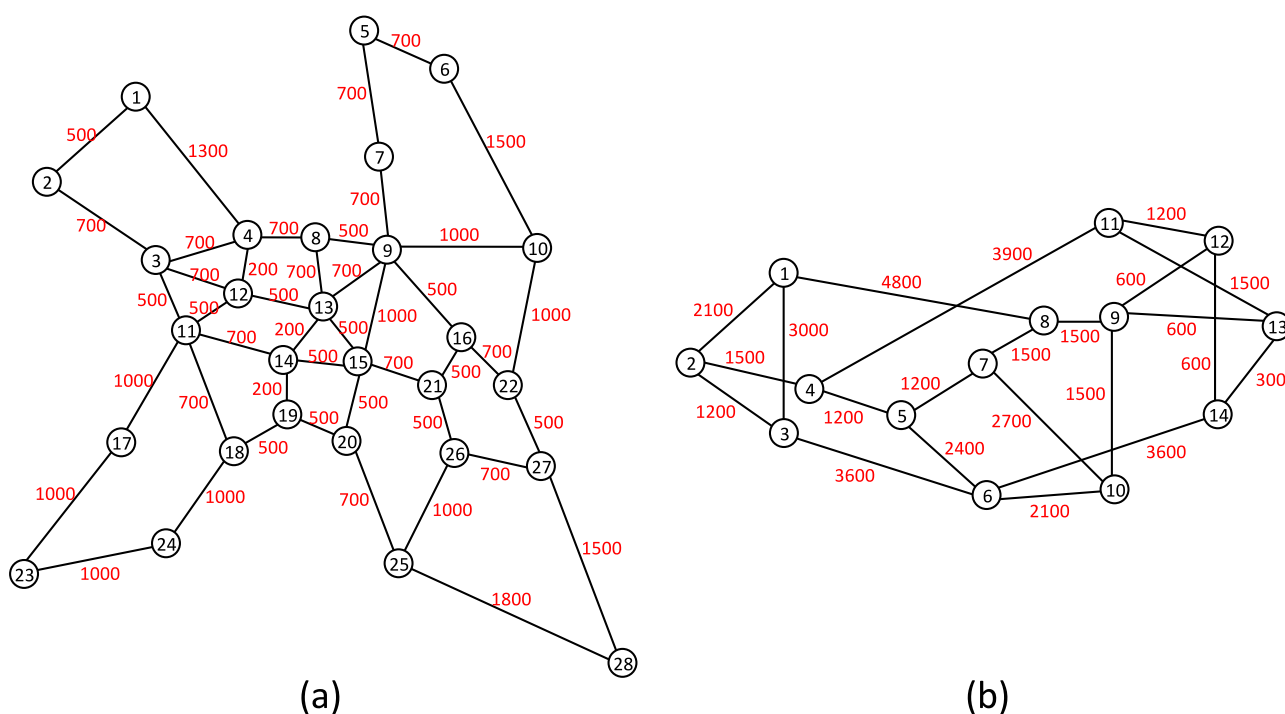


Figura 5: Topologias de rede (a) EON e NSFNet (b). A distância entre os enlaces é medida em quilômetros.

Foi considerado neste estudo o tráfego dinâmico. Neste tipo de tráfego, as requisições na rede são geradas segundo um processo *poissoniano* de taxa de chegada média (λ) e tempo de permanência dos circuitos exponencialmente distribuído com média $1/\mu$ (μ representa a taxa de atendimento média). Além disso, a carga de tráfego foi distribuída uniformemente entre todos os pares de nós da rede e é dada por $\rho = \lambda / \mu$ (*Erlangs*) [5]. A carga na rede para cada topologia foi definida de forma que a probabilidade de bloqueio de circuito seja inferior a 25%.

O desempenho foi avaliado sob a quantidade de 100.000 requisições geradas na rede. Considerou-se as larguras de banda 80, 160, 320, 500, 750, 1000 e 1250 Gbps para as requisições de circuito. Além disso, foram realizadas 10 replicações com cinco valores distintos de carga na rede. A Tabela 1 apresenta os demais parâmetros de simulação utilizados no estudo.

Foi utilizado para os experimentos o algoritmo de roteamento *Dijkstra* (DJK), que seleciona a rota com menor distância, e a política de alocação de espectro *First Fit*, que retorna o primeiro intervalo de espectro disponível que atenda a requisição. O formato de modulação escolhido é aquele que apresenta maior eficiência espectral e que seja adequado à distância de propagação do sinal óptico.

A sigla “DJK” significa que foi utilizado o algoritmo *Dijkstra* com a política de alocação *First Fit*. Já a nomenclatura “DJK Gat=10”, “DJK Gat=50” e “DJK Gat=100” corresponde à execução do algoritmo DJK com aplicação do processo de desfragmentação do espectro a cada 10, 50 e 100 circuitos finalizados, respectivamente.

