



IMPA: Novo algoritmo para atribuição de potência de forma adaptativa em SDM-EONs

Jordana França¹, Uriel P. Mori¹, Alexandre C. Fontinele¹,
Iallen Santos², André C. B. Soares¹

¹ Departamento de Computação – Universidade Federal do Piauí (UFPI)
Teresina, PI – Brasil

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí (IFPI)
Piripiri – PI, Brasil

jordanafranca@ufpi.edu.br

Abstract. *In this work, we investigate the extended PRMCSA problem, in which power is treated as a decision variable. We propose the IMPA (Impairment-Aware Margin Power Assignment) algorithm for adaptive power assignment in SDM-EONs. IMPA selects the lowest feasible power that simultaneously satisfies OSNR and crosstalk margins, also considering the impact on already established neighboring circuits. Evaluations in NSFNet and USA topologies demonstrate that IMPA significantly reduces the blocking probability compared to classical and adaptive algorithms in the literature, achieving a reduction in bitrate blocking probability of at least 18% in the NSFNet topology and 46.5% in the USA topology.*

Resumo. *Neste trabalho investigamos o problema ampliado PRMCSA, no qual a potência é tratada como variável de decisão. Propomos o algoritmo IMPA (Impairment-Aware Margin Power Assignment) para atribuição adaptativa de potência em SDM-EONs. O IMPA seleciona a menor potência viável que satisfaz simultaneamente margens de OSNR e crosstalk, considerando também o impacto sobre circuitos vizinhos já estabelecidos. Avaliações nas topologias NSFNet e USA demonstram que o IMPA reduz significativamente a probabilidade de bloqueio em relação aos algoritmos clássicos e adaptativos da literatura, alcançando uma redução na probabilidade de bloqueio de bitrate de pelo menos 18% na topologia NSFNet e 46,5% na topologia USA.*

1. Introdução

O crescimento exponencial do tráfego de dados em escala global, impulsionado pelo avanço de aplicações como computação em nuvem, redes 5G/6G, inteligência artificial e serviços de vídeo em alta resolução, tem pressionado os limites das infraestruturas de comunicação óptica tradicionais. Para atender a essas exigências, tornou-se essencial o desenvolvimento de arquiteturas flexíveis, escaláveis e energeticamente eficientes. Nesse cenário, as Redes Ópticas Elásticas (*Elastic Optical Networks* – EONs) surgem como um paradigma de próxima geração, baseadas na alocação dinâmica e granular do espectro óptico [Jinno et al. 2009, Tang et al. 2021].

As EONs introduzem o conceito de *flexi-grid*, no qual o espectro óptico é dividido em *slots* de granularidade fina, tipicamente 12,5 GHz. Essa estrutura possibilita a

adaptação da largura de banda alocada a cada conexão conforme seus requisitos de taxa de transmissão, proporcionando ganhos significativos de eficiência espectral e adaptabilidade. Apesar de seus avanços, as EONs enfrentam limitações fundamentais de capacidade impostas pelos efeitos não lineares da fibra. Para superar tais restrições, o conceito de Multiplexação por Divisão Espacial (*Space Division Multiplexing* – SDM) tem ganhado destaque. A SDM explora múltiplos caminhos físicos paralelos dentro de um mesmo cabo por meio de fibras multicore (MCFs). Embora essa arquitetura proporcione ganhos expressivos de capacidade, ela introduz um novo fator limitante: o *crosstalk* inter-núcleo (XT). Esse efeito indesejado entre sinais de núcleos adjacentes degrada a Qualidade de Transmissão (*Quality of Transmission* – QoT), afetando diretamente o alcance de transmissão de cada circuito. A combinação entre SDM e EONs originou as SDM-EONs, consideradas uma das tecnologias mais promissoras para ampliar a capacidade das redes ópticas atuais [Klinkowski and Zalewski 2019, Oliveira and Fonseca 2019].

O estabelecimento de circuitos em SDM-EONs requer a verificação da QoT, considerando a relação sinal-ruído óptica (OSNR) e XT. Esse processo envolve o problema de RMCSA (*Routing, Modulation, Core, and Spectrum Assignment*) [Liu et al. 2020], que consiste em definir: *i*) rota; *ii*) modulação; *iii*) núcleo e *iv*) faixa de espectro livre. Geralmente, esses parâmetros são selecionados em conjunto ou sequencialmente, com a potência de transmissão fixa. Essa suposição simplifica o modelo, mas ignora interações críticas entre potência e efeitos de camada física, particularmente o XT, cuja intensidade depende da potência do circuito e de sua vizinhança espectral e espacial [Tode and Hirota 2017, Yaghubi-Namaad et al. 2018, Liu et al. 2020, Halder et al. 2022].

Somente um número reduzido de trabalhos recentes reconhece que a potência deve ser tratada como variável de decisão, especialmente em ambientes multicore, resultando no problema mais completo e desafiador PRMCSA (*Power, Routing, Modulation Level, Core and Spectrum Assignment*) [Vale and Almeida 2019, Fontinele et al. 2020, Vale et al. 2022]. A formulação do PRMCSA envolve um espaço de busca muito maior, pois a potência impacta diretamente: a OSNR do próprio circuito, os efeitos não-lineares e XT, causando impactos no próprio circuito e em outros circuitos estabelecidos. Nesse contexto, foi proposto o algoritmo **IMPA** (*Impairment-Aware Margin Power Assignment*), uma estratégia que seleciona, para cada circuito, um nível de potência capaz de atender simultaneamente: a margem de OSNR do novo circuito, a margem de *crosstalk* do novo circuito e a preservação da QoT dos circuitos já estabelecidos.

O restante do trabalho está organizado da seguinte forma: A Seção 2 descreve a modelagem de camada física adotada neste estudo. A Seção 3 formaliza o problema de atribuição de potência e os efeitos físicos considerados. A Seção 4 discute trabalhos relacionados apresentando algoritmos presentes na literatura. O algoritmo proposto é apresentado na Seção 5. A Seção 6 apresenta a avaliação de desempenho dos algoritmos de atribuição de potência por circuito. Por fim, a Seção 7 resume as conclusões e aponta direções para trabalhos futuros.

