

Abordagem Multi-Política para Roteamento, Modulação e Alocação Dinâmica de Núcleo e Espectro em SDM-EONs

Ramon Alves Oliveira¹, Denis Rosário¹, Eduardo Cerqueira¹, Helder Oliveira²

¹Universidade Federal do Pará (UFPA) - Belém, PA, Brasil

²Universidade Federal do ABC (UFABC) – Santo André, SP, Brasil

ramonoliveira@icen.ufpa.br, {denis, cerqueira}@ufpa.br,

helder.oliveira@ufabc.edu

Abstract. *New applications that demand faster and more flexible connections drive the growth in internet traffic and push the limits of the current generation optical network architecture. In this scenario, Space Division Multiplexing Elastic Optical Networks (SDM-EONs) emerge as a promising candidate to replace and improve the current architecture, as their finer granularity allows for greater capacity and higher transmission rates. In this article, we propose three core and spectrum allocation policies for SDM-EONs to address bandwidth blocking, fragmentation and intercore crosstalk. Simulation results showed that the proposed approaches outperformed existing methods in the metrics tested for broad load intervals.*

Resumo. *Novas aplicações que demandam conexões mais rápidas e flexíveis impulsionam o crescimento de tráfego de internet e testam os limites da arquitetura atual de redes ópticas. Neste contexto, redes ópticas elásticas com multiplexação por divisão espacial (SDM-EONs) tornam-se candidatas importantes para substituir e aprimorar o padrão atual, uma vez que oferecem granularidade mais fina, maior capacidade e maiores taxas de transmissão. Neste artigo são propostas três políticas de alocação de núcleo e espectro em SDM-EONs que lançam mão de estratégias dinâmicas de atraso de ativação de núcleo, alocação bidirecional e evitação de áreas sombreadas para otimizar e equilibrar o bloqueio, fragmentação e o crosstalk da rede. Os resultados das simulações feitas indicam que as abordagens propostas conseguem melhor desempenho nas métricas testadas em grandes intervalos de carga.*

1. Introdução

A arquitetura atual das redes ópticas se apoia fortemente na Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda (*Wavelength-Division Multiplexing*, WDM) para alocação de frequência. No entanto, WDM apresenta uma importante limitação por empregar comprimentos de onda em intervalos grandes (sobre-provisionamento) e de tamanho fixo [Paradisi et al. 2019], o que impacta fortemente em quão eficientemente pode-se alocar recursos. Estratégias como *traffic grooming* foram implementadas para mitigar o problema, mas apenas sucederam em aliviá-lo, dada a granularidade larga [Naik et al. 2020].

Neste contexto as Redes Ópticas Elásticas (*Elastic Optical Networks*, EONs) surgem para solucionar o problema de granularidade das WDM, pois permitem uma malha

muito mais fina, com *slots* mais estreitos (convenciona-se usar 12.5 GHz de capacidade) [López et al. 2016]. Este aprimoramento da atribuição de espectro reduz o desperdício, dado que o espectro pode ser modelado finamente para uma determinada requisição. Multiplexação por Divisão Espacial (*Space Division Multiplexing*), por sua vez, adiciona múltiplos canais espaciais para transmissão de dados (neste estudo, implementados com a introdução de fibras multinucleadas (*Multi-Core Fibers*, MCFs), o que resulta em significativo aumento da capacidade de transmissão da rede.

Apesar dos seus benefícios, não são triviais as desvantagens das SDM-EONs, pois a granularidade fina e os núcleos extras introduzem novos fatores de degradação durante o processo de alocação, ao exemplo de *crosstalk* e fragmentação. Estes representam respectivamente a interferência entre *slots* de frequência alocados que partilham a mesma posição em núcleos adjacentes e o espalhamento de *slots* de frequência livres entre *slots* alocados de forma a criar regiões livres não contínuas, o que reduz o potencial de alocação da rede. Também é imperativo considerar o caminho que deve ser percorrido, além do formato de modulação com maior taxa de bits-por-símbolo, onde figuram entre os fatores limitantes a distância física, disponibilidade de espectro e as restrições de continuidade e contiguidade. O mau gerenciamento de qualquer um destes fatores pode degradar o desempenho da rede.

Ademais, as estratégias desenvolvidas para lidar com WDM não podem ser transpostas para SDM-EONs de maneira a explorar completamente seus benefícios, nem servem para mitigar suas principais desvantagens. Roteamento, Modulação, Alocação de Núcleo e Espectro (*Routing, Modulation, Spectrum and Core Allocation* - RMSCA) é a designação comum para os problemas de rede supramencionados que governam o gerenciamento de redes do tipo SDM-EON. A pesquisa em SDM-EONs que lida com este conjunto de problemas tornou-se um campo de investigação ativo nos anos recentes e posiciona esta tecnologia como uma promissora candidata para suprir as demandas futuras de banda [Dixit et al. 2021].

Alocação de núcleo e espectro em SDM-EONs requer a atribuição de *slots* de espectro ao longo do espectro livre e em diversos núcleos, o que se convencionou modelar como uma malha fina, ou matriz bidimensional onde as chamadas devem ocupar uma região contínua a ser posicionada no espectro disponível da forma mais eficiente. As chamadas ocorrem ao longo do tempo e são de duração finita, e cenários realistas tornam imprescindível a alocação dinâmica de recursos que levam em conta o preenchimento e esvaziamento do espectro de formas muito imprevisíveis.

Neste artigo são propostas três políticas originais de alocação dinâmica de espectro em SDM-EONs: MeenyMinyMo, MeenyFirst e Shadowless. As políticas propostas buscam reduzir de forma equilibrada a taxa de bloqueio de banda (BBR), *crosstalk* por *slot* (CpS) e fragmentação, de forma a minimizar o bloqueio de chamadas na rede sem deteriorar outros aspectos da alocação. As políticas propostas lançam mão do atraso de ativação dos núcleos da fibra, alocação bidirecional e evitação de áreas livres avizinhas por regiões ocupadas em núcleos adjacentes para otimizar a rede. Os resultados experimentais alcançados mostram reduções de BBR e CpS de mais de 8%, além de reduções de fragmentação de mais de 3% em relação ao *baseline* adotado.

