

Uma Solução para o Problema RMCSA utilizando Ranqueamento em SDM-EONs

João Marcos Rosal

Departamento de Computação
Universidade Federal do Piauí (UFPI)
Teresina, Piauí – Brasil
joaorosal@ufpi.edu.br

Alexandre Fontinele

Departamento de Computação
Universidade Federal do Piauí (UFPI)
Teresina, Piauí – Brasil
alexandre.fontinele@ufpi.edu.br

Selles Araújo

Departamento de Computação
Universidade Federal do Piauí (UFPI)
Teresina, Piauí – Brasil
sellesgustavo@gmail.com

Jurandir Lacerda Júnior

Coordenação de Informática
Instituto Federal do Piauí (IFPI)
Corrente, PI – Brasil
jurandir.cavalcante@ifpi.edu.br

André Soares

Departamento de Computação
Universidade Federal do Piauí (UFPI)
Teresina, Piauí – Brasil
andre.soares@ufpi.edu.br

Resumo—Este artigo propõe o ARMNERA para a solução do problema de seleção de rota, modulação, núcleo e espectro (RMCSA) em redes ópticas elásticas com multiplexação por divisão espacial (SDM-EONs), usando fibras multi-núcleo (MCF). O ARMNERA utiliza uma estratégia de ranqueamento para selecionar a melhor solução para alocação de recursos, buscando o melhor desempenho da rede e a redução da probabilidade de bloqueio. O algoritmo proposto é avaliado em duas topologias de rede reais, NSFNet e COST239, e os resultados demonstram sua eficácia em relação a outros algoritmos da literatura, especialmente em cenários de tráfego intenso. Adicionalmente, o artigo discute trabalhos relacionados na área de alocação de recursos em redes ópticas elásticas e destaca a importância de considerar o crosstalk (interferência entre núcleos) na seleção de alternativas de roteamento, modulação, núcleo e espectro.

Index Terms—Redes ópticas elásticas, roteamento, alocação de espectro, multiplexação por divisão espacial, crosstalk.

I. INTRODUÇÃO

O aumento do número de usuários, serviços e aplicações *online* tem gerado um crescimento significativo do tráfego de dados na Internet [1]. Para lidar com tal crescimento, as redes ópticas elásticas com multiplexação por divisão espacial (SDM-EONs – *Space-Division Multiplexed Elastic Optical Networks*) tem sido uma candidata promissora devido sua capacidade de atender demandas de diferentes taxas de *bits* de forma eficiente comparada às redes tradicionais [2]. Além disso, essas redes utilizam fibras ópticas multi-núcleo, aumentando a quantidade de recursos em ordem do número de núcleos da fibra.

A busca por uma rota, modulação, núcleo e faixa de espectro para o estabelecimento de um circuito óptico corresponde ao problema de roteamento, seleção de modulação, escolha de núcleo e alocação de espectro (RMCSA – *Routing, Modulation, Core, and Spectrum Assignment*) [3], [4]. O problema RMCSA consiste em: *i*) definição de uma rota (origem e destino) para um par de nós; *ii*) seleção de modulação adequada para esta rota; *iii*) escolha de núcleo e *iv*) alocação

de uma faixa de espectro livre (conjunto de *slots* contínuos e contíguos) na rota definida.

Embora as redes SDM-EONs ofereçam mais recursos para alocação, elas também apresentam problemas na camada física. Um desses problemas é o *crosstalk* (XT), um fenômeno que ocorre quando sinais de diferentes canais interferem uns com os outros, ou seja, quando *slots* de mesma frequência são alocados em núcleos adjacentes entre si [5]. A distância entre os núcleos interfere diretamente no *crosstalk*, onde menores distâncias causarão mais *crosstalk* [6].

Este artigo aborda o problema da seleção de soluções alternativas RMCSA em SDM-EONs, visando obter ganhos em propostas já validadas pela literatura. Embora muitos trabalhos da literatura tenham se concentrado em estratégias de roteamento como Dijkstra [7] ou o algoritmo KSP (K-Shortest Path) [8], eles não levam em conta a influência da estratégia de roteamento na formação de gargalos na rede. Essa limitação pode levar a uma utilização ineficiente dos recursos da rede e a uma redução na qualidade do serviço.

