

PRIME: Novo Algoritmo *Hitless* de Realocação Proativa de Circuito para Mitigar Efeitos do *Crosstalk* Inter-Núcleos em EON-SDM

Selles G. F. Carvalho^{1,2}, André C. B. Soares²

¹ Eixo de Comunicação e Informática – Instituto Federal do Piauí (IFPI)
CEP 64750-000 – Paulistana PI – Brazil

²Departamento de Computação – Universidade Federal do Piauí (UFPI)
CEP 64049-550 – Teresina – PI – Brazil

sellescarvalho@gmail.com, andre.soares@ufpi.edu.br

Abstract. This paper proposes a proactive circuit reallocation algorithm to mitigate inter-core crosstalk in spatially multiplexed elastic optical networks. The algorithm is activated according to the need for reorganization, identified from the continuous monitoring of the occupancy of the network links and cores, with the objective of reducing the overlap between circuits allocated in adjacent cores. Push-pull and fast-switching techniques are employed to avoid interruptions in traffic migration, making the algorithm hitless. Unlike existing approaches, which aim at spectral defragmentation, this proposal focuses directly on the proactive mitigation of inter-core crosstalk. The performance evaluation was based on metrics such as the bandwidth blocking probability, the components of the circuit blocking probability, the average number of reallocation events, and the spectral reallocation latency. The results were compared with those obtained by other algorithms and demonstrated a minimum reduction of 30% in the blocking associated with crosstalk compared to the scenario without reallocation, considering the NSFNET and EON topologies.

Resumo. Este artigo propõe um algoritmo de realocação proativa de circuitos para a mitigação do crosstalk inter-núcleos em redes ópticas elásticas multiplexadas espacialmente. O algoritmo é ativado conforme a necessidade de reorganização, identificada a partir do monitoramento contínuo da ocupação dos enlaces e núcleos da rede, com o objetivo de reduzir a sobreposição entre circuitos alocados em núcleos adjacentes. Para evitar interrupções na migração do tráfego, são empregadas as técnicas push-pull e fast-switching, tornando o algoritmo hitless. Diferente das abordagens existentes, que visam à desfragmentação espectral, esta proposta foca diretamente na mitigação proativa do crosstalk inter-núcleos. A avaliação de desempenho baseou-se em métricas como a probabilidade de bloqueio de banda, os componentes da probabilidade de bloqueio de circuito, o número médio de eventos de realocação e a latência da realocação espectral. Os resultados foram comparados com outros algoritmos e demonstraram uma redução mínima de 30% nos bloqueios associados ao crosstalk em relação ao cenário sem realocação, considerando as topologias NSFNET e EON.

1. Introdução

As redes ópticas elásticas com multiplexação por divisão espacial (*Elastic Optical Network with Spatial Division Multiplexing* (EON-SDM)) [Ítalo Brasileiro et al. 2020] surgiram como uma solução promissora para lidar com o crescente tráfego de dados na Internet, impulsionado por tecnologias como computação em nuvem, *streaming* de vídeo em alta resolução, telemedicina, dentre outros. A vantagem das EON-SDM está no uso de fibras ópticas multinucleadas [Ítalo Brasileiro et al. 2020], que ampliam os recursos disponíveis proporcionalmente ao número de núcleos. Cada núcleo possui um espectro óptico, dividido em *slots* de 12,5 GHz [Chatterjee and Oki 2018], permitindo uma alocação mais eficiente da largura de banda em comparação às redes tradicionais [Chatterjee and Oki 2018]. Essa abordagem otimiza o uso dos recursos da rede, reduzindo tanto a subutilização quanto o superprovisionamento do espectro.

A transmissão de dados em uma EON-SDM ocorre por meio de circuitos ópticos, cujo estabelecimento requer a resolução do problema *Routing, Modulation, Core and Spectrum Allocation* (RMCSA) [Ítalo Brasileiro et al. 2020]. Esse processo envolve a definição da rota, o formato de modulação, a seleção do núcleo e a alocação espectral conforme critérios predefinidos. Para a alocação espectral, as restrições de continuidade, mesma faixa de espectro nos enlaces da rota, e contiguidade, *slots* selecionados adjacentes, devem ser atendidas.

Após a definição da solução RMCSA, a Qualidade de Transmissão (*Quality of Transmission* (QoT)) do circuito é avaliada para garantir seu correto estabelecimento, prevenindo degradações causadas pelo acúmulo de ruídos na propagação do sinal óptico. Esse acúmulo resulta das imperfeições da camada física (*Physical Layer Impairments* (PLI)) [Lacerda et al. 2024], entre as quais se destaca o *crosstalk* inter-núcleos (XT) [Hayashi et al. 2011], um efeito comum em uma EON-SDM. O XT ocorre quando circuitos em núcleos vizinhos compartilham espectro, gerando interferências que podem comprometer a QoT e impedir o estabelecimento de novos circuitos. Os bloqueios por XT podem ser classificados em dois tipos: quando a **XT** do **Novo** (XTN) circuito é inaceitável e quando o impacto do novo circuito torna a **XT** dos **Outros** (XTO) circuitos estabelecidos inaceitável.

A realocação de circuitos é uma alternativa para mitigar o *crosstalk* internúcleos em cenários de tráfego dinâmico, reorganizando os circuitos na rede para reduzir sobreposições em núcleos vizinhos e minimizar interferências. Embora amplamente estudada para desfragmentação espectral [Zhao and Zhang 2016, Zhao et al. 2019, Trindade and da Fonseca 2021, Júnior et al. 2023], sua aplicação direta na mitigação do *crosstalk* inter-núcleos ainda é pouco explorada na literatura.

A realocação consiste na definição de uma nova solução RMCSA para circuitos ativos, podendo envolver rerroteamento, mudança de núcleo, espectro ou a combinação desses fatores [Zhang et al. 2014, Ítalo Brasileiro et al. 2020]. Para isso, um algoritmo de realocação deve determinar o momento adequado para iniciar sua execução, selecionar circuitos ativos a serem realocados, encontrar uma nova solução RMCSA para os circuitos selecionados e migrar o tráfego de forma eficiente, equilibrando desempenho e complexidade operacional. Esses algoritmos podem ser classificados como proativos, que previnem bloqueios por meio do monitoramento da rede, ou reativos, acionados apenas quando ocorre um bloqueio [Chatterjee and Oki 2018]. Além disso, podem ser catego-

rizados como *non-hitless*, que interrompem o tráfego mas oferecem melhor desempenho, ou *hitless*, que realizam a realocação sem interrupção, sendo mais adequados para cenários reais [Chatterjee and Oki 2018, Ítalo Brasileiro et al. 2020].

