

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

PAULO FERNANDO DE SOUZA FILHO

PROPOSTA DE HEURÍSTICA E META-HEURÍSTICA PARA ALOCAÇÃO EFICIENTE DE  
RECURSOS EM REDES COM MULTIPLEXAÇÃO POR DIVISÃO ESPACIAL



Recife

2018

PAULO FERNANDO DE SOUZA FILHO

PROPOSTA DE HEURÍSTICA E META-HEURÍSTICA PARA ALOCAÇÃO EFICIENTE DE  
RECURSOS EM REDES COM MULTIPLEXAÇÃO POR DIVISÃO ESPACIAL

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

Área de concentração: Comunicações.

Orientador: Prof<sup>o</sup>. Dr. Raul Camelo de Andrade Almeida Jr.

Recife

2018

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

S729p Souza Filho, Paulo Fernando de.  
Proposta de heurística e meta-heurística para alocação eficiente de recursos em redes com multiplexação espacial / Paulo Fernando de Souza Filho. – 2018.  
84 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Raul Camelo de Andrade Almeida Junior.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2018.  
Inclui Referências e Apêndices.

1. Engenharia Elétrica. 2. Fibras multi-núcleos. 3. Multiplexação espacial.  
4. Redes ópticas elásticas. I. Almeida Junior, Raul Camelo de Andrade.  
(Orientador). II. Título.

UFPE

621.3 CDD (22. ed.)

BCTG/2018-497

PAULO FERNANDO DE SOUZA FILHO

PROPOSTA DE HEURÍSTICA E META-HEURÍSTICA PARA ALOCAÇÃO EFICIENTE DE RECURSOS EM REDES COM MULTIPLEXAÇÃO POR DIVISÃO ESPACIAL

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

Aprovada em: 27/08/2018

BANCA EXAMINADORA

---

Prof<sup>o</sup>.Dr. Raul Camelo de Andrade Almeida Jr  
(Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof<sup>o</sup>.Dr. Daniel Augusto Ribeiro Chaves  
(Examinador Externo)  
Universidade de Pernambuco

---

Prof<sup>o</sup>.Dr. Helder Alves Pereira (Examinador Externo)  
Universidade Federal de Campina Grande

*Dedico este trabalho aos meu pais e familiares, que sempre me apoiaram nos bons e maus momentos.*

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Paulo e Maria, pelo apoio incondicional ao longo desses dois anos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Raul Camelo, pela dedicação, disponibilidade, ensinamentos e, principalmente, pela quantidades de ideias sugeridas ao longo desta pesquisa.

Aos professores da pós-graduação da UFPE pela contribuição nos conhecimentos utilizados na pesquisa.

Aos meus colegas de pós-graduação Bruno, Ravi, Darlisson, Rodrigo, Carlos, José, Clayton e demais, pelos momentos de descontração e trocas de informações.

À Lidiane por ter me suportado e aturado durante estes anos de pesquisa, sempre me apoiando e dando forças pra seguir em frente.

À CAPES pelo suporte financeiro através da bolsa de Mestrado.

Ao PPGEE pela oportunidade de realização deste trabalho.

*“The scientist is not a person who gives the right answers, he’s one who asks the right questions.”*  
*(Claude Lévi-Strauss)*

## RESUMO

Este trabalho propõe a apresentação e exploração do conceito de multiplexação espacial, em redes ópticas elásticas, que se apresenta como uma área de crescente interesse, quando se busca o aumento da capacidade em redes ópticas. Neste trabalho, são propostas uma heurística e uma meta-heurística para a alocação de recursos, em redes estruturadas para a aplicação de multiplexação espacial, com estrutura multi-núcleos. O conceito de algoritmo genético, é utilizado para a organização de classes de requisições em determinados núcleos, de modo a reduzir a quantidade de fragmentos que não são capazes de estabelecer caminhos ópticos, e assim proporcionar uma melhoria de desempenho do algoritmo proposto em relação ao algoritmo *First-Fit*. Um estudo comparativo do desempenho da heurística proposta, para diferentes classes de requisições, também é realizado. A meta-heurística proposta se baseia no algoritmo *Min Slot-Continuity Capacity Loss* desenvolvido para redes elásticas, e busca uma adaptação desse algoritmo para as redes com estrutura multi-núcleos, com o intuito de escolher um conjunto de slots e um núcleo de forma a reduzir a perda de capacidade de futuras alocações na rede. Todas as propostas são simuladas em diferentes tipos de topologia, e para diferentes valores de carga, e sempre aplicando como métrica a probabilidade de bloqueio de requisições. A melhoria de desempenho dos algoritmos propostos, é comparada aos algoritmos mais utilizados e conhecidos para o roteamento e alocação de recursos em redes multi-núcleos, tais como: *First-Fit* e *Random*.

Palavras-chave: Fibras multi-núcleos. Multiplexação espacial. Redes ópticas elásticas.

## ABSTRACT

This work proposes the presentation and exploration of the concept of spatial multiplexing, in elastic optical networks, which presents itself as an area of growing interest, when seeking to increase capacity in optical networks. In this work, a heuristic and a metaheuristic are proposed for the allocation of resources, in structured networks for the application of spatial multiplexing, with multi-core structure. The concept of genetic algorithm is used for the organization of classes of requisitions in certain cores, in order to reduce the number of fragments that are not able to establish optical paths, and thus provide a performance improvement of the algorithm proposed in relation to the First-Fit algorithm. A comparative study of the performance of the proposed heuristic, for different classes of requisitions, is also performed. The proposed metaheuristic, is based on the Min Slot-Continuity Capacity Loss algorithm developed for elastic networks and seeks an adaptation of this algorithm for the networks with multi-core structure, with the intention of choosing a set of slots and a core in order to reduce the loss of capacity of future allocations in the network. All the proposals are simulated in different types of topology, for different values of load, and always applying as a metric the call blocking probability. The performance improvement of the proposed algorithms is compared to the most widely used and known algorithms for the routing and allocation of resources in multi-core networks, such as: First-Fit and Random.

Keywords: Elastic Optical Networks. Multi-Core Fibers. Spatial Division Multiplexing.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Alocação de recursos em redes WDM e EON. . . . .	16
Figura 2 – Transmissão de canais WDM. . . . .	20
Figura 3 – Estrutura de um ROADM. . . . .	21
Figura 4 – Largura de banda dos canais WDM. . . . .	21
Figura 5 – Espectro WDM e OFDM. . . . .	26
Figura 6 – Exemplo de RSA. . . . .	28
Figura 7 – MCF com sete núcleos. . . . .	32
Figura 8 – Alguns modos LP para transmissão em fibras multi-modo. . . . .	32
Figura 9 – Tipos de comutação em SDM, adaptado de . . . . .	34
Figura 10 – Tipos de supercanais SDM. . . . .	35
Figura 11 – Exemplo de RSSA. . . . .	38
Figura 12 – Exemplo de representação de indivíduo no AG proposto. . . . .	44
Figura 13 – Fluxograma do Algoritmo Genético. . . . .	45
Figura 14 – Exemplo de cruzamento por monoponto, com a escolha da primeira linha. A concatenação da parte superior e inferior (e vice-versa) de I1 e I2 formam os elementos I3 e I4. . . . .	47
Figura 15 – Fluxograma do Método de Cruzamento. . . . .	47
Figura 16 – Exemplo de mutação em dois pontos. Na linha 1, os genes 1,3 e 6,0 são trocados de posição;na linha 2, os genes 2,4 e 1,5 são trocados de posição; na linha 3, os genes 1,3 e 5,0 são trocados de posição . . . . .	49
Figura 17 – Fluxograma do Método de Mutação. . . . .	49
Figura 18 – Representação dos indivíduos na roleta. . . . .	51
Figura 19 – Topologias utilizadas para a aplicação do AG: (a)Japonesa, (b)Toroidal, (c)NSFNet. . . . .	52
Figura 20 – Representação de indivíduo FFC. . . . .	52
Figura 21 – Comparação de desempenho das heurísticas FFC+AG e FFC, para a topologia Japonesa. . . . .	53
Figura 22 – Comparação de desempenho das heurísticas FFC+AG e FFC, para a topologia NSFNet. . . . .	54
Figura 23 – Comparação de desempenho das heurísticas FFC+AG e FFC, para a topologia Toroidal. . . . .	54
Figura 24 – Quantidade de requisições aceitas em cada núcleo para FFC(a) e FFC+AG(b), topologia Japonesa. . . . .	55
Figura 25 – Quantidade de requisições aceitas em cada núcleo para FFC(a) e FFC+AG(b), topologia NSFNET. . . . .	56

Figura 26 – Quantidade de requisições aceitas em cada núcleo para FFC(a) e FFC+AG(b), topologia Toroidal. . . . .	57
Figura 27 – Melhor e pior indivíduo ao fim de cada geração. . . . .	59
Figura 28 – Rotas interferentes. . . . .	61
Figura 29 – Possibilidades de alocação para uma requisição de 2 slots no vetor de disponibilidade. . . . .	62
Figura 30 – Operação booleana para obtenção do estado da rede após alocação. . . . .	63
Figura 31 – Representação do estado dos links da rede(a) e o núcleo que deve ser utilizado para o cálculo da perda de capacidade para uma possível alocação(b). . . . .	65
Figura 32 – Fluxograma do Algoritmo MSCL para as redes MCF. . . . .	66
Figura 33 – Gráfico comparativo entre o <i>First-Fit-Core</i> e o algoritmo proposto (MSCL) para a topologia NSFNET, com requisições de 2, 3, 4 e 5 slots. . . . .	67
Figura 34 – Gráfico comparativo entre o <i>First-Fit-Core</i> e o algoritmo proposto (MSCL) para a topologia Japonesa, com requisições de 2, 3, 4 e 5 slots. . . . .	68
Figura 35 – Gráfico comparativo entre o <i>First-Fit-Core</i> e o algoritmo proposto (MSCL) para a topologia Toroidal, com requisições de 2, 3, 4 e 5 slots. . . . .	68
Figura 36 – Gráfico comparativo entre o <i>First-Fit-Core</i> e o algoritmo proposto (MSCL) para a topologia NSFNET, com requisições de 2, 4 e 8 slots. . . . .	69
Figura 37 – Gráfico comparativo entre o <i>First-Fit-Core</i> e o algoritmo proposto (MSCL) para a topologia Japonesa, com requisições de 2, 4 e 8 slots. . . . .	69
Figura 38 – Gráfico comparativo entre o <i>First-Fit-Core</i> e o algoritmo proposto (MSCL) para a topologia Toroidal, com requisições de 2, 4 e 8 slots. . . . .	70
Figura 39 – Gráfico comparativo entre o <i>First-Fit-Core</i> , MSCL e o MSCL-FC para a topologia NSFNET, com requisições de 2, 4 e 8 slots. . . . .	71
Figura 40 – Gráfico comparativo entre o <i>First-Fit-Core</i> , MSCL e o MSCL-FC para a topologia NSFNET, com requisições de 2, 3, 4 e 5 slots. . . . .	71
Figura 41 – Gráfico comparativo entre as propostas MSCL-SDM, a melhor combinação obtida pelo FFC-AG e o FFC, para a topologia Toroidal, com requisições de 2, 4 e 8 slots. . . . .	72
Figura 42 – Gráfico comparativo entre as propostas MSCL-SDM, a melhor combinação obtida pelo FFC-AG e o FFC, para a topologia Toroidal, com requisições de 2, 3, 4 e 5 slots. . . . .	73

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Formatos de modulação, taxa de transmissão por subportadora e alcance. . .	27
Tabela 2 – Parâmetros utilizados para o AG proposto. . . . .	45
Tabela 3 – Valores de aptidão dos indivíduos. . . . .	50
Tabela 4 – Cargas em que o AG foi executado e ordens do núcleo do melhor indivíduo para cada topologia analisada. . . . .	53
Tabela 5 – Melhoria de desempenho do FFC+AG. . . . .	55
Tabela 6 – Tempo de simulação para os algoritmos simulados. . . . .	72

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BVT	Bandwidth Variable Transceivers
EON	Elastic Optical Networks
FFC	First-Fit-Core
FMF	Few-Mode Fiber
ILP	Integer Linear Programming
LP	Linearly Polarized
MCF	Multi-Core Fiber
MIMO-DSP	Multiple Input Multiple Output-Digital Signal Processor
MMF	Multi-Mode Fiber
MSCL	Min Slot-Continuity Capacity Loss
NP	Non-deterministic Polynomial time
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
RMCSA	Routing, Modulation Format, Core and Spectrum Allocation
ROADM	Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer
RSA	Routing and Spectrum Allocation
RSCA	Routing, Spectrum And Core Assignment
RSCMA	Routing, Spectrum, Core and/or Mode Assignment
RSSA	Routing, Spatial Mode and Spectrum Allocation
SDM	Spatial Division Multiplexing
SLICE	Spectrum-sliced Elastic Optical Path Network
SMFB	Single-Mode Fiber Bundle
TDM	Time Division Multiplexing
WDM	Wavelength-Division Multiplexing

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>15</b>
1.1	MOTIVAÇÕES . . . . .	15
1.2	OBJETIVOS . . . . .	18
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO . . . . .	18
<b>2</b>	<b>REDES ÓPTICAS</b> . . . . .	<b>19</b>
2.1	INTRODUÇÃO . . . . .	19
2.2	REDES ÓPTICAS WDM E O PROBLEMA DE RWA . . . . .	20
2.3	ROTEAMENTO . . . . .	22
<b>2.3.1</b>	<b>Roteamento fixo</b> . . . . .	<b>22</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Roteamento fixo-alternativo</b> . . . . .	<b>22</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Roteamento dinâmico</b> . . . . .	<b>22</b>
2.4	ALOCAÇÃO DE COMPRIMENTO DE ONDA . . . . .	23
2.5	TIPOS DE TRÁFEGO . . . . .	24
2.6	REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS . . . . .	25
<b>2.6.1</b>	<b>Roteamento e atribuição de espectro</b> . . . . .	<b>27</b>
<b>3</b>	<b>MULTIPLEXAÇÃO POR DIVISAL ESPACIAL</b> . . . . .	<b>30</b>
3.1	ESTRUTURAS SDM . . . . .	30
3.2	NÍVEL DE ACOPLAMENTO . . . . .	32
3.3	COMUTAÇÃO SDM . . . . .	33
3.4	FORMAÇÃO DE SUPERCANAIS SDM . . . . .	35
3.5	ROTEAMENTO E ALOCAÇÃO DE MODOS ESPACIAIS E ESPECTRO . . . . .	36
<b>3.5.1</b>	<b>Modelos ILP</b> . . . . .	<b>37</b>
<b>3.5.2</b>	<b>Métodos heurísticos e meta-heurísticos</b> . . . . .	<b>39</b>
<b>4</b>	<b>UMA PROPOSTA DE PRIORIZAÇÃO DE NÚCLEO POR CLASSE DE REQUISIÇÃO BASEADA EM ALGORITMO GÊNÉTICO</b> . . . . .	<b>41</b>
4.1	ALGORITMOS EVOLUTIVOS . . . . .	41
4.2	APLICAÇÃO DO AG PARA A OBTENÇÃO DE ORDENS DE ATRIBUIÇÃO DE NÚCLEO PARA DIFERENTES CLASSES DE REQUISIÇÕES . . . . .	43
<b>4.2.1</b>	<b>Cruzamento</b> . . . . .	<b>46</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Mutação</b> . . . . .	<b>48</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Seleção</b> . . . . .	<b>50</b>
4.3	MELHORIA DO <i>FIRST-FIT-CORE</i> (FFC) . . . . .	51

<b>5</b>	<b>ADAPTAÇÃO DO ALGORITMO <i>MIN SLOT-CONTINUITY CAPACITY LOSS</i> PARA REDES EON-MCF</b> . . . . .	<b>60</b>
5.1	<i>MIN SLOT-CONTINUITY CAPACITY LOSS</i> . . . . .	60
<b>5.1.1</b>	<b>Rotas interferentes</b> . . . . .	<b>61</b>
<b>5.1.2</b>	<b>Cálculo da perda de capacidade</b> . . . . .	<b>62</b>
5.2	ADAPTAÇÃO DO ALGORITMO MSCL PARA SDM . . . . .	64
<b>5.2.1</b>	<b>Resultados</b> . . . . .	<b>67</b>
5.2.1.1	Comparação entre as propostas MSCL-SDM e FFC-AG . . . . .	72
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b> . . . . .	<b>74</b>
6.1	CONTRIBUIÇÕES E CONSIDERAÇÕES . . . . .	74
6.2	TRABALHOS FUTUROS . . . . .	75
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>76</b>
	<b>APÊNDICE A – FUNÇÃO PARA ADAPTAÇÃO DO MSCL PARA REDES SDM</b> . . . . .	<b>82</b>
	<b>APÊNDICE B – FUNÇÕES PARA IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO GÊNÉTICO</b> . . . . .	<b>83</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Crescentes evoluções tecnológicas tem aumentado a demanda por tráfego de banda em redes com alta capacidade (*backbones*) de sistemas de comunicações. Serviços como transmissão de vídeo, dispositivos de internet das coisas, acesso a conteúdos via televisões inteligentes fazem com que se projete um tráfego anual de IP de 3.3 Zettabytes [CISCO, 2015]. Para suprir tal demanda, a infra-estrutura das redes ópticas existentes, que carregam esse tráfego, precisam se adaptar e buscar formas de aprovisionar a crescente demanda de tráfego. Em breve, a capacidade disponível das redes de transporte ópticas existentes, chegará ao seu limite [WINZER, 2014], neste contexto, novas formas de aumentar a capacidade das redes ópticas em uso já estão sendo pesquisadas, e o conceito de multiplexação por divisão espacial surge como uma alternativa viável para a solução do problema.

## 1.1 MOTIVAÇÕES

O surgimento e a larga aplicação de transmissão de dados por meio de fibras ópticas, gerou grande interesse no mercado de telecomunicações e, possibilitou a formação de diversas empresas nesse ramo, resultando em uma grande competitividade entre tais empresas, e consequentemente, uma redução no preço da banda. Diante deste novo cenário, essas empresas investiram massivamente no lançamento à terra de cabos de fibra óptica, com a expectativa no surgimento de uma crescente demanda [ALMEIDA, 2001].

Apesar do investimento massivo por volta dos anos 70, até o fim dos anos 90 existiam uma vasta quantidade de fibras sem serem utilizadas. Com diversas áreas metropolitanas possuindo milhares de fibras lançadas à terra, mas com o tráfego permanecendo inalterado durante vários anos. A estagnação do tráfego oferecido se devia a alguns fatores [ALMEIDA, 2001]:

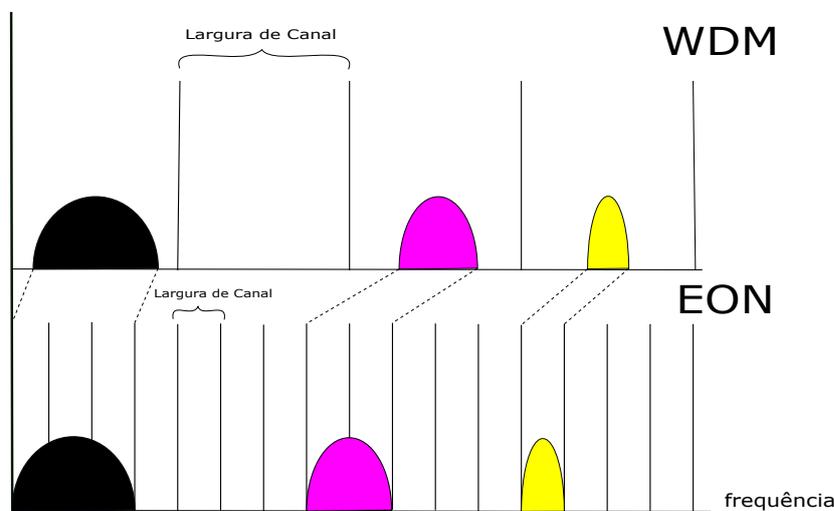
- Estágio inicial de desenvolvimento das redes responsáveis pela conexão entre o *backbone* de fibras e a residência dos usuários, chamadas redes de transporte. Esse tipo de rede era composta por pares de fios trançados, que não possuem a capacidade necessária para transferir o tráfego do *backbone* de fibras para o usuário final;
- Não desenvolvimento de equipamentos que possibilitassem a organização de uma arquitetura para a disponibilização da capacidade disponível nas fibras.

Alguns fatores possibilitaram a substituição da transmissão por par de fio trançado para comprimentos de onda em fibras ópticas. O desenvolvimento de amplificadores a fibras dopadas com érbio (EDFA, do inglês *Erbium Doped Fiber Amplifier*), que tem a capacidade de amplificar vários comprimentos de onda ao mesmo tempo, possibilitou a diminuição do custo de transmissões de longas distâncias. Outro importante fator, foi o desenvolvimento de roteadores ópticos baseados em comprimento de onda, que permitiram o roteamento das informações no

domínio óptico. Técnicas de multiplexação óptica, tais como OTDM (do inglês *Optical Time Division Multiplexing*) e WDM (do inglês *Wavelength Division Multiplexing*), possibilitaram a transmissão de diversos sinais em uma única fibra ao mesmo tempo e contribuíram para o uso mais eficiente da capacidade das fibras, o que auxiliou os *backbones* a suprir a demanda, cada vez mais crescente por serviços de banda larga.

Redes WDM por muito tempo se apresentaram como alternativa para a transmissão de dados em redes ópticas, podendo transmitir de 40 a 100 Gb/s. Um dos grandes problemas das redes WDM é a rigidez da largura de banda dos canais, provocando o uso ineficiente do espectro disponível. Como alternativa às redes WDM, surgiram as redes ópticas elástica (EON, do inglês *Elastical Optical Networks*) que apresentam maior flexibilidade para a acomodação mais eficiente dos diferentes tamanhos de demandas [GERSTEL et al., 2012]. A Figura 1 apresenta as grades para a largura dos canais WDM e EON com diferentes tamanhos de demandas, pode-se observar o melhor encaixe entre as demandas e a granularidade disponível para as redes EON. A aplicação do conceito de supercanais, possibilita a flexibilidade característica da redes EON, com cada taxa de transmissão sendo adequada para cada quantidade de banda demandada por determinada aplicação.

**Figura 1** – Alocação de recursos em redes WDM e EON.



Fonte: o autor.

Apesar do aumento das taxas de transmissão e da eficiência no aproveitamento do espectro proporcionado pelas redes EON, a demanda por maiores taxas de transmissão continuam a aumentar, como mostrado em [CISCO, 2015]. Somado a este fator, a capacidade de transmissão das fibras ópticas utilizadas deve chegar ao limite físico em breve [WINZER, 2014]. Para suprir tal demanda, a multiplexação por divisão espacial (SDM, do inglês *Spatial Division Multiplexing*) ganha força com o passar dos anos [SHARIATI et al., 2016].

Diversos trabalhos já procuram desenvolver formas de aumentar a capacidade das fibras ópticas, seja pela adição de núcleos separados espacialmente, seja pela exploração de modos ópticos onde não há espaçamento físico entre os canais transmitidos. Atualmente, alguns projetos

buscam explorar de maneira eficiente o ganho de capacidade provocado pela multiplexação espacial, assim como efeitos físicos provocados pela transmissão de canais espaciais próximos. A seguir serão citados alguns projetos em andamento na área de SDM:

- "*Technologies for spatial-division multiplexing: The next frontier in optical communications*", projeto sueco que busca analisar e aplicar conceitos desenvolvidos para SDM, de modo a alcançar altas taxas de transmissão. Utilizando áreas como teoria da informação, processamento digital de sinais e codificação para investigar conceitos teóricos e práticos desenvolvidos para SDM [CHALMERS, 2015].
- "*Optical Technologies for Spatial Division Multiplexing*", projeto português baseado no conceito de aumento de capacidade em fibras ópticas por meio de núcleos espaciais. Com o objetivo de produzir, desenvolver e otimizar componentes SDM que possibilitem a implementação de fibras multi-núcleos [TELECOMUNICAÇÕES, 2018].
- "*Modeling and optimization of space division multiplexing (SDM) elastic optical networks*", projeto polonês que tem como principais objetivos o desenvolvimento, implementação e avaliação de: modelos matemáticos e algoritmos de planejamento e operação para redes SDM baseadas no conceito EON, e modelos analíticos com ferramentas de simulação para a avaliação da qualidade de transmissão (QoT) em sistemas SDM [TELECOMMUNICATIONS, 2017].

A arquitetura SDM tem se mostrado um campo bastante produtivo para área acadêmica, dada a grande quantidade de artigos desenvolvidos nos últimos anos. Este interesse pode ser explicado pela quantidade de áreas a serem exploradas no contexto de SDM, a seguir serão listadas algumas áreas de interesse para a pesquisa e desenvolvimento desta tecnologia:

- Estudo do efeito de interferência entre canais de transmissão, dada a proximidade dos mesmos [KOSHIBA, 2014];
- Algoritmos de alocação e atribuição de núcleo e/ou modo [TODE; HIROTA, 2016];
- Aperfeiçoamento das tecnologias multi-núcleo e multi-modo, para a utilização em larga escala da arquitetura SDM [IGARASHI et al., 2015];
- Relação custo-benefício, entre desempenho e tecnologia de comutação implementada em cada nó da rede [SHARIATI et al., 2016].

A variedade de projetos e artigos científicos com foco em SDM, mostram a relevância desta área para o futuro da infra-estrutura das redes ópticas. Apesar do crescente interesse por esta área, a primeira demonstração de transmissão de sistemas SDM com alta capacidade só foi realizada por volta de 2011, o que evidencia o quão recente são os estudos nessa área e as possibilidades a serem exploradas.

## 1.2 OBJETIVOS

Visando explorar o conceito de SDM e utilizar os recursos disponíveis de maneira mais eficiente possível, este trabalho tem por objetivo a utilização de heurísticas e meta-heurísticas para a resolução do problema de roteamento e atribuição de núcleo e espectro em redes SDM. Para tal, o conceito de algoritmo evolutivo, mais especificamente algoritmo genético, foi utilizado para alocar as requisições que chegam à rede da maneira mais eficiente possível. O algoritmo genético se baseia em conceitos encontrados na natureza como cruzamento e mutação para evoluir uma população inicial, buscando a maximização de uma função *fitness* [ALMEIDA et al., 2013]. A heurística MSCL (do inglês *Min Slot-Continuity Capacity Loss*) desenvolvida para as redes EON [WALDMAN; FILHO, 2013] foi adaptada para as redes EON-MCF. O algoritmo MSCL analisa o impacto causado por possíveis alocações em rotas que possuem ao menos um link em comum com a rota principal (rotas interferentes), sempre procurando alocar a requisição na posição que provoque o menor impacto às rotas interferentes, visando à redução da fragmentação espectral e consequentemente aproveitando melhor os recursos da rede. As heurísticas e meta-heurísticas desenvolvidas neste trabalho buscam a redução da probabilidade de bloqueio de requisições.

## 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O restante do trabalho se apresenta da seguinte forma:

O Capítulo 2 apresenta informações sobre o nascimento e evolução das redes ópticas elásticas. As redes WDM e EON são detalhadas com suas características, restrições e soluções aos problemas de: roteamento e atribuição de comprimento de onda e roteamento e alocação de espectro. No Capítulo 3 o conceito de multiplexação por divisão espacial é abordado, com as possíveis implementações, características e restrições. Ainda neste capítulo são abordadas alternativas para a solução do problema de roteamento e alocação de espectro. O Capítulo 4 apresenta exemplos de algoritmos evolutivos, onde é detalhada a heurística baseada em algoritmo genético desenvolvida neste trabalho, em que diferentes classes de requisições apresentam diferentes ordens de tentativa de alocação. No Capítulo 5 é apresentado o conceito do algoritmo MSCL para redes EON e, posteriormente, sua adaptação para redes EON-SDM, com uma variação buscando a redução do tempo de execução. Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões e contribuições das propostas apresentadas por este trabalho, assim como sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REDES ÓPTICAS

Este capítulo tem por objetivo abordar os conceitos de WDM e EON para as redes ópticas, descrevendo suas principais características e desafios para as suas implementações. A arquitetura WDM será detalhada e o problema de roteamento e atribuição de comprimento de onda (RWA, do inglês *Routing and Wavelength Assignment*) será apresentado. Por fim, a arquitetura EON que, apesar de recente, já é consolidada no meio acadêmico, será apresentada juntamente com o seu problema de roteamento e atribuição de espectro (RSA, do inglês *Routing and Spectrum Assignment*), possíveis soluções e problemas decorrentes quando os recursos são tratados de maneira ineficiente.