2. Imperfeições da Camada Física

Devido às imperfeições da camada física da rede, a QoT de um circuito óptico se degrada enquanto o sinal se propaga ao longo da fibra e dos equipamentos que compõem

a SDM-EON. Neste trabalho são considerados três principais efeitos de camada física: *i*) o ruído de emissão espontânea amplificada (*Amplified Spontaneous Emission* – ASE); *ii*) os efeitos não-lineares (*Self-Phase Modulation* – SPM, *Cross-Phase Modulation* – XPM e *Four-Wave Mixing* – FWM); e *iii*) o *crosstalk* inter-núcleo. O ruído ASE e os efeitos não-lineares são classificados como interferências intra-núcleo, pois ocorrem dentro de um mesmo núcleo dentro da fibra. Além das limitações de origem intra-núcleo, existem limitações de camada física que ocorrem entre dois ou mais núcleos, que são conhecidas como efeitos inter-núcleos. O efeito inter-núcleo mais estudado na literatura é o *crosstalk* inter-núcleos (interferência entre núcleos adjacentes) [Hayashi et al. 2011, Poggiolini and Jiang 2017].

Uma forma de mensurar o impacto dos efeitos intra-núcleo é através da relação sinal-ruído óptico (*Optical Signal to Noise Ratio* – OSNR). A OSNR estabelece uma relação entre a densidade espectral de potência do sinal (*Power Spectral Density* – PSD) do circuito e a PSD do ruído ASE e das interferências não-lineares que o afeta. Neste artigo, o modelo apresentado em [Poggiolini and Jiang 2017, Habibi and Beyranvand 2019] é adotado para mensurar a OSNR dos circuitos e o modelo apresentado em [Lobato et al. 2019, Lacerda-Jr et al. 2024a] é adotado para calcular o *crosstalk*, que é o principal efeito inter-núcleo.

Quando o plano de controle recebe uma requisição para o estabelecimento de um novo circuito, calcula-se um circuito candidato composto por potência, rota, formato de modulação, núcleo e o conjunto de *slots* a serem usados. O plano de controle avalia a QoT para o novo circuito candidato, verificando se os níveis de OSNR e XT atendem aos limites estabelecidos pelo *Service Level Agreement* (SLA) da rede e determina se um circuito candidato será bloqueado ou não. Os fatores que podem levar ao bloqueio de um circuito candidato são: *i*) Não existam recursos livres para atender a este circuito candidato; *ii*) A OSNR do circuito candidato não esteja adequada (QSNRN); *iii*) O valor de XT no circuito candidato não seja aceitável (XTN); *iv*) A OSNR de algum circuito já estabelecido fique abaixo do limiar estabelecido caso o novo circuito seja estabelecido (OSNRO); *v*) O valor de XT em algum circuito já estabelecido deixe de ser aceitável caso o novo circuito seja estabelecido (XTO); Os valores adotados para os limites de OSNR e XT são descritos na Seção 6.

3. Problema de Atribuição de Potência por Circuito

A atribuição adequada da potência de lançamento é um componente fundamental para garantir a QoT em redes ópticas. Em arquiteturas elásticas com multiplexação espacial, a potência afeta simultaneamente diversos fenômenos físicos, como efeito não-linear e *crosstalk* inter-core. Portanto, a escolha da potência de transmissão deve considerar não apenas o desempenho do circuito que está sendo estabelecido, mas também o impacto sobre os circuitos já ativos na rede.

A Figura 1 ilustra a relação típica entre a potência de lançamento (em dBm) e o valor de OSNR (em dB) obtido no receptor. A curva apresenta comportamento unimodal, alcançando um ponto de potência ótima P_{\max} em que a OSNR é máxima. Essa característica é decisiva para compreender o problema de atribuição de potência.

Observa-se pela Figura 1 que um nível de potência significativamente baixo (P_1) resulta em uma OSNR igualmente reduzida ($OSNR_1$) para o circuito óptico. Um circuito

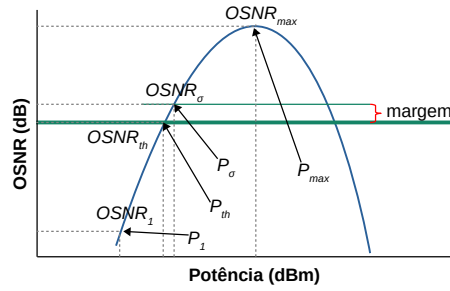


Figura 1. Níveis de potência e suas respectivas OSNRs.

estabelecido com esse nível de potência será bloqueado, pois sua OSNR estará abaixo do limiar mínimo ($OSNR_{th}$) exigido para o seu estabelecimento. Dessa forma, o nível de potência ideal deve ser escolhido na faixa compreendida entre a potência que atinge o limiar de OSNR e a potência que maximiza a OSNR ($OSNR_{max}$).

A curva de desempenho pode ser analisada em três regiões distintas, cada uma caracterizada por um regime específico de operação:

1. **Região de baixas potências:** Quando a potência de transmissão é insuficiente (por exemplo, P_1), o sinal chega ao receptor com uma relação sinal-ruído reduzida, sendo fortemente influenciado pelo ruído ASE. Nessa condição,

$$OSNR(P) < OSNR_{th} \quad \text{para } P < P_{th}, \quad (1)$$

o que inviabiliza o estabelecimento do circuito por não atender ao limiar mínimo de qualidade.

2. **Região intermediária:** À medida que a potência aumenta, a OSNR também cresce devido à melhor compensação das perdas acumuladas ao longo do enlace. Essa melhoria persiste até um ponto ótimo P_{max} , no qual os benefícios do aumento de potência ainda superam os efeitos não-lineares, que permanecem moderados.

$$OSNR_{th} \leq OSNR(P) \leq OSNR_{max} \quad \text{para } P_{th} \leq P \leq P_{max}. \quad (2)$$

3. **Região de altas potências:** Para valores superiores ao ponto ótimo P_{max} , os efeitos não-lineares tornam-se predominantes. O aumento de potência passa então a degradar a qualidade do sinal, reduzindo a OSNR:

$$OSNR(P) < OSNR_{max} \quad \text{para } P > P_{max}. \quad (3)$$

Nessa região, o excesso de potência provoca interferências não-lineares que superam os ganhos proporcionados pelas altas potências.