Neste contexto, este artigo propõe o algoritmo de realocação de circuitos *Proactive Reallocation for Inter-core crosstalk Mitigation in EON-SDM* (PRIME), que opera de forma proativa para prevenir a sobreposição de circuitos em núcleos adjacentes, reduzindo a probabilidade de bloqueios causados pelo *crosstalk* inter-núcleos. A ativação do PRIME ocorre por meio do monitoramento contínuo dos enlaces e núcleos da rede, sendo acionado quando a ocupação atinge um limiar predefinido, indicando uma alta probabilidade de bloqueios relacionados ao *crosstalk*.

A Seção 2 apresenta e discute os principais trabalhos relacionados ao tema. Na Seção 3 é detalhado o funcionamento do algoritmo proativo de realocação, contemplando seu pseudocódigo e um exemplo ilustrativo. A Seção 4 discute a avaliação do desempenho da rede com base em métricas específicas. Por fim, a Seção 5 apresenta as conclusões deste artigo e as sugestões de trabalhos futuros.

2. Trabalhos Relacionados

Esta seção apresenta os principais trabalhos relacionados à contribuição deste estudo, destacando aqueles que utilizam a realocação de circuitos como estratégia para mitigar desafios específicos da rede e aprimorar sua capacidade de atendimento. Dentre esses desafios, a fragmentação do espectro é o mais abordado na literatura sobre realocação em EON-SDM, pois constitui o principal fator limitante do desempenho da rede nos cenários analisados. Consequentemente, a maioria dos trabalhos citados propõe heurísticas voltadas à desfragmentação espectral.

Os autores em [Yao et al. 2019] propõem uma estratégia de realocação reativa do tipo *hitless* baseada em *Transductive Transfer Learning* (TTL). A proposta enfatiza a realização de realocações antes que ocorra um bloqueio, antecipando o tempo de desfragmentação por meio do TTL. Em contraste com as abordagens reativas, os autores em [Zhao et al. 2018, Zhao et al. 2019] propuseram estratégias de realocação proativas utilizando técnicas de migração *non-hitless*.

Em [Zhao et al. 2018], a realocação de circuitos é empregada para desfragmentar o espectro, garantindo níveis adequados de *crosstalk* na rede. O algoritmo proposto utiliza a métrica *Spectrum Compactness* (SC) para monitorar a compactação dos circuitos nos núcleos, sendo acionado sempre que os valores de SC ultrapassam limiares predefinidos. Tanto o estudo apresentado em [Hu et al. 2017] quanto o de [Zhao et al. 2018] baseiam-se na métrica SC.

O estudo apresentado em [Zhao et al. 2019] aborda a desfragmentação do espectro temporal em EON-SDM. Para avaliar o estado do espectro na rede, os autores propõem a métrica de SC temporal-dimensional. Com base nessa métrica, é proposto um algoritmo de realocação que é ciente de *crosstalk* mas visa principalmente mitigar a fragmentação do espectro.

Dentro da mesma categoria de abordagens proativas, mas empregando técnicas de migração *hitless*, os estudos apresentados em [Luo et al. 2018, Brasileiro et al. 2020, Khantwal et al. 2023] destacam-se por sua estreita relação com este trabalho, uma vez

que também adotam uma estratégia proativa de realocação de circuitos *hitless*.

O estudo em [Luo et al. 2018] propõe dois algoritmos para otimização paralela da realocação de circuitos: um algoritmo baseado em *simulated annealing*, responsável por determinar a sequência de rerroteamento dos circuitos, e o algoritmo de *time arrangement*, que define os instantes exatos para a execução das operações de realocações. As realocações são realizadas paralelamente na rede, em contraste com as realocações sequenciais da maioria dos trabalhos.

Em [Brasileiro et al. 2020] é feita uma adaptação no algoritmo de desfragmentação proposto em [Zhao et al. 2018] para usar a técnica de migração de circuitos *push-pull* e *fast-switching* com o objetivo de reduzir a fragmentação da rede. Para controle da fragmentação, é utilizada a medida SC. Foi utilizada a métrica de *Spectrum Reallocation Latency* (SRL) para computar os tempos de reconfiguração dos circuitos realocados. Neste trabalho também avaliou-se a métrica SRL para o algoritmo proposto.

Em [Khantwal et al. 2023] é proposto um algoritmo de desfragmentação baseado em participação. Tal algoritmo separa os circuitos em dois conjuntos: aqueles que são *single hop* e os que são *multiple hops*. Em seguida, aplica-se a política *first-exact-fit* para o conjunto *single hop* e *last-exact-fit* para o conjunto *multiple hops*. Os autores investigam os efeitos da desfragmentação considerando as interferências *inter-core* e *inter-mode* simultaneamente na rede.

Os trabalhos também podem combinar abordagens reativas e proativas em suas heurísticas de realocação, como proposto em [Hu et al. 2017, Trindade and da Fonseca 2021]. Essas propostas empregam técnicas de migração *non-hitless*. Em [Hu et al. 2017] foram propostas duas estratégias de realocação para desfragmentar o espectro. Tais estratégias realocam circuitos para manter os níveis de SC adequados por núcleos. Além disso, as estratégias se diferem entre si por iniciarem as realocações em momentos distintos. O algoritmo é acionado quando ocorre bloqueio de circuito ou quando a medida de SC ultrapassa limiares predefinidos.

Já os autores [Trindade and da Fonseca 2021] propõem um algoritmo reativo e um proativo que podem reduzir conjuntamente a fragmentação do espectro. A proposta reativa busca reduzir a necessidade de desfragmentação frequente e a proposta proativa usa aprendizado de máquina não supervisionado para identificar circuitos que podem ser agrupados no espectro com base em suas características. Para que o algoritmo seja executado, é realizado um monitoramento da fragmentação do espectro na rede e a desfragmentação é disparada quando o nível ultrapassa um limiar predefinido.