Neste trabalho, propomos uma adição ao KSP, que aliado com estratégias de alocação de núcleo e espectro, seleciona um conjunto de rotas alternativas da rede, bem como núcleo e espectro de forma eficiente que por si tem objetivo de otimizar a disponibilidade de espectro e reduzir a taxa de *Crosstalk* na rede. A proposta, chamada de Algoritmo de Roteamento, Modulação, Núcleo e Espectro com Ranqueamento Adaptativo (ARMNERA), adiciona aos métodos de seleção de alternativa para alocação de recursos da rede uma metodologia de ranqueamento de alternativas, que tem por objetivo otimizar a escolha das soluções encontradas pelos algoritmos KSP e CSA (*Core and Spectrum Assingment*) utilizados. A proposta busca otimizar as soluções encontradas e diminuir impacto do *Crosstalk* no bloqueio das solicitações de conexões que chegam à uma rede. Foi realizado um estudo de avaliação de desempenho que comprovou a eficácia do ARMNERA, em relação a outros trabalhos da literatura, em termos de

probabilidade de bloqueio nas topologias NSFNet e Cost239.

As demais seções deste artigo estão organizadas da seguinte forma. A Seção II apresenta o problema de RMCSA em redes SDM-EONs. A Seção III discute os trabalhos relacionados. O algoritmo proposto é apresentado na Seção IV. A Seção V apresenta a avaliação de desempenho dos algoritmos RMCSA. Por fim, as conclusões e trabalhos futuros são apresentados na Seção VII.

II. PROBLEMA ABORDADO

Recentemente, vários trabalhos têm se concentrado no problema RMCSA e suas variações em SDM-EONs. O objetivo desses estudos é alocar recursos de maneira eficaz, de forma a assegurar que a rede atenda ao máximo de solicitações de conexões possíveis. O problema RMCSA consiste nas seguintes etapas principais [3], [4]:

- 1) Definição da rota (Roteamento): Encontrar o caminho de menor custo entre os nós de origem e destino para uma determinada solicitação de conexão;
- 2) Seleção da modulação: Determinar o formato de modulação adequado para a rota, levando em consideração a capacidade de transmissão e a qualidade de sinal necessária para evitar degradações, como interferências e perdas de sinal;
- 3) Escolha do núcleo: As fibras ópticas multi-núcleo têm múltiplos núcleos que podem transmitir dados simultaneamente. O problema envolve escolher qual núcleo da fibra será utilizado para a transmissão, levando em conta o *crossstalk* (interferência entre núcleos adjacentes) que pode prejudicar a qualidade da transmissão (QoT – *Quality of Transmission*);
- 4) Alocação de espectro: Identificar uma faixa de espectro (conjunto de *slots* contínuos e contíguos) que esteja disponível e possa ser usada para a transmissão de dados no núcleo e rota escolhidos.

As pesquisas que abordam o problema RMCSA, geralmente, empregam algoritmos de caminhos mais curtos para o roteamento, seja o algoritmo SPF (*Shortest Path First*) tradicional [7] ou o algoritmo KSP [8]. Dependendo do estudo, o KSP considera o caminho mais curto como aquele que possui o menor número de saltos (KSPh - KSP hops) ou considera o comprimento de cada enlace (KSPd - KSP distance). A distribuição irregular de *slots* livres ao longo da rota pode levar à fragmentação de espectro, dificultando a alocação eficiente de novas conexões (circuitos ópticos). Reduzir a fragmentação de espectro é fundamental para evitar o bloqueio de novas solicitações de conexões.

III. TRABALHOS RELACIONADOS

Nesta seção, são discutidos trabalhos relevantes da literatura que abordam o problema de alocação de recursos em redes ópticas elásticas, incluindo roteamento, modulação, seleção de núcleo e espectro.

Em [9] é proposto um método heurístico para resolução do problema RMCSA. O trabalho define uma ordem de prioridade para os núcleos de cada fibra multi-núcleo, baseado na sua

posição relativa ao centro da fibra e na sua distância ao núcleo mais próximo. É usado um algoritmo de caminho mais curto para encontrar a rota ótima entre a origem e o destino da demanda, considerando o número de saltos, a largura de banda disponível e o formato de modulação mais adequado para cada segmento da rota. Para alocação espectral é utilizado o algoritmo *First Fit*.

Os autores em [10] usam KSP associado à duas estratégias de roteamento: roteamento de caminho mais curto (SPR – *Shortest Path Routing*) e roteamento de caminho mais longo (LPR – *Longest Path Routing*). O trabalho também usa uma função de pontuação que considera o nível de *crossstalk* e a taxa de ocupação do espectro para selecionar o menor caminho, núcleo e faixa do espectro para cada solicitação de conexão. O algoritmo tenta maximizar a pontuação total do caminho, considerando o *crossstalk* e a fragmentação. O algoritmo também usa a troca de núcleo para reduzir o *crossstalk* e aumentar a utilização do espectro. O algoritmo é baseado em um modelo de programação linear inteira mista (MILP – *Mixed-Integer Linear Programming*) que minimiza o número de *slots* de frequência usados.