### 2.1 INTRODUÇÃO

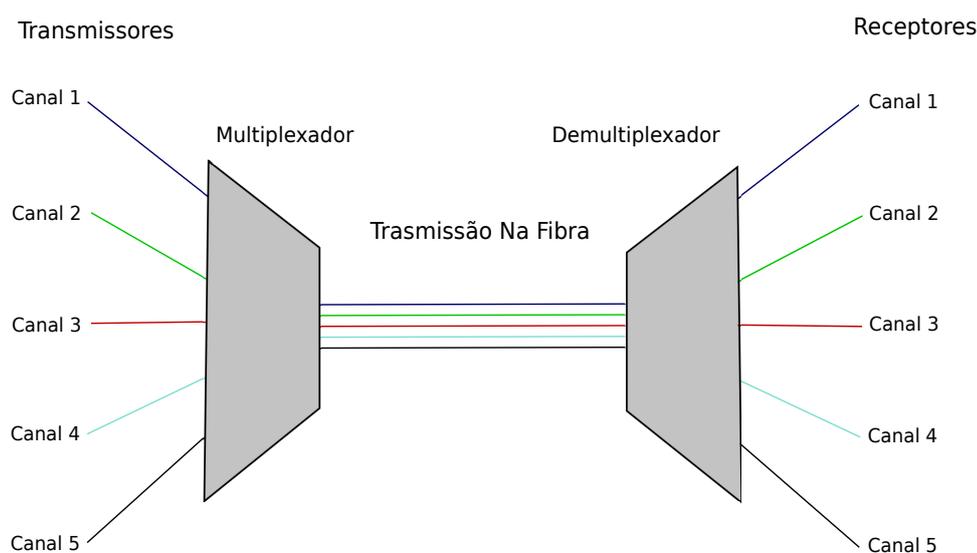
A crescente demanda por tráfego de dados fez com que os cabos metálicos utilizados ficassem obsoletos e as fibras ópticas surgissem como uma alternativa para suprir tal demanda. Quando comparadas aos cabos metálicos, algumas vantagens das fibras ópticas são: maior largura de banda, menor volume e peso, maior flexibilidade e resistência física, além de maior imunidade a ruído e interferência eletromagnética. Deve-se ressaltar que a simples substituição de cabos metálicos por fibras não representa uma rede óptica. Para a correta aplicação do termo "rede óptica", alguma função de gerenciamento da rede deve ser realizada no domínio óptico, como: roteamento, inteligência ou comutação [ALMEIDA, 2001]. Limitações tecnológicas impedem que redes operem completamente no domínio fotônico, portanto componentes eletrônicos são utilizados em conjunto com as fibras, possibilitando assim a implementação das redes ópticas.

Quanto ao tratamento dos dados que trafegam em suas estruturas, as redes ópticas podem ser classificadas em três tipos: transparentes, opacas e translúcidas. As redes transparentes apresentam uma estrutura completamente óptica, ou seja, a conversão para o domínio eletrônico ocorre apenas nos nós das bordas, apresentando assim um comportamento transparente em relação à taxa de bits e ao formato de modulação utilizado para acomodar dada requisição [SALEH; SIMMONS, 2012]. O ponto negativo está na impossibilidade de regeneração dos sinais, pois não há tratamento no domínio eletrônico. As redes opacas convertem os sinais para o domínio eletrônico (representada por  $O - E$ ) em todos os nós da rede. Cada nó deve possuir dois *transponders* para conversão  $O - E$  e a seguir voltar para o óptico [ELLINAS et al., 2004] (representada por  $O - E - O$ ). Após a primeira conversão, há a possibilidade de: regeneração dos sinais, aumento da relação sinal ruído óptico (OSNR, do inglês *Optical Signal-to-Noise Ratio*) e conversão de comprimento de onda. A aplicação de dois *transponders* causa a não transparência da rede, pois caso parâmetros como modulação e taxa de *bits* sejam alterados, os *transponders* devem ser trocados. Isso é apresentado como o ponto negativo da estrutura. As redes translúcidas representam um meio termo entre as redes opacas e transparentes, realizando

a comutação em parte no domínio óptico e parte no domínio eletrônico [RAMAMURTHY et al., ]. Em geral, os nós translúcidos são capazes de regenerar alguns comprimentos de onda, quando o sinal passa para o domínio eletrônico. A aplicação de regeneração para apenas alguns comprimentos de onda reduz o número de *transponders* para esse tipo de estrutura quando comparada com a estrutura opaca, apresentando uma relação custo-desempenho satisfatória.

Apesar do avanço causado pela implementação de fibras ópticas, no início as transmissões eram realizadas apenas ponto-a-ponto. Os dois tipos mais comuns de multiplexação em redes ópticas são TDM (do inglês, *Time Division Multiplexing*) e WDM [SOMANI, 2011]. Na multiplexação TDM, *slots* de tempo são distribuídos e a transmissão de dados é feita na mesma banda de frequência. Na multiplexação por comprimento de onda (WDM), as transmissões são feitas em diferentes bandas de frequência e ao mesmo tempo (Figura 2). A transmissão em várias bandas de frequência ao mesmo tempo proporcionou um aumento na capacidade de transmissão das fibras sem a necessidade de adição de novas fibras aos *links* da rede.

**Figura 2** – Transmissão de canais WDM.



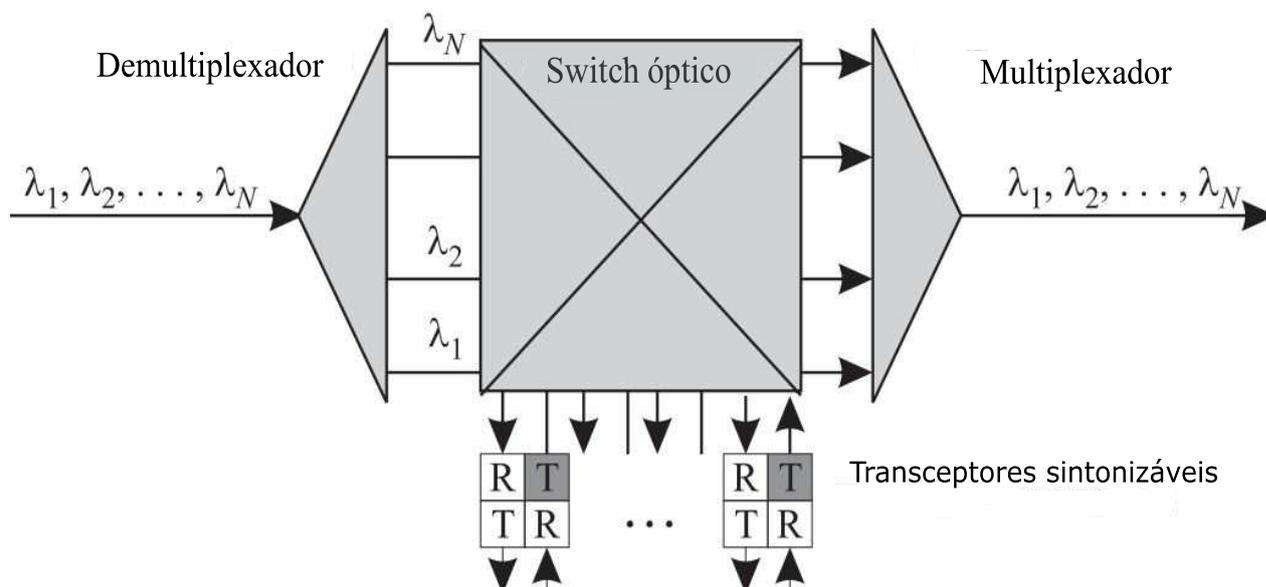
Fonte: o autor.

## 2.2 REDES ÓPTICAS WDM E O PROBLEMA DE RWA

Nas redes WDM, o ROADM (do inglês *Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer*) é o componente responsável por direcionar as demandas. Tais demandas, chegam ao nó por uma fibra de entrada, e são direcionadas para a fibra de saída adequada ao seu caminho óptico (rota e comprimento de onda atribuídos para dada requisição). Este componente representou um grande avanço no tratamento das demandas que passam pela rede, pois passou a permitir que os comprimentos de onda que chegam a um nó possam passar para as fibras de saída sem a realização da conversão do domínio óptico para o eletrônico. Transceptores sintonizáveis retiram e/ou adicionam comprimentos de onda. Na Figura 3, está representado um exemplo de ROADM com estrutura paralela e completamente reconfigurável, onde a letra R representa um receptor de

banda larga. Nesta estrutura, o *switch* óptico permite que qualquer  $\lambda$  de entrada, seja direcionado a qualquer porta de saída.

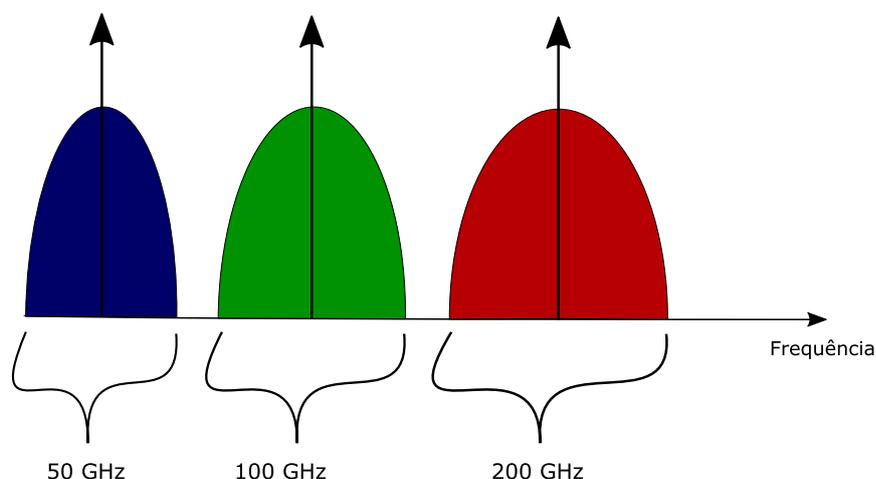
**Figura 3** – Estrutura de um ROADM.



Fonte: Ramaswami *et al* [RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 1998]. Tradução: o autor.

O advento das redes WDM possibilitou um aumento na capacidade dos enlaces das redes ópticas, proporcionando maiores taxas de transmissão. As primeiras implementações de tais redes apresentavam canais com larguras de banda de 50, 100 e 200 GHz, definidas pelo ITU-T (do inglês *International Telecommunication Union*), na Figura 4 está representada a largura de banda dos canais WDM.

**Figura 4** – Largura de banda dos canais WDM.



Fonte: o autor.

Para que as demandas de tráfego sejam atendidas, como dito anteriormente, o problema de RWA deve ser resolvido. Geralmente a escolha do roteamento e a atribuição de comprimento

de onda são resolvidos separadamente.

## 2.3 ROTEAMENTO

A escolha do roteamento pode ser classificada em três tipos: fixo, fixo-alternativo e dinâmico. A seguir serão descritos tais roteamentos.

### 2.3.1 Roteamento fixo

Neste tipo de roteamento, os caminhos são conhecidos antes das chegadas de requisições, portanto uma requisição destinada a determinado par de nós origem-destino sempre adotará a mesma rota [SUBRAMANIAM; BARRY, ]. O algoritmo de roteamento pelo caminho mais curto é um exemplo bastante utilizado. De forma *offline* os custos de cada enlace são atribuídos, e a seguir estes custos são utilizados por algum algoritmo que determinará o menor custo entre os pares de nó, sendo o algoritmo Dijkstra [DIJKSTRA, 1959] comumente utilizado. Por não considerar o estado atual dos enlaces, este tipo de roteamento pode levar a escolhas que proveem baixo desempenho da rede. A falta de uma alternativa à rota principal é um ponto negativo deste tipo de roteamento pois, em caso de sobrecarga em algum enlace da rede, não são permitidos caminhos secundários para a acomodação da requisição.

### 2.3.2 Roteamento fixo-alternativo

No roteamento fixo-alternativo, um conjunto de  $k$  rotas são selecionadas para cada par de nós da rede [ZANG; JUE; MUKHERJEE, 2000]. Este tipo de roteamento é uma alternativa para mitigar a impossibilidade de alocação de conexão em caso de enlaces sobrecarregados. Quando aplicado para esta finalidade, as  $k$  rotas devem ser preferencialmente disjuntas (sem enlaces em comum). Algumas métricas usadas para a escolha das rotas alternativas podem ser: menor quantidades de saltos (*hops*) ou menor distância física entre os nós de destino e origem da requisição. As rotas são ordenadas de acordo com alguma das métricas citadas anteriormente. A requisição que chega ao nó de origem deverá ser tentada na ordem das rotas como apresentadas na lista, se não houver recurso disponível a próxima rota da lista deverá ser tentada. O bloqueio da requisição ocorrerá quando não houver recurso para a alocação em nenhuma das rotas da lista. Este roteamento favorece a redução da probabilidade de bloqueio das requisições, pois existem mais opções para a acomodação da requisição quando comparado com o roteamento fixo. Considerando que todas as rotas são calculadas *offline*, este cálculo não causa impacto no tempo de operação da rede.

### 2.3.3 Roteamento dinâmico

No roteamento, dinâmico (ou adaptativo) os estados dos enlaces da rede devem ser levados em consideração para o cálculo da rota a ser adotada para as requisições que chegam aos pares de nós [ZANG; JUE; MUKHERJEE, 2000]. A quantidade de banda disponível em cada

enlace pode ser uma das métricas para a atribuição dos custos dos enlaces e o cálculo da melhor rota possível para a alocação da banda requisitada. Para a realização deste tipo de roteamento, os nós da rede devem estar em constante comunicação, pois o operador da rede deve conhecer o congestionamento de cada *link* para escolher a melhor rota possível. Por conhecer o estado da rede, o desempenho é comumente melhor quando comparado com os outros tipos de roteamento citados anteriormente. Em contrapartida, o estabelecimento das conexões é mais demorado. Li e Somani [LI; SOMANI, 1999] apresentaram um exemplo de roteamento dinâmico que primeiramente utiliza o roteamento por caminho mais curto e, em caso de empates, o conceito LCP (do inglês *Least Congested Path*), em que o caminho menos congestionado é escolhido, deve ser utilizado para a atribuição da rota.

## 2.4 ALOCAÇÃO DE COMPRIMENTO DE ONDA

O problema de alocação de comprimento de onda para redes WDM é bastante explorado [RANDHAWA; KALER; SINGAL, 2013] [FONSECA et al., 2004]. A seguir o processo e alguns algoritmos de RWA serão abordados. Para a alocação de comprimento de onda ( $\lambda$ ), um  $\lambda$  deve estar disponível em todos os enlaces da rota selecionada, restrição conhecida como continuidade de comprimento de onda. Quando não há conversão de comprimento de onda, o  $\lambda$  deve ser o mesmo em todos os *links*, quando há conversão cada *link* da rota pode assumir diferentes  $\lambda$ 's.

Uma das heurísticas mais simples de ser explicada e explorada é a *Random* (RD). Nesta heurística, os  $\lambda$ 's são escolhidos aleatoriamente, dentre os disponíveis, para cada requisição [RANDHAWA; KALER; SINGAL, 2013].

O algoritmo *First-Fit* (FF) é um dos algoritmos mais comumente aplicado para a resolução do problema de RWA, pois combina bom desempenho com baixa complexidade computacional [RANDHAWA; KALER; SINGAL, 2013]. Após a escolha de uma rota para a requisição, uma ordenação, pré-estabelecida, de  $\lambda$ 's é gerada e o primeiro  $\lambda$  disponível na rota, seguindo a lista pré-estabelecida, será o escolhido para a alocação.

O algoritmo conhecido como *Most-Used* (MU) é outro exemplo de uma heurística desenvolvida para a resolução do problema de RWA. Este algoritmo verifica o  $\lambda$  mais utilizado considerando todos os enlaces da rede e o escolhe como candidato para a tentativa de acomodação da requisição [RANDHAWA; KALER; SINGAL, 2013]. Por dar preferência ao  $\lambda$  mais utilizado, o MU apresenta uma boa capacidade de compactação da carga em alguns  $\lambda$ 's. O conhecimento global dos estados de cada enlace da rede é um dos pontos negativos para a aplicação desta heurística.

Diferentemente do conceito utilizado para o algoritmo MU, a heurística *Least-Used* (LU) procura pelo  $\lambda$  menos utilizado em a toda rede e busca utilizá-lo como primeira opção para a alocação. Este tipo de heurística busca a distribuição da carga entre os  $\lambda$ 's da rede. Embora

a distribuição de carga é geralmente uma estratégia eficiente em redes de telecomunicações, para a alocação de espectro ela é ineficiente. Isso ocorre devido a necessidade de continuidade do espectro. A distribuição de carga nos  $\lambda$ 's quebra a continuidade de  $\lambda$  nos caminhos que necessitam de muitos *hops*, praticamente apenas atendendo aos caminhos que precisam de poucos *hops* [RANDHAWA; KALER; SINGAL, 2013]. Sua performance é pior que a do algoritmo *Random*, por isso esta heurística não é utilizada na prática.

Alguns trabalhos procuram analisar o efeito da ordem de alocação dos *slots* na camada física. Para as redes WDM, em que todas as conexões possuem a mesma largura de banda (um comprimento de onda), se apenas a camada de rede for explorada, alterar a ordem do FF é irrelevante. Contudo, Iguatemi et al. [FONSECA et al., 2004] mostraram pela primeira vez que uma ordenação diferente do FF pode levar à redução da probabilidade de bloqueio de requisições se o efeito não linear da mistura de quatro ondas (FWM, do inglês *Four Wave Mixing*) for levado em consideração.

## 2.5 TIPOS DE TRÁFEGO

Quanto à chegada de requisições, o tráfego pode ser classificado em dois principais tipos: estático e dinâmico. No tráfego estático, as requisições são conhecidas anteriormente e os algoritmos têm por objetivo reduzir a quantidade de recursos necessários para atender a demanda ou aumentar a quantidade de tráfego atendido para uma determinada quantidade de recurso. Para as redes WDM, o objetivo é aumentar a quantidade de conexões atendidas, mantendo-se o número de comprimentos de onda utilizados [CHEN; BANERJEE, 1995]. Os caminhos ópticos estabelecidos são denominados permanentes, pois as conexões podem durar meses ou até anos.

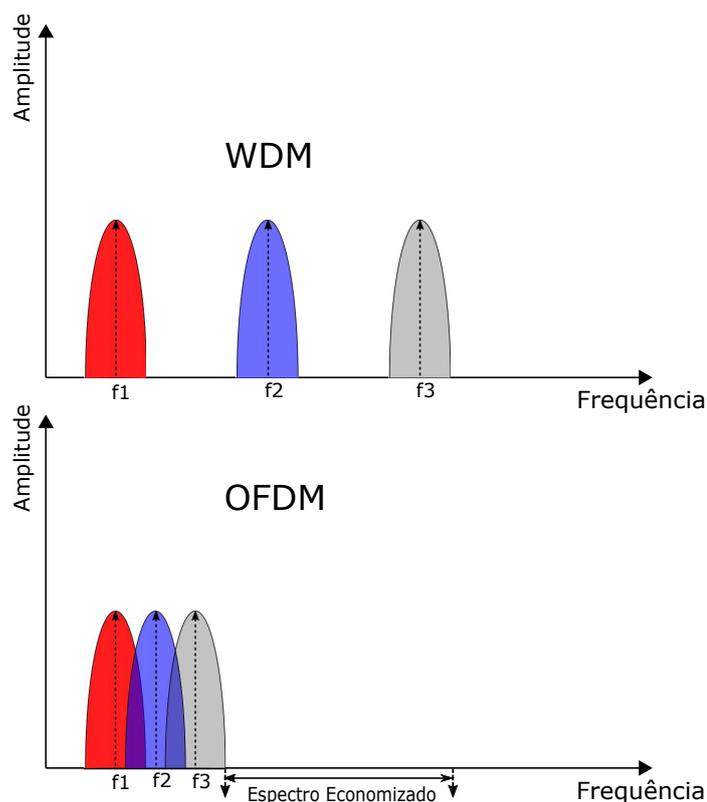
No tráfego dinâmico, as requisições chegam à rede de maneira aleatória e após determinado tempo de permanência são desativadas. Diferentemente do tráfego estático, as conexões têm curta duração. A resolução do problema de RWA para este tipo de tráfego visa a redução do número de requisições bloqueadas.

Apesar do grande avanço no aumento das taxas de transmissão das redes WDM, serviços como *streaming* de vídeo e televisão sobre IP (IPTV, do inglês *Internet Protocol Television*), provocaram aumento significativo nas demandas por recursos nas redes ópticas. A baixa granularidade causada pela grade fixa das redes WDM, geralmente 50 GHz, representa uma grande limitação no atendimento às demandas que necessitam de diferentes tamanhos de bandas de frequência. Para atender às demandas cada vez mais heterogêneas, foram desenvolvidas as Redes Ópticas Elásticas, que propiciam uma grade mais flexível e um melhor aproveitamento da banda disponível.

## 2.6 REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS

A arquitetura EON, também chamada de *Flexgrid* ou SLICE (do inglês *Spectrum-sliced Elastic Optical Path Network*) e proposta por Jinno et al. [JINNO et al., 2009], surge como alternativa para o estabelecimento de caminhos ópticos com demandas heterogêneas e para taxas de transmissão maiores que 400Gb/s, que não são supridas pelas redes WDM. Para que a implementação de tais redes seja possível, um novo tipo de transceptor deve ser utilizado em cada nó da rede, conhecidos como transceptores de largura de banda variável (BVTs, do inglês *Bandwidth Variable Transceivers*), possibilitam a implementação de caminhos ópticos com diferentes taxas de transmissão [GERSTEL et al., 2012] (diferentes formatos de modulação). Outra importante característica para o desenvolvimento das redes EON é a técnica de multiplexação OFDM (do inglês *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*), que, diferentemente da técnica WDM, não necessita de separação entre portadoras, pois aplica o conceito de ortogonalidade para utilizar sub-portadoras que se sobrepõem e aumentar as taxas de transmissão [ZHANG et al., 2013]. As subportadoras que formam a estrutura das redes EON podem ter uma alocação e atribuição de largura que varia de 12.5 GHz a 100 GHz [GERSTEL et al., 2012], essa flexibilidade no tamanho da banda, quando comparada com a arquitetura WDM, proporciona maior flexibilidade das taxas de transmissão para os clientes. A escolha dinâmica dos formatos de modulação dependendo da demanda de transmissão e a desativação de subportadoras, possibilitam um maior controle do consumo de energia nas redes OFDM. A não necessidade de banda de guarda entre portadoras proporciona uma melhor eficiência no uso do espectro disponível, na Figura 5 pode-se observar a economia de banda proporcionada pela técnica OFDM.

Outro importante avanço para o desenvolvimento das redes EON, foi a proposta de canais conhecidos como NYQUIST-WDM (N-WDM). Este conceito molda espectralmente as subportadoras de modo que ocupem uma pequena largura de banda [BOSCO et al., 2011], bem próxima ao limite de NYQUIST para a transmissão livre de interferência entre símbolos. Estas subportadoras estreitas, podem ser multiplexadas com espaçamento igual ou muito próximo ao *baud rate* (taxa de transmissão de símbolos), com a interferência limitada entre subportadoras. A eficiência deste tipo de canal, possibilitou a multiplexação de diversas subportadoras, eficientemente, formando supercanais capazes de suportar altas taxas de transmissão. Desde os trabalhos iniciais [BOSCO et al., 2011] até os dias atuais, N-WDM tem mostrado-se como uma alternativa viável e robusta para o aumento da capacidade de transmissão. Ainda em busca do aumento da capacidade de transmissão para as subportadoras, a tecnologia de multiplexação, super-Nyquist (SN-WDM), possibilita uma taxa de transmissão que pode chegar a 440Gb/s por subportadora. Tal sistema de multiplexação permite o cruzamento das subportadoras, o que possibilita uma maior eficiência espectral. Zhang et al. [ZHANG et al., 2014] demonstraram experimentalmente a transmissão em longa distância (3600km) de 20 canais SN-WDM com largura de banda de 100 GHz, com capacidade de transmissão de 440Gb/s para cada canal.

**Figura 5** – Espectro WDM e OFDM.

Fonte: Zhang *et al* [ZHANG et al., 2013]. Tradução: o autor.

Na arquitetura EON, é possível a utilização de diversos formatos de modulação. Para a escolha de um determinado formato, deve-se analisar a distância entre os pares de origem-destino e a taxa de transmissão demandada pela requisição. Os formatos mais utilizados são: BPSK (do inglês *Binary Phase-Shift Keying*), QPSK (do inglês *Quadrature Phase-Shift Keying*), QAM (do inglês *Quadrature Amplitude Modulation*). Cada formato de modulação proporciona uma diferente taxa de transmissão (Gb/s), que depende da sua quantidade de *bits* por símbolo transmitido e da respectiva constelação. O número máximo de *bits* transmitidos por símbolo é dado por  $\log_2(M)$ , onde  $M$  representa o número de símbolos da constelação [ESSIAMBRE et al., 2010]. Quão mais espectralmente eficiente o formato de modulação, menor a distância que pode ser percorrida sem a necessidade de regeneração do sinal. O formato 64-QAM, por exemplo, consegue uma taxa de transmissão de 75Gb/s para uma largura de banda com 12.5 GHz, mas apenas alcança 125 km, segundo [LÓPEZ et al., 2012]. A Tabela 1 apresenta informações sobre alguns formatos de modulação, taxa de transmissão da subportadora após a aplicação do formato de modulação e alcance.

Para a implementação da arquitetura EON, um novo tipo de ROADM teve que ser criado. O BV-ROADM (do inglês *Bandwidth Variable-ROADM*) é capaz de se adaptar as várias taxas de transmissão geradas pelos diversos formatos de modulação das redes EON e direcionar a demanda para a porta de saída de acordo com o seu caminho óptico. A flexibilidade proporcionada pelas EON possibilitou a geração de super-canais, que são conjunto de subportadoras adjacentes, para

**Tabela 1** – Formatos de modulação, taxa de transmissão por subportadora e alcance.

Formato de Modulação	Taxa de transmissão por subportadora de 12.5 GHz(Gb/s)	Alcance(km)
BPSK	12.5	4000
QPSK	25	2000
8-QAM	37.5	1000
16-QAM	50	500
32-QAM	62.5	250
64-QAM	75	125

Fonte: López *et al* [LÓPEZ et al., 2012]. Tradução: o autor.

atender demandas que necessitem mais de 12.5 GHz (um *slot*) para serem acomodadas.

### 2.6.1 Roteamento e atribuição de espectro

Nas redes EON, o problema de acomodação das demandas que chegam à rede é conhecido como roteamento e alocação de espectro (RSA, do inglês *Routing and Spectrum Allocation*) e apresenta a mesma restrição de continuidade presente no problema de RWA, mas, com a flexibilidade de tamanhos de banda diferentes para as diversas demandas, surge a restrição de contiguidade, que impõe a adjacência das subportadoras. Os tipos de roteamento citados nas Subseções 2.3.1,2.3.2,2.3.3 também são válidos para as redes EON. Portanto, para uma requisição ser acomodada na rede, deve-se escolher:

1. Uma rota entre os nós origem e destino;
2. Um conjunto de *slots* que estejam disponíveis em todos os enlaces da rota (continuidade);
3. Os *slots* deste conjunto devem ser adjacentes (contiguidade).

Com a finalidade de tornar mais clara a compreensão, um exemplo do problema de RSA será mostrado. Considere uma rede na qual após as demandas serem moduladas, as requisições necessitem de  $s = 1$ ,  $s = 2$  ou  $s = 3$  *slots*. Na Figura 6, está representada uma rede com três nós ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ) e a respectiva ocupação dos *slots* de cada enlace entre nós. Supondo uma requisição de  $s = 1$  *slot* com caminho óptico de  $a$  a  $c$ , verifica-se que o único índice que satisfaz as condições de continuidade e contiguidade é o 2. Pode-se perceber também que, para as requisições de  $s = 2$  e  $s = 3$  *slots*, nenhum índice consegue satisfazer as condições de continuidade e contiguidade para que essas requisições sejam acomodadas.

Uma das formas de se resolver o problema de RSA é através da técnica de programação linear inteira (ILP, do inglês *Integer Linear Programming*) [CHRISTODOULOPOULOS; TOMKOS; VARVARIGOS, 2011]. O problema de RSA é dito NP (do inglês *Non-deterministic Polynomial time*)-completo, tal característica implica que o tempo para a resolução do problema aumenta exponencialmente à medida que são incluídas mais variáveis. Diante deste fato, a aplicação da técnica de ILP para redes com grandes quantidades de nós e enlaces torna-se computacionalmente complexa e a busca por soluções se torna mais demorada. Outra opção para

**Figura 6** – Exemplo de RSA.



Fonte: Wang *et al* [WANG; MUKHERJEE, 2012]. Tradução: o autor.

a resolução do problema de RSA é através de técnicas heurísticas e meta-heurísticas, que encontram soluções próximas à ótima e em tempo computacionalmente viável [WALDMAN; FILHO, 2013]. A seguir serão listados alguns trabalhos que propuseram soluções para o problema de RSA.

