

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ELETRÔNICA E SISTEMAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

BRUNO VINÍCIUS DE ARAUJO CORREIA

**HEURÍSTICAS E META-HEURÍSTICA PARA EFICIENTE
ALOCÇÃO E USO DE UNIDADES DE DESFRAGMENTAÇÃO
ESPECTRAL EM REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS**



Recife

2018

BRUNO VINÍCIUS DE ARAUJO CORREIA

**HEURÍSTICAS E META-HEURÍSTICA PARA EFICIENTE ALOCAÇÃO E USO DE
UNIDADES DE DESFRAGMENTAÇÃO ESPECTRAL EM REDES ÓPTICAS
ELÁSTICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Comunicações.

Orientador: Prof. Dr. Raul Camelo de Andrade Almeida Jr.

Recife

2018

BRUNO VINÍCIUS DE ARAUJO CORREIA

**HEURÍSTICAS E META-HEURÍSTICA PARA EFICIENTE
ALOCÇÃO E USO DE UNIDADES DE
DEFRAGMENTAÇÃO ESPECTRAL EM REDES
ÓPTICAS ELÁSTICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: Recife, 26 de julho de 2018.

BANCA EXAMINADORA

Raul Camelo de Andrade Almeida Jr.
(Orientador e Membro Titular Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Iguatemi Eduardo da Fonseca (Membro
Titular Externo)
Universidade Federal da Paraíba

Daniel Augusto Ribeiro Chaves (Membro
Titular Externo)
Universidade de Pernambuco

Dedico este trabalho à minha família, presente em todos os momentos ao longo dessa jornada.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Wellington e Oneida, pelo constante incentivo durante todos os anos de minha formação.

Ao meu irmão, Pedro Victor, pelo companheirismo sempre presente.

Ao meu professor e orientador, Prof. Dr. Raul Camelo, pela dedicação prestada, ensinamentos passados, apoio fornecido e paciência mostrada, ao longo desses mais de dois anos.

A todos os professores da pós-graduação, da UFPE e de outras instituições, que contribuíram em meus conhecimentos.

Aos meus amigos da pós-graduação, Carlos, Clayton, Darlisson, Elias, José, Paulo, Ravi, Rodrigo, Thiago e demais, pelas conversas, trocas de informação e apoio durante diversos momentos.

A UFPE, em especial ao PPGEE, pela oportunidade oferecida.

A FACEPE pelo apoio financeiro.

“The good life is one inspired by love and guided by knowledge.”

Bertrand Russell

RESUMO

Este trabalho apresenta duas propostas heurísticas e uma meta-heurística para uma alocação eficiente de módulos de *multicasting* de supercanal, por meio de mistura de quatro ondas, em unidades de desfragmentação espectral, para aplicação de multiplexação óptica inversa, presentes em nós ópticos de redes ópticas elásticas. Com o uso dessa unidade, descontiguidade pode ser aplicada em algumas conexões que não poderiam ser estabelecidas da forma regular. Isso permite que alguns fragmentos da rede formados por conexões previamente estabelecidas possam ser preenchidos. A primeira heurística usa uma avaliação iterativa e incremental para realizar a alocação entre os nós da rede para um número fixo de módulos. A segunda faz uso das particularidades da aplicação da técnica estudada neste trabalho para definir uma constante que determina uma adequada distribuição dos módulos entre nós mais e menos congestionados. A meta-heurística usada neste trabalho é baseada no algoritmo genético NSGA-II e usada para criar uma frente de soluções (distribuições) não dominadas para diversas quantidades de módulos na rede, conhecida como frente de Pareto. A análise de cada algoritmo é realizada por meio da quantificação da probabilidade de bloqueio de chamada para diversas topologias físicas de redes distintas. Também é realizada uma comparação entre os ganhos desses algoritmos, além de um pequeno estudo sobre o tempo de solução de cada um. Este trabalho ainda apresenta uma hipótese do principal fator responsável pelos valores de probabilidade de bloqueio de chamada da aplicação da técnica estudada, propondo uma forma de uso dos módulos de modo a reduzir um pouco mais tal probabilidade. Também faz uso de uma alocação espectral específica, aplicada juntamente à técnica de multiplexação óptica inversa, para tentar produzir redução na probabilidade de bloqueio de chamada.

Palavras-chave: Multiplexação óptica inversa. *Multicasting* de supercanal. Desfragmentação espectral. Redes ópticas elásticas.

ABSTRACT

This work presents two heuristics and one meta-heuristic proposals for an efficient allocation of superchannel multicasting modules, using four-wave mixing, in defragmentation units, for optical inverse multiplexing application, present in optical nodes for elastic optical networks. Through the use of this unit can be applied descontiguity in unestablished connection and that cannot be allocated in regular form, filling the network fragments made by others connections. The first heuristic uses an iterative and incremental evaluation to perform the allocation between the network nodes for a fixed amount of modules. The second one makes use of the technique application studied in this work, along with the use of a constant that determines the modules dispersion between the least and most congested nodes, to find a good distribution. The meta-heuristic used in this work is based on the NSGA-II genetic algorithm and it is used to create a solutions (distributions) non-dominated front for several amounts of modules in the network, known as Pareto front. The analysis of each algorithm is performed by quantifying the call blocking probability for several physical topologies of different networks. A comparison between the gains of these algorithms is also performed, as also a short study about the solution time of each one. This work still presents a hypothesis of the main factor responsible for the call blocking probability values of the studied technique application, proposing a way of using the modules in order to try to produce gain in this probability. It also makes use of a specific spectrum allocation, applied together with the optical inverse multiplexing technique, trying to produce gains in the call blocking probability.

Keywords: Optical inverse multiplexing. Superchannel multicasting. Espectral defragmentation. Elastic optical network.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Previsão do aumento do tráfego IP mundial entre os anos de 2016 e 2021. | 16 |
| Figura 2 – Comparação das grades espectrais entre as redes WDM e EON. | 17 |
| Figura 3 – Formato de onda na frequência e no tempo de um sinal CO-OFDM | 26 |
| Figura 4 – Formato de onda na frequência e no tempo de um sinal N-WDM | 26 |
| Figura 5 – Ilustração do problema de fragmentação em redes EON. | 29 |
| Figura 6 – Ilustração de tentativa de alocação de um requisição sem e com uso da técnica de multiplexação óptica inversa. | 30 |
| Figura 7 – Ilustração do resultado de um <i>multicasting</i> de supercanal por meio do efeito não-linear de FWM. | 32 |
| Figura 8 – Comparação entre os esquemas de espaçamento entre <i>pumps</i> EGS e RPA. | 33 |
| Figura 9 – Ilustração das etapas do processo completo de OIM. | 34 |
| Figura 10 – Ilustração do receptor do sinal não contíguo. | 34 |
| Figura 11 – Arquitetura de um nó com capacidade de OIM | 37 |
| Figura 12 – Topologias utilizadas nas simulações. | 38 |
| Figura 13 – Gráficos de probabilidade de bloqueio versus carga da rede com comparação entre uso das unidades de desfragmentação como conversor de frequência central, como OIM e sem uso da técnica. | 38 |
| Figura 14 – Curvas de probabilidade de bloqueio de chamada versus carga da rede para diferentes quantidades de módulos MS por nó, variando entre 0 e 5. | 39 |
| Figura 15 – Curvas de probabilidade de bloqueio de chamada versus carga da rede para diferentes quantidades de módulos MS, com 2 e 3 <i>pumps</i> , por nó. | 40 |
| Figura 16 – Curvas de probabilidade de bloqueio de chamada versus número de <i>slots</i> das requisições para da topologia NSFNet com quantidades de módulos MS de 14 e 42, no total, e sem módulos presentes. | 41 |
| Figura 17 – Curvas de probabilidade de bloqueio de chamada versus número de <i>slots</i> das requisições para da topologia alemã com quantidades de módulos MS de 17 e 51, no total, e sem módulos presentes. | 42 |
| Figura 18 – Curvas de probabilidade de bloqueio de chamada versus número de <i>slots</i> das requisições para da topologia italiana com quantidades de módulos MS de 14 e 42, no total, e sem módulos presentes. | 43 |
| Figura 19 – Gráficos da probabilidade de bloqueio de chamada versus carga para 3 diferentes quantidades de módulos total na rede para a topologia alemã com: (a) 17 módulos; (b) 34 módulos; (c) 51 módulos para as seguintes distribuições: (1) Distribuição uniforme; (2) Distribuição incremental de melhor P_B | 48 |

| | |
|--|----|
| Figura 20 – Gráficos da probabilidade de bloqueio de chamada versus carga para 3 quantidades de módulos total para a topologia italiana com: (a) 14 módulos; (b) 28 módulos; (c) 42 módulos para as seguintes distribuições: (1) Distribuição uniforme; (2) Distribuição incremental de melhor P_B | 48 |
| Figura 21 – Gráficos da probabilidade de bloqueio de chamada versus carga para 3 quantidades de módulos total para a topologia NSFNet com: (a) 14 módulos; (b) 28 módulos; (c) 42 módulos para as seguintes distribuições: (1) Distribuição uniforme; (2) Distribuição incremental de melhor P_B | 49 |
| Figura 22 – Gráfico da variação da P_B versus variação do valor da constante de amortecimento α para a topologia NSFNet com: (1) 14 módulos; (2) 28 módulos; (3) 42 módulos. | 51 |
| Figura 23 – Gráfico da variação da P_B versus variação do valor da constante de amortecimento α para a topologia alemã com: (1) 17 módulos; (2) 34 módulos; (3) 51 módulos. | 52 |
| Figura 24 – Gráfico da variação da P_B versus variação do valor da constante de amortecimento α para a topologia italiana com: (1) 14 módulos; (2) 28 módulos; (3) 42 módulos. | 52 |
| Figura 25 – Gráficos da probabilidade de bloqueio de chamada versus carga para 3 quantidades de módulos total para a topologia alemã com: (a) 17 módulos; (b) 34 módulos; (c) 51 módulos para as seguintes distribuições: (1) Distribuição uniforme; (2) Distribuição de Uso (α). | 53 |
| Figura 26 – Gráficos da probabilidade de bloqueio de chamada versus carga para 3 quantidades de módulos total para a topologia italiana com: (a) 14 módulos; (b) 28 módulos; (c) 42 módulos para as seguintes distribuições: (1) Distribuição uniforme; (2) Distribuição de Uso (α). | 53 |
| Figura 27 – Gráficos da probabilidade de bloqueio de chamada versus carga para 3 quantidades de módulos total para a topologia NSFNet com: (a) 14 módulos; (b) 28 módulos; (c) 42 módulos para as seguintes distribuições: (1) Distribuição uniforme; (2) Distribuição de Uso (α). | 54 |
| Figura 28 – Gráficos da primeira frente de Pareto de cada iteração para as topologias: (a) Alemã; (b) Italiana; (c) NSFNet para as iterações: (1) 1; (2) 5; (3) 10; (4) 20; (5) 50. | 56 |
| Figura 29 – Gráficos da probabilidade de bloqueio de chamada versus carga para 3 quantidades de módulos total para a topologia alemã com: (a) 17 módulos; (b) 34 módulos; (c) 51 módulos para as seguintes distribuições: (1) Distribuição uniforme; (2) Distribuição do GA. | 56 |

| | |
|--|----|
| Figura 30 – Gráficos da probabilidade de bloqueio de chamada versus carga para 3 quantidades de módulos total para a topologia italiana com: (a) 14 módulos; (b) 28 módulos; (c) 42 módulos para as seguintes distribuições: (1) Distribuição uniforme; (2) Distribuição do GA. | 57 |
| Figura 31 – Gráficos da probabilidade de bloqueio de chamada versus carga para 3 quantidades de módulos total para a topologia NSFNet com: (a) 14 módulos; (b) 28 módulos; (c) 42 módulos para as seguintes distribuições: (1) Distribuição uniforme; (2) Distribuição do GA. | 57 |
| Figura 32 – Gráfico com o número de simulações efetuadas versus a quantidade de módulos MS total distribuída para as heurísticas incremental e de frequência de uso para as topologias NSFNet, italiana e alemã. | 59 |
| Figura 33 – Gráficos de probabilidade de bloqueio de chamada versus número de módulos MS total para as topologias: (a) NSFNet; (b) italiana; (c) alemã para: (1) Distribuição uniforme; (2) Distribuição do GA (Iteração 50); (3) Heurística de frequência de uso; (4) Heurística incremental. | 59 |
| Figura 34 – Gráficos com as quantidades de requisições que tentaram a aplicação da técnica de multiplexação óptica inversa e as quantidades de requisições que conseguiram efetuá-la, ambas apresentadas de acordo com o número de enlaces de suas respectivas rotas, para as topologias: (a) NSFNet; (b) alemã. | 62 |
| Figura 35 – Ilustração de compactação espectral realizada através de conversão de frequência central em um nó intermediário. | 62 |
| Figura 36 – Gráficos de probabilidade de bloqueio de chamada com comparação entre uso de módulos apenas para conexões sem disponibilidade de recursos fim-a-fim e o uso para compactação espectral através de conversão de frequência central. | 64 |
| Figura 37 – Gráfico da probabilidade de bloqueio de chamada versus carga na rede para as heurísticas de alocação espectral FF e MSCL da topologia NSFNet. | 65 |
| Figura 38 – Gráficos comparativos das heurísticas FF e MSCL para 1 e 3 módulos MS por nó da topologia NSFNet. | 66 |
| Figura 39 – Gráficos de probabilidade de bloqueio de chamada versus carga comparando a possibilidade de uso de OIM no nó de origem da requisição com seu uso apenas em nós intermediários da rota. | 66 |
| Figura 40 – Tipos de cruzamentos para algoritmos genéticos: (a) Um ponto; (b) Dois pontos; (c) Uniforme. | 77 |
| Figura 41 – Mutação. | 77 |
| Figura 42 – Vetor com as diferentes proporções para cada indivíduo da população. | 78 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Número de <i>slots</i> necessários, de acordo com a combinação taxa de transmissão junto com a modulação. | 27 |
| Tabela 2 – Tabela com o número de vezes que cada nó realizou OIM e o número máximo de módulos usados simultaneamente por nó, ambos para as topologias alemã, italiana e NSFNet. | 45 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|--------|--|
| BV-WSS | Bandwidth-Variable Wavelength-Selective Switch |
| CAPEX | Capital Expenditure |
| DJK | Dijkstra |
| EON | Elastic Optical Networks |
| FF | First-Fit |
| FWM | Four-Wave Mixing |
| GA | Genetic Algorithm |
| HNLF | Highly Non-Linear Fiber |
| MS | Multicasting de Supercanal |
| MSCL | Min Slot-Continuity Capacity Loss |
| OIM | Optical Inverse Multiplexing |
| OPEX | Operational Expenditure |
| RWA | Routing and Wavelength Assignment |
| RSA | Routing and Spectrum Allocation |
| SSS | Spectrum Selective Switch |
| WDM | Wavelength-Division Multiplexing |

SUMÁRIO

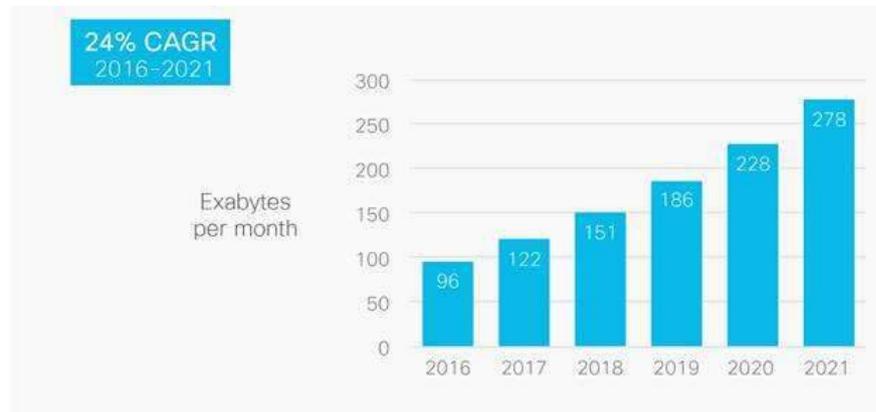
| | | |
|--------------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 16 |
| 1.1 | MOTIVAÇÕES | 16 |
| 1.2 | OBJETIVOS | 18 |
| 1.3 | ESTRUTURA DO TRABALHO | 18 |
| 2 | ASPECTOS REDES ÓPTICAS | 20 |
| 2.1 | ASPECTOS GERAIS SOBRE REDES DE COMUNICAÇÃO E REDES ÓPTICAS | 20 |
| 2.2 | REDES ÓPTICAS WDM E O PROBLEMA RWA | 21 |
| 2.2.1 | Roteamentos e suas classificações | 22 |
| 2.2.1.1 | Roteamento fixo | 23 |
| 2.2.1.2 | Roteamento fixo-alternativo | 23 |
| 2.2.1.3 | Roteamento adaptativo | 24 |
| 2.2.2 | Atribuição de comprimento de onda | 25 |
| 2.3 | REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS E O PROBLEMA RSA | 25 |
| 2.3.1 | Roteamento e alocação espectral em redes EON | 27 |
| 2.3.2 | Fragmentação em redes EON | 28 |
| 3 | MULTIPLEXAÇÃO ÓPTICA INVERSA | 30 |
| 3.1 | INTRODUÇÃO | 30 |
| 3.2 | PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO | 31 |
| 3.3 | ARQUITETURA DE UM NÓ ÓPTICO COM CAPACIDADE DE OIM | 36 |
| 3.4 | ANÁLISE DA TÉCNICA DE OIM APLICADA EM CENÁRIOS DE REDES ÓPTICAS | 37 |
| 4 | HEURÍSTICAS E META-HEURÍSTICA APLICADAS À ALOCAÇÃO DE MÓDULOS MS | 44 |
| 4.1 | CONCEITOS GERAIS DE HEURÍSTICAS, META-HEURÍSTICAS E OTI- MIZAÇÃO MULTI-OBJETIVO | 44 |
| 4.2 | APLICAÇÕES DE HEURÍSTICAS E META-HEURÍSTICAS PARA ALO- CAÇÃO DE MÓDULOS DE <i>MULTICASTING</i> DE SUPERCANAL EM UNIDADES DE DESFRAGMENTAÇÃO ESPECTRAL COM OIM | 45 |
| 4.3 | HEURÍSTICAS DE ALOCAÇÃO DE MÓDULOS MS INCREMENTAL COM MELHOR PROBABILIDADE DE BLOQUEIO | 46 |
| 4.3.1 | Resultados | 47 |

| | | |
|--------------|---|-----------|
| 4.4 | HEURÍSTICAS DE ALOCAÇÃO DE MÓDULOS MS BASEADA NA FREQUÊNCIA DE USO DOS NÓS INTERMEDIÁRIOS | 49 |
| 4.4.1 | Resultados | 51 |
| 4.5 | META-HEURÍSTICAS DE ALOCAÇÃO DE MÓDULOS MS BASEADA EM ALGORITMO GENÉTICO | 52 |
| 4.5.1 | Resultados | 55 |
| 4.6 | ANÁLISE E COMPARAÇÃO ENTRE AS POLÍTICAS DE ALOCAÇÃO DE MÓDULOS MS | 58 |
| 5 | TENTATIVAS PARA AUMENTO DA EFICIÊNCIA DA TÉCNICA DE MULTIPLEXAÇÃO ÓPTICA INVERSA | 61 |
| 5.1 | PROPORÇÃO DE BLOQUEIOS DE PRIMEIRO SALTO | 61 |
| 5.2 | USO DE MÓDULOS MS DE ACORDO COM A COMPACTAÇÃO ESPECTRAL | 61 |
| 5.3 | APLICAÇÃO DA HEURÍSTICA MSCL PARA REDUÇÃO DOS BLOQUEIOS DE PRIMEIRO <i>HOP</i> | 64 |
| 5.4 | APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE OIM NO NÓ ORIGEM | 66 |
| 6 | CONCLUSÕES | 68 |
| 6.1 | CONSIDERAÇÕES GERAIS E PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES | 68 |
| 6.2 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 69 |
| | REFERÊNCIAS | 71 |
| | APÊNDICE A – ALGORITMOS GENÉTICOS | 76 |
| | APÊNDICE B – FUNÇÕES USADAS PELO GA | 79 |

1 INTRODUÇÃO

Devido ao contínuo aumento na utilização dos serviços oferecidos por meio da Internet, tais como *streaming* de vídeos, redes virtuais privadas, Internet das coisas (IoT – *Internet of Things*), televisão por Internet, entre outros, há conseqüentemente uma maior demanda para as redes que dão suporte aos sistemas de comunicações. Na maior parte, essas redes são compostas por redes ópticas transparentes (*all-optical networks*) de alta capacidade (*backbone*) (ILYAS; MOUFTAH, 2003). De acordo com a Cisco, o tráfego IP mensal previsto para 2021 é de 278 EB (*Exabytes*), apresentando uma taxa de crescimento anual de 24%, partindo do ano de 2016 (CISCO, 2017), conforme mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Previsão do aumento do tráfego IP mundial entre os anos de 2016 e 2021.



Fonte: CISCO VNI Forecast Highlights tool.

Se as previsões se mostrarem corretas, as redes ópticas desempenharão um papel ainda mais fundamental tanto na sustentação das atividades já largamente utilizadas, como também no desenvolvimento de novas tecnologias que dependam de um rápido tráfego de informações para sua implementação.

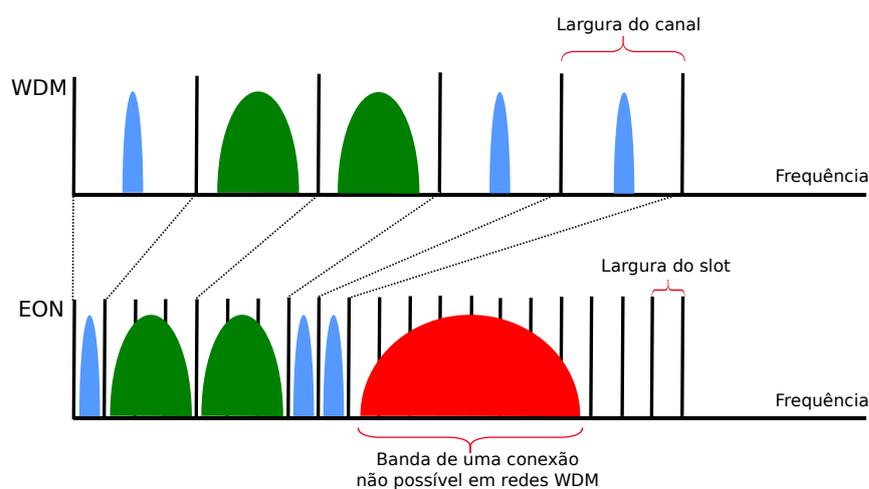
1.1 MOTIVAÇÕES

Impulsionado pela demanda por mais tráfego, e conseqüentemente, por mais largura de banda espectral nas fibras ópticas, usadas como meio de transmissão, buscam-se novas e mais eficientes tecnologias de transmissão, como também melhorias que aumentem a eficiência espectral dos sistemas já implementados. Em sua maior parte, os atuais sistemas de comunicação com redes ópticas transparentes aplicam a tecnologia WDM (*Wavelength-Division Multiplexing*). Nesse tipo de rede, o espectro da fibra é dividido em canais igualmente espaçados, com valor mais usual de 50 GHz para sistemas DWDM (*Dense WDM*) (ITU-T: TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU, 2012) e de pelo menos 20 nm para sistemas CWDM (*Coarse WDM*) (ITU-T: TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR

OF ITU, 2003), de acordo com cada aplicação específica. Essa rigidez na grade espectral acarreta em baixa eficiência de uso, pois requisições que apresentam larguras de bandas distintas irão ocupar o mesmo espaço espectral (um canal), conforme apresentado na literatura (GERSTEL et al., 2012; CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015; TOMKOS et al., 2014) e ilustrado na grade WDM da Figura 2. A ocupação espectral distinta se deve ao fato de ela ser proporcional à taxa de transmissão da requisição que será efetuada, juntamente com o formato de modulação usado por ela. Outra característica dessa rede é a impossibilidade da transmissão de requisições que ocupem mais largura de banda que o tamanho do canal, inviabilizando a transmissão de taxas mais altas (GERSTEL et al., 2012).

Para abordar essa ineficiência espectral, é preciso adotar sistemas que possuam mais flexibilidade, visando aproveitamento da capacidade espectral da fibra maior e o aumento das possíveis taxas de transmissão. Nesse sentido foi proposto o conceito de Redes Ópticas Elásticas (EON – *Elastic Optical Network*) que, de acordo com Jinno *et al* (JINNO et al., 2009), são capazes de uma alocação de uma largura de banda bem próxima à ocupada pelo canal. Esse tipo de rede possui uma grade espectral mais fina do que a WDM, à qual atribui-se a nomenclatura de *slot*. Adicionalmente, permite-se agora a junção de vários *slots* para a formação de um canal agrupado, denominado supercanal, com largura de banda mais ajustada ao formato de modulação e à taxa de transmissão requisitada (GERSTEL et al., 2012; TOMKOS et al., 2014; BOSCO et al., 2011; BOSCO et al., 2010). A figura 2 ilustra, por meio da comparação entre uma grade espectral fixa WDM de 50 GHz e uma grade espectral flexível de uma EON com largura de 12,5 GHz, a redução na utilização da banda da fibra como também a capacidade de transmissão de taxas mais altas por meio do uso dessa tecnologia.

Figura 2 – Comparação das grades espectrais entre as redes WDM e EON.



Fonte: o autor.

As vantagens obtidas com as redes EON trazem em contrapartida uma maior complexidade ao problema de alocação de recursos em redes ópticas. Para redes WDM, essa alocação é feita com a solução do problema de roteamento e atribuição de comprimento de onda (RWA – *Routing and Wavelength Assignment*), que, quando solucionado, acarreta na criação de um

caminho óptico (*lightpath*) responsável pela transmissão da chamada. Esse caminho óptico deverá ocupar o mesmo comprimento de onda em todos os enlaces que a rota ocupará, sendo essa a sua principal restrição (ZANG; JUE; MUKHERJEE, 2000). O problema equivalente para redes EON é o de roteamento e alocação espectral (RSA – *Routing and Spectrum Allocation*), no qual, além da restrição de continuidade de *slots* similar à continuidade de comprimento de onda das redes WDM, há também a restrição de contiguidade, o que exige a consecutividade do conjunto de *slots* que formarão a conexão (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015). Essa restrição acarreta no surgimento de comportamentos não apresentados nas redes WDM, entre eles o de fragmentação espectral (TOMKOS et al., 2014; WANG; MUKHERJEE, 2013). Conseqüentemente, pode ser que uma conexão não possa ser atendida pela rede mesmo havendo uma quantidade de *slots* livres maior ou igual que a requisitada pela demanda, porém sem obedecer a restrição de continuidade e/ou a de contiguidade. Isso leva a uma ineficiente utilização de recursos e degradação do desempenho da rede (CHATTERJEE; BA; OKI, 2017).

Uma das formas de mitigar o impacto da fragmentação espectral das EONs se dá por meio do uso de Multiplexação Óptica Inversa (OIM – *Optical Inverse Multiplexing*) baseado em *multicasting* de supercanal (GUO et al., 2014; ZHU et al., 2016; XU et al., 2014; ZHU et al., 2017; Zhangyuan Chen et al., 2014). Com essa técnica, é possível dividir o supercanal em *slots* não-contíguos, com o objetivo de ocupar os fragmentos previamente gerados na rede por outras requisições. Este trabalho faz uso dessa técnica, como forma de mitigar os efeitos da fragmentação espectral.

1.2 OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho consiste na aplicação da técnica de OIM, com intuito de mitigar os efeitos da desfragmentação espectral, em cenários de redes ópticas elásticas. Essa aplicação se dividiu em duas partes.