Já em [11] é proposto um método de seleção de rota e núcleo dependente do estado da rede, usando um método de tomada de decisão multi-atributo baseado nos métodos AHP (*Analytic Hierarchy Process*) e PROMETHEE (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*). A estratégia de roteamento utilizada pelo artigo é baseada em um método de tomada de decisão multi-atributo que considera critérios, como o comprimento da rota, o número de saltos, a disponibilidade de espectro, a interferência entre núcleos, o consumo de energia e a qualidade de transmissão. O método visa maximizar a utilização dos recursos da rede e minimizar o bloqueio e a fragmentação, calculando os pesos dos critérios e classificando as rotas e núcleos candidatos.

Em seu trabalho, [12] usa um método cooperativo de seleção de rota e formato de modulação, baseado no número de *slots* de frequência (FSs) requeridos pela solicitação de conexão. Ele prefere o caminho colaborativo com o menor número de FSs, que minimiza o efeito de *crossstalk* na rede. O artigo quantifica o efeito de *crossstalk* dos recursos de espectro na rede, considerando o número de núcleos ativos nas mesmas porções de espectro dos núcleos adjacentes. Ele constrói um grafo auxiliar do efeito de *crossstalk* na rede, que revela a relação entre o efeito de *crossstalk* e o sucesso do estabelecimento de *lightpaths*.

Os autores em [13] propõem um modelo de programação linear inteira mista para resolver o problema de roteamento, seleção de nível de modulação e alocação de espectro em redes ópticas elásticas, buscando reduzir o bloqueio de conexões e melhorar a utilização dos recursos da rede.

Em [14], é proposto um algoritmo de roteamento e alocação de espectro (RSA – *Routing and Spectrum Allocation*) online para redes ópticas elásticas flexíveis em espectro, considerando a continuidade de espectro e a contiguidade de *slots*, com o objetivo de reduzir a taxa de bloqueio e melhorar a utilização de espectro.

Em seu trabalho, [15] propõe duas abordagens para resolver o problema de roteamento, modulação, alocação de núcleo e espectro em SDM-EONs. Os algoritmos propostos, o algoritmo de atribuição de recursos tridentais (TRA – *Trident Resource Assignment*) e o algoritmo de alocação de recursos baseado em evitação de desperdício de espectro (SWARM – *Spectrum Wastage Avoidance-based Resource Allocation*), utilizam estratégias de roteamento que consideram a largura de banda, o *crossstalk* e o comprimento do caminho. Além disso, o trabalho propõe otimizações *offline*, como a otimização de limiar auxiliada por aprendizado de máquina (ML – *Machine Learning*) e a seleção de caminho prioritário baseada em programação linear inteira (PPS – *Priority Path Selection*), para melhorar ainda mais o desempenho do roteamento.

Conforme apresentado na Tabela I, diversos trabalhos da literatura utilizam o KSP. De maneira geral, o KSP fornece um conjunto de rotas alternativas e posteriormente a escolha dentre uma destas rotas é influenciada por uma política de acordo com o propósito de cada trabalho. Assim como esses trabalhos, o algoritmo proposto também utiliza o KSP para fornecer as rotas alternativas. Entretanto, são utilizados múltiplos critérios na busca de encontrar a melhor solução balanceando a alocação de recursos da rede.

Os trabalhos mencionados demonstram o crescente interesse na área de alocação de recursos em SDM-EONs. As pesquisas têm explorado diferentes abordagens para lidar com os desafios de RMCSA, buscando melhorar o desempenho da rede e mitigar o impacto do *crossstalk*. No entanto, a maioria dos trabalhos existentes não oferece uma solução completa e eficiente para a seleção de alternativas RMCSA, levando em consideração múltiplos critérios de otimização e restrições de qualidade de transmissão. Além disso, a influência da estratégia de roteamento na formação de gargalos na rede e a necessidade de balanceamento de carga não são abordadas de forma abrangente.

Neste contexto, a proposta ARMNERA se destaca por oferecer uma solução completa e flexível para o problema RMCSA. Ao combinar k menores caminhos, diferentes formatos de modulação, algoritmos de alocação de núcleo e espectro, e estratégias de ranqueamento adaptativo, o ARMNERA busca otimizar o desempenho da rede, levando em consideração o *crossstalk*, a utilização de recursos, a fragmentação do espectro e a qualidade de transmissão. Adicionalmente, a proposta considera a formação de gargalos na rede e busca balancear a carga entre os enlaces, o que pode contribuir para um melhor aproveitamento dos recursos e um aumento da capacidade da rede.