Para o caso de tráfego dinâmico, Santos et al. [SANTOS et al., 2013], propuseram uma adaptação da heurística chamada BSR (do inglês *Best Among The Shortest Routes*) para as redes EON. Nesta heurística, busca-se uma redução da probabilidade de bloqueio de requisições através do estudo da melhor opção de rota mais curta entre pares de nós durante a operação da rede. A heurística busca o equilíbrio da carga na rede e os resultados mostram a melhoria do desempenho da proposta quando compara com o roteamento baseado apenas no algoritmo Dijkstra.

Algumas heurísticas como *Random* e *FF* foram adaptadas do problema de RWA para o RSA. Na heurística *Random* conjuntos de *slots* são escolhidos aleatoriamente, enquanto que na heurística *FF* uma lista de alocação é gerada e os conjuntos de *slots* são escolhidos de acordo com a ordem da lista. Em adição às heurísticas citadas, Chatterjee e Oki [CHATTERJEE; OKI, 2015] avaliaram o desempenho das heurísticas *first-last fit* e *exact fit*. O algoritmo *first-last fit* divide o espectro de todos os enlaces em áreas e o modo como se procura os *slots* para a alocação dependerá do índice da área. Na heurística *exact fit* sempre se tenta alocar as requisições em blocos que tenham exatamente o mesmo tamanho da conexão. Usando como métrica de avaliação a probabilidade de bloqueio de requisições, o *first-last fit* apresenta os melhores resultados.

Waldman et al. [WALDMAN; FILHO, 2013] propuseram a heurística MSCL, para a

alocação das demandas de modo a considerar o efeito das alocações em rotas que tenham ao menos um *link* em comum à rota em que a requisição será alocada. Quando comparado ao FF, o MSCL apresenta melhores resultados de probabilidade de bloqueio de requisições.

Requisições de tamanhos diferentes levam a um problema conhecido como fragmentação espectral [CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015], que causa a degradação do desempenho da rede. Após determinado tempo de permanência, as requisições são desativadas e conjuntos de *slots* antes indisponíveis passam a ser opções de alocações válidas. Portanto, quando as demandas são acomodadas de maneira ineficiente, alguns espaços surgem nos enlaces e determinados tamanhos de requisições não podem ser alocadas nestes espaços, conforme mostra a Figura 6. Alguns trabalhos já exploraram a redução da fragmentação espectral buscando melhoria no desempenho da rede através da redução da probabilidade de bloqueio de requisições [CHATTERJEE; OKI, 2015][STIAKOGIANNAKIS et al., 2014][CHEN; ZHONG; JUKAN, 2013].

Todas as propostas deste trabalho estão no campo de alocação de espectro em redes EON, com roteamento fixo e tráfego dinâmico para as chegadas de requisições.

### 3 MULTIPLEXAÇÃO POR DIVISÃO ESPACIAL

Este capítulo tem por objetivo apresentar características e enumerar as alternativas mais utilizadas para o aumento de capacidade das fibras ópticas com o auxílio da tecnologia SDM. Serão apresentadas: estruturas, formas de comutação, constituições de supercanais, assim como soluções propostas para a alocação de recursos, em redes SDM.

#### 3.1 ESTRUTURAS SDM

Apesar da grande melhoria do uso de banda com o advento das EONs, o tráfego continua aumentando e outras maneiras de aumentar a capacidade das fibras vêm sendo estudadas. Nesse contexto, a multiplexação por divisão espacial (SDM, do inglês *Space Division Multiplexing*) [WINZER, 2014] ganha cada vez mais espaço com o conceito de co-propagação em modos espaciais e núcleos [RICHARDSON; FINI; NELSON, 2013]. Esse tipo de multiplexação opera com fibras projetadas adequadamente nas quais os modos são guiados por múltiplos núcleos em uma única fibra ou por apenas um núcleo de uma maior dimensão com índice de refração modificado [MORIOKA et al., 2012]. O conceito de SDM se baseia na adição de canais espaciais através da exploração de certas características ou combinações de estruturas de fibras. Abaixo são descritas algumas alternativas para a aplicação de SDM.

- Agrupamento de Fibras Mono-Modo (SMFB, do inglês *Single-Mode Fiber Bundle*): uma das primeiras tentativas de se desenvolver o conceito de SDM, foi através de dispor de um conjunto de fibras mono-modo (SMF), podendo variar de dezenas a centenas de fibras dispostas paralelamente. O diâmetro desses conjuntos variam de 10 à 27 mm e entregam centenas de *links* paralelos, o que torna este tipo de estrutura espacialmente menos eficiente. Conjuntos de fibras já são aplicados na estrutura óptica existente há alguns anos [SARIDIS et al., 2015].
- Fibra Multi-Núcleo (MCF, do inglês *Multi-Core Fiber*): este tipo de estrutura tem se mostrado uma das maneiras mais eficientes e populares de se desenvolver SDM [HAYASHI et al., 2011], com a primeira produção desse tipo de fibra realizada em 1979 [RICHARDSON; FINI; NELSON, 2013]. Existem duas maneiras diferentes de se projetar os núcleos deste tipo de estrutura: com ou sem acoplamento. A grande diferença está na interferência entre núcleos (do inglês *Crosstalk*) da estrutura com acoplamento. Tal característica gera a necessidade de processadores digitais de sinais com múltiplas entradas e saídas (MIMO-DSP do inglês *Multiple Input Multiple Output-Digital Signal Processor*) para o receptor do sinal. Os núcleos das fibras MCF podem ser organizados de diversas maneiras diferentes, mas uma das mais utilizadas disposições para experimentos são sete núcleos dispostos hexagonalmente [TAKENAGA et al., 2011], como mostrado na Figura 7. O funcionamento da transmissão com e sem acoplamento será mais detalhado na próxima seção.

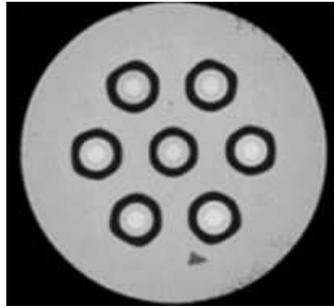
As fibras MCF representam um grande passo no aumento da capacidade das redes ópticas, podendo chegar a transmissões da ordem de Pbps. A multiplexação espacial possibilita o surgimento de supercanais espaciais, que são canais na mesma frequência com disposições espaciais diferentes (em núcleos diferentes para o caso de MCF) e roteados em conjunto [SIRACUSA et al., 2015].

Outro importante ponto é o tratamento de *Crosstalk* entre núcleos, que é o quanto de potência óptica sai de um núcleo e interfere em outro adjacente. Alguns estudos já analisaram o efeito do *Crosstalk* no desempenho da rede [TAKENAGA et al., 2011] [PROIETTI et al., 2015] [TODE; HIROTA, 2016]. Ye et al. [YE et al., 2015], demonstraram que o *Crosstalk* depende levemente da frequência do sinal e Hayashi et al. [HAYASHI et al., 2011] comprovaram que o *Crosstalk* se intensifica com a distância da transmissão. Algumas características como curvatura da fibra, espaçamento dos núcleos e diferentes índices de refração dos núcleos [HAYASHI et al., 2011] podem ser manipuladas de modo a mitigar o efeito do *Crosstalk*.

- Fibra Multi-Modo (MMF, do inglês *Multi-Mode Fiber*): é o tipo de estrutura que utiliza a multiplexação por modos. Fibras multi-modos são fibras construídas com a capacidade de transmitir múltiplos sinais de luz/modos ao mesmo tempo, em que cada modo apresenta uma leve diferença no ângulo de reflexão dentro do núcleo no qual os modos são transmitidos. Na Figura 8, estão representados os padrões de alguns modos LP (do inglês, *Linearly Polarized*) utilizados para a transmissão em fibras multi-modo [PHOTONICS, 2017a]. O fenômeno de dispersão entre modos limita o desempenho e o alcance deste tipo, tornando-a não indicada para transmissões em longas distâncias [PHOTONICS, 2017b]. A dispersão modal de diversos canais propagando paralelamente, juntamente com o considerável atraso de grupo de modo diferencial (DMGD do inglês, *Differential Mode Group Delay*) tornam transmissões de longa distância impossíveis. Para possibilitar transmissões em maiores distâncias, foi desenvolvida uma fibra para permitir a propagação de menos modos LP, FMF (do inglês *Few-Mode Fiber*) [BIGOT-ASTRUC; BOIVIN; SILLARD, 2012], e assim diminuir a quantidade de MIMO-DSP para que os receptores sejam capazes de recuperar os sinais [RYF et al., 2012].
- *Few-Mode Multi-Core Fiber* (FM-MCF): este tipo de estrutura busca explorar os melhores aspectos das abordagens MCF e MMF, com os núcleos e modos representando o aumento de capacidade da fibra. A grande diferença deste conceito para o de MMF está na menor quantidade de MIMO-DSP necessária para que o receptor seja capaz de reconstruir o sinal. Sakaguchi et al. [SAKAGUCHI et al., 2015], desenvolveram uma estrutura com 108 canais espaciais, dividida em 36 núcleos e 3 modos e Igarashi et al. [IGARASHI et al., 2015] transmitiram 114 canais divididos em 19 núcleos e 6 modos a uma distância de 9.8 km. Para exemplificar a redução da quantidade de MIMO-DSP para a estrutura FM-MCF, Saridis et al. [SARIDIS et al., 2015] mostraram o benefício de se utilizar uma estrutura com 2 modos LP e 3 núcleos ao invés de se utilizar 6 modos LP e 1 núcleo. SDM aplicada com

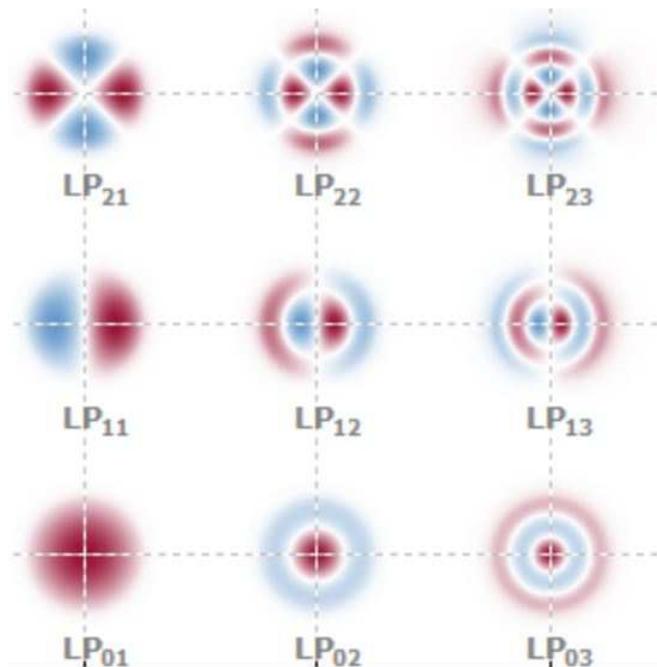
FM-MCF se apresenta como uma alternativa promissora para o aumento da capacidade das redes ópticas, desde que componentes como MUX/DEMUX e amplificadores sejam desenvolvidos em conjunto.

**Figura 7** – MCF com sete núcleos.



Fonte: Saridis *et al* [SARIDIS et al., 2015]. Tradução: o autor.

**Figura 8** – Alguns modos LP para transmissão em fibras multi-modo.



Fonte: RpPhotonics [PHOTONICS, 2017a]. Tradução: o autor.

### 3.2 NÍVEL DE ACOPLAMENTO

Fibras SDM também podem ser categorizadas quanto ao nível de interferência entre os canais espaciais co-propagantes, divididas em: fortemente acopladas e fracamente acopladas/desacopladas.

- O forte acoplamento caracteriza-se pela proximidade dos canais transmitidos, apresenta os sinais transmitidos em modos ou em grupo de modos e se faz necessário o uso de MIMO-DSP no lado do receptor. Para essa característica, encaixam-se as MMF [HUANG

et al., 2016] e as MCF com núcleos projetados muito próximos. Para o acoplamento forte de grupos de modos, a recuperação da informação é feita por MIMO-DSP [ROTTONDI et al., 2017] que atuam em cada grupo de modos e geralmente o acoplamento entre os grupos é considerado nulo ou muito fraco. Nesse tipo de acoplamento ainda estão incluídas as FM-MCF, em que cada núcleo transporta grupo de modos, e FMF, em que cada fibra transporta os grupos.

- Para o desacoplamento ou fraco acoplamento, a informação é transmitida em modos espaciais separados (núcleos), o que possibilita maior flexibilidade da rede, pois os núcleos podem ser roteados separadamente e não há a necessidade de MIMO-DSP no receptor. Esse tipo de acoplamento é característico das MCF e SMFB, pois apresentam uma maior distância entre seus núcleos ou fibras. Para as MCF, a distância entre núcleos pode ser projetada de modo a diminuir o acoplamento e assim evitar a necessidade da utilização de MIMO-DSP do lado receptor. Apesar disso, o *Crosstalk* entre núcleos pode gerar a necessidade de regeneradores de sinal para a melhoria de qualidade da transmissão a partir de determinadas distâncias.

A escolha de fibras fortemente acopladas leva a uma série de decisões que precisam ser tomadas no planejamento e operação da rede, pois os modos podem ser roteados e comutados como uma única entidade, o que gera uma redução na complexidade do comutador [MAROM et al., 2017], ou os grupos de modos podem ser comutados de maneira independente, gerando uma maior flexibilidade.

Em relação ao *Crosstalk* das fibras MCF, um modelo bastante utilizado é considerar que a interferência ocorre entre núcleos que estão fisicamente próximos (adjacentes) e em sinais ópticos que são transmitidos em segmentos espectrais que se sobrepõem [KOSHIBA, 2014].

### 3.3 COMUTAÇÃO SDM

Devido aos diferentes tipos de estruturas possíveis para a implementação das redes ópticas SDM, diversos tipos de comutações dos canais espectrais e espaciais são possíveis. A seguir, serão apresentadas algumas alternativas.

- (a) Comutação independente de modos espaciais e comprimentos de onda (Ind-Sw)/*slots*. Neste tipo de alternativa, todos os *slots* têm plena liberdade para serem comutados em qualquer modo espacial e em qualquer *slot* de saída, exemplificado na Figura 9-a). Este é o tipo de comutação que permite o maior grau de liberdade para a alocação de recursos, mas também necessita de uma maior complexidade de *hardware* [RYF et al., 2015].
- (b) Comutação por modo espacial em todos os comprimentos de onda/*slots* (Mode-Sw). Neste tipo de abordagem, todos os *slots* de determinado modo espacial são comutados ao mesmo tempo para uma dada saída (granularidade espacial), como na Figura 9-b). Esta comutação apresenta uma menor granularidade quando comparada à Ind-Sw, por apresentar uma menor flexibilidade sua implementação não é tão complexa e pode ser aplicada para

estruturas sem acoplamento [SIRACUSA et al., 2015].

- (c) Comutação de comprimentos de onda/*slots* através dos modos espaciais ou comutação conjunta (J-Sw). Os modos espaciais são tratados como uma entidade e os *slots* podem ser comutados livremente, como na Figura 9-c). Devido à característica apresentada, a comutação J-Sw é indicada para a estrutura fortemente acoplada, embora também possa ser aplicada em estrutura sem acoplamento [SIRACUSA et al., 2015].
- (d) Comutação de comprimentos de onda/*slots* através de subgrupos de modos espaciais, também chamada de comutação conjunta fracionária (FrJ-Sw). Nesta comutação, todos os modos espaciais são separados em subgrupos e apenas os *slots* de cada subgrupo podem ser comutados, dentro do próprio subgrupo, como representado na Figura 9-d). Apresentado como um modelo híbrido, possui uma granularidade de comutação menor que o Ind-Sw, mas a implementação é menos complexa [SIRACUSA et al., 2015].

**Figura 9** – Tipos de comutação em SDM, adaptado de



Fonte: Klinkowski *et al* [KLINKOWSKI; LECHOWICZ; WALKOWIAK, 2018]. Tradução: o autor.

Algumas arquiteturas desenvolvidas de forma híbrida permitem que alguns nós da rede realizem determinados tipos de comutação este tipo de arquitetura é denominada Arquitetura por Demanda (AoD, do inglês *Architecture On Demand*). Os nós desta arquitetura são programáveis e sua estrutura interna é reconfigurada de acordo com a necessidade de comutação das requisições que chegam aos nós. Além de proporcionar uma maior flexibilidade de comutação, esta arquitetura possibilita a redução de comutadores ópticos e módulos OXC, gerando uma diminuição da potência necessária para o provisionamento de um conjunto de requisições [MUHAMMAD et al., 2014] [MUHAMMAD; ZERVAS; FORCHHEIMER, 2015].

Shariati et al. [SHARIATI et al., 2016] apresentaram um estudo comparativo entre os tipos de comutação Ind-Sw, J-Sw e FrJ-Sw, avaliando a eficiência espectral em relação à carga da rede, para diferentes resoluções espectrais (banda mínima requisitada pelas requisições). As simulações foram realizadas para a topologia de rede nacional espanhola, com conjuntos de 12 SMF em cada enlace e com uma banda de 4.8 THz por fibra. Para todos os cenários apresentados, ficou demonstrada a melhoria de desempenho da política Ind-Sw quando comparada às políticas FrJ-Sw e J-Sw. Também constatou-se que, quanto maior a granularidade espectral das demandas que chegam à rede, é detectada uma melhoria no desempenho das políticas FrJ-Sw e J-Sw ao ponto de se aproximar bastante dos resultados obtidos para a política Ind-Sw. Portanto uma maior rigidez na política de comutação espacial pode ser compensada com a operação em uma

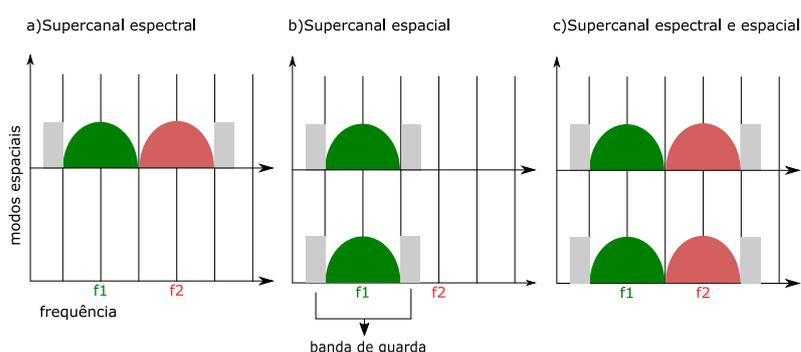
maior granularidade espectral, evitando a complexidade e alto custo da implementação de uma arquitetura com Ind-Sw.

### 3.4 FORMAÇÃO DE SUPERCANAIS SDM

Com a flexibilidade espacial e espectral proporcionada pelas redes SDM, surgem mais possibilidades de geração de supercanais (SC), que neste caso consistem de um conjunto de portadoras distribuídas espacialmente e espectralmente. De acordo com tais flexibilidades disponíveis, os *trponders* para as redes SDM são capazes de gerar três tipos de SC, exemplificados a seguir:

- SC espectrais, caracterizados por canais ópticos adjacentes, assim como nas redes EON, em um único modo espacial. Para uma melhor eficiência espectral, os canais são dispostos próximos à condição de *Nyquist*, possibilitando que a banda de guarda seja alocada apenas para os canais ópticos/*slots* das extremidades do supercanal, exemplificado na Figura 10-a).
- SC espaciais utilizam a mesma frequência de um canal óptico, mas são dispostos em modos espaciais diferentes. A utilização de diferentes canais espaciais causa um desperdício de banda, pois as bandas de guarda serão aplicadas às extremidades do supercanal em todos os modos espaciais, como na na Figura 10-b).
- SC espectrais e espaciais aproveitam canais ópticos adjacentes e modos espaciais para formar o supercanal, como na Figura 10-c). A necessidade de bandas de guarda em cada modo espacial, assim como nos SC espaciais, também gera certa ineficiência espectral.

**Figura 10** – Tipos de supercanais SDM.



Fonte: o autor.

Estes diferentes tipos de SC devem ser acompanhados da adequada tecnologia nos *links* e nós da rede, para que sejam possíveis a comutação, multiplexação e transmissão/recepção das demandas que chegam à rede. Portanto, as políticas de alocação e roteamento para as demandas irão depender dos tipos de comutação e supercanal utilizados no projeto da rede.

Klinkowski et al. [KLINKOWSKI; LECHOWICZ; WALKOWIAK, 2018] mostraram que, estruturas que utilizam o conceito de SC espectrais aproveitam melhor o espectro disponível quando comparadas às estruturas que utilizam os modos espaciais para formar SC, pois a banda

de guarda terá que ser reservada em todos os modos espaciais. Rumipamba et al. [RUMIPAMBA-ZAMBRANO et al., 2016] constataram que, independentemente do tamanho da rede, a redução da banda de guarda de SC espaciais em redes EON-SDM tem uma forte influência na eficiência da utilização espectral. Portanto, o investimento em equipamentos ópticos mais eficientes, que proporcionem uma diminuição na banda de guarda, é um caminho a ser considerado para a evolução das redes SDM. Outra alternativa para a melhoria do desempenho das redes SDM é a adaptação do supercanal espacial/espectral de acordo com seu impacto na eficiência espectral ou no *Crosstalk* de modos espaciais (núcleos) adjacentes [SHI et al., 2016].

### 3.5 ROTEAMENTO E ALOCAÇÃO DE MODOS ESPACIAIS E ESPECTRO

A adição do modo espacial torna a alocação das demandas de requisições que chegam à rede SDM mais complexa quando comparada com o problema de alocação das demandas para as redes EON (RSA). Ao longo desta seção serão apresentadas as restrições para a acomodação de requisições em redes SDM e as possíveis soluções para tal problema.

A nomenclatura para a alocação das requisições em redes SDM pode variar de acordo com o trabalho, mas as siglas mais comuns são:

- Roteamento e Atribuição de Núcleo e Espectro-RSCA (do inglês *Routing, Spectrum And Core Assignment*);
- Roteamento e Atribuição de Espectro, Modo e/ou Núcleo-RSCMA (do inglês *Routing, Spectrum, Core and/or Mode Assignment*);
- Roteamento e Alocação de Modo Espacial e Espectro-RSSA (do inglês *Routing, Spatial Mode and Spectrum Allocation*);
- Roteamento e Alocação de Formato de Modulação, Núcleo e Espectro-RMCSA (do inglês *Routing, Modulation Format, Core and Spectrum Allocation*).

Neste trabalho os efeitos da camada física não são considerados, portanto a multiplexação por modos de propagação não será abordada, todas as propostas são aplicadas para o contexto de RSCA. A seguir, uma rede fictícia e as possíveis alocações para um algoritmo RSCA serão apresentadas.

Assim como na estrutura de redes sem multiplexação espacial, na arquitetura SDM para a acomodação de demandas existem as restrições de continuidade e contiguidade. Além disso, há a restrição do modo espacial, tal que cada requisição deve ser alocada em um ou mais modos espaciais. O problema de RSCA também é dito NP-completo, pois, no extremo de utilização de apenas um modo espacial, o problema se reduz ao RSA. As etapas de roteamento e atribuição de modo espacial e espectro são geralmente resolvidas separadamente, tornando a resolução do problema de RSCA menos complexa.

Para exemplificar o processo de RSCA, na Figura 11 está representada uma rede com três nós, dois *links*, dois núcleos e dez *slots* por núcleo. Nesta rede as demandas  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$ ,

$d_4$  e  $d_5$  estão acomodadas com 3, 2, 4, 2 e 3 *slots*, respectivamente. Ainda na Figura 11, estão representados os vetores de disponibilidade do conjunto de *slots* de cada núcleo em cada *link*. Supondo que uma demanda chegue à rede e tenha como caminho óptico os nós 1-2-3 e, após a escolha do formato de modulação, a demanda necessite de 3 *slots* para ser acomodada. Pode-se observar dois cenários diferentes, a depender da possibilidade de realizar troca de núcleo ou não. Caso seja possível a comutação de núcleos nos nós da rede, existem quatro possibilidades de alocação:

1. *Link* 1-Núcleo 1-*Slots* 7, 8 e 9 e *Link* 2-Núcleo 1-*Slots* 7, 8 e 9;
2. *Link* 1-Núcleo 1-*Slots* 7, 8 e 9 e *Link* 2-Núcleo 2-*Slots* 0, 1 e 2;
3. *Link* 1-Núcleo 2-*Slots* 0, 1 e 2 e *Link* 2-Núcleo 1-*Slots* 7, 8 e 9;
4. *Link* 1-Núcleo 2-*Slots* 0, 1 e 2 e *Link* 2-Núcleo 2-*Slots* 0, 1 e 2;

Caso a arquitetura de comutação da rede não permita a troca de núcleos nos nós da rede, existem duas possibilidades de alocação:

1. *Link* 1-Núcleo 1-*Slots* 7, 8 e 9 e *Link* 2-Núcleo 1-*Slots* 7, 8 e 9;
2. *Link* 1-Núcleo 2-*Slots* 0, 1 e 2 e *Link* 2-Núcleo 2-*Slots* 0, 1 e 2;

Um algoritmo de SA deve escolher uma dessas possibilidades de acordo com algum critério, conforme discutido na Seção 2.6.1.

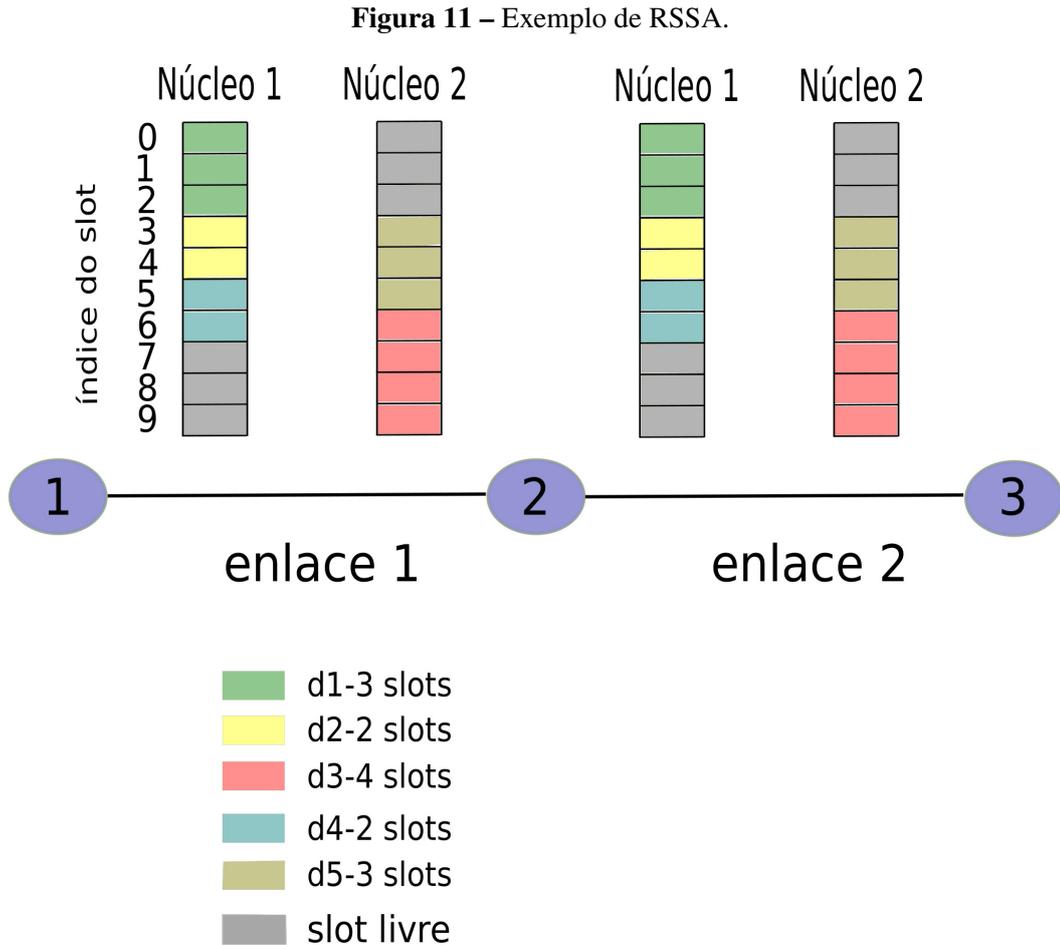
### 3.5.1 Modelos ILP

Uma das ferramentas utilizadas para a resolução do problema de RSCA são os modelos ILP, que são mais custosos computacionalmente quando comparados aos modelos ILP desenvolvidos para as redes SMF, pois a variável espacial é adicionada ao modelo. Os modelos ILP encontram a solução ótima para o problema proposto. Em relação ao roteamento, a modelagem ILP pode ser classificada em duas diferentes abordagens [KLINKOWSKI; LECHOWICZ; WALKOWIAK, 2018]:

- Roteamento por *link*-caminho [PIÓRO; MEDHI, 2004]: para cada par de nó da demanda, um conjunto de caminhos entre o par de nó é pre-computado e no processo de otimização um dos caminhos é selecionado;
- Roteamento por nó-*link* [PIÓRO; MEDHI, 2004]: utiliza o conceito da lei de conservação do fluxo, que é representado no modelo ILP por um conjunto de restrições que buscam preservar o fluxo em cada nó da rede.