Tabela 1: Parâmetros de simulação

Parâmetros de Simulação	
Topologia	NSFNet (14 nós) e EON (28 nós)
Quantidade de slots	320
Replicações	10
Pontos de carga	5
Quantidade de Requisições	100.000
Nível de confiança	95%
Frequência do slot	12,5 GHz
Formatos de modulação	BPSK, QPSK e 16QAM
Larguras de banda	80, 160, 320, 500, 750, 1.000 e 1.250 Gbps

4.1 PROBABILIDADE DE BLOQUEIO DE CIRCUITO

A Probabilidade de Bloqueio de Circuito (PBC) é a razão entre a quantidade de requisições bloqueadas e a quantidade de requisições geradas na rede. Os valores para a PBC variam de 0 a 100%. Quanto mais próximo de 100% é o resultado da PBC para um algoritmo, pior é seu desempenho para essa métrica. O cálculo da PBC consiste da seguinte equação:

$$PBC = \frac{\text{quantidadeRequisicoesBloqueadas}}{\text{quantidadeTotalRequisicoesGeradas}}$$

O bloqueio de requisições ocorre devido a ausência de recursos livres na rota definida para a requisição. Além disso, o bloqueio pode acontecer também pelo não atendimento das restrições de contiguidade e continuidade do espectro. Na Figura 6, é apresentado os resultados da probabilidade de bloqueio de circuito em relação a carga de tráfego na rede para ambas as topologias consideradas.

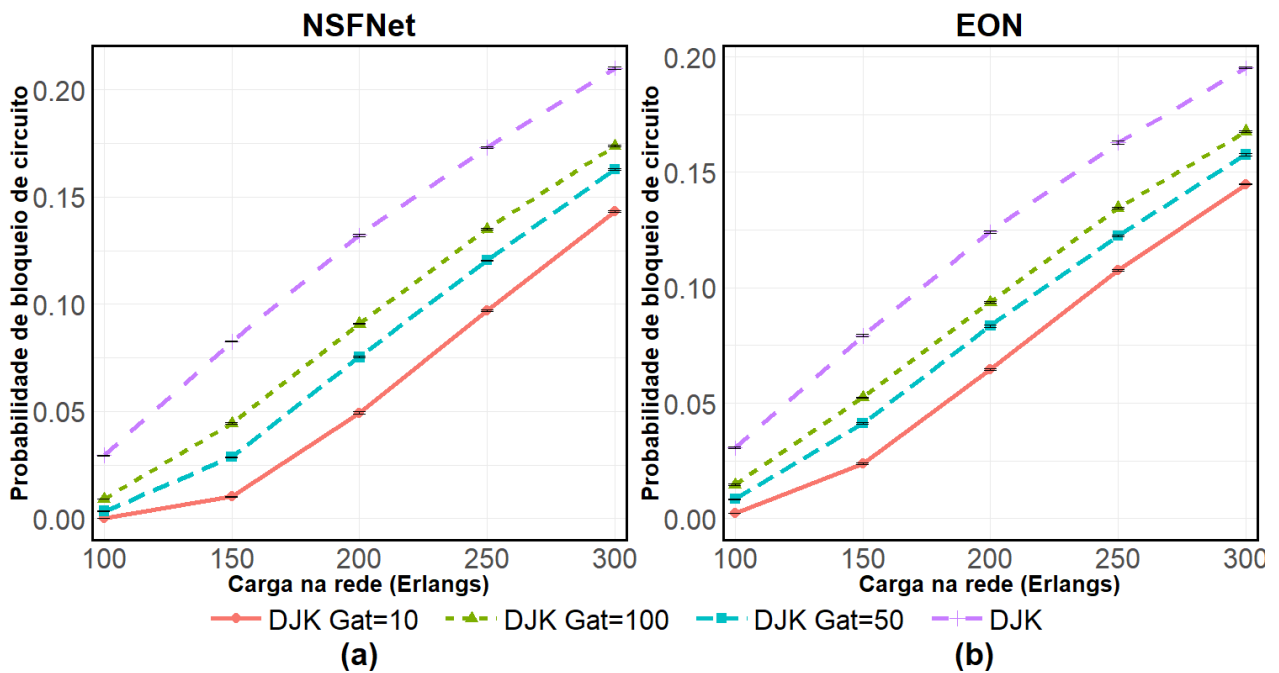


Figura 6: Probabilidade de bloqueio de circuito do cenário com e sem desfragmentação do espectro para as topologias (a) NSFNet e (b) EON.

A Figura 6(a) apresenta a PBC para a topologia NSFNet sob diferentes cargas de tráfego. Observa-se que quando o espectro é desfragmentado, a PBC é inferior em todos os pontos de carga quando comparado ao DJK. Considerando a carga 300 *Erlangs*, por exemplo, observa-se que a redução da PBC do DJK Gat=10, DJK Gat=50 e DJK Gat=100, em relação ao DJK foi de aproximadamente 32%, 28% e 22% respectivamente.

Já a Figura 6(b) ilustra a PBC na topologia EON em relação ao tráfego na rede. Assim como na topologia NSFNet (Figura 6(a)), na topologia EON os resultados da PBC correspondentes ao cenário com desfragmentação apresentaram valores inferiores comparados ao DJK. Para o último ponto de carga, por exemplo, as reduções foram de 25,9%, 19,3% e 14,08% respectivamente para o DJK Gat=10, DJK Gat=50 e DJK Gat=100 em relação ao algoritmo DJK sem utilização do processo de desfragmentação.