IV. ALGORITMO PROPOSTO

O presente trabalho propõe o ARMNERA (Algoritmo de Roteamento, Modulação, Núcleo e Espectro com Ranqueamento Adaptativo), um algoritmo que visa otimizar a alocação de recursos em SDM-EONs. O ARMNERA busca encontrar a melhor solução de roteamento, modulação, núcleo e espectro para cada solicitação de conexão, considerando múltiplos critérios de otimização e restrições de QoT.

O processo para a busca de uma solução pelo ARMNERA inicia com a chegada de uma nova solicitação de conexão, que especifica a origem, o destino e a demanda de tráfego. O algoritmo proposto utiliza o KSP para encontrar os K menores caminhos entre os nós de origem e destino da conexão. Em seguida, para cada um dos K caminhos encontrados, são determinadas as possíveis combinações de modulação, núcleo e espectro que atendem à demanda de tráfego da solicitação. Para cada combinação de rota, modulação, núcleo e espectro, é aplicado o algoritmo de alocação de núcleo e espectro ABNE (Algoritmo de Balanceamento Inter-Núcleos), que busca reduzir o *crossstalk* e garantir a QoT da conexão, balanceando a alocação de recursos entre os núcleos [16].

Após a aplicação do algoritmo ABNE, são obtidas diversas soluções RMCSA candidatas, cada uma representando uma combinação de rota, modulação, núcleo e espectro. Essas soluções são então ranqueadas de acordo com três critérios: utilização de *slots* (RU), fragmentação do espectro (RF) e *crossstalk* (RXT). A Figura 1 ilustra o funcionamento do algoritmo quando ele está montando as soluções e aplicando o ranqueamento.

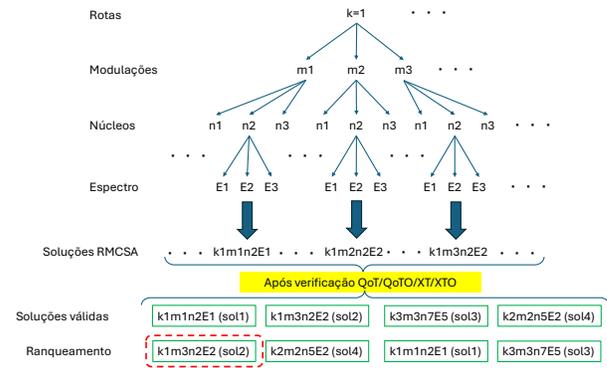


Figura 1. Demonstração das soluções possíveis e ranqueamento.

Observa-se pela Figura 1 que apenas as soluções que atendem os critérios de QoT são selecionadas como soluções válidas. Somente as soluções válidas são submetidas ao ranqueamento. Finalmente, a solução RMCSA com a melhor classificação, de acordo com o critério de ranqueamento escolhido, é selecionada para estabelecer a conexão. Caso nenhuma solução atenda aos requisitos de QoT, a solicitação é bloqueada.

Para realizar o ranqueamento é atribuído um custo para cada solução RMCSA. A Equação 1 é a fórmula que computa o custo que é atribuído para cada solução RMCSA. α_1 , α_2 e α_3 são pesos que ajustam a importância dos critérios selecionados para o ranqueamento. Os valores de α_1 , α_2 e α_3 são normalizados e a soma deles deve ser igual a 1 (um). Depois que é atribuído um custo para cada solução válida, as soluções são ranqueadas em ordem crescente de custo. A solução válida com o menor custo é selecionada para estabelecer a solicitação de conexão.

$$Custo = \alpha_1 * RU + \alpha_2 * RXT + \alpha_3 * RF \quad (1)$$

Tabela I
COMPARAÇÃO ENTRE TRABALHOS PARA SDM-EONS.

Referência	Criação de Rotas	Ranqueamento Alternativas?	Métricas
[13]	Não informado	Sim	Bloqueio de conexões, Utilização da rede
[14]	Não informado	Sim	Taxa de cloqueio, Utilização do espectro
[9]	DJK	Não	Crosstalk
[12]	KSP	Não	Crosstalk
[15]	KSP	Não	Crosstalk
[10]	KSP	Sim	Crosstalk, Fragmentação
[11]	KSP	Sim	Crosstalk, Consumo energético e Fragmentação
Este trabalho	KSP	Sim	Crosstalk, Utilização de espectro e Fragmentação

O ARMNERA utiliza uma abordagem que combina: i) K menores caminhos (KSP) para a seleção de rotas; ii) Um algoritmo de alocação de núcleos e espectro (ABNE) para balancear a carga entre os núcleos e minimizar o *crosstalk*; iii) Ranqueamento adaptativo para classificar as soluções de RMCSA com base em múltiplos critérios. Essa proposta oferece uma abordagem flexível e eficiente para a alocação de recursos em SDM-EONS, permitindo a otimização do desempenho da rede de acordo com diferentes critérios e restrições.

