

# Realocação de Circuito ciente de *Crosstalk* para Redução de Bloqueios em Redes Ópticas Elásticas com Multiplexação Espacial

Selles Araujo<sup>1,2</sup>, Andre Soares<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Computação – Universidade Federal do Piauí (UFPI)  
CEP 64049-550 – Teresina – PI – Brazil

<sup>2</sup>Campus Paulistana – Instituto Federal do Piauí (IFPI)  
CEP 64750-000 – Paulistana PI – Brazil

sellesgustavo@gmail.com

**Abstract.** *This paper proposes an inter-core crosstalk (XT)-aware circuit reallocation algorithm for elastic optical networks with spatial division multiplexing. Unlike works in the literature that use reallocation to defragment the spectrum, this work reallocates circuits to mitigate the effect of XT and avoid or reduce blockages in the network. The algorithm is executed whenever a request is about to block and is therefore considered a reactive algorithm. Furthermore, the impact of the proposal is analyzed in a circuit allocation scenario with and without XT awareness considering the NSFNET and EON topology. The push-pull and fast-switching techniques are used to migrate data traffic, as these are techniques that do not cause service interruptions. In terms of bandwidth blocking probability, there was a reduction of at least 30% with a maximum of 0.25% of active circuits reallocated per process.*

**Resumo.** *Este artigo propõe um algoritmo de realocação de circuito ciente do crosstalk (XT) entre núcleos para redes ópticas elásticas com multiplexação por divisão espacial. Diferentemente dos trabalhos na literatura que usam a realocação para desfragmentar o espectro, este trabalho realoca circuitos para mitigar o efeito de XT e evitar ou reduzir bloqueios na rede. O algoritmo é executado sempre que uma requisição está na iminência de bloqueio e, portanto, é considerado um algoritmo reativo. Além disso, o impacto da proposta é analisado em cenário de alocação de circuito com e sem ciência de XT considerando a topologia NSFNET e EON. É utilizada a técnica push-pull e fast-switching para migrar o tráfego dos dados, já que são técnicas que não causam interrupção de serviços. Em termos de probabilidade de bloqueio de banda, houve uma redução de pelo menos 30% com no máximo 0,25% dos circuitos ativos realocados por processo.*

## 1. Introdução

As redes ópticas elásticas (*Elastic Optical Networks* - EON) surgiram para melhor lidar com o aumento significativo e a heterogeneidade do tráfego de dados na Internet [Chatterjee et al. 2018]. A elasticidade das EONs possibilita a acomodação do tráfego na rede de forma mais eficiente comparada às redes tradicionais [Chatterjee et al. 2018],

reservando apenas recurso necessário para os circuitos. A acomodação mais eficiente é devido ao espectro da fibra óptica ser dividido em pequenos intervalos de frequência, os *slots*, que geralmente tem tamanho de 12,5GHz ou 6GHz, e, com isso, minimiza o superprovisionamento de espectro para atender as requisições.

Para potencializar as vantagens das EONs são usadas as fibras ópticas multinúcleos, aumentando a quantidade de recurso na rede em ordem relacionada ao número de núcleos. As EONs multinúcleos são conhecidas na literatura como Redes Ópticas Elásticas com Multiplexação por Divisão Espacial (*Spacial Division Multiplexing – SDM*) [Klinkowski et al. 2018]. Nas EON-SDM, com a adição da dimensão espacial, a escolha de núcleo é um novo subproblema que deve ser solucionado para o estabelecimento do circuito. Portanto, o problema de alocação de circuito, conhecido como RMSA (*Routing, Modulation, Spectrum Assignment*) nas redes EON, passa a ser RMCSA (*Routing, Modulation, Core and Spectrum Assignment*) nas redes EON-SDM [Klinkowski et al. 2018].

Os sucessivos estabelecimentos e finalizações dos circuitos em um cenário de tráfego dinâmica contribuem para a ocorrência do problema de fragmentação do espectro [Chatterjee et al. 2018]. Este problema é potencializado por duas restrições do meio óptico que são levadas em conta quando o novo circuito é estabelecido na rede. A primeira restrição é a contiguidade do espectro, ou seja, os *slots* escolhidos devem ser adjacentes. A segunda restrição é a continuidade, isto é, a porção escolhida deve ser a mesma em todos os enlaces pertencente à rota [Chatterjee et al. 2018, Klinkowski et al. 2018].

O problema da fragmentação, segundo a literatura, pode ser mitigado basicamente de duas formas: com algoritmos cientes de fragmentação, ou seja, buscam alocar recursos que geram menores níveis de fragmentação na rede. Outra forma de lidar com a fragmentação é a utilização de algoritmos de desfragmentação de espectro, isto é, algoritmos que buscam selecionar circuitos ativos e realocá-los para outras rotas ou faixas espectrais afim de gerar blocos de espectro contíguos e contínuos, possibilitando a admissão de mais tráfego na rede [Chatterjee et al. 2018].

Um outro problema comum nas redes EON-SDM são os Efeitos de Camada Física (ECF), que provoca diminuição na qualidade de transmissão do sinal (*Quality of Transmission - QoT*) através de sua propagação ao longo dos enlaces da rota [Fontinele et al. 2017]. Para mitigar os problemas relacionados aos ECF, algoritmos de alocação cientes de ECF [Fontinele et al. 2017] e algoritmos de realocação cientes de ECF [Araújo et al. 2018] foram propostos na literatura, no qual reduzem significativamente bloqueios de camada física.