Este artigo está organizado da seguinte forma: a Seção 2 revisa trabalhos relaci-

onados; a Seção 3 introduz as políticas de alocação; a Seção 4 avalia o desempenho das políticas de alocação propostas e a Seção 5 conclui o artigo.

2. Trabalhos Relacionados

As SDM-EONs tem motivado várias investigações, mas poucos trabalhos tem tratado as políticas de alocação.

Zhang *et al.* elaboram três algoritmos para diminuir bloqueio em redes SDM-EON. O LB-RMA seleciona o caminho entre origem e destino com menor ocupação de espectro antes da alocação, independentemente do comprimento, posição ou número de links do caminho. O FA-SCA utiliza métrica de "corte" da literatura para calcular a fragmentação de super-canais candidatos para alocação e escolher o que menos impacte fragmentação e LBFA-RMSCA é uma abordagem que mescla as duas supracitadas para obter desempenho equilibrado. De forma dissimilar a esta pesquisa, o estudo não lida com atraso na ativação de núcleos, optando por super-canais que violam o princípio da contiguidade para diminuir taxa de bloqueio. Também não descreve práticas de combate local de CpS ou de alocação bidirecional [Zhang et al. 2021].

Yousefi *et al.* propõem três algoritmos originais para mitigar crosstalk e bloqueio de espectro em redes SDM-EON, são eles Min Cross, Min Frag e Mod Frag Cross. Estes algoritmos priorizam ora mitigar fragmentação, ao possível custo do aumento do crosstalk, ora mitigar crosstalk, ao possível custo da fragmentação, ou tentam conciliar as duas métricas. Diferentemente das políticas aqui propostas, não se considera, além do CpS a dimensão, natureza ou posicionamento das regiões livres de alocação, optando-se por projetar as técnicas em um escopo de núcleo [Yousefi and Ghaffarpour Rahbar 2020].

Lacerda *et al.* apresentam dois algoritmos originais para alocação de recursos e escolha de núcleos em SDM-EONs. O SBA busca mitigar *Crosstalk* causado pela alocação de espectro em núcleos adjacentes e o CBA busca posicionar chamadas nos núcleos com menor ocupação. Diferentemente do que é proposto neste artigo, SBA não promove o retardo da ativação de núcleos, apenas a alocação sinuosa do espectro em núcleos vizinhos. CBA, por sua vez, considera a média da sobreposição de espectro para a escolha de núcleo, mas não busca alocar ativamente em regiões não sobrepostas. Também não há estratégia proposta para atenuar a fragmentação do espectro [Lacerda et al. 2021].

3. Políticas de Alocação

Nesta seção são introduzidas as três políticas de alocação propostas: MeenyMinyMo, MeenyFirst e Shadowless. As políticas implementam e combinam estratégias de otimização, i.e. atraso de ativação de núcleo, alocação bidirecional e combate localizado de alocação em áreas sombreadas para otimizar SDM-EONs. As abordagens propostas buscam alocar o espectro de forma compacta, evitando fragmentação, ao mesmo tempo em que evitam a alocação em núcleos adjacentes e em áreas sombreadas por regiões alocadas do espectro, o que tem por efeito final a redução do bloqueio de banda e maior estabilização da rede.

A Figura 1 ilustra os fenômenos do crosstalk entre núcleos e da fragmentação nos núcleos de uma SDM-EON. O crosstalk entre os núcleos 1 e 2, por exemplo, se dá nos slots 5, 9 e 10, onde há alocação de chamadas em posições idênticas em núcleos adjacentes. Já o fenômeno da fragmentação fica especialmente claro no núcleo 2, em que,

mesmo com metade da capacidade ociosa (6 slots), não poderia comportar uma chamada que ocupe mais de 3 slots dada a distribuição desvantajosa das alocações correntes.

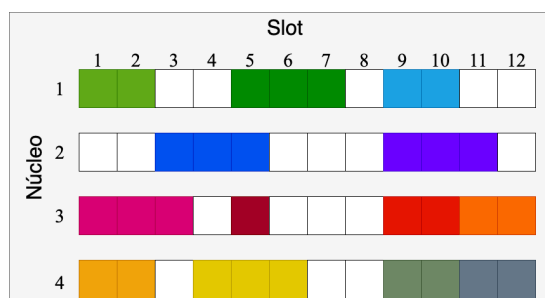


Figura 1. Problemas de crosstalk e fragmentação

3.1. MeenyMinyMo

A MeenyMinyMo é uma política de alocação de espectro que realiza o posicionamento online de chamadas no espectro disponível seguindo um padrão sinuoso de alocação enquanto evita o posicionamento de chamadas em núcleos adjacentes. MeenyMinyMo cria um mapa do espectro disponível inspecionando os nós que compõem determinado caminho par a par, estima o formato de modulação mais eficiente alcançável na rota pretendida e então calcula o número de *slots* de frequências necessários para acomodar a chamada.

A MeenyMinyMo busca então posicionar a chamada em um ponto do espectro que atrasará ao máximo a ativação de núcleos adjacentes na fibra, e apenas quando os núcleos não adjacentes não mais forem capazes de sustentar as demandas de espectro, serão ativados núcleos adjacentes, onde chamadas serão alocadas no sentido inverso, o que se mostrou benéfico no curso das simulações. Ilustra-se na Figura 2 como o algoritmo reestrutura o espectro, para em seguida tentar a alocação na primeira área disponível com os recursos mínimos requeridos.