A redução obtida em ambas as topologias de rede foi devido a aplicação do processo de realocação de circuitos para reduzir a fragmentação do espectro. Este processo permite gerar faixas espectrais contíguas e contínuas no intuito de admitir mais requisições na rede. Quanto maior a frequência de desfragmentação do espectro, mais requisições de circuitos podem ser estabelecidas e isto é observado na Figura 6, quando o DJK Gat=10 apresenta PBC inferior em todos os pontos de carga em relação aos demais concorrentes.

4.2 PROBABILIDADE DE BLOQUEIO DE BANDA

A Probabilidade de Bloqueio de Banda (PBB) faz distinção entre o bloqueio de circuitos com requisitos de largura de banda diferente e consiste da razão da quantidade de banda bloqueada pela quantidade de banda requisitada. O cálculo da PBB é definido da seguinte forma:

$$PBB = \frac{\sum LBB_i * TB_i}{\sum LB_j * T_j}$$

onde LBB_i e TB_i é a largura de banda e o tempo de duração de cada circuito bloqueado, respectivamente. Já LB_j e T_j representam, nesta ordem, a largura de banda e a duração de cada circuito requisitado. A Figura 7 exibe a PBB para cada topologia de rede utilizada.

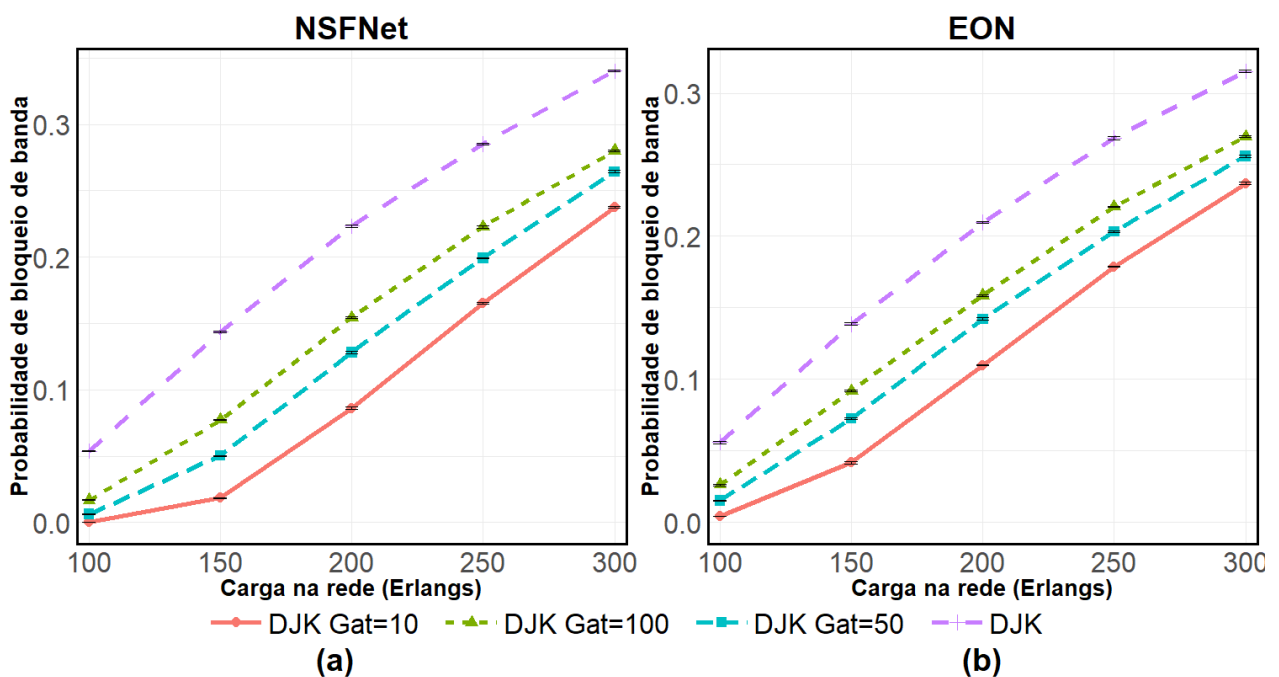


Figura 7: Probabilidade de bloqueio de largura de banda para a topologia (a) NSFNet e (b) EON.

A PBB em relação a carga na rede para a topologia NSFNet é apresentada na Figura 7(a). A redução na PBB foi alcançada em todos os pontos de carga considerados quando aplicado o processo de desfragmentação. Em relação a carga de 300 *Erlangs*, por exemplo, o DJK Gat=10 diminuiu a PBB em 30,02% quando comparado ao DJK. Já para a topologia EON, apresentada na Figura 7(b), os resultados foram semelhantes aos obtidos na topologia NSFNet, correspondendo a uma redução de 24,83% do DJK Gat=10 em relação ao cenário que não utiliza a desfragmentação do espectro (DJK).

Além da probabilidade de bloqueio de banda mencionado acima, é possível apresentar a PBB para cada largura de banda utilizada. A Figura 8 indica a PBB na topologia NSFNet considerando as taxas 500, 750, 1000 e 1250 Gbps afim de analisar quais larguras de banda sofrem mais bloqueios.