A QoT dos circuitos é mensurada a partir da SNR (*Signal to Noise Ratio*) que é a relação entre a densidade espectral de potência do sinal (*Power Spectral Density - PSD*) do circuito com a PSD dos ruídos que a atingem. O cálculo da SNR pode ser encontrado em [Johannisson and Agrell 2014] e, quando o valor da SNR é abaixo de um limiar exigido pela rede, ocorre o bloqueio do tipo QoT. Os efeitos considerados neste trabalho foram a emissão espontânea amplificada e os efeitos não lineares (auto-modulação de fase, modulação de fase cruzada e mistura de quatro ondas) [Fontinele et al. 2017], aqueles que são independentes da potência do sinal do circuito.

Um novo desafio surge com o advento da EON-SDM que é o problema do *cross-talk* entre núcleos (XT). O *crossstalk* é a interferência que circuitos ativos promovem em

outros circuitos que estão alocados em núcleos vizinhos e com porções do espectro em comum [Hayashi et al. 2011]. Essa interferência pode ser alta o suficiente para impedir que um circuito funcione normalmente, dificultando o entendimento do sinal do receptor. Essa situação tem como consequência o bloqueio do circuito devido ao nível de *crosstalk* não atender as exigências da rede. O cálculo da XT para um dado circuito usado neste trabalho é apresentado em [Lobato et al. 2019] e dois tipos de bloqueio por XT pode ocorrer: XT (XT do novo circuito inadequada) e XTO (XT dos Outros circuitos ativos inadequada). O bloqueio do tipo XTO ocorre quando o impacto do estabelecimento de uma nova requisição provoca alteração na XT de um circuito já ativo tornando-o inadequado para operar.

Uma forma de mitigar os bloqueios do tipo XT e XTO, é utilizar algoritmos de alocação cientes de *crosstalks* [Trindade and da Fonseca 2021], no qual buscam soluções RMCSA que sofra o mínimo possível com o *crosstalk* entre núcleos. Porém, a redução desse tipo de bloqueio pode ser potencializada utilizando a realocação de circuitos, que já foi usada para mitigar bloqueios de fragmentação e de camada física em diversos trabalhos da literatura.

Tendo isso em vista, este artigo propõe um algoritmo de realocação de circuito para reduzir o problema do *crosstalk* entre núcleos, e conseqüentemente, os bloqueios ocasionados por ele. O algoritmo é executado sempre que um bloqueio do tipo XT ou XTO estão na iminência de ocorrer. Com a execução do algoritmo, os circuitos interferentes na requisição iminente de bloqueio são selecionados e realocados para um novo núcleo e/ou nova faixa espectral. A realocação do circuito é realizada pelas técnicas de migração de tráfego *push-pull* [Cugini et al. 2013] e *fast-switching* [Meloni et al. 2016]. De forma sucinta, as contribuições deste artigo são:

- Propor um algoritmo de realocação de circuitos para lidar com o problema de *crosstalk*, ou seja, realocar circuitos para evitar ou mitigar bloqueios do tipo XT e XTO;
- Investigar o funcionamento do algoritmo em dois cenários com diferentes algoritmos de alocação de recursos: i) cenário com algoritmo de alocação ciente de XT e ii) cenário com algoritmo de alocação não ciente de XT. Os cenários foram avaliados para duas topologias de rede reais: NSFNET e EON.

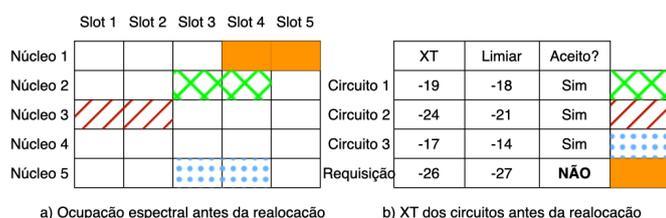
O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma: A Seção 2 apresenta o processo de realocação de circuito, detalhando cada etapa necessária para a alteração de rota, núcleo ou faixa espectral de um circuito. A Seção 3 elenca os principais trabalhos relacionados a este artigo e suas contribuições. Na Seção 4 é apresentada a proposta do trabalho e na Seção 5 é mostrado o resultado da avaliação de desempenho nos cenários delimitados. Por fim, a Seção 6 apresenta as conclusões do trabalho.

## 2. Realocação de Circuito

A realocação consiste da migração do tráfego de um circuito ativo para uma nova solução RMCSA. A nova solução pode ter alteração da rota, da modulação, do núcleo ou do espectro de um circuito comparado à sua solução RMCSA original. As realocações na literatura são normalmente usadas para desfragmentar o espectro ou mitigar efeitos de camada física, mais especificamente efeitos não lineares. Porém, as realocações são utilizadas para mitigar *crosstalk* entre núcleos em redes EON-SDM, já que esse problema é um dos principais fatores de bloqueios de requisição neste tipo de rede.

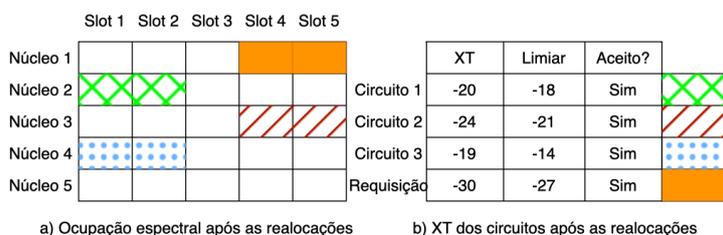
A Figura 1 e 2 apresenta um exemplo da realocação de circuitos para evitar um iminente bloqueio de requisição por *crosstalk*. A cor laranja representa a requisição a ser estabelecida, a cor verde representa o circuito 1, a cor vermelha representa o circuito 2 e a cor azul representa o circuito 3. Os circuitos 1, 2 e 3 já estão estabelecidos na rede.

