

# Janela de Desfragmentação de Espectro em Redes SDM-EON

Paulo J. S. Júnior<sup>1</sup>, Marcelo Marotta<sup>2</sup>, Lucas R. Costa<sup>2</sup>, André C. Drummond<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Federal de Brasília- Planaltina - DF

<sup>2</sup>Departamento de Ciência da Computação/IE  
Universidade de Brasília

{paulo.jose@etfbsb.edu.br, marotta@unb.br, lucasrc.rodri@gmail.com, andred@unb.br}

**Abstract.** *The space division multiplexing (SDM) technology allows the elastic optical network to become a promising candidate for future optical networks. SDM-EON becomes more complex with the introduction of the spatial dimension and the issue of spectrum fragmentation is more concerning compared to traditional EON. To remedy the fragmentation issue we propose a spectrum defragmentation algorithm with a slot segment window technique based on a metric to pick the best fragments with least computational effort. Simulation results show that the proposed algorithm can achieve better performance than an algorithm from the literature in terms of blocking probability and external fragmentation. Results show that our proposal has a significant reduction in spectrum fragmentation and blocking rates of up to 90% and that proactive defragmentation has considerably better results than reactive defragmentation.*

**Resumo.** *A tecnologia de multiplexação por divisão de espaço (SDM) permite que a rede óptica elástica se torne uma candidata promissora para futuras redes ópticas. A SDM-EON se torna mais complexa com a introdução da dimensão espacial e a questão da fragmentação de espectro é mais preocupante comparada a EON tradicional. Para remediar a questão da fragmentação é proposto um algoritmo de desfragmentação do espectro com uma técnica de janela de segmentos de slots baseado em uma métrica que definimos para escolhas dos melhores fragmentos com menor esforço computacional. Resultados de simulação mostram que o algoritmo proposto pode alcançar melhor desempenho do que um algoritmo da literatura em termos de probabilidade de bloqueio e Fragmentação externa. Os resultados mostram que nossa proposta apresenta uma redução significativa da fragmentação do espectro e taxas de bloqueio de até 90%, e que o processo proativo de desfragmentação tem resultado consideravelmente melhor que o reativo.*

## 1. Introdução

Considerando o crescente aumento das demandas nas redes ópticas, diferentes tecnologias de multiplexação vem sendo aplicadas para melhorar o aproveitamento das fibras ópticas. Apesar do ganho em eficiência espectral trazido pela tecnologia emergente, as redes ópticas EON, Elastic Optical Networks, a capacidade alcançável da fibra óptica está se aproximando de sua limitação física no domínio da frequência [Sharma et al. 2022]. Com isso, nova tecnologia de multiplexação com divisão espacial da fibra óptica (SDM), vem surgindo como uma nova solução para a crise de capacidade. As Redes ópticas baseadas em tecnologias SDM podem expandir a capacidade de transmissão além do limite

físico das fibras ópticas tradicionais, pois podem permitir vários núcleos de transmissão em paralelo, podendo dar um ganho de até 30% [Sharma et al. 2022].

A tecnologia EON trouxe melhorias com relação às redes WDM, Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda, com maior flexibilidade ao adaptar-se às demandas de diferentes granularidades, fornecendo diferentes capacidades nos caminhos ópticos, mas potencializou o problema da fragmentação. A fragmentação de espectro pode trazer ineficiência na utilização da largura de banda provocando bloqueio da demanda, pois pode-se ter quantidade de espectro livre suficiente para atender mas desorganizado a ponto de não permitir o uso do recurso [Paira et al. 2020]. Com a introdução da dimensão espacial, a fragmentação do espectro tornou-se ainda mais difícil de ser resolvida do que na rede EON tradicional, pois o paralelismo de canais de espectros aumenta a possibilidade de maior quantidade de fragmentos. Em redes SDM-EONs, a existência de núcleos de transmissão em paralelo possibilita também o problema de “crosstalk”, interferência entre os núcleos vizinhos. O “crosstalk” entre núcleos é considerado uma restrição de camada física para roteamento e alocação de espectro [Lei et al. 2019]. Em redes EON-SDM, novos algoritmos de roteamento, espectro e alocação de núcleo (RSCA) são necessários.

Para minimizar o problema da fragmentação, esquemas de desfragmentação tem sido propostos para redes SDM-EON. Devido às redes EON-SDM ainda não serem atualmente predominantes, existem ainda poucos estudos recentes com relação ao problema de desfragmentação nesta tecnologia [Oki et al. 2020a] [Brasileiro et al. 2020] [Wang 2019a] [Zhao et al. 2018]. A desfragmentação nas redes ópticas ocorre com a reconfiguração e realocação das conexões para otimizar mais recursos livres. A reconfiguração como um método de desfragmentação é geralmente indesejável, pois resulta na interrupção do serviço. Existem soluções na camada física que minimizam e até eliminam os efeitos das interrupções durante as reconfigurações [Wang 2019b], mas com um custo muito alto devido à utilização de equipamentos dedicados para esta operação. A desfragmentação torna-se mais importante como foco de pesquisa, pois o seu objetivo tem um efeito muito positivo na melhor disponibilidade de recursos, mas precisa ser balanceado com o seu alto custo operacional. Então, a grande questão é como os métodos de desfragmentação podem aumentar a disponibilidade de recursos minimizando a quantidade de interrupções de serviço e as taxas de bloqueio, com a menor utilização de equipamentos. Este artigo propõem uma solução que visa principalmente minimizar o esforço da desfragmentação em prol da diminuição da taxa de bloqueio.