Quanto à alocação de espectro, duas abordagens são usadas:

- Alocação baseada em canal: canal é definido como um conjunto de *slots* contíguos capaz de atender determinada demanda e pré-calculado. O modelo ILP usa como variáveis a utilização ou não de determinado canal para determinada demanda.
- Alocação baseada em *slot*: esta abordagem seleciona o *slot* inicial que atenderá a demanda e evita colisões com demandas que disputem o mesmo recurso.



Fonte: o autor.

Klinkowski et al. [KLINKOWSKI; LECHOWICZ; WALKOWIAK, 2018] exemplificaram os seguintes cenários: roteamento *link*-caminho baseado em canal, roteamento *link*-caminho baseado em *slot* e roteamento nó-*link* baseado em canal. É constatado que o roteamento por *link*-caminho é mais flexível em relação ao número de caminhos candidatos para a requisição, enquanto que o roteamento por nó-*link* sempre utiliza todos os caminhos possíveis para a acomodação da requisição, que o tornando mais complexo computacionalmente.

Walkowiak et al. [WALKOWIAK et al., 2016] propuseram e compararam três modelos ILP baseados na alocação em canal, para o tráfego estático. Os três tipos de cenários analisados variam as formas como SC podem ser construídos, que são as seguintes:

- Total flexibilidade: SC espectrais e espaciais que podem ser alocados em qualquer lugar do espectro disponível;
- Pouca flexibilidade: SC espectrais e espaciais são formados de modo que nenhum dos *slot* que os compoñham se sobreponha a de outro supercanal;
- Sem flexibilidade: SC espectrais.

Como esperado, o cenário com total flexibilidade apresenta um maior número de opções para

a alocação das demandas, portanto um maior número de variáveis, restrições e complexidade computacional quando comparado aos outros cenários mencionados. De uma maneira geral, constata-se que a formulação ILP para a resolução do problema de RSSA deve ser proposta para redes com poucos *links* e *slots*, conseqüentemente gerando menos variáveis e restrições ao modelo.

### 3.5.2 Métodos heurísticos e meta-heurísticos

Como apontado na subseção 3.5.1, o aumento da quantidade de *slots* devido à adição dos modos espaciais torna a abordagem ILP muito complexa e dispendiosa para a resolução do problema de RSCA. Os métodos heurísticos e meta-heurísticos surgem como uma alternativa para a resolução do problema de RSCA em tempo computacionalmente viável e com soluções próximas à ótima.

Algumas heurísticas utilizam matrizes para representar a ocupação dos diversos *slots* nos diversos núcleos de cada *link* da rede SDM, com valores binários representando a ocupação ou não de cada *slot*. Moura et al. [MOURA; Da Fonseca, 2016] utilizaram este conceito de matriz e, a partir de determinado caminho óptico, a matriz de ocupação é calculada e um algoritmo de processamento de imagem chamado CCL (do inglês, *Connected Component Labelling*) é aplicado. O CCL encontra regiões de matriz em que a demanda pode ser alocada e a seguir um algoritmo de alocação é aplicado apenas nestas regiões, diminuindo assim a complexidade e o tempo computacional do processo de alocação. Os mesmos autores aplicaram o método do retângulo inscrito, método de processamento de imagem que encontra retângulos de *pixels* conectados (i.e, *pixels* vizinhos com o mesmo valor), na matriz de ocupação [MOURA; Da Fonseca, 2017]. Aplicando políticas de alocação nos diversos retângulos encontrados, consegue-se a redução de alguns problemas como *crosstalk* e fragmentação espectral.

Tode et al. [TODE; HIROTA, 2016] aplicaram uma heurística para a separação de áreas em redes MCF, em cada núcleo de cada *link* da rede, para diferentes tamanhos de requisições, comprovando que tal procedimento diminui a fragmentação espectral dos *links* e resulta em uma melhoria na probabilidade de bloqueio das requisições. No mesmo trabalho os autores analisam o impacto da ordem de tentativa de alocação em relação ao Núcleo (C), ao Modo (M) e à Frequência (F) em redes FM-MCF. As políticas de alocação adotadas referem-se à prioridade na busca de recursos para a acomodação da demanda, e.g, a política FMC primeiro seleciona um *slot* de frequência, a seguir um modo e por último um núcleo. Após simulações, a política denominada CMF apresentou o melhor resultado em relação à probabilidade de bloqueio de requisições. Deve-se observar que os resultados podem variar para diferentes cenários de redes SDM, assim como para diferentes padrões de tráfego e modelos de camada física [KLINKOWSKI; LECHOWICZ; WALKOWIAK, 2018].

Siracusa et al. [SIRACUSA et al., 2015] compararam quatro heurísticas de RSSA tendo a probabilidade de bloqueio de requisições como métrica. As heurísticas foram as seguintes:

- *Spectrum-First* (SpeF), as demandas são acomodadas sempre procurando um conjunto de *slots* contíguos em um único modo espacial;
- *Space-First* (Spaf), as demandas são acomodadas sempre procurando o maior número de modos espaciais possíveis;
- *Degenerate-Space-First* (DSpaF), demandas acomodadas, em um caminho óptico em determinado modo espacial, não permitem que outras demandas utilizem o mesmo conjunto de *slots* nos *links* da demanda já acomodada. Este tipo de heurística é geralmente aplicada para estruturas FMF;
- *Align-Strict* (AS), separa o recurso disponível, em cada modo espacial, em áreas destinadas às diferentes classes de demandas.

O estudo analisa os custos envolvidos na aplicação das heurísticas citadas, pois a utilização de SC espectrais resulta no aumento do uso de *lasers* para a modulação das subportadoras ópticas. Conclui-se que heurísticas orientadas por modos espaciais (SpaF) são mais econômicas em relação à quantidade de *lasers* utilizados, mas apresentam os piores resultados em relação à probabilidade de bloqueio de requisições. Heurísticas baseadas na alocação de espectro (SpeF), apresentam baixa probabilidade de bloqueio ao custo da utilização de mais *lasers*. A heurística AS apresentou o melhor balanço entre custo e desempenho, aproximando-se na utilização de *lasers* da heurística SpaF e com probabilidade de bloqueio próxima à SpeF.

O algoritmo *First-Fit* é uma heurística bastante explorada nas redes WDM e EON. Isso decorre principalmente da sua simplicidade de implementação, baixo esforço computacional demandado na busca dos recursos espectrais livres e bons resultados devido à sua característica de compactação das requisições em determinada faixa do espectro, o que deixa capacidade livre fima-fim na rede para o atendimento de futuras requisições. Dado o aumento de possibilidades para a formação de SC nas redes SDM, vários tipos de heurística *First-Fit* podem ser desenvolvidas. Para o escopo deste trabalho será considerada apenas a formação de SC espectrais, portanto pode-se observar duas possibilidades de heurística *First-Fit*. *First-Fit-Core* (FFC), quando a busca por recursos começa no núcleo (modo espacial) de menor índice e, dentro do núcleo, o primeiro conjunto de *slots* disponível. *First-Fit-Slot* (FFS), quando a busca por recursos tenta o conjunto de *slots* com o menor índice dentro de um núcleo, e caso não seja possível a alocação, o índice do núcleo será variado.

## 4 UMA PROPOSTA DE PRIORIZAÇÃO DE NÚCLEO POR CLASSE DE REQUISIÇÃO BASEADA EM ALGORITMO GÊNÉTICO

Neste capítulo será explicado o conceito de algoritmo evolutivo, suas características e algumas aplicações já propostas para o contexto de redes ópticas. Também será apresentada uma das propostas deste trabalho, que consiste na utilização do algoritmo genético para a priorização de núcleo por classe de requisição em redes SDM com multi núcleos.

### 4.1 ALGORITMOS EVOLUTIVOS

A palavra heurística é derivada do grego *heuriskien* e significa descobrir. Como já exemplificado no capítulo anterior, os métodos heurísticos são bastante explorados para a resolução de problemas em redes ópticas. O termo meta-heurística significa algo como além da heurística, ou seja, são métodos que geram heurísticas a partir de heurísticas estabelecidas. Nos últimos anos, a classe de meta-heurística baseada em algoritmos bio-inspirados vem sendo bastante explorada, sendo aplicada para a solução de problemas em várias áreas. Técnicas como redes neurais artificiais, algoritmos evolucionários e inteligência de enxame vêm sendo aplicadas nas resoluções de problemas complexos. Os algoritmos bio-inspirados baseiam-se no comportamento de determinados animais, e em certos processos e modelos de fenômenos biológicos [DECASTRO et al., 2004].

Um dos primeiros algoritmos bio-inspirados foi desenvolvido em 1943 buscando modelar matematicamente o funcionamento das redes neurais [MCCULLOCH; PITTS, 1990]. Após alguns anos, Rosenblatt [ROSENBLATT, 1957] propôs uma rede neural com apenas uma camada, que tinha como base o modelo de neurônio apresentado por Mcculloch et al. [MCCULLOCH; PITTS, 1990], e foi demonstrado que, se os neurônios fossem ligados com conexões (sinapses) ajustáveis, a rede neural seria capaz de ser treinada para identificar padrões em classes linearmente separáveis. Desde então, diversos avanços na área levaram até o aprendizado de máquina (do inglês *Machine Learning*), que é um ramo da computação que explora algoritmos que podem aprender com seus erros e fazer previsões sobre dados. Devido a sua flexibilidade, o aprendizado de máquina se apresenta como ferramenta para a solução de problemas como: reconhecimento óptico de caractere (OCR), motores de busca, diagnósticos médico, reconhecimento de fala, entre outros.

O processo de otimização por colônia de formigas (ACO, do inglês *Ant Colony Optimization*) é outro exemplo de uma meta-heurística bio-inspirada. O ACO busca o melhor caminho em um grafo ponderado, no qual agentes se movem e, a cada iteração, constroem soluções para o problema a ser otimizado [DORIGO, 2007]. O processo de construção das soluções é estatístico e baseado em um modelo de feromônio, o conjunto de parâmetros é modificado à medida que os agentes se movem no grafo. O sistema imunológico humano serve de base para os

algoritmos AIS (do inglês *Artificial Immune Systems*), que se inspiram no aprendizado e memória utilizados por tal sistema para a solução de problemas computacionais complexos [DECASTRO et al., 2004]. Algumas das áreas de aplicação dos AIS são: aprendizado de máquina, segurança computacional e detecção de falhas.

O comportamento social de grupos de animais serve como base para diversos tipos de algoritmos, dentre estes se destaca o PSO (do inglês *Particle Swarm Optimization*), que aplica o conceito de inteligência de enxame na resolução de problemas. Proposto por Kennedy e Eberhart [KENNEDY; EBERHART, 1995], foi desenvolvido pela observação e simulação do voo dos pássaros. Em determinado ambiente, agentes individuais (partículas) procuram percorrer o espaço em busca da melhor posição (melhor solução para o problema proposto). O PSO trabalha diretamente com os conceitos de competição, já que cada partícula procura a melhor solução individual, e colaboração, pois cada partícula compartilha informações com as outras buscando melhores posições ainda não encontradas [LIRA, 2016]. Clayton [LIRA, 2016] aplicou o PSO em redes EON com o objetivo de otimizar uma heurística proposta anteriormente, e reduzir a probabilidade de bloqueio de requisições para o tráfego dinâmico.

Outra importante classe de meta-heurística bio-inspirada é a dos algoritmos evolutivos, que se inspiram em mecanismos da evolução biológica como: cruzamento, mutação e recombinação. Soluções que são candidatas ao problema de otimização são tratadas como indivíduos de uma população, e uma função de adaptação (do inglês *fitness*) é associada a cada indivíduo e diz qual a boa é a solução. As principais e mais utilizadas técnicas deste tipo de meta-heurística são:

- Programação genética: as soluções são propostas em forma de programas de computadores, e a função *fitness* é determinada pela sua habilidade de resolução de problemas computacionais [GLOVER; KOCHENBERGER, 2003];
- Programação evolutiva: similar à programação genética, mas os programas computacionais são fixos e seus parâmetros evoluem com as iterações [EIBEN; SMITH, 2015];
- Estratégia evolutiva: soluções são apresentadas em forma de vetores de números reais e, para a evolução das soluções [EIBEN; SMITH, 2015], o conceito de auto adaptação de seus parâmetros é aplicado;
- Sistemas classificadores: utilizado para evoluir sistemas a partir de uma regra base que cobre todas as possíveis entradas, e sugerir uma resposta adequada para cada [EIBEN; SMITH, 2015];
- Algoritmo genético (AG): geralmente utilizado em problemas de otimização. Utiliza os conceitos de mutação e cruzamento para a evolução de determinada função objetivo de uma população de indivíduos [EIBEN; SMITH, 2015].

Apesar da variedade de opções de algoritmos evolutivos, o AG se apresenta como o mais popular e será a técnica utilizada neste trabalho. Técnicas que utilizam meta-heurísticas evolutivas para a otimização de problemas em redes de comunicação têm ganhado cada vez mais espaço e diversos trabalhos já foram propostos [DRESSLER et al., 2010] [PEREIRA, 2007] [ALMEIDA et al.,

2013]. Nesta dissertação, o AG será aplicado para redes SDM com arquitetura MCF, utilizando a probabilidade de bloqueio de requisições como a função adaptação a ser otimizada. A seguir, o AG será detalhado.

#### 4.2 APLICAÇÃO DO AG PARA A OBTENÇÃO DE ORDENS DE ATRIBUIÇÃO DE NÚCLEO PARA DIFERENTES CLASSES DE REQUISIÇÕES

Primeiramente proposto por John Holland [HOLLAND, 1992], em 1975, o AG é uma ferramenta utilizada para a otimização de problemas em diversas áreas, tais como: controle, identificação de parâmetros e sistemas, robótica, reconhecimento de padrões, sistemas classificatórios e reconhecimento de voz [MAN; TANG; KWONG, 1996]. A elaboração do AG necessita da determinação inicial de alguns parâmetros, que são: representação cromossômica, população inicial, métodos de cruzamento, seleção e mutação, quantidade de iterações e função objetivo. Os genes de cada indivíduo são mapeados de acordo com as variáveis que representam possíveis soluções ao problema. Com os genes como parâmetros de entrada a função objetivo gera uma saída que representa a aptidão da possível solução. O valor da aptidão representa quão eficiente é o indivíduo e suas chances de prosseguir no processo evolutivo. Neste trabalho, a representação cromossômica inteira será adotada, mas na literatura diversos tipos de representações são possíveis, tais como: binária, terciária e real [MAN; TANG; KWONG, 1996].

A seguir, o tamanho da população inicial deve ser escolhido ( $P_i$ ) e os genes de cada indivíduo devem ser criados aleatoriamente. Após a obtenção da população inicial, a função objetivo será aplicada para cada indivíduo e será gerado um valor de aptidão. Para os próximos passos, um processo de seleção escolhe indivíduos denominados pais e, pelos processos de cruzamento e mutação, seus genes são recombinados para dar origem aos indivíduos denominados filhos. Para cada indivíduo criado, aplica-se a função objetivo e obtém-se o valor de aptidão. Ao final da aplicação dos operadores genéticos (mutação e cruzamento) um procedimento de seleção, baseado no valor de aptidão, deve ser aplicado para escolher os indivíduos que prosseguirão na próxima iteração do processo evolutivo, buscando emular o mecanismo de sobrevivência do mais adaptado presente na natureza [MAN; TANG; KWONG, 1996].

As iterações do processo evolutivo devem seguir até que algum critério de parada seja alcançado. O pré-estabelecimento de um número de iterações pode ser um critério de parada adotado, assim como a determinação de um valor de aptidão a ser alcançado. Outro critério de parada que pode ser adotado é o desvio do valor de aptidão para indivíduos de diferentes gerações [MAN; TANG; KWONG, 1996].

A meta-heurística proposta neste trabalho busca uma melhor ordenação para a escolha dos núcleos no processo de RSCA, diferentemente da ordenação feita pelo algoritmo *First-Fit-Core* (FFC, Seção 3.5.2), em que as diversas classes de requisição são alocadas em núcleos seguindo a mesma ordem. A ideia principal é a de juntar conexões que se casam melhores em alguns núcleos e evitar conexões que não se casam bem de usar os mesmos núcleos, visando à

diminuição da probabilidade de bloqueio de requisições. O AG proposto utiliza a probabilidade de bloqueio das requisições como função a ser minimizada, pois a redução de bloqueios das chamadas representa a melhoria de desempenho da proposta.

O êxito na utilização do AG para a solução de problemas em redes de comunicação [DRESSLER et al., 2010] [PEREIRA, 2007] [ALMEIDA et al., 2013], bem como a formatação do problema proposto que possibilita a criação de indivíduos representados por matrizes de números inteiros, foram pontos que levaram à escolha dessa ferramenta de otimização evolutiva.

O AG é construído da seguinte forma: cada indivíduo é composto por uma matriz tal que o número de linhas indica a quantidade de classes de requisições que podem chegar à rede, representada por  $T$ , e as colunas representam a ordem em que se deve procurar os núcleos para alocar a requisição, representada por  $C$ . Na Figura 12 está representado um exemplo de indivíduo com  $T = 3$  (classes de  $i, j, z$  slots) e  $C = 7$ . Ao se iniciar o algoritmo genético, uma população de  $P_i$  indivíduos é gerada e a função objetivo de cada indivíduo é calculada, e geram-se valores de aptidão que serão associados aos indivíduos. As linhas de cada indivíduo são preenchidas com valores aleatórios, não repetidos e entre 0 e 6. O valor de aptidão é obtido mediante a simulação da rede usando a ordenação dos núcleos definida pelo indivíduo do algoritmo genético. A seguir, é realizado o procedimento de cruzamento dos indivíduos. A seleção dos indivíduos para o cruzamento é feita pelo método da roleta [SHUKLA; PANDEY; MEHROTRA, 2015]. Após o cruzamento, o número de elementos da população será  $2P_i$ . A seguir, um processo de seleção semi elitista é realizado, iniciando pela ordenação da população de acordo com o valor de aptidão de cada elemento. Os melhores  $A$  elementos são selecionados para o seguinte passo, com  $P_i > A > 0$ , e outros  $P - A$  são escolhidos aleatoriamente. Após essa etapa, a população volta a ter  $P_i$  elementos. O valor de  $A$  define quão elitista é o processo de seleção. Caso  $A = P_i$  (seleção elitista) nenhum indivíduo é escolhido aleatoriamente; Caso  $A = 0$ , todos os indivíduos são escolhidos aleatoriamente. O passo seguinte é o da mutação. Tal processo gera  $P_i$  novos indivíduos, formando uma população com  $2P_i$  indivíduos. A seleção semi elitista é aplicada mais uma vez para restaurar a população com  $P_i$  indivíduos. Todo o processo deve ser repetido  $G$  vezes. O fluxograma do AG está representado na Figura 13. Em cada bloco os parâmetros  $P_i$  e  $2P_i$  representam o número de indivíduos da população após o processo. Na Tabela 2, estão especificados os parâmetros utilizados nesta proposta.

**Figura 12** – Exemplo de representação de indivíduo no AG proposto.

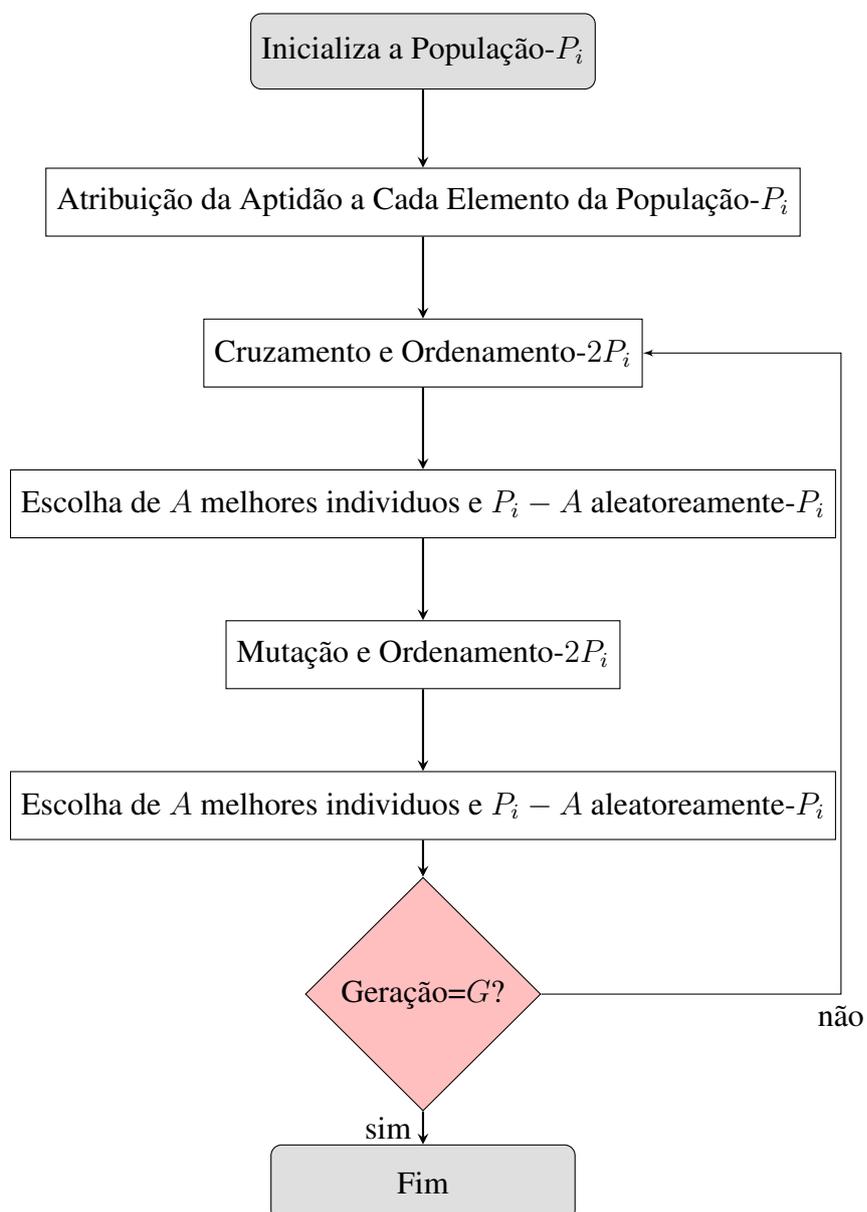
	Ordem de atribuição dos núcleos						
Classe de requisições- $j$	6	4	2	1	0	5	3
Classe de requisições- $i$	2	0	4	6	1	3	5
Classe de requisições- $z$	5	0	1	3	2	4	6

Fonte: o autor.

**Tabela 2** – Parâmetros utilizados para o AG proposto.

Parâmetro	Significado	Valor
$P_i$	Quantidade de indivíduos da população inicial	50
$G$	Quantidade de gerações	50
$A$	Número de indivíduos selecionados pelos valores de aptidão	40
$T$	Quantidade de classes de requisições	3
$C$	Quantidade de núcleos	7
$p_m$	Probabilidade de mutação para cada gene	0.2

Fonte: o autor.

**Figura 13** – Fluxograma do Algoritmo Genético.

A seguir os procedimentos de cruzamento, mutação e seleção serão especificados.

#### 4.2.1 Cruzamento

O procedimento de cruzamento combina o material genético dos pais para gerar os filhos. De modo geral, este procedimento não necessariamente ocorre em todos os pares de indivíduos selecionados. A forma mais comum é associar uma probabilidade de ocorrência ao processo de cruzamento,  $P_c$ . O cruzamento tem por principal objetivo propagar os genes dos indivíduos mais bem adaptados ao ambiente. Quanto maior o valor da variável  $P_c$ , o processo de cruzamento ocorrerá mais vezes, podendo gerar melhores indivíduos pela recombinação genética [PEREIRA, 2007].

O modo como o cruzamento é realizado depende fortemente do modo como os cromossomos são representados no problema de otimização. Para que seja possível a aplicação do AG em diversos tipos de problemas, vários tipos de cruzamento foram desenvolvidos [MAN; TANG; KWONG, 1996]. O cruzamento monoponto é o tipo mais comum, onde determinado ponto é sorteado aleatoriamente e os dois pais são recombinados a partir deste ponto. Outra forma de cruzamento é por multiponto, onde  $n$  posições são selecionadas aleatoriamente e, entre estas posições, o material genético dos pais é recombinado para dar origem aos descendentes. O cruzamento uniforme é outro conceito que pode ser aplicado. Neste esquema, uma máscara de cruzamento é gerada aleatoriamente e aplicada aos pais. Os *bits* da máscara definirão a forma dos descendentes [MAN; TANG; KWONG, 1996].

No AG proposto, o cruzamento monoponto foi utilizado e, em todas as gerações, dois indivíduos são pareados com um ponto em comum escolhido aleatoriamente e geram dois filhos. Tal processo é repetido até que a população dobre de tamanho. Os dois elementos são combinados a partir deste ponto, quando a parte superior de um indivíduo é agregada à parte inferior do outro para formar os dois novos indivíduos, chamados de filhos. Na Figura 14, pode-se observar um exemplo de cruzamento, com  $T = 3$  e  $C = 7$ . A seleção dos indivíduos para o cruzamento é feita pelo método da roleta [SHUKLA; PANDEY; MEHROTRA, 2015].

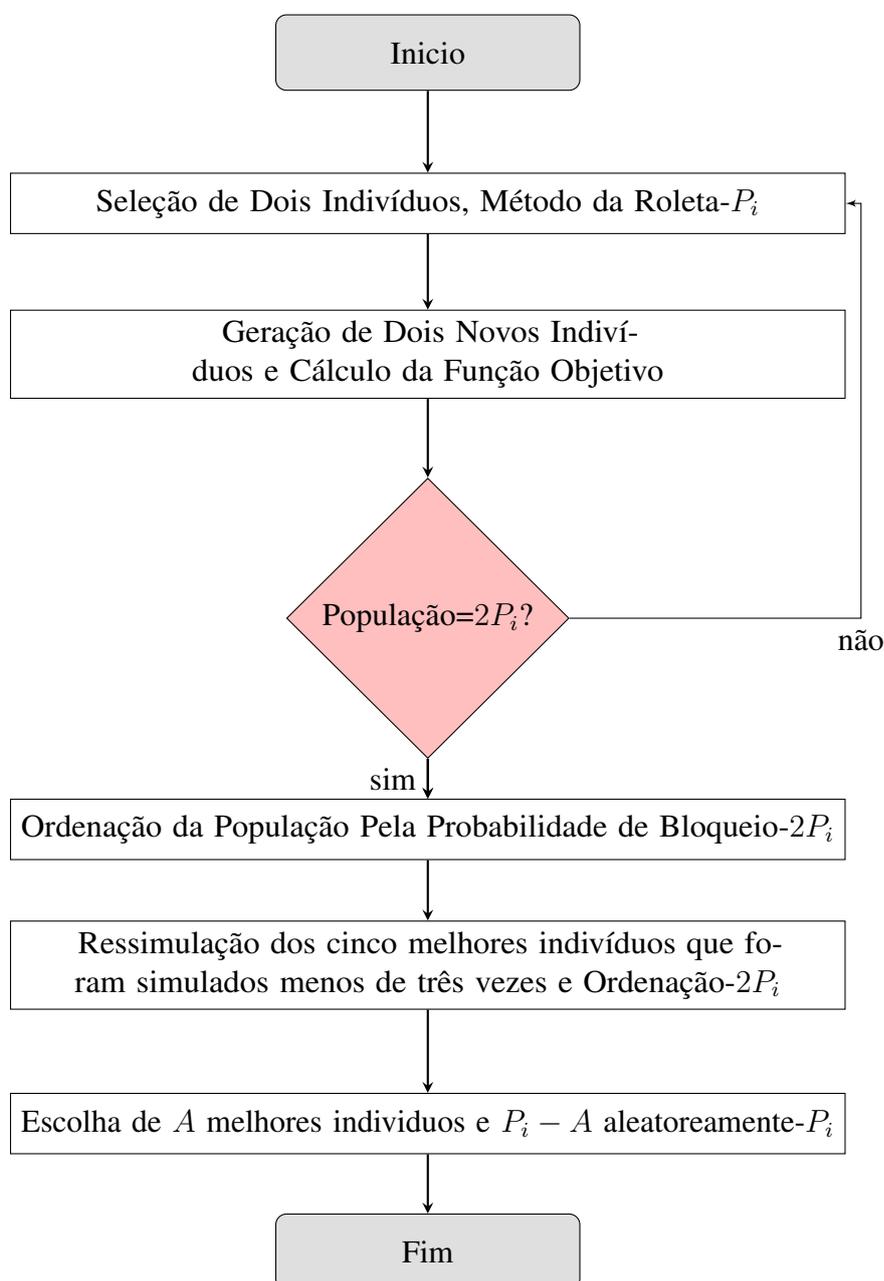
Para impedir que as melhores probabilidades de bloqueio se devam a um conjunto de requisições favoráveis para um indivíduo presente no processo evolutivo, cada indivíduo pode ser ressimulado até três vezes. Este processo é realizado para os cinco melhores indivíduos ao término do ordenamento da população pelas melhores probabilidades de bloqueio, que ocorre na seleção semi-elitista das etapas de cruzamento e mutação. Após este processo, a população é ordenada mais uma vez. Para os indivíduos ressimulados, a probabilidade de bloqueio associada será dada pela média entre o valor anterior e o valor obtido na nova simulação. Na Figura 15, está representado o fluxograma do processo de cruzamento, com a indicação do tamanho da população em cada bloco.