A combinação de K menores caminhos, diferentes formatos de modulação e algoritmos de alocação de núcleo e espectro, juntamente com estratégias de ranqueamento, permite encontrar a melhor solução para cada solicitação de conexão, maximizando a eficiência da rede e garantindo a qualidade da transmissão. O ARMNERA tem o potencial de: i) Minimizar o bloqueio de conexões: aumentando a flexibilidade e a capacidade de adaptação da rede a diferentes demandas de tráfego; ii) Melhorar a qualidade da transmissão: através da mitigação do *crosstalk* e da escolha adequada do formato de modulação; iii) Reduzir o consumo de energia: otimizando a alocação de recursos e evitando o uso desnecessário de componentes de rede; iv) Aumentar a escalabilidade da rede: permitindo a adição de novos núcleos e a adaptação da rede a diferentes cenários de tráfego.

V. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Para a avaliação de desempenho, foram realizadas simulações computacionais através da ferramenta SNetS (*Slice Networks Simulator*) [17], [18] com diferentes cargas de tráfego de dados. A carga de tráfego segue o processo de *Poisson* e é distribuída uniformemente entre todos os pares de nós origem-destino na rede, definida por $\rho = \lambda/\mu$ e medida em *Erlangs*. A componente λ corresponde à taxa de chegada entre requisições enquanto o parâmetro μ representa a taxa de atendimento da rede.

Para cada simulação computacional foram geradas 100.000 requisições de circuitos com larguras de banda de 100, 200, 300, 400 e 500 Gbps, seguindo as seguintes proporções: 5, 4, 3, 2, 1, respectivamente. Além disso, foram realizadas 10 replicações com diferentes sementes de geração de variável aleatória e com intervalo de confiança de 95%.

Considerou-se duas topologias de rede reais: NSFNET e COST239 [19]. As topologias NSFNet (*National Science Foundation Network*) e Cost239 são apresentadas na Figura

2. Os enlaces da rede são bidirecionais e compostos por 7 núcleos, dispostos em 6 núcleos circundando um núcleo central. Cada núcleo possui seu espectro óptico independente com tamanho de 4000 GHz, decompostos em 320 *slots* de 12,5 GHz. Foi utilizada banda de guarda de 1 *slot* para diminuir a interferências entre os circuitos ativos adjacentes.

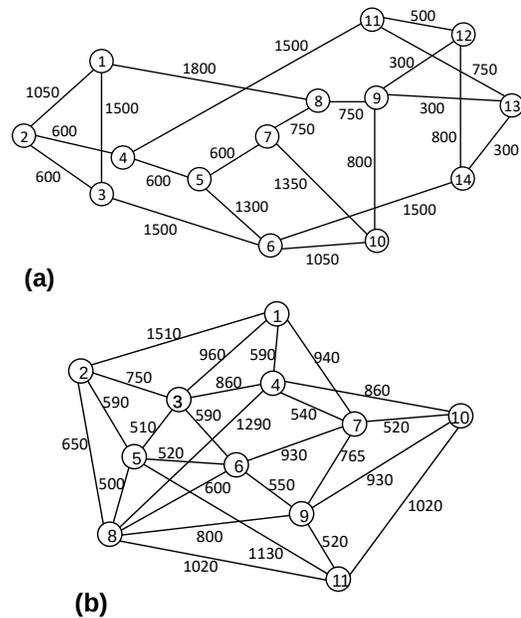


Figura 2. Topologias consideradas no estudo: (a) NSFNet e (b) Cost239. O número em cada enlace corresponde a distância em km.

Além disso, foram adotadas as modulações 4QAM, 8QAM, 16QAM, 32QAM, 64QAM, com limiares de OSNR de 8,95dB, 13,15dB, 15,49dB, 18,51dB, 21,28dB, e limiares de *crosstalk* de -19,03dB, -23,23dB, -25,57dB, -28,59dB e -31,36dB, respectivamente [18]. Os limiares de OSNR para as modulações foram calculados para atingir um pré FEC-BER $1,3 \cdot 10^{-2}$ e incluem um *overhead* de 25% para o FEC [18].