É possível observar na Figura 8(a) que as requisições de circuitos que necessitam de mais recursos (*slots*) tendem a bloquear com mais frequência em relação às requisições com menores larguras de banda, assim como na Figura 8(b). A probabilidade de bloqueio do DJK de cada requisição considerada para análise é apresentada na Figura 8(a). Em todos os pontos de carga as requisições de taxa 1250 Gbps apresentam maiores bloqueios em relação às demais taxas.

Já a Figura 8(b) indica a probabilidade de bloqueio do DJK Gat=10, que corresponde ao algoritmo DJK com desfragmentação a cada 10 circuitos finalizados na rede. É possível observar que o processo de desfragmentação permite a redução de bloqueios de requisições de circuitos de grandes larguras de banda. Considerando a carga 300 *Erlangs*, por exemplo, enquanto requisições de 1250 Gbps apresentam bloqueios de mais de 50% para o cenário da Figura 8(a), o bloqueio para a mesma largura de banda (1250Gbps) é de aproximadamente 40%, alcançando redução de ao menos 20%. Assim como para a banda 1250Gbps, as demais taxas consideradas na análise apresentam reduções consideráveis.

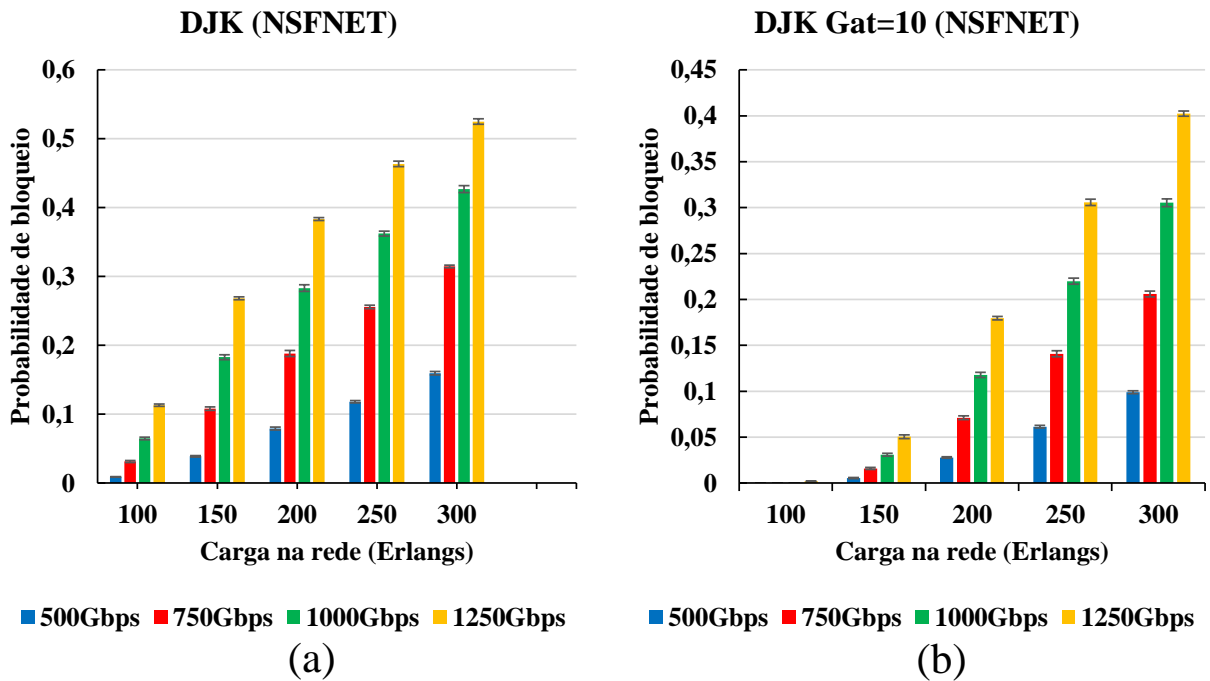


Figura 8: Probabilidade de bloqueio de banda dos algoritmos (a) DJK e (b) DJK Gat=10 considerando as taxas 500, 750, 1000 e 1250 Gbps na topologia NSFNet.

4.3 FRAGMENTAÇÃO EXTERNA

A Fragmentação Externa (FE) consiste da razão entre o maior intervalo contíguo de *slots* livres e a quantidade total de *slots* desocupados considerando um enlace, conforme descrito na seguinte equação:

$$F_{ext} = 1 - \frac{\text{maiorIntervaloContiguo}}{\text{numeroSlotsLivres}}$$

A partir da equação da FE, quanto maior o valor de fragmentação, menor será o maior intervalo de espectro contíguo livre, reduzindo a possibilidade de estabelecimento de requisições de circuito de maior tamanho de banda. Na Figura 9, é apresentado os resultados correspondentes à fragmentação externa média para as topologias utilizadas neste trabalho.