**Figura 14** – Exemplo de cruzamento por monoponto, com a escolha da primeira linha. A concatenação da parte superior e inferior (e vice-versa) de  $I_1$  e  $I_2$  formam os elementos  $I_3$  e  $I_4$ .

Ponto de corte	$I_1$	$I_2$																																										
	<table style="border-collapse: collapse; width: 100%; text-align: center;"> <tr><td>6</td><td>4</td><td>2</td><td>1</td><td>0</td><td>5</td><td>3</td></tr> <tr style="border-top: 1px dashed black;"><td>2</td><td>0</td><td>4</td><td>6</td><td>1</td><td>3</td><td>5</td></tr> <tr><td>5</td><td>0</td><td>1</td><td>3</td><td>2</td><td>4</td><td>6</td></tr> </table>	6	4	2	1	0	5	3	2	0	4	6	1	3	5	5	0	1	3	2	4	6	<table style="border-collapse: collapse; width: 100%; text-align: center;"> <tr><td>4</td><td>3</td><td>1</td><td>0</td><td>2</td><td>5</td><td>6</td></tr> <tr style="border-top: 1px dashed black;"><td>1</td><td>3</td><td>4</td><td>0</td><td>2</td><td>5</td><td>6</td></tr> <tr><td>3</td><td>0</td><td>5</td><td>1</td><td>6</td><td>4</td><td>2</td></tr> </table>	4	3	1	0	2	5	6	1	3	4	0	2	5	6	3	0	5	1	6	4	2
6	4	2	1	0	5	3																																						
2	0	4	6	1	3	5																																						
5	0	1	3	2	4	6																																						
4	3	1	0	2	5	6																																						
1	3	4	0	2	5	6																																						
3	0	5	1	6	4	2																																						
	$I_3$	$I_4$																																										
	<table style="border-collapse: collapse; width: 100%; text-align: center;"> <tr><td>6</td><td>4</td><td>2</td><td>1</td><td>0</td><td>5</td><td>3</td></tr> <tr><td>1</td><td>3</td><td>4</td><td>0</td><td>2</td><td>5</td><td>6</td></tr> <tr><td>3</td><td>0</td><td>5</td><td>1</td><td>6</td><td>4</td><td>2</td></tr> </table>	6	4	2	1	0	5	3	1	3	4	0	2	5	6	3	0	5	1	6	4	2	<table style="border-collapse: collapse; width: 100%; text-align: center;"> <tr><td>4</td><td>3</td><td>1</td><td>0</td><td>2</td><td>5</td><td>6</td></tr> <tr><td>2</td><td>0</td><td>4</td><td>6</td><td>1</td><td>3</td><td>5</td></tr> <tr><td>5</td><td>0</td><td>1</td><td>3</td><td>2</td><td>4</td><td>6</td></tr> </table>	4	3	1	0	2	5	6	2	0	4	6	1	3	5	5	0	1	3	2	4	6
6	4	2	1	0	5	3																																						
1	3	4	0	2	5	6																																						
3	0	5	1	6	4	2																																						
4	3	1	0	2	5	6																																						
2	0	4	6	1	3	5																																						
5	0	1	3	2	4	6																																						

Fonte: o autor.

**Figura 15** – Fluxograma do Método de Cruzamento.



## 4.2.2 Mutação

Na natureza, o processo de mutação representa a modificação da carga genética de forma aleatória, produzindo assim uma nova estrutura cromossômica. Devido à sua simplicidade, é um procedimento facilmente adaptável em diversos problemas de otimização. Geralmente este processo recebe uma probabilidade,  $P_m$ , de acontecer em cada indivíduo. O operador de mutação tem por objetivo criar diversidade na população, a partir de mudanças aleatórias nos cromossomos de cada indivíduo. O processo de cruzamento, apesar de efetivo, com o passar das gerações pode se tornar muito conservador e provocar a perda de indivíduos com bom potencial. O operador de mutação é utilizado como prevenção contra tal possibilidade, tentando evitar a convergência para máximos locais [GOLDBERG, 1989].

Mais uma vez, o operador de mutação pode variar de acordo com a forma em que os genes são representados no problema a ser otimizado. Por exemplo, para representações binárias, a mutação pode representar apenas a troca da paridade do *bit* em determinada posição; para representações de vetores formados por números naturais, a mutação pode ser representada por adição ou subtração de valores em determinadas posições.

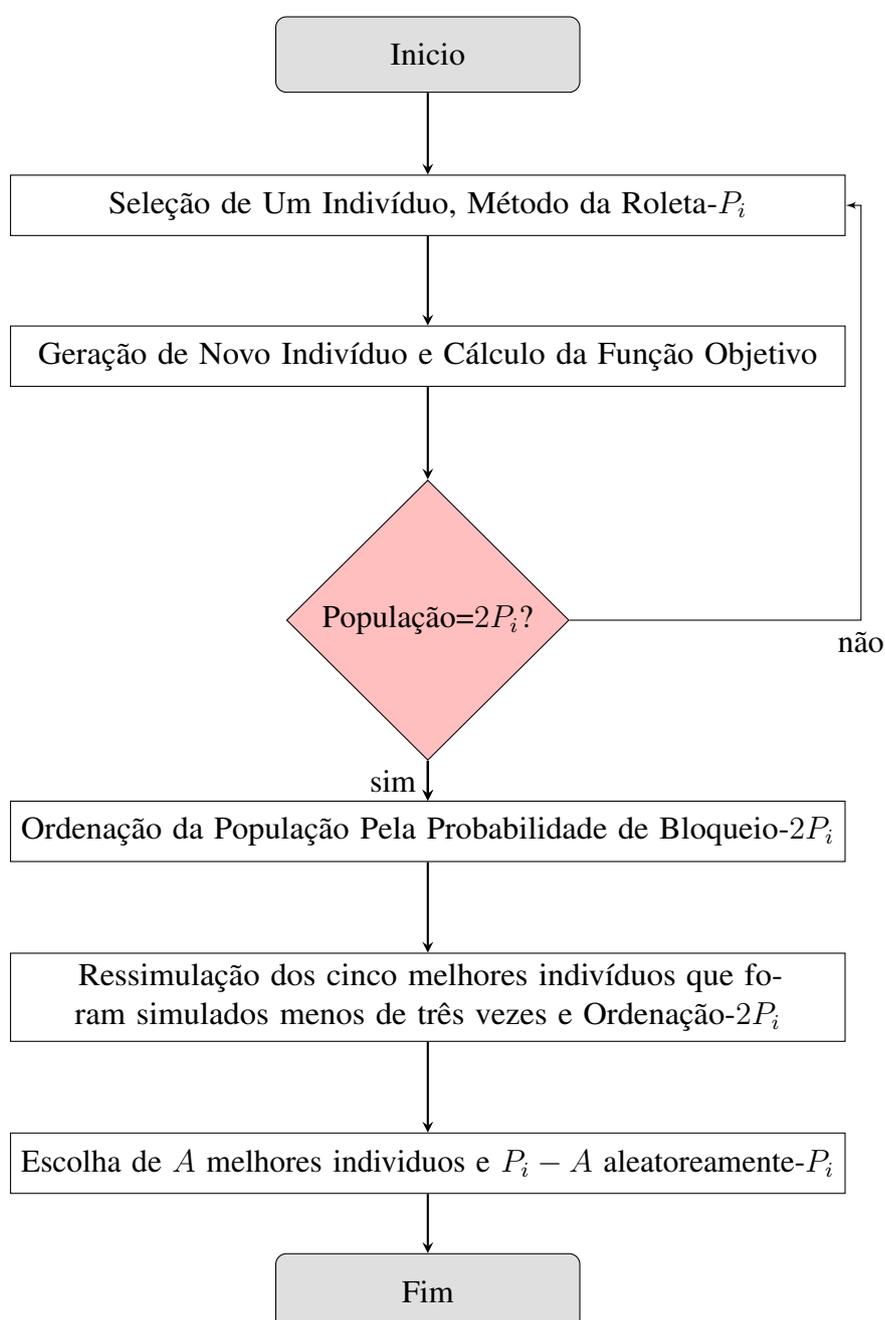
No AG proposto, o processo de mutação ocorre em todas as gerações. Nesse processo,  $P_i$  indivíduos são selecionados. Para a escolha do indivíduo, o método da roleta é utilizado mais uma vez e, nesse processo, um indivíduo pode ser escolhido mais de uma vez. Após a seleção dos indivíduos, cada gene é percorrido e recebe uma probabilidade  $p_m$  de ser selecionado. Caso o gene seja selecionado, outra posição é selecionada aleatoriamente e o conteúdo dessas posições são trocados, gerando novos indivíduos. Ao término do processo de mutação, a função objetivo é aplicada aos novos indivíduos e a população é ordenada de acordo com o valor de aptidão. Na Figura 16, pode-se observar um exemplo de mutação com  $M = 2$  pontos. O processo de mutação gera  $P_i$  novos indivíduos, formando uma população com  $2P_i$  indivíduos. A seguir, a função objetivo é aplicada mais uma vez para os cinco melhores indivíduos e toda a população é ordenada mais uma vez (assim como no cruzamento). A seleção semi elitista é aplicada mais uma vez para restaurar a população com  $P_i$  indivíduos. Na Figura 17, está representado o fluxograma do processo de mutação, com a indicação do tamanho da população em cada bloco.

**Figura 16** – Exemplo de mutação em dois pontos. Na linha 1, os genes 1,3 e 6,0 são trocados de posição; na linha 2, os genes 2,4 e 1,5 são trocados de posição; na linha 3, os genes 1,3 e 5,0 são trocados de posição

Antes da Mutação	
Mutação:1 – >3,6 – >0.	1 2 3 4 5 6 0
Mutação:1 – >4,5 – >6.	5 1 3 4 6 0 2
Mutação:0 – >1,2 – >6.	0 5 1 3 2 4 6
Após Mutac�o	
	3 2 1 4 5 0 6
	6 4 3 1 5 0 2
	1 5 0 3 6 4 2

Fonte: o autor.

**Figura 17** – Fluxograma do Método de Mutac o.



### 4.2.3 Seleção

O mecanismo de seleção de indivíduos a serem utilizados nos processos de mutação e cruzamento é de extrema importância, pois tende a selecionar indivíduos com os melhores valores de aptidão, aumentando a chance de que seus genes se perpetuem a cada geração [MAN; TANG; KWONG, 1996]. O mecanismo de seleção normalmente é formado por um processo em que os indivíduos com melhores valores de aptidão têm mais chances de serem escolhidos, mas é de fundamental importância que os indivíduos menos aptos também estejam presentes nas próximas gerações, garantindo uma maior exploração do espaço de soluções [PEREIRA, 2007].

O método de seleção da roleta é um dos mais utilizados e conhecidos quando se trata de problemas de otimização por AG. No AG proposto, o método da roleta foi utilizado para a seleção dos pais nos processos de mutação e cruzamento. Para melhor entendimento, a seguir será exemplificado o funcionamento do método. Considerando que  $P_r$  é o valor da probabilidade de bloqueio para um indivíduo, o valor de aptidão será dado por:

$$V_a = 1/(P_r + P_{melhor}) \quad (4.1)$$

Em que  $P_{melhor}$  é a probabilidade de bloqueio do melhor indivíduo ao início do processo de mutação/cruzamento. O valor de aptidão é representado desta forma para que haja inversão dos valores de probabilidade de bloqueio, pois assim bons indivíduos, com pequenos valores de  $P_r$ , representarão grandes valores de  $V_a$ . Com a representação dada por  $V_a$ , o melhor indivíduo ocupará 50% da roleta. Quanto mais próximo determinado indivíduo estiver do melhor (ao início da mutação/cruzamento), maior espaço ocupará na roleta. O procedimento para a aplicação do método da roleta segue os seguintes passos:

1. Somam-se todas as aptidões de todos os indivíduos;
2. Um valor aleatório entre 0 e o valor total de aptidão é gerado;
3. Seleciona-se o primeiro indivíduo cujo valor de aptidão adicionado com os outros valores de aptidão dos anteriores seja maior ou igual ao número gerado.

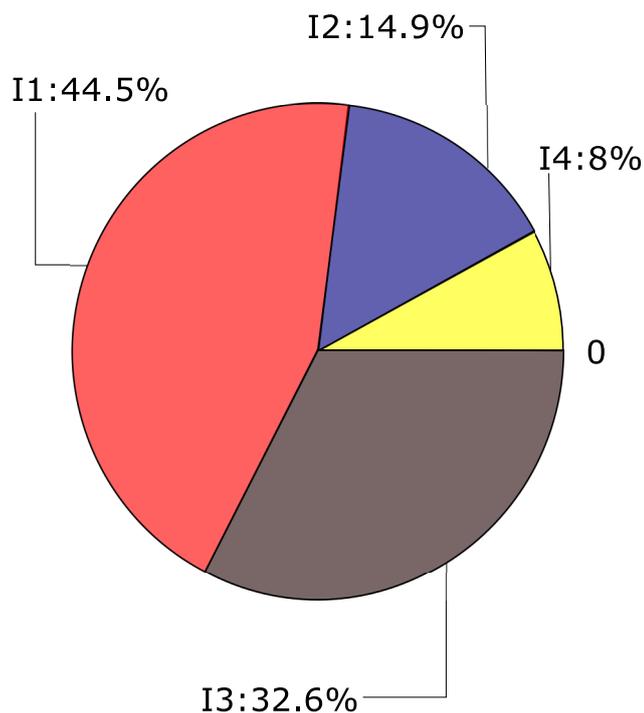
Para um melhor entendimento, considere quatro indivíduos e seus respectivos valores de aptidão, representados na Tabela 3. No gráfico da Figura 18, estão representadas as porcentagens de cada valor de aptidão para cada indivíduo e a porção ocupada na roleta. Caso o número aleatório, entre 0 e 100, tenha o valor de 40, observa-se que este valor cai na posição ocupada pelo indivíduo  $I_1$ .

**Tabela 3** – Valores de aptidão dos indivíduos.

Indivíduo	Valor de Aptidão	Valor Total de Aptidão
$I_1$	0,78	1,75
$I_2$	0,26	
$I_3$	0,57	
$I_4$	0,14	

Fonte: o autor.

**Figura 18** – Representação dos indivíduos na roleta.



Fonte: o autor.

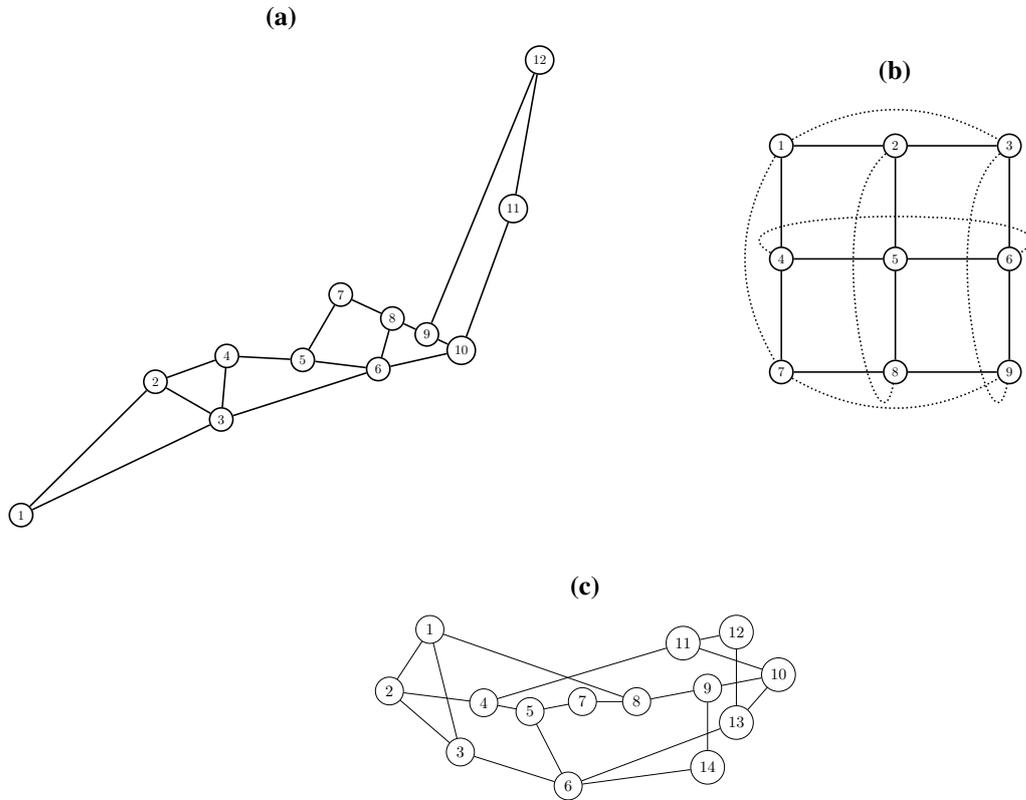
#### 4.3 MELHORIA DO *FIRST-FIT-CORE*(FFC)

As simulações, para a implementação do AG, foram realizadas num simulador ad-hoc estruturado para fibras multi núcleos baseado no simulador EON desenvolvido na UFPE. Efeitos da camada física não foram considerados. Três topologias diferentes foram simuladas, todas com links bidirecionais, conforme ilustra a Figura 19. Cada link possui sete núcleos com 320 *slots* por núcleo. Para a chegada de requisições, adotou-se o tráfego *Poissonian* com tempo de permanência exponencial com requisições de larguras de banda de 2, 4 e 8 *slots*. O algoritmo de roteamento utilizado foi o de caminho mais curto por *hops*. Bloqueios acontecem quando um conjunto de *slots* requisitados não pode ser alocado em um núcleo com o mesmo índice em todos os enlaces da rota (i.e, presume-se que não há possibilidade de troca de núcleo).

Como explicado na Seção 2.6.1, a separação do espectro em áreas para determinadas classes de requisições gera uma melhoria de desempenho em relação aos algoritmos tradicionais como o *First-Fit*, em redes EON, quando a probabilidade de bloqueio é usada como métrica. Com este ponto de partida, o AG proposto busca compactar determinadas classes de requisições em determinados núcleos, visando a melhoria de desempenho em relação à probabilidade de bloqueio, tendo como métrica de comparação o algoritmo FFC (Seção 3.5.2). Na Figura 20 está representado o indivíduo utilizado no FFC.

Note que podem ser definidos dois tempos distintos quando a proposta é empregada: o de planejamento e o de operação. O tempo de planejamento é o tempo que o procedimento proposto

**Figura 19** – Topologias utilizadas para a aplicação do AG: (a)Japonesa, (b)Toroidal, (c)NSFNet.



Fonte: o autor

**Figura 20** – Representação de indivíduo FFC.

	Ordem de atribuição dos núcleos						
Classe de requisições-2	0	1	2	3	4	5	6
Classe de requisições-4	0	1	2	3	4	5	6
Classe de requisições-8	0	1	2	3	4	5	6

Fonte: o autor

leva para encontrar uma boa priorização dos núcleos para cada classe de requisição. Observe que isso está relacionado a um processo de otimização realizado antes da operação da rede. Embora esse processo requeira um certo tempo para ser executado, pois demanda uma quantidade de iterações e simulações, a demora de algumas horas ou alguns dias para a resolução desta etapa não é uma questão proibitiva a ser considerada, mesmo em uma rede com um cenário de tráfego dinâmico. Já o tempo de operação é aquele que o plano de controle requer desde a chegada da requisição até o estabelecimento do caminho óptico. Durante este processo, a principal tarefa do plano de controle da rede é executar o RSCA. Aqui sim um tempo elevado pode se tornar proibitivo. Observe que essa proposta requer um tempo de execução do RSCA praticamente idêntico ao do FFC, pois a diferença primordial entre a proposta e o FFC está na ordem de procura do núcleo para o conjunto de *slots* requisitados. Portanto, é proposto um algoritmo que mantém a simplicidade do FFC, mas com desempenhos bem superiores. Na Tabela 4 estão

apresentados os melhores indivíduos e o ponto de carga em que o AG foi simulado para cada topologia. As simulações foram realizadas para  $10^6$  requisições.

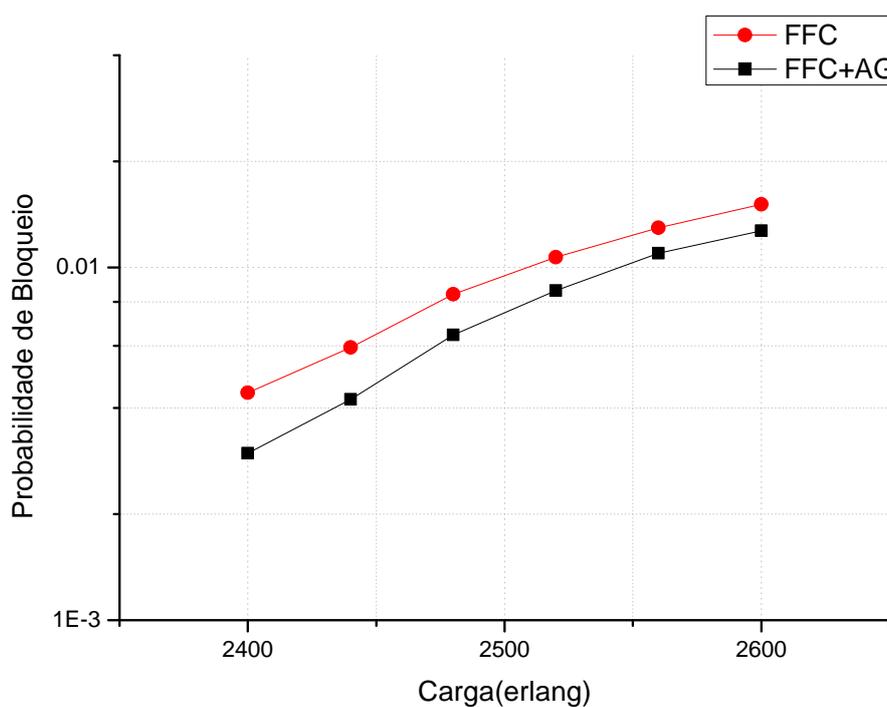
**Tabela 4** – Cargas em que o AG foi executado e ordens do núcleo do melhor indivíduo para cada topologia analisada.

Topologia	Classe da Requisição	Ordem do Melhor Indivíduo	Carga(erlang)
NSFNET	2 Slots	6-4-3-0-2-5-1	5400
	4 Slots	0-6-5-4-1-2-3	
	8 Slots	1-0-2-5-6-3-4	
Japonesa	2 Slots	5-3-0-1-4-6-2	2400
	4 Slots	6-5-2-3-0-1-4	
	8 Slots	0-6-5-4-2-1-3	
Toroidal	2 Slots	4-2-3-0-1-5-6	6200
	4 Slots	0-6-4-2-3-5-1	
	8 Slots	5-6-4-0-3-1-2	

Fonte: o autor

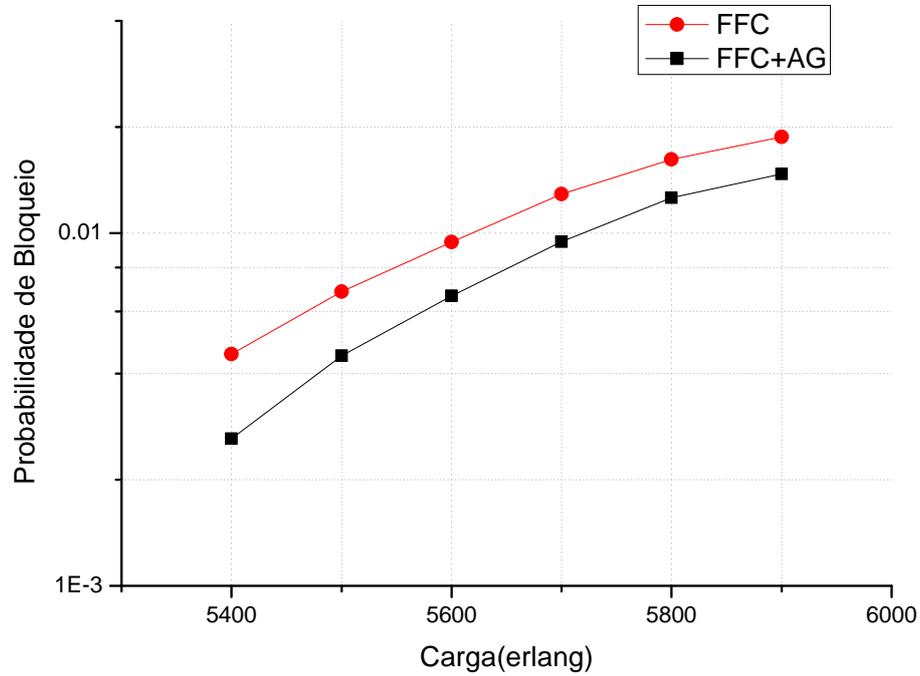
A partir do ponto onde o AG foi aplicado, mais 5 pontos foram simulados em cada topologia e os resultados estão apresentados nas Figuras 21, 22 e 23, onde o desempenho do AG proposto (FFC+AG) é comparado ao do FFC.

**Figura 21** – Comparação de desempenho das heurísticas FFC+AG e FFC, para a topologia Japonesa.



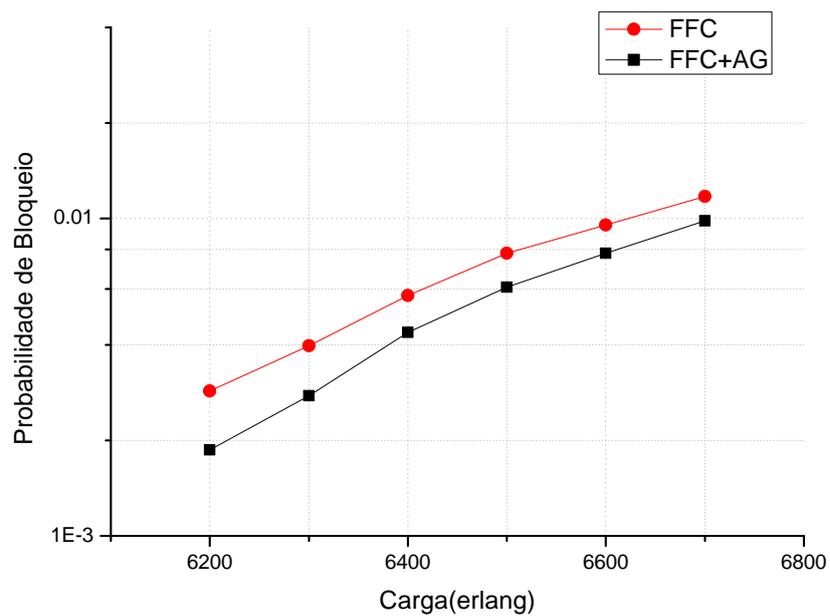
Fonte: o autor

**Figura 22** – Comparação de desempenho das heurísticas FFC+AG e FFC, para a topologia NSFNet.



Fonte: o autor

**Figura 23** – Comparação de desempenho das heurísticas FFC+AG e FFC, para a topologia Toroidal.



Fonte: o autor

A melhoria da proposta é consistente para todos os pontos de carga, pois, em nenhum momento, os resultados da proposta são inferiores aos do FFC, o que comprova a relevância do algoritmo proposto. Como esperado, diferentes ordens de tentativas de alocação para diferentes classes de requisições provocam um uso mais casado dos recursos disponíveis e uma consequente melhoria no desempenho da rede para as topologias abordadas. Na Tabela 5 estão apresentados os ganhos percentuais para o ponto de carga em que o AG foi simulado, e as respectivas topologias.