A primeira delas é feita na fase de planejamento da rede na forma de buscar uma alocação de módulos, responsáveis pela aplicação da técnica de OIM, eficiente entre os nós da rede. Essa alocação permite um melhor aproveitamento dos recursos da rede, diminuindo os custos de implantação da capacidade de desfragmentação espectral nessa rede. Essa etapa foi realizada através da aplicação de heurísticas e meta-heurísticas aplicadas ao problema.

A segunda etapa, aplicada na fase de operação da rede, tem por objetivo o aumento da eficiência da técnica de OIM, por meio de variações na forma de uso dos módulos e do uso de heurísticas de alocação espectral, ambas também visando aplicação em distintos cenários de rede.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação está estruturada da seguinte forma:

No Capítulo 2 as redes ópticas são abordadas em detalhes, juntamente ao problema de alocação de recursos RWA, para redes WDM, e RSA, para redes EON. Ainda será detalhado o problema de fragmentação espectral presente em redes ópticas elásticas, e as diversas formas como ele pode ser abordado.

O Capítulo 3 descreve de maneira detalhada os conceitos da técnica de multiplexação óptica inversa usada ao longo de todo o trabalho apresentado, como também aborda seu princípio físico de funcionamento. Também será especificada a arquitetura de um nó óptico capaz de aplicar a técnica. Ainda são mostrados resultados de simulações computacionais, para cenários de redes distintos, que comparam os usos dos módulos de *multicasting* de supercanal como conversores de frequência central e aplicação de OIM. Também são apresentados resultados para o aumento do número de módulos nos nós da rede.

O Capítulo 4 apresenta conceitos sobre heurísticas, meta-heurísticas e otimização multi-objetivo encontradas na literatura. Posteriormente, duas heurísticas para alocação de módulos de *multicasting* são propostas e avaliadas, juntamente à avaliação de uma meta-heurística, também para alocação de módulos. Também é realizada uma comparação entre os algoritmos usados ao longo do capítulo.

No Capítulo 5 são propostas duas formas distintas de aplicação da técnica de OIM como tentativas de aumentar o desempenho da rede através de sua aplicação. A primeira delas usa de maneira diferente os recursos de OIM, aplicando-os em conexões que, mesmo sem seu uso, podem ser estabelecidas. A segunda forma utiliza uma heurística de alocação espectral específica, juntamente à aplicação da técnica, avaliando se a combinação gera melhoras no desempenho de cenários de rede.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões finais sobre este trabalho, baseados nos resultados obtidos e apresentados nos capítulos anteriores. Discorre também, de maneira sucinta, sobre possíveis trabalhos futuros que possam dar continuidade à pesquisa efetuada neste trabalho.

2 ASPECTOS REDES ÓPTICAS

Este capítulo aborda o conceito geral de redes ópticas, que é um tipo de rede de comunicação existente na atualidade. Também trata especificamente da tecnologia ainda bastante usada atualmente, as redes WDM, detalhando as formas de solução para o problema de alocação de recursos nesse tipo de rede. Posteriormente, são apresentados em detalhe os conceitos de um novo tipo de rede óptica, já amplamente aceita nas comunidades acadêmicas e nos meios comerciais conhecida como redes ópticas elásticas, que surge como uma nova possibilidade para substituição dos sistemas atuais. Por último será abordado o problema de fragmentação espectral presente nas EON's.

2.1 ASPECTOS GERAIS SOBRE REDES DE COMUNICAÇÃO E REDES ÓPTICAS

Devido à variedade de funções exercidas por diferentes componentes, vendidos por diferentes fabricantes e usados de maneira conjunta, as redes de comunicação são divididas em camadas, conforme proposto pela ISO (*International Standards Organization*) no começo da década de 80 (RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 1998). Esse modelo, de nome OSI-ISO (*Open Systems Interconnection-ISO*), apresenta 7 camadas empilhadas verticalmente, cada uma delas executando um conjunto de funções e provendo um conjunto de serviços à camada superior (FOROUZAN, 2009). As camadas desse modelo, em ordem ascendente, são formadas por:

1. **Camada física** – Trata da transmissão dos sinais envolvendo considerações de interfaces mecânicas, elétricas, de sincronização e características do meio físico. Podem utilizar meio óptico, sem fio, coaxial ou cabo de par trançado.
2. **Camada de enlace de dados** – Possui a tarefa de fazer com que o canal de transmissão pareça livre de erros de transmissão para a camada de rede.
3. **Camada de rede** – É responsável por determinar a rota de uma chamada solicitada, controlar o congestionamento das chamadas, devido ao compartilhamento dos mesmos caminhos e recursos da rede, fornecendo QoS (*Quality of Service*) quanto ao atraso, tempo em trânsito, instabilidade e outros fatores.
4. **Camada de transporte** – Possui a função básica de aceitar os dados da camada superior, dividi-los em unidades menores e determinar qual tipo de serviço será fornecido à camada de sessão.
5. **Camada de sessão** – Permite que os usuários estabeleçam sessões entre eles, ou seja, comuniquem-se de forma que seja realizado um controle de quem deve transmitir em cada momento. Dessa forma, impede que as duas partes tentem executar a mesma operação ao mesmo tempo e realiza uma verificação periódica de transmissões longas para permitir que elas continuem a partir do ponto em que estavam na ocorrência de falhas.

6. **Camada de apresentação** – Está relacionada à sintaxe e à semântica das informações transmitidas, ou seja, para tornar possível a comunicação entre computadores, com diferentes representações de dados. As estruturas de dados a serem trocadas podem ser definidas de maneira abstrata, juntamente com uma codificação padrão que será usada durante a chamada.
7. **Camada de aplicação** – Contém um conjunto de protocolos comumente necessários para os usuários, dependendo da necessidade e das funções requeridas pelas aplicações, tais como: transferência de arquivos, correio eletrônico e transmissão de notícias pela rede.

Ainda de acordo com Ramaswami (RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 1998), um modelo mais realista dos sistemas atuais empregam múltiplas pilhas de protocolos, cada uma apresentando várias subcamadas, que podem fornecer funções similares às camadas do modelo OSI-ISO. Um exemplo disso são as subcamadas, pertencentes à camada de enlace de dados, MAC (*Media Acces Control*) e LLC (*Logical Link Control*) (FOROUZAN, 2009).

A implementação de redes ópticas na prática se deu principalmente devido a quatro eventos significativos ocorridos entre as décadas de 80 e 90 (O'MAHONY et al., 2006), sendo eles:

- Criação e desenvolvimento de amplificadores ópticos viáveis comercialmente;
- Viabilidade econômica e prática da utilização de sistemas WDM.
- Demonstração de um comutador óptico (OXC – *Optical Cross-Connect*), tornando possível a configuração de rotas baseadas em comprimentos de onda.
- A convergência de serviços e demanda por taxas de transmissão elevadas.

Redes ópticas da atualidade incorporam várias subcamadas, correspondendo principalmente às funções da camada física, mas também apresentando funções das camadas de enlace de dados e de rede. Entre as funções, é possível citar as de comutação, roteamento e tomada de decisões, todas no domínio óptico (RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 1998).

2.2 REDES ÓPTICAS WDM E O PROBLEMA RWA

Como foi apresentado em 2.1, devido ao grande aumento na capacidade de transmissão e uma diminuição dos custos de implementação (CAPEX – *capital expenditure*) e operação (OPEX – *operational expenditure*) (TOMKOS et al., 2014), as redes WDM rapidamente ganharam força e adesão, especialmente para comunicações de longa distância (RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 1998). Esse tipo de rede utiliza a multiplexação por divisão de comprimento de onda, ou seja, divide o espectro da fibra óptica em canais com largura de banda igualmente espaçados, em que cada canal apresenta um comprimento de onda (frequência) específico (KEISER, 1999). Esse tipo de multiplexação possibilita a transmissão de vários canais de comunicação independentes entre si (ILYAS; MOUFTAH, 2003), sendo possível a transmissão na mesma fibra de sinais com distintos formatos de modulação, taxas de transmissão, entre outros parâmetros.

A transmissão de uma conexão em redes WDM se dá com a criação de um caminho óptico por meio da solução do problema RWA. Essa solução é constituída de uma rota que ligue o nó de origem ao nó de destino da conexão, e de um comprimento de onda em que a requisição seja alocada ao longo dessa rota, se a rede não possuir capacidade de conversão de comprimento de onda (BANERJEE; MUKHERJEE, 1995). A literatura (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015; ZANG; JUE; MUKHERJEE, 2000; BANERJEE; MUKHERJEE, 1995; RAMASWAMI; SIVARAJAN, 1995; DURÕES et al., 2010; YUM, 1994; LI; SOMANI, 1999; DIJKSTRA, 1959) apresenta roteamentos do tipo fixo, fixo-alternativo e adaptativo, abordados em 2.2.1, como também diversos algoritmos para solução da atribuição de comprimento de onda, detalhados em 2.2.2.

O problema RWA em redes WDM depende do tipo de modelo de tráfego usado. Para casos de tráfego estático, sabe-se de antemão o número total de requisições entre todos os pares (origem/destino) de nós da rede. O problema então é modelado de forma a minimizar a quantidade de comprimentos de onda utilizados para alocar todo esse conjunto de requisições ou alocar o maior número possível de requisições para uma certa quantidade de recursos (ZANG; JUE; MUKHERJEE, 2000). Esse modelo geralmente utiliza algoritmos de otimização através de programação linear inteira (ILP – *Integer Linear Programming*) ou mista (MILP - *Mixed-Integer Linear Programming*) para solução do problema, da classe dos problemas NP-completo (*NP-complete*), conforme apresentado por Banerjee e Mukherjee (BANERJEE; MUKHERJEE, 1995).

Para modelos de tráfego é denominado dinâmico, onde as transmissões são requisitadas de forma sequencial, em que cada uma permanece na rede por um tempo limitado. Nesse caso, o problema de roteamento e atribuição de comprimento de onda de uma conexão é feito após a acomodação ou rejeição da anterior (DURÕES et al., 2010). Por esse modelo, o critério de desempenho utilizado para avaliar as diferenças entre os algoritmos que abordam o problema é a probabilidade de bloqueio de chamada (P_B), sendo a razão entre o número de requisições rejeitadas e a quantidade total de requisições (ZANG; JUE; MUKHERJEE, 2000). O simulador do grupo de pesquisa em que o desenvolvimento deste trabalho foi efetuado apresenta um modelo de tráfego dinâmico. Todas as simulações realizadas neste trabalho utilizaram modelos de tráfego dinâmico.

2.2.1 Roteamentos e suas classificações

O primeiro tipo de classificação de roteamento se dá quanto ao momento em que seu cálculo é efetuado. Para tráfego estático, apenas o roteamento estático (*offline*) é realizado, pois todas as conexões já são conhecidas pelo plano de controle. Para o caso dinâmico, roteamento *offline* significa que o conjunto das rotas entre todos os pares de nós origem/destino da rede é pré-determinado (DURÕES et al., 2010). Assim, quando há uma nova requisição, a rota para esse par de nó específico já é conhecida pelo plano de controle, não sendo necessário um novo

cálculo para encontrá-la.

O roteamento dinâmico (*online*) ocorre para tráfego dinâmico, e é caracterizado pelo cálculo da rota para cada nova requisição (LI; SOMANI, 1999). Geralmente, esse tipo de roteamento apresenta um custo computacional maior, pois está associado a roteamentos que necessitam de informações gerais da rede, e, por isso, necessitam de uma constante atualização de informação.

2.2.1.1 Roteamento fixo

O roteamento fixo consiste em utilizar uma única e mesma rota para cada par de nó origem-destino da rede. Geralmente utiliza-se algum algoritmo de menor caminho, sendo o *Dijkstra* (DJK) (DIJKSTRA, 1959) e o *Bellman-Ford* (BELLMAN, 1954) as opções mais conhecidas.

Esse tipo de possui algumas desvantagens, sendo a principal delas a possibilidade de acarretar uma má gestão dos recursos da rede. Isso poderá ocorrer se houver congestionamento em partes específicas da rede enquanto outras partes ficam ociosas, isto é, as rotas ficarão concentradas em um grupo de enlaces específicos, enquanto outros enlaces apresentam uma baixa, ou até nenhuma, utilização (ZANG; JUE; MUKHERJEE, 2000). Isso acarreta em um aumento na probabilidade de bloqueio para tráfego dinâmico, ou um alto uso de comprimentos de onda para o caso estático.

Essa desvantagem pode ser amenizada por meio de um algoritmo de roteamento fixo *offline* proposto em (DURÕES et al., 2010) e denominado BSR (*Best among the Shortest Routes*), em que uma nova distribuição de rotas é encontrada a cada iteração do algoritmo. Todo o processo iterativo é realizado na fase de pré-processamento do plano de controle. Para cada iteração, ocorre uma variação no custo dos enlaces da rede, de acordo com suas frequências de uso nas rotas da rede. Esses custos determinam os desempates das menores rotas entre os pares de nós de rede, acarretando em um espalhamento das rotas entre os enlaces. Ao fim do processo iterativo, escolhe-se o conjunto de rotas que apresenta a melhor distribuição de carga na rede (DURÕES et al., 2010).

Outra desvantagem do roteamento fixo é a incapacidade de lidar com falhas na rede. Isso ocorre porque uma quebra em algum enlace da rota estabelecida ou falha em algum dispositivo nos nós dessa rota, a conexão será bloqueada pois não há rota alternativa para a conexão ser efetuada (ZANG; JUE; MUKHERJEE, 2000).

2.2.1.2 Roteamento fixo-alternativo

Diferente do roteamento fixo, que apresenta uma única rota para cada par de nó origem-destino da rede, o roteamento fixo-alternativo apresenta uma quantidade k de rotas para cada um desses pares. Geralmente é também utilizado um algoritmo de menor caminho (ZANG;

JUE; MUKHERJEE, 2000). Havendo empate entre um conjunto das k rotas selecionadas, algum critério de desempate é usado para escolher as rotas a serem usadas.

No momento da escolha do caminho óptico, o plano de controle tentará usar a primeira rota do conjunto daquele par de nó e tentará encontrar um comprimento de onda disponível em toda essa rota. Não sendo possível a atribuição de comprimento de onda naquela rota, busca-se a rota seguinte e assim sucessivamente até encontrar uma em que seja possível a criação do caminho óptico. Se as k rotas forem testadas e não for encontrado um comprimento de onda disponível, a requisição é bloqueada por falta de recursos. O algoritmo YEN (YEN, 1971) é o principal exemplo de algoritmo de menor caminho para roteamento fixo-alternativo.

Esse tipo de roteamento possui uma significativa tolerância a falhas, pois se um enlace parar de funcionar por motivos diversos, as rotas que não compartilham desse enlace poderão efetuar a conexão da requisição. Mesmo possuindo tolerância a falhas e gerando ganho quando comparado com o fixo, esse tipo de roteamento não possui conhecimento do estado da rede para efetuar a construção do conjunto de rotas, podendo ainda assim resultar em uma má gestão dos recursos da rede (ZANG; JUE; MUKHERJEE, 2000).

2.2.1.3 Roteamento adaptativo

Para uma rede já muito congestionada nas menores rotas entre pares de nós, roteamentos fixo e fixo-alternativo de menor caminho apresentarão altas quantidades de bloqueios, quantidade essa que poderia ser diminuída se rotas maiores, porém mais livres, fossem eventualmente utilizadas para tentar alocar as conexões.

Sendo assim, o roteamento adaptativo leva em consideração o estado da rede no momento da solicitação da requisição, tentando alocá-la de maneira a diminuir a probabilidade de bloqueio por falta de recursos, além de utilizar métricas que proporcionem um uso mais igualitário dos recursos. Devido a isso, esse tipo de roteamento consegue gerir os recursos de forma mais eficiente, visto que o plano de controle pode efetuar uma melhor distribuição das requisições na rede, geralmente obtendo um melhor desempenho em relação aos outros tipos de roteamento (ZANG; JUE; MUKHERJEE, 2000).

Um exemplo de roteamento adaptativo é apresentado por Chan e Yum (YUM, 1994), denominado LCP (*Least-Congested-Path routing*), que utiliza da característica do roteamento fixo-alternativo para pré-processar um conjunto de rotas para cada par de nós da rede. A seleção da rota, dentre as estabelecidas na fase de pré-processamento, será realizada por meio da análise do estado da rede, mediante o cálculo do congestionamento em cada rota e dando preferência às que possuem menor valor. O grau de congestionamento de um enlace é determinado pelo número de canais livres. Quanto maior o número de canais livres, menos congestionado é o enlace (YUM, 1994). Outro tipo de abordagem do LCP mensurado por Li e Somani (LI; SOMANI, 1999) é a escolha das rotas de menor caminho e, nos casos de empate, a análise do congestionamento das rotas para seleção de uma delas.

2.2.2 Atribuição de comprimento de onda

Nesta seção serão abordadas algumas heurísticas presentes na literatura (ZANG; JUE; MUKHERJEE, 2000; BANERJEE; MUKHERJEE, 1995) que solucionam o problema de atribuição de comprimento de onda na criação de um caminho óptico em redes WDM para tráfego de rede dinâmico. Outra parte do problema RWA consiste em encontrar um comprimento de onda disponível ao longo da rota pré-selecionada. Essa escolha deve atender à restrição de continuidade, que exige que o caminho óptico possua o mesmo comprimento de onda ao longo de toda a rota.

A primeira heurística apresentada é a mais simples e ao mesmo tempo uma das mais eficientes. Ela é denominada FF (*First-Fit*), pois escolhe o comprimento de onda de menor índice que está disponível para a rota sob análise. Essa heurística apresenta bons resultados pois consegue compactar a ocupação de banda espectral e possui um baixo custo computacional, apresentando um bom *tradeoff* entre ganho e desempenho (ZANG; JUE; MUKHERJEE, 2000). Outras heurísticas são a de maior (MU – *Most-Used*) e menor (LU – *Least-Used*) utilização, em que os comprimentos de onda mais e menos usados, nos enlaces da rede, respectivamente, são os preferidos. Ambos necessitam de um plano de controle central que detenha informações do estado da rede. O MU apresenta uma redução na probabilidade de bloqueio de chamada, enquanto no LU ocorre um aumento dessa probabilidade, ambos comparados com a heurística FF. Também há um aumento no custo computacional, também comparados com o FF (ZANG; JUE; MUKHERJEE, 2000).

Ainda é possível citar a heurística de máximo somatório (*MAX-SUM*), proposta por Subramaniam e Barry (SUBRAMANIAM; BARRY,). Nela, o plano de controle considera todas as rotas possíveis na rede e tenta maximizar a capacidade restante de alocação dessas rotas, após o estabelecimento da chamada atual. A maximização ocorre com a escolha do comprimento de onda que menos impacte essa capacidade, para futuras conexões, das rotas pré-estabelecidas. O RCL (*Relative Capacity Loss*) apresenta o mesmo princípio do máximo somatório, porém tem a capacidade de evitar comprimentos de onda mais críticos em relação às rotas da rede, com acréscimo proporcional à quantidade de comprimentos de onda perdidos com a alocação. Essa heurística poderá realizar a alocação em um comprimento de onda que afete mais rotas, porém de forma menos crítica. Estas duas últimas heurísticas apresentam os melhores resultados quando comparadas com as demais citadas, sendo a RCL a que apresenta a menor probabilidade de bloqueio (ZANG; JUE; MUKHERJEE, 2000).

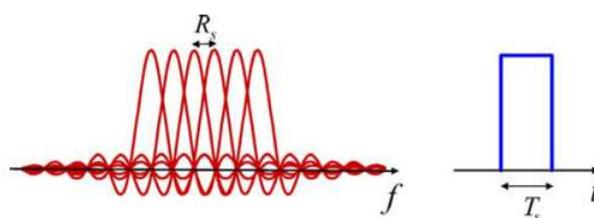
2.3 REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS E O PROBLEMA RSA

Com o desenvolvimento dos dispositivos ópticos BVT (*Bandwidth-Variable Transponder*), BV-WXC (*Bandwidth-Variable Wavelength Cross-Connect*) e BV-WSS (*Bandwidth-Variable Wavelength-Selective Switch*), um novo tipo de rede óptica foi proposto por Jinno *et al* (JINNO *et al.*, 2009) com o objetivo de atender especificações não possíveis em redes WDM.

Com a utilização desses dispositivos, as redes EON apresentam a capacidade de reconfiguração da largura de banda utilizada na conexão de acordo com a requisição, sendo essa característica de flexibilidade que dá nome a esse novo tipo de rede, conhecida na literatura como SLICE (*Spectrum-sliced Elastic Optical Path Network*), redes ópticas flexíveis ou redes ópticas elásticas.

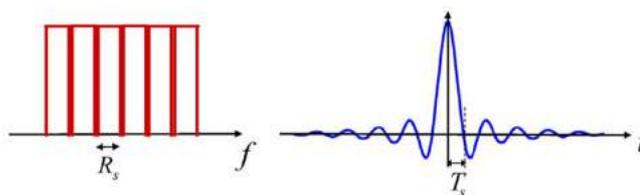
A primeira característica apresentada nas redes EON é a capacidade de criação de supercanais espectralmente eficientes, sendo eles múltiplos canais de baixas taxas de transmissão agrupados e transmitidos pela rede como uma única entidade, por meio da utilização de técnicas de multiplexação como CO-OFDM (*Coherent Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) ou N-WDM (*Nyquist-WDM*) (BOSCO et al., 2011). A primeira técnica, apresentada por Zhang *et al* (ZHANG et al., 2013), consegue obter o agrupamento de canais de baixas taxas aplicando a ortogonalidade entre eles, possibilitando a sobreposição desses canais sem interferência inter-simbólica, para uma melhor eficiência espectral, conforme ilustrado na figura 3. O *crosstalk* dessa técnica é filtrado no receptor do sinal, e no domínio de tempo um sinal OFDM consiste em um fluxo contínuo de símbolos. A segunda técnica, mostrada por Bosco *et al* (BOSCO et al., 2011), consiste em construir os canais de modo a ocuparem uma pequena largura de banda, próxima ao limite de *Nyquist* como apresentado na figura 4, permitindo assim uma transmissão livre de interferência inter-simbólica e *crosstalk*. No domínio do tempo, um sinal N-WDM consiste em pulsos tipo *sinc*. Uma comparação entre as duas técnicas é apresentada em Bosco *et al* (BOSCO et al., 2010) e confirma ambas como formas viáveis de multiplexação em redes EON.

Figura 3 – Formato de onda na frequência e no tempo de um sinal CO-OFDM



Fonte: Bosco *et al* (BOSCO et al., 2010).

Figura 4 – Formato de onda na frequência e no tempo de um sinal N-WDM



Fonte: Bosco *et al* (BOSCO et al., 2010).

As redes EON também apresentam características de suporte a diferentes taxas de transmissão com ocupação espectral proporcional a essa taxa, juntamente com o formato de

modulação usado (GERSTEL et al., 2012). A quantidade de *slots* S necessária para efetuar a conexão é calculada de acordo com a equação:

$$S = \left\lceil \frac{B_s}{F_w} \right\rceil \quad (2.1)$$

em que B_s representa a largura de banda em GHz necessária para alocar a conexão e F_w a largura de banda de um *slot*, geralmente apresentada na literatura com valor de 12,5 GHz ou menos, valor esse também adotado nas simulações realizadas neste trabalho (TOMKOS et al., 2014). A função teto, usada na Equação 2.1, obtém o primeiro número inteiro maior ou igual à divisão entre B_s e F_w . A Tabela 1 apresenta as quantidades de *slots*, com largura espectral de 12,5 GHz, necessária para alocar cada taxa de dados específica e cada formato de modulação presente no simulador utilizado neste trabalho. Ele apresenta capacidade de atender requisições com formatos de modulação distintos, variando entre QAM-4 a QAM-64.

Todas as vantagens apresentadas tornam as redes elásticas capazes de atender a atual necessidade por maiores taxas de transmissão, maior eficiência espectral e maior flexibilidade de tráfego (TOMKOS et al., 2014).

Tabela 1 – Número de *slots* necessários, de acordo com a combinação taxa de transmissão junto com a modulação.

| Taxa | Formatos de modulação disponíveis no simulador | | | | |
|----------|--|--------|--------|-------|-------|
| | QAM-64 | QAM-32 | QAM-16 | QAM-8 | QAM-4 |
| 10 Gbps | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 40 Gbps | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| 100 Gbps | 2 | 2 | 2 | 3 | 4 |
| 200 Gbps | 3 | 4 | 4 | 6 | 8 |
| 400 Gbps | 6 | 7 | 8 | 11 | 16 |

Fonte: o autor.

2.3.1 Roteamento e alocação espectral em redes EON

Conforme visto na seção 2.2, a alocação de recursos em redes WDM é feita através da solução do problema RWA, composto pelo roteamento e atribuição de comprimento de onda, apresentando a restrição de continuidade, que impõe a utilização do mesmo comprimento de onda ao longo de toda a rota selecionada. O problema de alocação de recursos em redes elásticas RSA apresenta roteamento e alocação de espectro e, além da restrição de continuidade, apresenta a restrição de contiguidade (TALEBI et al., 2014). A primeira impõe a necessidade de utilização dos mesmos *slots* ao longo de toda a rota, e a segunda impõe que esses *slots* sejam adjuntos, também ao longo de toda a rota (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015).

Da mesma forma que em redes WDM, a solução do problema RSA pode ser aplicada para dois tipos de tráfego: estático e dinâmico. A solução para o primeiro se dá através do

cálculo de *slots* necessários para alocar todas as requisições previamente conhecidas, enquanto o caso dinâmico aplica heurísticas de forma a diminuir o número de requisições bloqueadas, e conseqüentemente a probabilidade de bloqueio de chamada por falta de recursos.

O roteamento para EON é efetuado de forma semelhante às apresentadas na seção 2.2, também apresentando os tipos fixo, fixo-alternativo e adaptativo. Deste último tipo, o algoritmo SCSP (*Spectrum Continuity based Shortest Path*), proposto por Xavier *et al* em (XAVIER *et al.*, 2015), é um exemplo de algoritmo específico para redes ópticas elásticas. Ele é baseado no algoritmo de menor caminho DJK, porém apresenta capacidade de guardar informação da continuidade do espectro ao longo da rota acessada, utilizando essa informação para determinar os custos dos links.

Todas as heurísticas de alocação de atribuição de comprimento de onda abordadas na Subseção 2.2.2 para redes WDM são aplicáveis às redes EON. Uma comparação entre algumas delas é feita por Chatterjee e Oki em (CHATTERJEE; OKI, 2015). Como o problema de alocação de recursos em EONs apresenta uma maior complexidade, o desempenho das heurísticas pode apresentar comportamento diferente do apresentado em redes WDM. Um exemplo disso se dá através da comparação de desempenho das heurísticas FF e MU. Quando aplicadas às redes elásticas, o *First Fit* apresenta um melhor desempenho que o *Most Used*, diferentemente do desempenho mostrado em redes WDM.

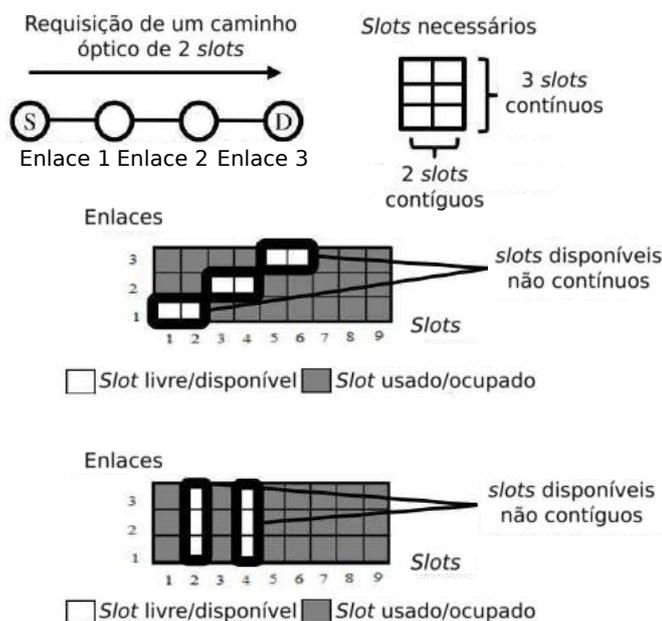
Um exemplo de heurística de alocação espectral específica para redes EON é apresentado por Almeida *et al* em (ALMEIDA *et al.*, 2013) e denominado MSCL (*Min Slot-Continuity Capacity Loss*). Ele é baseado no cálculo da perda de capacidade entre as rotas que interferem com a rota selecionada (rotas que compartilham pelo menos um enlace com a rota analisada), evitando que essas rotas percam capacidade para alocações futuras, levando-se em conta a continuidade e a contigüidade do espectro. Esse algoritmo apresenta ganhos na probabilidade de bloqueio de chamadas na rede, quando comparados com outras heurísticas como o FF.