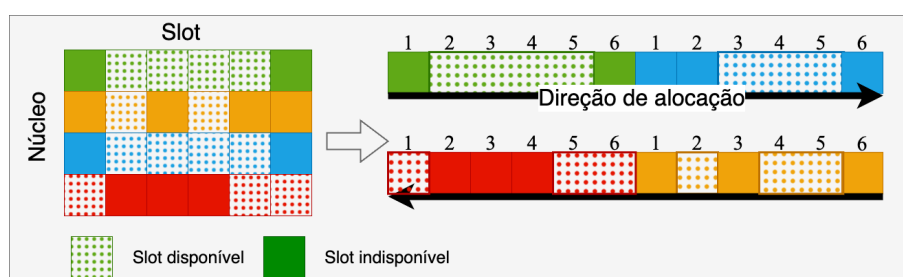


Figura 2. MeenyMinyMo

O Algoritmo 1 ilustra o funcionamento desta abordagem. Primeiramente, o algoritmo recebe como entrada as matrizes de ocupação para todos os pares de nós que compõem o caminho atual a ser analisado. Em seguida, constrói a matriz de disponibilidade que representa o caminho inteiro, através de sucessivas operações lógicas do tipo *AND* entre as matrizes de disponibilidade entre os pares de nós (Linha 4). A matriz de disponibilidade é examinada, de forma que os núcleos são atravessados em um padrão de zigue-zague e núcleos não adjacentes são sempre mapeados primeiro. A lista de regiões resultante contém todos os conjuntos de regiões linearmente conectadas de

slots de frequência desocupados que não não pertencem a núcleos adjacentes entre si (Linhas 7-23).

Alocar em qualquer uma dessas regiões não gera *crosstalk* extra na rede. Regiões que exigiriam a alocação de espectro em núcleos adjacentes também são geradas, mas lhes são atribuídos os níveis mais baixos de prioridade e só serão acessados se não houver absolutamente nenhuma alternativa em núcleos não adjacentes com os mínimos recursos de rede necessários. Nas Linhas 24-29 busca-se posicionar uma dada chamada na primeira região com os requerimentos mínimos de *slots* de frequência em núcleo não adjacente, em uma tentativa de atrasar ao máximo a ativação de núcleos, além de mitigar a fragmentação. Se não for encontrada região que satisfaça os requerimentos mínimos de alocação, a chamada é bloqueada.

A complexidade assintótica do Algoritmo 1 depende do número de caminhos p atravessados, assim como da dimensão da matriz de espectro, calculada como o número de núcleos i da MCF multiplicado pelo número de *slots* j em que o espectro é dividido em cada núcleo além do número de regiões r que resultam do processo. A complexidade final pode ser expressa como $O(p \cdot ((i \cdot j) + r))$. Em cenários realistas, uma vez que o número de caminhos considerados para alocação e a lista de regiões contém sempre poucos elementos em comparação às demais variáveis consideradas, a complexidade corresponde aproximadamente ao número de *slots* na rede, o que torna o algoritmo não mais complexo que uma política de *first-fit* ou *random-fit*, mas com performance melhorada em relação ao *baseline* adotado pelo estudo.

3.2. MeenyFirst

O Algoritmo 2 herda o mesmo mecanismo de formação de regiões de *slots* livres descrito anteriormente como Algoritmo 1 e adiciona uma política de ordenação de regiões e de alocação em menor região para maior otimização da alocação de recursos. Como ilustrado na Figura 3, a abordagem resultante retém a alocação sinuosa e atraso de ativação de núcleos da abordagem anterior, com a adição de uma hierarquia que prioriza as menores regiões em núcleos não-adjacentes, e, somente se exauridas, as menores regiões em núcleos adjacentes.

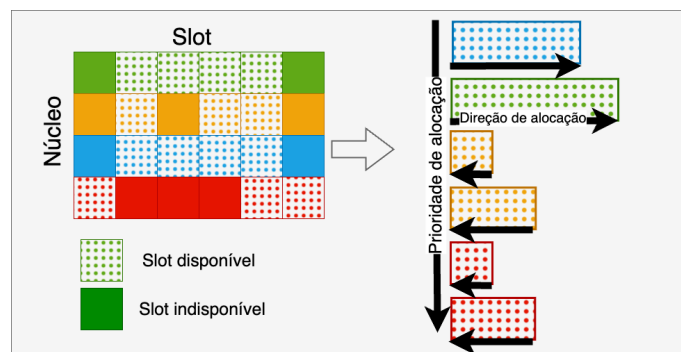


Figura 3. MeenyFirst

Munido das informações de tráfego da rede, invoca-se o Algoritmo 1 para realizar a análise sinuosa do espectro, resultando na lista de regiões livres no espectro compostas de *slots* livres linearmente conectados em núcleos não-adjacentes e adjacentes (Linha 2).

Algoritmo 1: MeenyMinyMo

input : Tráfego de Rede
output: Lista estruturada de regiões

```
1 Para Cada caminhop Faça
2   Inicializar lista de regiões;
3   Calcular demanda em slots de espectro em relação à modulação;
4   Para Cada par de nósa,b ∈ caminhop Faça
5     Encontrar o espectro disponível;
6   Fim para
7   Para Cada núcleo núcleoi se  $i \in 2\mathbb{Z}$  Faça
8     Para Cada sloti,j ∈ núcleoi Faça
9       Se sloti,j é disponível Então
10        Se sloti,j-1 ∉ região ∈ lista de regiões Então
11          Inicializar nova região;
12          Inserir sloti,j em nova região;
13          Inserir nova região na lista de regiões;
14        Fim Se
15        Se sloti,j-1 ∈ região ∈ lista de regiões Então
16          Inserir sloti,j na mesma região;
17        Fim Se
18      Fim Se
19    Fim para
20  Fim para
21  Para Cada núcleoi se  $i \notin 2\mathbb{Z}$  Faça
22    Repetir laço anterior em ordem reversa;
23  Fim para
24  Para Cada regiãor ∈ lista de regiões Faça
25    Se |regiãor| ≥ demanda em slots Então
26      Alocar chamada;
27      return True;
28    Fim Se
29  Fim para
30  return Falso;
31 Fim para
```

A lista resultante é abrangente, pois também inclui as regiões que requeressem a alocação de chamadas em núcleos adjacentes, mas essas regiões são de prioridade mínima e seriam apenas alocadas em um cenário de pior caso em que não é possível fazer a alocação em núcleos não adjacentes.