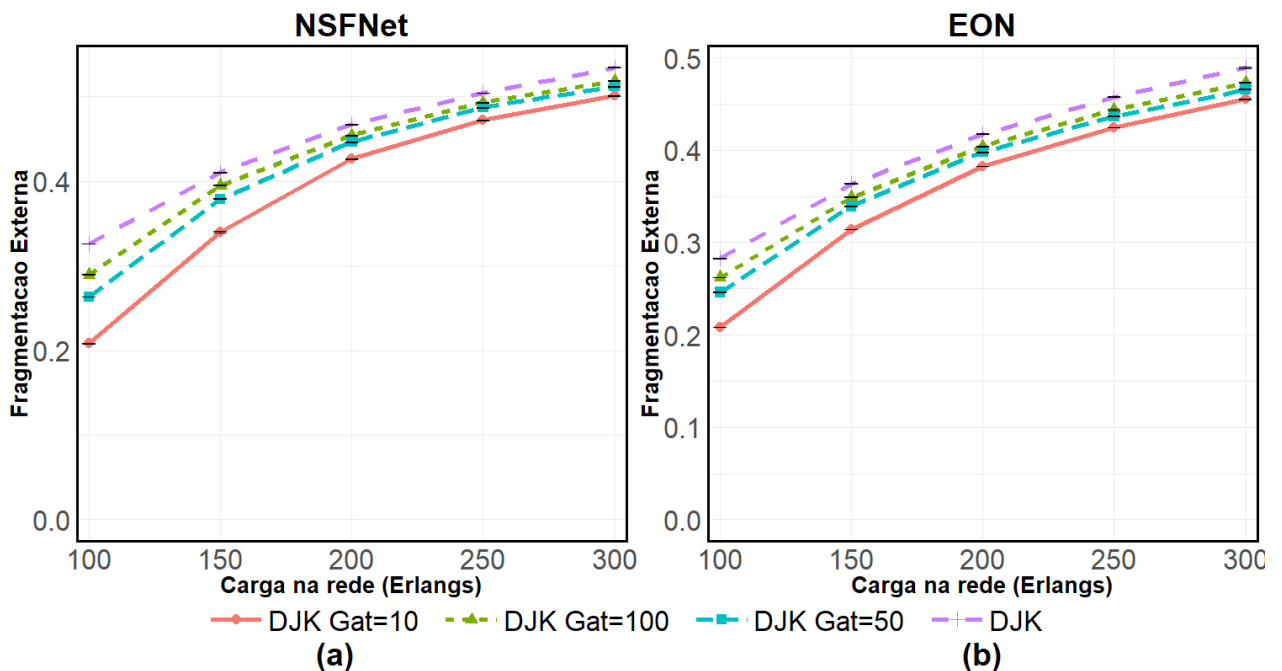


Figura 9: Fragmentação externa da rede para o cenário com (DJK Gat=10,50,100) e sem (DJK) aplicação da desfragmentação do espectro óptico nas topologias (a) NSFNet e (b) EON.

A Figura 9(a) indica a FE dos algoritmos avaliados para a topologia NSFNet. Observa-se que o cenário com maior índice de fragmentação é o DJK, pois não utiliza estratégia para lidar com a distribuição de pequenos fragmentos não-contíguos no espectro. O DJK Gat=10 apresenta a menor FE com redução média de 14% em relação ao DJK. Os algoritmos DJK Gat=50 e DJK Gat=100 também apresentam taxa de fragmentação inferior ao DJK, porém superior ao DJK Gat=10.

Para a topologia EON, a FE em função da carga na rede é apresentada na Figura 9(b). Considerando o último ponto de carga, o DJK apresenta FE de 48,92% enquanto a FE do DJK Gat=10 é de 45,54%. Essa redução da fragmentação externa ocorreu devido a reorganização das conexões ativas da rede. E além disso, o processo de reorganização suaviza a existência de pequenos blocos livres de *slots* distribuídos no espectro, permitindo a admissão de mais circuitos na rede.

4.4 UTILIZAÇÃO DO ESPECTRO

A Utilização de Espectro (UE) indica o percentual de recurso utilizado na rede para um dado algoritmo. A UE consiste da razão entre a quantidade de *slots* de frequência utilizados em cada enlace da rede pelo número total de *slots* de cada enlace. Quanto maior o valor de utilização do espectro, menor é a quantidade de recursos disponíveis. A Figura 10 exibe os valores de utilização do espectro para as topologias reais NSFNet e EON.