2.3.2 Fragmentação em redes EON

O problema de fragmentação espectral apresentado nas EON's (TOMKOS *et al.*, 2014; WANG; MUKHERJEE, 2013; WANG; MUKHERJEE, 2012a) é decorrente da diversidade de largura de banda das requisições, das restrições de continuidade e de contigüidade, como também do tráfego dinâmico, havendo alocações e retiradas de conexões ao longo do tempo (WANG; MUKHERJEE, 2012a). Sendo assim, ocorre o surgimento de fragmentos espectrais, isto é, blocos de *slots* que não atendem simultaneamente as restrições de continuidade e contigüidade impostas às redes EON e que dificilmente poderão ser utilizados por futuras requisições, havendo perda de desempenho da rede (CHATTERJEE; BA; OKI, 2017).

A figura 5 ilustra a ocorrência do problema abordado. Nela, uma conexão entre os nós *S* e *D* é requisitada, atravessando os enlaces 1, 2 e 3 sequencialmente. Essa requisição apresenta uma largura de banda em que são necessários dois *slots* contíguos para ocorrer a alocação. Portanto,

Figura 5 – Ilustração do problema de fragmentação em redes EON.



Fonte: Chatterjee *et al* (CHATTERJEE; BA; OKI, 2017). Tradução: autor.

faz-se necessário um alinhamento de tamanho dois nos três enlaces da rota. O primeiro exemplo de tentativa de alocação atende à restrição de contiguidade em todos os enlaces, apresentando dois *slots* contíguos em cada, porém esses blocos livres não estão alinhados, em desacordo com a restrição de continuidade. O segundo caso atende à restrição de continuidade, sendo os índices dos *slots* livres os mesmos em todos os enlaces. Porém, esses índices não estão postos de forma sequencial, conseqüentemente não atendendo à restrição de contiguidade.

Os tipos de abordagem de gerenciamento de fragmentação são usados para lidar com fragmentação espectral e aumentar os níveis de tráfego admissíveis em redes ópticas elásticas (CHATTERJEE; BA; OKI, 2017). As abordagens são divididas em duas categorias principais: abordagem sem desfragmentação (*Non-defragmentation Approach*) e com desfragmentação (*Defragmentation Approach*). A primeira é feita alocando as conexões de uma maneira que evite o surgimento de fragmentação na rede. Essa forma apresenta baixos custos de CAPEX e OPEX, porém apresenta desempenho, em termos de aumento de volume de tráfego, inferior à segunda categoria (CHATTERJEE; BA; OKI, 2017). Na segunda forma, a abordagem é voltada à conexões já estabelecidas, de forma a suprimir o efeito de desfragmentação espectral surgido. Essa abordagem é subdividida em duas categorias secundárias. A forma reativa é feita quando uma nova requisição de conexão é recebida e a forma proativa é aplicada sem a necessidade de uma nova requisição de conexão (CHATTERJEE; BA; OKI, 2017).

A técnica utilizada neste trabalho apresenta uma abordagem com desfragmentação de forma reativa com o objetivo de aumentar a eficiência de recursos na rede, possibilitando que requisições ocupem os fragmentos gerados nela, conforme detalhado no Capítulo 3.

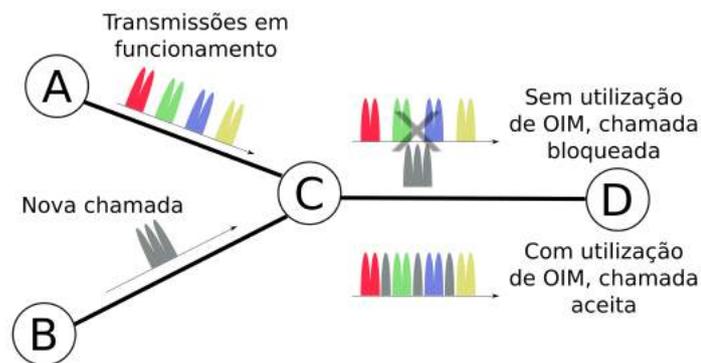
3 MULTIPLEXAÇÃO ÓPTICA INVERSA

Este capítulo aborda em detalhes a técnica de multiplexação óptica inversa usada neste trabalho e como, por meio dela, é possível mitigar os efeitos da fragmentação espectral presentes em redes ópticas elásticas. Também será apresentada a arquitetura de um nó óptico com capacidade de aplicar a desfragmentação usada neste trabalho. Por fim, este capítulo apresenta dados resultantes de simulações computacionais que quantificam a redução na probabilidade de bloqueio de chamada com o uso de multiplexação óptica inversa.

3.1 INTRODUÇÃO

A multiplexação óptica inversa é uma técnica de desfragmentação espectral usada para alocação de chamadas por meio da separação do supercanal em, possíveis, múltiplos conjuntos de *slots* menores com flexibilidade de contiguidade (XU et al., 2014). A Figura 6 ilustra a tentativa de alocação de uma nova requisição específica e mostra os cenários sem e com o uso da técnica de multiplexação óptica inversa. Assumindo a ocupação espectral presente nos enlaces A-C e C-D, tenta-se alocar uma nova conexão, com rota entre os enlaces B-C-D. Percebe-se que a rota da nova chamada apresenta um conjunto de *slots* contíguos no enlace B-C. Porém, mesmo apresentando uma quantidade de *slots* suficientemente livres para a alocação no enlace C-D, eles não estão dispostos de forma contígua, resultando na presença de fragmentos nesse enlace. Portanto, sem o uso da técnica de OIM, não há um conjunto de *slots* ao longo de toda a rota que atenda as restrições de continuidade e contiguidade das EONs. Sendo assim, a conexão não poderá ser alocada. Com o uso de OIM, o nó intermediário C poderá ser capaz de usar *slots* descontíguos a partir dele até o nó de destino da requisição, possibilitando a ocupação dos fragmentos apresentados nesse enlace (C-D).

Figura 6 – Ilustração de tentativa de alocação de um requisição sem e com uso da técnica de multiplexação óptica inversa.



Fonte: o autor.

Observa-se no exemplo da Figura 6 que, através do uso de multiplexação óptica inversa,

é possível alocar a conexão mesmo em situações de fragmentação acentuada na rede, mais precisamente nos enlaces que compõem a parte final da rota da requisição a ser alocada, parte essa entre o nó onde a técnica de OIM é aplicada e o nó destino da requisição. Isso acarreta em uma maior flexibilidade de alocação das conexões, por meio do relaxamento parcial das restrições de continuidade-contiguidade de *slots* (GUO et al., 2014).

3.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O processo de multiplexação óptica inversa baseado em *multicasting* de supercanal pode ser dividido em quatro partes: acoplamento do supercanal, geração de cópias do supercanal, seleção das subbandas e direcionamento ao enlace de saída.

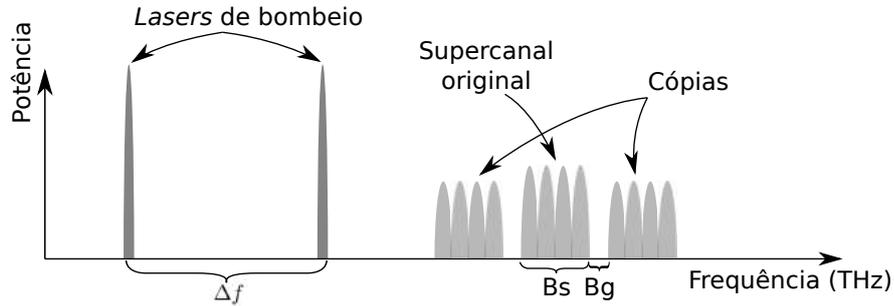
A primeira parte da técnica de OIM consiste em acoplar o supercanal, ao qual se deseja aplicar a técnica, com uma quantidade fixa de *lasers* de bombeio co-polarizados (CHEN et al., 2013). Os *lasers* de bombeio são amplificadores ópticos envoltos em uma cavidade reflexiva que causa oscilação através de emissão estimulada (RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 1998). Esse acoplamento é realizado através de um acoplador óptico, dispositivo usado para, nesse caso, combinar os sinais de todas as fibras de entrada de entrada e direcioná-las à única fibra de saída.

A segunda etapa do processo é a geração das cópias do supercanal em que a técnica de OIM será aplicada, denominado *multicasting* de supercanal (Yuanxiang Chen et al., 2013). Na saída do acoplador óptico, descrito na primeira parte da técnica, os sinais combinados serão direcionados à um tipo de fibra com alto índice de não-linearidade (HNLF – *Highly Non-Linear Fiber*). Essa fibra apresenta característica de acentuação dos efeitos não-lineares do sinal ou dos sinais. Ao final dessa fibra, cópias à direita e à esquerda do sinal, na frequência, serão criadas devido ao efeito não linear da mistura de quatro ondas (FWM – *Four-Wave Mixing*). Esse efeito não linear ocorre à partir da interação entre dois, ou mais, sinais que apresentem componentes espectrais distintas e propaguem no mesmo meio não linear (RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 1998). A partir das duas componentes espectrais distintas, duas componentes de frequência adicionais serão criadas em frequências também distintas. Se forem usadas três componentes espectrais distintas, uma componente espectral será criada. Essa geração de cópias a partir do efeito de FWM recebe a nomenclatura de *multicasting* de supercanal (Yuanxiang Chen et al., 2013) e é ilustrada na Figura 7.

Faz-se necessário destacar que o significado de *multicasting* utilizado no material de pesquisa de referência, e conseqüentemente neste trabalho, apresenta diferenças quando comparado ao significado original, em que *multicasting* se refere à geração de cópias de um sinal e sua posterior distribuição por diferentes enlaces de saída em um nó da rede. Aqui, o termo é utilizado para definir apenas a criação das cópias, sem a distribuição multiponto.

Ainda em relação ao *multicasting* de supercanal apresentado na Figura 7, a quantidade de cópias criadas é definida pela Equação 3.1. Conforme apresentado, o número de cópias

Figura 7 – Ilustração do resultado de um *multicasting* de supercanal por meio do efeito não-linear de FWM.



Fonte: o autor.

criadas K irá depender da quantidade de *lasers* de bombeio L acoplados ao supercanal, com metade das cópias criadas à direita do supercanal no espectro, e a outra metade à esquerda do supercanal. Sendo assim, a partir de dois *lasers* de bombeio haverá, após o processo de *multicasting*, duas cópias do sinal original mais o próprio sinal (supercanal), sendo uma cópia à esquerda e outra à direita, desse supercanal, no espectro. Portanto, a partir de 1 supercanal são formados 3 supercanais (1:3). Se forem utilizados três *lasers* de bombeio, o sinal apresentará seis cópias, três à direita e três à esquerda do supercanal original, fornecendo um *multicasting* de 1:7.

$$K = \binom{L}{2} \cdot 2 = L(L - 1) \quad (3.1)$$

A Equação 3.2 mostra a frequência central de cada cópia gerada f_{R_i} , fornecida a partir da frequência central do sinal original f_s e da frequência de dois *lasers* de bombeio distintos f_{P_j} e f_{P_k} . Os possíveis arranjos a partir das frequências de todos os *lasers* de bombeio fornecem todas as frequências centrais das cópias criadas.

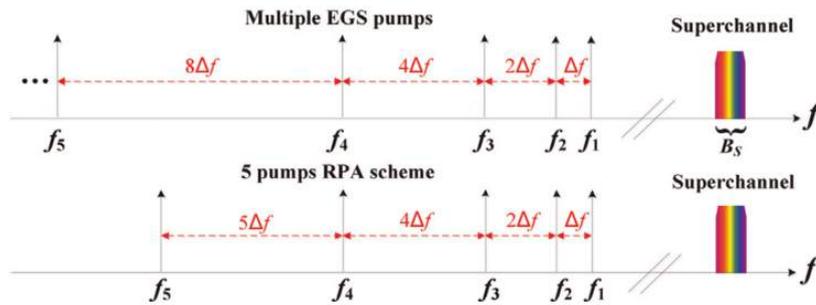
$$f_{R_i} = f_s + f_{P_j} - f_{P_k} \quad (i = 1, 2, \dots, K, j = 1, 2, \dots, L, k = 1, 2, \dots, L, j \neq k) \quad (3.2)$$

O espaçamento espectral entre os *lasers* de bombeio é apresentado na Equação 3.3 e segue um dos critérios apresentados em (ZHU et al., 2015), sendo eles o espaçamento de crescimento exponencial (EGS – *Exponentially Growing Spaced*), proposto em (CHEN et al., 2013) e usado nas simulações efetuadas neste trabalho, ou o esquema recursivo de acréscimo de *pumps* (RPA – *Recursive Pump-Adding Scheme*), proposto em (ZHU et al., 2015). Ambas as formas apresentam a mesma quantidade de *pumps* necessários para criar o mesmo número de cópias, se diferenciando nos valores de $n_{j,ks}$ adotados. Essa diferença é apresentada na Figura 8. As frequências dos *pumps*, obedecendo algum desses espaçamentos, determinam a posição da frequência central das cópias criadas, visto que a frequência central do supercanal original não é

alterada.

$$f_{P_j} - f_{P_k} = n_{j,ks} \cdot \Delta f \quad (j = 1, 2, \dots, L, k = 1, 2, \dots, L, j \neq k, n_{j,k} \text{ inteiros positivos}) \quad (3.3)$$

Figura 8 – Comparação entre os esquemas de espaçamento entre *pumps* EGS e RPA.



Fonte: Zhu *et al* (ZHU et al., 2015).

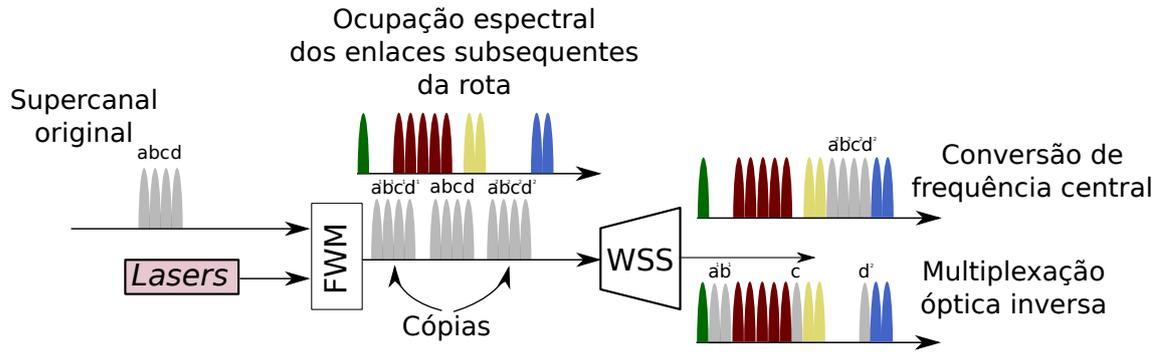
A equação 3.4 apresenta o intervalo da distância espectral possível entre a frequência central do sinal original f_s e frequência do *laser* de bombeio f_{P_1} mais próximo a ele, em função de uma constante inteira não-negativa p , que está relacionada com a sensibilidade à polarização (*polarization sensitivity*) ao *multicasting*, que diminui à medida que seu valor aumenta (ZHU et al., 2015). K representa o número de cópias geradas, B_S a largura de banda do sinal original e B_G a banda de guarda entre as cópias e o sinal original.

$$\left(\frac{K+1}{2} + p \right) \cdot (B_S + B_G) - \frac{B_G}{2} < f_s - f_{P_1} < \left(\frac{K+1}{2} + p \right) \cdot (B_S + B_G) + \frac{B_G}{2} \quad (3.4)$$

Após o processo de *multicasting*, a próxima etapa da técnica de OIM é a de seleção, através de um BV-WSS, do conjunto de sub-bandas que irão compor o sinal a ser transmitido, sinal que pode ser formado por 1, 2, ..., ou K grupos contíguos. Esse dispositivo, também denominado SSS (*Spectrum Selective Switch*), tem como função direcionar sinais ópticos na entrada, com diferentes larguras de banda e frequência centrais, para uma (das) saída(s) do dispositivo (JINNO et al., 2009). Como são apresentadas várias cópias do sinal original, é necessário escolher, dentre todas as possibilidades de *slots*, aqueles que serão usados. Tal escolha depende da disponibilidade dos *slots* nos enlaces restantes da rota. Exemplificando, com a utilização de OIM com *multicasting* 1:3 de um sinal que ocupa 4 *slots*, uma possível escolha se dá pelo uso dos *slots* 1 e 2 da cópia à esquerda do sinal original, do *slot* 3 do sinal original e do *slot* 4 da cópia à direita do sinal, conforme ilustrado na figura 9 na saída de nome Multiplexação óptica inversa.

Se todos os *slots* escolhidos pertencerem a uma mesma cópia, também ilustrado em uma das possíveis escolhas do WSS da Figura 9, a técnica de OIM funcionará como conversor

Figura 9 – Ilustração das etapas do processo completo de OIM.



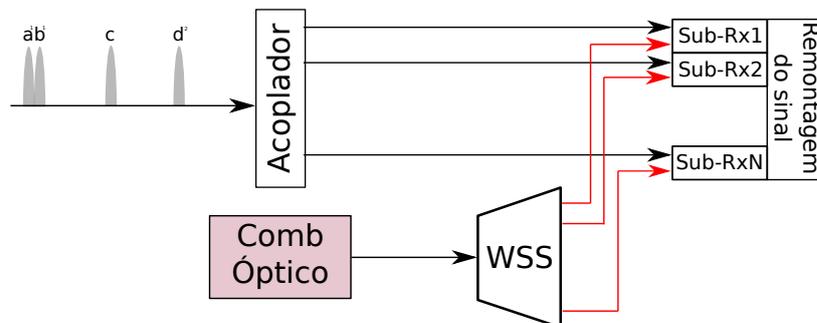
Fonte: o autor.

de frequência central de supercanal (GEISLER et al., 2011; LU; SAKAMOTO; KAWANISHI, 2014), similar à conversão de comprimento de onda das redes WDM (CHU; LI; CHLAMTAC, 2003). Já a escolha de sub-bandas pertencentes a diferentes cópias do supercanal acarreta em não-contiguidade dos *slots* que compõem o sinal devido ao relaxamento parcial dessa restrição (quebra da conexão). Para ambos os casos há um alívio, também parcial, da restrição de continuidade, que será subdividida em duas: uma restrição de continuidade para a subrota entre o nó de origem da conexão e o nó intermediário onde a técnica é aplicada, e outra partindo do nó intermediário até o nó de destino da requisição, devendo ambas serem respeitadas.

A última etapa, responsável pelo direcionamento do sinal desfragmentado ao enlace de saída da transmissão, é realizada por um acoplador óptico presente no nó onde a técnica de OIM será aplicada. Esse acoplador é responsável pelo acoplamento dos sinais que usaram e não usaram da técnica para alocação.

A Figura 10 apresenta a estrutura responsável pela recepção do sinal não contíguo, após aplicação da técnica de OIM. Nela, um grupo de sub-receptores são usados para receber as subbandas com decodificação digital coerente (ZHU et al., 2017). Um *comb* óptico, gerenciado por um SSS, oferece todos os osciladores locais necessários para a correta recepção do sinal.

Figura 10 – Ilustração do receptor do sinal não contíguo.



Fonte: o autor.

A técnica de OIM possui algumas vantagens, sendo a principal delas, como já mencionado anteriormente, o tratamento do relaxamento das restrições de continuidade e de contiguidade

dos *slots* da requisição, a partir do nó que se efetua a quebra. Outra vantagem apresentada pelo uso da técnica vem do fato de sua implementação ser totalmente feita no domínio óptico (*All-optical*), sendo transparente ao sinal, portanto sem necessidade de um aumento significativo na complexidade do sistema.

Além das vantagens apresentadas, essa tecnologia adiciona algumas restrições ao problema RSA. A primeira das restrições, de acordo com literatura a qual a pesquisa efetuada foi baseada (GUO et al., 2014; XU et al., 2014), determina que a técnica só pode ser aplicada em um nó intermediário da rota, não podendo ser efetuada no nó de origem da requisição da chamada. Essa restrição implica na necessidade de, pelo menos, 1 *hop* de contiguidade na rota da requisição para ocorrer a tentativa de desfragmentação. O relaxamento na restrição de contiguidade das EONs a partir do nó origem da requisição pode ser alcançado por meio da aplicação da técnica de *Split Spectrum* (SS) (LIRA; ALMEIDA; MARTINS-FILHO, 2017). Essa técnica, já estudada pelo grupo de pesquisa no qual este trabalho foi realizado, é feita no domínio elétrico, através do uso de *transponders* especiais, arranjos de filtros sintonizáveis e moduladores. De acordo com Guo *et al* (GUO et al., 2014), a técnica de OIM baseada em *multicasting* de supercanal apresenta desempenho quase igual à técnica SS com relação a probabilidade de bloqueio de banda. Como essa descontiguidade no nó origem já havia sido trabalhada, não foi feita uma investigação, quanto à possibilidade física, da aplicação de OIM baseado em *multicasting* de supercanal nesse nó.

Outra restrição da tecnologia de OIM é a possibilidade de realização da conversão/quebra apenas uma única vez ao longo da rota, ou seja, em apenas um dos nós intermediários essa operação poderá ser realizada, devendo a conexão atingir o nó de destino da forma que estiver disposta na saída do nó intermediário em que a técnica foi aplicada. Essa restrição se deve à degradação apresentada pelo sinal, conforme estudado (GUO et al., 2014), advindo dos efeitos não-lineares introduzidos pelo *multicasting* de supercanal. Sendo assim, quando se leva em consideração as imperfeições da camada física em cenários de rede, deve-se computar não apenas as perdas habituais associadas à modulação usada na transmissão ao longo da rota selecionada, mas também as perdas introduzidas pela técnica de OIM. Essa restrição será seguida em todas as análises desta dissertação.

Através do uso do protocolo de virtualização de redes *OpenFlow* pelo plano de controle (LIU et al., 2011), o impacto apresentado pela aplicação da técnica de OIM é pequeno, com o acréscimo de algumas informações adicionais. As informações enviadas pelos agentes, presentes no nós da rede, ao plano de controle para conexões sem aplicação de OIM incluem: porta de entrada, porta de saída, número de subbandas de entrada, número de subbandas de saída, frequência central e largura de banda da conexão. Essas são as mesmas informações enviadas para conexões que não atingiram o nó intermediário em que a técnica de OIM está sendo aplicada (ZHU et al., 2016). Há dois tipos de informações adicionais enviadas ao plano de controle quando uma conexão faz uso de OIM. O primeiro tipo é enviado por nós que estão realizando

a comutação de conexões que aplicaram a técnica, ou seja, após o nó intermediário. Essas informações adicionais são compostas pelas frequências centrais e número de subbandas de cada bloco contíguo de subbandas. Para o exemplo de multiplexação óptica inversa da Figura 9, serão enviados ao plano de controle três frequências centrais e três quantidades de subbandas, um par para cada bloco. O segundo tipo de informações enviadas ao plano de controle se destina a agentes presentes em nós que estão efetuando a multiplexação óptica inversa, sendo composto pelas informações descritas do primeiro tipo com o acréscimo de: frequência central do sinal de entrada (em que a técnica de OIM será aplicada) e largura de banda desse sinal. Com essas informações, o plano de controle poderá realizar os cálculos necessários do número e frequências dos *lasers* de bombeio e SSS's, no nó intermediário responsável pela aplicação da técnica (ZHU et al., 2017).

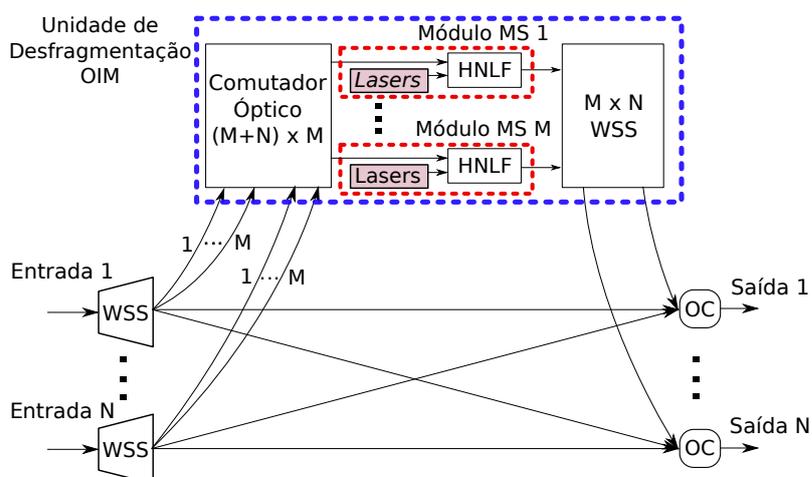
Visto todas as etapas físicas do processo de OIM, é necessário detalhar a aplicação dessa técnica na camada de rede propriamente dita, apresentando a estrutura e funcionamento de um nó com capacidade de efetuar a desfragmentação.

3.3 ARQUITETURA DE UM NÓ ÓPTICO COM CAPACIDADE DE OIM

Visando uma alocação mais eficiente de recursos com a utilização de fragmentos espectrais não usados e presentes na rede, nós com capacidade de multiplexação óptica inversa foram propostos (GUO et al., 2014; ZHU et al., 2016; XU et al., 2014). O nó mostrado (GUO et al., 2014; XU et al., 2014) apresenta módulos com capacidade de aplicação da técnica por enlace de entrada, enquanto o nó proposto por Zhu *et. al.* (ZHU et al., 2016) e baseado em um trabalho anterior (ZHU et al., 2015), apresenta compartilhamento dos módulos entre todos os enlaces desse nó. A arquitetura usada neste trabalho é apresentada na Figura 11. Ela apresenta M módulos de *multicasting* de supercanal (MS) pertencentes à unidade de desfragmentação, sendo todos eles compartilhados entre todos os N enlaces conectados a esse nó. Consequentemente, esse nó poderá aplicar a técnica em, no máximo, M supercanais simultaneamente, visto que o módulo estará ocupado enquanto a chamada na qual ele foi utilizado estiver ativa (XU et al., 2014).

A partir da Figura 11, é possível observar um conjunto de N SSS's $1 \times (M + N)$ nas entradas dos enlaces do nó. Esses dispositivos têm como função selecionar quais supercanais serão direcionados diretamente para o enlace subsequente e quais irão para a unidade de desfragmentação desse nó, primeiramente passando por um comutador óptico. O comutador óptico é responsável por direcionar, individualmente, cada supercanal para o respectivo módulo MS, que ficará ocupado durante toda a duração dessa chamada. Além de comutador óptico, a unidade de desfragmentação apresenta M módulos MS, cada um composto por L *lasers* de bombeio (*pumps*) que, juntamente com a HNLF, serão responsáveis pela criação das cópias do supercanal, conforme apresentado na Seção 3.2.

O último dispositivo que a unidade de desfragmentação apresenta, um SSS $M \times N$,

Figura 11 – Arquitetura de um nó com capacidade de OIM

Fonte: o autor.