Neste artigo, é explorado a fragmentação do espectro em SDM-EON, e é proposto um novo método de desfragmentação que além de efetuar um menor esforço computacional, consegue diminuir os efeitos da fragmentação, combinando com as técnicas de reconfiguração sem interrupção na camada física [Brasileiro et al. 2020] com o uso mínimo de equipamentos, a ponto de protelar ao máximo a congestão da rede e diminuir o bloqueio das chamadas. Para mitigar o alto custo da desfragmentação, é proposto um algoritmo de desfragmentação do espectro com uma técnica de janela de segmentos de slots baseado numa métrica que definimos para escolhas dos caminhos ópticos que serão realocados com um menor esforço computacional. O algoritmo proposto acrescenta um método de desfragmentação que propõem tanto a comutação de núcleos como a troca de espectro para redes SDM-EON, e utiliza uma lista de janelas de segmentos de slots com as

prioridades para a desfragmentação definida por uma equação. Esta técnica tem também por objetivo possibilitar uma quantidade mínima de equipamentos dedicados à reconfiguração sem a interrupção conforme [Brasileiro et al. 2020]. Esta quantidade é medida pelo tamanho da janela. Os resultados apresentados neste trabalho demonstram diversos testes e o desenvolvimento de uma metodologia empírica que justifica a escolha de janelas de desfragmentação com também um resultado muito melhor em comparação com a literatura [Brasileiro et al. 2020]. Esta nova técnica é testada e avaliada em métodos reativos e proativos.

O artigo está organizado com a seção 2 abordando conceitos e trabalhos relacionados à desfragmentação e redes SDM-EON, com a seção 3 apresentando as técnicas de desfragmentação e o um algoritmo. A Seção 4 apresenta os resultados e análises da simulação, e a Seção 5 conclui o artigo.

## 2. Conceitos e Trabalhos Relacionados

As redes EON tradicionais possuem fibras com um único núcleo (SCF) e as SDM-EON possibilitam fibras com múltiplos núcleos (MCF). Estes núcleos adotam a mesma técnica de multiplexação para redes EON, a Ortogonal por Divisão de Frequência (OFDM). Nas fibras com MCF ocorrem a Multiplexação por Divisão Espacial (SDM). No MCF, mais de um núcleo de transmissão pode ser usado para uma mesma fibra, podendo haver “crosstalk”. A restrição de “crosstalk” aumenta o esforço computacional dos algoritmos de roteamento e alocação de espectro para encontrar uma solução. Nas redes SDM-EON, cada núcleo possui o seu conjunto de slots. O “crosstalk” ocorre quando dois núcleos vizinhos possuem demandas ocupando mesmos índices de “slots”. Evitar o “crosstalk” e minimizar os efeitos da fragmentação são os principais desafios das redes SDM-EON [Mrad et al. 2022].

Nas redes EON, os requisitos físicos de contiguidade e continuidade de espectro para cada caminho óptico estabelecido colaboram com a fragmentação de toda a rede. Isto também ocorre com a inserção e a remoção das conexões com largura de banda variável e com a variação do tráfego ao longo do tempo, o que leva a uma otimização de recursos não ideal. A fragmentação do espectro se refere à existência de blocos espectrais não alinhados, isolados e com segmentos de tamanho não uniformes. Os fragmentos causados pela constante chegada e saída de caminhos ópticos em redes dinâmicas provocam baixa utilização de espectro e alta probabilidade de bloqueio [Singh et al. 2017]. Esses fragmentos dificultam a alocação de um segmento de espectro contínuo com tamanho suficiente para satisfazer a capacidade de um novo caminho óptico. Apesar de existir “slots” livres suficientes para acomodar uma solicitação de conexão, uma demanda pode ser bloqueada por não existir um bloco contíguo de “slots” livres com a capacidade de atender a demanda [Sharma et al. 2022].

Na literatura existem diversas métricas de fragmentação que a utilizam como indicadores de desempenho. A maioria desses estudos fazem uma correlação dos efeitos da fragmentação com relação à taxa de bloqueio [Wu et al. 2014] [Sharma et al. 2022] [Buffa et al. 2020]. Originalmente, as métricas de fragmentação vem das análises de discos rígidos. Em [Wu et al. 2014] é proposto uma métrica para cálculo do grau de continuidade de espectro, que é uma restrição física de grande influência na fragmentação. [Buffa et al. 2020] apresenta a fragmentação externa como a sua principal mé-

trica, e classifica a desfragmentação como reativa ou proativa, com e sem interrupção, e com e sem re-roteamento. Este estudo também utiliza a técnica de alocação ‘‘first-fit’’ [Rosa et al. 2012] para tentar manter o máximo de blocos contíguos de um lado do espectro e conseqüentemente evitar mais fragmentação. O trabalho de [Sharma et al. 2022] destaca os efeitos de mitigar a fragmentação mantendo as deficiências relacionadas ao ‘‘crosstalk’’ em valores limite.

Este artigo adota a fragmentação externa [Rosa et al. 2012] como referência. A Equação 1, calcula a fragmentação externa onde o maiorBlocoLivre representa o número de slots do maior espaço contíguo livre, e o totalLivre é o número total de slots disponíveis. Se *FragExt* for próximo a um, o canal estará todo dividido em pedaços pequenos e com maior fragmentação. A Equação 1 também destaca que quanto maior o número de espaços livres pequenos nos slots dos enlaces, maior a fragmentação e a importância do esforço de se manter o maior bloco livre possível.

$$FragExt = 1 - \frac{maiorBlocoLivre}{totalLivre} \quad (1)$$

Para diminuir os efeitos da fragmentação, técnicas de desfragmentação vem sendo explorada na literatura [Brasileiro et al. 2020] [Oki et al. 2020a] [Wang 2019a] [Zhao et al. 2018]. O principal objetivo da desfragmentação é manter o máximo de segmentos de slots livres contíguos. A desfragmentação busca minimizar o número de conexões interrompidas ou protelar a congestão da rede com a reorganização dos recursos livres. Quando a organização dos slots necessários para criação de caminhos ópticos não são atendidos, a desfragmentação pode corrigir esse problema ajustando fragmentos e aprimorando o bloqueio de chamadas na rede. A desfragmentação é a técnica que reorganiza os segmentos do espectro agrupando os caminhos ópticos e abrindo espaços maiores e livres e com contigüidade máxima de slots livres para atender novas demandas. Esta técnica também depende da política de alocação de espectro que pode ser ‘‘first-fit, last-fit’’ e outras [Buffa et al. 2020]. A desfragmentação é também o processo de reconfiguração ou realocação do caminho óptico em outro espectro. O objetivo da desfragmentação é de melhorar a taxa de utilização de fragmentos de espectro e melhorar a taxa de acesso de solicitações de serviço [Wang et al. 2021].