Para que um circuito seja considerado viável, a OSNR deve superar o limiar requerido pelo formato de modulação acrescido de uma margem operacional:

$$OSNR(P) \geq OSNR_{th} + \text{margin}. \quad (4)$$

Na Figura 1, essa condição é ilustrada pela linha horizontal verde correspondente ao $OSNR_{\sigma}$. Observa-se que mais de um valor de potência pode atender ao limiar de

OSNR – por exemplo, tanto P_σ quanto $P_{m,MAX}$, assim como qualquer potência situada entre esses dois pontos. No entanto, valores elevados de potência intensificam os efeitos não lineares (NLI) e o *crosstalk* inter-core, aumentando a interferência gerada sobre circuitos vizinhos. Por esse motivo, a escolha prática tende a privilegiar a **menor potência que satisfaz todas as restrições de QoT**, evitando degradações desnecessárias na rede.

Dado um circuito candidato c , com rota r , modulação m , núcleo k , faixa de slots s e intervalo físico de potências $[P_{min}, P_{max}]$, o Problema de Atribuição de Potência por Circuito consiste em determinar uma potência P^* tal que a OSNR do sinal seja maior ou igual ao limite mínimo exigido, somado a uma margem de segurança. O nível de *crosstalk* deve estar abaixo de um limite máximo tolerável, o novo circuito não pode escolher uma potência que degrade a OSNR e o XT interfira nos vizinhos. O objetivo é encontrar o valor mínimo de potência (P^*) dentro do intervalo permitido que consiga satisfazer todas as restrições de QoT.

A Figura 1 mostra que a OSNR aumenta, atinge um máximo e depois decai devido a NLI. Portanto, o problema não pode ser resolvido simplesmente buscando a potência que maximiza OSNR; deve-se selecionar a **menor potência que garanta QoT** sem causar degradação nos demais circuitos. Este entendimento é fundamental para o desenvolvimento de algoritmos que encontram soluções que levam a redução da probabilidade de bloqueio de requisições de circuitos.

O *crosstalk* inter-core apresenta forte dependência da potência de transmissão, aumentando de forma monotônica à medida que o nível de potência cresce. Em fibras multicore, o XT decorre do nível de acoplamento entre núcleos adjacentes, de modo que potências mais elevadas intensificam a interferência que cada circuito exerce sobre seus vizinhos. Diferentemente da OSNR, cuja relação com a potência é unimodal e apresenta um ponto ótimo, o XT não possui máximo local: ele cresce continuamente conforme a potência aumenta, independentemente do regime de operação do enlace. Essa característica implica que a potência escolhida para um novo circuito pode, mesmo antes de ultrapassar a região de efeitos não-lineares, provocar degradação significativa na QoT de circuitos já estabelecidos nos núcleos vizinhos. Assim, a atribuição de potência deixa de ser um problema isolado de cada circuito, passando a ser uma decisão global, que deve considerar o impacto coletivo sobre toda a infraestrutura espacialmente multiplexada.

4. Trabalhos Relacionados

Os autores em [Palkopoulou et al. 2013] apresentam três estratégias para atribuir potência por circuito: *Optimum Launch Power* (OLP), *Constant Launch Power* (CLP) e *Constant Power Spectral Density* (CPSD). A abordagem CPSD emprega a mesma densidade espectral de potência para todos os circuitos. A potência de cada circuito é proporcional à largura de banda alocada para o circuito. A definição da densidade espectral de potência adequada é realizada através da avaliação de múltiplos valores, iniciando-se em uma densidade menor e progredindo para valores maiores. O valor que manifestar a menor taxa de bloqueio da rede é o selecionado para implementação.

Os autores em [Vale and Almeida 2019] apresentam quatro estratégias para determinar a potência por circuito: *Egoistic Power Assignment* (EPA), *Enough Power Assignment* (EnPA), *Constant Power Assignment* (CPA) e *Adaptive Power Assignment* (APA). As estratégias OLP e CLP são semelhantes às estratégias EPA e CPA, respectivamente. A

estratégia do EPA atribui ao circuito o nível de potência que alcança o valor máximo de OSNR ($OSNR_{max}$). O valor dessa potência ideal, denotada por P_{max} para um determinado circuito no EPA, é definido por meio da Equação (5). Os detalhes de como obter os parâmetros C_{route} e $2\alpha_{channel}$ podem ser encontrados em [Vale and Almeida 2019].

$$P_{max} = \sqrt[3]{\frac{C_{Route}}{2\alpha_{Channel}}} \quad (5)$$

O método EnPA atribui ao circuito o nível de potência que atinge o limiar de OSNR ($OSNR_{th}$) da modulação selecionada. Em [Vale and Almeida 2019] esse nível é determinado utilizando-se interpolação linear entre uma potência base, significativamente baixa, e o nível de potência que maximiza a OSNR. Posteriormente, é realizado um ajuste para identificar a potência que corresponde ao $OSNR_{th}$. A Figura 1 exemplifica o nível de potência resultante (P_{th}) que atinge o $OSNR_{th}$ em comparação com uma potência base de referência (P_1). A estratégia CPA atribui a mesma potência para todos os circuitos. Para definir a potência que será atribuída, é realizada uma varredura em um intervalo que se estende da potência mínima à potência máxima admissível. O valor de potência que resultar na menor probabilidade de bloqueio global da rede é, então, selecionado e aplicado uniformemente.