é responsável por selecionar as sub-bandas desejadas que irão compor o sinal, contíguo ou não, e direcioná-las para os enlaces de destino específicos. Por fim, N acopladores ópticos são usados antes dos enlaces de saída, com o objetivo de combinar todos os sinais direcionados aos respectivos enlaces. Devido ao compartilhamento dos módulos MS, há uma redução na quantidade de dispositivos ópticos para atender a mesma quantidade M de sinais, diminuindo os custos de implementação dessa tecnologia, quando comparados às arquiteturas apresentadas em (XU et al., 2014; GUO et al., 2014).

3.4 ANÁLISE DA TÉCNICA DE OIM APLICADA EM CENÁRIOS DE REDES ÓPTICAS

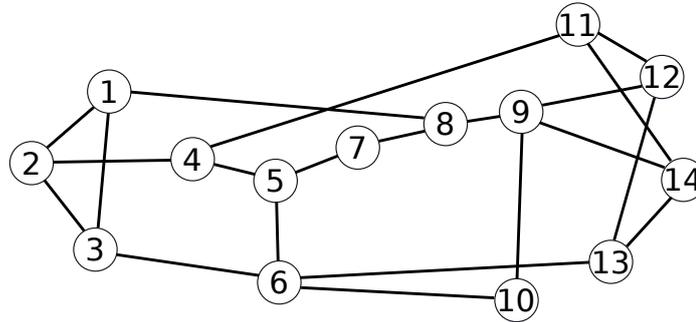
Como forma de atestar os ganhos obtidos com a aplicação da técnica de OIM em um cenário de rede, foram realizadas simulações para as topologias apresentadas na Figura 12. A topologia NSFNet da Figura 12a apresenta 14 nós e 21 enlaces bidirecionais, a topologia alemã na Figura 12b possui 17 nós e 26 enlaces e, finalmente, a topologia italiana da Figura 12c apresenta 14 nós e 29 enlaces, também bidirecionais.

Todas as simulações apresentadas neste trabalho foram realizadas com a ferramenta computacional criada pelo Grupo de Redes Ópticas da UFPE. Ele é desenvolvido na linguagem de programação C++ (DEITEL, 2010) e não apresenta interface gráfica, sendo os parâmetros de entrada necessários obtidos através do menu principal apresentado por terminal. O simulador usa tráfego dinâmico e distribuição de requisição de chamadas, entre os nós fonte-destino, uniforme.

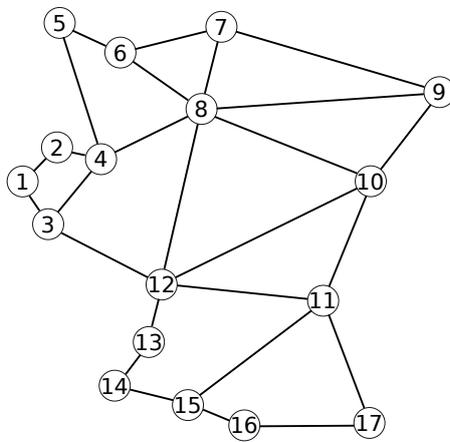
Como parâmetros de entrada específicos dessas simulações, foram utilizados roteamento fixo de menor caminho DJK com métrica de custo de enlace *hop*, alocação espectral FF, 128 slots por fibra, um total de 10^8 requisições e chamadas com ocupando 3, 6 e 11 *slots*, representando taxas de transmissão de 100, 200 e 400 Gbps. O algoritmo de menor caminho DJK por *hops* foi escolhido pela sua simplicidade e capacidade de redução do problema de continuidade, restrição apresentada pelas EONs. A Figura 13 apresenta uma comparação entre as simulações

Figura 12 – Topologias utilizadas nas simulações.

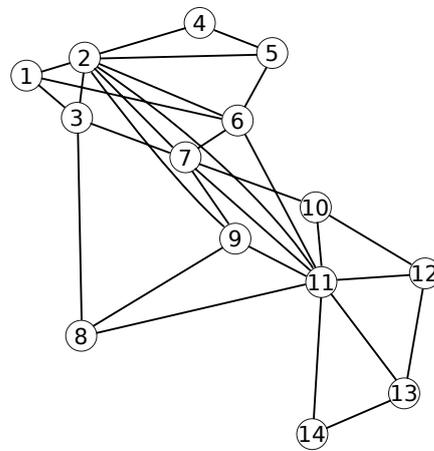
(a) Topologia NSFNet.



(b) Topologia alemã.



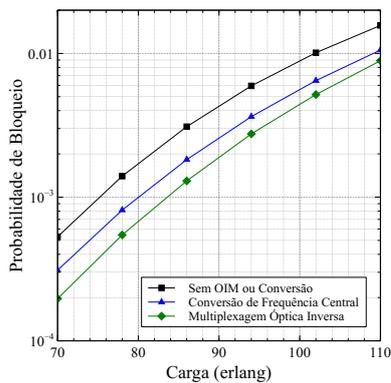
(c) Topologia italiana.



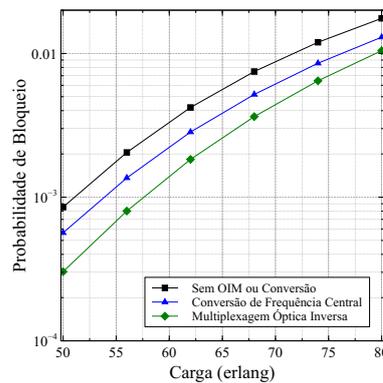
Fonte: o autor.

Figura 13 – Gráficos de probabilidade de bloqueio versus carga da rede com comparação entre uso das unidades de desfragmentação como conversor de frequência central, como OIM e sem uso da técnica.

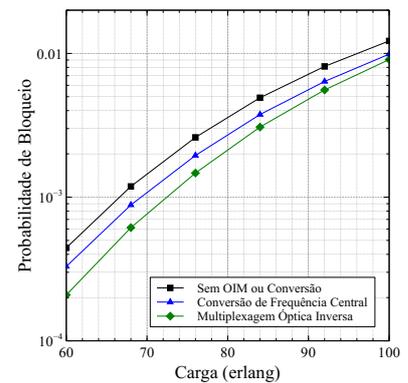
(a) Topologia NSFNet.



(b) Topologia alemã.



(c) Topologia italiana.



Fonte: o autor.

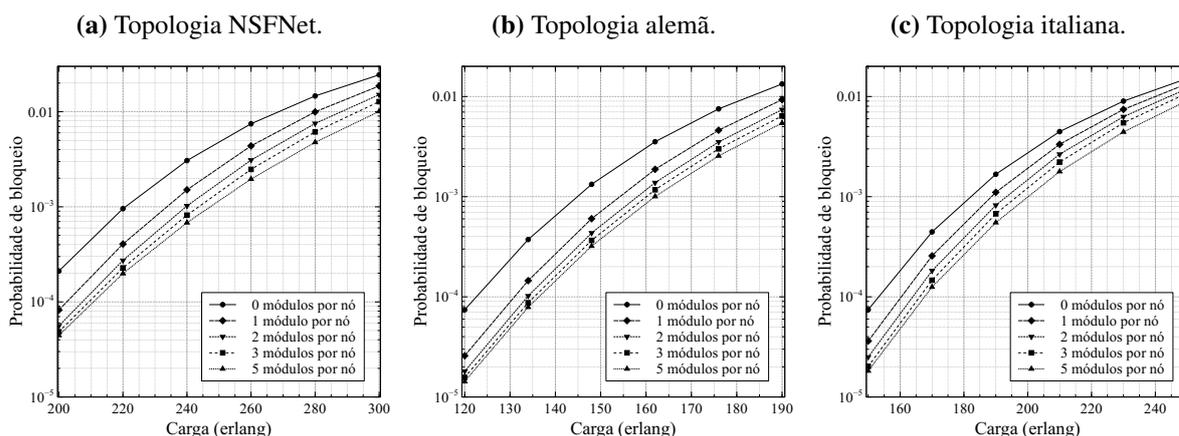
sem capacidade de desfragmentação, com unidade de desfragmentação sendo usada apenas para efetuar conversão de frequência central, i.e., serão escolhidas todas as sub-bandas de uma das cópias criadas, e com uso de desfragmentação através de OIM, possibilitando *slots* não contíguos nos enlaces da rota posteriores ao nó onde a técnica foi aplicada. Foi utilizado apenas 1 módulo

MS em cada unidade de desfragmentação de cada nó, portanto cada nó poderá efetuar apenas uma conversão-quebra simultaneamente.

A escolha do nó onde a técnica de OIM será realizada é feita de maneira aleatória, dentre as, possíveis, várias possibilidades. Se for possível alocar a requisição com uso de OIM no primeiro nó sorteado, ela é aceita e esse nó será escolhido para aplicação da técnica. Se a requisição não puder ser alocada por meio do uso de OIM no primeiro nó sorteado, se tentará a alocação no próximo nó intermediário, também sorteado aleatoriamente. Quando a aplicação da técnica de OIM for testada em todos os nós intermediários e não puder ser alocada, a conexão é bloqueada.

Analisando a Figura 13, é possível observar uma redução expressiva na probabilidade de bloqueio de chamada para todas as topologias testadas. A topologia NSFNet apresentou reduções entre 32% e 41% para conversão de frequência central e entre 43% e 63% com utilização de OIM, ambas para pontos de carga de 110 e 70 erlang, respectivamente. Para a topologia alemã, foram obtidas reduções entre 26% e 34% para conversão de frequência central e entre 40% e 64% para OIM, ambas para pontos de carga de 80 e 50 erlang. A topologia italiana apresentou reduções de probabilidade de bloqueio de chamada entre 19% e 26% para conversão e entre 26% e 53% com a aplicação da técnica de OIM, ambas para pontos de carga de 100 e 60 erlang. Esses resultados confirmam os benefícios da aplicação da técnica em cenários de rede, apresentando ganhos significativos quanto ao uso dessa tecnologia para aliviar a restrição de contiguidade em parte da rota das chamadas, que seriam bloqueadas caso contrário.

Figura 14 – Curvas de probabilidade de bloqueio de chamada versus carga da rede para diferentes quantidades de módulos MS por nó, variando entre 0 e 5.



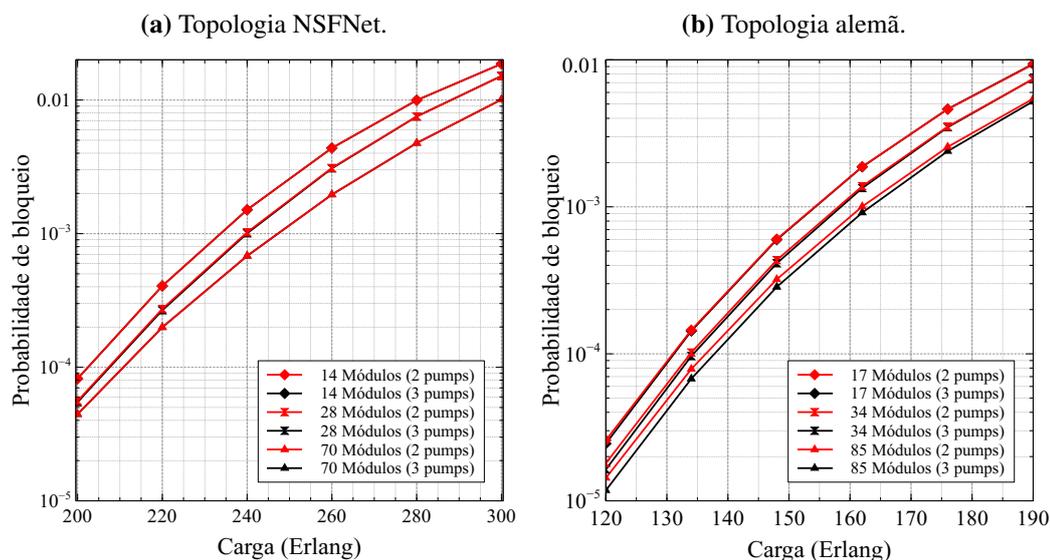
Fonte: o autor.

A Figura 14 apresenta as curvas de probabilidade de bloqueio de chamada versus carga na rede para valores de 0, 1, 2, 3, e 5 módulos MS por nó para todas as topologias da Figura 12. Essa simulação utilizou requisições com tamanhos variando entre 2 e 5 slots, uniformemente distribuídos entre os pares de nós fonte-destino. A partir dela é possível observar, para baixos valores de carga, uma saturação no ganho de probabilidade de bloqueio de chamada com o

aumento do número de módulos MS por nó. Essa saturação pode ser interpretada como uma aproximação de um limite de ganho da própria técnica, visto que se faz necessário a rota da requisição apresentar um mínimo de 1 *hop* contíguo para se tentar a aplicação do OIM. Nota-se também que os ganhos se mantêm praticamente constantes com o aumento do número de módulos para uma rede mais congestionada, pelo menos até uma quantidade de 5 módulos por nó.

Conforme detalhado na Seção 3.2, o número de *pumps* no módulos MS proporcionará diferentes quantidades de cópias do supercanal ao qual a técnica de OIM poderá ser aplicada. Sendo assim, uma análise sobre as diferenças na probabilidade de bloqueio de chamada foi feita, de modo a comparar o uso de módulos com 2 e 3 *pumps*, com criação de 2 e 6 cópias, respectivamente.

Figura 15 – Curvas de probabilidade de bloqueio de chamada versus carga da rede para diferentes quantidades de módulos MS, com 2 e 3 *pumps*, por nó.



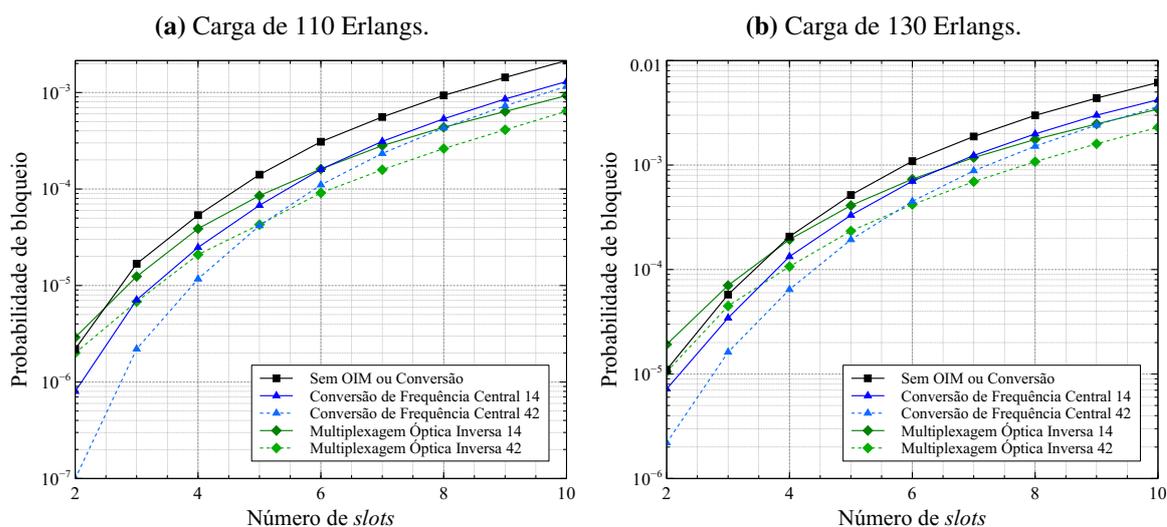
Fonte: o autor.

A partir da Figura 15 é possível notar que não há diferença entre o uso de módulos MS com 2 e 3 *pumps* para a topologia NSFNet e, apenas, uma pequena diferença para a topologia alemã, apenas quando 5 módulos MS por nó são alocados, totalizando 85 módulos. Essa insignificante diferença aponta que o uso de mais um *laser* de bombeio, além de encarecer o CAPEX e OPEX da técnica de OIM, não deve apresentar ganhos de desempenho em cenários de rede. Portanto, salvo quando explicitado de outra maneira, todas as simulações apresentadas neste trabalho utilizam módulos MS com 2 *pumps*, aplicando um *multicasting* de supercanal 1:3.

Outra análise realizada está relacionada com o que na literatura é denominado *fairness* (CALLEGATI et al., 2014; WANG; MUKHERJEE, 2012b). Seu conceito está relacionado ao fato de que, por exemplo, quanto maior a quantidade de *hops* da rota de uma determinada requisição, mais difícil será de alocá-la, a depender do congestionamento da rede. Normalmente, a análise de *fairness* é feita por meio da comparação de algoritmos aplicados à mesma rede,

apresentando os mesmo dispositivos. Aqui, é feita a avaliação do impacto da implantação de módulos MS na rede, fazendo uso desses módulos como conversores de frequência central e para aplicação de OIM, por meio da parcela da probabilidade de bloqueio de chamadas total versus a quantidade de *slots* usados pelas conexões.

Figura 16 – Curvas de probabilidade de bloqueio de chamada versus número de *slots* das requisições para da topologia NSFNet com quantidades de módulos MS de 14 e 42, no total, e sem módulos presentes.



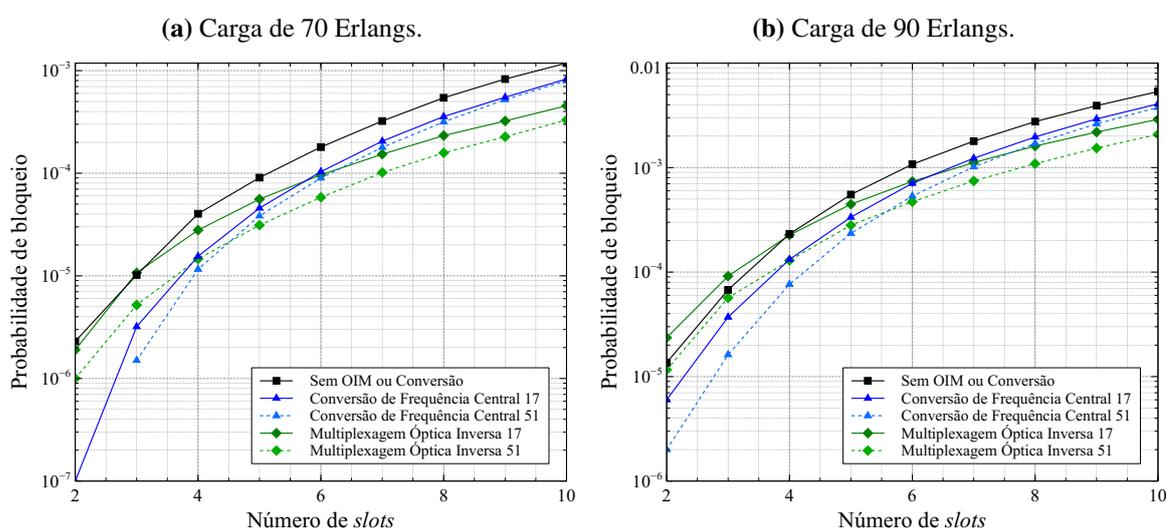
Fonte: o autor.

A partir da Figura 16, para uma demanda de tráfego formada por 2 a 10 *slots*, observa-se novamente a redução da probabilidade de bloqueio de chamada com o uso de conversão de frequência central e de multiplexação óptica inversa, seja com 14 ou 42 módulos MS. Quando se compara o bloqueio por classe de demanda, é possível observar que as requisições de menor quantidade de *slots* são bloqueadas em menor quantidade quando os módulos MS são usados como conversores de frequência central, comparadas com seu uso com OIM e que requisições de maior tamanho são menos bloqueadas quando os módulos são usados aplicando a descontiguidade dos *slots*. É possível observar na Figura 16a que as curvas com 14 módulos se invertem a partir das requisições de tamanho 6, enquanto as curvas com 42 módulos se invertem quando atingem o número de 5 *slots*. Ambas as curvas da Figura 16b se invertem no ponto de requisições de tamanho 6. Para uma mesma quantidade de módulos MS empregados por nó, embora as classes de requisição com menos *slots* possuam menos bloqueio quando apenas conversão de frequência central é utilizada, o fato de a multiplexação óptica inversa favorecer as requisições por mais *slots*, e estas são aquelas que apresentam maior bloqueio e que portanto praticamente definem o valor da probabilidade de bloqueio da rede, explica a redução da probabilidade de bloqueio de rede quando se compara o uso de conversão de frequência e OIM. Observa-se que o uso de multiplexação óptica inversa consegue aliviar um pouco a discrepância entre o bloqueio de conexões largas e estreitas. Isso ocorre porque a restrição de contiguidade é muito severa para requisições com muitos *slots*. Portanto, o uso da multiplexação óptica inversa, por aliviar a

contiguidade dos *slots*, favorece mais as demandas por mais *slots*.

A redução de bloqueio das demandas maiores acarreta numa maior carga na rede, e, embora os módulos OIM também possam ser usados para aliviar a contiguidade de conexões menores, o impacto de uma rede mais congestionada torna-se mais determinante no bloqueio de requisições estreitas do que o benefício da técnica de multiplexagem inversa. A Figura 16a (16b) mostra que, para uma carga de 110 (130) erlang, as requisições de tamanho 2 (tamanhos 2 e 3) são menos bloqueadas quando não há uso de módulos MS na rede, se comparadas ao uso de módulos como OIM para o caso do uso de 14 módulos. Quão maior a carga, mais congestionada se torna a rede, e essa redução do benefício de OIM para as conexões menores torna-se mais evidente.

Figura 17 – Curvas de probabilidade de bloqueio de chamada versus número de *slots* das requisições para da topologia alemã com quantidades de módulos MS de 17 e 51, no total, e sem módulos presentes.

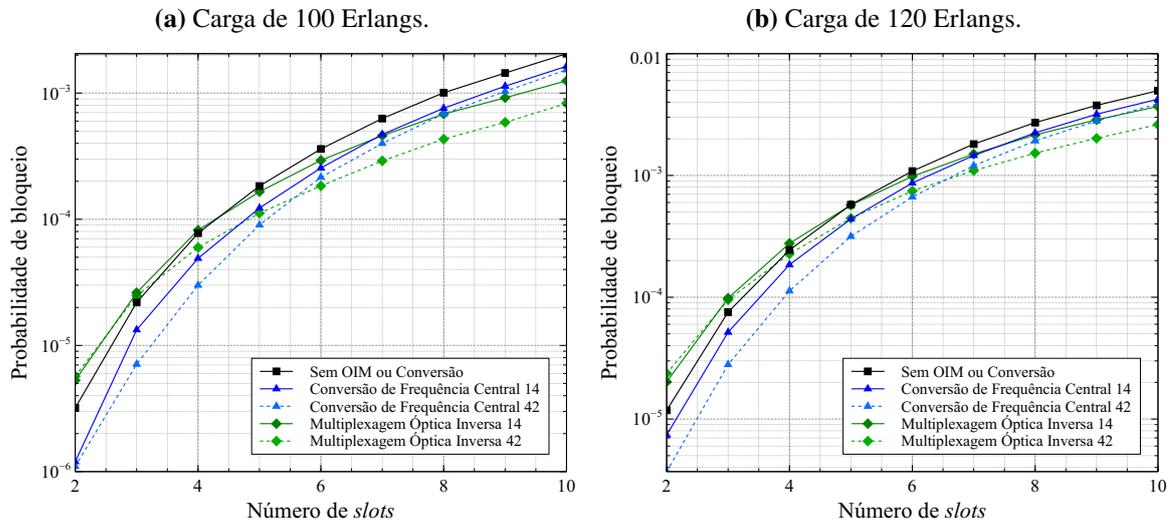


Fonte: o autor.

As mesmas observações feitas sobre a Figura 16 podem ser feitas para as Figuras 17 e 18, que mostram os resultados para as topologias alemã e italiana, respectivamente, apresentando comportamento similar. Um ponto a ser destacado é o apresentado na Figura 17a, onde não ocorre bloqueio de requisições de tamanho 2, com uso de 51 módulos como conversores de frequência central.

As Figuras 16 e 17 indicam que o uso dos módulos MS aplicados a descontinuidade de requisições apresenta um melhor índice de desempenho de *fairness*, quando compara-se seu uso com conversão de frequência central, o que já era previsto e foi corroborado pelos resultados. Observe que, nos casos aqui analisados, a conversão de frequência central em redes ópticas elásticas não se mostrou eficiente para o provimento de *fairness* das requisições por diferentes larguras de banda. Isso ocorre porque, embora a conversão de frequência central, assim como a multiplexagem óptica inversa, facilite a alocação de todas as classes de demanda para uma dada carga da rede, a manutenção da contiguidade do espectro requerida na conversão de frequência

Figura 18 – Curvas de probabilidade de bloqueio de chamada versus número de *slots* das requisições para da topologia italiana com quantidades de módulos MS de 14 e 42, no total, e sem módulos presentes.



Fonte: o autor.

central não traz tantos benefícios para as requisições por mais *slots* como a multiplexagem óptica inversa, e acarreta em praticamente os mesmos benefícios para as requisições por poucos *slots*. Portanto, o aumento de carga na rede resultante de mais requisições alocadas na rede não é tão grande a ponto de impactar na melhora advinda da conversão de frequência central das requisições por poucos *slots*.

4 HEURÍSTICAS E META-HEURÍSTICA APLICADAS À ALOCAÇÃO DE MÓDULOS MS

Este capítulo apresenta primeiramente breves conceitos de heurísticas e meta-heurísticas encontrados na literatura (PEARL, 1984; LUKE, 2013; DEB et al., 2002), como também aborda o conceito de otimização multi-objetivo (Coello Coello, 2006; KONAK; COIT; SMITH, 2006). Posteriormente são detalhadas duas heurísticas e uma meta-heurística, que tem como objetivo alocar módulos MS entre os nós de rede de maneira mais eficiente. Serão apresentados os resultados obtidos através da quantificação da redução da probabilidade de bloqueio de chamada para diversas topologias. Por fim, os três algoritmos serão comparados e uma análise qualitativa será realizada.

4.1 CONCEITOS GERAIS DE HEURÍSTICAS, META-HEURÍSTICAS E OTIMIZAÇÃO MULTI-OBJETIVO

Conforme definido por Pearl em (PEARL, 1984), heurísticas são critérios, métodos ou princípios para decidir qual curso de ação, entre várias opções, deve ser o mais eficiente para atingir um objetivo específico. Alguns problemas precisam da avaliação de uma grande quantidade de possibilidades para a determinação da solução ótima, podendo levar um tempo de cálculo proibitivo para casos práticos. Através de heurísticas, é possível encontrar soluções aceitáveis, próximas das soluções ótimas, em um tempo hábil para soluções de problemas de cenários reais.

As meta-heurísticas são definidas por Luke em (LUKE, 2013) como processos de geração iterativos que orientam uma heurística subordinada, combinando conceitos de inteligência distintos, para explorar o espaço de busca com estratégias de aprendizagem usadas para estruturar informações a fim de encontrar soluções eficientes próximas do ideal. Esse tipo de algoritmo geralmente é baseado em conceitos oriundos da evolução biológica, sistemas nervosos, mecanismos estatísticos, entre outros (PEARL, 1984). Semelhantes às heurísticas, esse tipo de algoritmo não garante a solução ótima do problema, mas pode apresentar resultados satisfatórios com tempo de solução aceitável.

Normalmente heurísticas abordam um problema específico, trabalhando com suas particularidades para direcionamento a uma boa solução. Por outro lado, meta-heurísticas se comportam de maneira mais generalista (LUKE, 2013). Problemas de natureza diferentes, mas que possuam a mesma estrutura básica, podem ser resolvidos pela mesma meta-heurística.

Outro conceito abordado por Luke em (LUKE, 2013) trata do problema de otimização que apresenta mais de um objetivo, sendo ambos conflitantes entre si. Objetivo é o termo usado para designar o parâmetro que se busca otimizar. Esse tipo de problema não apresenta uma solução simultaneamente ótima para todos os objetivos, mas sim um conjunto de soluções que apresentam

troca de ganho entre os parâmetros a serem otimizados. Essas soluções, quando comparadas com as demais soluções do conjunto, não apresentam ganhos inferiores, ou superiores, para todos os objetivos simultaneamente, por isso são apresentadas como conjunto de soluções não dominadas ou frente de Pareto (Coello Coello, 2006; KONAK; COIT; SMITH, 2006).