[Posam et al. 2020] destaca os três ajustes de fragmentação, ‘‘Fragmentation Aware’’, e a desfragmentação proativa e reativa. O ‘‘Fragmentation Aware’’ é o uso de uma técnica para alocar o caminho óptico quando da chegada da demanda como forma de diminuir os efeitos da fragmentação e protelar a congestão de recursos. A desfragmentação já é a correção da fragmentação. A desfragmentação proativa é realizada periodicamente e a reativa depende de momentos arbitrados ou por gatilhos. O Método proativo pode ser utilizado para prorrogar o momento de congestão do tráfego e prolongar o excesso de capacidade de toda ou parte da rede. O Método reativo pode reconfigurar apenas as conexões que comprometem a nova demanda bloqueada. O método reativo tem uma menor utilização de equipamentos e conseqüentemente um menor custo operacional que o proativo, mas acontece justamente quando se falta recurso e com uma menor probabilidade de êxito.

Apesar de a desfragmentação trazer o problema da interrupção do caminho óptico a ser realocado, existem técnicas de desfragmentação na camada física como: ‘‘re-

optimization, make-before-break, push-pull e hop-tuning” [Wang 2019b] que visam minimizar ou eliminar este problema. Alguns resultados demonstram com sucesso a capacidade da técnica ”push-pull” em executar uma desfragmentação do espectro sem prejudicar a camada física com a ausência de recursos adicionais, sem afetar a estabilidade, e sem induzir efeitos prejudiciais à distribuição de tráfego [Brasileiro et al. 2020]. Em [Brasileiro et al. 2020] é apresentada uma técnica combinada de desfragmentação ”push-pull” e de ”fast-switching” que não interrompe circuitos de rede. A ”push-pull” baseia-se na sintonia dinâmica de frequência e propõem a reconfiguração e realocação do caminho óptico sem precisar de ”transponders” adicionais [Zhang et al. 2014].

A desfragmentação pode acontecer em redes SDM-EON com a realocação do caminho óptico para um mesmo ou diferente espectro. A realocação de mesmo espectro ocorre entre os mesmos ”slots” do caminho óptico mudando apenas o núcleo e sem a necessidade de troca de ”transponder”. Neste caso, o maior problema é encontrar os mesmos slots em canais diferentes e sem possuir ”crosstalk”. A realocação com espectro diferente ocorre mantendo o mesmo canal e sem a necessidade de novo ”transponder”. Esta técnica, sem uso da ”push-pull”, provoca a interrupção na conexão, com a troca ou reconfiguração dos ”transponders” de origem e destino. Todas estas técnicas devem considerar a restrição de ”crosstalk”.

As redes SDM-EON utilizam roteamento RSCA. Zhao et al [Zhao et al. 2018] propôs um algoritmo de roteamento RSCA e desfragmentação do espectro baseado em compactação de espectro que permite explorar a interferência do ”crosstalk” e com isso liberar mais recurso. Esse algoritmo acrescenta a essa métrica a desfragmentação SS-DC e DS-SC. A SS-DC significa mesmo espectro em diferente núcleo e move o caminho óptico para outro núcleo no mesmo link com os mesmos slots de espectro. A DS-SC, significa espectro diferente no mesmo núcleo, e acontece quando não há recurso de espectro disponível em outros núcleos ou quando o ”crosstalk” excede um limite, com o caminho óptico sendo movido para outro espectro disponível no mesmo núcleo ao longo do caminho óptico.

As vantagens da desfragmentação com ganho substancial de diminuição de taxas de bloqueio nos diversos estudos em [Buffa et al. 2020] [Luo et al. 2019] [Ran et al. 2020] [Khi et al. 2021], combinado com os antigos esforços em mitigar as interrupções [Saad and Luo 2005] [Gencata and Mukherjee 2003], e com novas técnicas associadas a proteção [Oki et al. 2020b] [Sawa et al. 2019], justificam o constante estudo em melhorar as técnicas de desfragmentação como importantíssimo problema a ser superado.

### **3. Desfragmentação Baseado em Janela de Slots**

O algoritmo WindowDefrag segue os mesmos processos de desfragmentação do CASD-Push-pull do [Brasileiro et al. 2020], com RSCA, ”crosstalk”, SS-DC, DS-SC, porém, adicionando momentos reativos e proativos de desfragmentação em conjunto com um método que utiliza uma lista de janelas de segmentos de slots com as prioridades para a desfragmentação definida pela Equação 2. Este método faz uma busca de segmentos de slots através de janela deslizante de tamanho variável. O tamanho da janela varia de acordo com a largura de banda das demandas que são dimensionadas por quantidade de slots.

O WindowDefrag prioriza a desfragmentação das janelas de slots com menos caminhos ópticos a serem realocados e mais espaços livres. Os caminhos ópticos com menores saltos também são priorizados e vão propiciar menos alteração em toda a rede. O WindowDefrag possui em método que armazena em uma lista de janelas ou segmentos de slots na ordem decrescente de acordo com a Equação 2. Todas as variáveis da Equação 2 são referentes a cada janela armazenada na lista. A variável  $nLps$  armazena a quantidade de caminhos ópticos, a  $nHops$  guarda a quantidade de saltos de todos os caminhos ópticos, e a variável  $nFrees$  refere-se a quantidade de slots livres. Na prática, esta equação será utilizada para uma ordenação das janelas atendendo a prioridade de menor esforço computacional.