**Figura 1. Cenário de rede antes da realocação.**



Na Figura 1(a) é apresentado uma situação hipotética de um cenário de rede com três circuitos ativos e uma requisição a ser estabelecida no *slot4* e *slot5* do *núcleo1*. Já a Figura 1(b) apresenta os respectivos níveis de XT de cada circuito e da nova requisição, com seus limiares de XT. Percebe-se que a nova requisição tem níveis de XT abaixo do limiar estabelecido, ocasionando o bloqueio da requisição por XT inadequada. Especificamente, o bloqueio é causado por circuitos de núcleos vizinhos (*núcleo2*, *núcleo4* e *núcleo5* são vizinhos do *núcleo1*) estarem ocupando mesma faixa de espectro da requisição (*slot4* e *slot5*), causando assim interferência a ponto de inviabilizar seu valor de XT, isto é, os circuitos 1 e 3 interferem na requisição.

**Figura 2. Cenário de rede após a realocação.**



A reorganização dos circuitos, como é visto na Figura 2, possibilita o estabelecimento da requisição que passa a ter XT aceitável para operar na rede, antes com valor  $-26$ , maior que o limiar (Figura 1(b)) e, após as realocações, valor  $-30$ , menor que o limiar (Figura 2(b)), evitando assim um bloqueio. Isto ocorre devido a utilização de estratégias para realocar os circuitos para porções do espectro ou para outros núcleos com o objetivo de evitar a utilização de mesmos slots de frequência em núcleo vizinhos. A reorganização da rede mostrou que foi possível alocar os circuitos de tal forma que nenhum interferisse no outro, ou seja, zero situação de *crosstalk*.

As Figuras 1 e 2 apresentam apenas uma parte do processo de realocação, a mudança do circuito na rede. Porém, esse processo ocorre em várias etapas, são elas: **i) momento para iniciar o processo de realocação** (chamado na literatura de gatilho); **ii) seleção dos circuitos ativos a serem realocados e ordená-los segundo um critério;** **iii) como realocar cada circuito e iv) qual técnica de migração de tráfego de dados utilizar no procedimento.** [Chatterjee et al. 2018]

Um algoritmo de realocação precisa solucionar cada etapa mencionada, porém, o maior desafio consiste em escolher os circuitos para a realocação (**etapa ii**) e definir a nova solução RMCSA objetivando causar o máximo de efeito positivo para a rede (**etapa iii**). Os trabalhos de realocação na literatura geralmente usam gatilhos baseados em um nível de fragmentação da rede, trabalhos com abordagens proativas, ou gatilhos do tipo bloqueio de requisição, conhecidos como abordagens reativas. Alguns trabalhos utilizam ambas abordagens de gatilho. A proposta deste trabalho é considerada reativa por ser executada quando um bloqueio está na iminência de ocorrer.

Além disso, os trabalhos podem ser categorizados segundo a técnica de migração de tráfego de dados. Dependendo da técnica, os trabalhos podem ser categorizados como *non-hitless*, aqueles que interrompem o tráfego de dados do circuito durante sua migração, causando perda de dados. Além de *non-hitless*, os trabalhos podem ser categorizados como *hitless*, aqueles que realizam realocações de circuitos sem interrupção do tráfego de dados. As principais técnicas hitless usadas nos trabalhos são: *Hop retuning* [Proietti et al. 2012], *push-pull* [Cugini et al. 2013], *fast-switching* [Meloni et al. 2016] e *make-before-break* [Takagi et al. 2011]. Este trabalho usou *push-pull* e *fast-switching*.

### 3. Trabalhos Relacionados

Na literatura das SDM-EON, os trabalhos que abordam a realocação de circuitos objetivam desfragmentar o espectro óptico e, por isso, as contribuições apresentadas pelos trabalhos mencionados são estratégias de desfragmentação do espectro.

Em [Zhao et al. 2018], é proposto um algoritmo de desfragmentação baseado na métrica *Spectrum Compactness* (SC) para lidar com o problema da fragmentação do espectro. O objetivo é realocar circuitos para mitigar a fragmentação atendendo limiares pré-estabelecidos de SC nos núcleos, mantendo o espectro o mais compacto possível. Este trabalho é uma extensão do trabalho proposto por [Hu et al. 2017].

Os autores em [Luo et al. 2018] propuseram algoritmos de desfragmentação que visam a realocação de circuitos paralelamente, reduzindo o tempo do processo de migração. A paralelização é viabilizada através de um controlador SDN (*Software Defined Network*). Vale ressaltar que bloqueios do tipo XT na rede foram reduzidos através das realocações, porém aconteceu por consequência da desfragmentação.

Em [Yao et al. 2019] é proposto uma estratégia de otimização de recurso para reservar recurso baseado em *Transfer Learning*. Considera-se dois tipos de requisição: a *immediate reservation* (IR) e a *advance reservation* (AR). Caso ocorra falha na reserva de recurso para uma requisição do tipo AR, o processo de desfragmentação é iniciado e a técnica *push-pull* é usada para migrar o circuitos. A contribuição discorre sobre realizar realocações antes de um bloqueio ocorrer conhecendo o tempo de desfragmentação a partir da técnica *Transfer Learning*.

Em [Zhao et al. 2019], é estudado a questão da desfragmentação do espectro de tempo em SDM-EONs. Para medir o status do espectro na rede, uma métrica chamada compactidade do espectro temporal-dimensional (TSC) é projetada. Com base no TSC, é proposto um algoritmo de realocação ciente de *crosstalk* com duas estratégias para reprovisionar solicitações de AR e melhorar o status do espectro para problemas de desfragmentação em SDM-EONs. Considerou-se dois tipos de requisições, as requisições

AR, que suportam um *delay* inicial para seu atendimento, e as requisições IR, que precisam ser atendidas imediatamente.