As Linhas 3-5 descrevem o processo de ordenação das regiões em ordem ascendente, onde a menor região de núcleo não adjacente ocuparia a primeira posição na lista, seguida pela segunda menor região não adjacente e assim por diante, até a maior região não adjacente. Na posição seguinte seria posicionada a menor região livre localizada em núcleo adjacente, seguida da segunda maior, e assim por diante, de forma a atrasar a ativação de núcleos adjacentes e a consequente alocação de chamadas em posições que contribuiriam para o aumento do crosstalk. Assim adiciona-se uma medida para adensar o povoamento dos núcleos e reduzir o bloqueio de espectro, ao mesmo tempo em que se mantém a estratégia de atraso da ativação de núcleos vizinhos.

A complexidade assintótica do Algoritmo 2 depende do número de caminhos p atravessados, assim como da dimensão da matriz de espectro, calculada como o número de núcleos i da MCF multiplicado pelo número de *slots* j em que o espectro é dividido em cada núcleo; o número de regiões r e, por fim, a complexidade para ordenar as regiões da lista de regiões, que podem ser expressos como $O(p \cdot ((i \cdot j) + r \log r + r))$. Desta forma, embora haja um certo impacto na complexidade, foi possível incluir mais uma estratégia para mitigar fragmentação na rede.

Algoritmo 2: MeenyFirst

```

input : Tráfego de Rede
output: Lista Ranqueada de Regiões

1 Para Cada caminho $p$  Faça
2   | Invocar Algoritmo 1
3   | Para Cada região $r$   $\in$  lista de regiões Faça
4   |   | Ranquear a região $r$  de acordo com sua dimensão;
5   |   | Fim para
6   |   | Para Cada região $r$   $\in$  lista ranqueada de regiões Faça
7   |   |   | Se |região $r$ |  $\geq$  demanda em slots Então
8   |   |   |   | Alocar chamada;
9   |   |   |   | return True;
10  |   |   | Fim Se
11  |   | Fim para
12  |   | return False;
13 Fim para

```

3.3. Shadowless

O Algoritmo Shadowless herda as características de ambas as abordagens descritas previamente, realizando a alocação em um padrão de zigue-zague, o que retarda a ativação de núcleos adjacentes e prioriza a menor região disponível para a alocação. Apenas se não houver regiões disponíveis que satisfaçam essas restrições tenta-se a alocação em regiões livres localizadas em áreas não favoráveis do espectro. Se ainda assim não for possível assegurar os recursos mínimos necessários, então será bloqueada a chamada. Como uma medida extra para mitigar *crosstalk* entre núcleos adjacentes, o Algoritmo Shadowless refina ainda mais o processo ao considerar o estado de alocação do núcleo vizinho ao gerar suas regiões livres.

Como ilustrado na Figura 4, Shadowless adiciona a distinção entre regiões não-sombreadas (hachuradas) e regiões sombreadas (pontilhadas), e sua hierarquia de alocação prioriza a alocação nas menores regiões não-sombreadas em núcleos não-adjacentes, o que reduz o *crosstalk* entre núcleos. Na sua implementação, utiliza-se o Algoritmo 2 para gerar a primeira lista (Linha 2), e aplica-se o requisito de não sombreamento às regiões formadas (Linhas 4-17). Uma vez gerada a lista de regiões não-sombreadas, aplica-se a ordenação e as duas listas são fundidas, com os membros da lista de regiões não-sombreadas colocados nas posições iniciais da lista combinada. Desta forma, garante-se que as regiões não-sombreadas terão prioridade de alocação.

As Linhas 4-17 ilustram o incremento mais importante desta política. O Algoritmo 3 constrói suas regiões de maior prioridade aplicando uma estratégia de não-sobreposição

Algoritmo 3: Shadowless

input : Tráfego de rede

output: Lista Ranqueada de Regiões Não Sombreadas

```
1 Para Cada caminhop Faça
2   Invocar Algoritmo 1;
3   Inicializar lista de regiões não sombreadas;
4   Para Cada regiãor ∈ lista de regiões Faça
5     Para Cada sloti ∈ regiãor Faça
6       Se sloti+1,j está disponível Então
7         Se sloti,j-1 não está disponível Então
8           Inicializar nova região não-sombreada;
9           Inserir sloti,j em região inicializada;
10          Inserir região na lista de regiões não-sombreadas;
11        Fim Se
12        Se sloti,j-1 está disponível Então
13          Inserir sloti,j na mesma região de sloti,j-1;
14        Fim Se
15      Fim Se
16    Fim para
17  Fim para
18  Ordenar lista de regiões não-sombreadas;
19  Combinar listas de regiões não-sombreadas à lista de regiões regulares;
20  Para Cada regiãor ∈ lista combinada de regiões Faça
21    Se |regiãor| ≥ demanda em slots Então
22      Alocar chamada;
23      return True;
24    Fim Se
25  Fim para
26  return False;
27 Fim para
```