**Tabela 5** – Melhoria de desempenho do FFC+AG.

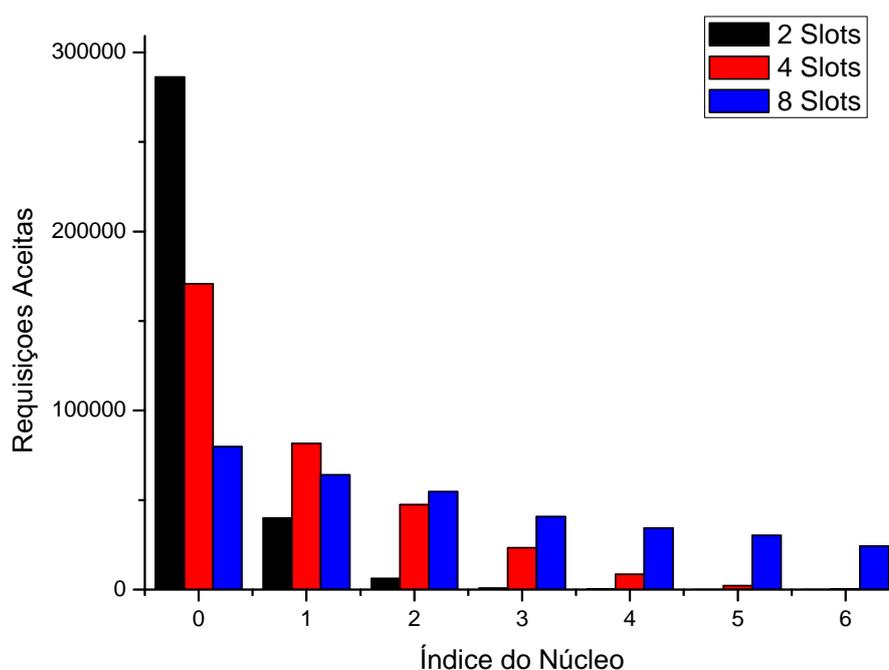
Topologia	Japonesa	NSFNET	Toroidal
Ponto de treinamento(em erlang)	2400	5400	6200
Ganho de desempenho(em %)	33	43	35

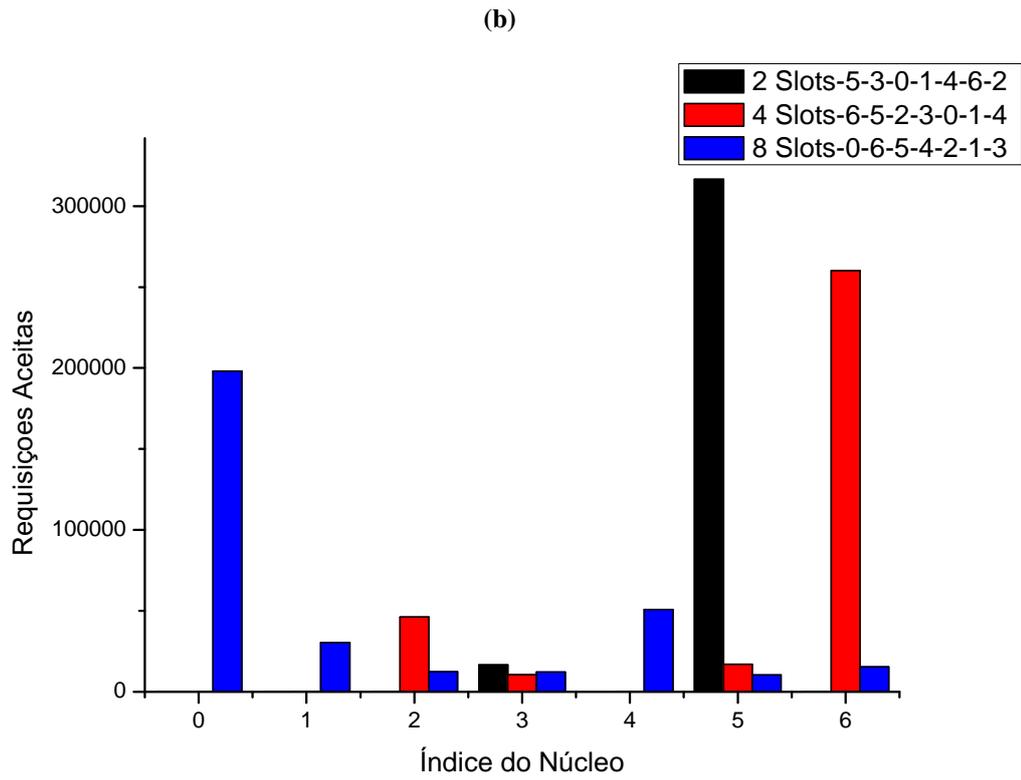
Fonte: o autor

Nas Figuras 24, 25 e 26, estão apresentados os histogramas da quantidade de requisições de cada classe aceitas em cada núcleo quando os algoritmos FFC e FFC+AG são utilizados nas topologias Japonesa, NSFNET e Toroidal, com cargas de 2400, 4000 e 6200 erlang, respectivamente.

**Figura 24** – Quantidade de requisições aceitas em cada núcleo para FFC(a) e FFC+AG(b), topologia Japonesa.

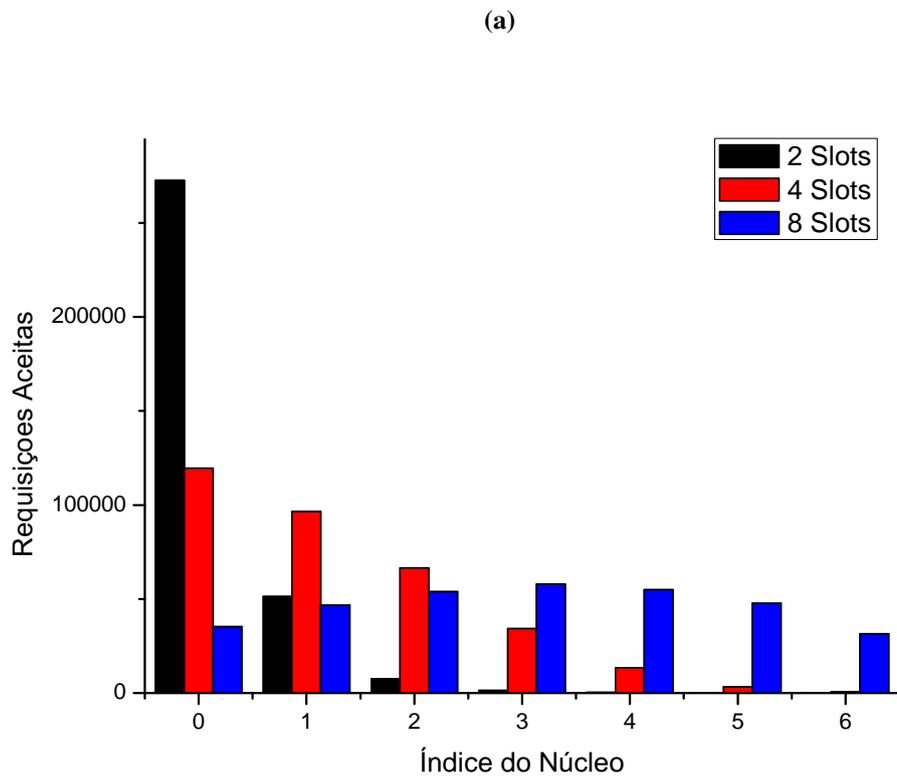
(a)

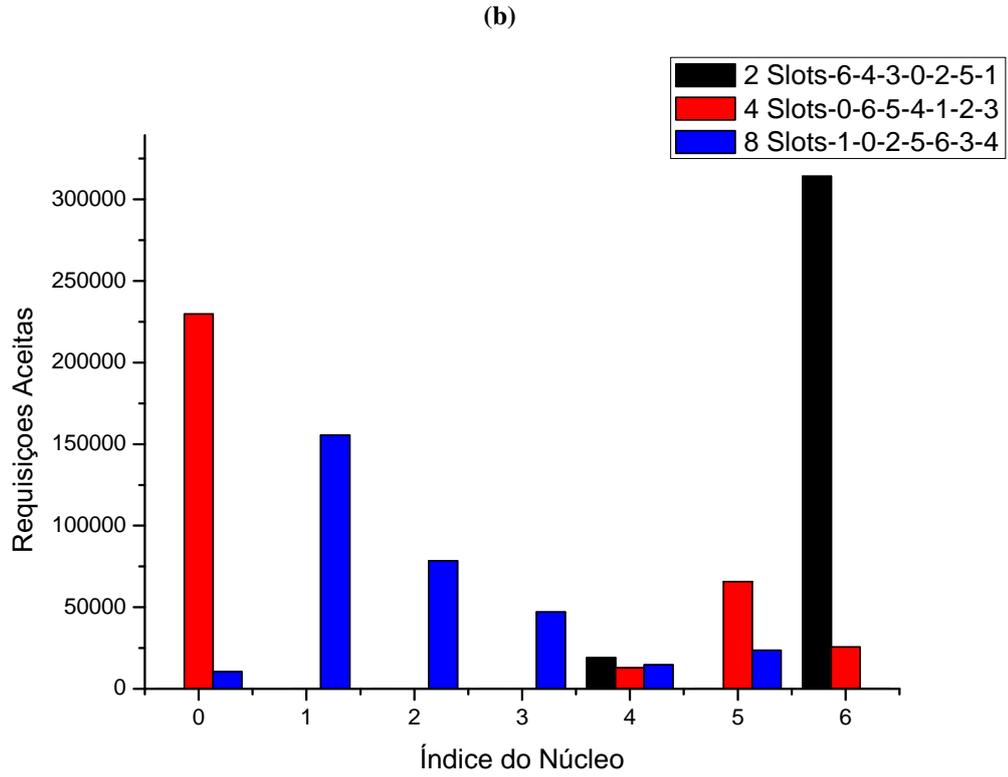




Fonte: o autor

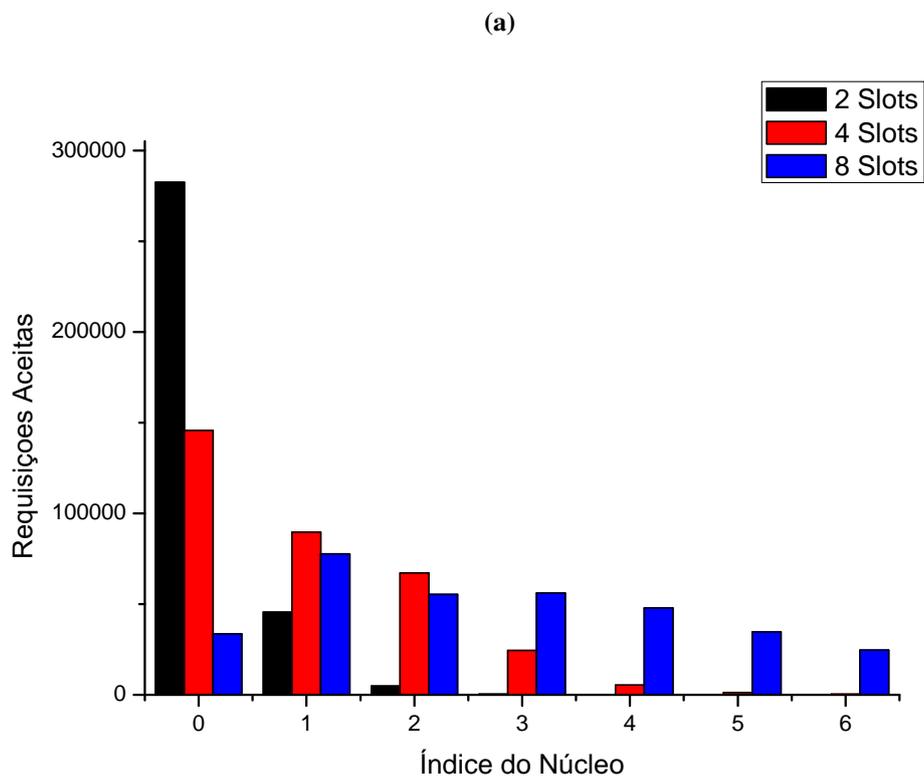
**Figura 25** – Quantidade de requisições aceitas em cada núcleo para FFC(a) e FFC+AG(b), topologia NSFNET.

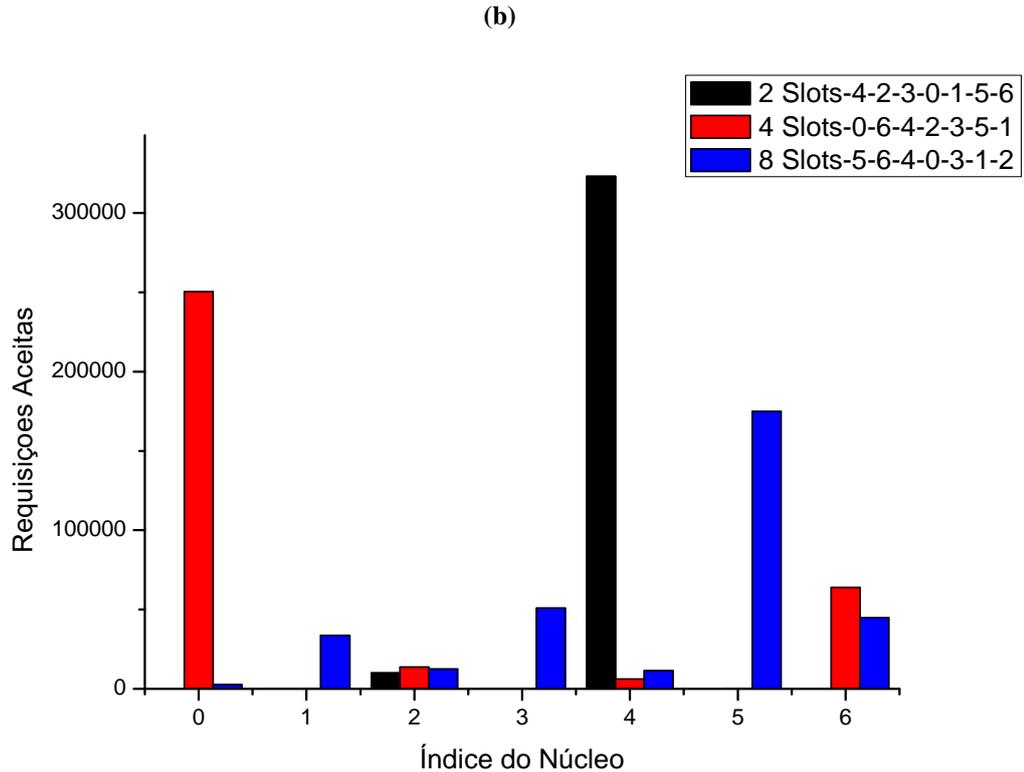




Fonte: o autor

**Figura 26** – Quantidade de requisições aceitas em cada núcleo para FFC(a) e FFC+AG(b), topologia Toroidal.



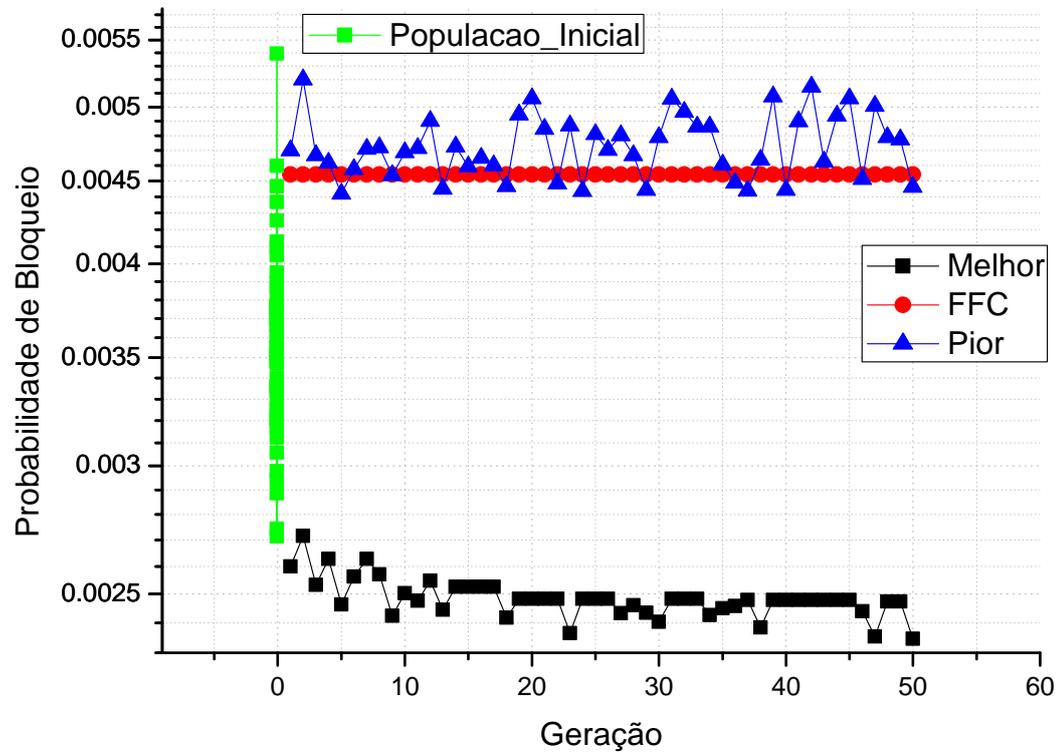


Fonte: o autor

Nos histogramas do algoritmo proposto, pode-se observar que a ocupação dos núcleos para os diferentes tamanhos de requisições segue a ordem pré-estabelecida. Observe que, para o FFC, não há um núcleo de preferência para uma determinada requisição. Ou seja, conexões por 2, 4 e 8 *slots* passam a disputar os mesmos espaços, o que causa a inexistência de algum núcleo quase que dedicado para algum tamanho de requisição. Já para o FFC+AG, alguns núcleos são quase que integralmente utilizados por uma classe de requisição, o que evita a fragmentação de espectro e proporciona uma melhoria de desempenho do FF+AG.

Na Figura 27, as probabilidades de bloqueio dos seguintes elementos estão representadas: melhor e pior indivíduos ao fim de cada geração, e o indivíduo que utiliza a ordem do algoritmo FFC. Os resultados apresentados são para a topologia NSFNET no ponto de carga em que o AG foi simulado, 5400 erlang.

**Figura 27** – Melhor e pior indivíduo ao fim de cada geração.



Fonte: o autor

Pode-se notar uma variação dos melhores indivíduos a cada geração, pois, como dito anteriormente, os cinco melhores indivíduos são ressimulados, até três vezes, ao fim de cada operação, a fim de evitar que os bons resultados se devam a um conjunto de requisições favoráveis. Também nota-se que a má escolha das ordens para as classes de requisições pode levar a resultados piores ou iguais ao FFC.

## 5 ADAPTAÇÃO DO ALGORITMO *MIN SLOT-CONTINUITY CAPACITY LOSS* PARA REDES EON-MCF

Como citado na Seção 2.6.1, a resolução do problema de fragmentação espectral, em redes EON-SMF (estrutura sem multiplexação espacial), utilizando a probabilidade de bloqueio como métrica, é objeto de estudo em diversos trabalhos. Duran et al. [DURÁN et al., 2012] apresentaram uma heurística que tenta evitar a formação de *slots* isolados. Tais *slots* são indesejados pois não têm capacidade de formar um caminho óptico fim-a-fim, levando à degradação da probabilidade de bloqueio. Possíveis soluções são ordenadas de acordo com a quantidade de *slots* isolados que podem gerar, com a escolha do caminho óptico devendo ser baseada nesta lista. Esta proposta foi comparada, em relação à probabilidade de bloqueio, com algoritmos clássicos como *Most-Used*, *Random*, *Least-Used* e *First-Fit*, ficando comprovada a melhoria de desempenho em relação aos algoritmos clássicos. A avaliação do impacto da acomodação de requisições em caminhos ópticos que tenham *links* em comum com o caminho óptico a ser alocado é uma heurística que pode levar à melhoria de desempenho, proposto por Sone et al. [SONE et al., 2011]. Neste trabalho, é levada em consideração a redução da perda de capacidade de alocação em fibras adjacentes e a consecutividade de *slots* em pares de fibras, portanto o conjunto de *slots* e a rota entre o par origem e destino serão escolhidos de modo a minimizar a perda de capacidade. A heurística apresenta melhoria de desempenho quando comparada com algoritmos como *First-Fit*, *Random* e *Most-Used*, e utilizando como métrica a capacidade de caminho provisionável. A análise do estado da rede, ainda que parcial, ajuda a explicar a melhoria de desempenho desta proposta. A partir dos trabalhos citados, pode-se notar que a avaliação parcial do estado da rede e a aplicação do conceito de capacidade (formas de alocar uma requisição) são caminhos que levam à melhoria de desempenho em redes EON-SMF.

A seguir, a heurística MSCL, proposta para as redes EON-SMF, será explicada e posteriormente sua adaptação e resultados para redes EON-MCF serão discutidos.

### 5.1 *MIN SLOT-CONTINUITY CAPACITY LOSS*

Waldman et al. [WALDMAN; FILHO, 2013] apresentaram a heurística MSCL, cujo objetivo é a escolha de um conjunto de *slots* para a alocação de uma requisição de modo que a perda de capacidade da rede seja a menor possível, visando uma redução na probabilidade de bloqueio das requisições. A análise da perda de capacidade é realizada tanto na rota em que se pretende alocar a requisição quanto nas rotas interferentes à rota principal. Para o entendimento do algoritmo, algumas definições precisam ser detalhadas:

- $\psi$ : representa o estado da rede (caminhos ópticos já alocados) antes de uma possível alocação de um conjunto de *slots*;
- $\psi'$ : representa o estado da rede (caminhos ópticos já alocados) após uma possível alocação

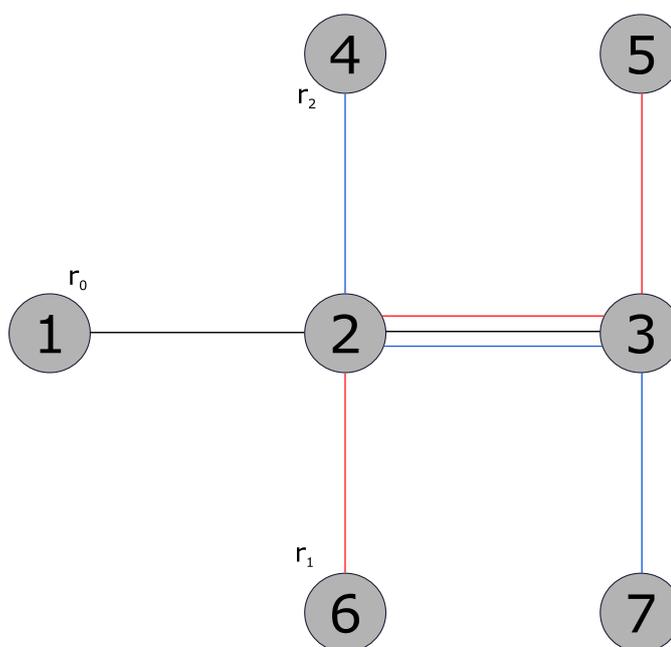
de um conjunto de *slots*;

- $r$ : é a rota selecionada pelo processo de roteamento;
- $I_r$ : conjunto de rotas interferentes a  $r$ ;
- $D^{<r>}(\psi)$ : representa o vetor de disponibilidade dos *slots* da rota,  $r$ , em análise, representado de forma *booleana*. Cada posição indica se o *slot*  $i$  está disponível ou não para o estado  $\psi$  da rede. O valor 1 indica ocupação do *slot* e o valor 0 indica a não ocupação do *slot* em todos os enlaces da rota  $r$ .

### 5.1.1 Rotas interferentes

São consideradas rotas interferentes os caminhos que possuem ao menos um *link* em comum com determinada rota em análise. Na Figura 28, estão apresentadas três rotas em uma rede fictícia.

**Figura 28** – Rotas interferentes.



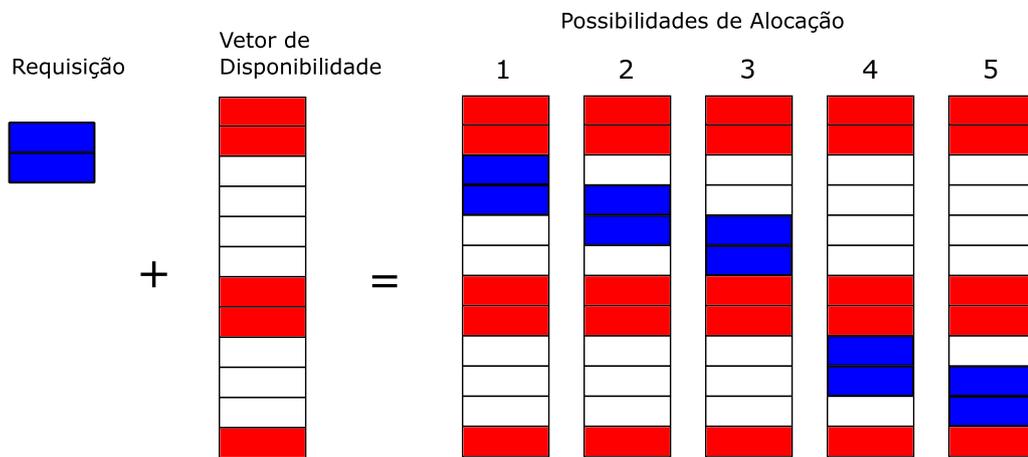
Fonte: o autor

Considerando a rota principal como  $r_0$  (representada em preto), formada pelos nós 1 – 2 – 3, e as rotas interferentes  $r_1$  (vermelho) e  $r_2$  (azul), formadas pelos conjuntos de nós 4 – 2 – 3 – 7 e 6 – 2 – 3 – 5 respectivamente. As rotas  $r_1$  e  $r_2$  são consideradas interferentes a  $r_0$  pois possuem o *link* 2 – 3 em comum com a rota principal  $r_0$ . Portanto, neste caso, o algoritmo MSCL irá avaliar o impacto de uma possível alocação na rota  $r_0$  levando em consideração a mudança de sua capacidade como também a causada nas rotas  $r_1$  e  $r_2$ .

### 5.1.2 Cálculo da perda de capacidade

Para a identificação da quantidade de possibilidades de alocação, o conceito de buraco deve ser apresentado. O termo buraco é empregado para expressar determinada quantidade de *slots* contíguos disponíveis em determinada rota. O tamanho de um buraco indica a quantidade de *slots* que este possui. O tamanho de cada buraco pode ser identificado no vetor de disponibilidade,  $D^{<r>}(\psi)$ , que representa a ocupação dos *slots* em uma rota  $r$ . Caso haja algum buraco do mesmo tamanho ou maior que a quantidade de *slots* necessários para acomodar a requisição, é possível determinar o número de formas que o conjunto de *slots* pode ser acomodado. Um exemplo de possibilidades de alocação é apresentado na Figura 29.