$$F_{c_1} = \alpha_1.nLps + \alpha_2.nHops + \alpha_3.nFrees \quad (2)$$

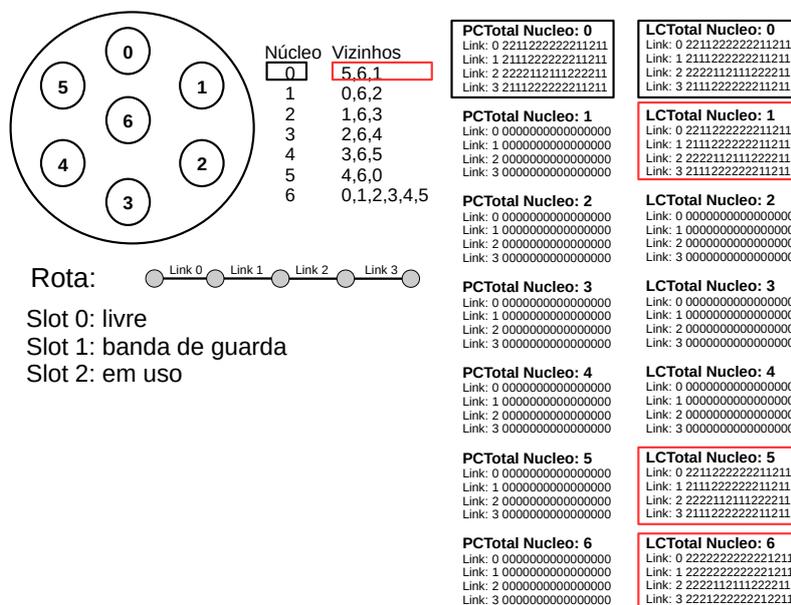


Figura 1. PCTotal x LCTotal

Inicialmente, o WindowDefrag utiliza um mecanismo que cria uma lista virtual que considera a interferência entre os canais vizinhos. Esta informação é utilizada como restrição para admitir uma conexão e evitar o "crosstalk". A Figura 1 mostra a diferença entre os slots utilizados na camada física, PCTotal, e a camada virtual, LCTotal, que verifica a disponibilidade de recurso. Apesar de existir recurso para a demanda no enlace, o LCTotal mostra que não é possível devido a interferência inter-núcleo ou "crosstalk". A PCTotal apresenta slots livres e a LCTotal apresenta slots disponíveis. Os slots disponíveis são os slots que não possuem interferências entre núcleos vizinhos. A LCTotal é atualizada periodicamente quando chega uma demanda. A política de RCSA do nosso algoritmo é baseada principalmente no LCTotal e na janela de segmentos e alocação "First-Fit". No caso da Figura 1 e considerando a demanda do canal 1, os canais 2,4 e 6 do

PCTotal não têm slots sendo utilizados na camada física, e caso seja utilizado como fragmento livre, poderá provocar "crosstalk". Com o LCTotal em mãos, o processo reativo e proativo ocorre sem o "crosstalk".

O WindowDefrag pode ser utilizado em eventos reativos e proativos. A desfragmentação ocorre para uma conexão que atravessa diversos enlaces afetando não somente a rota desta conexão como toda a rede. O método reativo tenta desfragmentar apenas quando a rota demandada é bloqueada. O método proativo tenta apenas descongestionar o máximo possível os enlaces da rota requisitada pela demanda antes de verificar a aceitação ou o bloqueio, ou seja, sempre que chega uma requisição de conexão. O nosso algoritmo utiliza o roteamento com k rotas de forma a estabelecer um parâmetro de rotas estáticas aplicando a mesma política de desfragmentação em toda a rede.

O processo reativo ocorre quando não existe recurso livre que atravesse os enlaces da rota em pelo menos um núcleo da fibra, ou seja, a demanda poderá ser bloqueada caso não se consiga a desfragmentação com a liberação de uma quantidade de slots que atenda a capacidade requisitada. No caso do método reativo, a realocação e liberação dos caminhos óticos pode fazer com que uma janela com tamanho igual à quantidade de slots requerida pela demanda seja liberada revertendo o bloqueio em curso. No processo proativo, a rota é analisada independente de estar bloqueada ou não. Neste processo, a desfragmentação, através de janelas segue um vetor de tamanhos de demanda e pode além de evitar o bloqueio em curso, diminuir a congestão da rota e da rede com a reorganização de recursos livres disponibilizando fragmentos livres de maior tamanho. O processo proativo tenta realocar o máximo de caminhos óticos com um tamanho de janela variável. Todos estes processos seguem a alocação "First-Fit".

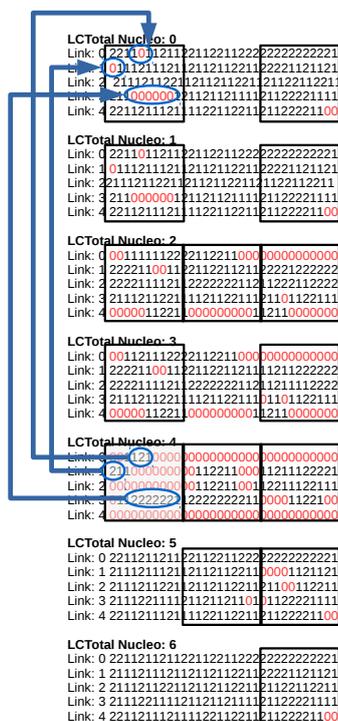


Figura 2. Desfragmentação SS-DC

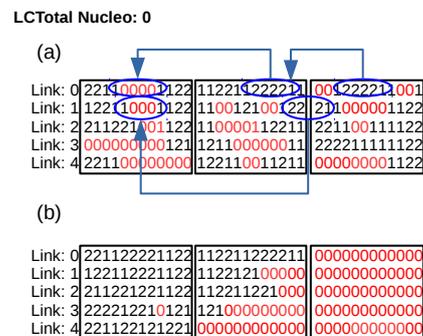


Figura 3. Desfragmentação DS-SC

As Figuras 2 e 3 destacam a técnica de janela de segmentos. A janela de segmento é retirada de cada núcleo seguindo a rota de enlaces da demanda que é requisitada dinamicamente. Na Figura 2, um exemplo tenta liberar uma janela de segmentos de tamanho igual a da demanda. A Figura 2 destaca a troca de núcleos, SS-DC, sem mudança de índice de slot e conseqüentemente mantendo mesmo "transponder". A Figura 3 mostra como os núcleos e enlaces da rota tem os seus caminhos óticos fragmentados e como a técnica DS-SC funciona. A Figura 3 apresenta o método DS-SC que faz desfragmentação das janelas de acordo com os tamanhos das demandas e pode provocar uma maior aglomeração de demandas devido ao processo "first-fit" e conseqüentemente diminuindo a fragmentação dos núcleos.