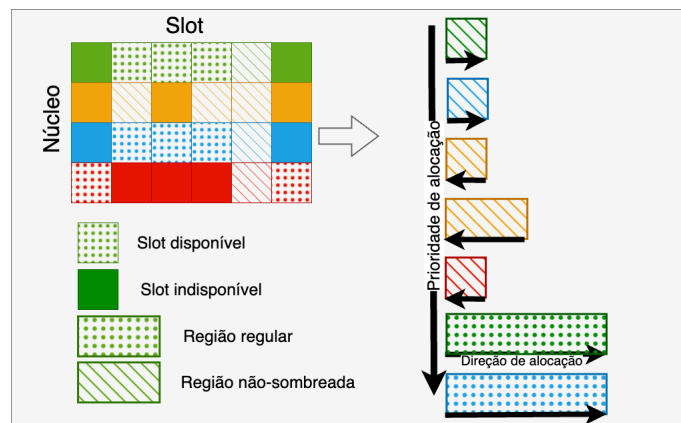


Figura 4. Shadowless

do espectro livre, ou seja, qualquer $slot_{i,j} \in core_i$ tem de estar livre e não pode estar sombreado por um $slot$ alocado na mesma posição em $core_{i+1}$. Naturalmente, regiões não-sobrepostas tornam-se gradativamente mais escassas na medida em que o espectro é povoado, e, assim que nenhuma região não-sombreada possa satisfazer as demandas, emprega-se como fontes secundárias as regiões construídas de acordo com a política descrita no Algoritmo 2 para alocação.

A complexidade assintótica do Algoritmo *Shadowless* equivale à complexidade do Algoritmo *MeenyFirst*, executado o dobro de vezes para cada tentativa de alocação; a primeira para gerar a lista de regiões sombreadas, e a segunda para gerar a lista de regiões não sombreadas contemplando o mesmo caminho tal que: $O(2 \cdot p \cdot ((i \cdot j) + r \log r + r))$, logo: $O(p \cdot ((i \cdot j) + r \log r + r))$.

4. Avaliação de Desempenho

Esta seção descreve em detalhe a metodologia de avaliação adotada, incluindo as ferramentas usadas para simulação, parâmetros de simulação, métricas adotadas e *baseline* usado para comparação.

4.1. Visão Geral da Rede

O modelo de rede óptica aqui adotado emprega multiplexadores add/drop com *wavelength-selective switching*, *space-wavelength granularity* e *transceivers* de múltiplo-*input* múltiplo-*output* (MIMO). Adota-se também uma MCF de sete núcleos dispostos em uma formação hexagonal. Cada núcleo da formação tem a totalidade do espectro disponível dividida em 320 slots de frequência com 12.5 Gbps de capacidade.

Utilizou-se enlaces formados por pares de nós que permitem comunicação bidirecional de dados. O comprimento do enlace corresponde à distância física em quilômetros que separa os nós em cada extremidade do enlace e essas distâncias variam de acordo com a topologia física adotada e com a disposição dos nós nela contidos. Nossos modelos não admitem estabelecimento de circuitos entre núcleos, o que requer a adesão às restrições de continuidade e contiguidade. O número de *slots* de largura de banda necessários para satisfazer uma dada demanda é definido de acordo com a taxa de símbolos projetada, o que por sua vez depende da modulação, com a adição de um *slot* extra que cumpre a função de banda de guarda.

As simulações adotaram seis formatos de modulação dependentes de distância em conformidade com o estado-da-arte [Oliveira and da Fonseca 2017]. Quaisquer tentativas de alocação priorizarão o formato de modulação com a maior taxa de bits-por-símbolo, presumindo-se que nenhuma das restrições supramencionadas seja rompida, e de forma que a qualidade de transmissão (*Quality of Transmission*, QoT) permaneça dentro dos limites aceitáveis. As modulações adotadas foram *BPSK*, *QPSK*, *8QAM*, *16QAM*, *32QAM* e *64QAM*. Estas modulações permitem as seguintes taxas de transmissão (bits por símbolo): $\{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$, com a capacidade por slot (Gb/s) de $\{12.5, 25, 37.5, 50, 62.5, 75\}$ e permitem distâncias máximas de transmissão em Km de $\{4000, 2000, 1000, 500, 250, 125\}$, respectivamente.

4.2. Descrição do Cenário e Metodologia de Avaliação

As políticas propostas foram submetidas a simulação comparativa. Para tal, utilizou-se a plataforma de simulação FlexGridSim [Moura and Drummond]. Produziu-se um

intervalo de confiança de 95% para garantir a consistência dos resultados.

O simulador supracitado, com uso extensivo em trabalhos da literatura, permite a reprodução da operação de SDM-EONs, incluindo uma série de fatores de degradação da rede em uma variedade de cargas e topologias consideradas MCFs

Cada etapa da simulação envolve a execução de 10^3 chamadas, divididas em sete taxas de transmissão (25 Gbps, 50 Gbps, 125 Gbps, 200 Gbps, 500 Gbps, 750 Gbps, and 1 Tbps) e distribuídas conforme um processo de Poisson uniforme entre todos os pares de nós da topologia. Variou-se a carga entre 100 e 1000 erlangs, com passos de 50 erlangs.

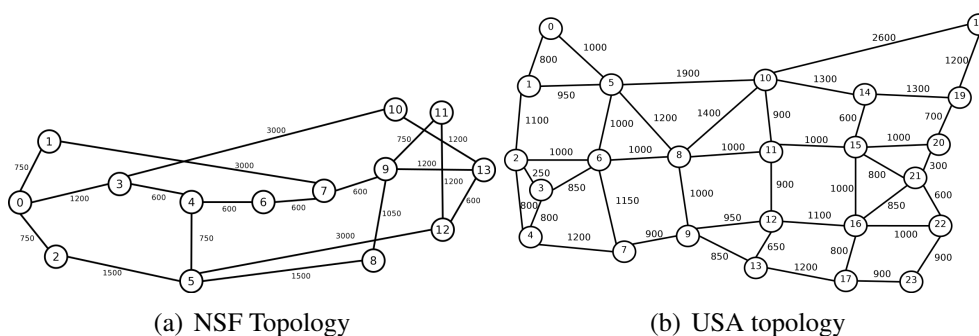


Figura 5. Topologies

Foram simuladas as topologias USA (Fig. 5(b)) e NSF (Fig. 5(a)). A primeira é composta por 24 nós e 43 links, enquanto a segunda tem 14 nós e 18 links. Atribui-se às arestas que ligam os links valor numérico equivalente a distância física que os separa em quilômetros. Comparou-se os resultados das políticas propostas à abordagem de roteamento e alocação que consiste na busca de menor caminho via algoritmo de Dijkstra, seguida da alocação no espectro em caminho único por meio de algoritmo de reconhecimento de imagem binária, que realiza o reconhecimento de áreas linearmente conectadas de slots livres. Esta abordagem foi adaptada de [Moura and da Fonseca 2021] e [Shapiro 1996] para atender aos parâmetros de simulação adotados e será doravante referida como *baseline*.