Em [Brasileiro et al. 2020] é feito uma adaptação no algoritmo de desfragmentação CASD ([Zhao et al. 2018]) para usar a técnica *push-pull* e *fast-switching* com o objetivo de reduzir a fragmentação da rede. Para controle da fragmentação é utilizada a medida SC. A ideia do algoritmo é que todos os núcleos tenham SC menor que um limiar pre-definido, isto é, realocações para outros núcleos ou outras faixas espectrais são frequentemente feitas quando a requisição chega na rede para manter o SC de cada núcleo dentro do limiar.

Os autores em [Trindade and da Fonseca 2021] propõe um algoritmo reativo e um proativo que podem reduzir conjuntamente a fragmentação do espectro. O algoritmo reativo usa aprendizado de máquina não supervisionado para identificar circuitos que podem ser agrupados no espectro com base em suas características. Em seguida, é feito um mapeamento dos núcleos com os agrupamentos de circuitos e realizado as realocações. O algoritmo proativo aproveita informações sobre o agrupamento do espectro e os características dos circuitos estabelecidos para permitir a aceitação de novos circuitos em um dos grupos formados, contribuindo para a prevenção da fragmentação futura do espectro.

Em [Khantwal et al. 2023] é proposto um algoritmo de desfragmentação baseado em partição, denominado PDavXT. O PDavXT separa os circuitos em dois conjuntos: aquelas que são *single hop* (SH) e as que são *multiple hops* (MH). Em seguida, aplica-se a política first-exact-fit para o conjunto SH e last-exact-fit para o conjunto MH. É usado *push-pull* para migrar o tráfego de dados dos circuitos em ambos os conjuntos. O PDavXT é executado sempre que o nível de fragmentação ultrapassa um limiar.

Em [Júnior et al. 2023] é proposto um algoritmo de desfragmentação em redes SDM-EON. A proposta 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. Para viabilizar essas realocações, usa-se as técnicas de migração de tráfego de dados *Push Pull* e *Fast Switching*.

Diferente dos trabalhos elencados que objetivam a desfragmentação do espectro, a contribuição deste trabalho consiste na utilização da realocação para reduzir ou evitar *crosstalk* entre núcleos.

#### 4. Proposta

O algoritmo proposto é considerado um algoritmo *hitless* e reativo que realoca circuitos para reduzir efeitos de *crosstalk* entre núcleos nas SDM-EON. A ação reativa do algoritmo é disparada quando uma requisição de circuito está na iminência de bloqueio do tipo XT ou XTO (Requisição  $R$ ). Todos os circuitos que compartilham os enlaces da rota  $R$  são armazenados na *ListaCircuitos*. Em seguida, aplica-se os seguintes filtros na *ListaCircuitos*: i) circuitos que estão alocados em núcleos vizinhos de  $R$ ; ii) circuitos que possuem algum *slot* em comum com os *slots* da requisição  $R$ . O objetivo dos filtros é ter uma lista de circuitos que interferem e sofrem interferência da requisição  $R$ . A seguir tem-se os passos realizados no procedimento reativo.

1. Selecionar circuitos (*ListaCircuitos*) que interferem na requisição iminente de

- bloqueio  $R$ , isto é, aqueles que possuem parte ou todo o espectro em comum com a requisição  $R$  em núcleos vizinhos. Definir  $i = 0$ , para representar os circuitos.
2. Definir soluções (*ListaSolucoes*) para o circuito  $C_i$ ; Será buscado e armazenado na *ListaSolucoes* a faixa de espectro com o melhor delta XT (Diferença entre a XT do circuito e o limiar da modulação) em cada núcleo;
  3. Ordenar a *listaSolucoes* segundo algum critério (Ordem decrescente de número de *slots* em comum);
  4. Para cada solução da *ListaSolucoes* tentar realocar o circuito  $C_i$ ; Se sucesso, ir para o item 5; Se insucesso, valor de  $i = i + 1$  (próximo circuito da *ListaCircuitos*) e ir para o item 2.
  5. Tentar atender requisição  $R$ ; Se sucesso, processo de realocação encerrado; Se insucesso, valor de  $i = i + 1$  (próximo circuito da *ListaCircuitos*) e ir para o item 2.
  6. O processo de realocação encerra quando a requisição  $R$  é atendida ou quando a *ListaCircuitos* é toda percorrida e o atendimento de  $R$  não foi possível.

Vale ressaltar que, como existem diversos tipos de bloqueios, o ação reativa age apenas quando um iminente bloqueio do tipo XT e XTO está para ocorrer. Para a iminência de bloqueios de outros tipos nenhum procedimento é realizado. Esta decisão parte do pressuposto, pode ser visto adiante, que os bloqueios do tipo XT e XTO são consideravelmente mais expressivos do que os demais tipos de bloqueios.

O diferencial na estratégia reativa quando o bloqueio é do tipo XTO é apenas a seleção dos circuitos para realocação. Quando o estabelecimento da requisição provoca um bloqueio em um circuito já estabelecido, estes circuitos que seriam bloqueados que serão realocados. A partir do item 2, o procedimento continua o mesmo.

A definição das soluções para cada circuito a ser realocado é feita de forma gulosa, ou seja, busca-se o conjunto de *slots* com maior delta XT em cada núcleo calculando a XT de *slot* por *slot*. Definimos o número de soluções em 7 devido ao quantidade de núcleos utilizados neste trabalho ser 7. Um exemplo é mostrado na Figura 3.