4.2 APLICAÇÕES DE HEURÍSTICAS E META-HEURÍSTICAS PARA ALOCAÇÃO DE MÓDULOS DE *MULTICASTING* DE SUPERCANAL EM UNIDADES DE DESFRAGMENTAÇÃO ESPECTRAL COM OIM

Juntamente aos resultados da redução da P_B das simulações apresentadas na Figura 14, foi possível também obter o número de vezes que cada nó efetuou a multiplexação óptica inversa ao longo de toda a simulação, como também o número máximo de módulos MS utilizados simultaneamente em cada nó. Esses dados são apresentados na Tabela 2 e correspondem às simulações com 5 módulos MS por nó.

Tabela 2 – Tabela com o número de vezes que cada nó realizou OIM e o número máximo de módulos usados simultaneamente por nó, ambos para as topologias alemã, italiana e NSFNet.

| Índice do nó | Nº de OIM realizadas | | | Nº máximo de módulos MS usados simultaneamente | | |
|--------------|----------------------|----------|--------|--|----------|--------|
| | Alemã | Italiana | NSFNet | Alemã | Italiana | NSFNet |
| 1 | 10618 | 0 | 26586 | 5 | 0 | 5 |
| 2 | 29 | 257592 | 20647 | 3 | 5 | 5 |
| 3 | 28493 | 47 | 45321 | 5 | 2 | 5 |
| 4 | 21523 | 0 | 221629 | 5 | 0 | 5 |
| 5 | 8 | 0 | 127304 | 1 | 0 | 5 |
| 6 | 0 | 0 | 165880 | 0 | 0 | 5 |
| 7 | 0 | 35 | 2120 | 0 | 2 | 5 |
| 8 | 40143 | 0 | 169046 | 5 | 0 | 5 |
| 9 | 0 | 0 | 116320 | 0 | 0 | 5 |
| 10 | 54823 | 0 | 638 | 5 | 0 | 4 |
| 11 | 74108 | 263311 | 53523 | 5 | 5 | 5 |
| 12 | 241017 | 0 | 28240 | 5 | 0 | 5 |
| 13 | 3960 | 0 | 5417 | 4 | 0 | 5 |
| 14 | 2 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 15 | 4857 | - | - | 5 | - | - |
| 16 | 0 | - | - | 0 | - | - |
| 17 | 0 | - | - | 0 | - | - |

Fonte: o autor.

É possível observar uma disparidade entre o número de vezes que a técnica de multiplexação óptica inversa foi realizada em cada nó das redes estudadas. Portanto, um melhor aproveitamento dos módulos MS poderá ser alcançado se houver uma distribuição adequada deles entre esses nós. Isto pode significar que, com o mesmo número de módulos MS, é possível produzir um ganho na probabilidade de bloqueio de chamada maior, ou que uma mesma P_B poderá ser alcançada usando menos módulos ao total.

Com esses objetivos, duas heurísticas e uma meta-heurística para a alocação de módulos MS para desfragmentação espectral foram propostas e são descritas e avaliadas nas seções subsequentes.

O problema de alocação de módulos MS apresenta as características de otimização multi-objetivo, pois, para poucos módulos alocados, há um alto valor de probabilidade de bloqueio de chamada enquanto que, para muitos módulos, o valor de P_B diminui. Devido a isso, é possível aplicar o conceito de frente de Pareto com o objetivo de construir um conjunto de melhores soluções para esse problema, onde cada ponto apresenta uma distribuição de módulos MS específica, juntamente com a probabilidade de bloqueio de chamada dessa distribuição. Haverá, no máximo, uma solução possível para cada quantidade total de módulos MS na rede. Este trabalho apresenta as aplicações do conceito de frente de Pareto nas Seções 4.5 e 4.6.

4.3 HEURÍSTICAS DE ALOCAÇÃO DE MÓDULOS MS INCREMENTAL COM MELHOR PROBABILIDADE DE BLOQUEIO

A primeira heurística de alocação de módulos MS proposta neste trabalho é mostrada através do pseudo-código do Algoritmo 1. Ela realiza uma alocação dos módulos de forma incremental, ou seja, analisa a cada iteração qual dos nós da rede produz a maior redução na probabilidade de bloqueio de chamada naquela iteração. A este nó é atribuído um módulo e o processo iterativo se repete até que todos os módulos sejam alocados.

Após a inicialização das variáveis, começa o processo de alocação de um módulo, representado no *loop* iniciado na linha 3 do Algoritmo 1. Primeiramente, o nó de índice d recebe um módulo MS provisoriamente. Com essa alocação provisória, a probabilidade de bloqueio de chamada é calculada e comparada com a mínima até o momento. Se o valor de P_B encontrado for menor, a P_{Bmin} receberá o valor atual e o índice do nó d será guardado na variável x . Por fim, o módulo posto provisoriamente no nó de índice d é retirado e a alocação provisória no próximo nó é analisada. Se todos os nós já tiverem sido analisados (linha 11), um módulo MS é alocado no nó x , que apresentou o menor valor de P_B dentre todos os avaliados.

O processo de alocação da linha 3 é repetido T vezes, sendo essa a quantidade total de módulos a ser alocada. As simulações da P_B são realizadas para um ponto de carga média da rede.

Algoritmo 1 Heurística Incremental de Distribuição dos módulos MS baseada na menor probabilidade de bloqueio de chamada.

Entrada: T {Número total de módulos MS};

Saída: $M = (M_1, M_2, \dots, M_D)$ {Distribuição final dos módulos, sendo D o número total de nós da rede};

```

1: while  $T > 0$  do
2:    $P_{B_{min}} \leftarrow 1$ ;
3:   for  $d = 1$  to  $D$  do {Testes de alocação de um módulo em todos os nós da rede, um por
   iteração}
4:      $M_d \leftarrow M_d + 1$ ;
5:      $P_B \leftarrow$  Cálculo da probabilidade de bloqueio de chamada, para uma carga média
   na rede, com distribuição  $M$  de módulos MS;
6:     if  $P_B < P_{B_{min}}$  then
7:        $P_{B_{min}} \leftarrow P_B$ ;
8:        $x \leftarrow d$ ;
9:     end if
10:     $M_d \leftarrow M_d - 1$ ;
11:  end for
12:   $M_x \leftarrow M_x + 1$ ;
13:   $T \leftarrow T - 1$ ;
14: end while

```

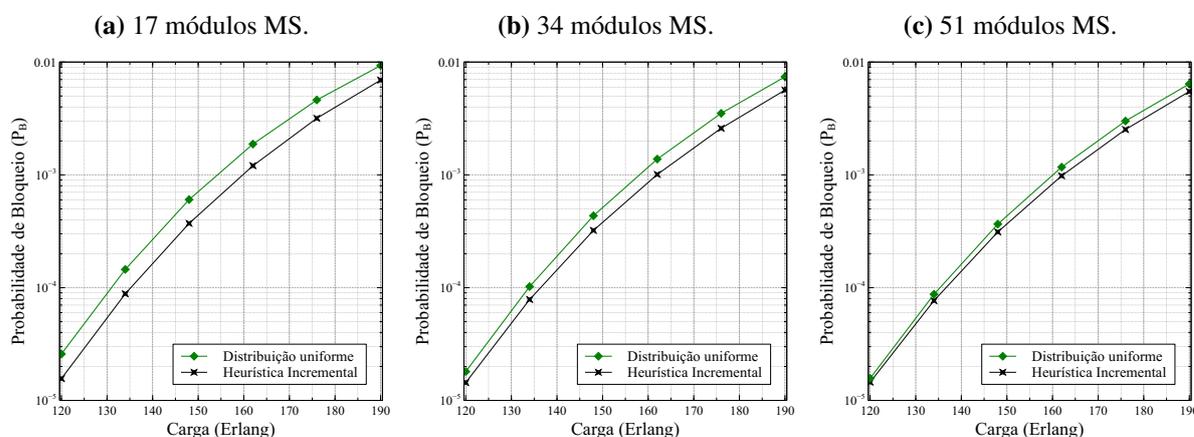
4.3.1 Resultados

Para cada topologia da Figura 12, foram efetuadas 3 simulações diferentes, cada uma com uma quantidade de módulos MS distinta. Esses valores, 17, 34 e 51 módulos para a topologia alemã e 14, 28 e 42 para as topologias italiana e NSFNet, foram escolhidos por ser possível de comparação com a distribuição de módulos uniforme. Os parâmetros de entrada foram semelhantes aos da simulação apresentada na Seção 3.4 e apresentam requisições com tamanhos variando entre 2 e 5 *slots* uniformemente distribuídos entre os pares de nós da rede.

Os primeiros gráficos, para a tologia alemã e apresentados na Figura 19, mostraram reduções na probabilidade de bloqueio de chamada entre 39.5% e 25.7% para a simulação com 17 módulos MS, 20% e 23.7% para 34 módulos e entre 7.6% e 14.2% para a simulação com 51 módulos comparados com a distribuição uniforme de módulos. Também é possível observar que, para uma rede pouco congestionada, o ganho da heurística entre os valores de 34 e 51 módulos é praticamente desprezível, sendo representado pelos pontos mais à esquerda dos gráficos. Isso implica que, nesse estado da rede, o acréscimo de módulos não trará mais benefícios, pois a quantidade de módulos por nó é tal que não há benefícios em privilegiar algum nó em detrimento de outro.

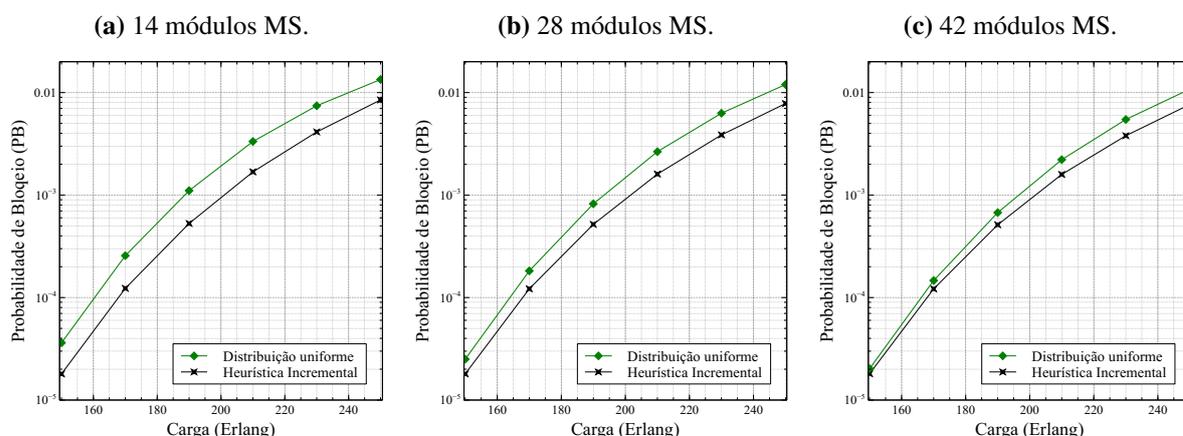
Os gráficos da topologia italiana, apresentados na Figura 20, mostram redução de P_B entre 50.3% e 36.9% para a simulação com 14 módulos MS, entre 28.1% e 34.7% para 28 módulos e entre 10.7% e 29.1% para 42 módulos, novamente quando comparadas com a distribuição uniforme. Similar à simulação apresentada na Figura 19, o aumento do ganho entre as Figuras 20b e

Figura 19 – Gráficos da probabilidade de bloqueio de chamada versus carga para 3 diferentes quantidades de módulos total na rede para a topologia alemã com: (a) 17 módulos; (b) 34 módulos; (c) 51 módulos para as seguintes distribuições: (1) Distribuição uniforme; (2) Distribuição incremental de melhor P_B .



Fonte: o autor.

Figura 20 – Gráficos da probabilidade de bloqueio de chamada versus carga para 3 quantidades de módulos total para a topologia italiana com: (a) 14 módulos; (b) 28 módulos; (c) 42 módulos para as seguintes distribuições: (1) Distribuição uniforme; (2) Distribuição incremental de melhor P_B .



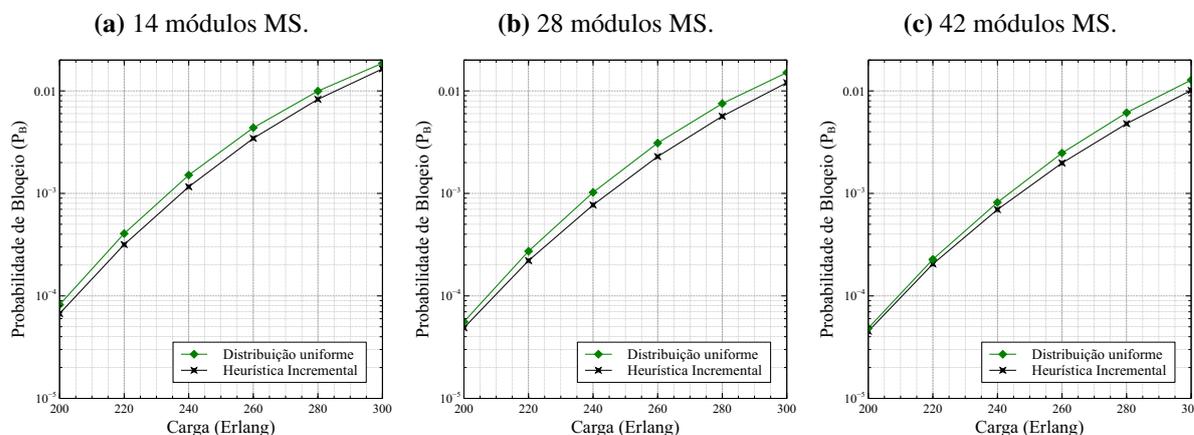
Fonte: o autor.

20c, para uma rede pouco congestionada, é praticamente nulo.

A topologia NSFNet apresentou ganhos entre 18% e 12%, 12.6% e 20.4% e entre 6.8% e 20.7% para as simulações com 14, 28 e 42 módulos MS, respectivamente. O aumento do ganho da probabilidade de bloqueio de chamada nessa rede foi o mais baixo das topologias testadas. O aumento no ganho para a rede mais congestionada, ponto mais à direita dos gráficos, manteve-se praticamente constante com o aumento do número de módulos, indicando que uma quantidade de 42 módulos possivelmente não atinge o ganho máximo de P_B .

Mais detalhes sobre as simulações usando a heurística de alocação de módulos MS incremental baseada na melhor probabilidade de bloqueio de chamada serão apresentados na Seção 4.6, quando será realizada uma comparação dela com outros algoritmos implementados

Figura 21 – Gráficos da probabilidade de bloqueio de chamada versus carga para 3 quantidades de módulos total para a topologia NSFNet com: (a) 14 módulos; (b) 28 módulos; (c) 42 módulos para as seguintes distribuições: (1) Distribuição uniforme; (2) Distribuição incremental de melhor P_B .



Fonte: o autor.

neste trabalho.

4.4 HEURÍSTICAS DE ALOCAÇÃO DE MÓDULOS MS BASEADA NA FREQUÊNCIA DE USO DOS NÓS INTERMEDIÁRIOS

A segunda heurística proposta ao longo da pesquisa efetuada no mestrado e apresentada neste trabalho, baseia-se nas particularidades e restrições da técnica de multiplexação óptica inversa, conforme detalhadas na Seção 3.2 e apresentadas em (GUO et al., 2014; Yuanxiang Chen et al., 2013; XU et al., 2014).

Ela utiliza a frequência de uso dos nós da rede como nó intermediário, dentro do conjunto total de rotas pré-estabelecidas pelo algoritmo de roteamento, como critério de escolha para alocação dos módulos MS. Além da frequência de uso, foi utilizada uma constante de amortecimento α que, aplicada à redução do valor de uso a cada alocação de módulo, determina a intensidade da concentração dos módulos nos nós mais congestionados. Essa constante é variada entre um valor próximo de 0, que apresenta uma concentração no(s) nó(s) com maior frequência de uso, e um valor próximo de 1, tendendo a uma distribuição uniforme entre os nós da rede. A escolha do valor ótimo de α é realizada medindo a menor probabilidade de bloqueio de chamada apresentada.

A heurística é apresentada através do pseudo-código presente no Algoritmo 2 e possui como parâmetros de entrada o conjunto de rotas entre todos os pares de nós e o número total de módulos MS. A partir do conjunto de rotas da entrada, é construído o vetor U de frequência de uso de cada nó como nó intermediário das rotas. Também estão presentes um vetor A , representando uma distribuição auxiliar de módulos entre os nós da rede, e uma variável P_{Bmin} que guardará o menor valor da probabilidade de bloqueio de chamada encontrado pelo algoritmo.

Algoritmo 2 Distribuição dos módulos MS baseada na frequência de uso dos nós como nó intermediário.

Entrada: Conjunto de rotas responsável por conectar todos os pares de nós da rede, conforme fornecido pelo algoritmo de roteamento;

Entrada: T {Número total de módulos MS};

Saída: $M = (M_1, M_2, \dots, M_D)$; {Melhor distribuição de módulos, onde D é o número de nós na rede}

```

1:  $U = (U_1, U_2, \dots, U_D)$ ; {Criação do vetor  $U$  de frequência dos nós da rede como nó interme-
   diário do conjunto total de rotas}
2:  $A = (A_1, A_2, \dots, A_D)$ ; {Distribuição de módulos auxiliar};
3:  $P_{B_{min}} \leftarrow 1$ ;
4: for  $\alpha = 0.01$  to  $0.99$  do
5:   for  $i = 1$  até  $D$  do {Valores iniciais para  $U$  e  $A$ }
6:      $A_i \leftarrow 0$ ;
7:      $U_i \leftarrow$  número de vezes que o  $i$ -ésimo nó foi um nó intermediário no conjunto de
       todas as rotas da rede;
8:   end for
9:    $L \leftarrow$  maior valor do vetor  $U$ ;
10:  while  $\sum_{i=1}^D A_i < T$  do
11:     $i \leftarrow$  índice do nó que apresenta o maior valor no vetor  $U$ ;
12:     $A_i \leftarrow A_i + 1$ ; {Atribuição de um módulo MS no  $i$ -ésimo nó}
13:     $U_i \leftarrow U_i - \alpha \cdot L$ ; {Atualização do vetor  $U$ }
14:  end while
15:   $P_{B_{aux}} \leftarrow$  probabilidade de bloqueio de chamada para valor de carga médio com
   distribuição de módulos  $A$ ;
16:  if  $P_{B_{aux}} < P_{B_{min}}$  then
17:     $P_{B_{min}} \leftarrow P_{B_{aux}}$ ;
18:     $M \leftarrow A$ ;
19:  end if
20:   $\alpha \leftarrow \alpha + 0.01$ ;
21: end for

```

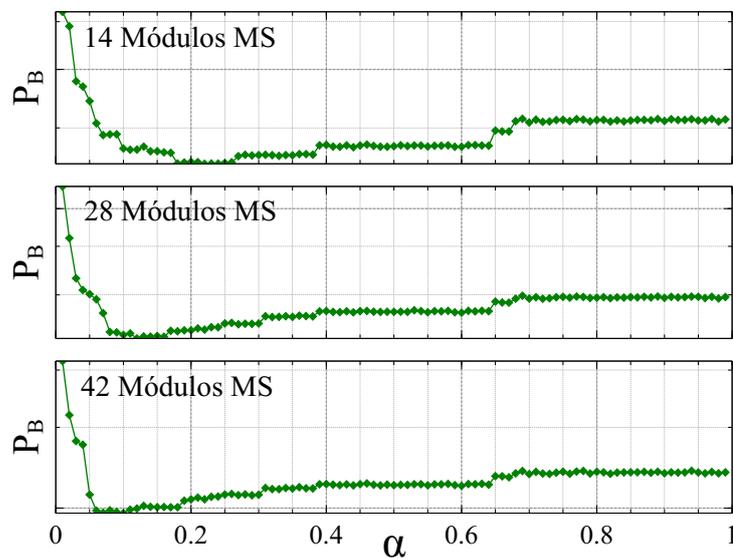
A alocação de fato se dá no *loop* iniciado na linha 4 do Algoritmo 2. Nele, para valores de α variando entre 0.01 e 0.99 com passo de 0.01, os vetores A e U são inicializados e a variável L recebe o valor do nó que apresentar a maior recorrência como nó intermediário. Posteriormente, é realizada a distribuição de todos os módulos MS entre os nós da rede, de acordo com o *loop* iniciado na linha 10. Essa distribuição é realizada primeiramente atribuindo um módulo ao nó i com maior valor no vetor U . Após essa atribuição, ocorre uma atualização do vetor U . Nessa atualização é subtraído de U_i o valor de L multiplicado pela constante de amortecimento α . Após a subtração o processo se repete e um novo módulo será atribuído, se ainda houver módulos para serem alocados.

Para cada distribuição específica, a probabilidade de bloqueio de chamada é calculada e comparada com a menor probabilidade até o momento. Se apresentar um valor menor, essa P_B é guardada em $P_{B_{min}}$ e a distribuição A é armazenada em M , que representa a distribuição de módulos resultado da heurística.

4.4.1 Resultados

Primeiramente são apresentadas as variações da probabilidade de bloqueio de chamada versus a variação do valor de α para todas as topologias da Figura 12, com quantidades de 14, 28 e 42 módulos MS para as topologias italiana (Figura 24) e NSFNet (Figura 22) e quantidades de 17, 34 e 51 módulos para a topologia alemã (Figura 23). Essas simulações foram realizadas para um ponto de carga médio específico de cada topologia, com valor de 200 Erlangs para a topologia italiana, 250 Erlangs para a NSFNet e 162 Erlangs para a topologia alemã.

Figura 22 – Gráfico da variação da P_B versus variação do valor da constante de amortecimento α para a topologia NSFNet com: (1) 14 módulos; (2) 28 módulos; (3) 42 módulos.

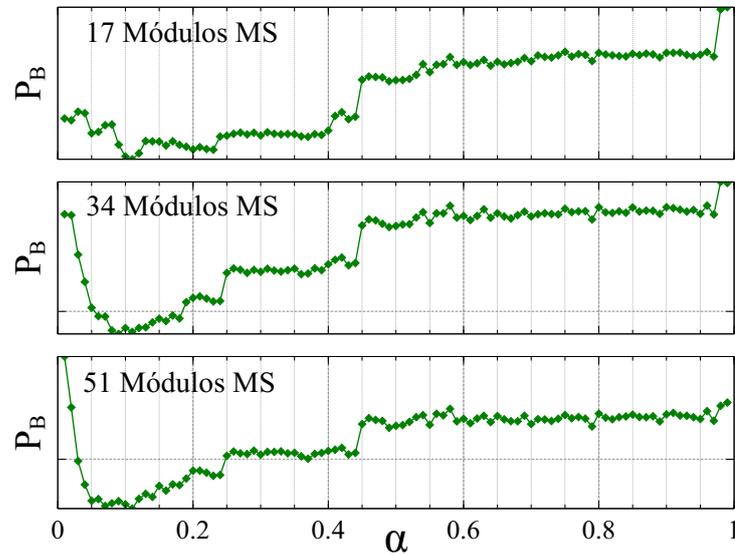


Fonte: o autor.

A partir dos gráficos apresentados nas Figuras 22, 23 e 24, é possível observar que, para todas as topologias, um valor ótimo de α foi encontrado, representando uma distribuição específica dos módulos MS entre os nós da rede. Nota-se também que os valores ótimos encontrados ficaram mais próximos de 0, indicando que uma concentração dos módulos MS nos nós mais usados como nós intermediários das rotas apresenta uma maior redução da P_B , pelo menos para carga média na rede.

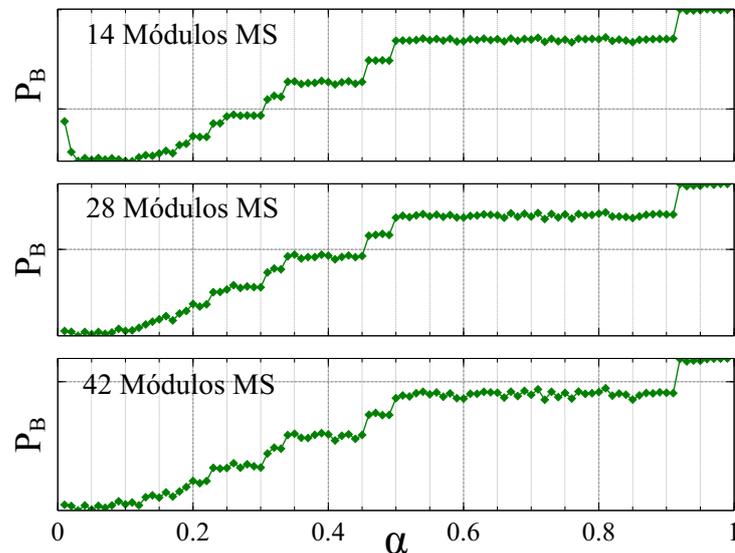
Cada valor ótimo de α , juntamente com sua respectiva distribuição de módulos MS, foi aplicado em uma simulação de P_B versus carga da rede, apresentadas nas Figuras 25, 26 e 27. É possível observar uma redução na probabilidade de bloqueio de chamada para todas as topologias simuladas. Em termos de porcentagem, os resultados da heurística de frequência de uso de nós intermediários obtiveram praticamente a mesma redução de probabilidade de bloqueio de chamada que a heurística incremental de melhor P_B apresentada na Seção 4.3, com leve vantagem em alguns pontos de carga específicos. Maiores detalhes da comparação entre os algoritmos serão apresentados na Seção 4.6.

Figura 23 – Gráfico da variação da P_B versus variação do valor da constante de amortecimento α para a topologia alemã com: (1) 17 módulos; (2) 34 módulos; (3) 51 módulos.



Fonte: o autor.

Figura 24 – Gráfico da variação da P_B versus variação do valor da constante de amortecimento α para a topologia italiana com: (1) 14 módulos; (2) 28 módulos; (3) 42 módulos.

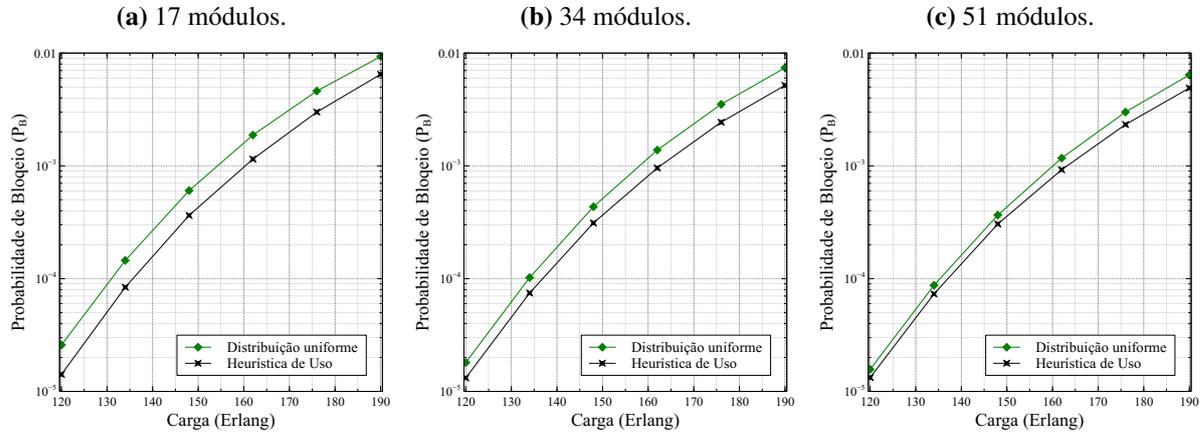


Fonte: o autor.