Os autores em [Vale et al. 2022] apresentam os algoritmos APAmem (*Adaptive Power Assignment with memory*) e APAnoMem (*Adaptive Power Assignment without memory*). O algoritmo APAmem atribui um valor de potência (P_σ), correspondente ao limiar de OSNR adicionada de uma margem para prevenir interferências de futuros circuitos. Por esta razão, o valor de potência P_σ deverá ser maior do que a potência P_{th} e menor do que a potência P_{max} . As Potências já utilizadas para o estabelecimento de circuitos são salvas em um banco de dados. Quando é realizado o atendimento de uma requisição de circuito que não possui um valor de potência salvo no banco de dados, o valor inicial de potência ($P_{Current}$) é obtido de forma que o parâmetro k_p ajusta a margem de potência relativa à potência de limiar, P_{th} . O valor de P_{max} pode ser inicializado com a Equação 5 e a estratégia EnPA pode ser usada para inicializar P_{min} . O APAnoMem, é uma variação do algoritmo APAmem que visa reduzir o tempo de execução e a complexidade ao eliminar o uso do Banco de Dados. Esta abordagem dispensa o registro de potências de conexões passadas, resultando em uma versão mais rápida do algoritmo.

Em [Fontinele et al. 2020] os autores apresentam o algoritmo PABS (*Power Assignment by Binary Search*). O PABS é um método adaptativo para atribuição de potência que utiliza a busca binária para determinar o nível de potência ideal ($P_{Current}$) para um novo circuito óptico. O PABS opera dentro de um intervalo definido pela potência máxima e uma potência mínima, refinando sucessivamente $P_{Current}$ pela média dos limites. Para acelerar o processo, o algoritmo usa um banco de dados para consultar potências já atribuídas a circuitos semelhantes, evitando buscas cegas. A potência final só é aceita se alcançar ou superar o limiar de OSNR com margem ($OSNR_{th+m}$) e, crucialmente, se não degradar a QoT dos circuitos já ativos na rede.

5. Proposta

Nesta seção é apresentado o *Impairment-Aware Margin Power Assignment* (IMPA), um algoritmo de atribuição de potência adaptativa projetado para EON-SDM. O IMPA adota

uma estratégia orientada por restrições ajustadas pelos operadores da rede, avaliando simultaneamente os requisitos de QoT do circuito sendo estabelecido e o impacto causado aos circuitos já ativos na rede, considerando os principais efeitos físicos da camada óptica: ASE, efeito não-linear e *crosstalk* inter-núcleo.

Em SDM-EONs baseadas em fibras multi-núcleo, o sinal óptico sofre degradações provenientes de (i) ruído ASE, (ii) NLI acumulado ao longo da rota e (iii) *crosstalk*. Ao ajustar a potência de lançamento de um circuito, tais efeitos podem melhorar ou piorar simultaneamente, influenciando tanto o circuito em questão quanto os demais circuitos que compartilham recursos espaciais ou espectrais. Portanto, o IMPA foi desenvolvido com o objetivo de selecionar a potência mais baixa possível que mantenha as margens de QoT do novo circuito e preserve as margens de QoT dos circuitos já estabelecidos, buscando reduzir degradações futuras que levem ao bloqueio de novas requisições de circuitos. A operação do IMPA pode ser dividida em três fases principais:

1. **Determinação dos limites de potência:** O algoritmo calcula uma potência mínima P_{\min} capaz de atingir o limiar de OSNR requerido e uma potência máxima P_{\max} correspondente ao ponto de máximo OSNR, obtido por expansão adaptativa e busca ternária.
2. **Geração de potências candidatas:** Um conjunto de valores é gerado no intervalo $[P_{\min}, P_{\max}]$ utilizando uma combinação de amostragem uniforme e log-uniforme, garantindo cobertura adequada de toda a região viável de potência.
3. **Avaliação sequencial de QoT:** Para cada potência candidata P , o IMPA avalia os seguintes critérios para o novo circuito e para seus vizinhos: margem de OSNR (novo circuito), margem de XT (novo circuito), QoT para OSNR (impacto sobre vizinhos) e QoT para XT (impacto sobre vizinhos).

O primeiro valor de potência que satisfaz simultaneamente todas as restrições é retornado como solução. Caso nenhuma potência candidata seja válida, o IMPA retorna a média geométrica ($\sqrt{P_{\min} \cdot P_{\max}}$), utilizada posteriormente para verificação final de QoT. O Algoritmo 1 apresenta os passos do IMPA na busca da potência ideal.

Os limiares de OSNR e XT são ajustados incorporando margens operacionais definidas pelos operadores da rede. Assim, os limiares efetivos tornam-se:

$$\text{OSNR}_{\text{th}}^{\text{eff}} = 10^{(\text{OSNR}_{\text{th(dB)}} + \text{margin}_{\text{OSNR(dB)}})/10}, \quad (6)$$

$$\text{XT}_{\text{th}}^{\text{eff}} = 10^{(\text{XT}_{\text{th(dB)}} - \text{margin}_{\text{XT(dB)}})/10}. \quad (7)$$

A potência candidata P é imediatamente descartada caso os valores de OSNR e XT alcançados não respeitem os limiares de OSNR e XT ajustados:

$$\text{OSNR}(P) < \text{OSNR}_{\text{th}}^{\text{eff}}, \quad (8)$$

$$\text{XT}(P) > \text{XT}_{\text{th}}^{\text{eff}}. \quad (9)$$

Além disso, o IMPA reavalia todos os circuitos vizinhos que compartilham enlaces, núcleos ou espectro. Para cada vizinho k , são verificadas se as restrições de OSNR e XT. Caso qualquer vizinho viole algum limiar (não respeite uma das restrições), a potência candidata P é descartada.