Por outro lado, proposta reativa e proativa realizando migração sem interromper o tráfego pode ser vista em [Júnior et al. 2023]. É proposto um algoritmo de desfragmentação para EON-SDM, no qual se utiliza uma abordagem de janela de segmento de *slots* para auxiliar no processo de realocação do circuito, gerando prioridades para onde seria mais “adequado” realocar o circuito na rede com o mínimo esforço computacional.

Diante desse contexto, este artigo propõe um novo algoritmo de realocação de circuitos que atua de forma preventiva e realiza migrações sem interrupção do tráfego *hitless*. O diferencial da proposta é a reorganização dos circuitos com o objetivo direto

de mitigar os efeitos do *crosstalk* inter-núcleos, um dos principais fatores de degradação do desempenho da rede no cenário analisado. Como o *crosstalk* está diretamente relacionado à sobreposição espectral entre circuitos em núcleos adjacentes, o algoritmo utiliza um gatilho baseado em um limiar espectral, definido para cada núcleo, representando a probabilidade de ocorrência de sobreposição. Assim, ao atingir ou ultrapassar esse limiar, a realocação é acionada para evitar interferências e, por consequência, garantir maior admissão de tráfego na rede.

3. Solução Proposta

O algoritmo *Proactive Reallocation for Inter-core crosstalk Mitigation in EON-SDM* (PRIME) foi desenvolvido com o objetivo de realocar circuitos de maneira estratégica para minimizar a probabilidade de sobreposição entre circuitos alocados em núcleos adjacentes, um fator crítico na ocorrência de bloqueios do tipo *crosstalk* inter-núcleos. Além da mitigação do *crosstalk*, o algoritmo busca otimizar a eficiência da realocação, reduzindo o número de eventos de realocação, minimizando, assim, os custos operacionais. Outra característica fundamental do PRIME é sua abordagem preventiva, ou seja, a realocação ocorre antes da ocorrência de bloqueios e a migração do tráfego de dados dos circuitos utiliza técnicas *hitless push-pull* [Cugini et al. 2013] e *fast-switching* [Meloni et al. 2016]. O *push-pull* permite reatribuir espectro realizando deslizamento no espectro, sendo que o caminho até o destino não pode conter obstáculos no espectro. O *fast-switching* consiste na reatribuição nuclear sem a interrupção dos serviços.

A execução do algoritmo PRIME ocorre quando a ocupação espectral de um núcleo ultrapassa um limiar predefinido. Esse monitoramento é realizado sempre que um circuito óptico é estabelecido na rede. Caso o espectro definido para o circuito ultrapasse o limiar, o algoritmo PRIME é iniciado. Vale destacar que o limiar predefinido representa um índice de *slot* no espectro, no qual entende-se que, a partir desta posição, existe uma alta probabilidade de ocorrência de sobreposição de circuito e, portanto, bloqueio do tipo XTN ou XTO. Dessa forma, o algoritmo promove um equilíbrio entre desempenho da rede e eficiência operacional, garantindo a continuidade do tráfego e a melhor utilização dos recursos da rede.

A Figura 1 e Figura 2 representam um exemplo do funcionamento do algoritmo PRIME em um cenário hipotético de rede com 1 enlace com 7 núcleos e 9 *slots* cada núcleo. As letras minúsculas representam os circuitos estabelecidos e a letra maiúscula *R* representa a requisição estabelecida após o limiar.

A situação da Figura 1(a) ilustra o estabelecimento da requisição *R* após o limiar e, portanto, o algoritmo PRIME inicia sua execução. Dois limiares são definidos no espectro, o primeiro limiar na posição um terço (1/3) do espectro e segundo limiar na posição dois terços (2/3). Tais limiares são definidos devido ao algoritmo de alocação utilizado nos estudos alocar com a política *FirstFit* nos núcleos ímpares, *LastFit* nos núcleos pares e *MediumFit* no núcleo central. Essa forma de alocação foi proposta por [Lacerda Júnior et al. 2020] e denominada como Algoritmo de Balanceamento de Núcleo e Espectro (ABNE). O ABNE aloca circuito para já evitar o *crosstalk*. Porém, as realocações são necessárias para aumentar a capacidade de atendimento da rede quando considera-se tráfego dinâmico. Tal dinamicidade potencializa a ocorrência de *crosstalk*.

Iniciando a execução do PRIME, na Figura 1(b) para cada núcleo realoca-se os

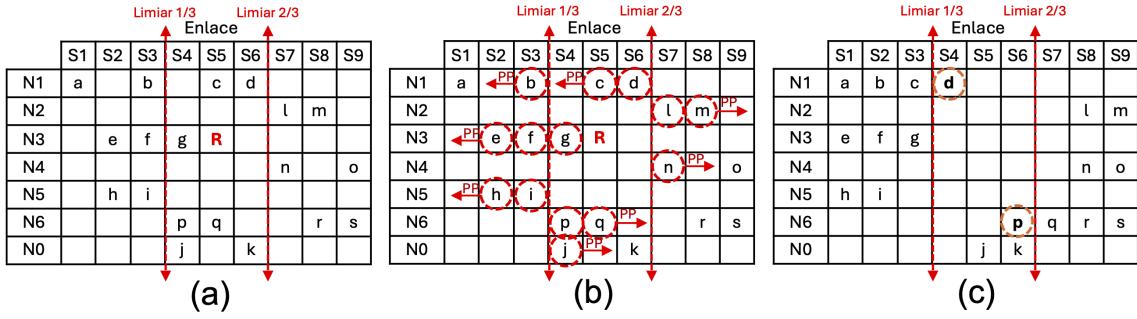


Figura 1. Exemplificando Parte 1 do Algoritmo.

circuitos. Nos núcleos ímpares, os circuitos serão compactados no início do espectro apenas deslizando o circuito. Nos núcleos pares, realoca-se os circuitos deslizando-os para o final do espectro. No núcleo central, os circuitos são compactados no meio do espectro. Essa organização contribui consideravelmente para a diminuição de possíveis sobreposições entre circuitos. Dessa forma, os bloqueios por *crosstalk* são mitigados. Vale ressaltar que o deslizamento do circuito é possível com a aplicação da técnica de migração de tráfego *push-pull*.