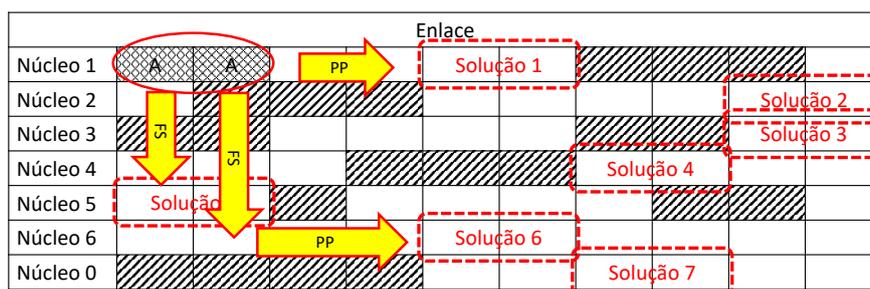
**Figura 3. Definição de soluções para o circuito A. Cada núcleo possui a melhor solução (faixa espectral com maior delta XT) para realocação do circuito A.**

	Enlace						
Núcleo 1	A				Solução 1		
Núcleo 2							Solução 2
Núcleo 3							Solução 3
Núcleo 4						Solução 4	
Núcleo 5	Solução 5						
Núcleo 6					Solução 6		
Núcleo 0							Solução 7

Observa-se na Figura 3 que para o circuito a ser realocado A (destacado com elipse vermelha) foram encontradas 7 soluções de realocações. Em cada núcleo da fibra foi possível identificar a faixa de espectro com melhor delta XT. Cada solução identificada atende os mesmos requisitos do processo de alocação de circuito. Limitou-se a 1 solução

por núcleo para reduzir o número de soluções e, cada solução dessa, além de atender todos os requisitos já mencionados, é necessário atender a restrição da técnica de migração. Este requisito consiste em, quando a solução for identificada, verificar se através das técnicas *Push-Pull* (PP) e *Fast-Switch* (FS) é possível migrar o tráfego do circuito da sua posição original até a solução definida sem nenhum impedimento. A ilustração da Figura 4 mostra o funcionamento da restrição de técnica de migração.

**Figura 4. Restrição relacionada às técnicas de migração de tráfego usadas para definir as soluções de realocação.**



Conforme é mostrado na Figura 4, uma solução é definida quando todas as exigências da rede são atendidas e se é possível alcançar a faixa de espectro em qualquer núcleo aplicando as técnicas *push-pull* e *fast-switching*. A Solução 1, por exemplo, é um conjunto de *slots* que apresenta o maior delta XT do núcleo 1 e pode ser alcançado deslizando o circuito A (aplicação da técnica PP). Caso a Solução 6 seja a escolhida para realocar o circuito A, seria necessário aplicar a técnica FS (realocar o circuito para o núcleo 6) e, em seguida, aplicar a técnica PP (deslizar o circuito para o conjunto de *slots* da Solução 6).

## 5. Avaliação de Desempenho

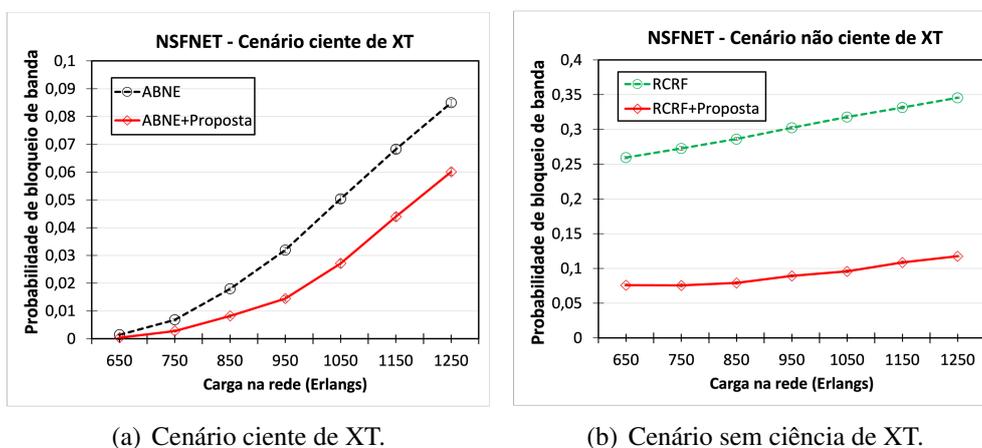
Os experimentos foram feitos a partir do uso da ferramenta SNetS (SLICE Network Simulator) [Fontinele et al. 2017]. A ferramenta SNetS simula uma SDM-EON com tráfego dinâmico e diferentes parâmetros que podem ser ajustados. Em cada simulação computacional realizada, 100.000 requisições de circuitos foram geradas na rede seguindo um processo de *Poisson* com taxa média entre chegadas de requisição de  $\lambda$  e tempo médio de retenção dos circuitos seguindo uma distribuição exponencial com média  $1/\mu$ . A carga de tráfego é medida em *erlangs* e calculada pela equação  $\rho = \lambda/\mu$ .

A carga de tráfego é distribuída uniformemente entre todos os pares de nós origem e destino. São geradas 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. Para cada simulação foram realizadas 10 replicações com diferentes sementes de geração de variável aleatória. Todos os resultados possuem nível de confiança de 95% e as topologias usadas nas simulações foram a NSFNET [Fontinele et al. 2017] e EON [Fontinele et al. 2017].

Foram utilizadas fibras ópticas com 7 núcleos. Cada núcleo contendo 320 *slots* de frequência e 1 *slot* reservado para banda de guarda. A frequência do *slot* foi de 12,5GHz. Além disso, foram usadas diferentes formatos de modulações neste trabalho com diferentes limiares de distância, SNR e XT. Os valores de limiares e parâmetros de camada física podem ser encontrados no trabalho de [Lobato et al. 2019].