Algorithm 1: Impairment-Aware Margin Power Assignment (IMPA)

Input: Circuit c (rota, modulação, núcleo, faixa de slots), $margin_{OSNR}$, $margin_{XT}$

Output: Potência selecionada P^*

- 1 Compute OSNR threshold: $OSNR_{th}^{eff} = 10^{(m.OSNR_{th} + margin_{OSNR})/10}$
- 2 Compute XT threshold: $XT_{th}^{eff} = 10^{(m.XT_{th} - margin_{XT})/10}$
- 3 $P_{min} \leftarrow \text{computePmin}(c, P_{low}, P_{max})$
- 4 $P_{max} \leftarrow \text{computePmax}(c)$
- 5 Generate candidate powers $P_{candidates} \leftarrow \text{generateCandidatePowers}(c, P_{min}, P_{max})$
- 6 Set default power $P^* \leftarrow \sqrt{P_{min} \cdot P_{max}}$; // Média geométrica
- 7 **foreach** P in $P_{candidates}$ **do**
- 8 Set circuit launch power to P
- 9 Compute OSNR of the circuit: $OSNR(P) \leftarrow \text{computeOSNR}(c)$
- 10 **if** $OSNR(P) < OSNR_{th}^{eff}$ **then**
- 11 | continue ; // Bloqueio por OSNRN
- 12 Compute XT of the circuit: $XT(P) \leftarrow \text{computeXT}(c)$
- 13 **if** $XT(P) > XT_{th}^{eff}$ **then**
- 14 | continue ; // Bloqueio por XTN
- 15 Compute neighbor OSNR info: $infoOSNR \leftarrow \text{computeOSNRNeighborInfo}(c)$
- 16 **if** $infoOSNR.violatesThreshold$ **then**
- 17 | continue ; // Bloqueio por OSNRO
- 18 Compute neighbor XT info: $infoXT \leftarrow \text{computeXTNeighborsInfo}(c)$
- 19 **if** $infoXT.violatesThreshold$ **then**
- 20 | continue ; // Bloqueio por XTO
- 21 $P^* \leftarrow P$
- 22 break
- 23 **return** P^*

A lógica central do IMPA consiste em avaliar a lista ordenada de potências candidatas. Para cada valor P , o algoritmo:

1. Configura a potência no circuito em análise;
2. Verifica QoT via OSNR e XT no novo circuito;
3. Verifica QoT via OSNR e XT nos circuitos vizinhos;

Se todas as condições forem satisfeitas, o algoritmo retorna P . Caso contrário, o próximo valor é avaliado. O procedimento é determinístico, comportando-se de forma estável em diversos cenários de carga e níveis de *crosstalk*. Quando nenhuma potência candidata é válida, o IMPA retorna a potência de *fallback* (média geométrica), que é fisicamente razoável e permite que estágios posteriores da camada de controle realizem verificações adicionais.

O método *generateCandidatePowers* tem como objetivo produzir um conjunto de potências representativas dentro do intervalo informado $[P_{min}, P_{max}]$. Para isso, o método

combina dois tipos de amostragem: 1) Amostragem Log-Uniforme – concentra amostras em regiões de baixa potência, que são mais sensíveis a oscilações de OSNR e a regimes críticos de operação. 2) Amostragem Uniforme – distribui amostras em toda a faixa para evitar lacunas e permitir avaliação ampla da QoT.

A quantidade total de amostras é adaptativa e depende da carga atual da rede, que é medida pela utilização de *slots*. Redes com baixa ocupação geram menos amostras, resultando em avaliação mais rápida, enquanto redes muito carregadas aumentam a quantidade de amostras, melhorando a precisão no processo de seleção de potência. Esse mecanismo adaptativo garante que o sistema responda ao estado real da rede, evitando tanto subexploração em cenários críticos quanto sobrecusto computacional em cenários leves.

6. Resultados

Para gerar os resultados, foi utilizado o simulador *SLICE Network Simulator* (SNetS) [Lacerda-Jr et al. 2024b]. Cada simulação processou 100.000 requisições de circuitos, com carga de tráfego distribuída uniformemente entre os pares de nós de origem e destino. Os resultados, obtidos a partir de 5 replicações utilizando diferentes sementes para geração de variáveis aleatórias, possuem um nível de confiança de 95%. As requisições são geradas de acordo com um processo de Poisson com taxa média λ , e o tempo médio de retenção dos circuitos segue uma distribuição exponencial com média $1/\mu$. A distribuição da carga de tráfego é uniforme entre todos os pares de nós de origem e destino. Foram simuladas requisições de 100, 200, 300, 400 e 500 Gbps, com proporções de 5:4:3:2:1, respectivamente. A carga em Erlangs é definida por $\rho = \lambda/\mu$.

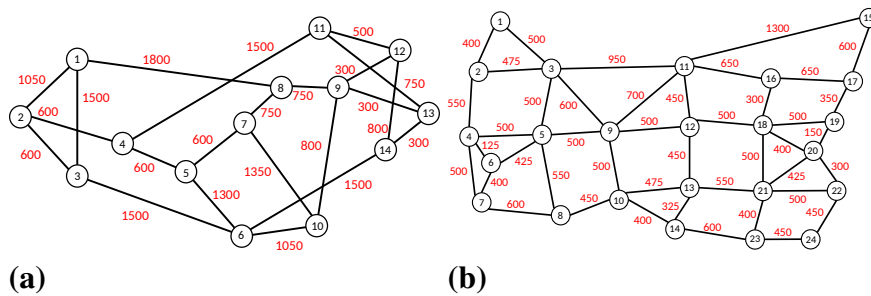


Figura 2. Topologias (a) NSFNet e (b) USA.

As simulações foram realizadas utilizando as topologias NSFNet e USA, conforme ilustrado na Figura 2. Os enlaces da rede são bidirecionais e formados por 7 núcleos, organizados em um núcleo central circundado por outros 6 núcleos. Cada núcleo possui um espectro óptico independente, dividido em 320 *slots* de 12,5 GHz, com uma banda de guarda de 1 *slot* para reduzir as interferências entre os circuitos adjacentes ativos no espectro. Essas topologias foram selecionadas por serem baseadas em infraestruturas reais, permitindo uma análise mais fiel do comportamento dos algoritmos em aplicações práticas.