O nosso algoritmo utiliza uma Equação 2 que identifica a janela de menor custo operacional. A ideia é escolher uma janela menos congestionada, ou seja, com 3 métricas: Quantidade de caminhos óticos, quantidade saltos entre todos os caminhos óticos, e quantidade de slots livres. A janela menos congestionada vai provocar um menor esforço de desfragmentação exigindo menos configuração de "transponders" e menos inatividade durante a troca de posição de canal ou de slots, além de utilizar o "push-pull" [Zhang et al. 2014] como forma de eliminar a interrupção do tráfego.

### 3.1. WindowDefrag Algoritmo

O WindowDefrag funciona conforme Fluxograma 4 e recebe inicialmente como entrada a demanda  $(s,d,b,T,D,M)$ , com  $s$  sendo a origem,  $d$  o destino,  $b$  a banda requisitada, o  $T$  que representa um vetor com a seqüência de tamanhos das janelas, e o  $D$  que representa se vai ser diferente, DS-SC, ou mesmo espectro, SS-DC, e  $M$  representa se o método é reativo,  $R$  ou proativo,  $P$ . Em seguida, é calculada a menor rota para esta demanda,  $Dijkstra(s, d, k)$ , e criado a lista  $LCTotal$  com  $createLC()$ . Na seqüência, caso a  $M$  seja diferente de  $R$ , a  $CWindows$  cria um vetor de janelas de tamanho  $T$ . No caso de  $M = R'$ , o tamanho das janelas será igual ao da demanda. Após estes dados, esta janela é ordenada através do cálculo da Equação 2 e disponibilizado uma lista crescente de custo. A partir daí, cada janela será atendida com a desfragmentação do tipo  $D$  através das funções  $realocDS(window[i])$  ou  $realocSS(window[i])$ .

A avaliação da complexidade do nosso algoritmo segue a  $route = Dijkstra(s, d, k)$  com  $O(K|V|(|E| + |V|Log|V|))$ , onde  $K$  é o numero de caminhos,  $V$  o conjunto de nós e  $E$  o conjunto de enlaces da topologia da rede. O  $WDefrag()$  é composto das rotinas  $CreateLC$ ,  $CWindows$ ,  $SortWindows$ ,  $RealocDF$  E  $RealocSS$  conforme fluxograma da Figura 4. O  $CreateLC$ , que é responsável pela atualização do  $LCTotal$ , possui  $O(|E| * |C| * |S|)$ , com  $C$  como conjunto de núcleos da fibra ótica, e  $S$  como conjunto de slots. O  $CWindows$  tem  $O(|E| * |(S/T)| * |S|)$ , com o  $T$  como tamanho da janela onde  $(S/T)$  representa a quantidade de janelas. O  $SortWindows$  usa o bubblesort e tem  $O(|(S/T)|)$ . O  $RealocDF$  tem  $O(|(L)| * |(S/T)|)$  com  $L$  o número máximo de caminhos óticos, e, o  $realocSS$  com  $O(|(L)| * |(S/T)|)$  com a possibilidade de percorrer todas as janelas no pior caso. A complexidade de pior caso de todo o algoritmo é de  $O(K|V|(|E| + |V|Log|V|)) + O(|E| * |C| * |S|)^2 + O(|E| * |(S/T)^4| * |S|)$ .

## 4. Resultados Numéricos

O modelo de desfragmentação proposto é avaliado com variações se reativo e proativo com diferentes tamanhos de janelas, e comparado com um algoritmo da literatura CASD

[Brasileiro et al. 2020] através de simulações utilizando o simulador de redes ópticas ONS [Costa et al. ]. As topologias consideradas nas simulações foram o USANet com 24 nós e 43 links bidirecionais na Figura 5 e a PanEuro com 27 nós e 82 enlaces bidirecionais na Figura 5). Em cada simulação, 100.000 solicitações de conexão foram geradas para diferentes níveis de carga na rede medida em Erlang. Cada simulação foi realizada 5 vezes usando o método de replicação independente. Para os resultados apresentados, foram calculados intervalos de confiança com 95 % de confiança. As métricas utilizadas tem o objetivo de destacar o melhor trade-off entre fragmentação externa e taxa de bloqueio.