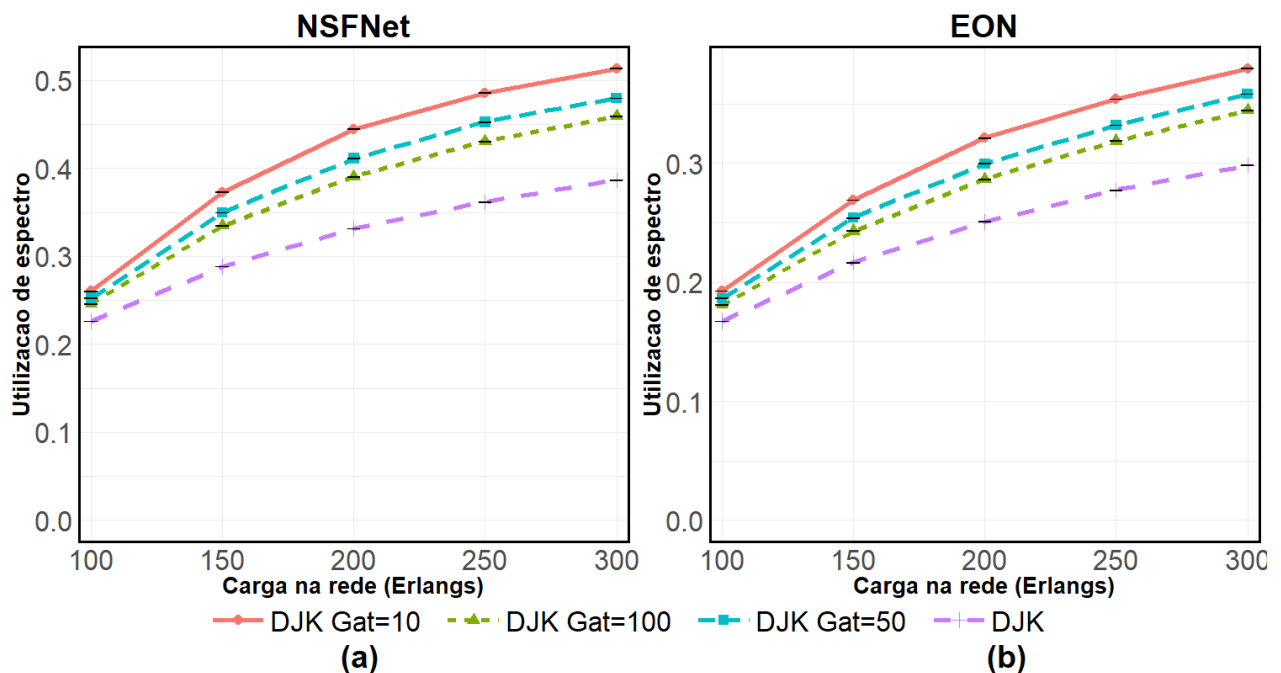


Figura 10: Utilização do espectro óptico para as topologias reais (a) NSFNet e (b) EON.

Segundo a Figura 10(a), o cenário com desfragmentação DJK Gat=10, DJK Gat=50 e DJK Gat=100, obtiveram melhor desempenho em todos os pontos de carga considerados. Observa-se que quando o tráfego é 300 *Erlangs*, a UE óptico do DJK(Gat=10) é de 51,35% enquanto a UE do DJK é de 38,67%, apresentando um aumento de 32,79% no uso dos recursos.

A Figura 10(b) também apresenta a utilização do espectro sob diferentes cargas de tráfego. Porém, os resultados obtidos na Figura 10(a) consideraram a topologia real EON. considerando a carga 300 *Erlangs*, a UE do algoritmo DJK foi de 29,84% enquanto a UE do DJK Gat=10, por exemplo, foi de 37,96%, correspondendo a um aumento de 27,22% na UE. O ganho na UE ocorre devido a desfragmentação, no qual permite a utilização de recursos que antes eram impossibilitados de serem usados.

4.5 CONSUMO ENERGÉTICO

O Consumo Energético (CE) reflete o gasto de energia considerando os principais componentes de uma rede óptica elástica em toda a simulação. O gasto energético diz respeito à utilização dos recursos devido ao circuitos estarem em operação e os dispositivos em funcionamento. A Figura 11 indica o consumo de energia em função da carga na rede para diferentes topologias reais.

A Figura 11(a) apresenta os resultados do consumo energético para a topologia NSFNet. O consumo do algoritmo DJK Gat=10 foi superior a todos os demais algoritmos devido a maior utilização de recursos da rede. Para a carga 300 *Erlangs*, por exemplo, o CE do DJK foi de 214.124,4888 *Watts* enquanto o do DJK Gat=100, DJK Gat=50 e DJK Gat=10 foi de 239.168,3599, 246.545,5348 e 257.661,856 *Watts*, respectivamente.

Assim como na topologia NSFNet, os resultados do CE na topologia EON (Figura 11(b)) foi superior para o DJK Gat=10 e inferior para o DJK em todos os pontos de carga na rede. Levando em conta o tráfego de 300 *Erlangs*, o consumo de energia do DJK Gat=10 é de 16,26% maior que o do DJK. Para todos os cenários que considera a desfragmentação, o CE é superior devido