4.3. Métricas

Avaliou-se como métricas de desempenho a taxa de bloqueio de banda (*Bandwidth Blocking Ratio*, BBR), a fragmentação e o crosstalk por slot (*Crosstalk per Slot*, CpS). O BBR permite visualizar a capacidade da rede de prover os recursos necessários de forma mais objetiva que o número de requisições não-atendidas, pois representa proporcionalmente o volume não-atendido de banda em relação ao total requisitado. Por sua vez, o CpS indica o nível de degradação da rede ocasionado pela alocação de slots de frequência em posições idênticas no espectro em mais de um núcleo ao mesmo tempo. A *fragmentação* permite avaliar o potencial dos fragmentos presentes no espectro (isto é o conjunto de intervalos de slots de frequência livres linearmente conectados) proverem recursos suficientes para acomodar uma chamada em um dado momento.

Juntas, estas métricas permitem avaliar de diversos ângulos como as diferentes abordagens de alocação testadas influenciam na rede direta e indiretamente conforme a carga suportada pela rede aumenta, e permitem visualizar como priorizar a otimização de

uma métrica impacta benéfica ou maleficamente na performance da rede em outros aspectos de formas não intuitivas. Calculamos o *BBR* como a razão entre a banda bloqueada em relação ao total dos recursos de redes requisitados ao longo do processo de simulação, conforme a Eq. 1.

$$BBR = \frac{\sum \text{bandabloqueada}}{\sum \text{bandatotal}} \quad (1)$$

O *CpS* foi calculado conforme a Eq. 2

$$CpS = \frac{1}{|L|} \sum_{l \in L} \frac{1}{|S|} \sum_{s_{ij} \in S} (\mathbb{K}_{s_{i-1j}} + \mathbb{K}_{s_{i+1j}}) \quad (2)$$

Onde L é o conjunto de links da topologia, tal que $L = \{l_1, l_2, \dots, l_n\}$, S é o conjunto de slots ocupados no espectro de l_n e suas posições, tal que $S = \{s_{0,0}, s_{4,2}, \dots, s_{ij}\}$ e \mathbb{K} (condição) é a função, igual a 1 se a condição de ocupação de slot em posições adjacentes for verdadeira e 0 caso contrário.

A fragmentação foi calculada de acordo com a equação 3:

$$\text{Fragmentação} = \frac{1}{|L|} \sum_{\text{link} \in L} \frac{1}{|\Phi|} \sum_{\substack{\phi \in \Phi \\ r \in R}} \mathbb{K} \left(\frac{r}{sc} \geq \text{dimensão}(\phi) \right) \quad (3)$$

onde L é o conjunto de links da topologia, tal que $L = \{l_1, l_2, \dots, l_n\}$. Φ é o conjunto de fragmentos contidos do espectro de l_n , de forma que $\Phi = \{\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n\}$. R é um conjunto de taxas de transmissão praticadas e sc é a capacidade de transmissão de um slot individual. \mathbb{K} (condição) é a função, igual a 1 se a condição for verdadeira e 0 caso contrário. $|L|$ é o número de links na topologia, e $|\Phi|$ é o número de fragmentos no espectro.

4.4. Resultados

Nesta seção são ilustrados e comentados os resultados simulados do desempenho das abordagens propostas nas topologias testadas, expressos como porcentagens em relação ao *baseline* descrito na Seção 4.2. Simulou-se as topologias *NSF* e *USA*, como ilustradas nas figuras 5(a) e 5(b), respectivamente.

A Figura 6 mostra o desempenho das abordagens propostas no que concerne *BBR* nas duas topologias pesquisadas em escala logarítmica. A Figura 6(a) ilustra o desempenho das políticas em 5(a). A política *MeenyMinyMo* reduziu *BBR* em 2% - até 4% se consideradas apenas cargas mais altas (700-1000 erlangs). *MeenyFirst* foi em média 8% mais eficiente que o *baseline* e *Shadowless* 7%. A Figura 6(b) mostra o desempenho em 5(b) onde *MeenyMinyMo* teve desempenho em *BBR* compatível com o *baseline*, não variando mais de um ponto percentual para mais ou menos. *MeenyFirst*, reduziu o *BBR* em média 2%, e chegou a até 5%, se consideradas apenas cargas mais altas (700-1000 erlangs). *3* reduziu o *BBR* em média 3%, e quase 6%, consideradas apenas cargas mais elevadas (750-1000 erlangs). Constata-se ter havido melhorias para as três políticas em ambas as topologias simuladas com a introdução do atraso de ativação de núcleo e

alocação em zigue-zague, com um salto significativo mediante introdução de ranqueamento das regiões livres, e desempenho ligeiramente diminuído com a distinção entre regiões regulares e regiões sombreadas; técnica que, no entanto, permitiu desempenho melhor em CpS e desempenho geral mais equilibrado para as métricas analisadas.