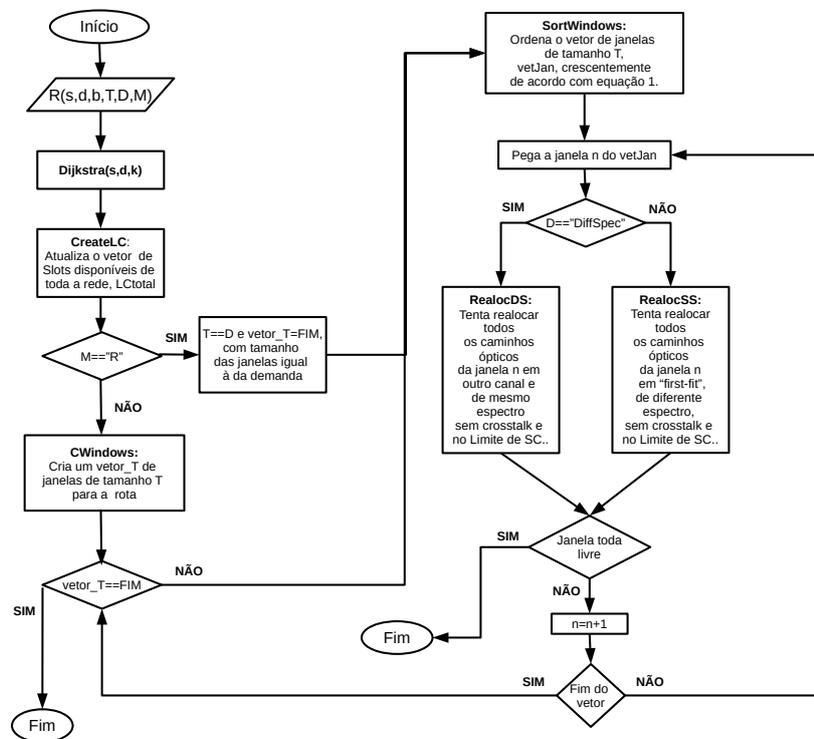
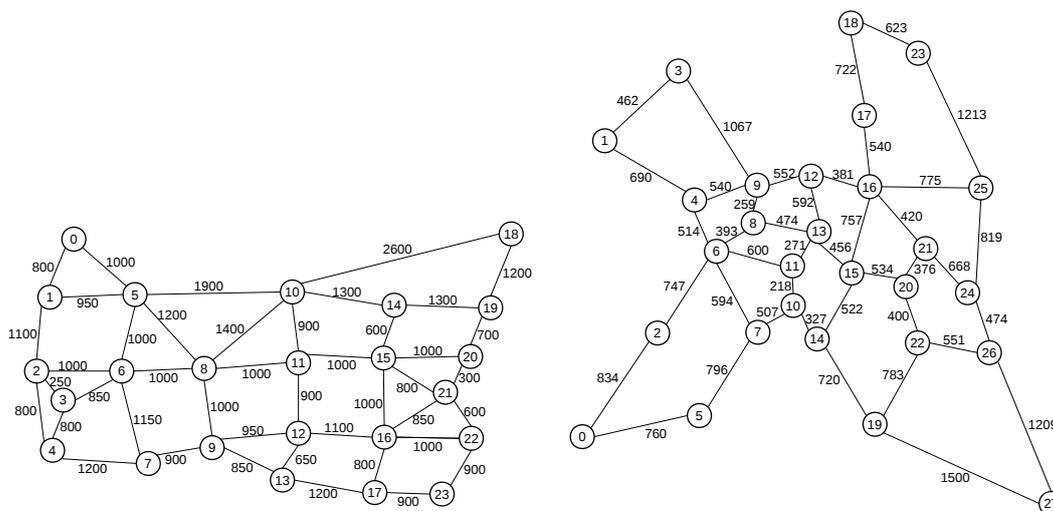


Figura 4. Fluxograma do WindowDefrag

Para esta simulação, cada link foi adotado com 4000 GHz e com as demandas utilizadas são: 10,20,40,100 e 200 Gb/s, num total de 320 slots de 12.500 GHz por fibra, e 2 slots de banda de guarda por fibra unidirecional, 4000 portas de agregação por nó, formato de modulação BPSK, e tráfego com uma distribuição uniforme. Todos os gráficos tem como parâmetro e momento de alta congestão a BBR de 5% que é por padrão o máximo aceitável, do algoritmo de melhor resultado.



**Figura 5. Rede USANet e Paneuro**

#### 4.1. Metodologia

Para obtermos os resultados, partimos de um estudo preliminar de descoberta de qual a melhor janela para a desfragmentação. Iniciamos com as soluções reativas onde cada janela tem o tamanho igual à quantidade da demanda em "Slots", ou seja, se  $D=200$  Gb/s, então 16 "Slots". Para uma comparação, os WDefrag005 e WDefrag006 executam o método reativo, e o WDefrag001, WDefrag002, WDefrag003, WDefrag004 e WDefrag005 executam o método proativo. A variação do tamanho das janelas ocorre para encontrar a forma mais rápida de liberar uma janela. As diversas formas de combinar os tamanhos das janelas mostram que o tamanho da janela deve ser flexível e que esta variação é a principal chave para a qualidade do algoritmo.

Com relação aos métodos proativos e reativos, os reativos WDefrag005 e WDefrag006 tem resultados sempre piores que os métodos proativos como WDefrag001, WDefrag002, WDefrag003 e WDefrag004. Importante destacar que a realocação de mesmo espectro gera mais fragmentação que o algoritmo sem desfragmentação, LessDefrag001, que usa apenas os métodos de RCSA. Entre os métodos proativos, o que utiliza lista decrescente de tamanho das janelas de segmentos, 16,12,8 e 4, WDefrag001, têm o melhor rendimento entre todos e superior aos que usam a forma crescente de tamanho de segmentos, 4,8,12 e 16, WDefrag002. Isto pode ser justificado pelo melhor resultado de se resolver inicialmente os segmentos maiores e que liberam mais slots livres. Por outro lado, priorizar a lista crescente T, pode inicialmente remover demandas de menores slots mas não liberar janelas e até gerar mais fragmentação. Uma comparação utilizando apenas uma lista de janela de 16, WDefrag003, mostra que é menos eficiente que uma lista de janelas variáveis, pois deixa de desfragmentar ignorando a realocação de demandas menores.

#### 4.2. Fragmentação Externa

Esta subseção faz uma comparação da fragmentação externa de toda a rede entre métodos proativos e reativos, com realocação de mesmo espectro e diferentes espectros, com desfragmentação e sem desfragmentação, na Figura 6. O cálculo da fragmentação baseia-se

na Equação 1. Inicialmente, podemos destacar o ganho substancial em comparação com o algoritmo da literatura CASD-Push-Pull [Brasileiro et al. 2020] nas duas topologias. O CASD-Push-Pull tem praticamente resultado pior que todos destacando que apenas o critério de “crosstalk” não garante uma melhor desfragmentação. Na USANet, o ganho é de aproximadamente 20% menos fragmentação. A fragmentação é um problema pior quando atualizado em topologias mais restritas ou de menor grau de conectividade como na PanEuro, mas o resultado do WDefrag001 é de também de até 20% menos fragmentação.