Considerou-se dois cenários de simulação neste trabalho. O primeiro cenário, algoritmo não ciente de XT, não leva em consideração nenhuma informação de XT no processo de alocação de circuito, representado pelo *Random Core Random Fit* (RCRF) [Fujii et al. 2014]. Já o segundo cenário utiliza algoritmo ciente de XT, onde os recursos escolhidos devem ser aqueles que estão livres de influência de XT, representado pelo Algoritmo de Balanceamento de Núcleo e Espectro (ABNE) [Júnior et al. 2020].

As Figuras 5 e 6 apresentam a Probabilidade de Bloqueio de Banda (PBB) nas topologias NSFNET e EON, respectivamente. Em ambas as topologias, a proposta de realocação provocou uma admissão significativa de circuitos na rede, reduzindo a PBB em todos os pontos de carga na rede, independente do algoritmo de alocação utilizado.



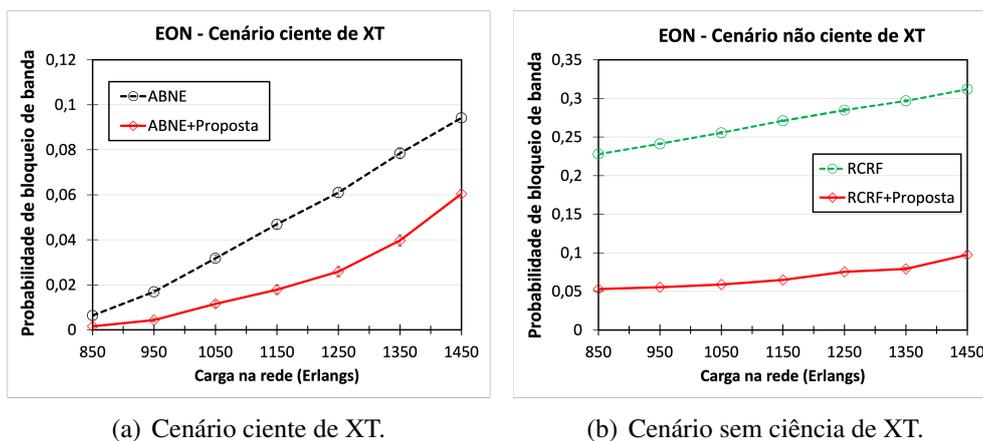
**Figura 5. Probabilidade de bloqueio de banda na topologia NSFNET para o cenário com alocação usando (a) ABNE e (b) RCRF.**

A Figura 5(a) apresenta a PBB na topologia NSFNET para um cenário ciente de XT, isto é, usando o algoritmo ABNE para alocar novos circuitos. Neste cenário, comparado ao cenário de alocação sem ciência de XT, a alocação do circuito é bem mais sofisticada, dificultando em uma possível realocação. Porém, mesmo neste cenário, a PBB apresentou uma redução de aproximadamente 30% para o último ponto de carga e reduções maiores que 30% para as demais cargas.

As reduções de PBB do gráfico da Figura 5(b) variaram entre 60 a 70%. Esses altos valores de reduções é devido a aplicação da proposta em um cenário de alocação não tão eficiente comparado à alocação com o ABNE. Assim sendo, é possível afirmar que realocar circuito estrategicamente usando informações de sobreposição entre circuitos e buscando balancear a carga nos núcleos, provoca um ganho significativo na topologia NSFNET.

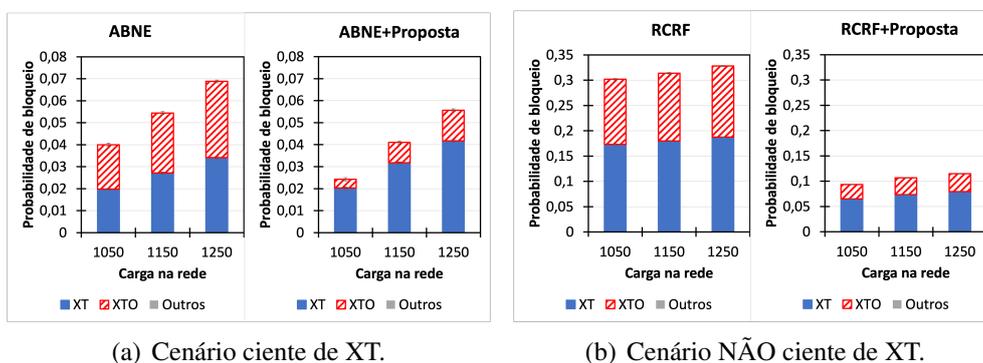
Com os resultados dos gráficos das Figuras 6(a) e 6(b), observa-se que as reduções significativas de PBB também aconteceram para a topologia EON, em ambos os cenários de alocação considerados. Isso mostra que a aplicação do algoritmo proposta funcionou independente de topologia e cenário de alocação. É notório a redução de PBB em todos os pontos de cargas tanto no cenário do ABNE quanto no cenário do RCRF.

Os valores de reduções do gráfico da Figura 6(a) foram maiores que no o mesmo cenário na topologia NSFNET, correspondendo a reduções aproximadas entre 35% a



**Figura 6. Probabilidade de bloqueio de banda na topologia EON para o cenário com alocação usando (a) ABNE e (b) RCRF.**

75%. No cenário não ciente de XT, Figura 6(b), os ganhos foram ainda maiores comparados ao mesmo cenário na topologia NSFNET, com ganho mínimo de 68%. No geral, a estratégia proposta apresentou reduções de PBB consideráveis nos cenários estudados. Nesse mesmo contexto, foram observadas as probabilidades de bloqueio de circuito quando decompostas em tipos de bloqueios e apresentadas nos gráficos a seguir.