A Figura 1(c) representa o cenário de rede após as realocações com *push-pull*. Dois circuitos *d* e *p* continuam além do limiar *e*, portanto, com alta probabilidade de sofrerem bloqueios ou interferirem em novas requisições. Porém, é possível reorganizar os circuitos *c* e *d* com alterações de núcleo usando a técnica *fast-switching* e, em seguida, aplicar *push-pull* para reatribuição espectral. A Figura 2(a) destaca as oportunidades de realocação do circuito *d*.

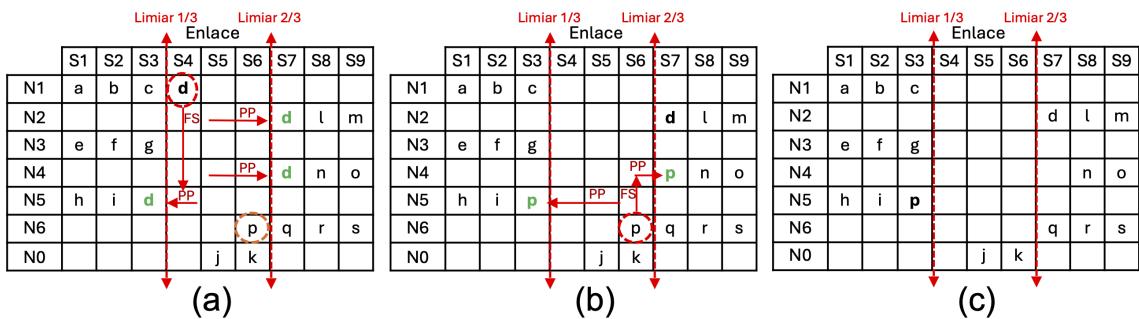


Figura 2. Exemplificando Parte 2 do Algoritmo.

Dentre as várias oportunidades, o circuito *d* foi realocado para o núcleo *N2* e slot *S7*, conforme Figura 2(b). Em seguida, o circuito *p* com suas várias possibilidades, é realocado para o núcleo *N5* e slot *S3*. A escolha da solução dentre as várias possibilidades é realizada através de critérios que, nesta proposta, priorizam primeiro para onde o circuito terá o maior valor de *crosstalk* e a nova faixa de espectro seja o mais próximo da extremidade do espectro. A Figura 2(c) representa o estado final da rede após a execução do algoritmo PRIME, todos os circuitos dentro das regiões delimitadas pelo limiar.

O algoritmo proposto é dividido em duas partes. A primeira parte consiste das realocações envolvendo apenas reatribuição espectral com a técnica *push-pull*, represen-

tada pelo Algoritmo 1. Os núcleos dos enlaces da rota onde o circuito C_e foi estabelecido serão percorridos (linha 4). Para cada núcleo n serão selecionados os circuitos que passam por n (linha 5). Caso os núcleos são ímpares (linha 6), os circuitos são ordenados por índice de *slot* crescente (linha 7) para garantir que o primeiro circuito seja deslizado primeiro (linha 9) e assim sucessivamente. Em núcleos pares (linha 11), os circuitos são ordenados por índice de *slot* decrescente para garantir que o último circuito seja realocado primeiro (linha 14), seguindo essa dinâmica. Para o núcleo central (linha 16), duas listas de circuitos são criadas, aquelas com os circuitos antes do meio do espectro (linha 18) e os circuitos após o meio do espectro (linha 19). Na primeira lista (linha 20) os circuitos serão deslizados para a direita até o meio do espectro e, na segunda lista, os circuitos serão deslizados para a esquerda do espectro até o meio (linha 23). Ao final, os núcleos estarão compactados e a probabilidade de ocorrência de *crosstalk* diminuída.

Algorithm 1 : PRIME - Realocação de Circuitos no Mesmo Núcleo

```

1: Entrada: Circuito Estabelecido  $C_e$ 
2: Núcleo  $n \in$  ao conjunto de núcleos  $N$ 
3: while percorrer cada  $n \in N$ 
4:    $listaDeCircuitosDoNucleo \leftarrow$  Conjunto de circuitos do núcleo  $n$ ;
5:   if  $n \in N = (1, 3, 5)$  then
6:     ordenaPorIndiceSlotCrescente( $listaDeCircuitosDoNucleo$ );
7:     for percorrer cada circuito  $c \in listaDeCircuitosDoNucleo$  then
8:       realoca  $c$  com push-pull para esquerda do espectro;
9:     end for
10:    else if  $n \in N = (2, 4, 6)$  then
11:      ordenaPorIndiceSlotDecrescente( $listaDeCircuitosDoNucleo$ );
12:      for percorrer cada circuito  $c \in listaDeCircuitosDoNucleo$  then
13:        realoca  $c$  com push-pull para direita do espectro;
14:      end for
15:    else if  $n \in N = (0)$  then
16:      referencia  $\leftarrow$  Índice do slot do meio do espectro
17:      lAntes  $\leftarrow$  circuitos de  $listaDeCircuitosDoNucleo$  antes de  $referencia$ ;
18:      lApos  $\leftarrow$  circuitos de  $listaDeCircuitosDoNucleo$  após  $referencia$ ;
19:      for percorrer cada circuito  $c \in lAntes$  then
20:        realoca  $c$  com push-pull para direita do espectro;
21:      end for
22:      for percorrer cada circuito  $c \in lApos$  then
23:        realoca  $c$  com push-pull para esquerda do espectro;
24:      end for
25:    end if
26: Fim do algoritmo

```

Após a aplicação do Algoritmo 1, alguns circuitos ainda podem estar alocados em regiões do espectro com alta probabilidade de ocorrência de bloqueio por *crosstalk*. Em visto disso, o Algoritmo 2 objetiva refinar o processo de realocação, identificando os circuitos de tais regiões e realocá-los, quando possível, em regiões do espectro com probabilidade de ser sobreposto diminuída em relação à sua posição original.