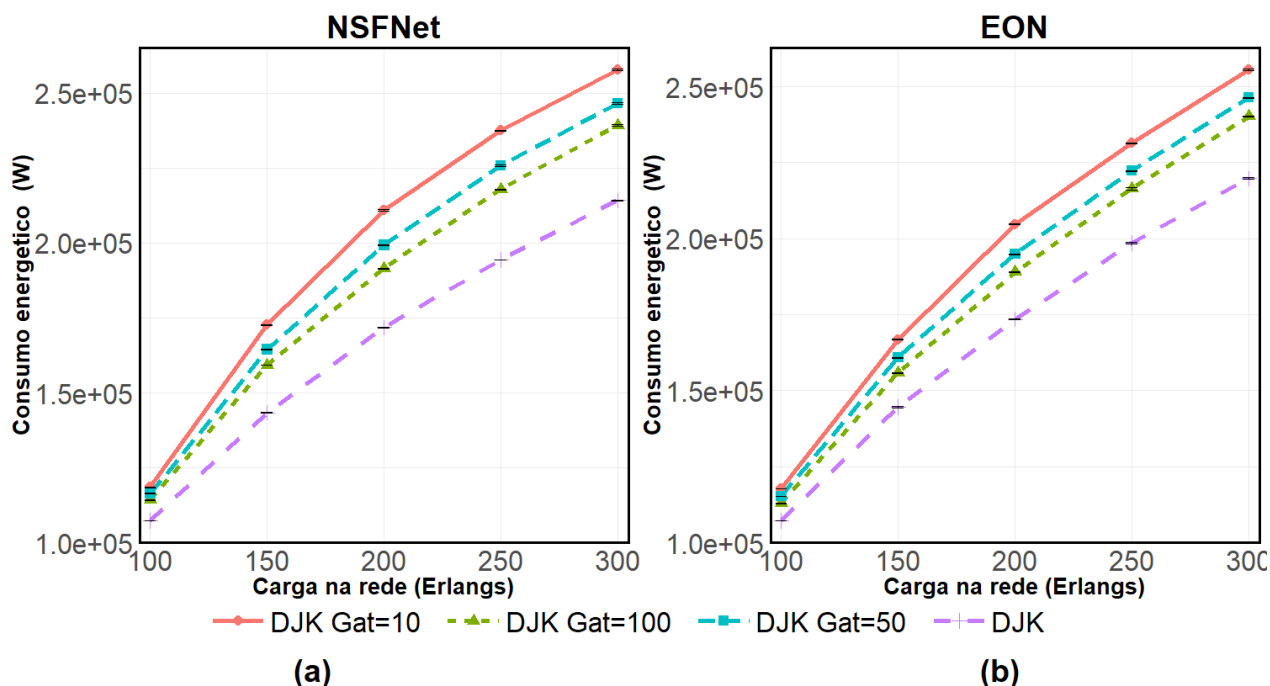


Figura 11: Consumo energético da rede para a topologia (a) NSFNet e (b) EON.

a reorganização das conexões permitir o atendimento de requisições que seriam bloqueadas por fragmentação, possibilitando maior utilização dos recursos.

5. CONCLUSÃO

O crescente tráfego de dados está diretamente relacionado ao aumento no número de usuários da Internet e o surgimento de aplicações que necessitam de maiores larguras de banda. Neste contexto, uma candidata promissora para lidar com esse crescimento exponencial de dados é a rede óptica elástica.

As redes ópticas elásticas utilizam de forma mais eficiente os recursos espectrais que as redes tradicionais. A tecnologia OFDM utilizada nas redes elásticas, permite dividir o espectro em intervalos de frequência denominado *slots*, os quais podem ser agrupados para atender requisições que necessitem de maior largura de banda.

A possibilidade de alocar e desalocar diferentes *slots*, ocasiona o problema da fragmentação, o qual contribui para o bloqueio de requisições. Para amenizar este problema, é utilizada estratégias de desfragmentação, com o objetivo de reorganizar as conexões a fim de liberar novos intervalos de frequência. Isto, por sua vez, gera a possibilidade de estabelecimento de novas demandas de tráfego.

Foram realizadas simulações através da ferramenta SNetS, nas quais foi avaliado o desempenho do algoritmo DJK com e sem desfragmentação na topologia NSFNet e EON. Foi constatado que, para os mesmos parâmetros de simulação, o cenário com desfragmentação apresentou melhor probabilidade de bloqueio de circuito, probabilidade de bloqueio de banda, fragmentação externa e utilização do espectro em relação ao cenário DJK sem desfragmentação. A periodicidade influenciou diretamente nos resultados obtidos. Isto é, quanto maior foi a frequência da desfragmentação, maior foi o impacto no desempenho da rede neste estudo.

REFERÊNCIAS

- [1] V. N. I. Cisco. “Tráfego global de IP irá triplicar nos próximos cinco anos ultrapassando os 3 zettabytes em 2021”, 2017.
- [2] B. C. Chatterjee, N. Sarma and E. Oki. “Routing and spectrum allocation in elastic optical networks: A tutorial”. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 17, no. 3, pp. 1776–1800, 2015.
- [3] O. Gerstel, M. Jinno, A. Lord and S. J. B. Yoo. “Elastic optical networking: a new dawn for the optical layer?” *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, no. 2, pp. s12–s20, February 2012.
- [4] A. Kretsis, K. Christodoulopoulos, P. Kokkinos and E. Varvarigos. “Planning and operating flexible optical networks: Algorithmic issues and tools”. *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 1, pp. 61–69, January 2014.
- [5] A. Fontinele, I. Santos, J. Neto, D. Campelo and A. Soares. “Um novo algoritmo RSA ciente de imperfeições de camada física para redes ópticas elásticas”. *XXXIV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)*, pp. 322–335, 2016.