Com relação ao modelo de camada física adotada, foram levados em conta os efeitos não-lineares *Self-Phase Modulation* (SPM), *Cross-Phase Modulation* (XPM) e *Four-Wave Mixing* (FWM) [17]. Além dos não-lineares, também levou-se em conta o *crosstalk* inter-núcleo, como já mencionado, e o ruído *Amplified Spontaneous Emission* (ASE), inserido pelos amplificadores *Erbium Doped Fiber Amplifier* (EDFA) [17], também utilizado no cenário considerado. Vale ressaltar que

os ganhos dos amplificadores são ajustados para compensar as perdas dos dispositivos ópticos e das fibras. Outros parâmetros utilizados nas simulações estão listados na Tabela II e mais informações sobre a camada física podem ser encontradas em [18], [20].

Tabela II
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)	$1,3 (W \cdot km)^{-1}$
Coefficiente de acoplamento de potência (h_c)	$6,4 \cdot 10^{-9} m^{-1}$

A seguir, serão apresentados os resultados numéricos da métrica de probabilidade de bloqueio de circuitos (PB), comparando o desempenho do algoritmo proposto (ARMNERA) com outros trabalhos apresentados na literatura. Todos os algoritmos analisados utilizam K igual a 3 para o KSP.

A Figura 3 apresenta a PB em função da carga de tráfego na rede (em *Erlangs*) para diferentes algoritmos de RMCSA na topologia NSFNet. Observa-se pela Figura 3 que o ARMNERA alcançou o melhor desempenho em termos de PB em comparação com os outros algoritmos na topologia NSFNet. As estratégias de RMCSA que não consideram o balanceamento de carga entre os núcleos da fibra, como o CPFF (*Core Prioritization + First Fit*) e RCFF (*Random Core + First Fit*), apresentam as maiores PB em todas as cargas de tráfego testadas. Isso ocorre porque essas estratégias não levam em conta o *crossstalk* na alocação de recursos, o que pode levar a um desbalanceamento na utilização dos núcleos e, consequentemente, a um aumento da PB. Por outro lado, o algoritmo KSP + ABNE, que utiliza o algoritmo de balanceamento entre núcleos ABNE, apresenta um desempenho superior em relação às estratégias CPFF e RCFF, especialmente em cargas de tráfego mais elevadas. Isso evidencia a importância de considerar o *crossstalk* na alocação de recursos em redes SDMEONs, a fim de minimizar a interferência entre os sinais transmitidos em diferentes núcleos e, assim, reduzir a PB.

A Figura 4 apresenta a PB em função da carga de tráfego na rede (em *Erlangs*) para diferentes algoritmos de RMCSA na topologia Cost239. Observa-se pela Figura 4 que o ARMNERA também alcançou o melhor desempenho em termos de PB em comparação com os outros algoritmos na topologia Cost239. Comparando as estratégias que utilizam o algoritmo ABNE, nota-se que a utilização do ranqueamento do ARMNERA (com diferentes pesos para os critérios de utilização de recursos, fragmentação e *crossstalk*) resulta em uma melhora significativa na PB em relação à utilização somente do ABNE, especialmente em carga de tráfego mais elevadas. Isso sugere que, mesmo em cenários de alta incidência de *crossstalk*, a seleção de alternativas entre as disponíveis, considerando múltiplos critérios de otimização, pode ser mais eficiente do que simplesmente balancear a carga entre núcleos. Em relação

às estratégias CPFF e RCFF, observa-se que o ABNE e as variações de ARMNERA apresentam um desempenho muito superior em todas as cargas testadas. A partir de 1500 *Erlangs*, a diferença na PB entre essas estratégias e as demais é de mais de uma ordem de grandeza, evidenciando a importância de considerar o balanceamento de carga entre os núcleos e a seleção da melhor alternativa de roteamento, modulação e espectro, mesmo em condições de alta incidência de *crossstalk*.

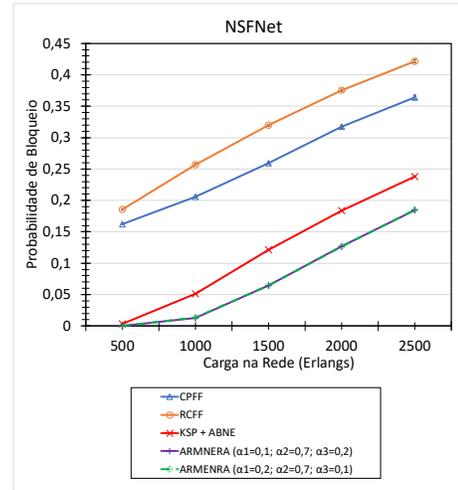


Figura 3. Probabilidade de bloqueio na topologia NSFNet.