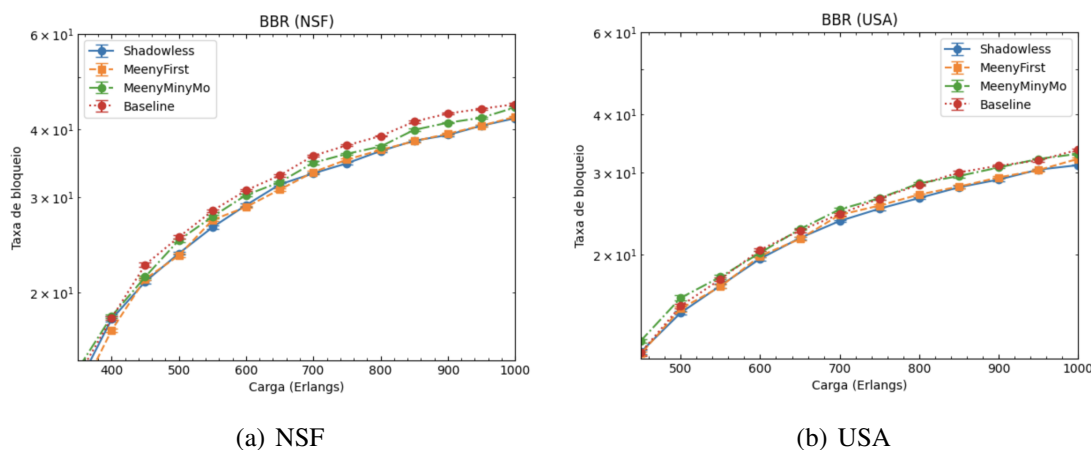


Figura 6. Taxa de Bloqueio de Banda

A Figura 7 ilustra o desempenho de CpS das abordagens propostas. Vê-se na Figura 7(a) o desempenho das políticas em 5(a), onde as três alcançaram resultados vantajosos. A política *MeenyMinyMo* reduziu em 4%, em média, as taxas de CpS em relação ao *baseline*. *MeenyFirst* reduziu em média 7% o CpS, e até 9.8%, se consideradas apenas as cargas baixas e intermediárias (100-600 erlangs). *Shadowless* reduziu CpS em 8.6%, em média, e até 13% em cargas baixas e intermediárias, o melhor desempenho entre as abordagens propostas. A Figura 7(b) ilustra o desempenho em 5(b), onde *MeenyMinyMo* reduziu CpS em 2%. *MeenyFirst* reduziu em média em 4% ao longo das cargas testadas, o que chegou a 7%, consideradas apenas cargas intermediárias (500-800 erlangs). *Shadowless* apresenta desempenho muito similar a *MeenyFirst*, com reduções de 4% em média, obtendo reduções de até 7% em cargas entre 450 e 750 erlangs.

Desta forma, fica evidente que atrasar ao máximo a ativação de núcleos adjacentes, e alocá-los em sentido oposto quando for necessário contribui para diminuir CpS, com ganhos ainda maiores com a adição de medidas que previnem com precisão a alocação de chamadas em áreas sombreadas. No entanto, vê-se maiores ganhos em cargas baixas e intermediárias, uma vez que em cargas muito elevadas naturalmente haverá um número significativamente menor de opções não-sombreadas e escolher regiões menores (*MeenyFirst*) volta a ser melhor e computacionalmente menos custoso.

A Figura 8 ilustra qual o impacto na fragmentação da rede mediante aplicação das políticas propostas para alocação propostas. A Figura 8(a) mostra os resultados para 5(a), onde *MeenyMinyMo* reduziu, em média, 3% a fragmentação na rede. *MeenyFirst*, por sua vez, reduziu em média 1%, e *Shadowless* reduziu em 3% a fragmentação, empatando com *MeenyMinyMo*. A Figura 8(b) mostra os resultados para 5(b), onde *MeenyMinyMo* reduziu em 2% a fragmentação, mesmo resultado de *MeenyFirst*, que reduziu até 3% a fragmentação em cargas mais altas (600-1000 erlangs). *Shadowless* reduziu em torno de 2% a fragmentação da rede para as cargas testadas.

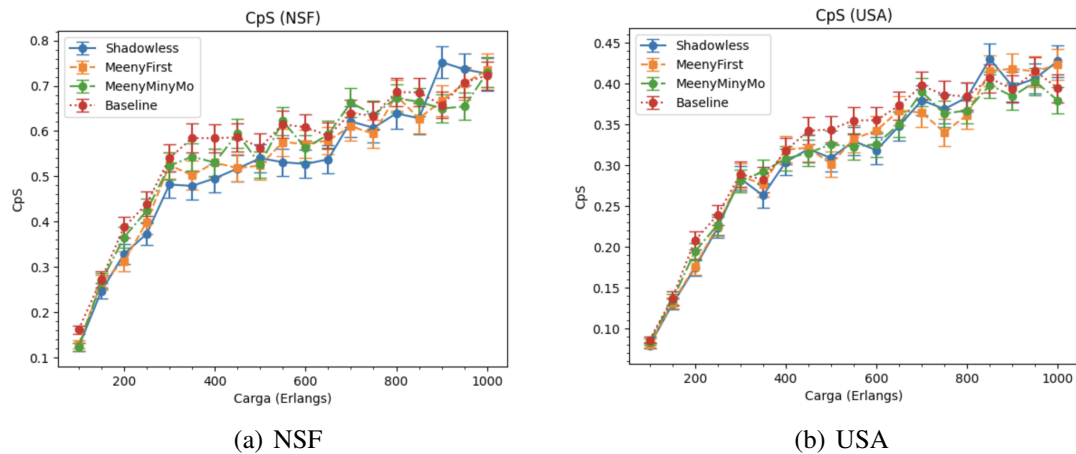


Figura 7. Crosstalk por Slot

Uma vez que a fragmentação indica a capacidade das regiões livres contínuas de acomodar chamadas, *MeenyMinyMo* se sobressai nesta métrica, pois aloca sequencialmente e prioriza exaurir a capacidade de cada núcleo antes de mudar o núcleo de alocação, o que tende a preservar áreas extensas livres. *MeenyFirst* enfatiza encontrar as menores regiões ao mesmo tempo em que tenta alocar em núcleos não-adjacentes, o que pode levar a sobre-provisionamento (vide Figura 3) e explica a degradação em relação a *MeenyMinyMo*. *Shadowless*, por segmentar regiões livres em sombreadas e não-sombradas e ranqueá-las conforme a dimensão volta a compactar a alocação, reduzindo a fragmentação.