- [6] L. Costa and A. Drummond. “Novo algoritmo RMLSA com roteamento multihop em redes ópticas elásticas”. *XXXIV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)*, 2016.
- [7] G. Feng, C. Douligeris and M. Klinkowski. “A heuristic for routing, modulation and spectrum allocation in spectrum sliced elastic optical path network”. In *2015 IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology (ISSPIT)*, pp. 111–115, Dec 2015.
- [8] A. Horota, G. B. Figueiredo and N. L. S. d. Fonseca. “Routing and spectrum assignment algorithm with fragmentation minimization in elastic optical networks”. In *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)*, pp. 436–442, Maio 2014.
- [9] M. Zhang, W. Shi, L. Gong, W. Lu and Z. Zhu. “Bandwidth defragmentation in dynamic elastic optical networks with minimum traffic disruptions”. In *2013 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 3894–3898, June 2013.
- [10] T. Takagi, H. Hasegawa, K. i. Sato, Y. Sone, A. Hirano and M. Jinno. “Disruption minimized spectrum defragmentation in elastic optical path networks that adopt distance adaptive modulation”. In *2011 37th European Conference and Exhibition on Optical Communication*, pp. 1–3, Sept 2011.
- [11] M. Zhang, C. You, H. Jiang and Z. Zhu. “Dynamic and adaptive bandwidth defragmentation in spectrum-sliced elastic optical networks with time-varying traffic”. *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, no. 5, pp. 1014–1023, March 2014.
- [12] C. Colombo and S. Morganti. “Transmission aspects of optical superchannels using reconfigurable DP-16QAM/QPSK transponders in a flexgrid arrangement”. In *2014 Fotonica AEIT Italian Conference on Photonics Technologies*, pp. 1–4, May 2014.
- [13] S. Huang, Y. Zhou, S. Yin, Q. Kong, M. Zhang, Y. Zhao, J. Zhang and W. Gu. “Fragmentation assessment based on-line routing and spectrum allocation for intra-data-center networks with centralized control”. *Optical Switching and Networking*, vol. 14, Part 3, pp. 274 – 281, 2014. SI: Optimization and Application in Converged Optical and Data Center Networks.
- [14] E. Barbosa, H. Melo, I. Brasileiro, N. Cunha, R. Rabelo, A. Soares and J. V. Junior. “Novo algoritmo baseado no uso dos slots para definição de roteamento nas redes ópticas elásticas”. *III Escola Regional de Informática do Piauí*, vol. 1, no. 1, pp. 129 – 134, 2017.
- [15] S. Shirazipourazad, Z. Derakhshandeh and A. Sen. “Analysis of on-line routing and spectrum allocation in spectrum-sliced optical networks”. In *2013 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 3899–3903, June 2013.
- [16] J. L. Vizcaíno, Y. Ye and I. T. Monroy. “Energy efficiency analysis for dynamic routing in optical transport networks”. In *2012 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 3009–3014, June 2012.
- [17] J. L. Vizcaíno, Y. Ye and I. T. Monroy. “Energy efficiency analysis for flexible-grid OFDM-based optical networks”. *Computer Networks*, vol. 56, no. 10, pp. 2400 – 2419, 2012. Green communication networks.
- [18] A. N. Patel, P. N. Ji, J. P. Jue and T. Wang. “Defragmentation of transparent flexible optical WDM (FWDM) networks”. In *2011 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference*, pp. 1–3, March 2011.
- [19] R. V. Fávero, J. S. Marçal, P. C. B. Silva, L. H. Bonani and M. L. F. Abbade. “A new elastic optical network defragmentation strategy based on the reallocation of lightpaths sharing the most fragmented link”. In *2015 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, pp. 1–5, Nov 2015.
- [20] X. Wang, I. Kim, Q. Zhang, P. Palacharla and M. Sekiya. “A hitless defragmentation method for self-optimizing flexible grid optical networks”. In *2012 38th European Conference and Exhibition on Optical Communications*, pp. 1–3, Sept 2012.
- [21] P. M. Moura, N. L. S. d. Fonseca and R. A. Scaraficci. “Fragmentation aware routing and spectrum assignment algorithm”. In *2014 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 1137–1142, June 2014.
- [22] F. Cugini, F. Paolucci, G. Meloni, G. Berrettini, M. Secondini, F. Fresi, N. Sambo, L. Poti and P. Castoldi. “Push-Pull defragmentation without traffic disruption in flexible grid optical networks”. *Journal of Lightwave Technology*, vol. 31, no. 1, pp. 125–133, Jan 2013.
- [23] S. Ba, B. C. Chatterjee and E. Oki. “Defragmentation scheme based on exchanging primary and backup paths in 1 + 1 path protected elastic optical networks”. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 25, no. 3, pp. 1717–1731, June 2017.
- [24] B. C. Chatterjee, S. Ba and E. Oki. “Fragmentation problems and management approaches in elastic optical networks: A survey”. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 20, no. 1, pp. 183–210, Firstquarter 2018.

- [25] S. K. Singh and A. Jukan. “Non-disruptive spectrum defragmentation with holding-time awareness in optical networks”. In *2016 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, pp. 1–6, May 2016.
- [26] C. Wang, G. Shen and L. Peng. “Protection lightpath-based hitless spectrum defragmentation for distance adaptive elastic optical networks”. *Opt. Express*, vol. 24, no. 5, pp. 4497–4511, Mar 2016.
- [27] C. Wang, G. Shen and L. Peng. “Protection path-based hitless spectrum defragmentation for elastic optical networks: 1+1 path protection”. In *Asia Communications and Photonics Conference 2014*, p. AF3E.3. Optical Society of America, 2014.
- [28] I. G. de Sousa Santos. “Alocação de recursos para o estabelecimento de circuitos em redes ópticas wdm e ofdm”. *Universidade Federal do Piauí*, 2015.