Foram utilizados cinco formatos de modulação: 4QAM, 8QAM, 16QAM, 32QAM e 64QAM, com limiares de OSNR de 8,95 dB, 13,15 dB, 15,49 dB, 18,51 dB e 21,28 dB, respectivamente. Os limites de *crossstalk* associados a essas modulações são

de -19,03 dB, -23,23 dB, -25,57 dB, -28,59 dB e -31,36 dB, também na ordem correspondente [Lacerda-Jr et al. 2024b]. Outros parâmetros utilizados nas simulações estão listados na Tabela 1 e mais informações sobre a camada física podem ser encontradas em [Lacerda-Jr et al. 2024b].

Tabela 1. Parâmetros de camada física utilizados nas simulações.

Descrição	Valor
Perda no nó (W_s)	15 dB
Tamanho de um <i>span</i> (L_s)	80 km
Figura de ruído do amplificador (NF)	5 dB
Atenuação da fibra (α)	0,2 dB/km
Parâmetro de dispersão da fibra (D)	16 ps/(nm·km)
Coefficiente não linear da fibra (γ)	$1,3 (\text{W}\cdot\text{km})^{-1}$
Coefficiente de acoplamento de potência (h_c)	$6,4\cdot 10^{-9} \text{ m}^{-1}$

6.1. Análises

A avaliação do desempenho de atribuição de potência foi conduzida utilizando um conjunto de oito algoritmos de atribuição de potência por circuito, sendo eles: EPA, EnPA, CPA, CPSD, APAmem, APAnoMem, PABS e IMPA. A métrica de avaliação de desempenho adotada foi a Probabilidade de Bloqueio. Foram consideradas a Probabilidade de Bloqueios de Circuito (PBC) e Probabilidade de Bloqueio de BitRate (PBBR).

Para todos os algoritmos de atribuição de potência por circuito foram utilizadas as mesmas estratégias para a seleção de rota, modulação, núcleo e espectro. Para o roteamento utilizou-se k menores caminhos, com k igual a 3. As rotas foram ordenadas em ordem crescente de distância e as modulações foram ordenadas em ordem decrescente de eficiência espectral. Os núcleos são ordenados de modo que o núcleo com maior número de adjacências (núcleo central) seja avaliado por último. É aplicado o algoritmo de alocação de espectro que utiliza a estratégia de seleção de espectro do algoritmo ABNE [Lacerda-Jr et al. 2020]. Para cada combinação de potência, rota, modulação, núcleo e espectro (PRMCSA) é atribuído um custo, que é o valor de XT alcançado por essa combinação. No final é selecionada a combinação com o menor valor de XT e que possui níveis de QoT aceitáveis para o novo circuito e os demais circuitos ativos.

Com exceção do EPA, todos os algoritmos de atribuição de potência analisados possuem parâmetros ajustáveis que influenciam diretamente em seu desempenho. De forma a determinar os valores que resultam na melhor performance de cada algoritmo. O experimento consistiu nas simulações com os parâmetros variando em um intervalo predefinido, partindo de um valor mínimo até um valor máximo, com um incremento específico. A PBC foi a métrica utilizada para a análise. Foi selecionado o valor que alcançou a menor probabilidade de bloqueio para cada algoritmo.

A otimização dos parâmetros específicos para cada algoritmo foi conduzida de forma individual. Para os algoritmos APAmem e APAnoMem, foi selecionado o valor de $k_p = 0,25$. O desempenho foi avaliado com o parâmetro k_p variando de 0,0 a 1,0, com incrementos de 0,25. No caso do CPA, o estudo analisou a potência de transmissão no intervalo de -5 dBm a 0 dBm, com passos de 1 dB, a potência de 0 dBm resultou no desempenho superior. Para o CPSD, a faixa de potência explorada foi de -10 dBm a -5 dBm, também com incrementos de 1 dB. Para determinar a densidade espectral de

potência, utilizou-se a largura de banda de referência equivalente à largura de banda de um slot. Neste caso, as potências de -7 dBm e -10 dBm alcançaram os melhores resultados nas topologias NSFNet e USA, respectivamente. O algoritmo PABS foi simulado com uma margem de OSNR variando entre 0,0 e 1,0, com incrementos de 0,25, sendo a margem de 0,75, aquela que produziu o menor bloqueio. Por fim, a margem de OSNR para o EnPA foi testada com três valores discretos (0,01, 0,10 e 0,15), com o valor de 0,15 apresentando o melhor desempenho.

O algoritmo IMPA possui dois parâmetros para ajustes, a margem de OSNR ($margin_{OSNR}$) e a margem de XT ($margin_{XT}$). Para essas margens foram verificados valores variando entre 0,0 e 1,0, com incrementos de 0,25. Simulações foram conduzidas usando combinações desses valores para as margens. Por exemplo, $margin_{OSNR} = 0,0$ e $margin_{XT} = 0,25$ ou $margin_{OSNR} = 0,50$ e $margin_{XT} = 0,50$. Dentre essas combinações a combinação $margin_{OSNR} = 0,25$ e $margin_{XT} = 0,50$ foi a que apresentou o melhor desempenho para a topologia NSFNet. Enquanto a combinação $margin_{OSNR} = 1,0$ e $margin_{XT} = 0,25$ apresentou o melhor desempenho para a topologia USA.

A Figura 3 apresenta a (a) PBC e a (b) PBBR para os algoritmos de atribuição de potência em função da carga na rede na topologia NSFNet. Em ambas as métricas, o algoritmo IMPA demonstrou o melhor desempenho, alcançando a menor média de bloqueio no cenário estudado. Seguido de perto pelos algoritmos PABS, APAMem e APAnoMem, que superaram os demais métodos, especialmente nos pontos de maior carga. Em contraste, o EnPA registrou os maiores índices de bloqueio na maioria dos pontos analisados, enquanto os algoritmos EPA, CPA e CPSD apresentaram resultados intermediários, posicionando-se logo após o EnPA na ordem de pior desempenho.