**Figura 29** – Possibilidades de alocação para uma requisição de 2 *slots* no vetor de disponibilidade.



Fonte: o autor

*Slots* ocupados são representados pela cor vermelha e a requisição a ser alocada é representada pela cor azul. A requisição (2 *slots*) pode ser acomodada em qualquer buraco de tamanho maior ou igual a 2 *slots*. Um buraco é representado por um vetor de 1's dado por  $h_m^r$ , que representa o m-ésimo buraco da rota  $r$ . O tamanho do buraco é dado por  $|h_m^r|$ . Para que uma requisição de  $n$  *slots* seja acomodada deve-se ter:  $|h_m^r| \geq n$ . A representação binária do vetor de disponibilidade é dado por  $D^{<r>}(\psi) = (1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 1)$ . A Figura 29 mostra que a requisição pode ser encaixada de 5 formas diferentes em  $D^{<r>}(\psi)$ . Para o exemplo, o vetor  $h_m^r = (|h_1^r| = 4, |h_2^r| = 3)$ , pois existe 1 buraco de tamanho 4 e outro de tamanho 3. O buraco  $h_1^r$  tem tamanho de 4 *slots*, e a requisição de 2 *slots* pode ser alocada de 3 maneiras diferentes neste buraco (possibilidades de alocação 1, 2, 3 na Figura 29). O buraco  $h_2^r$  tem tamanho de 3 *slots*, e a requisição de 2 *slots* pode ser alocada de 2 maneiras diferentes neste buraco (possibilidades de alocação 4, 5 na Figura 29). Para o dado estado da rede, os buracos de tamanho 4 e 3, presentes no vetor de disponibilidade, definem as possibilidades de alocação para a requisição com tamanho 2 *slots*, portanto a requisição pode ser encaixada no vetor de disponibilidade da rota,  $r$ , de 5 formas diferentes. O cálculo da perda de capacidade utilizado no algoritmo MSCL, para as rotas

interferentes e a rota principal, tem como métrica o número de formas de alocação.

Para um buraco de tamanho  $|h_m^r|$  e uma requisição com  $n$  slots, o número de formas que uma requisição pode ser acomodada neste buraco é dado por  $|h_m^r| - n + 1$ , desde que  $|h_m^r| \geq n$ , impondo que o tamanho da requisição deve ser menor ou igual ao tamanho do buraco. Considerando a disponibilidade da rota  $r$ ,  $D^{<r>}(\psi)$ , e o tamanho de requisição,  $n$ , o número total de formas de alocação é dado por:

$$S^{<r>}(\psi, n) = \sum_{i=1}^m \max(0, |h_i^r| - n + 1), \quad (5.1)$$

A função  $\max(a, b)$  retorna o maior valor entre  $a$  e  $b$  e  $m$  é o número total de buracos na rota  $r$ . Quando uma requisição de tamanho  $n$  é alocada, os slots  $s_j, s_{j+1}, s_{j+2}, \dots, s_{j+n-1}$  serão ocupados e um vetor booleano,  $X_{j,n}$ , será formado e todas as posições recebem o valor 0, exceto as posições em que os slots são alocados (posições  $j$  até  $j + n - 1$ ). Após a acomodação do espectro requisitado, o estado da rota é dado pela seguinte operação booleana:

$$D^{<r>}(\psi') = D^{<r>}(\psi) + X_{j,n}, \quad (5.2)$$

A Figura 30 ilustra a operação descrita para o exemplo proposto.

**Figura 30** – Operação booleana para obtenção do estado da rede após alocação.

$D^{<r>}(\psi)$	$X_{j,n}$	$D^{<r>}(\psi')$
1	0	1
1	0	1
0	1	1
0	1	1
0	0	0
0	0	0
1	0	1
1	0	1
0	0	0
0	0	0
0	0	0
1	0	1

Fonte: o autor

A requisição de tamanho 2 foi encaixada no buraco  $h_1^r$ , cujo tamanho é 4. O vetor  $X_{j,n}$  representa o local em que a requisição será alocada no estado atual da rede. Após a alocação da requisição, o estado da rota é representado por  $D^{<r>}(\psi') = (1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 1)$ . Considere um caminho  $p$ , contido no conjunto  $I_r$ , e seu vetor de disponibilidade obtido após a acomodação de um conjunto de slots na rota  $r$ , dado por  $D^{<p>}(\psi')$ . Com as informações do estado anterior e posterior de um caminho,  $p$ , interferente à rota principal,  $r$ , é possível a realização

do cálculo da perda de capacidade, para qualquer rota interferente, devido à acomodação de uma requisição com  $n$  slots em  $r$ . A perda de capacidade será dada por:

$$C(n) = \sum_{p \in I_r} S^{<p>}(\psi, n) - S^{<p>}(\psi', n), \quad (5.3)$$

$S^{<p>}(\psi, n)$  representa o número total de possibilidades de alocação para uma requisição com  $n$  slots e  $S^{<p>}(\psi', n)$  representa as possibilidades de alocação após considerar-se a alocação da requisição em questão. O somatório da Equação 5.3 é aplicado para todos os caminhos interferentes à rota  $r$ , presentes em  $I_r$ . A perda total de capacidade será dada por:

$$C = \sum_{n \in N} C(n), \quad (5.4)$$

O termo  $C(n)$  representa a perda de capacidade para dada requisição de tamanho  $n$ , e  $N$  representa todos os possíveis tamanhos de requisição que podem chegar à rede.

Pela Equação 5.4, observa-se que a perda de capacidade total leva em consideração todos os comprimentos de requisições que podem chegar à rede. Diferentes formatos de modulação e padrões de tráfego definem quais serão as classes de requisições que poderão chegar à rede. As equações apresentadas mostram que o algoritmo MSCL leva em consideração o estado atual da rede para as rotas interferentes à rota em que a requisição será alocada, e escolhe o conjunto de slots que causa o menor impacto a estas rotas.

Como proposto por Waldman et al. [WALDMAN; FILHO, 2013], o algoritmo MSCL para redes EON-SMF apresenta-se como uma boa alternativa para a melhoria de desempenho quando comparado aos algoritmos mais populares como *Random* e *First-Fit*, tendo como métrica a probabilidade de bloqueio de requisições. Portanto, a análise do estado da rede, quando o número de formas de alocação é utilizado como métrica para a capacidade, apresenta-se como uma estratégia para a melhoria da eficiência na alocação de recursos.

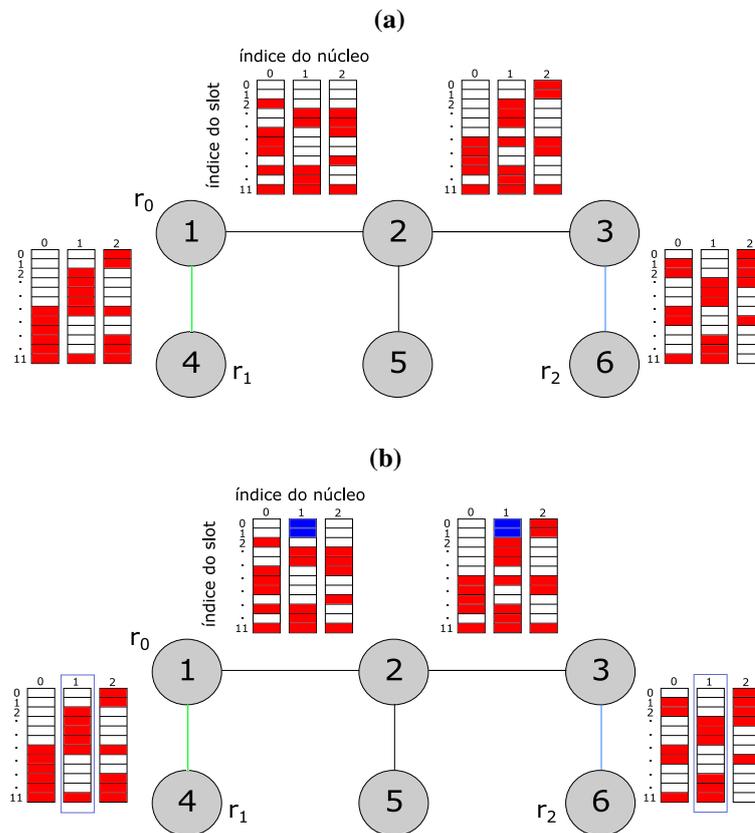
A heurística proposta na próxima seção é uma adaptação do algoritmo MSCL das redes EON-SMF para as redes EON-MCF, objetivando a redução da fragmentação espectral que resultará na redução da probabilidade de bloqueio das requisições.

## 5.2 ADAPTAÇÃO DO ALGORITMO MSCL PARA SDM

A principal diferença desta adaptação está na quantidade de opções para a alocação de espectro das redes EON-MCF. Considere que  $C$  representa o número de núcleos da fibra cada *link* agora aumentará em  $C$  vezes sua capacidade, quando comparado com os *links* de redes SMF com uma única fibra. Nesta proposta, a troca de núcleos não foi adotada. Portanto, para que uma requisição seja alocada, é necessário que o conjunto de slots escolhido para atender a requisição esteja disponível no núcleo de mesmo índice em todos os *links* da rota

principal [TODE; HIROTA, 2016]. Dada a restrição para a continuidade de núcleos, o cálculo da perda de capacidade para as rotas interferentes é realizado apenas no núcleo da possível alocação. Portanto, as possíveis alocações, para o algoritmo, são caracterizadas por um núcleo  $N$  e um conjunto de *slots*  $S_{alloc}$ . Na Figura 31(a), está representado o estado de uma rede fictícia, com os vetores de disponibilidade de cada núcleo em cada *link*. Considere uma rota  $r_0$  dada pelos nós 1 – 2 – 3, em que a alocação deve ser acomodada, e as rotas interferentes  $r_1$  e  $r_2$ , representadas pelos nós 4 – 1 – 2 e 2 – 3 – 6, respectivamente. Para uma requisição de tamanho 2 *slots*, uma possível alocação está representada na Figura 31(b), identificada por  $C = 1$  e  $S_{alloc} = 0, 1$ . O cálculo da perda de capacidade para as rotas  $r_1$  e  $r_2$  deve ser realizado para o núcleo 1 (retângulo azul).

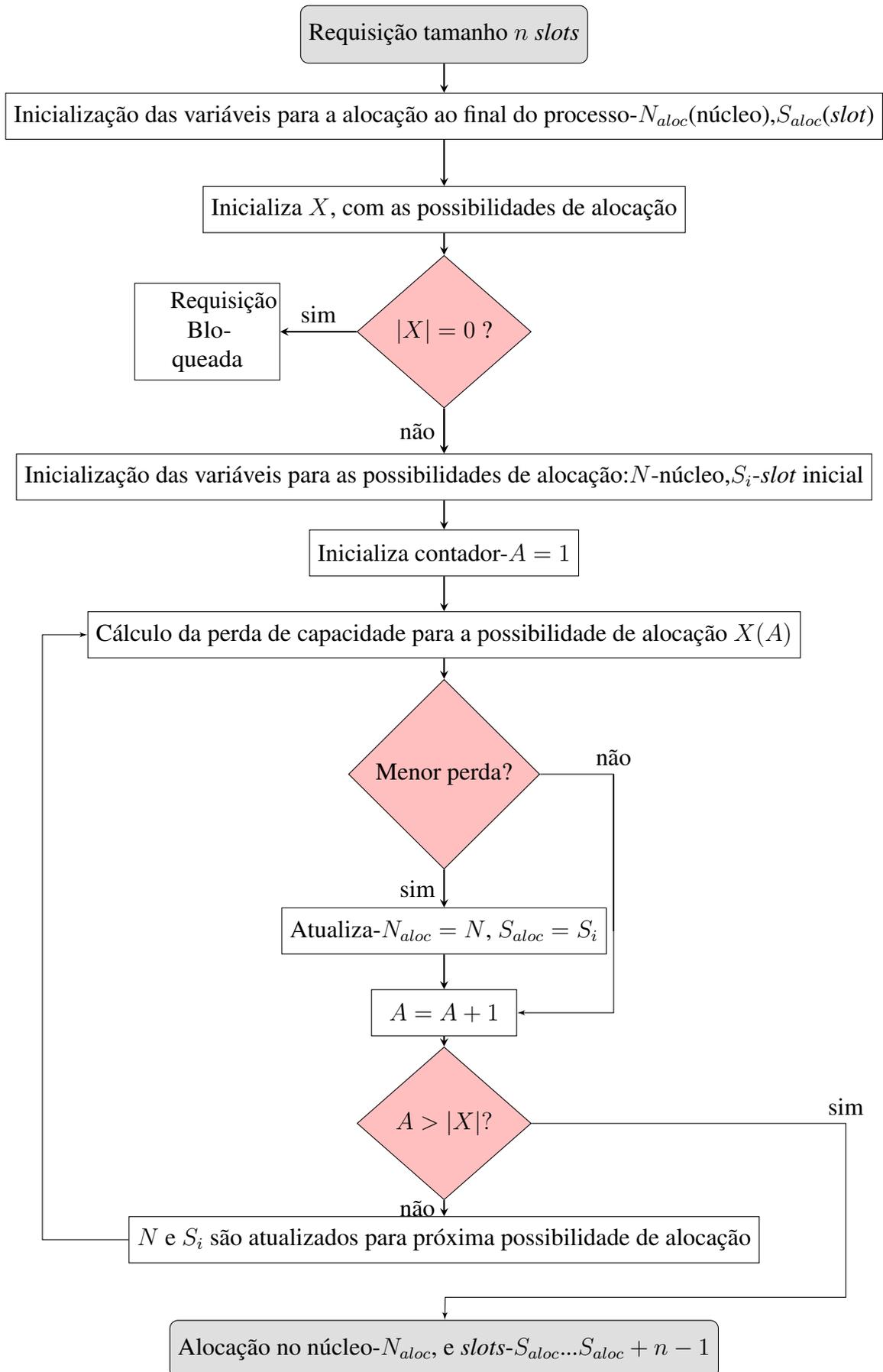
**Figura 31** – Representação do estado dos *links* da rede(a) e o núcleo que deve ser utilizado para o cálculo da perda de capacidade para uma possível alocação(b).



Fonte: o autor

Para uma melhor descrição da política proposta, a Figura 32 apresenta o fluxograma do algoritmo proposto. Os passos para a aplicação do algoritmo proposto são os seguintes: chegada de uma requisição, encontra-se a rota  $r$  (assumida aqui pré-definida pelo método de roteamento fixo) e todas as possibilidades de alocação de núcleo/*slots* nessa rota. Para cada combinação núcleo/*slots*, é realizado o cálculo da perda de capacidade de todas as rotas interferentes a  $r$ . A opção que gera a menor perda de capacidade é escolhida.

**Figura 32** – Fluxograma do Algoritmo MSCL para as redes MCF.

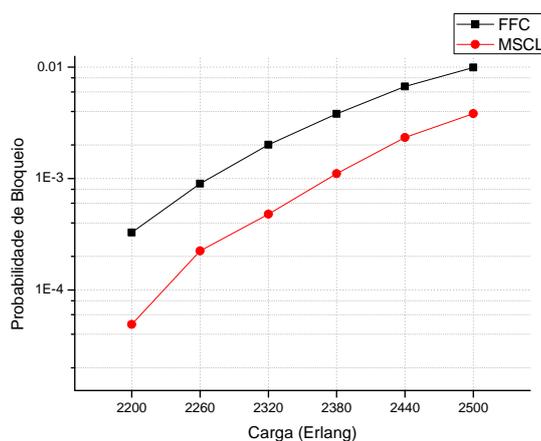


### 5.2.1 Resultados

As simulações para a verificação do desempenho da proposta foram realizadas num simulador ad-hoc estruturado para fibras multi núcleos baseado no simulador EON [WALDMAN; FILHO, 2013] [LIRA, 2016] desenvolvido na UFPE. Efeitos da camada física não foram considerados. O computador utilizado possui as seguintes configurações: *Intel i-7 4790*, 3.6 GHz x 4, memória *ram* de 7.7 GHz. Três topologias diferentes foram simuladas, todas com *links* bidirecionais, NSFNET com 42 *links* e 14 nós, Japonesa com 34 *links* e 12 nós e Toroidal com 36 *links* e 9 nós. Cada *link* possui sete núcleos com 120 *slots* por núcleo. Para a chegada de requisições, adotou-se o tráfego *Poissonian*, tempo de permanência com distribuição exponencial e requisições por larguras de banda uniformemente distribuídas entre 2, 3, 4 e 5 *slots*. Para o roteamento, foi escolhido o algoritmo de caminho mais curto por *hops*. Bloqueios acontecem quando um conjunto de *slots* requisitados não pode ser alocado de forma contígua em um núcleo com o mesmo índice em todos os enlaces da rota. Cada simulação foi realizada para  $10^6$  requisições.

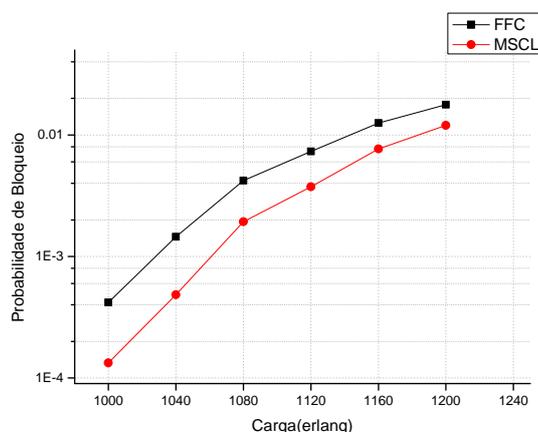
Para critério de comparação, foi utilizado o algoritmo FFC. Nas Figuras 33, 34 e 35, estão apresentados os gráficos de probabilidade de bloqueio em função da carga do tráfego oferecido à rede para as topologias NSFNET, Japonesa e Toroidal, respectivamente. Para a topologia NSFNET, no ponto de carga de 2200 erlang, a melhoria foi de aproximadamente 85%. Para a topologia Japonesa, no ponto de carga de 1000 erlang, a redução da probabilidade de bloqueio foi de aproximadamente 68%. Finalmente, para a topologia Toroidal, no ponto de carga de 2700 erlang, a melhoria foi de aproximadamente 65%.

**Figura 33** – Gráfico comparativo entre o *First-Fit-Core* e o algoritmo proposto (MSCL) para a topologia NSFNET, com requisições de 2, 3, 4 e 5 *slots*.



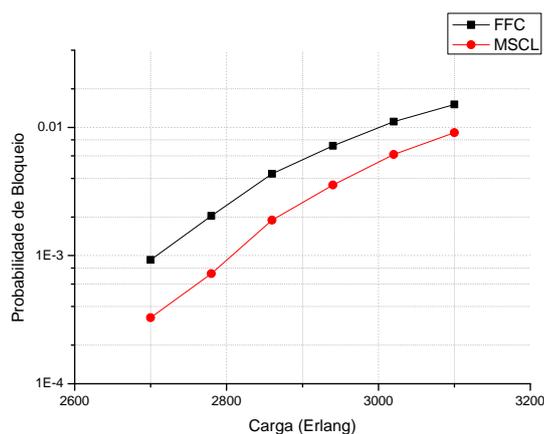
Fonte: o autor.

**Figura 34** – Gráfico comparativo entre o *First-Fit-Core* e o algoritmo proposto (MSCL) para a topologia Japonesa, com requisições de 2, 3, 4 e 5 *slots*.



Fonte: o autor.

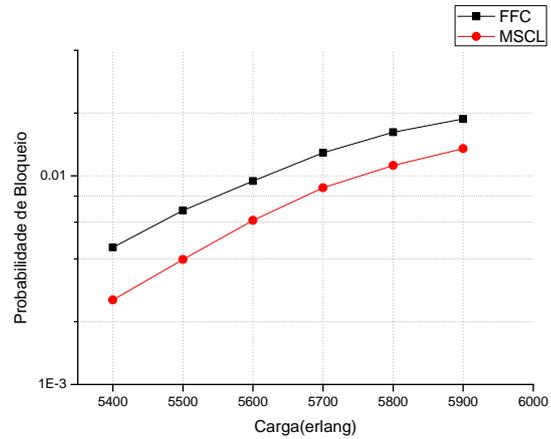
**Figura 35** – Gráfico comparativo entre o *First-Fit-Core* e o algoritmo proposto (MSCL) para a topologia Toroidal, com requisições de 2, 3, 4 e 5 *slots*.



Fonte: o autor.

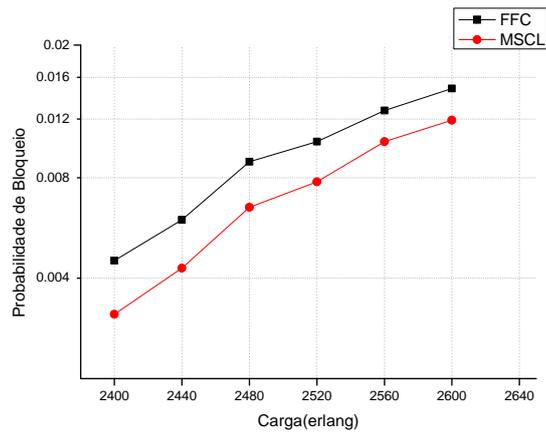
Com as mesmas configurações já citadas, outras simulações também foram realizadas para o cenário de requisições com largura de banda uniformemente distribuída entre 2, 4 e 8 *slots* e com 320 *slots* por *link*. As melhorias foram de aproximadamente 44%, 31% e 44% nos pontos de carga 5400, 2400, 6000 erlang para as topologias NSFNET, Japonesa e Toroidal, respectivamente. Os gráficos das Figuras 36, 37 e 38, apresentam os resultados para essa configuração.

**Figura 36** – Gráfico comparativo entre o *First-Fit-Core* e o algoritmo proposto (MSCL) para a topologia NSFNET, com requisições de 2, 4 e 8 *slots*.



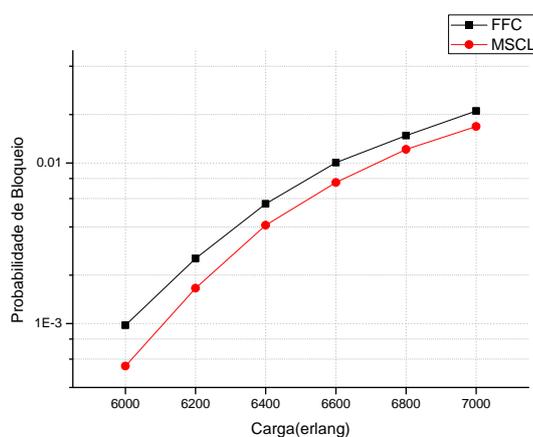
Fonte: o autor.

**Figura 37** – Gráfico comparativo entre o *First-Fit-Core* e o algoritmo proposto (MSCL) para a topologia Japonesa, com requisições de 2, 4 e 8 *slots*.



Fonte: o autor.

**Figura 38** – Gráfico comparativo entre o *First-Fit-Core* e o algoritmo proposto (MSCL) para a topologia Toroidal, com requisições de 2, 4 e 8 *slots*.



Fonte: o autor.

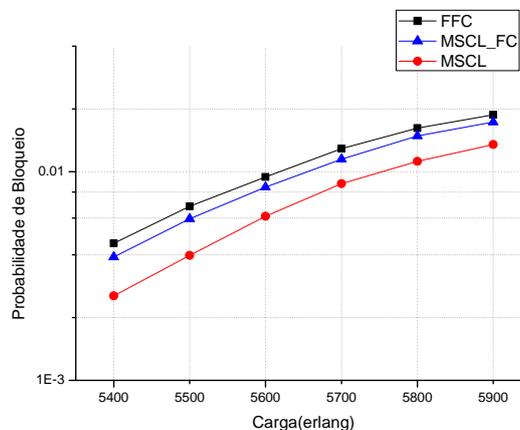
A melhoria do algoritmo proposto é consistente, pois em nenhum ponto de carga os resultados do algoritmo proposto são inferiores ao do FFC. Pode-se verificar que apesar da diminuição do ganho de desempenho para o padrão de tráfego com 2, 4 e 8 *slots* em relação ao padrão com 2, 3, 4 e 5 *slots*, os ganhos ainda são consideráveis para as topologias analisadas. Verifica-se também que a análise do estado da rede presente no algoritmo MSCL apresenta-se como uma alternativa eficiente para a melhoria de desempenho da alocação de espectro em redes EON-MCF.

Para os cenários abordados, constata-se que para um tráfego mais heterogêneo, onde os tamanhos de requisições não se encaixam tão bem (2, 3, 4 e 5 *slots*), a análise do estado da rede torna a adaptação do algoritmo MSCL mais eficiente que o algoritmo FFC, pois reduz o impacto da fragmentação espectral. Para o padrão de requisições que se alinham (2, 4 e 8 *slots*), a diferença entre o MSCL adaptado e o FFC diminui, pois, para este tipo de configuração dos tamanhos de requisições, a adaptação do MSCL apresenta um maior bloqueio para a requisição de maior tamanho (8 *slots*).

Dado o aumento do número de recursos disponíveis para as redes EON-MCF quando comparada às redes EON-SMF, a execução da adaptação do algoritmo MSCL torna-se custosa computacionalmente, podendo levar a um tempo excessivo para a decisão da alocação da conexão. Com o objetivo de reduzir o esforço computacional e ainda assim obter melhores resultados que o algoritmo FFC, o algoritmo MSCL-First-Core (MSCL-FC) é proposto. Para esta proposta, a análise dos conjuntos de *slots* disponíveis é realizada pela política MSCL sequencialmente no conjunto dos núcleos até o primeiro que conseguir acomodar a requisição. Ou seja, caso o núcleo sob análise não possua capacidade, será analisado o próximo núcleo e, no primeiro núcleo com capacidade de alocação, a atribuição de espectro será feita no conjunto que cause a menor perda de capacidade para as rotas interferentes. Os resultados para a topologia NSFNET com conjuntos de tamanho de requisições 2, 4 e 8 *slots* e 2, 3, 4 e 5 *slots* estão representados nas Figuras 39

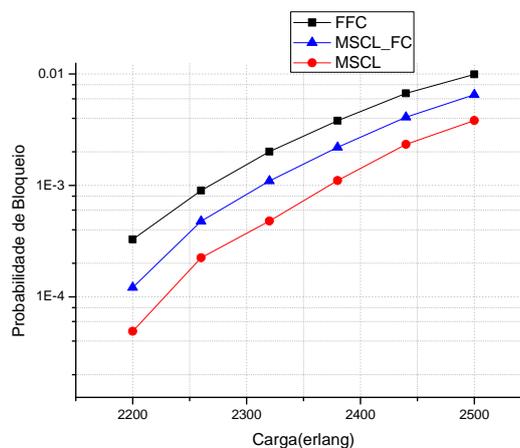
e 40.

**Figura 39** – Gráfico comparativo entre o *First-Fit-Core*, MSCL e o MSCL-FC para a topologia NSFNET, com requisições de 2, 4 e 8 slots.



Fonte: o autor.

**Figura 40** – Gráfico comparativo entre o *First-Fit-Core*, MSCL e o MSCL-FC para a topologia NSFNET, com requisições de 2, 3, 4 e 5 slots.



Fonte: o autor.

Pode-se observar que o MSCL-FC apresenta uma melhora em relação ao FFC com um ganho de aproximadamente 14% e 63% para os pontos de cargas 5400 e 2200 erlang. Por não analisar todas as possibilidades de alocação em todos os núcleos possíveis o MSCL-FC apresenta um menor ganho de desempenho em relação ao MSCL. Em contrapartida, cada ponto simulado no algoritmo MSCL-FC leva um tempo consideravelmente menor para ser executado em relação ao MSCL. Na Tabela 6 está representado o tempo de simulação para os três algoritmos utilizados neste Capítulo, para a topologia NSFNET no ponto de carga de 2200 erlang. Cada algoritmo foi simulado para um total de 7 amostras, com intervalo de confiança de 95%.

**Tabela 6** – Tempo de simulação para os algoritmos simulados.

Algoritmo	Ponto de Simulação (erlang)	Probabilidade de Bloqueio	Tempo (segundos)
First-Fit-Core	2200	0,00039	13,9 ± 0,3
MSCL-First-Core		0,000132	386,6 ± 1,4
MSCL		0,000029	17567 ± 0,97

Fonte: o autor.