Os circuitos identificados para a realocação são aqueles que ultrapassam o limiar predefinido do espectro que indica que o referido circuito pertence à região de alta probabilidade de bloqueio de *crosstalk* (linha 5). A busca para selecionar os circuitos percorre todos os núcleos da rota do circuito C_e (linha 4).

Para cada núcleo, a lista de circuitos selecionados são ordenados a depender se o núcleo é ímpar ou par. Caso o núcleo seja ímpar (linha 7), os circuitos são ordenados por índice de *slot* decrescente no intuito de realocar primeiro os circuitos com maior probabilidade de sofrer bloqueio de *crosstalk*, isto é, aqueles que estão mais distantes da região de alocação “adequada”. O mesmo raciocínio é aplicado para os núcleos pares (linha 10). Lembrando que a estratégia segue o critério de alocações de espectro diferentes em núcleos diferentes e que são vizinhos, já que o *crosstalk* está relacionado com a ocupação espectral dos núcleos adjacentes.

Algorithm 2 : PRIME - Realocação do Circuitos que Ultrapassam o Limiar

```

1: Entrada: Espectro dos enlaces da rota do circuito  $C_e$ 
2: Núcleo  $n \in$  ao conjunto de núcleos  $N$ ;
3: while percorrer cada  $n \in N$ 
4:    $listaCircuitosUltrapassamLimiar \leftarrow$  Conjunto de circuitos do núcleo  $n$  que
5:     ultrapassa o limiar de alta probabilidade de sobreposição;
6:   if  $n \in N = (1, 3, 5)$  then
7:     ordenaPorIndiceSlotDecrescente( $listaCircuitosUltrapassamLimiar$ );
8:   end if
9:   if  $n \in N = (2, 4, 6)$  then
10:    ordenaPorIndiceSlotCrescente( $listaCircuitosUltrapassamLimiar$ );
11:   end if
12:   for percorrer cada circuito  $c \in listaCircuitosUltrapassamLimiar$  then
13:      $solucoes \leftarrow$  Conjunto de possibilidades de realocação para  $c$ ;
14:     ordenaPorExtremidadeEspectro&OcupacaoNucleo( $solucoes$ );
15:     for percorrer cada solução  $s \in solucoes$  then
16:       if é possível realoca  $c$  para  $s$  then
17:         realoca  $c$  com fast-switching e push-pull;
18:         break;
19:       end if
20:     end for
21:   end for

```

Na linha 13, para cada circuito a ser realocado, busca-se um conjunto de possibilidades de realocação (linha 14), sendo 1 solução por núcleo para restringir o espaço de busca. A busca de solução é realizada pelo *firstfit* em núcleos ímpares e *lastfit* nos núcleos pares. Tais soluções são válidas se atender os seguintes critérios: i) ter faixa livre no núcleo; ii) os níveis de QoT serem aceitáveis; iii) os níveis de XT e XTO serem aceitáveis; iv) ter continuidade e contiguidade de espectro; v) a solução destino puder ser alcançada a partir de um conjunto de movimentos no espectro com as técnicas *push-pull* e *fast-switching* combinadas, mantendo o tráfego ininterrupto.

Com a definição das possibilidades de realocação, estas são ordenados segundo dois critérios no intuito de realocar o circuito para o posição na rede com menor probabi-

lidade de sofrer com o *crosstalk* (linha 15). Primeiro, ordena-se crescentemente a partir da distância da solução para a extremidade do espectro, no sentido de realocar para o mais distante da região central do espectro, onde a probabilidade de sobreposição é alta comparada à outras regiões. Após a primeira ordenação, aplica-se a ordenação crescente segundo a ocupação espectral do núcleo, no intuito de realocar para o núcleo com menor utilização, gerando balanceamento de carga. Dessa forma, a solução prioritária será aquela mais próxima da extremidade do espectro (início ou final a depender do núcleo) no núcleo menos utilizado.

As soluções serão percorridas (linha 16) até o circuito ser realocado. A migração do circuito para sua nova posição na rede será realizada com a técnica *fast-switching* para a mudança de núcleo e *push-pull* para a mudança do espectro. Com essas duas técnicas de migração, os circuitos podem ser movimentados no espectro sem a interrupção dos serviços de rede.

Por fim, vale ressaltar que esta proposta pode ser aplicada em qualquer cenário de rede, independente do algoritmo de alocação. Além disso, a proposta concentra suas operações nos enlaces da rota do circuito estabelecido C_e e não em toda a rede e inicia as realocações quando as ocupações no espectro já estão entrando em regiões de alta probabilidade de bloqueio de *crosstalk*, delimitadas pelo limiar definido. Assim como mostrado na Figura 1, o limiar usado nos experimentos deste trabalho é o índice de *slot* que representa um terço (1/3) do espectro em núcleos ímpares e dois terços (2/3) do espectro em núcleos pares. O núcleo central é delimitado pelos dois limiares. Os limiares podem ser ajustados.

4. Avaliação de Desempenho

Os experimentos foram conduzidos utilizando o simulador *SLICE Network Simulator* (SNetS) [Fontinele et al. 2017]. Em cada simulação, foram geradas 100.000 requisições de circuitos, seguindo um processo de Poisson com taxa média de chegada λ e tempo de retenção dos circuitos distribuído exponencialmente com média $1/\mu$. A carga de tráfego, expressa em Erlangs, foi calculada pela equação $\rho = \lambda/\mu$.

A carga de tráfego é distribuída uniformemente entre todos os pares de nós origem e destino, com requisições de 100, 150, 200, 250, 300, 350 e 400 Gbps, seguindo a proporção de chegadas de 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1, respectivamente. Cada simulação foi replicada 10 vezes com diferentes sementes de geração de variável aleatória, garantindo um nível de confiança de 95% nos resultados. As avaliações foram realizadas nas topologias NSFNET e EON [Lacerda et al. 2024]. O algoritmo Dijkstra foi usado para definir rotas.

Foram utilizadas fibras ópticas com 7 núcleos, cada um contendo 320 *slots* de frequência, sendo 1 *slot* reservado para banda de guarda. Cada *slot* possui uma largura de 12,5 GHz. Diferentes formatos de modulação foram adotados, considerando limiares específicos de distância e *crosstalk* (XT), apresentados na Tabela 1. Mais informações sobre os parâmetros de camada física utilizados podem ser encontrados em [Lacerda et al. 2024]. Dentre os parâmetros, vale destacar que estes experimentos foram conduzidos no cenário de alto *crosstalk* [Lacerda et al. 2024].