4.5 META-HEURÍSTICAS DE ALOCAÇÃO DE MÓDULOS MS BASEADA EM ALGORITMO GENÉTICO

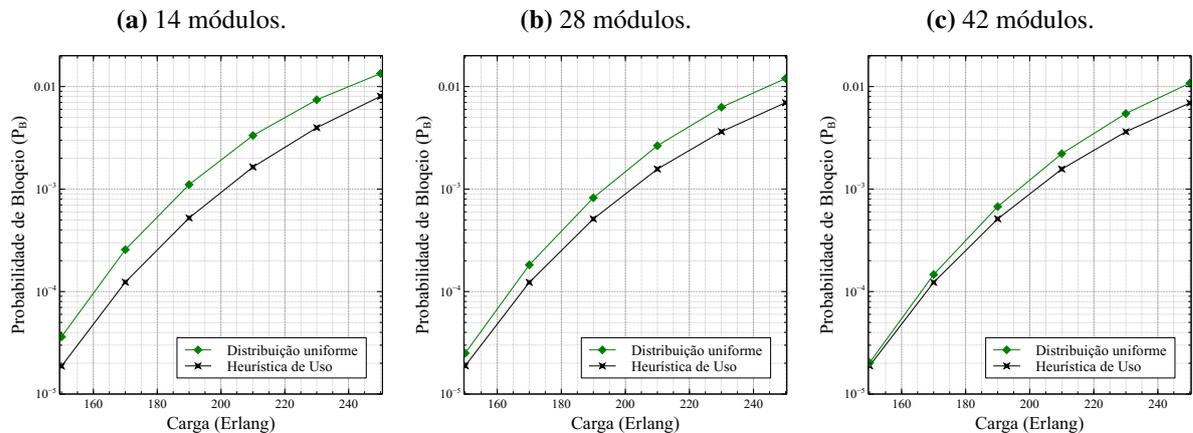
A meta-heurística para otimização de alocação de módulos MS usada neste trabalho é apresentada na literatura (LUKE, 2013) como algoritmo genético (GA – *Genetic Algorithm*) e é baseada em evolução biológica. Ela utiliza conceitos de cruzamento, mutação e seleção entre os indivíduos do grupo para buscar uma melhor solução para o problema de otimização, a

Figura 25 – Gráficos da probabilidade de bloqueio de chamada versus carga para 3 quantidades de módulos total para a topologia alemã com: (a) 17 módulos; (b) 34 módulos; (c) 51 módulos para as seguintes distribuições: (1) Distribuição uniforme; (2) Distribuição de Uso (α).



Fonte: o autor.

Figura 26 – Gráficos da probabilidade de bloqueio de chamada versus carga para 3 quantidades de módulos total para a topologia italiana com: (a) 14 módulos; (b) 28 módulos; (c) 42 módulos para as seguintes distribuições: (1) Distribuição uniforme; (2) Distribuição de Uso (α).

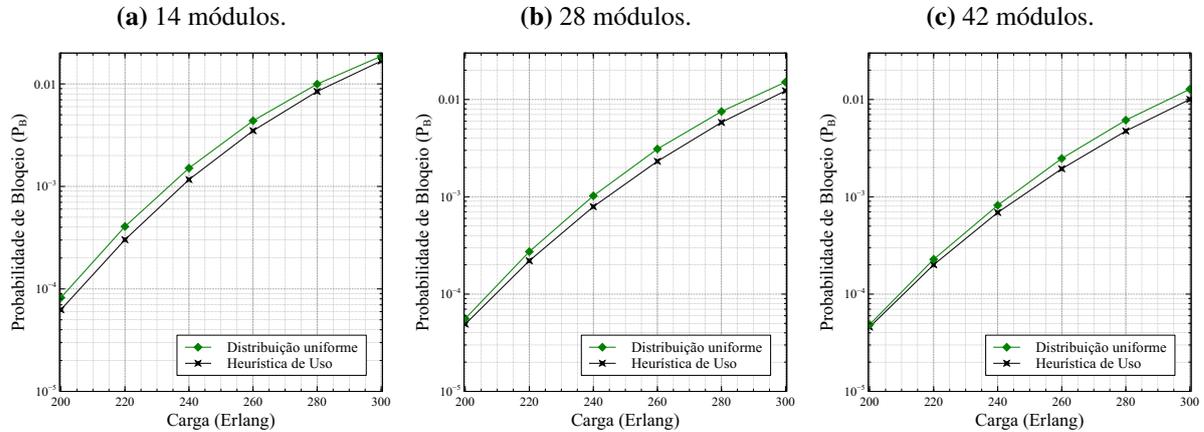


Fonte: o autor.

cada geração (iteração). Todos os detalhes sobre esses conceitos estão descritos no Apêndice A. Diversas formas de GA's podem ser encontradas em (LUKE, 2013). O GA apresenta a necessidade de configuração da estrutura cromossômica com valores inteiros. Essa característica foi o que motivou o uso desse algoritmo, visto que o número de módulos por nó na rede pode ser estruturado dessa forma.

O GA utilizado neste trabalho, apresentado através do Algoritmo 3, é uma variação do GA usado por Cavalcante *et al* (CAVALCANTE *et al.*, 2018) para alocação de regeneradores em EONs, que por sua vez foi baseado no algoritmo NSGA-II (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II*) proposto por Deb *et al* (DEB *et al.*, 2002). Esse algoritmo é utilizado para a criação de um conjunto de soluções ótimas não dominadas, denominado de frente de Pareto,

Figura 27 – Gráficos da probabilidade de bloqueio de chamada versus carga para 3 quantidades de módulos total para a topologia NSFNet com: (a) 14 módulos; (b) 28 módulos; (c) 42 módulos para as seguintes distribuições: (1) Distribuição uniforme; (2) Distribuição de Uso (α).



Fonte: o autor.

para um problema de otimização multi-objetivo, sendo aqui aplicado à alocação de módulos MS em uma rede EON. Uma solução é dita não-dominada quando não há nenhuma outra solução do espaço que apresente todos os valores de objetivos melhores que o dessa solução. O algoritmo cria, ao fim das iterações, um conjunto de soluções com diferentes valores de módulos e diferentes probabilidades de bloqueio de chamadas. Qualquer dessas soluções, obtidas na fase de planejamento da rede, pode ser aplicada a ela, a depender do recurso que se deseja fixar.

Algoritmo 3 Criação de frentes de Pareto através de algoritmo genético (GA).

Entrada: Número de gerações G ;

Entrada: Tamanho da população N ; {Número de indivíduos}

Saída: $R = (R_1, \dots, R_G)$; {Conjunto da primeira frente de Pareto de cada iteração}

- 1: $P = (I_1, I_2, \dots, I_N) \leftarrow \text{criarPopulaçãoInicial}()$;
 - 2: **for** $g = 1$ **to** $g \leq G$ **do**
 - 3: $Q \leftarrow \text{criarNovaPopulação}(P)$; {Nova população Q apresentará tamanho $4N$ }
 - 4: Cálculo das funções objetivo para todos os indivíduos de Q ;
 - 5: $F \leftarrow \text{criarFrentesDePareto}(Q)$; {O número de frentes é variável, estando as $4N$ soluções distribuídas entre elas}
 - 6: $R_g \leftarrow F_1$; {Vetor R recebe a primeira frente da iteração}
 - 7: $P \leftarrow \text{selecionarMelhorPopulação}(F)$; {Conjunto das melhores N soluções}
 - 8: **end for**
-

O pseudocódigo do algoritmo proposto é descrito em Algoritmo 3. Os parâmetros de entrada são o número de gerações e o tamanho da população dos indivíduos (distribuições de módulos). O número de gerações representa a quantidade de iterações que serão efetuadas, sendo usado um valor de $G = 50$ no caso estudado. O tamanho da população, também de $N = 50$, representa a quantidade das melhores soluções ao final de cada iteração, como também o tamanho da população inicial do algoritmo. O algoritmo ainda apresenta como saída (R) a primeira frente de Pareto de cada geração.

A primeira função do algoritmo, apresentada na linha 1, cria uma população com indivíduos compostos aleatoriamente, conforme detalhado no Apêndice B. Para cada iteração (da linha 2 à linha 8) do GA, são realizadas basicamente quatro funções. A primeira delas (linha 3) representa a criação de uma nova população a partir de uma população de entrada. Essa função aplica internamente as operações de cruzamento uniforme e mutação para gerar um novo conjunto de indivíduos. O processo de cruzamento duplica o número de indivíduos de N para $2N$ e o processo de mutação duplica esse conjunto de $2N$ para $4N$ indivíduos. Esses processos são uma variação do GA tradicional, usados com objetivo de testar um número de indivíduos maior. A função da linha 5 cria as diversas frentes de Pareto, através de avaliação e comparação entre todos os indivíduos. A linha 6 guarda no vetor de saída R_g todas as soluções pertencentes à primeira frente de Pareto dessa iteração. Por último, uma seleção de N melhores soluções é aplicado ao vetor F com as frentes de Pareto ordenadas. Exemplificando a seleção, se a primeira frente (F_1) não apresentar N indivíduos, todos eles serão adicionados à população P e será analisada a próxima frente. Se a adição de todos os indivíduos de F_2 à população P ultrapassar N indivíduos, serão sorteados de F_2 quantos indivíduos forem necessários até que P apresente tamanho N . Essa forma de escolha, por sorteio, não é usada no NSGA-II, que escolhe os melhores indivíduos através da função *crowd distance* (DEB et al., 2002). Se a adição não ultrapassar a quantidade N , toda a frente F_2 será adicionada à população P e repete-se o processo. Essa população servirá como entrada na iteração subsequente do algoritmo. Os pseudo-códigos das funções usadas no Algoritmo 3 são apresentados no Apêndice B.

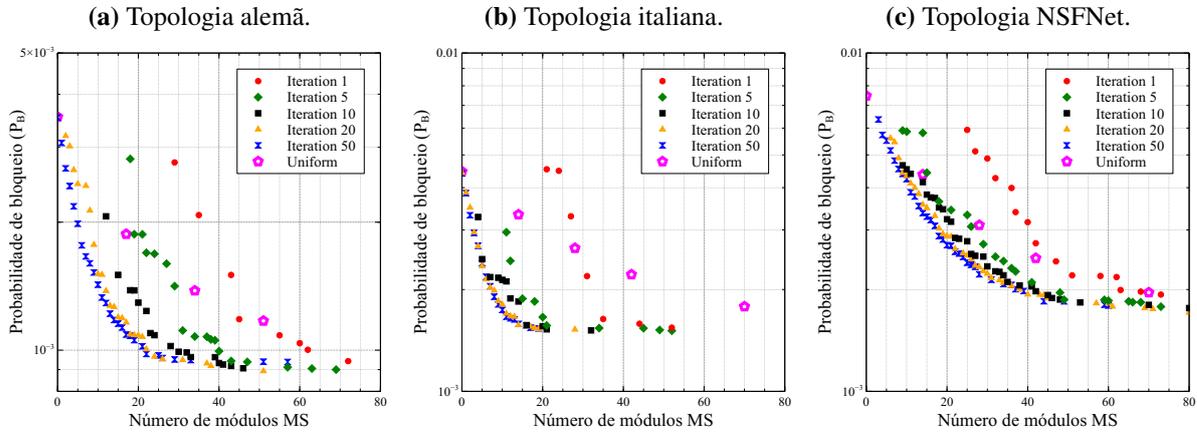
4.5.1 Resultados

A fim de apresentar a evolução dos indivíduos ao longo das gerações efetuadas pelo GA, os gráficos da Figura 28 mostram a primeira frente de Pareto das iterações 1, 5, 10, 20 e 50 para todas as topologias da Figura 12. Os gráficos também mostram os pontos referentes a uma distribuição uniforme dos módulos MS. Essas simulações foram realizadas para um ponto de carga médio específico de cada topologia, com valor de 200 Erlangs para a topologia italiana, 250 Erlangs para a NSFNet e 162 Erlangs para a topologia alemã.

O primeiro ponto observado através dos gráficos da Figura 28 é a evolução das frentes com o decorrer das iterações. É possível observar que na primeira iteração há poucas soluções não dominadas, primeira frente de Pareto, e essas soluções apresentam piores resultados se comparadas com as distribuições uniformes. Ainda analisando a Figura 28, é possível ver que o ganho obtido entre a iteração 20 e a 50 é pequeno, quase insignificante, mostrando que a quantidade total de gerações provavelmente conseguiu obter uma convergência de soluções não dominadas.

Devido ao fato de ser uma meta-heurística e não haver controle quanto à quantidade total de módulos MS na rede, o GA geralmente não encontra as melhores distribuições de módulos para todos os valores possíveis de módulos MS na rede, como também não há certeza

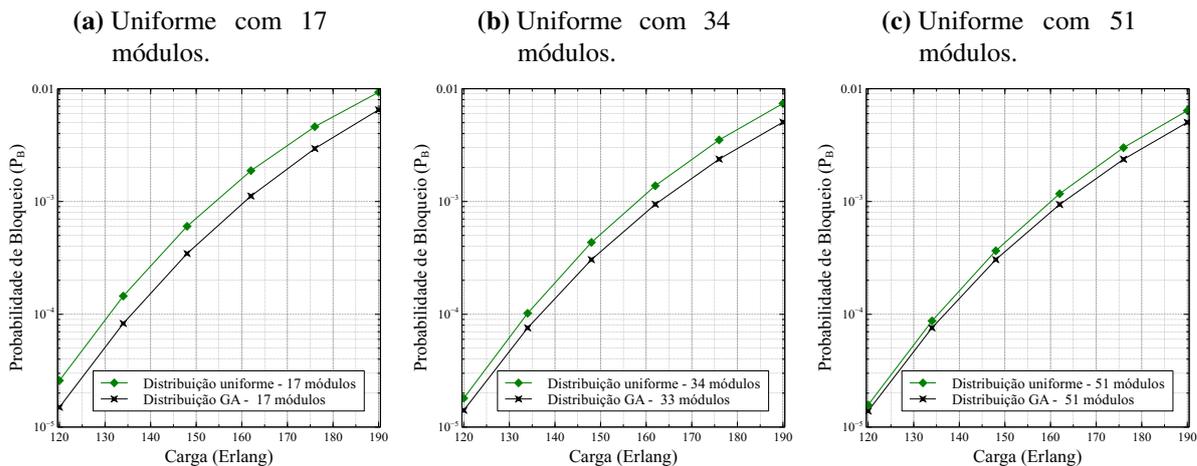
Figura 28 – Gráficos da primeira frente de Pareto de cada iteração para as topologias: (a) Alemã; (b) Italiana; (c) NSFNet para as iterações: (1) 1; (2) 5; (3) 10; (4) 20; (5) 50.



Fonte: o autor.

de encontrar os pontos correspondentes à distribuição uniforme. Devido a isso, em alguns gráficos das Figuras 29, 30 e 31, pode haver uma diferença entre a quantidade de módulos usada na distribuição uniforme, valor múltiplo da quantidade de nós da rede, e na distribuição fornecida pelo GA. O valor utilizado, quando divergir do da distribuição uniforme, corresponde à solução que apresenta a quantidade de módulos MS mais próxima da fornecida pela distribuição uniforme.

Figura 29 – Gráficos da probabilidade de bloqueio de chamada versus carga para 3 quantidades de módulos total para a topologia alemã com: (a) 17 módulos; (b) 34 módulos; (c) 51 módulos para as seguintes distribuições: (1) Distribuição uniforme; (2) Distribuição do GA.

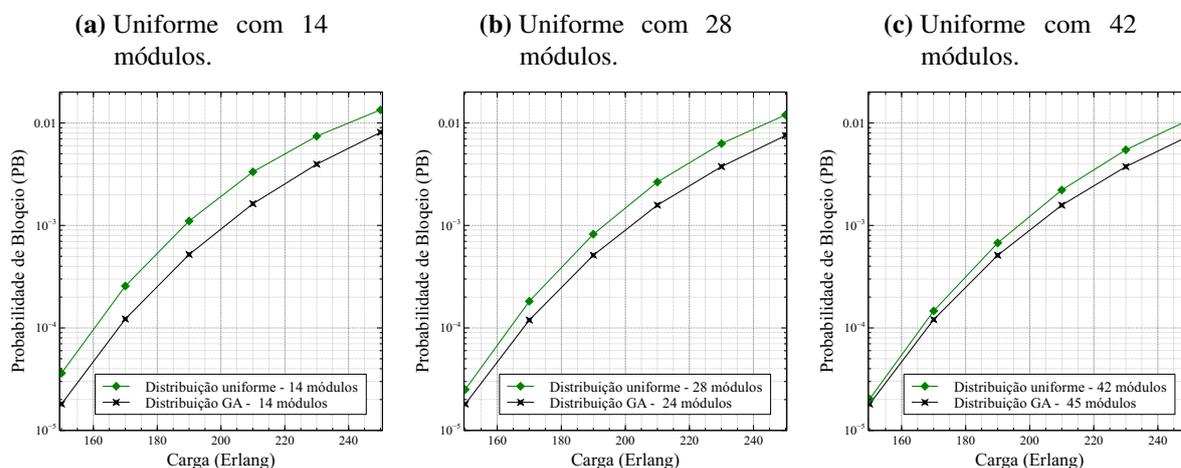


Fonte: o autor.

A Figura 29 apresenta os ganhos obtidos com a distribuição fornecida pelas frentes de Pareto do GA para a topologia alemã. É possível observar na Figura 29b que a solução fornecida pelo GA mais próxima de 34 módulos apresentou 33, e mesmo com um módulo a menos apresentou uma boa redução na probabilidade de bloqueio de chamada em comparação

com a distribuição uniforme.

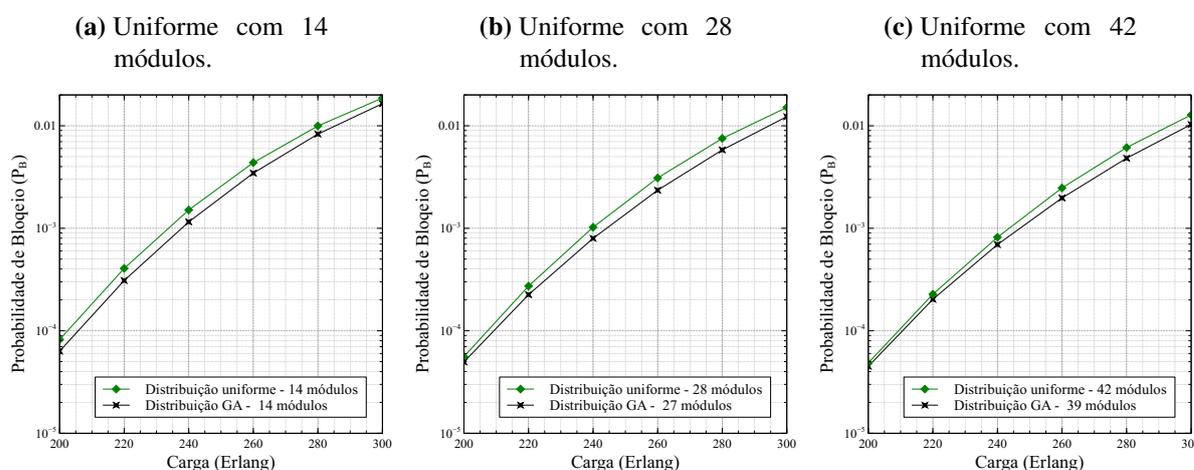
Figura 30 – Gráficos da probabilidade de bloqueio de chamada versus carga para 3 quantidades de módulos total para a topologia italiana com: (a) 14 módulos; (b) 28 módulos; (c) 42 módulos para as seguintes distribuições: (1) Distribuição uniforme; (2) Distribuição do GA.



Fonte: o autor.

No gráfico da Figura 30b, a solução mais próxima da quantidade de 28 módulos MS foi obtida para uma distribuição com 24 módulos no total, correspondendo a aproximadamente 14% de módulos a menos. Essa distribuição, mesmo possuindo menos módulos, apresentou um ganho expressivo, especialmente para uma rede mais congestionada. A distribuição do GA mais próxima da quantidade múltipla no número de nós na Figura 30c foi de 45 módulos, 3 módulos a mais que a distribuição uniforme.

Figura 31 – Gráficos da probabilidade de bloqueio de chamada versus carga para 3 quantidades de módulos total para a topologia NSFNet com: (a) 14 módulos; (b) 28 módulos; (c) 42 módulos para as seguintes distribuições: (1) Distribuição uniforme; (2) Distribuição do GA.



Fonte: o autor.

Para a topologia NSFNet, as quantidades de 28 e 42 módulos não foram produzidas pelo GA, sendo realizadas simulações com 27 e 39 módulos MS para efeito comparativo. Ambas

as soluções, mesmo as que possuem menos módulos, foram bem sucedidas ao diminuir a probabilidade de bloqueio de chamada quando comparadas à distribuição uniforme.

4.6 ANÁLISE E COMPARAÇÃO ENTRE AS POLÍTICAS DE ALOCAÇÃO DE MÓDULOS MS

Esta seção se destina a fazer uma breve comparação entre os algoritmos de alocação de módulos MS apresentados nas seções anteriores. Primeiramente, destaca-se que os algoritmos tiveram uma boa redução na probabilidade de bloqueio de chamadas, quando comparados com as distribuições uniformes, para todas as topologias testadas.

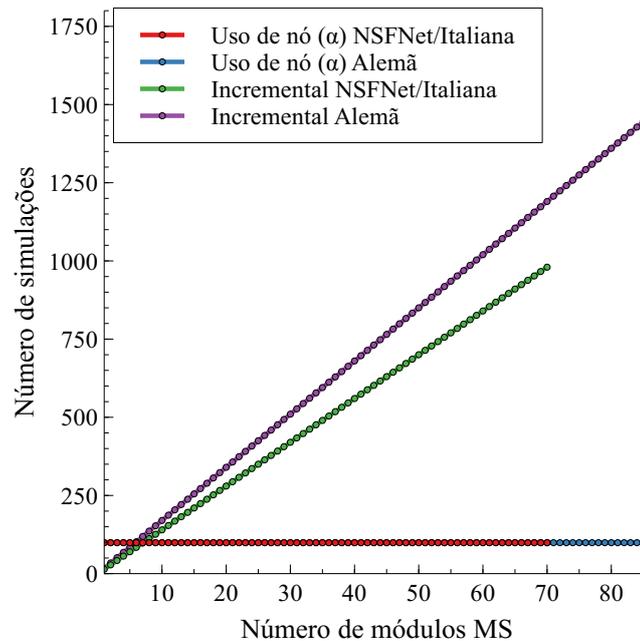
Com relação ao algoritmo genético, apresentado na Seção 4.5, não foi possível criar um tipo em que o número de módulos total na rede fosse fixo, devido às etapas de cruzamento e mutação que impossibilitaram essa forma. Porém, mesmo não garantindo a criação dos pontos referentes aos pontos da distribuição uniforme, foi possível obter pontos iguais ou próximos a eles, possibilitando essa comparação. Esse algoritmo apresenta um total de 200 simulações por iteração, sendo escolhido um total de 50 iterações, totalizando 10000 simulações, responsáveis por criar um conjunto de soluções final, de tamanho variável. A quantidade total de simulações é fixa e independe da topologia da rede em que será aplicada.

Sobre a heurística de alocação incremental, apresentada na Seção 4.3, é possível dizer que ela apresentou bom desempenho, com ganhos de P_B levemente abaixo da heurística baseada na frequência de uso dos nós intermediários e do GA. O número de simulações necessário para a determinação da alocação para um valor fixo de módulos MS depende do número de nós da rede, pois, em cada iteração, que corresponde à alocação de um módulo, são realizadas D simulações. Sendo assim, para uma distribuição de T módulos MS, a heurística apresenta um total de $T \cdot D$ simulações.

A heurística de alocação baseada na frequência de uso dos nós intermediários, apresentada na Seção 4.4, também apresentou bons resultados, quando comparada com a distribuição uniforme de módulos MS. A grande vantagem dessa heurística, especialmente em relação à incremental, está no fato de o número de simulações ser fixo, apresentando um total de 99 simulações, independente da quantidade de módulos MS que devam ser alocados ou do número de nós da rede. A quantidade de simulações depende da granularidade do peso de α , que no caso aqui apresentado, usou passos de 0.01. Um questionamento que pode ser feito à essa heurística diz respeito a possível proximidade dela com uma distribuição de módulos estritamente proporcional à frequência de uso dos nós como nós intermediários. Essa distribuição proporcional, mesmo apresentando bons resultados para muitos módulos, não resolve o problema de distribuição de poucos módulos na rede. A heurística proposta resolve essa questão, pois uma possível distribuição proporcional, ou próximo disso, está dentro do espaço de soluções testado por ela. O crescimento do número de simulações, para as heurísticas incremental e de frequência de uso, de acordo com a quantidade de módulos MS a ser distribuída é apresentado na Figura 32. Nela,

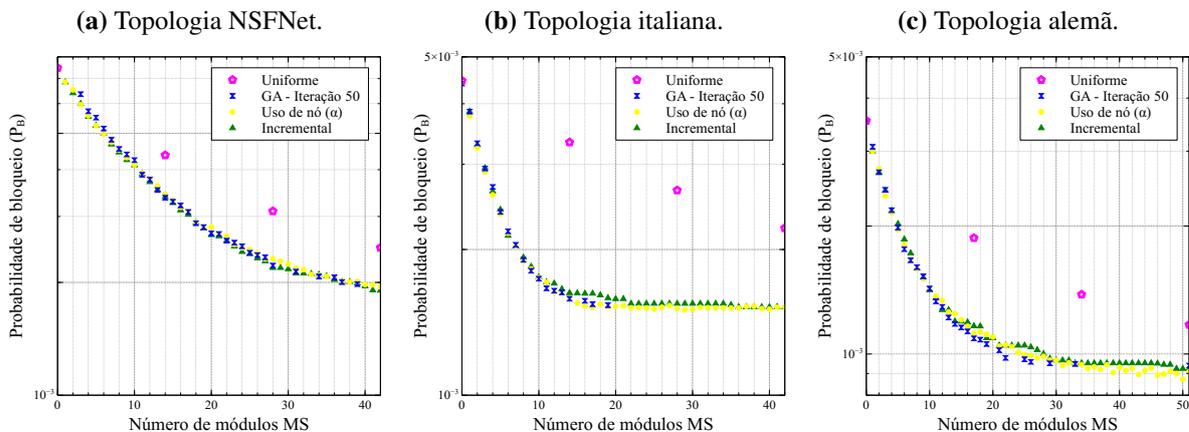
é possível observar que as distribuições através da heurística incremental, comparadas com as distribuições de frequência de uso, apresentam uma maior quantidade de simulações com menos de 10 módulos, para ambas as topologias.

Figura 32 – Gráfico com o número de simulações efetuadas versus a quantidade de módulos MS total distribuída para as heurísticas incremental e de frequência de uso para as topologias NSFNet, italiana e alemã.



Fonte: o autor.

Figura 33 – Gráficos de probabilidade de bloqueio de chamada versus número de módulos MS total para as topologias: (a) NSFNet; (b) italiana; (c) alemã para: (1) Distribuição uniforme; (2) Distribuição do GA (Iteração 50); (3) Heurística de frequência de uso; (4) Heurística incremental.



Fonte: o autor.

A Figura 33 apresenta as simulações de P_B versus número de módulos MS para as três topologias da Figura 12. Essas simulações foram efetuadas para pontos de carga de 260, 162 e 210 Erlang, para as topologias NSFNet, italiana e alemã, respectivamente. Essas simulações

mostram uma mínima diferença entre os algoritmos estudados. Portanto, é possível deduzir que ambas as heurísticas atingiram um bom desempenho, pois elas conseguem, praticamente, a se igualar aos resultados obtidos pelo GA, que é um algoritmo com boa chance de produzir um resultado eficiente. Também é possível dizer que a escolha entre a heurística de frequência de uso e a incremental deve ser feita levando em consideração o tamanho da rede estudada. Para redes menores e com poucos módulos MS a serem alocados, a heurística incremental é preferencial, visto que o número de simulações é proporcional a essas duas variáveis. Para redes maiores e/ou com muitos módulos MS para serem alocados, a heurística de frequência de uso, além de produzir resultados levemente melhores, apresenta um número fixo de simulações.