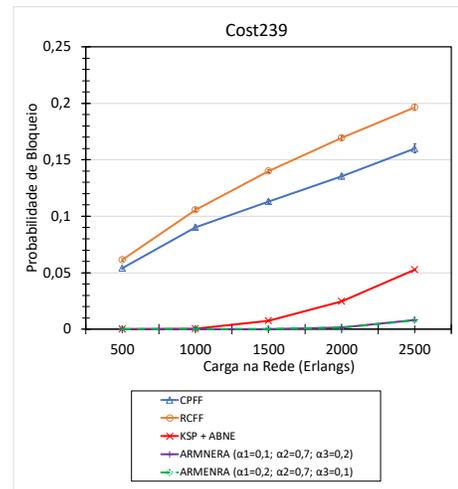


Figura 4. Probabilidade de bloqueio na topologia Cost239.

A Tabela III sintetiza as reduções na PB alcançadas pelo ARMNERA em relação aos outros algoritmos comparados em cada topologia. Os valores de redução na PB exibidos na Tabela III correspondem aos valores obtidos para a última carga (2500 *Erlangs*) testada em ambas as topologias. Em outros pontos de carga o ARMNERA apresenta redução de PB ainda maior. O ARMNERA alcançou uma redução máxima de 99,96% na NSFNet e 100% na Cost239.

Observa-se pela Tabela III que na topologia NSFNet o ARMNERA alcançou uma redução na PB de 56,35%, 49,45%

e 22,73% em relação à PB do RCFF, CPFF e ABNE, respectivamente. Na topologia Cost239, o ARMNERA reduziu a PB em 95,93%, 95,00% e 84,81% em relação à PB do RCFF, CPFF e ABNE, respectivamente. Esses resultados mostram que o ARMNERA alcançou uma redução na PB significativa em relação a PB dos outros algoritmos considerados neste estudo.

Tabela III
REDUÇÃO NA PB ALCANÇADA PELO ARMNERA EM RELAÇÃO À PB DOS ALGORITMOS COMPARADOS.

Topologia	RCFF	CPFF	ABNE
NSFNet	56,35%	49,45%	22,73%
Cost239	95,93%	95,00%	84,81%

VI. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Piauí (FAPEPI), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), processos nº. 88887.918434/2023-00 e no. 88887.831790/2023-00.

VII. CONCLUSÃO

Este trabalho propõe o ARMNERA, um algoritmo que encontra uma solução para o problema RMCSA em SDM-EONS utilizando uma estratégia de ranqueamento para a alocação dos recursos. A estratégia utilizada pelo ARMNERA busca otimizar o desempenho da rede e minimizar a probabilidade de bloqueio.

Foi conduzida uma avaliação de desempenho comparando a proposta com outros algoritmos apresentados na literatura nas topologias NSFNet e Cost239. Os resultados mostraram que o algoritmo proposto alcançou o melhor desempenho em termos de probabilidade de bloqueio em comparação aos outros algoritmos em ambas as topologias consideradas no estudo. Na topologia NSFNet, o algoritmo ARMNERA reduziu a probabilidade de bloqueio em 56,35% em relação ao algoritmo RCFF, 49,45% em relação ao CPFF e 22,73% em relação ao ABNE. Na topologia Cost239, o algoritmo ARMNERA reduziu a probabilidade de bloqueio em 95,93% em comparação ao RCFF, 95,00% em relação ao CPFF e 84,81% se comparado ao ABNE.

Como trabalhos futuros, pretende-se investigar a aplicação do ARMNERA em redes de maior porte (com mais nós) e com diferentes configurações de tráfego. Além de explorar a combinação de outras métricas de desempenho, como o consumo de energia, no processo de ranqueamento das soluções. Também se pretende investigar a possibilidade de utilizar técnicas de aprendizado de máquina para melhorar o ajuste da função de custo aplicada no algoritmo proposto.

REFERÊNCIAS

[1] CISCO, “Cisco annual internet report (2018–2023),” 2021.
[2] O. Gerstel, M. Jinno, A. Lord, and S. B. Yoo, “Elastic optical networking: A new dawn for the optical layer?,” *IEEE communications Magazine*, vol. 50, no. 2, pp. s12–s20, 2012.