A Figura 3 representa os resultados para a probabilidade de bloqueio de banda para a topologia NSFNET e EON. Os diferentes algoritmos são versões da proposta. Como a

Tabela 1. Modulações com seus respectivos limiares de alcance de transmissão, OSNR e XT.

Modulação	BPSK	QPSK	8QAM	16QAM	32QAM
Alcance (km)	10000.0	5000.0	2500.0	1250.0	625.0
Limar XT (dB)	-14.0	-18.5	-21.0	-25.0	-27.0

proposta é dividida em duas etapas, realocações no mesmo núcleo com *Push-Pull* (PP) e realocações em núcleos diferentes com *Fast-Switching* (FS), essas versões permitiram identificar o impacto gerado pela segunda etapa do algoritmo, quando se faz reatribuição nuclear. Além disso, os algoritmos *PRIME_PP* e *PRIME_PP_FS* são executados segundo o limiar apresentado na Seção 3 e os demais algoritmos utilizam Número de Circuito Finalizados (NCF) para disparar as realocações. Vale reforçar que o *ABNE* é utilizado para alocar circuitos e não realiza realocações.

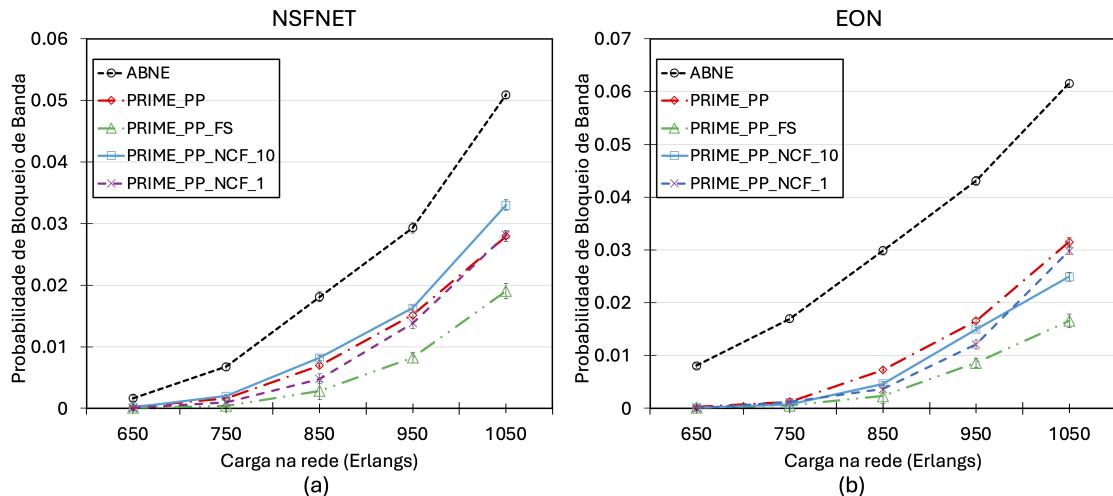


Figura 3. Probabilidade de bloqueio de banda para a (a) topologia NSFNET e (b) topologia EON.

Observa-se reduções significativas de todos os algoritmos avaliados para a topologia NSFNET (Figura 3(a)) quanto para a topologia EON (Figura 3(b)). O algoritmo foi eficiente na reorganização dos circuitos independente de topologias. Porém, vale destacar que o *PRIME_PP_FS*, no qual executa as duas etapas apresentadas na Seção 3, mostrou-se mais eficiente. É notório o impacto da execução da segunda parte do algoritmo, visto que a diferença de bloqueio entre o *PRIME_PP* (apenas a primeira parte) para o *PRIME_PP_FS* foi considerável.

Em termos de resultados numéricos, considerando o último ponto de carga, o *PRIME_PP_FS* apresentou redução de probabilidade de bloqueio de banda de aproximadamente 60% comparado ao *ABNE* e 32% comparado ao segundo melhor desempenho (*PRIME_PP_NCF_10*) para a topologia NSFNET. Já para a topologia EON, as reduções foram de 70% e 33% de bloqueio de banda em relação ao *ABNE* e *PRIME_PP_NCF_1*. Das variações do algoritmo, o *PRIME_PP_FS* obteve melhores resultados de bloqueio de banda em relação aos demais algoritmos.

A Figura 4 representa a métrica de Probabilidade de Bloqueio de Circuito (PBC) decomposta em componentes de bloqueio em função da carga na rede para a topologia NSFNET. A Figura 4(a) ilustra os tipos de bloqueios no algoritmo ABNE, sendo predominantes os bloqueios relacionados ao *crosstalk* inter-núcleos XTN e XTO. Da mesma forma, a Figura 4(b) destaca os bloqueios no cenário quando a estratégia PRIME é utilizada.

Observa-se uma redução considerável em todas as cargas analisadas nos dois tipos de bloqueio do PRIME comparado ao ABNE. A redução é devido às realocações realizadas pelo PRIME reorganizarem os circuitos na rede com o objetivo de evitar ou retardar sobreposições de espectro entre circuitos de núcleos vizinhos. As sobreposições ocasionam interferências entre os circuitos, influenciando negativamente em suas qualidades de transmissão, tornando-os propensos a sofrer bloqueios do tipo XTN ou XTO.