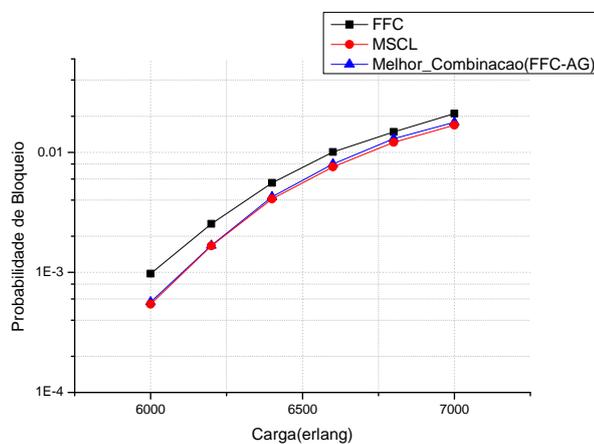
### 5.2.1.1 Comparação entre as propostas MSCL-SDM e FFC-AG

A seguir é realizada uma comparação entre os desempenhos dos algoritmos propostos: MSCL-SDM, a melhor combinação obtida pelo FFC-AG e o FFC para a topologia Toroidal. As comparações foram realizadas para as seguintes configurações:

- 320 *slots* por núcleo e requisições com tamanhos de 2, 4 e 8 *slots*;
- 120 *slots* por núcleo e requisições com tamanhos de 2, 3, 4 e 5 *slots*;

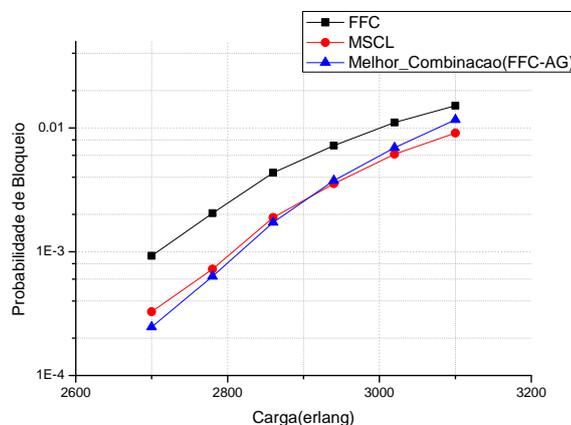
Os pontos de simulação para o FFC-AG foram 6000 e 2700 erlang para as configurações com 320 e 120 *slots*/núcleo respectivamente. Os resultados estão apresentados nas Figuras 41 e 42.

**Figura 41** – Gráfico comparativo entre as propostas MSCL-SDM, a melhor combinação obtida pelo FFC-AG e o FFC, para a topologia Toroidal, com requisições de 2, 4 e 8 *slots*.



Fonte: o autor.

**Figura 42** – Gráfico comparativo entre as propostas MSCL-SDM, a melhor combinação obtida pelo FFC-AG e o FFC, para a topologia Toroidal, com requisições de 2, 3, 4 e 5 *slots*.



Fonte: o autor.

Pode-se observar que para o padrão de tráfego 2, 4 e 8 *slots*, os algoritmos propostos neste trabalho apresentam desempenho bastante similar. Para o padrão de tráfego com 2, 3, 4 e 5 *slots*, o FFC-AG apresenta um melhor desempenho para pontos de carga baixa e a inversão ocorre para cargas mais altas, onde a adaptação do MSCL apresenta uma melhoria de desempenho em relação ao FFC-AG. Para cargas baixas, o FFC-AG agrupa melhor as requisições em determinados núcleos e quase não há competição de requisições com diferentes tamanhos nos núcleos. Para cargas mais altas, essa competição começa a acontecer o que degrada o desempenho do FFC-AG e ressalta a melhoria de desempenho da adaptação do MSCL.

## 6 CONCLUSÕES

Este capítulo tem por objetivo apresentar um fechamento aos assuntos e às técnicas abordadas neste trabalho, que buscou apresentar e discutir heurísticas e meta-heurísticas para a alocação eficiente de recursos em redes que utilizam a multiplexação por divisão espacial. A seguir serão abordadas algumas contribuições deste trabalho para a área de SDM, assim como considerações gerais sobre a dissertação. Neste capítulo também serão abordadas sugestões para trabalhos futuros, que objetivam o prosseguimento da linha de pesquisa desenvolvida neste trabalho.

### 6.1 CONTRIBUIÇÕES E CONSIDERAÇÕES

Dada a recente exploração dos conceitos e tecnologias envolvendo SDM, os novos algoritmos para a solução do problema de alocação de espectro devem se adaptar às novas restrições e evitar problemas já presentes nas redes EON, como a fragmentação espectral. Duas contribuições para a mitigação de tal problema foram desenvolvidas neste trabalho: o uso da meta-heurística MSCL para a alocação de recursos e o uso do algoritmo genético para a distribuição eficiente de classes de requisições em dados núcleos.

Com o intuito de diminuir a probabilidade de bloqueio de requisições (mono-objetivo), pela mitigação da fragmentação espectral, foi proposto um AG que busca agrupar classes de requisições em diferentes núcleos. Os processos presentes no AG proporcionaram a evolução dos indivíduos que, após 50 gerações, apresentaram melhoria de desempenho, quando comparado ao desempenho do algoritmo FFC. Para os pontos em que o AG foi simulado nas topologias abordadas NSFNET, Japonesa e Toroidal, os ganhos obtidos foram de 43, 33 e 35%, respectivamente. Os histogramas apresentados na Seção 4.3 indicam que o número de requisições acomodadas em cada núcleo segue as diferentes ordens para a tentativa de acomodação das requisições. Todo o processo do AG ocorre no tempo de planejamento da rede, portanto, após a operação do AG, as ordens de tentativa para a atribuição de núcleo são preparadas para os diferentes tamanhos de requisições, o que torna o tempo de execução bem próximo ao do FFC.

Como já demonstrado em redes EON-SMF, a análise do estado da rede na alocação de chamadas proporciona uma distribuição mais eficiente de recursos. Com isto em mente, o algoritmo MSCL foi adaptado para as redes SDM. Para esta proposta, um conjunto de *slots* é escolhido no núcleo que cause a menor perda de capacidade possível para as rotas interferentes. Esta proposta deve ser executada no tempo de operação da rede, portanto os cálculos são realizados a cada chegada de uma chamada. A melhoria de desempenho mais significativa foi obtida para o conjunto de requisições com 2, 3, 4 e 5 *slots*, com ganhos de desempenho em relação ao FFC de até 85, 68 e 65 % para as topologias NSFNET, Japonesa e Toroidal, respectivamente.

Para o conjunto de tamanhos de requisições com 2, 4 e 8 *slots*, os ganhos apresentados foram maiores, indicando que, para este conjunto de classes de requisições, a fragmentação espectral aumenta e o desempenho da proposta diminui. Apesar da diminuição do ganho, a melhoria do algoritmo proposto é consistente para os conjuntos de requisições simulados.

## 6.2 TRABALHOS FUTUROS

Devido à relevância e amplitude do assunto abordado, existem diversas possibilidades para a continuidade do trabalho apresentado, com algumas listadas a seguir:

- Consideração de efeitos da camada física, considerações como: *crosstalk* entre núcleos para fibras MCF e interferência entre modos para fibras MF. Utilização de tais efeitos para o desenvolvimento de políticas para a alocação de espectro, com o intuito de evitar ou diminuir a quantidade de *crosstalk*;
- Exploração aprofundada do efeito de diferentes políticas para roteamento em redes SDM, com a verificação do possível impacto no desempenho para diferentes quantidades de rotas alternativas;
- Aplicação da abordagem evolutiva para fibras com multiplexação por núcleos e modos, com o objetivo de encontrar ordens para tentativa do RSCMA que provoquem melhoria de desempenho em relação aos algoritmos mais utilizados;
- Abordagem de heurísticas para RSCMA, com formações de supercanais espectrais e/ou espaciais.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, R. C. et al. An evolutionary spectrum assignment algorithm for elastic optical networks. *International Conference on Transparent Optical Networks*, p. 13–15, 2013. 18, 43, 44
- ALMEIDA, R. C. de A. *Alocação de rota e comprimento de onda em anéis wdm*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, 2001. 15, 19
- BIGOT-ASTRUC, M.; BOIVIN, D.; SILLARD, P. Design and fabrication of weakly-coupled few-modes fibers. *2012 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series, PSST 2012*, v. 1, n. 978, p. 189–190, 2012. 31
- 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. 25
- CHALMERS. *Technologies for spatial-division multiplexing: the next frontier in optical communications*. 2015. Disponível em: <<https://www.chalmers.se/en/projects/Pages/Technologies-for-spatial-division-multiplexingQ-The-next.aspx>>. [Acesso em: 05-Novembro-2018]. 17
- CHATTERJEE, B. C.; OKI, E. Performance evaluation of spectrum allocation policies for elastic optical networks. *International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, v. 2015-Augus, p. 1–4, 2015. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7193485>>. 28, 29
- CHATTERJEE, B. C.; SARMA, N.; OKI, E. Routing and spectrum allocation in elastic optical networks: a tutorial. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, v. 17, n. 3, p. 1776–1800, 2015. 29
- CHEN, C.; BANERJEE, S. Optical switch configuration and lightpath assignment in wavelength routing multihop lightwave networks1. p. 1300–1307, 1995. 24
- CHEN, X.; ZHONG, Y.; JUKAN, A. Multipath routing in elastic optical networks with distance-adaptive modulation formats. *2013 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, p. 3915–3920, 2013. 29
- CHRISTODOULOPOULOS, K.; TOMKOS, I.; VARVARIGOS, E. A. Elastic bandwidth allocation in flexible ofdm-based optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, v. 29, n. 9, p. 1354–1366, 2011. 27
- CISCO. The Zettabyte era: trends and analysis. *Cisco*, n. May 2015, p. 1–29, 2015. 15, 16
- DECASTRO, L. N. et al. *Recent developments in biologically inspired computing*. Hershey, PA, USA: IGI Global, 2004. ISBN 1591403138. 41, 42
- DIJKSTRA, E. W. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, v. 1, n. 1, p. 269–271, 1959. 22
- DORIGO, M. Ant colony optimization. *Scholarpedia*, v. 2, n. 3, p. 1461, 2007. Revision #90969. 41

- DRESSLER, F. et al. Guest editorial bio-inspired networking. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 28, n. 4, p. 521–523, 2010. 42, 44
- DURÁN, R. J. et al. Performance comparison of methods to solve the routing and spectrum allocation problem. *International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, p. 3–6, 2012. 60
- EIBEN, A. E.; SMITH, J. E. *Introduction to evolutionary computing*. 2nd. ed. [S.l.]: Springer Publishing Company, Incorporated, 2015. ISBN 3662448734, 9783662448731. 42
- ELLINAS, G. et al. Network control and management challenges in opaque networks utilizing transparent optical switches. *IEEE Communications Magazine*, v. 42, n. 2, p. S16–S24, feb 2004. Disponível em: <[http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs{\\\_}all.jsp?arnumber=1267097http://ieeexplore.ieee.org/document/12670](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs/all.jsp?arnumber=1267097http://ieeexplore.ieee.org/document/12670)>. 19
- ESSIAMBRE, R.-J. R.-J. et al. Capacity limits of optical fiber networks. *Journal of Lightwave Technology*, v. 28, n. 4, p. 662–701, 2010. 26
- FONSECA, I. E. et al. Meeting optical qos requirements with reduced complexity in dynamic wavelength assignment. In: *First International Conference on Broadband Networks*. [S.l.: s.n.], 2004. p. 331–333. 23, 24
- 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. 16, 25
- GLOVER, F.; KOCHENBERGER, G. A. *Handbook of meta-heuristics*. [S.l.: s.n.], 2003. 42
- GOLDBERG, D. E. *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*. 1st. ed. Boston, MA, USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1989. ISBN 0201157675. 48
- HAYASHI, T. et al. Design and fabrication of ultra-low crosstalk and low-loss multi-core fiber. *Optics Express*, v. 19, n. 17, p. 16576, 2011. Disponível em: <<https://www.osapublishing.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-19-17-16576>>. 30, 31
- HOLLAND, J. H. *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. [S.l.]: The MIT Press, 1992. ISBN 0262581116,9780262581110. 43
- HUANG, H. et al. Virtual network provisioning over space division multiplexed optical networks using few-mode fibers. *Journal of Optical Communications and Networking*, v. 8, n. 10, p. 726, 2016. Disponível em: <<https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=jocn-8-10-726>>. 33
- IGARASHI, K. et al. 114 Space-division-multiplexed transmission over 9.8-km weakly-coupled-6-mode uncoupled-19-core fibers. In: *Optical Fiber Communication Conference Post Deadline Papers*. Washington, D.C.: OSA, 2015. p. Th5C.4. ISBN 978-1-55752-940-4. Disponível em: <<https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?uri=OFC-2015-Th5C.4>>. 17, 31
- 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. 25
- KENNEDY, J.; EBERHART, R. Particle swarm optimization. *Neural Networks, 1995. Proceedings., IEEE International Conference on*, v. 4, p. 1942–1948 vol.4, 1995. 42

- KLINKOWSKI, M.; LECHOWICZ, P.; WALKOWIAK, K. Survey of resource allocation schemes and algorithms in spectrally-spatially flexible optical networking. *Optical Switching and Networking*, v. 27, n. September 2017, p. 58–78, 2018. 34, 35, 37, 38, 39
- KOSHIBA, M. Design aspects of multicore optical fibers for high-capacity long-haul transmission. *2014 International Topical Meeting on Microwave Photonics / the 9th Asia-Pacific Microwave Photonics Conference, MWP/APMP 2014 - Proceedings*, p. 318–323, 2014. 17, 33
- 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. 23
- LIRA, C. J. N. de. *Utilização de meta-heurística e de divisão espectral para alocação eficiente de espectro em redes ópticas elásticas*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2016. 42, 67
- LÓPEZ, J. et al. Traffic and power-aware protection scheme in elastic optical networks. *Proceedings of 2012 15th International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium, NETWORKS 2012*, 2012. 26, 27
- MAN, K. F.; TANG, K. S.; KWONG, S. Genetic algorithms: concepts and applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 43, n. 5, p. 519–534, 1996. 43, 46, 50
- MAROM, D. M. et al. Survey of photonic switching architectures and technologies in support of spatially and spectrally flexible optical networking [invited]. *Journal of Optical Communications and Networking*, v. 9, n. 1, p. 1, 2017. Disponível em: <<https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=jocn-9-1-1>>. 33
- MCCULLOCH, W. S.; PITTS, W. A logical calculus nervous activity. *Bulletin of Mathematical Biology*, v. 52, n. 1, p. 99–115, 1990. 41
- MORIOKA, T. et al. Enhancing optical communications with brand new fibers. *IEEE Communications Magazine*, v. 50, n. 2, p. 31–42, 2012. 30
- MOURA, P. M.; Da Fonseca, N. L. Routing, core and spectrum assignment based on connected component labelling for sdm optical networks. *2016 IEEE International Conference on Communications, ICC 2016*, 2016. 39
- MOURA, P. M.; Da Fonseca, N. L. Inscribed rectangles algorithm for routing, core and spectrum assignment for sdm optical networks. *IEEE International Conference on Communications*, 2017. 39
- MUHAMMAD, A.; ZERVAS, G.; FORCHHEIMER, R. Resource allocation for space-division multiplexing: optical white box versus optical black box networking. *Journal of Lightwave Technology*, v. 33, n. 23, p. 4928–4941, 2015. 34
- MUHAMMAD, A. et al. Flexible and synthetic sdm networks with multi-core-fibers implemented by programmable roadms. *European Conference on Optical Communication, ECOC*, n. 1, p. 6–8, 2014. 34
- PEREIRA, H. A. *Análise sistêmica das penalidades de ruído nas redes ópticas transparentes*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2007. 42, 44, 46, 50
- PHOTONICS, R. *LP modes*. 2017. Disponível em: <[https://www.rp-photonics.com/lp\\_modes.html](https://www.rp-photonics.com/lp_modes.html)>. [Acesso em: 05-Maio-2018]. 31, 32

- PHOTONICS, R. *Modes*. 2017. Disponível em: <[https://www.rp-photonics.com/multimode\\_fibers.html](https://www.rp-photonics.com/multimode_fibers.html)>. [Acesso em: 15-Julho-2018]. 31
- PIÓRO, M.; MEDHI, D. *Routing, flow, and capacity design in communication and computer networks*. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2004. ISBN 0125571895. 37
- PROIETTI, R. et al. 3D elastic optical networking in the temporal, spectral, and spatial domains. *IEEE Communications Magazine*, v. 53, n. 2, p. 79–87, 2015. 31
- RAMAMURTHY, B. et al. Transparent vs. opaque vs. translucent wavelength-routed optical networks. In: *OFC/IOOC . Technical Digest. Optical Fiber Communication Conference, 1999, and the International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication*. IEEE. p. 59–61. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/767791/>>. 20
- RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K. N.; SASAKI, G. H. *Optical network: a practical perspective*. Third. [S.l.]: Morgan Kaufmann, 1998. 21
- RANDHAWA, R.; KALER, R. S.; SINGAL, A. Performance evaluation of algorithms for wavelength assignment in optical ring network. *Optik*, Elsevier GmbH., v. 124, n. 1, p. 78–81, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijleo.2011.11.070>>. 23, 24
- RICHARDSON, D. J.; FINI, J. M.; NELSON, L. E. Space-division multiplexing in optical fibres. *Nature Photonics*, Nature Publishing Group, v. 7, n. 5, p. 354–362, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/nphoton.2013.94>>. 30
- ROSENBLATT, F. *The perceptron - a perceiving and recognizing automaton*. 1957. 460–1 p. 41
- ROTTONDI, C. et al. Routing, modulation format, baud rate and spectrum allocation in optical metro rings with flexible grid and few-mode transmission. *Journal of Lightwave Technology*, v. 35, n. 1, p. 61–70, 2017. 33
- RUMIPAMBA-ZAMBRANO, R. et al. Influence of the spatial super channel guard-band width on the performance of dynamic flex-grid/sdm optical core networks. *International Conference on Transparent Optical Networks*, v. 2016-August, p. 3–6, 2016. 36
- RYF, R. et al. Physical layer transmission and switching solutions in support of spectrally and spatially flexible optical networks. *IEEE Communications Magazine*, v. 53, n. 2, p. 52–59, 2015. 33
- RYF, R. et al. Mode-division multiplexing over 96 km of few-mode fiber using coherent 6x6 mimo processing. *Journal of Lightwave Technology*, v. 30, n. 4, p. 521–531, 2012. 31
- SAKAGUCHI, J. et al. Realizing a 36-core, 3-mode fiber with 108 spatial channels. In: *Optical Fiber Communication Conference Post Deadline Papers*. Washington, D.C.: OSA, 2015. p. Th5C.2. ISBN 978-1-55752-940-4. Disponível em: <<https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?uri=OFC-2015-Th5C.2>>. 31
- SALEH, A. a. M.; SIMMONS, J. M. All-optical networking - evolution , benefits , challenges , and future vision. *Proceedings of the IEEE*, v. 100, n. 5, p. 1105–1117, 2012. 19
- SANTOS, A. F. et al. Adaptação do algoritmo bsr para redes ópticas slice. p. 512–525, 2013. 28

- SARIDIS, G. M. et al. Survey and evaluation of space division multiplexing: from technologies to optical networks. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, v. 17, n. 4, p. 2136–2156, 2015. 30, 31, 32
- SHARIATI, B. et al. Evaluation of the impact of spatial and spectral granularities on the performance of spatial superchannel switching schemes. *International Conference on Transparent Optical Networks*, v. 2016-August, p. 1–4, 2016. 16, 17, 34
- SHI, Z. et al. Contaminated area-based rsca algorithm for super-channel in flex-grid enabled sdm networks. p. 4–6, 2016. 36
- SHUKLA, A.; PANDEY, H. M.; MEHROTRA, D. Comparative review of selection techniques in genetic algorithm. p. 515–519, 2015. 44, 46
- SIRACUSA, D. et al. Resource allocation policies in sdm optical networks (invited paper). *2015 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, p. 168–173, 2015. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7127293>>. 31, 34, 39
- SOMANI, A. *Survivability and traffic grooming in wdm optical networks*. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2011. ISBN 0521369967, 9780521369961. 20
- SONE, Y. et al. Routing and spectrum assignment algorithm maximizes spectrum utilization in optical networks. *37th European Conference and Exposition on Optical Communications*, n. Point 1, p. Mo.1.K.3, 2011. Disponível em: <<https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?uri=ECOC-2011-Mo.1.K.3>>. 60
- STIAKOIANNAKIS, I. et al. Dynamic cooperative spectrum sharing and defragmentation for elastic optical networks. *Journal of Optical Communications and Networking*, v. 6, n. 3, p. 259, 2014. Disponível em: <<https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=jocn-6-3-259>>. 29
- SUBRAMANIAM, S.; BARRY, R. Wavelength assignment in fixed routing wdm networks. *Proceedings of ICC'97 - International Conference on Communications*, v. 1, p. 406–410. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/605312/>>. 22
- TAKENAGA, K. et al. Reduction of crosstalk by trench-assisted multi-core fiber. *Optical fiber communication conference*, p. OWJ4, 2011. Disponível em: <<http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?uri=OFC-2011-OWJ4>>. 30, 31
- TELECOMMUNICATIONS, N. I. of. *Modeling and optimization of space division multiplexing (sdm) elastic optical networks*. 2017. Disponível em: <<https://www.itl.waw.pl/en/national-projects-and-research-programs/projects-funded-by-ncn-and-ncbir/projekt-sdm>>. [Acesso em: 05-Novembro-2018]. 17
- TELECOMUNICAÇÕES, I. de. *Optical technologies for spatial division multiplexing (sdm)*. 2018. Disponível em: <<https://www.it.pt/Projects/Index/4534>>. [Acesso em: 05-Novembro-2018]. 17
- TODE, H.; HIROTA, Y. Routing , spectrum and core assignment on sdm optical networks ( invited ). *Optical Fiber Communication Conference 2016*, v. 9, n. 1, p. 5–7, 2016. 17, 31, 39, 65
- WALDMAN, H.; FILHO, J. F. M. Slot assignment strategy to reduce loss of capacity of contiguous-slot path requests in flexible grid optical networks. n. FEBRUARY, p. 3–5, 2013. 18, 28, 60, 64, 67

- WALKOWIAK, K. et al. Ilp modeling of flexgrid sdm optical networks. *2016 17th International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium, Networks 2016 - Conference Proceedings*, p. 121–126, 2016. 38
- WANG, R.; MUKHERJEE, B. Spectrum management in heterogeneous bandwidth networks. *GLOBECOM - IEEE Global Telecommunications Conference*, v. 50, p. 2907–2911, 2012. 28
- WINZER, P. J. Spatial multiplexing in fiber optics: the scaling of metro/core capacities. *Bell Labs Technical Journal*, v. 19, p. 22–30, 2014. 15, 16, 30
- YE, F. et al. Wavelength-dependence of inter-core crosstalk in homogeneous multi-core fibers. *IEEE Photonics Technology Letters*, v. 28, n. 1, p. 27–30, 2015. 31
- 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. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.127.5171{&}rep=rep1{&}ty>>. 22
- 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. 25, 26
- ZHANG, J. et al. 400 g transmission of super-nyquist-filtered signal based on single-carrier 110-gbaud pdm qpsk with 100-ghz grid. *Journal of Lightwave Technology*, v. 32, n. 19, p. 3239–3246, Oct 2014. 25

## APÊNDICE A – FUNÇÃO PARA ADAPTAÇÃO DO MSCL PARA REDES SDM

---

### Algoritmo 1 MSCL para redes MCF.

---

**Entrada:** Conjunto de todas as rotas entre os pares de nós da rede, dado pelo algoritmo de roteamento;

**Saída:**  $S = (S_1, S_2, \dots, S_n)$  {Vetor com as posições do conjunto de *slots*, em que será alocada a requisição. Onde  $n$ , representa o tamanho da requisição};

**Saída:**  $N$  {Variável inteira, que representa o núcleo onde será alocada a requisição};

1:  $A = (A_1, A_2, \dots, A_n)$  {Vetor auxiliar, utilizado para armazenar a posição atual do conjunto de *slots* que causará menor perda de capacidade};

2:  $B$  {Variável auxiliar, utilizada para armazenar a posição atual do núcleo que causará a menor perda de capacidade};

3:  $K = (K_1, K_2, \dots, K_x)$  {Vetor, onde cada elemento informa o conjunto de *slots* e o núcleo da possível alocação};

4:  $M_{perda}$  {Variável para armazenar a menor perda de capacidade total}  $\leftarrow$  inicializa a variável;

5: **for**  $k = 1$  **to**  $|K|$  {Total de possibilidades de alocação da requisição} **do**

6:  $P$  {Variável para armazenar a perda de capacidade da atual alocação}  $\leftarrow$  inicializa a variável;

7: **for**  $i = 1$  **to**  $|l_r|$  {Conjunto de rotas interferentes à  $r$ } **do**

8:  $P \leftarrow P +$  perda de capacidade da possibilidade de alocação  $k$ , na rota  $i$ ;

9: **end for**

10: **if**  $P < M_{perda}$  **then**

11:  $M_{perda} \leftarrow P$ ;

12:  $A \leftarrow$  posições da possível alocação  $k$ ;

13:  $B \leftarrow$  núcleo da possível alocação  $k$ ;

14: **end if**

15: **end for**

16:  $S \leftarrow A$ ;

17:  $N \leftarrow B$ ;

---

## APÊNDICE B – FUNÇÕES PARA IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO GÊNÉTICO

---

### Algoritmo 2 AG( $P$ ).

---

**Entrada:**  $P = (A_1, A_2, \dots, A_N)$  {População com  $N$  indivíduos};

**Saída:**  $P_{final} = (D_1, D_2, \dots, D_N)$

1:  $P_{aux} = (I_1, I_2, \dots, I_{2N})$  {Vetor auxiliar para os processos de geração de indivíduos.}

2:  $p_m = 0.1$ ; {Probabilidade do gene sofrer mutação}

3:  $G = 50$ ; {Quantidade de gerações}

4:  $N = 50$ ; {Quantidade de indivíduos ao início de cada geração}

5:  $T \leftarrow$  quantidade de tamanhos de requisições;

6:  $C \leftarrow$  quantidade de núcleos;

7:  $A_N = (A_N^1, A_N^2, \dots, A_N^T)$  {Representação cromossômica do indivíduo  $N$ , com tamanho  $T$ .  
Onde  $A_N^1$ , é um vetor de tamanho  $C$  e representa a ordem de tentativa de atribuição de núcleo para determinado tamanho de requisição.}

8: **for**  $g = 1$  **to**  $g = G$  **do**

9:   {Cruzamento}

10:   **while**  $P$  não estiver vazio **do**

11:     Seleção pelo método da roleta de dois indivíduos de  $P$  ( $A_x$  e  $A_y$ );

12:     Remoção dos indivíduos  $A_x$  e  $A_y$  da população  $P$ ;

13:     Inserção dos indivíduos  $A_x$  e  $A_y$  na população  $P_{aux}$ ;

14:     Criação de dois novos indivíduos,  $B$  e  $C$ ;

15:      $pos = \text{ALEATÓRIO}(1, T - 1)$  {Seleção do ponto para cruzamento};

16:      $B^1 \dots B^{pos} \leftarrow A_x^1 \dots A_x^{pos}$ ;

17:      $B^{pos+1} \dots B^T \leftarrow A_y^{pos+1} \dots A_y^T$ ;

18:      $C^1 \dots C^{pos} \leftarrow A_y^1 \dots A_y^{pos}$ ;

19:      $C^{pos+1} \dots C^T \leftarrow A_x^{pos+1} \dots A_x^T$ ;

20:     Inserção de  $B$  e  $C$  em  $P_{aux}$ ;

21:   **end while**

22:   ressimulaPop( $P, P_{aux}$ );

23:   {Mutação}

24:   **for**  $i = 1$  **to**  $i = N$  **do**

25:     Seleção de indivíduo  $A_x$  em  $P$  pelo método da roleta;

26:     Criação de cópia de  $A_x$  em  $B$ ;

27:     Inserção de  $A_x$  em  $P_{aux}$ ;

28:     mutacaoPorCadaGene( $p_m, A_x, B$ );

29:     Remoção do indivíduo  $A_x$  de  $P$ ;

30:     Inserção de  $B$  em  $P_{aux}$ , na posição  $i + 1$ ;

31:   **end for**

32:   ressimulaPop( $P, P_{aux}$ );

33:    $P_{final} \leftarrow P$ ;

34: **end for**

35: **return**  $P$ ;

---

---

**Algoritmo 3**  $\text{ressimulaPop}(P, P_{aux})$ 

---

**Entrada:**  $P = (A_1, A_2, \dots, A_N)$ ,  $P_{aux} = (I_1, I_2, \dots, I_{2N})$ ;

- 1: Ressimulação dos cinco melhores indivíduos em  $P_{aux}$ ;
  - 2: Ordenação de  $P_{aux}$ , de acordo com o valor de aptidão;
  - 3: Seleção semi-elitista. Indivíduos selecionados inseridos em  $P$ ;
  - 4:  $P_{final} \leftarrow P$ ;
- 

---

**Algoritmo 4**  $\text{mutacaoPorCadaGene}(p_m, A_x, B)$ 

---

**Entrada:**  $p_m, A_x, B$ ;

- 1: **for all** Genes em  $A_x$  **do**
  - 2:      $p = \text{ALEATÓRIO}(0,1)$ ;
  - 3:     **if**  $p < p_m$  **then**
  - 4:         Troca do conteúdo da posição do Gene atual por outra posição aleatória, em  $B$ ;
  - 5:     **end if**
  - 6: **end for**
-