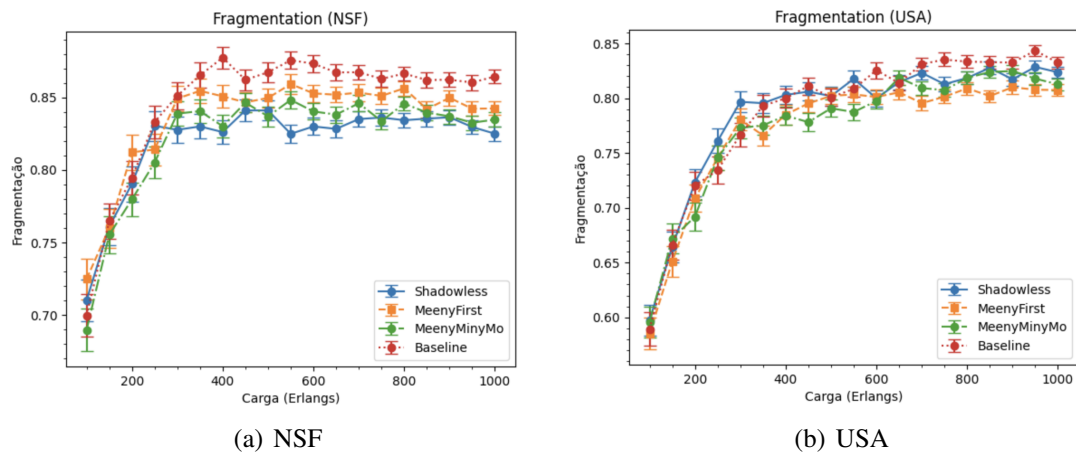


Figura 8. Fragmentação

5. Conclusões

Diante dos resultados apresentados é possível constatar que as políticas propostas obtiveram êxito em superar seu *baseline*. *MeenyMinyMo* reduziu BBR, CpS e fragmentação em 5(a) e reduziu Cps e Fragmentação em 5(b), mantendo baixa complexidade computacional. *MeenyFirst* foi o que mais reduziu, em média, BBR na rede, além de conseguir a segunda maior redução em CpS. *Shadowless* conseguiu o resultado mais equilibrado, com

a segunda maior redução de BBR, maior redução de CpS e fragmentação similar a do primeiro colocado nesta métrica. Ademais, nota-se que as políticas propostas se sobressaem em intervalos diferentes de cargas, onde apresentam ganhos em diferentes métricas, o que sugere que o desenvolvimento de uma abordagem capaz de atribuir dinamicamente o método de alocação que melhor lida com determinadas configurações de rede poderia obter resultados ainda melhores e mais consistentes para intervalos longos.

Agradecimentos

Este trabalho foi apoiado pelo processo nº 2022/07488-8 da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e pelo processo nº 305489/2023-2 do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq.

Referências

- Dixit, S., Batham, D., and Narwaria, R. P. (2021). Elastic optical network: A promising solution for future communication networks considering differentiated cos. In *Machine Intelligence and Smart Systems: Proceedings of MISS 2020*, pages 49–60. Springer.
- Lacerda, J. C., Cartaxo, A. V. T., and Soares, A. C. B. (2021). New core and spectrum balancing algorithms for space division multiplexed elastic optical networks. In *2021 IEEE International Mediterranean Conference on Communications and Networking (MeditCom)*, pages 383–388.
- López, V., Velasco, L., et al. (2016). Elastic optical networks. *Architectures, Technologies, and Control, Switzerland: Springer Int. Publishing*.
- Moura, P. M. and da Fonseca, N. L. (2021). Multipath routing in elastic optical networks with space-division multiplexing. *IEEE Communications Magazine*, 59(10):64–69.
- Moura, P. M. and Drummond, A. C. FlexGridSim: Flexible Grid Optical Network Simulator. <http://www.lrc.ic.unicamp.br/FlexGridSim/>.
- Naik, D., Bauri, A., De, T., et al. (2020). Traffic aggregation in elastic optical and wireless networks. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Communication, Devices and Computing*, pages 55–70. Springer.
- Oliveira, H. M. and da Fonseca, N. L. (2017). Routing, spectrum, core and modulation level assignment algorithm for protected sdm optical networks. In *GLOBECOM 2017-2017 IEEE Global Communications Conference*, pages 1–6. IEEE.
- Paradisi, A., Figueirdo, R. C., Chiuchiarelli, A., and de Sousa Rosa, E. (2019). *Optical Communications*. Springer.
- Shapiro, L. G. (1996). Connected component labeling and adjacency graph construction. In Kong, T. Y. and Rosenfeld, A., editors, *Topological Algorithms for Digital Image Processing*, volume 19 of *Machine Intelligence and Pattern Recognition*, pages 1–30. North-Holland.
- Yousefi, F. and Ghaffarpour Rahbar, A. (2020). Novel crosstalk, fragmentation-aware algorithms in space division multiplexed- elastic optical networks (sdm-eon) with considering physical layer security. *Optical Switching and Networking*, 37:100566.
- Zhang, S., Yeung, K.-L., and Jin, A. (2021). Lbfa: A load-balanced and fragmentation-aware resource allocation algorithm in space-division multiplexing elastic optical networks. *Photonics*, 8(10).