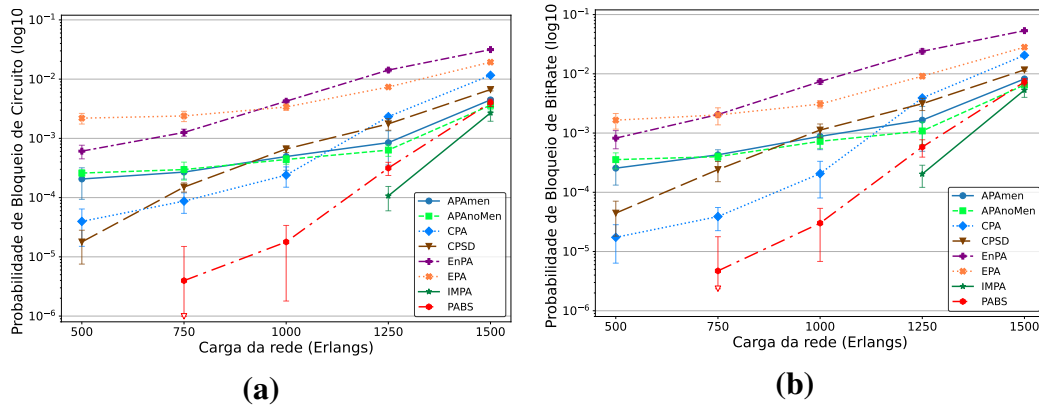


Figura 3. (a) PBC e (b) PBBR na topologia NSFNet.

A Figura 4 apresenta a (a) PBC e a (b) PBBR para os algoritmos de atribuição de potência em função da carga na rede na topologia USA. Em ambas as métricas, o algoritmo IMPA demonstrou o melhor desempenho, alcançando a menor média de bloqueio no cenário estudado. Ele foi seguido de perto pelos algoritmos PABS, APAMem e APAnoMem, que superaram os demais métodos, especialmente nos pontos de maior carga. Em contraste, o EnPA registrou os maiores índices de bloqueio na maioria dos pontos analisados, enquanto os algoritmos EPA, CPA e CPSD apresentaram resultados intermediários, posicionando-se logo após o EnPA na ordem de pior desempenho.

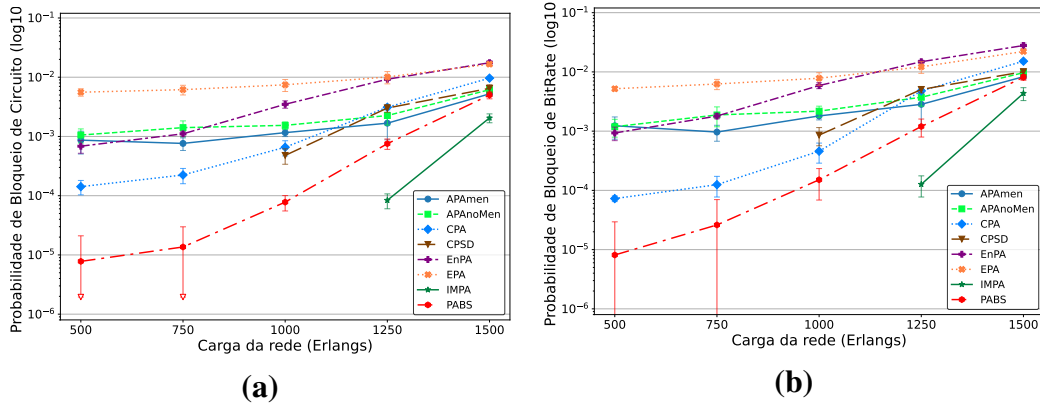


Figura 4. (a) PBC e (b) PBBR na topologia USA.

O ganho do algoritmo IMPA em relação aos demais métodos de atribuição de potência é calculado por $G = \frac{(R_{alg} - R_{IMPA})}{R_{alg}}$, onde R_{alg} é a métrica (PBC ou PBBR) dos algoritmos da literatura e R_{IMPA} a do algoritmo proposto. Nos pontos de carga baixos, a probabilidade de bloqueio do IMPA atingiu valor zero, em ambas as topologias. No último ponto de carga da NSFNet, os ganhos em PBC e PBBR foram, respectivamente: 91,5% e 90% (EnPA); 86% e 81% (EPA); 77% e 74% (CPA); 59,6% e 54% (CPSD); 40% e 35% (APAmem); 33% e 27% (PABS); e 26% e 18% (APAnoMem). Para a topologia USA, no último ponto de carga, o IMPA superou o EnPA em 88,3% (PBC) e 84,4% (PBBR). Em relação aos demais algoritmos nesta topologia, os ganhos em PBC e PBBR foram: 87,6% e 80,3% (EPA); 78,7% e 71,3% (CPA); 68,4% e 56,9% (CPSD); 66,6% e 55,1% (APAnoMem); 60,8% e 47,6% (APAmem); e 58,9% e 46,5% (PABS).

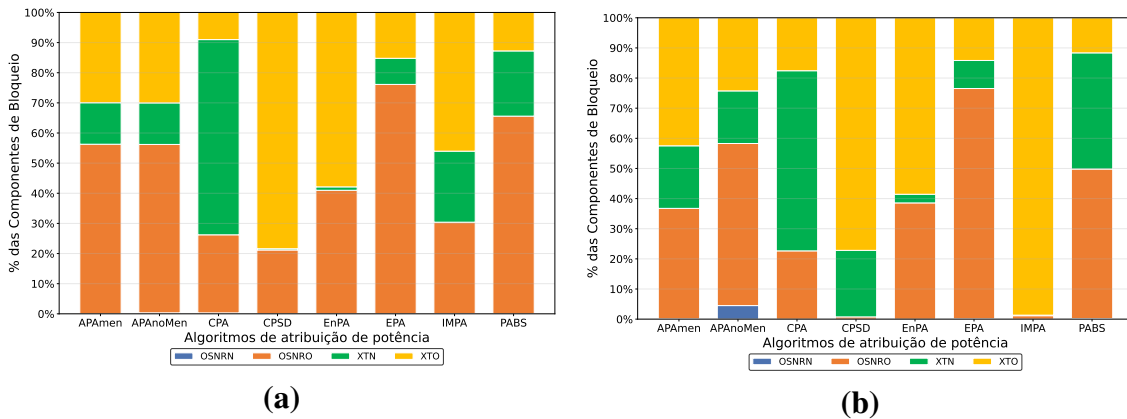


Figura 5. Componentes da PBC obtidas pelos algoritmos de atribuição de potência por circuito para as topologias (a) NSFNet e (b) USA