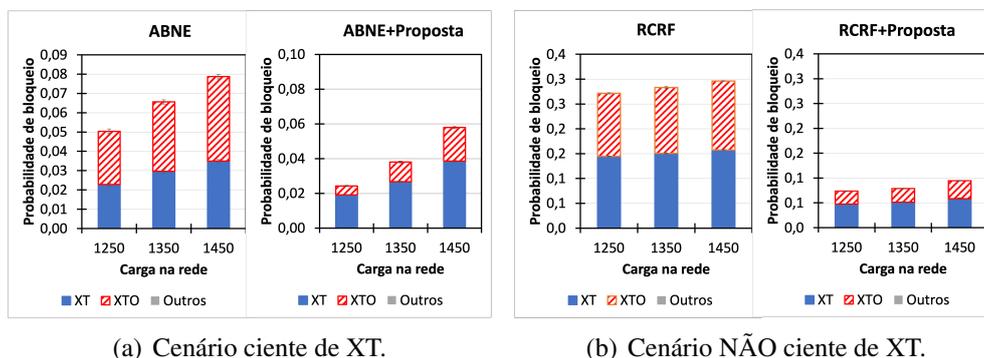


**Figura 7. Componentes da Probabilidade de Bloqueio de Circuito na topologia NSFNET para o cenário com alocação usando (a) ABNE e (b) RCRF.**

A Figura 7(a) apresenta as componentes de bloqueio para o cenário de alocação com ABNE na topologia NSFNET. Considerando o último ponto de carga, o bloqueio do tipo XT aumentou aproximadamente 20% enquanto o bloqueio XTO reduziu cerca de 60%. Isso significa que as realocações para evitar bloqueio do tipo XTO obtiveram maior sucesso comparada as realocações feitas para evitar bloqueio do tipo XT. Porém, mesmo com aumento de bloqueios XT, a redução geral no ponto de carga analisado foi cerca de 20% enquanto nas cargas de 1050 e 1150 a redução foi de aproximadamente 40% e 25%, nesta ordem.

Já na Figura 7(b), cenário não ciente de XT, as reduções dos dois tipos de bloqueio foram consideráveis em todas as cargas analisadas. O ganho drástico de probabilidade de bloqueio é devido a maior facilidade de realocar circuito neste cenário comparado ao cenário ciente de XT por causa da alocação não tão sofisticada. O percentual de redução

mínimo de bloqueio XT e XTO foi aproximadamente 57% e 74%, respectivamente.



**Figura 8. Componentes da Probabilidade de Bloqueio de Circuito na topologia EON para o cenário com alocação usando (a) ABNE e (b) RCRF.**

A Figura 8 mostra os tipos de bloqueio nos dois cenários distintos considerados para a topologia EON. Assim como na topologia NSFNET, o comportamento da proposta na topologia EON gerou resultados semelhantes. Na Figura 8(a), o bloqueio do tipo XT sofreu um aumento, como visto também na topologia NSFNET, porém, o bloqueio do tipo XTO reduziu consideravelmente a ponto de compensar o aumento de XT, alcançando valores de redução mínima de 55%. Vale ressaltar que o aumento de bloqueio do tipo XT pode estar relacionado à realocação de circuitos quando o gatilho de bloqueio XTO é acionado, isto é, busca-se evitar o bloqueio XTO e, em contrapartida, a nova posição do circuito realocado contribui para o aumento de bloqueio XT. Além disso, uma justificativa também viável é o não sucesso de evitar um bloqueio do tipo XT em muitos casos, prejudicando o cenário de rede em uma certa medida.

Os dois tipos de bloqueios da Figura 8(b) foram reduzidos significativamente em todas as cargas avaliadas. Na carga de 1450 erlang, por exemplo, os bloqueios do tipo XT diminuíram em aproximadamente 62% enquanto os bloqueios XTO alcançaram 73% de redução. A estratégia proposta agiu mais efetivamente nos cenários não cientes de XT devido a alocação não ser a mais sofisticada em relação ao cenário ciente de XT, refletindo em um grau de dificuldade de realocação diferente nos cenários.

A proposta de realocação alcançou seu objetivo, em reduzir bloqueios relacionados ao *crossstalk*, principal fator de bloqueio do cenário de rede estudado. A proposta provocou redução significativa dos bloqueios em dois cenários distintos: ciente de XT e não ciente de XT, mostrando que independente do algoritmo de alocação, neste trabalho, e independente de topologia de rede, a proposta foi eficiente.

A Tabela 1 mostra a estatística do processo de realocação no cenário ciente de XT considerando 3 parâmetros: i) média de circuitos ativos sempre que o algoritmo é executado; ii) média de circuitos selecionados para a realocação a partir dos circuitos ativos; e iii) média dos circuitos realocados com sucesso a partir dos circuitos selecionados.

Em todas as cargas de tráfego apresentadas na Tabela 1, observa-se que o número de circuitos selecionados para a realocação está no intervalo entre 1 a 2 circuitos por processo. Em percentual, os circuitos escolhidos variam entre 0,14% a 0,17% dos circuitos ativos, isto é, as alterações no estado da rede são mínimas em relação ao ganho adquirido na probabilidade de bloqueio de circuito. Além disso, mais de 79% dos circuitos

**Tabela 1. Estatísticas de realocação na topologia NSFNET para o cenário ciente de XT (ABNE).**

Carga	Circuitos Ativos (CA)	Circuitos Seleccionados (CS)	Circuitos Realocados (CR)
650	653,72	1,09 – (0,17% de CA)	1,03 – (94,49% de CS)
750	749,34	1,23 – (0,16% de CA)	1,07 – (86,99% de CS)
850	844,29	1,37 – (0,16% de CA)	1,14 – (83,21% de CS)
950	932,61	1,47 – (0,16% de CA)	1,19 – (80,95% de CS)
1050	1019,37	1,53 – (0,15% de CA)	1,23 – (80,39% de CS)
1150	1098,52	1,58 – (0,14% de CA)	1,27 – (80,38% de CS)
1250	1174,91	1,63 – (0,14% de CA)	1,29 – (79,14% de CS)

seleccionados são realocados com sucesso, ou seja, os circuitos escolhidos quase sempre conseguiram ser migrados para um outro núcleo ou espectro que pudesse viabilizar o atendimento da requisição iminente de bloqueio.