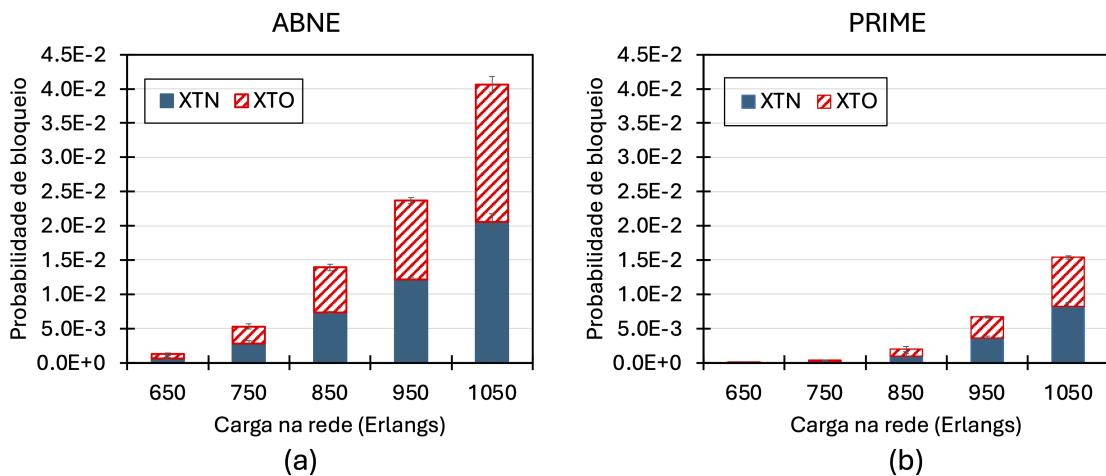


Figura 4. Componentes da PBC na topologia NSFNET dos algoritmos ABNE e PRIME.

Para fins numéricos, analisando o último ponto de carga (1050 *Erlangs*) da Figura 4(a) em relação à Figura 4(b), a redução de bloqueio do tipo XTN e XTO foram aproximadamente de 60% e 64%. Essas reduções representam a assertividade da proposta nas realocações para prevenção de bloqueios. Para a topologia EON os resultados foram semelhantes.

Na Figura 5 apresenta resultados para as métricas número de eventos de realocação e latência de realocação do espectro para a topologia NSFNET. Observa-se na Figura 5(a), que o número de acionamentos do *PRIME_PP_FS* aumentou com o aumento da carga e até a carga de 950 *Erlangs* foi o que apresentou menor número de eventos. A quantidade de eventos do algoritmo *PRIME_PP* também aumentou em função da carga. O comportamento do *PRIME_PP* e o *PRIME_PP_FS* são justificados pelo momento em que é executado ser relacionado ao limiar de ocupação do espectro. O *PRIME_PP_NCF_10* manteve-se com valores constantes devido a sua associação ao momento em que os circuitos são finalizados. Os resultados do *PRIME_NCF_1* não foram inseridos no gráfico devido a seus valores serem maiores que 30.000 eventos para todos os pontos de carga avaliados, visto que é executado sempre que 1 circuito é finalizado.

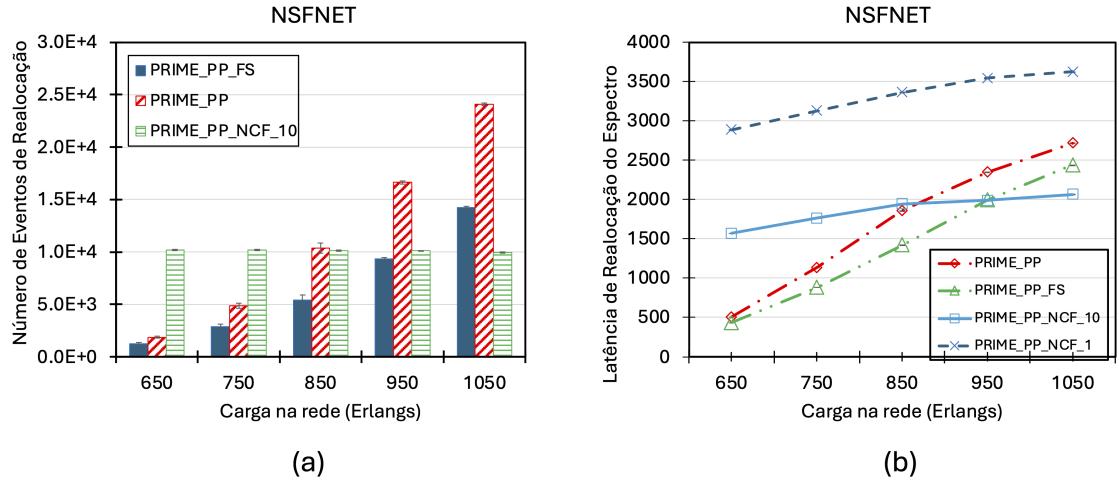


Figura 5. Resultados do (a) número médio de eventos de realocação e da (b) latência de realocação do espectro.

Já os valores da Figura 5(b) são baseados na seguinte equação de latência de realocação do espectro [Júnior et al. 2025]:

$$Latencia = (n + 1) * D + (n + 1) * C + \sum_{i \in E} P_i \quad (1)$$

onde n é o número de saltos da rota, D é o tempo de processamento da mensagem, C o tempo de configuração do *Optical Cross Connect* (OXC) e P_i o atraso de propagação no enlace i . Em relação aos valores de tempo, $D = 10\mu s$, $C = 10\mu s$ e $P = 400\mu s$ por tamanho de *spam* de 80 km, baseado no trabalho de [Júnior et al. 2025].

Dessa forma, os valores de latência na Figura 5(b) mostram que o algoritmo *PRIME_PP_FS* obteve melhor resultado comparado aos demais. Em contrapartida, o algoritmo *PRIME_PP_NCF_1* apresentou pior desempenho de latência. A latência também está associada ao número de circuitos realocados e ao número de eventos. Portanto, os algoritmos que realocam circuitos mais frequentemente tendem a apresentar latências maiores. Vale ressaltar que o algoritmo *PRIME_PP_FS* apresentou melhor desempenho em termos de bloqueio e menor custo de latência, resultado do momento de acionamento foi eficiente no quesito de diminuir necessidades de realocações.

Os resultados do gráfico da Figura 5(a) e Figura 5(b) para a topologia EON não foram inseridos devido o limite de páginas do artigo. Porém, destaco que o comportamento dos algoritmos é semelhante aos apresentados para a topologia NSFNET em ambas as métricas mencionadas.

5. Conclusão e Trabalhos Futuros

Este artigo propôs um algoritmo de realocação de circuitos para mitigar os efeitos do *crosstalk* inter-núcleos em EON-SDM. O algoritmo é acionado com base no monitoramento da ocupação espectral dos núcleos, realocando circuitos quando essa ocupação ultrapassa um limiar predefinido. Além disso, opera de forma preventiva e utiliza técnicas *hitless*, garantindo que a migração dos circuitos ocorra sem interrupção do tráfego.