5 TENTATIVAS PARA AUMENTO DA EFICIÊNCIA DA TÉCNICA DE MULTIPLEXAÇÃO ÓPTICA INVERSA

Esse capítulo apresenta uma análise dos fatores que impedem que a técnica de multiplexação óptica inversa baseada em *multicasting* de supercanal obtenha melhores resultados, destacando o principal fator responsável pela probabilidade de bloqueio de chamada obtida. Posteriormente, são apresentadas duas formas, aplicadas ao longo da pesquisa efetuada, para mitigar os fatores apresentados no primeiro tópico.

5.1 PROPORÇÃO DE BLOQUEIOS DE PRIMEIRO SALTO

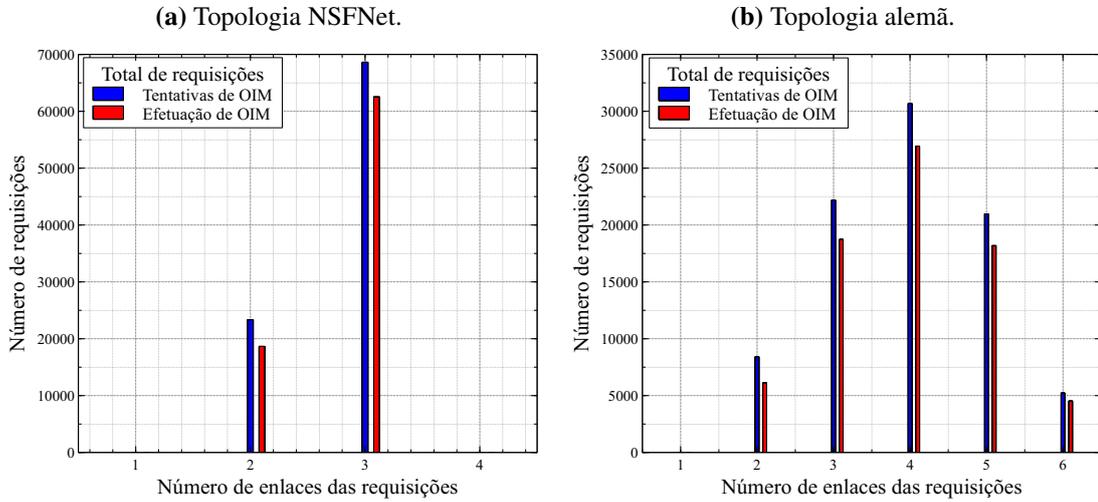
Conforme apresentado no Capítulo 3, a técnica de multiplexação óptica inversa baseada em *multicasting* de supercanal é realizada apenas nos nós intermediários da rota da chamada, conseqüentemente necessitando de um conjunto de *slots* contíguos até o nó onde a técnica poderá ser aplicada. Na Figura 34 são apresentadas as quantidades totais de requisições que não conseguiram ser alocadas fim-a-fim, ou seja, tentaram aplicar a técnica, e as quantidades de requisições que conseguiram ser alocadas através de OIM. Essas simulações foram efetuadas para quantificar os bloqueios por contiguidade e não por falta de recursos, visto que foram utilizados 40 módulos MS por nó, ficando bem acima do valor máximo de módulos usados simultaneamente. O número de requisições é apresentado separadamente por tamanho da rota, medido por saltos. A pequena diferença entre esses dois valores, portanto, indica que na maior parte das vezes que uma requisição tenta aplicar OIM, ela consegue ser alocada. Essa proporção se mantém praticamente constante para requisições com rotas com variados valores de saltos.

Ainda a partir dos dados da simulação da figura apresentada, não apresentados nos gráficos da Figura 34, foi observado que os bloqueios de um *hop*, i.e., de requisições que não apresentaram um conjunto de *slots* contíguos no primeiro enlace da rota, correspondem a aproximadamente 65% para a topologia NSFNet e 33% para a topologia alemã, para os diversos pontos de cargas testados. Especificamente para o primeiro ponto de carga simulado de cada topologia, 200 e 120 Erlangs para as topologias NSFNet e alemã respectivamente, essa proporção aumenta para aproximadamente 87% e 44%, representando uma significativa parte dos bloqueios totais. Sendo assim, algumas formas para um melhor aproveitamento espectral foram aplicadas, na tentativa de diminuir os bloqueios de 1 *hop* e, conseqüentemente, aumentar a eficácia da técnica de OIM em cenários de rede.

5.2 USO DE MÓDULOS MS DE ACORDO COM A COMPACTAÇÃO ESPECTRAL

Uma forma pensada para reduzir os bloqueios de um *hop* faz uso dos módulos MS, aproveitando de sua ociosidade e aplicando-os à conversão de frequência central da requisição,

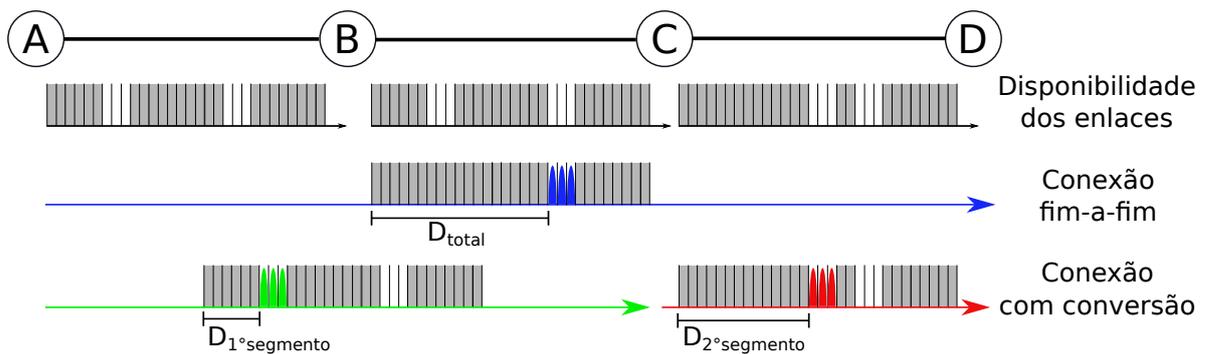
Figura 34 – Gráficos com as quantidades de requisições que tentaram a aplicação da técnica de multiplexação óptica inversa e as quantidades de requisições que conseguiram efetua-la, ambas apresentadas de acordo com o número de enlaces de suas respectivas rotas, para as topologias: (a) NSFNet; (b) alemã.



Fonte: o autor.

mesmo com disponibilidade de *slots* fim-a-fim da requisição da chamada. Esse tipo de abordagem apresenta como principal vantagem a capacidade de uma maior compactação espectral devido ao alívio da restrição de continuidade da conexão. Sua principal desvantagem está na possibilidade de uma conexão futura sem capacidade fim-a-fim precisar de um módulo MS livre e esse módulo estar ocupado com uma conexão que, mesmo sem seu uso, poderia ter sido alocada. A figura 35 ilustra a compactação obtida através de conversão espectral em um nó intermediário da rota.

Figura 35 – Ilustração de compactação espectral realizada através de conversão de frequência central em um nó intermediário.



Fonte: Autor.

A Figura 35 apresenta uma rota composta por 4 nós e 3 enlaces, como também o vetor disponibilidade em cada um desses enlaces. Nela, os *slots* ocupados estão representados pela cor cinza e os *slots* disponíveis estão na cor branca. É possível perceber que existe disponibilidade de conexão fim-a-fim, com tamanho 3, a partir do *slot* de índice 20, conforme apresentado na linha azul. Também percebe-se que, se houver conversão de frequência central no nó C, seria possível alocar a requisição a partir do *slot* 7 para os enlaces A-B-C, linha verde, e a partir do

slot 15 no enlace C-D na linha vermelha, uma combinação aceitável pela técnica, respeitando o espaçamento mínimo entre os *slots* do primeiro e segundo segmentos.

Devido à quantidade limitada de módulos MS na rede e com o objetivo de evitar o uso indevido desses módulos, resultando em uma piora do desempenho da mesma, dois parâmetros foram criados. O primeiro deles reserva uma quantidade fixa de módulos que serão destinados apenas a conexões que não apresentem capacidade fim-a-fim. O segundo parâmetro é responsável por avaliar quando uma conversão de frequência central deve ser efetuada mesmo sem necessidade, ou seja, atender a um limite mínimo de compactação espectral obtido com a conversão. Esse parâmetro foi denominado ΔFF , devido à forma de compactação ser compatível com a heurística de alocação espectral FF e é apresentado na Inequação 5.1.

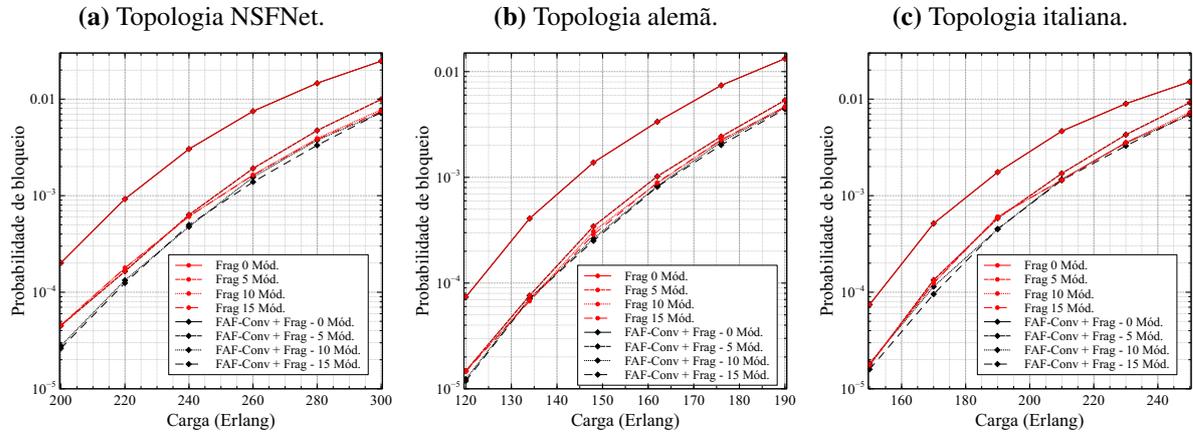
$$\Delta FF \leq D_{total} - \frac{D_{1^o\text{segmento}} \cdot N_{hops1}^o + D_{2^o\text{segmento}} \cdot N_{hops2}^o}{N_{hops}^o} \quad (5.1)$$

Na Inequação 5.1, o termo D_{total} representa o índice do primeiro *slot* da possível alocação fim-a-fim. Os termos $D_{1^o\text{segmento}}$ e $D_{2^o\text{segmento}}$ representam, respectivamente, os índices do primeiro *slot* da alocação do primeiro e do segundo segmentos, se a conversão for aplicada. Por fim, os termos N_{hops1}^o e N_{hops2}^o indicam o número de *hops* do primeiro e do segundo segmento, respectivamente. O termo N_{hops}^o se refere à quantidade de *hops* total da rota, sendo a soma dos termos N_{hops1}^o e N_{hops2}^o . Os segmentos são separados pelo nó onde a conversão será aplicada.

Se, a partir de alguma combinação de alocações, o valor de ΔFF for superado, a requisição irá realizar a conversão, devendo ser escolhida a combinação que apresentar maior compactação espectral. Simulações foram realizadas com o objetivo de determinar se a aplicação de módulos MS à conversão de requisições com capacidade fim-a-fim apresenta ganho de desempenho de rede, através da quantificação da probabilidade de bloqueio de chamada. Para isso, é realizada uma varredura entre todos os valores inteiros de ΔFF possíveis, entre 0 e o número total de *slots* em cada fibra, para um ponto de carga médio da rede na simulação. O valor máximo de ΔFF indica que nenhuma conversão forçada será efetuada e o valor 0 indica que, para qualquer compactação espectral, a conversão será realizada. Posteriormente, foi aplicado o melhor valor de ΔFF encontrado, aquele que apresentou a menor P_B , e realizada uma simulação para múltiplos pontos de carga, verificando se esse valor realmente gera benefícios para estados variados da rede.

A partir da Figura 36, para os menores valores de carga de cada topologia, é possível observar que o acréscimo de módulos, valores de 10 e 15, não apresenta redução na probabilidade de bloqueio de chamada quando utilizados de forma convencional. Esse mesmo acréscimo apresenta redução visível de P_B , principalmente na topologia NSFNet, quando usamos módulos para realizar a conversão das conexões que apresentarem uma compactação espectral maior ou igual ao limite determinado pela varredura da constante ΔFF . As reduções para os menores valores de carga de cada topologia foram de aproximadamente 38,9% e 41,8% para a topologia

Figura 36 – Gráficos de probabilidade de bloqueio de chamada com comparação entre uso de módulos apenas para conexões sem disponibilidade de recursos fim-a-fim e o uso para compactação espectral através de conversão de frequência central.



Fonte: o autor.

NSFNet com 10 e 15 módulos, respectivamente, e de 15, 6% e 18, 7% para a topologia alemã também para 10 e 15 nós, respectivamente. A topologia italiana apresentou ganho apenas para a comparação com 15 módulos por nó, com um ganho aproximado de 12%. Para cargas mais elevadas, o uso dos módulos na forma proposta não apresenta ganhos substanciais de P_B .

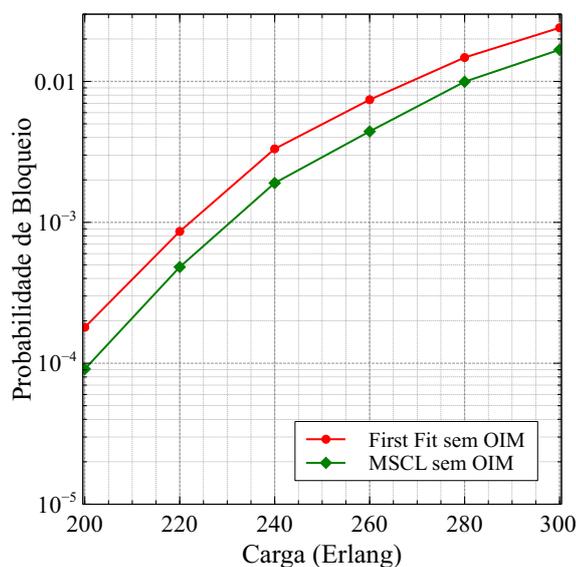
Vale ressaltar que a quantidade de módulos MS reservada apenas para conexões sem capacidade de alocação fim-a-fim, valor esse de 5 módulos, é a mesma para todos os nós da rede. Conforme detalhado na Seção 4.2, há uma enorme diferença de uso de módulos MS entre os nós da rede. Portanto, o mesmo valor aplicado a todos os nós não condiz com o melhor aproveitamento da ociosidade dos módulos. Sendo assim, o valor de reserva de módulos poderia ser planejado por nó, de modo a aproveitar toda a capacidade oferecida por esses dispositivos. O mesmo pode ser dito para o valor do limite ΔFF , que pode ser determinado de maneira individual (por par origem-destino). Esse melhor aproveitamento não foi abordado na pesquisa em que este trabalho foi desenvolvido, sendo colocado como possível trabalho futuro na Seção 6.2.

5.3 APLICAÇÃO DA HEURÍSTICA MSCL PARA REDUÇÃO DOS BLOQUEIOS DE PRIMEIRO HOP

Outra forma de diminuir os bloqueios de um *hop*, para um possível melhor aproveitamento da técnica de OIM, foi tentada através da heurística de alocação espectral MSCL (ALMEIDA et al., 2013), citada na Seção 2.3. As simulações realizadas para avaliar o desempenho dessa heurística, juntamente com a aplicação da técnica de OIM, utilizaram 10^6 requisições no total, com tamanhos variando entre 2 e 5 *slots*, para a topologia NSFNet e usam de *multicasting* de supercanal 1:7.

A Figura 37 apresenta uma comparação entre as heurísticas de alocação espectral FF e MSCL, sem a utilização da técnica de OIM. É possível observar que, mediante o uso do MSCL,

Figura 37 – Gráfico da probabilidade de bloqueio de chamada versus carga na rede para as heurísticas de alocação espectral FF e MSCL da topologia NSFNet.



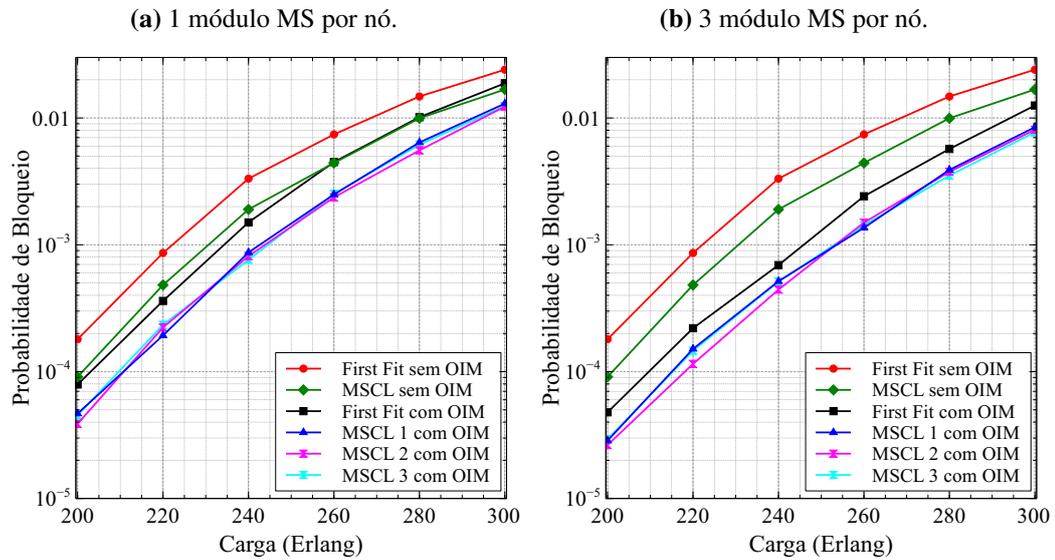
Fonte: Autor.

a rede apresenta redução de P_B entre 30% e 50% para os pontos de carga simulados.

Devido ao número de cópias criadas através do *multicasting*, existem várias combinações de alocação para cada conjunto de *slots* do primeiro segmento, antes da aplicação da técnica. Devido a essa grande quantidade de possibilidades, três formas de MSCL para a aplicação da técnica de OIM foram propostas. A primeira forma utiliza MSCL apenas para requisições que apresentem disponibilidade fim-a-fim, e FF para as que necessitem usar OIM para serem estabelecidas. A segunda forma aplica o MSCL da mesma forma que o primeiro tipo, e acrescenta o MSCL para o primeiro segmento da requisição, ordenando todas as possibilidades de alocação. No segundo segmento, ainda é usado o FF. A terceira forma aplica o MSCL em todas as requisições, com e sem disponibilidade fim-a-fim, comparando todas as possibilidades nos primeiro e segundo segmentos da aplicação da técnica.

A partir da Figura 38 é possível observar que os resultados para os 3 tipos de MSCL não apresentam diferenças significativas. Devido à maior complexidade das formas do MSCL 2 e 3, não há justificativa para a aplicação das mesmas, ao invés da primeira forma, que apresenta uma complexidade muito menor. A partir dos resultados obtidos, é possível dizer que a quase uniformidade dos resultados entre os tipos de MSCL decorre da quantidade de requisições, que necessitam de OIM e, conseqüentemente, aplicam o MSCL, ser pequena. Sendo assim, não há um número suficientes de requisições para produzir redução de P_B , através do MSCL, na aplicação de OIM.

Figura 38 – Gráficos comparativos das heurísticas FF e MSCL para 1 e 3 módulos MS por nó da topologia NSFNet.

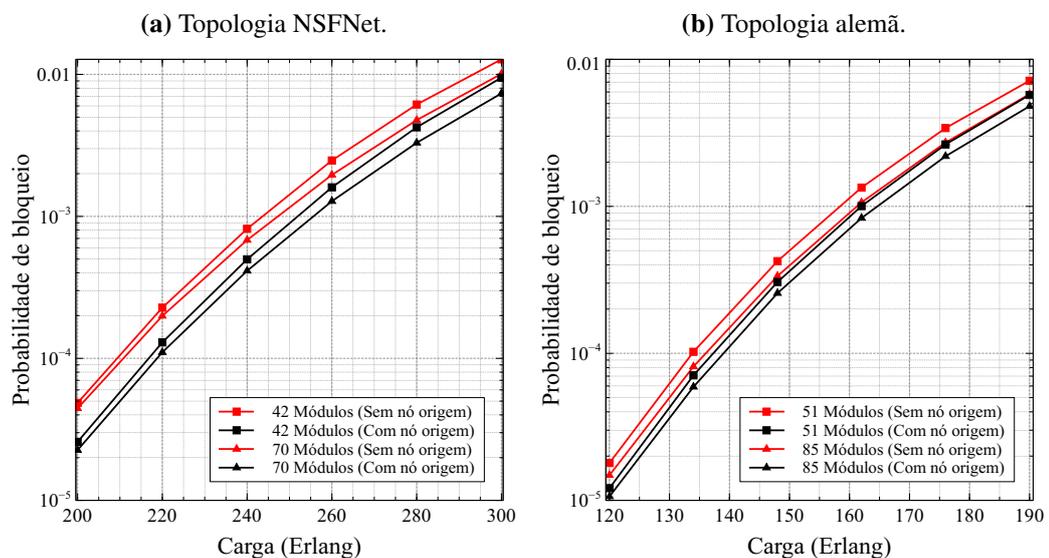


Fonte: o autor.

5.4 APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE OIM NO NÓ ORIGEM

Conforme mencionado na Seção 3.2, a aplicação da técnica de OIM se dá nos nós intermediários da rota da requisição. Mesmo não sendo apresentada no material de referência usado neste trabalho, a possibilidade de aplicação da técnica no nó origem da requisição foi levantada e analisada. Nessa análise, foram usadas requisições com tamanhos variando entre 2 e 5 *slots* para as topologias NSFNet e alemã.

Figura 39 – Gráficos de probabilidade de bloqueio de chamada versus carga comparando a possibilidade de uso de OIM no nó de origem da requisição com seu uso apenas em nós intermediários da rota.



Fonte: o autor.

A Figura 39 apresenta redução da probabilidade de bloqueio de chamada para ambas as topologias. A topologia NSFNet apresentou ganhos entre 47% e 25,7% com 42 módulos MS e entre 49,2% e 27,1% com 70 módulos, no total. Os ganhos para a topologia alemã ficaram entre 32,6% e 20%, com 51 módulos MS, e entre 28,3% e 17,2%, com 85 módulos, também no total. As reduções na P_B apresentaram ganhos significativos, fornecendo boas perspectivas para a investigação e uso da técnica de OIM com essa possibilidade, que não foi mais investigada na pesquisa e que foi posta como uma das opções de trabalhos futuros na Seção 6.2.

6 CONCLUSÕES

Este capítulo tem como objetivo finalizar este trabalho, que objetivou o estudo aprofundado sobre a técnica de multiplexação óptica inversa baseada em *multicasting* de supercanal aplicada a cenários de redes ópticas elásticas. Nele, estão contidas as considerações gerais da dissertação, como também as principais contribuições obtidas ao longo da pesquisa efetuada. Uma seção deste capítulo é dedicada aos trabalhos que poderão dar continuidade às investigações realizadas sobre o tema deste trabalho.

6.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS E PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES

O aumento substancial das redes de telecomunicações faz-nos acreditar que as redes ópticas elásticas, em substituição aos sistemas WDM, desempenharão um papel fundamental no provimento do tráfego aplicado a essas redes. Sendo assim, o estudo sobre os efeitos deteriorantes presentes nesse tipo de rede, como também formas de solucioná-los, são de vital importância para a consolidação dessa tecnologia. Um dos principais efeitos observados é o de fragmentação espectral, e uma forma de mitigá-lo é através da técnica abordada nesta dissertação, a multiplexação óptica inversa baseada em *multicasting* de supercanal.

Com esse dever em mente, foram desenvolvidas algumas contribuições originais, sendo elas: a criação de duas heurísticas para alocação eficiente de uma quantidade fixa de módulos de *multicasting* de supercanal nas unidades de desfragmentação presentes em nós ópticos de EONs; aplicação de uma meta-heurística baseada em algoritmo genético para, também, alocação de módulos MS nos nós da rede, porém voltado para a criação de um conjunto de soluções (Frente de Pareto) para diversas quantidades de módulos; e, por fim, foi proposto uma nova forma de uso dos módulos MS, baseada na compactação espectral obtida através de sua utilização.

As propostas de alocação de módulos, Seções 4.3, 4.4 e 4.5, são aplicadas na fase de planejamento da rede, com objetivo de reduzir o número de módulos para uma determinada probabilidade de bloqueio de chamada ou para minimizar essa probabilidade para um número fixo de módulos. Para ambos os casos, tanto as heurísticas com a meta-heurística atenderam as expectativas e foram capazes de apresentar ganho na P_B , quando comparadas com a distribuição uniforme de módulos. Sendo assim, elas se apresentam como boas propostas para casos em que esse tipo de tecnologia é usada. Já a nova forma de uso, proposta na Seção 5.2, é aplicada na fase de operação da rede e apresenta pequenos ganhos na P_B . Porém, mais testes são necessários para afirmar de maneira categórica se ela é, ou não, capaz de gerar ganhos expressivos em cenários de rede.

Adicionalmente, é possível citar como contribuições adicionais: análise das reduções de probabilidade de bloqueio de chamada através do uso dos módulos MS para conversão espectral

e para aplicação de descontiguidade dos *slots* de uma conexão, apresentada na Seção 3.4. Essa análise comprovou a capacidade de redução de P_B através de OIM, mostrando um comportamento muito próximo ao apresentado por Xu *et. al* (XU et al., 2014). Não foi possível replicar com exatidão o experimento em questão, devido à falta de informações do material. Ainda na Seção 3.4, foi feita uma avaliação quantitativa do impacto na P_B com o aumento no número de módulos MS. Nela, foi observada uma redução bastante significativa na probabilidade de bloqueio de chamada com a adição do primeiro módulos a todos os nós da rede, porém o ganho diminui drasticamente a partir do segundo módulo, chegando a praticamente zerar, para redes com baixo congestionamento, a partir do terceiro módulo adicionado. Isso indica, pelo menos para esse tipo de uso, que o acréscimo de poucos módulos já é capaz de atingir, ou ficar próximo de, o limite de ganho possibilitado pela técnica de OIM. O último ponto da Seção 3.4 apresenta os resultados à diferença da aplicação de módulo MS com 2 e 3 *pumps*. Essas simulações deixam a entender que o aumento no custo do dispositivo, com o incremento de um *laser* de bombeio, é irrelevante na redução da probabilidade de bloqueio de chamada. Também foi apresentada uma análise de *fairness*, mostrando que a diferença na P_B entre conexões de tamanhos variados diminui através do uso de OIM.

A aplicação da alocação espectral MSCL, na Seção 5.3, não apresentou resultados muito promissores, sendo essa a análise de resultado mais inexpressivo da pesquisa. Devido à baixa quantidade de requisições, com relação ao total, que aplicam OIM, não foi possível obter reduções de P_B , quando comparadas com aplicação da heurística FF para requisições sem disponibilidade fim-a-fim. Por fim, na Seção 5.4, foram apresentados os resultados das simulações efetuadas com a possibilidade de aplicação da técnica de OIM no nó de origem. Conforme discutido, essa opção não é apresentada nos materiais usados como base para essa dissertação, porém abre uma possibilidade a ser estudada, que será indicada na Seção subsequente.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Devido à grande demanda por estudos sobre fragmentação espectral em EONs, a continuação da pesquisa efetuada no mestrado, e apresentado nesta dissertação, torna-se bastante pertinente e necessária a longo prazo.

A primeira indicação de uma possível continuação dos estudos é referente à proposta de uso de módulos MS de acordo com a compactação espectral, apresentada na Seção 5.2. Conforme mencionado, as duas variáveis propostas são determinadas para todos os nós da rede. Sendo assim, a aplicação de um algoritmo evolucionário pode ser feita, de modo a encontrar diferentes valores de variáveis para cada nó da rede, ainda com a possibilidade de o valor de ΔFF ser determinado de acordo com a disponibilidade de módulos MS em seu respectivo nó. A principal opção para esse caso é através do uso de algoritmos de otimização de enxame de partículas (PSO – *Particle Swarm Optimization*), apresentado em (KENNEDY; EBERHART, 1995).