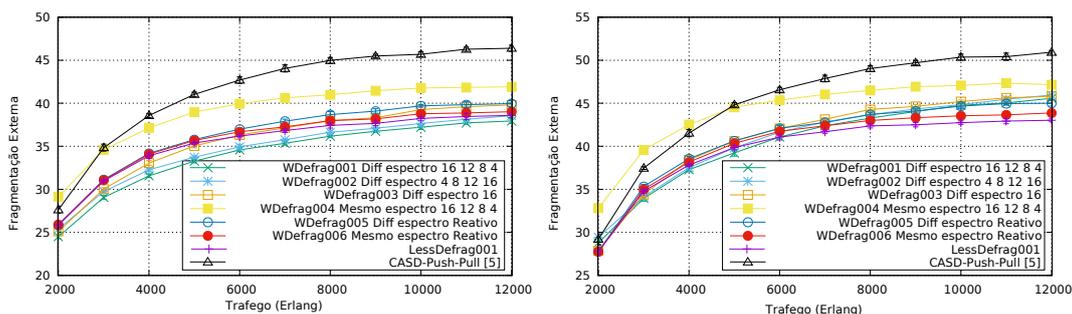


Figura 6. Fragmentação Externa na Rede USANet e PanEuro

### 4.3. MBR e MBBR

Esta subseção faz uma comparação as métricas de taxa média de bloqueio de banda (BBR), Figura 7, e taxa Média de bloqueio (BR), Figura 8, por chamada aceita na rede. Também podemos destacar o ganho substancial em comparação com o algoritmo da literatura CASD-Puss-Pull [Brasileiro et al. 2020] nas duas topologias. Nestas métricas, o CASD-Puss-Pull tem melhor resultado apenas que o WDefrag004 Mesmo Espectro 16 12 8 4, bem próximo ao WDefrag006 esmo espectro Reativo e também do LessDefrag001.

Na USANet, o WDefrag001 e o WDefrag002, e ambos de Diff espectro, tem ganho de BBR 4 vezes superior estendendo o momento de congestão em até 3 vezes a carga. Apesar da topologia mais restritiva ou de menor grau de conectividade como na PanEuro, o resultado do WDefrag001 e o WDefrag002 é 5 vezes melhor e estendendo o momento de congestão em 3 vezes a carga. Para a BR, o ganho chega a ser maior com resultados até 8 vezes melhor na USANet e até 10 vezes melhor na PANEuro.

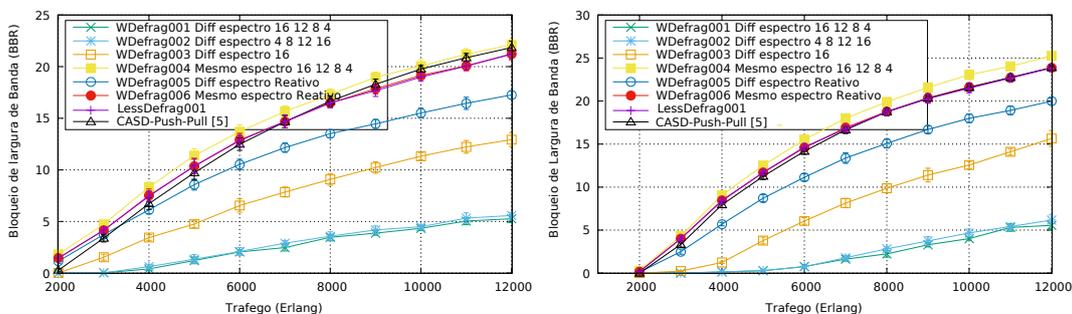


Figura 7. MBBR na Rede USANet e PanEuro

Com relação aos métodos proativos e reativos, os proativos tem ganhos de até 90%

de BBR e BR nas duas topologias. Na comparação entre métodos de realocação de mesmo e diferentes espectros, o resultado destaca a realocação de diferentes espectros e proativo como substancialmente melhor. O WDefrag001 também têm o melhor rendimento entre todos.

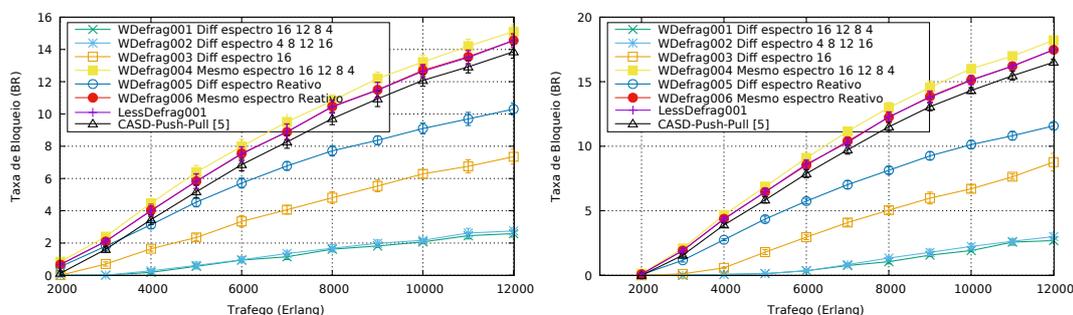


Figura 8. MBR na Rede USANet e PanEuro

## 5. Conclusão

Este artigo estuda a questão da desfragmentação do espectro em SDM-EONs e propõem uma abordagem diferente da literatura considerando a realocação das demandas através de uma janela de segmentos de slots, com a restrição de “crosstalk” entre canais da mesma fibra e enlace, com roteamento fixo e alocação first-fit. Comparando o SS-DC e o DS-SC, avaliamos que o SS-DC pode fragmentar mais ainda com a mudança de núcleo, e o DS-SC com um resultado consideravelmente muito melhor. Também é constatado que o uso concomitante do SS-DC e DS-SC no processo proativo não é viável, pois como o método DS-SC faz uma realocação em todos os canais, o método SS-DC pode sofrer nova realocação perdendo sua intenção. O nosso algoritmo pode alcançar um desempenho bem melhor que o algoritmo de referência em termos de probabilidade de bloqueio de largura de banda e fragmentação externa. Nossa principal contribuição para as redes SDM-EON é uma nova forma de liberar recurso com base no menor esforço e impacto em toda a rede destacando sua eficiência com os resultados numéricos apresentados. A eficiência da desfragmentação é demonstrada com o resultado de BBR quase 8 vezes menor que o da literatura. Isto demonstra que a desfragmentação é uma atividade fundamental para tornar a disponibilização dos recursos das redes SDM-EON mais eficiente.