A avaliação de desempenho considerou métricas como probabilidade de bloqueio de banda, apresentando reduções significativas, componentes de bloqueio, destacando a diminuição expressiva dos bloqueios relacionados ao *crosstalk*, número de eventos de realocação e custo operacional, analisado por meio da latência da realocação. Os resultados demonstraram que tanto o número de eventos quanto a latência apresentaram um desempenho superior em comparação com variações do algoritmo.

Como perspectivas futuras, pretende-se explorar a aplicação da abordagem em topologias com diferentes níveis de conectividade, além de avaliar seu comportamento em cenários com diferentes estratégias de alocação e compará-la com soluções reativas. No entanto, essa comparação representa um desafio, uma vez que a literatura sobre EON-SDM ainda carece de estudos de realocação especificamente voltados à mitigação do *crosstalk*.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Piauí (FAPEPI) (013/2021) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (317545/2021-3).

Referências

- Brasileiro, I. B., Costa, L. R., Silva, G. E. V., and Drummond, A. C. (2020). Empowering hitless spectral defragmentation in elastic optical networks with spatial multiplexing. In *2020 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, pages 1–4.
- Chatterjee, B. C. and Oki, E. (2018). Performance of hitless defragmentation scheme in quasi 1+1 path protected elastic optical networks. In *2018 20th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, pages 1–4.
- Cugini, F., Paolucci, F., Meloni, G., Berrettini, G., Secondini, M., Fresi, F., Sambo, N., Poti, L., and Castoldi, P. (2013). Push-pull defragmentation without traffic disruption in flexible grid optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, 31(1):125–133.
- Fontinele, A., Santos, I., Nolêto Neto, J., Campelo, D. R., and Soares, A. (2017). An efficient ia-rmlsa algorithm for transparent elastic optical networks. *Computer Networks*, 118:1–14.
- Hayashi, T., Taru, T., Shimakawa, O., Sasaki, T., and Sasaoka, E. (2011). Design and fabrication of ultra-low crosstalk and low-loss multi-core fiber. *Opt. Express*, 19(17):16576–16592.
- Hu, L., Zhao, Y., Zhu, R., Yu, X., Zhang, J., and Liu, Z. (2017). Crosstalk-aware spectrum defragmentation in space division multiplexing elastic optical networks. In *Asia Communications and Photonics Conference*, page Su3C.6. Optica Publishing Group.
- Júnior, P. J., Costa, L. R., Drummond, A. C., and Marotta, M. A. (2025). Minimizing unavailability in elastic optical networks: Pre-provisioning and provisioning protection strategy using dlp and dpp. *Computer Networks*, 257:110928.
- Júnior, P. S., Marotta, M., Costa, L., and Drummond, A. (2023). Janela de desfragmentação de espectro em redes sdm-eon. In *Anais do XLI Simpósio Brasileiro*

de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, pages 323–336, Porto Alegre, RS, Brasil. SBC.

- Khantwal, R., Kumar, V., Oki, E., and Chatterjee, B. C. (2023). Pdavxt: Partition-based crosstalk-avoided defragmentation scheme for spectrally-spatially elastic optical networks. In *2023 23rd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, pages 1–4.
- Lacerda, J. C., Cartaxo, A. V., and Soares, A. C. (2024). Novel dynamic impairment-aware algorithm for modulation, core, and spectrum assignment in sdm-eons. *Optical Switching and Networking*, 51:100763.
- Lacerda Júnior, J., Fontinele, A., Santos, I., Leão, E., Campelo, D., Monteiro, J. A., and Soares, A. (2020). Algoritmo de balanceamento inter-núcleos para redes Ópticas elásticas com multiplexação por divisão espacial. In *Anais do XXXVIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, pages 519–532, Porto Alegre, RS, Brasil. SBC.
- Luo, R., Hua, N., Zheng, X., and Zhou, B. (2018). Fast parallel lightpath re-optimization for space-division multiplexing optical networks based on time synchronization. *Journal of Optical Communications and Networking*, 10(1):A8–A19.
- Meloni, G., Fresi, F., Imran, M., Paolucci, F., Cugini, F., D’Errico, A., Giorgi, L., Sasaki, T., Castoldi, P., and Pot, L. (2016). Software-defined defragmentation in space-division multiplexing with quasi-hitless fast core switching. *Journal of Lightwave Technology*, 34(8):1956–1962.
- Trindade, S. and da Fonseca, N. L. (2021). Machine learning for spectrum defragmentation in space-division multiplexing elastic optical networks. *IEEE Network*, 35(1):326–332.
- Yao, Q., Yang, H., Yu, A., and Zhang, J. (2019). Transductive transfer learning-based spectrum optimization for resource reservation in seven-core elastic optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, 37(16):4164–4172.
- Zhang, M., You, C., Jiang, H., and Zhu, Z. (2014). Dynamic and adaptive bandwidth defragmentation in spectrum-sliced elastic optical networks with time-varying traffic. *Journal of Lightwave Technology*, 32(5):1014–1023.
- Zhao, Y., Hu, L., Zhu, R., Yu, X., Li, Y., Wang, W., and Zhang, J. (2019). Crosstalk-aware spectrum defragmentation by re-provisioning advance reservation requests in space division multiplexing enabled elastic optical networks with multi-core fiber. *Opt. Express*, 27(4):5014–5032.
- Zhao, Y., Hu, L., Zhu, R., Yu, X., Wang, X., and Zhang, J. (2018). Crosstalk-aware spectrum defragmentation based on spectrum compactness in space division multiplexing enabled elastic optical networks with multicore fiber. *IEEE Access*, 6:15346–15355.
- Zhao, Y. and Zhang, J. (2016). Crosstalk-aware cross-core virtual concatenation in spatial division multiplexing elastic optical networks. *Electronics Letters*, 52(20):1701–1703.
- Ítalo Brasileiro, Costa, L., and Drummond, A. (2020). A survey on challenges of spatial division multiplexing enabled elastic optical networks. *Optical Switching and Networking*, 38:100584.