A Figura 5 mostra a porcentagem das componentes da PBC para cada tipo de bloqueio: OSNRN, OSNRO, XTN e XTO. Esses valores são considerando os últimos pontos de carga para as topologias (a) NSFNet e (b) USA. Os tipos de bloqueios que mais dominaram foram OSNRO e XTO em ambas as topologias. O tipo de bloqueio que mais afetou o desempenho dos algoritmos EnPA, CPSD e IMPA foi o XTO. Já o tipo de bloqueio que mais afetou o desempenho dos algoritmos EPA, PABS, APAmem e APAnoMem foi o OSNRO. A maior causa de bloqueios do algoritmo CPA foi o XTN.

7. Conclusão

Os resultados apresentados na Seção 6 demonstram que a estratégia de atribuição de potência possui impacto direto e significativo na probabilidade de bloqueio em SDMEONS. O algoritmo IMPA, proposto neste trabalho, destacou-se como a melhor abordagem entre os métodos avaliados, alcançando as menores taxas de bloqueio tanto na métrica de PBC quanto na PBBR. Nos três primeiros pontos de carga, o IMPA apresentou bloqueio zero nos cenários avaliados. Nos pontos de carga mais elevadas, o IMPA manteve desempenho superior, obtendo ganhos em relação aos outros algoritmos de no mínimo 18% na topologia NSFNet e 46,5% na topologia USA.

Como trabalhos futuros, propõe-se investigar a aplicação de técnicas de aprendizagem de máquina (*Machine Learning*) para aprimorar o processo de atribuição de potência. Em particular, modelos supervisionados ou baseados em aprendizado por reforço podem ser empregados para prever ajustes ótimos de potência em tempo real, reduzindo significativamente o custo computacional associado às simulações iterativas. Essa abordagem seria especialmente útil para substituir a necessidade de calibração manual dos parâmetros utilizados pelos algoritmos adaptativos analisados neste estudo.

Agradecimentos

Agradecemos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Piauí (FAPEPI) pelo apoio financeiro concedido para a realização desta pesquisa.

Referências

- Fontinele, A., Santos, I., Júnior, J. L., Soares, A., Cartaxo, A., and Campelo, D. (2020). Novo algoritmo para atribuição de potência por circuito em redes Ópticas elásticas. In *Anais do XXXVIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, pages 561–574, Porto Alegre, RS, Brasil. SBC.
- Habibi, M. and Beyranvand, H. (2019). Impairment-aware manycast routing, modulation level, and spectrum assignment in elastic optical networks. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 11(5):179–189.
- Halder, J., Acharya, T., and Bhattacharya, U. (2022). A novel rsca scheme for offline survivable sdm-eon with advance reservation. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 19(2):804–817.
- 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. *Optics Express*, 19:16576–16592.
- Jinno, M., Takara, H., Kozicki, B., Tsukishima, Y., Sone, Y., and Matsuoka, S. (2009). Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: architecture, benefits, and enabling technologies. *IEEE Communications Magazine*, 47(11):66–73.
- Klinkowski, M. and Zalewski, G. (2019). Dynamic crosstalk-aware lightpath provisioning in spectrally-spatially flexible optical networks. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 11(5):213–225.

- Lacerda-Jr, 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*, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Lacerda-Jr, J., Morais, A., Cartaxo, A., and Soares, A. (2024a). Um novo algoritmo para mitigar crosstalk e fragmentação em redes Ópticas elásticas multi-núcleos. In *Anais do XLII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, Niterói, RJ, Brasil.
- Lacerda-Jr, J. C., Cartaxo, A. V., and Soares, A. C. (2024b). Novel dynamic impairment-aware algorithm for modulation, core, and spectrum assignment in SDM-EONs. *Optical Switching and Networking*, 51:100763.
- Liu, H., Xiong, Q., and Chen, Y. (2020). Routing core and spectrum allocation algorithm for inter-core crosstalk and energy efficiency in space division multiplexing elastic optical networks. *IEEE Access*, 8:70453–70464.
- 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.
- Oliveira, H. and Fonseca, N. (2019). Proteção e roteamento multicaminho em redes ópticas elásticas com multiplexação por divisão espacial. *SBC*, pages 487–500.
- Palkopoulou, E., Bosco, G., Carena, A., Klonidis, D., Poggiolini, P., and Tomkos, I. (2013). Nyquist-WDM-based flexible optical networks: Exploring physical layer design parameters. *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, 31(14):2332–2339.
- Poggiolini, P. and Jiang, Y. (2017). Recent advances in the modeling of the impact of nonlinear fiber propagation effects on uncompensated coherent transmission systems. *Journal of Lightwave Technology*, 35(3):458–480.
- Tang, F., Shen, G., and Rouskas, G. N. (2021). Crosstalk-aware shared backup path protection in multi-core fiber elastic optical networks. *J. Lightwave Technol.*, 39(10):3025–3036.
- Tode, H. and Hirota, Y. (2017). Routing, spectrum, and core and/or mode assignment on space-division multiplexing optical networks [invited]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 9(1):A99–A113.
- Vale, V. and Almeida, R. (2019). Power, routing, modulation level and spectrum assignment in all-optical and elastic networks. *Optical Switching and Networking*, 32:14 – 24.
- Vale, V., Almeida, R., and Assis, K. (2022). Network-state-dependent routing and route-dependent spectrum assignment for prmlsa problem in all-optical elastic networks. *Optical Switching and Networking*, 43:100646.
- Yaghubi-Namaad, M., Rahbar, A. G., and Alizadeh, B. (2018). Adaptive modulation and flexible resource allocation in space-division- multiplexed elastic optical networks. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 10(3):240–251.