A segunda proposta de trabalhos futuros está relacionada com a opção da aplicação da técnica de OIM, ou algum tipo de descontiguidade de *slots*, no nó de origem da requisição da chamada. Uma possibilidade está na junção das técnicas de OIM e *Split Spectrum* (LIRA; ALMEIDA; MARTINS-FILHO, 2017), mencionada na Seção 3.2. Como a técnica de SS é efetuada no nó origem, seria possível realizar um estudo, atribuindo custos distintos para cada tipo de dispositivo, através da aplicação de GA, para determinar uma eficiente combinação entre esses dispositivos, como também definir que técnica usar quando as duas estão disponíveis. Muito similar à maneira usada na Seção 4.5, poderia ser apresentado um conjunto de soluções para diferentes valores de custo total e diferentes probabilidades de bloqueio de chamada. Outra possibilidade está na proposição de uma arquitetura de uma unidade de desfragmentação de um nó óptico, com capacidade de aplicar a técnica de OIM no nó de origem.

Por fim, uma terceira possibilidade está na continuação da investigação da aplicação da heurística MSCL, juntamente à técnica de OIM. Existem diversas possibilidades que não foram exploradas e que, devido à grande eficácia dessa heurística para simulações de rede sem utilização da técnica, ainda podem ser desenvolvidas. Ainda existe a possibilidade de ser realizado um estudo dessa heurística, utilizada em conjunto com o uso dos módulos para compactação espectral (FF).

As ideias aqui apresentadas também servem para ser aplicadas noutros problemas de redes ópticas elásticas ou outras redes de comunicação.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, R. C. et al. Slot assignment strategy to reduce loss of capacity of contiguous-slot path requests in flexible grid optical networks. *Electronics Letters*, v. 49, n. 5, p. 359–361, February 2013. ISSN 0013-5194. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 64.
- BANERJEE, D.; MUKHERJEE, B. A Practical Approach for Routing and Wavelength Assignment in Large Wavelength-Routed Optical Networks 1 Introduction. *Computer*, v. 14, n. 5, p. 1–14, 1995. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 25.
- BELLMAN, R. The theory of dynamic programming. *Bulletin of the American Mathematical Society*, v. 60, n. 6, p. 503–516, nov 1954. ISSN 0002-9904. Citado na página 23.
- BOSCO, G. et al. Performance Limits of Nyquist-WDM and CO-OFDM in High-Speed PM-QPSK Systems. *IEEE Photonics Technology Letters*, v. 22, n. 15, p. 1129–1131, aug 2010. ISSN 1041-1135. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 26.
- BOSCO, G. et al. On the performance of nyquist-WDM terabit superchannels based on PM-BPSK, PM-QPSK, PM-8QAM or PM-16QAM subcarriers. *Journal of Lightwave Technology*, v. 29, n. 1, p. 53–61, 2011. ISSN 07338724. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 26.
- CALLEGATI, F. et al. Trunk Reservation for Fair Utilization in Flexible Optical Networks. *IEEE Communications Letters*, v. 18, n. 5, p. 889–892, may 2014. ISSN 1089-7798. Citado na página 40.
- CAVALCANTE, M. A. et al. Evolutionary Multiobjective Strategy for Regenerator Placement in Elastic Optical Networks. *IEEE Transactions on Communications*, v. 6778, n. c, p. 1–15, 2018. ISSN 00906778. Citado na página 53.
- CHATTERJEE, B. C.; BA, S.; OKI, E. Fragmentation Problems and Management Approaches in Elastic Optical Networks: A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, n. c, p. 1–1, 2017. ISSN 1553-877X. Citado 3 vezes nas páginas 18, 28 e 29.
- CHATTERJEE, B. C.; OKI, E. Performance evaluation of spectrum allocation policies for elastic optical networks. In: *2015 17th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. [S.l.]: IEEE, 2015. v. 2015-Augus, p. 1–4. ISBN 978-1-4673-7880-2. ISSN 21627339. Citado na página 28.
- CHATTERJEE, B. C.; SARMA, N.; OKI, E. Routing and Spectrum Allocation in Elastic Optical Networks: A Tutorial. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 17, n. 3, p. 1776–1800, 2015. ISSN 1553-877X. Citado 4 vezes nas páginas 17, 18, 22 e 27.
- CHEN, Y. et al. Experimental demonstration of 400 Gb/s optical PDM-OFDM superchannel multicasting by multiple-pump FWM in HNLF. *Optics Express*, v. 21, n. 8, p. 9915–9922, apr 2013. ISSN 1094-4087. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.
- CHU, X.; LI, B.; CHLAMTAC, I. Wavelength converter placement under different RWA algorithms in wavelength-routed all-optical networks. *IEEE Transactions on Communications*, v. 51, n. 4, p. 607–617, 2003. ISSN 00906778. Citado na página 34.

CISCO. *The Zettabyte Era: Trends and Analysis*. 2017. <<https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/vni-hyperconnectivity-wp.html>>. [Online; acessado 26-Novembro-2017]. Citado na página 16.

Coello Coello, C. Evolutionary multi-objective optimization: a historical view of the field. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, v. 1, n. 1, p. 28–36, feb 2006. ISSN 1556-603X. Citado 3 vezes nas páginas 44, 45 e 76.

DEB, K. et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: Nsga-ii. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, v. 6, n. 2, p. 182–197, Apr 2002. ISSN 1089-778X. Citado 3 vezes nas páginas 44, 53 e 55.

DEITEL, P. J. *C++ How to Program*. P.J. Deitel, H.M. Deitel. 7th. ed. [S.l.]: Pearson Education, 2010. ISBN 0132484587, 9780132484589. Citado na página 37.

DIJKSTRA, E. W. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, v. 1, n. 1, p. 269–271, dec 1959. ISSN 0029-599X. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.

DURÕES, G. M. et al. The choice of the best among the shortest routes in transparent optical networks. *Computer Networks*, v. 54, n. 14, p. 2400–2409, 2010. ISSN 13891286. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.

FOROUZAN, B. *Comunicação de Dados e Redes de Computadores*. [S.l.]: McGraw Hill Brasil, 2009. ISBN 9788563308474. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.

GEISLER, D. J. et al. Demonstration of Spectral Defragmentation in Flexible Bandwidth Optical Networking by FWM. *IEEE Photonics Technology Letters*, v. 23, n. 24, p. 1893–1895, dec 2011. ISSN 1041-1135. Citado na página 34.

GERSTEL, O. et al. Elastic optical networking: A new dawn for the optical layer? *IEEE Communications Magazine*, v. 50, n. 2, p. 12–20, 2012. ISSN 01636804. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 27.

GUINSBURG, J.; FARIA, J. *O Naturalismo*. [S.l.]: Editora Perspectiva S/A, 2017. (Stylus). ISBN 9788527310949. Citado na página 76.

GUO, B. et al. Multicasting based optical inverse multiplexing in elastic optical network. *Optics Express*, v. 22, n. 12, p. 15133, jun 2014. ISSN 1094-4087. Citado 6 vezes nas páginas 18, 31, 35, 36, 37 e 49.

HOLLAND, J. H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press, 1975. Second edition, 1992. Citado na página 76.

ILYAS, M.; MOUFTAH, H. T. E. *The Handbook of Optical Communication Networks*. First. [S.l.]: CRC Press, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 21.

ITU-T: TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU. *G.694.2: Spectral grids for WDM applications: CWDM frequency grid*. [S.l.], 2003. Citado na página 17.

ITU-T: TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU. *G.694.1: Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid*. [S.l.], 2012. Citado na página 16.

JINNO, M. et al. Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: Architecture, benefits, and enabling technologies. *IEEE Communications Magazine*, v. 47, n. 11, p. 66–73, 2009. ISSN 01636804. Citado 3 vezes nas páginas 17, 25 e 33.

KEISER, G. E. A Review of WDM Technology and Applications. *Optical Fiber Technology*, v. 5, n. 1, p. 3–39, jan 1999. ISSN 10685200. Citado na página 21.

KENNEDY, J.; EBERHART, R. Particle swarm optimization. In: *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*. [S.l.]: IEEE, 1995. v. 4, p. 1942–1948. ISBN 0-7803-2768-3. ISSN 19353812. Citado na página 69.

KONAK, A.; COIT, D. W.; SMITH, A. E. Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 91, n. 9, p. 992–1007, sep 2006. ISSN 09518320. Citado 4 vezes nas páginas 44, 45, 76 e 77.

LI, L.; SOMANI, A. K. Dynamic wavelength routing using congestion and neighborhood information. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, v. 7, n. 5, p. 779–786, 1999. ISSN 10636692. Citado 3 vezes nas páginas 22, 23 e 24.

LIRA, C. J. N. de; ALMEIDA, R. C.; MARTINS-FILHO, J. F. On combining split spectrum technique with a slot-continuity capacity loss heuristic in elastic optical networks. In: *2017 IEEE 18th International Conference on High Performance Switching and Routing (HPSR)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 70.

LIU, L. et al. Experimental validation and performance evaluation of OpenFlow-based wavelength path control in transparent optical networks. *Optics Express*, v. 19, n. 27, p. 26578, dec 2011. ISSN 1094-4087. Citado na página 35.

LU, G.-W.; SAKAMOTO, T.; KAWANISHI, T. Wavelength conversion of optical 64QAM through FWM in HNLF and its performance optimization by constellation monitoring. *Optics Express*, v. 22, n. 1, p. 15, jan 2014. ISSN 1094-4087. Citado na página 34.

LUKE, S. *Essentials of Metaheuristics*. second. [S.l.]: Lulu, 2013. Available for free at <http://cs.gmu.edu/~sean/book/metaheuristics/>. Citado 6 vezes nas páginas 44, 52, 53, 76, 77 e 78.

O'MAHONY, M. J. et al. Future optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, v. 24, n. 12, p. 4684–4696, Dec 2006. ISSN 0733-8724. Citado na página 21.

PEARL, J. *Heuristics: Intelligent Search Strategies for Computer Problem Solving*. Boston, MA, USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1984. ISBN 0-201-05594-5. Citado na página 44.

PEREIRA, H. A. *Análise sistêmica das penalidades de ruído nas redes ópticas transparentes*. *Análise sistêmica das penalidades de ruído nas redes ópticas transparentes*. Tese (Doutorado) — UFPE, 2007. Citado na página 76.

RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K. Routing and wavelength assignment in all-optical networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, v. 3, n. 5, p. 489–500, 1995. ISSN 10636692. Citado na página 22.

RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K. N.; SASAKI, G. H. *Optical Network: A Practical Perspective*. Third. [S.l.]: Morgan Kaufmann, 1998. Citado 3 vezes nas páginas 20, 21 e 31.

SUBRAMANIAM, S.; BARRY, R. Wavelength assignment in fixed routing WDM networks. In: *Proceedings of ICC'97 - International Conference on Communications*. [S.l.]: IEEE. v. 1, p. 406–410. ISBN 0-7803-3925-8. ISSN 10095896. Citado na página 25.

- TALEBI, S. et al. Spectrum Management Techniques for Elastic Optical Networks: A Survey. *Optical Switching and Networking*, Elsevier, v. 13, n. 2, p. 34–48, jul 2014. ISSN 15734277. Citado na página 27.
- TOMKOS, I. et al. A Tutorial on the Flexible Optical Networking Paradigm: State of the Art, Trends, and Research Challenges. *Proceedings of the IEEE*, v. 102, n. 9, p. 1317–1337, 2014. ISSN 0018-9219. Citado 5 vezes nas páginas 17, 18, 21, 27 e 28.
- WANG, R.; MUKHERJEE, B. Spectrum management in heterogeneous bandwidth networks. In: *2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 2907–2911. ISSN 1930-529X. Citado na página 28.
- WANG, R.; MUKHERJEE, B. Spectrum management in heterogeneous bandwidth networks. In: *2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. [S.l.]: IEEE, 2012. v. 50, p. 2907–2911. ISBN 978-1-4673-0921-9. ISSN 1930-529X. Citado na página 40.
- WANG, R.; MUKHERJEE, B. Provisioning in Elastic Optical Networks with Non-Disruptive Defragmentation. *Journal of Lightwave Technology*, v. 31, n. 15, p. 2491–2500, aug 2013. ISSN 0733-8724. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 28.
- XAVIER, A. V. et al. Spectrum continuity based routing algorithm for flexible grid optical networks. *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference Proceedings*, v. 2015-Decem, n. 1, p. 2–6, 2015. Citado na página 28.
- XU, Y. et al. Demonstration of all-optical inverse multiplexing in elastic optical networks. *Conference on Optical Fiber Communication, Technical Digest Series*, p. 6–8, 2014. ISSN 21622701. Citado 7 vezes nas páginas 18, 30, 35, 36, 37, 49 e 69.
- YEN, J. Y. Finding the K Shortest Loopless Paths in a Network. *Management Science*, v. 17, n. 11, p. 712–716, jul 1971. ISSN 0025-1909. Citado na página 24.
- Yuanxiang Chen et al. Experimental Demonstration of 1.2-Tb/s Optical PDM SCFDM Superchannel Multicasting by HNLF. *IEEE Photonics Journal*, v. 5, n. 5, p. 7902007–7902007, oct 2013. ISSN 1943-0655. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 49.
- YUM, T. Analysis of least congested path routing in WDM lightwave networks. *Proceedings of INFOCOM '94 Conference on Computer Communications*, p. 962–969, 1994. ISSN 0743166X. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 24.
- ZANG, H.; JUE, J. P.; MUKHERJEE, B. A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength- routed optical WDM networks. *Optical Networks Magazine*, v. 1, n. January, p. 47–60, 2000. Citado 5 vezes nas páginas 18, 22, 23, 24 e 25.
- ZHANG, G. et al. A survey on OFDM-based elastic core optical networking. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, v. 15, n. 1, p. 65–87, 2013. ISSN 1553877X. Citado na página 26.
- Zhangyuan Chen et al. Key technologies for elastic optical networks. In: *2014 13th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON)*. [S.l.]: IEEE, 2014. v. 1, n. c, p. 1–3. ISBN 978-1-4799-7218-0. Citado na página 18.
- ZHU, P. et al. Experimental demonstration of EON node supporting reconfigurable optical superchannel multicasting. *Optics Express*, v. 23, n. 16, p. 20495–20504, 2015. ISSN 1094-4087. Citado 3 vezes nas páginas 32, 33 e 36.

ZHU, P. et al. Demonstration of Elastic Optical Network Node with Defragmentation Functionality and SDN Control. *Optical Fiber Communication Conference 2016*, p. 3–5, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 18, 35 e 36.

ZHU, P. et al. Software-Defined Elastic Optical Network Node Supporting Spectrum Defragmentation. *Journal of Optical Communications and Networking*, v. 9, n. 1, p. A63, jan 2017. ISSN 1943-0620. Citado 3 vezes nas páginas 18, 34 e 36.

ZHU, P. et al. Recursive pump-adding scheme for optical superchannel multicasting based on FWM. *Optics Communications*, Elsevier, v. 347, p. 25–30, 2015. ISSN 00304018. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 33.

APÊNDICE A – ALGORITMOS GENÉTICOS

Em meados do século XIX surge na Europa um movimento denominado naturalismo, que apresenta uma nova forma de ver e interpretar o mundo. Ele traz consigo a ideia de que todo tipo de matéria está em constante transformação, indo de encontro aos conceitos de previsibilidade e imutabilidade presentes até o momento. Sua principal afirmação é de que os indivíduos são determinados pelo ambiente e pela hereditariedade (GUINSBURG; FARIA, 2017).

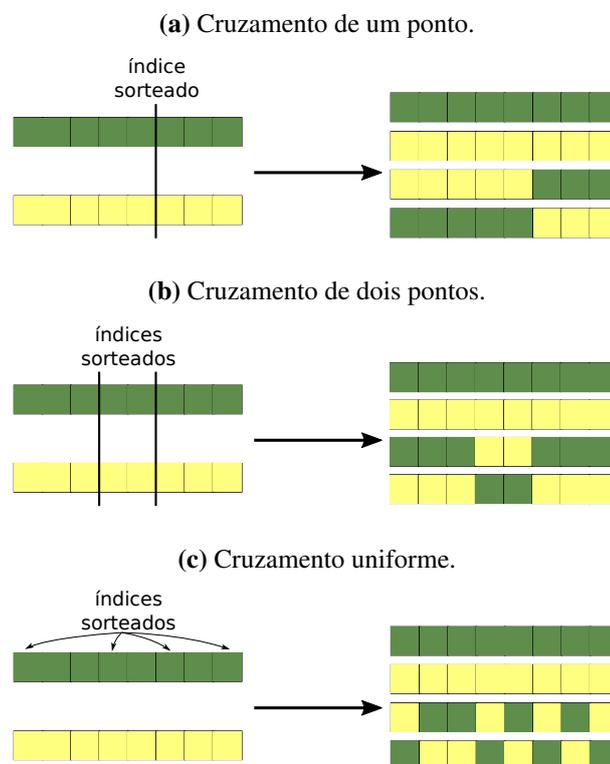
Inspirado por esse novo tipo de pensamento, novos conceitos e teorias foram propostos com objetivo de explicar a diversidade de espécies na natureza. O expoente deles se encontra no livro *A Origem das Espécies*, publicado em 1859 pelo naturalista britânico Charles Robert Darwin. Em sua publicação, Darwin rejeitou o princípio de fixidez das espécies, aderindo à noção de variação gradual dos seres vivos graças ao acúmulo de modificações pequenas, sucessivas e favoráveis, e não por modificações extraordinárias e surgidas repentinamente (PEREIRA, 2007).

Os algoritmos genéticos, primeiramente propostos por Holland em (HOLLAND, 1975), são inspirados por esse tipo de dinâmica evolucionária (KONAK; COIT; SMITH, 2006), fazendo uso de cruzamentos e mutações genéticas, como também de seleção dos melhores indivíduos dentro de um grupo, para buscar melhores soluções para diferentes tipos de problemas de otimização (Coello Coello, 2006). Um indivíduo é nada mais que uma possível solução para o problema trabalhado, sendo representado através de uma estrutura cromossômica. Uma população é composta por um conjunto de indivíduos e o conjunto de iterações ao longo do algoritmo é denominado gerações.

O processo de cruzamento consiste em combinar os cromossomos de dois indivíduos (pais) para formar dois novos indivíduos (filhos). O GA apresenta, conforme mostrado na Figura 40 e apresentado na literatura (LUKE, 2013), três tipos de cruzamentos. O primeiro deles, o cruzamento de um ponto apresentado na Figura 40a, sorteia um índice do vetor de cromossomos dos indivíduos. Um novo indivíduo herdará de um dos pais os cromossomos entre 0 e esse índice e, do outro pai os cromossomos entre o índice e o final do vetor. O outro novo indivíduo fará a operação inversa. O cruzamento de dois pontos sorteia dois índices do vetor. Nesse tipo de cruzamento ocorre a intercalação de herança de cromossomos dos pais entre os índices sorteados, conforme apresentado na Figura 40b. Por último, conforme mostrado em 40c, o GA dispõe do cruzamento uniforme que sorteia a fonte do cromossomos filhos individualmente, intercalando entre um ou outro dos indivíduos pais. Geralmente esse tipo de cruzamento apresenta 50% de chance do cromossomo pertencer a determinado indivíduo original, gerando paralelamente o caso inverso.

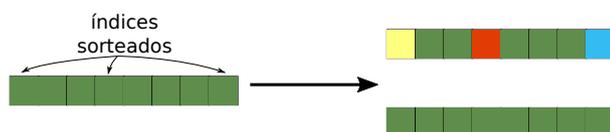
O outro mecanismo também responsável pela criação de novos indivíduos é denominado mutação. Ele consiste em modificar o cromossomo dos indivíduos da população de forma

Figura 40 – Tipos de cruzamentos para algoritmos genéticos: (a) Um ponto; (b) Dois pontos; (c) Uniforme.



Fonte: Autor.

Figura 41 – Mutação.



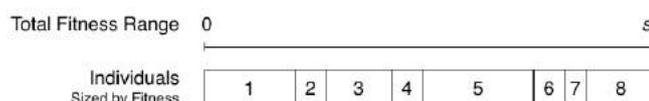
Fonte: Autor.

aleatória, geralmente apresentando uma baixa probabilidade de ser efetuada (KONAK; COIT; SMITH, 2006). Através da mutação, possibilidades de soluções não apresentadas pelos indivíduos pais poderão surgir, possibilitando uma busca mais ampla pelo espaço total de soluções, como também capacidade de fuga de mínimos locais (LUKE, 2013). A Figura 41 apresenta um tipo de mutação em que a partir de um indivíduo outro é gerado, apresentando modificações através desse processo.

O último mecanismo presente nos algoritmos genéticos consiste na seleção dos indivíduos que serão responsáveis pela formação de uma próxima geração, através de algum critério específico. Uma das formas mais conhecidas é denominada Seleção com Reposição (*Select With Replacement*), em que um indivíduo é selecionado dentro do conjunto total e sua cópia é destinada ao conjunto que formará a geração futura. Nela, a probabilidade de escolha de um indivíduo é determinada pelo seu *fitness*, que corresponde à qualidade de sua solução proporcional às qualidades de todas as soluções da população (LUKE, 2013). Essa forma de

seleção também é conhecida como Seleção Proporcional ao *Fitness* (*Fitness-Proportionate Selection*) ou Roleta (*Roulette Selection*). A Figura 42 ilustra o princípio desse tipo de seleção. Como ocorrerá sorteios aleatórios, dentro da extensão total de soluções, para a escolha dos indivíduos que irão fazer parte da próxima geração, os que apresentarem maior valor de *fitness* terão um maior tamanho no espaço de sorteio, sendo escolhido mais vezes consequentemente. Outros tipos de seleção podem ser encontrados em (LUKE, 2013).

Figura 42 – Vetor com as diferentes proporções para cada indivíduo da população.



Fonte: *Essentials of Metaheuristics* (LUKE, 2013).

O GA utilizado para criação das frentes de Pareto abordado na Seção 4.5, utiliza um cruzamento do tipo uniforme para gerar novos indivíduos, gerando dois novos a cada par selecionado. O processo de mutação, juntamente com suas probabilidades específicas, será detalhado no pseudo-código do Apêndice B. Como o GA foi utilizado para criar uma frente de soluções não dominadas, não há necessidade da aplicação da seleção roleta, havendo uma forma de seleção diferente relacionado com a não dominância de cada solução.

APÊNDICE B – FUNÇÕES USADAS PELO GA

Algoritmo 4 criarPopulaçãoInicial().

Saída: $P = (I_1, I_2, \dots, I_N)$ {Conjunto dos N primeiros indivíduos do GA};

```

1:  $p_i = 0.8$ ; {Probabilidade do gene receber módulos MS}
2:  $N = 50$ ; Tamanho da população no começo e ao final de cada iteração
3:  $T_{max} = 10$ ; {Número máximo de módulos MS por nó}
4:  $O \leftarrow$  números de nós da rede;
5: for  $n = 1$  to  $N$  do
6:    $I_n = (I_n^1, I_n^2, \dots, I_n^O)$  {Representação cromossômica do indivíduo  $n$ , com tamanho do
   vetor  $O$ }
7:   for  $o = 1$  to  $o = O$  do
8:      $p = \text{ALEATÓRIO}(0,1)$ ;
9:     if  $p < p_i$  then
10:       $I_n^o \leftarrow \text{UNIFORME}(1, T_{max})$ ;
11:     else
12:       $I_n^o \leftarrow 0$ ;
13:     end if
14:      $o \leftarrow o + 1$ ;
15:   end for
16:    $n \leftarrow n + 1$ ;
17: end for
18: return  $P$ ;

```

Algoritmo 5 criarNovaPopulação(P).

Entrada: $P = (I_1, I_2, \dots, I_N)$ {População com N indivíduos};

Saída: $Q = (I_1, I_2, \dots, I_{4N})$ {População com $4N$ indivíduos, após processos de cruzamento e mutação}

```

1:  $p_c = 0.5$ ; {Probabilidade do gene  $o$  sofrer cruzamento}
2:  $p_m = 0.1$ ; {Probabilidade do gene  $o$  sofrer mutação}
3:  $p_i = 0.8$ ; {Probabilidade do gene  $o$  receber módulos MS}
4:  $T_{max} = 10$ ; {Número máximo de módulos MS por nó}
5:  $O \leftarrow$  números de nós da rede;
6: while  $P$  não estiver vazio do
7:   Seleção aleatória de dois indivíduos de  $P$  ( $I_x$  e  $I_y$ );
8:   Remoção dos indivíduos  $I_x$  e  $I_y$  da população  $P$ ;
9:   Inserção dos indivíduos  $I_x$  e  $I_y$  na população  $Q$ ;
10:
11:   {Cruzamento}
12:   Criação de dois novos indivíduos  $J_x$  e  $J_y$ ;
13:   for  $o = 1$  to  $o = O$  do
14:      $p = \text{ALEATÓRIO}(0,1)$ ;
15:     if  $p < p_c$  then
16:        $J_x^o \leftarrow I_x^o$ ;
17:        $J_y^o \leftarrow I_y^o$ ;
18:     else
19:        $J_x^o \leftarrow I_y^o$ ;
20:        $J_y^o \leftarrow I_x^o$ ;
21:     end if
22:      $o \leftarrow o + 1$ ;
23:   end for
24:   Inserção dos indivíduos  $J_x$  e  $J_y$  na população  $Q$ ;
25: end while
26:
27: {Mutação}
28: for all Indivíduos de  $Q$  do  $\{Q = (I_1, I_2, \dots, I_{2N})\}$ 
29:   Criação de uma cópia  $J$  do indivíduo  $I$ ;
30:   for  $o = 1$  to  $o = O$  do
31:      $p = \text{ALEATÓRIO}(0,1)$ ;
32:     if  $p < p_m$  then
33:        $p = \text{ALEATÓRIO}(0,1)$ ;
34:       if  $p < p_i$  then
35:          $J^o \leftarrow \text{UNIFORME}(1, T_{max})$ ;
36:       else
37:          $J^o \leftarrow 0$ ;
38:       end if
39:     end if
40:      $o \leftarrow o + 1$ ;
41:   end for
42:   Inserção do indivíduo  $J$  na população  $Q$ ;
43: end for
44: return  $Q$ ;

```

Algoritmo 6 criarFrentesDePareto(Q).

Entrada: $Q = (I_1, I_2, \dots, I_{4N})$; {População com $4N$ indivíduos}

Saída: $F = (F_1, F_2, \dots)$;

```

1:  $x = 1$ ;
2: while  $Q$  não estiver vazio do
3:    $F_x \leftarrow$  todos os indivíduos não dominados;
4:   Remoção todos os indivíduos acrescentados em  $F_x$  de  $Q$ ;
5:    $x \leftarrow x + 1$ ;
6: end while
7: return  $F$ ;

```

Algoritmo 7 selecionarMelhorPopulação(F).

Entrada: $F = (F_1, F_2, \dots)$;

Saída: $P = (I_1, I_2, \dots, I_N)$

```

1:  $N = 50$ ; {Tamanho da população no começo e ao final de cada iteração}
2:  $x = 1$ ;
3: while Número de indivíduos de  $P < N$  do
4:   if Número de indivíduos de  $P +$  número de indivíduos de  $F_x < N$  then
5:      $P \leftarrow$  todos indivíduos de  $F_x$ ;
6:      $x \leftarrow x + 1$ ;
7:   else
8:     while Número de indivíduos de  $P < N$  do
9:       Remoção de um indivíduo aleatório  $J$  de  $F_x$ ;
10:      Inserção do indivíduo  $J$  na população  $P$ ;
11:     end while
12:   end if
13: end while
14: return  $P$ ;

```