[3] Í. Brasileiro, L. Costa, and A. Drummond, “A survey on challenges of spatial division multiplexing enabled elastic optical networks,” *Optical Switching and Networking*, vol. 38, p. 100584, 2020.
[4] S. Trindade and N. L. da Fonseca, “Core and spectrum allocation for avoidance of spectrum fragmentation in eon-sdm,” in *ICC 2020-2020 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 1–6, IEEE, 2020.
[5] P. E. Araujo, J. C. Lacerda Jr, and A. C. Soares, “Um novo algoritmo de balanceamento espectral entre grupos de núcleos para redes ópticas elásticas com multiplexação por divisao espacial,” in *Anais do XXXIX Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, pp. 742–755, SBC, 2021.
[6] J. C. Lacerda Jr, A. V. Cartaxo, and A. C. Soares, “Um novo algoritmo ciente de crosstalk para alocação de núcleo e espectro em redes ópticas elásticas multi-núcleos,” in *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBR)*, pp. 728–741, SBC, 2021.
[7] E. Dijkstra, “A note on two problems in connexion with graphs,” *Numerische Mathematik*, vol. 1, pp. 269–271, 1959.
[8] J. Y. Yen, “Finding the k shortest loopless paths in a network,” *Management Science*, vol. 17, no. 11, pp. 712–716, 1971.
[9] Y. Seki, Y. Tanigawa, Y. Hirota, and H. Tode, “Core and spectrum allocation to achieve graceful degradation of inter-core crosstalk with generalized hierarchical core prioritization on space-division multiplexing elastic optical networks,” *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 15, no. 1, pp. 43–56, 2022.
[10] J. L. Ravipudi and M. Brandt-Pearce, “A score function heuristic for crosstalk-and fragmentation-aware dynamic routing, modulation, core, and spectrum allocation in sdm-eons,” in *2022 IEEE Future Networks World Forum (FNWF)*, pp. 83–87, IEEE, 2022.
[11] J. L. Ravipudi and M. Brandt-Pearce, “Impairment-and fragmentation-aware, energy-efficient dynamic rmsca for sdm-eons,” *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 15, no. 9, pp. D10–D22, 2023.
[12] J. Zhang, Q. Yao, B. Bao, D. Ren, J. Hu, H. Yang, and J. Zhao, “Resource-oriented rmsca scheme with low crosstalk effect in multi-core fiber-based elastic optical networks,” *Optical Fiber Technology*, vol. 68, p. 102796, 2022.
[13] M. Klinkowski, K. Walkowiak, and M. Pióro, “Dynamic routing, modulation level and spectrum allocation in elastic optical networks using milp,” in *2012 14th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, pp. 1–4, 2012.
[14] Y. Yin, Z. Zhu, and S. J. B. Yoo, “Routing and spectrum assignment in spectrum-flexible elastic optical networks,” in *Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)*, pp. 1–3, 2011.
[15] S. Petale and S. Subramaniam, “Advanced resource allocation strategies for mcf-based sdm-eons: Crosstalk aware and machine learning assisted algorithms,” in *2023 23rd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, pp. 1–4, IEEE, 2023.
[16] J. C. L. Júnior, A. C. Fontinele, I. G. de Sousa Santos, E. M. Leão, D. R. de Sousa Campelo, J. A. S. Monteiro, and A. C. B. Soares, “Algoritmo de balanceamento inter-núcleos para redes ópticas elásticas com multiplexação por divisao espacial,” in *Anais do XXXVIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, pp. 519–532, SBC, 2020.
[17] A. Fontinele, I. Santos, J. N. Neto, D. R. Campelo, and A. Soares, “An efficient IA-RMLSA algorithm for transparent elastic optical networks,” *Computer Networks*, vol. 118, no. Supplement C, pp. 1 – 14, 2017.
[18] J. C. Lacerda, A. V. Cartaxo, and A. C. Soares, “Novel dynamic impairment-aware algorithm for modulation, core, and spectrum assignment in sdm-eons,” *Optical Switching and Networking*, vol. 51, p. 100763, 2024.
[19] Y. Zhao, L. Hu, R. Zhu, X. Yu, X. Wang, and J. Zhang, “Crosstalk-aware spectrum defragmentation based on spectrum compactness in space division multiplexing enabled elastic optical networks with multicore fiber,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 15346–15355, 2018.
[20] F. R. Lobato, A. Jacob, J. Rodrigues, A. V. Cartaxo, and J. Costa, “Inter-core crosstalk aware greedy algorithm for spectrum and core assignment in space division multiplexed elastic optical networks,” *Optical Switching and Networking*, vol. 33, pp. 61–73, 2019.