A Tabela 2 apresenta os dados estatísticos do cenário não ciente de XT. O número de circuitos escolhidos para a realocação são levemente maiores que o cenário da Tabela 1. Isto ocorre devido a natureza do algoritmo de alocação escolher randomicamente núcleo e espectro para estabelecer requisições, provocando maior probabilidade de sobreposições espectrais entre os circuitos. Diferentemente do cenário ABNE, que as alocações já buscam soluções que reduzem possíveis intersecções espectrais em núcleos vizinhos.

**Tabela 2. Estatísticas de realocação dos circuitos na topologia NSFNET para o cenário NÃO ciente de XT (RCRF).**

Carga	Circuitos Ativos (CA)	Circuitos Seleccionados (CS)	Circuitos Realocados (CR)
650	599,52	1,53 – (0,25% de CA)	1,29 – (84,31% de CS)
750	690,28	1,58 – (0,23% de CA)	1,31 – (82,91% de CS)
850	777,60	1,65 – (0,21% de CA)	1,35 – (81,82% de CS)
950	859,89	1,71 – (0,19% de CA)	1,38 – (80,71% de CS)
1050	946,53	1,79 – (0,19% de CA)	1,42 – (79,33% de CS)
1150	1024,26	1,88 – (0,18% de CA)	1,47 – (78,19% de CS)
1250	1100,87	1,97 – (0,18% de CA)	1,52 – (77,16% de CS)

Ainda na Tabela 2, o percentual mínimo de circuitos realocados foi de 77,16%, na maior carga de tráfego considerada nos experimentos. Em termos numérico, a redução significativa apresentado na probabilidade de bloqueio de banda para este cenário decorreu da realocação 1,52 circuitos ativos por execução do algoritmo, considerando a carga de 1250 erlangs. Vale ressaltar que os resultados apresentados nas Tabelas 1 e 2 foram similares aos resultados da topologia EON.

## 6. Conclusão

Neste trabalho foi proposto um algoritmo de realocação de circuito com objetivo de mitigar o efeito do *crosstalk* no intuito de reduzir bloqueios de requisições, já que este efeito é o principal causador de bloqueios no cenário estudado. O *crosstalk* (XT) entre núcleos ocorre nas fibras multinúcleos quando adotadas nas SDM-EON devido a utilização das mesmas partes do espectro óptico em núcleos vizinhos.

O algoritmo proposta foi investigado em dois cenários diferentes: cenário ciente de XT e não ciente de XT. Além dos cenários distintos, na avaliação de desempenho foram considerada duas topologias reais diferentes, a NSFNET e a EON. Em ambos os cenários e topologias, ocorreram diminuições significativas de bloqueios devido às realocações estrategicamente realizadas pelo algoritmo proposto. A redução mínima de bloqueio para

a topologia NSFNET foi de aproximadamente 30% e de 35% para a topologia EON em termos de probabilidade de bloqueio de banda. Vale ressaltar que os tipos de bloqueios que mais sofreram reduções foram os realocionados ao *crosstalk* entre núcleos.

## Agradecimentos

Este trabalho foi desenvolvido com apoio parcial do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Piauí (FAPEPI).

## Referências

- Araújo, S., Soares, A., Fontinele, A., Campelo, D. R., dos Reis, J. V., and Barbosa, (2018). Circuit reallocation strategy aware of the physical layer effects for elastic optical networks. In *2018 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, pages 970–975.
- 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., Ba, S., and Oki, E. (2018). Fragmentation problems and management approaches in elastic optical networks: A survey. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 20(1):183–210.
- 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., Neto, J. N., Campelo, D. R., and Soares, A. (2017). An efficient ia-rmlsa algorithm for transparent elastic optical networks. *Computer Networks*, 118:1–14.
- Fujii, S., Hirota, Y., Tode, H., and Murakami, K. (2014). On-demand spectrum and core allocation for reducing crosstalk in multicore fibers in elastic optical networks. *Journal of Optical Communications and Networking*, 6(12):1059–1071.
- 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.
- Johannisson, P. and Agrell, E. (2014). Modeling of nonlinear signal distortion in fiber-optic networks. *Journal of Lightwave Technology*, 32(23):4544–4552.
- Júnior, J. L., 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.

- 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.
- Klinkowski, M., Lechowicz, P., and Walkowiak, K. (2018). Survey of resource allocation schemes and algorithms in spectrally-spatially flexible optical networking. *Optical Switching and Networking*, 27:58–78.
- Lobato, F. R., Jacob, A., Rodrigues, J., Cartaxo, A. V., and Costa, J. (2019). Inter-core crosstalk aware greedy algorithm for spectrum and core assignment in space division multiplexed elastic optical networks. *Optical Switching and Networking*, 33:61–73.
- 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.
- Proietti, R., Qin, C., Guan, B., Yin, Y., Scott, R. P., Yu, R., and Yoo, S. J. B. (2012). Rapid and complete hitless defragmentation method using a coherent rx lo with fast wavelength tracking in elastic optical networks. *Opt. Express*, 20(24):26958–26968.
- Takagi, T., Hasegawa, H., Sato, K.-i., Sone, Y., Hirano, A., and Jinno, M. (2011). Disruption minimized spectrum defragmentation in elastic optical path networks that adopt distance adaptive modulation. In *2011 37th European Conference and Exhibition on Optical Communication*, pages 1–3.
- 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.
- 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.