## Referências

- Brasileiro, B., Costa, L. R., Silva, G. E. V., and Drummond, A. C. (2020). Empowering hitless spectral defragmentation in elastic optical networks with spatial multiplexing. In *2020 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, pages 1–4.
- Buffa, M., Morea, A., Poli, F., and Paparella, A. (2020). A new defragmentation algorithm for dynamic optical networks. In *2020 Italian Conference on Optics and Photonics (ICOP)*, pages 1–4.
- Costa, L. R., de Sousa, L. S., de Oliveira, F. R., da Silva, K. A., Júnior, P. J. S., and Drummond, A. C. ONS: Optical Network Simulator - WDM/EON. <http://comnet.unb.br/br/grupos/get/ons>.

- Gencata, A. and Mukherjee, B. (2003). Virtual-topology adaptation for wdm mesh networks under dynamic traffic. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 11(2):236–247.
- Khi, N. T., Romero Reyes, R., and Bauschert, T. (2021). Spectrum defragmentation with improved lightpath migration scheme in flex-grid networks. In *2021 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, pages 1–6.
- Lei, Y., Chen, Q., Jiang, Y., Zhang, Q., and Chen, B. (2019). Crosstalk-aware routing, core, and spectrum assignment with core switching in sdm-eons. In *2019 18th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON)*, pages 1–3.
- Luo, L., Liu, X., Zhang, J., Yu, C., and Shen, J. (2019). Blocking-triggered defragmentation mechanism based on the selected path for elastic optical network. In *2019 28th Wireless and Optical Communications Conference (WOCC)*, pages 1–4.
- Mrad, M., Suryahatmaja, U. S., Elsayed, A. O., Gharbi, A., and Esmail, M. A. (2022). Assignment-based heuristic for sdm networks with multi-core fibers. In *2022 5th International Conference on Advanced Systems and Emergent Technologies (ICASET)*, pages 279 – –284.
- Oki, E., Sawa, T., He, F., Sato, T., and Chatterjee, B. C. (2020a). Performance of hitless defragmentation with rerouting for quasi 1 + 1 protected elastic optical networks. In *2020 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, pages 1–4.
- Oki, E., Sawa, T., He, F., Sato, T., and Chatterjee, B. C. (2020b). Performance of hitless defragmentation with rerouting for quasi 1 + 1 protected elastic optical networks. In *2020 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, pages 1–4.
- Paira, S., Halder, J., Bhattacharya, U., and Chatterjee, M. (2020). A novel fragmentation-aware and energy-efficient multipath routing and spectrum allocation for prioritized traffic in protected eons. In *2020 11th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, pages 1–6.
- Posam, S. K., Bhyri, S. K., Gowrishankar, R., Challa, V. N., and Sanagapati, S. S. S. (2020). Reactive hitless hop tuning based defragmentation algorithm for enhanced spectrum efficiency in elastic optical networks. In *2020 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS)*, pages 1–6.
- Ran, J., Ding, D., Wang, J., Lin, C., and Li, Y. (2020). Design and simulation of spectrum defragmentation algorithm based on multiple criteria decision making. In *2020 International Conference on Robots Intelligent System (ICRIS)*, pages 658–660.
- Rosa, A., Cavdar, C., Carvalho, S., Costa, J., and Wosinska, L. (2012). Spectrum allocation policy modeling for elastic optical networks. *High Capacity Optical Networks and Emerging/Enabling Technologies*, pages 242–246.
- Saad, M. and Luo, Z.-Q. (2005). Reconfiguration with no service disruption in multifiber wdm networks. *Journal of Lightwave Technology*, 23(10):3092–3104.
- Sawa, T., He, F., Sato, T., Chatterjee, B. C., and Oki, E. (2019). Defragmentation considering link congestion in toggled 1+1 path protected elastic optical networks. In *2019*

*24th OptoElectronics and Communications Conference (OECC) and 2019 International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC)*, pages 1–3.

Sharma, A., Heera, B. S., Lohani, V., and Singh, Y. N. (2022). Fragmentation-aware routing, core and spectrum assignment in multi-core fiber based sdm-eon. In *2022 Workshop on Recent Advances in Photonics (WRAP)*, pages 01–02.

Singh, S. K., Bziuk, W., and Jukan, A. (2017). Analytical performance modeling of spectrum defragmentation in elastic optical link networks. *Optical Switching and Networking*, 24:25 – 38.

Wang, J., Chen, F., Li, J., Ran, J., and Zhang, Y. (2021). Research on spectrum fragmentation algorithm for space division multiplexing elastic optical network based on mcdm. In *2021 International Conference on Electronic Information Engineering and Computer Science (EIECS)*, pages 505–509.

Wang, Y. (2019a). A research on spectrum defragmentation algorithms in elastic optical network. In *2019 2nd World Symposium on Communication Engineering (WSCE)*, pages 78–81.

Wang, Y. (2019b). A research on spectrum defragmentation algorithms in elastic optical network. In *2019 2nd World Symposium on Communication Engineering (WSCE)*, pages 78–81.

Wu, J., Zhang, M., Wang, F., Yue, Y., and Huang, S. (2014). An optimal independent sets based greedy spectral defragmentation algorithm in elastic optical network. In *2014 13th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON)*, pages 1–4.

Zhang, M., You, C., Jiang, H., and Zhu, Z. (2014). Dynamic and adaptive bandwidth defragmentation in spectrum-sliced elastic optical networks with time-varying traffic. *Journal of Lightwave Technology*, 32(5):1014–1023.

Zhao, Y., Hu, L., Zhu, R., Yu, X., Wang, X., and Zhang, J. (2018). Crosstalk-aware spectrum defragmentation based on spectrum compactness in space division multiplexing enabled elastic optical networks with multicore fiber. *IEEE Access*, 6:15346–15355.