



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Rafael Augusto Marques da Costa

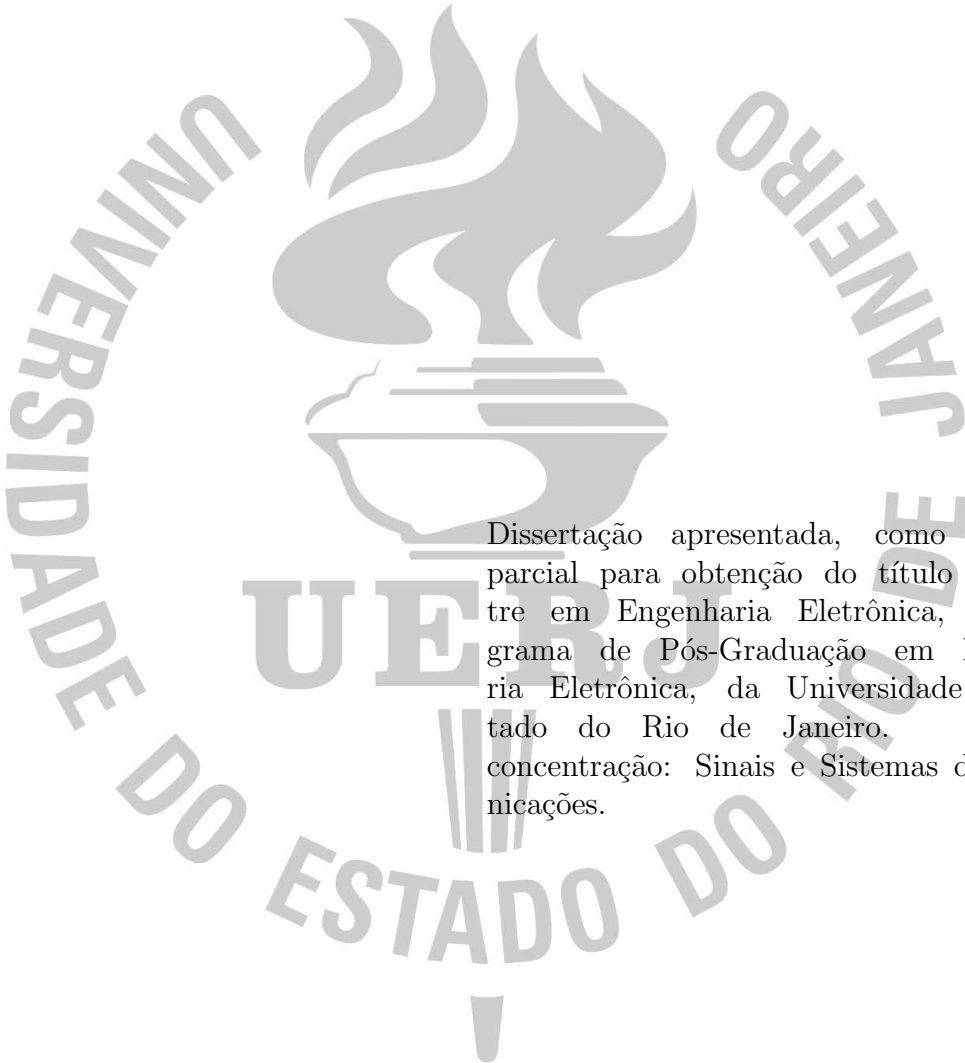
**Roteamento, Nível de Modulação e Alocação de Espectro em
Redes Ópticas Elásticas via Algoritmo Genético**

Rio de Janeiro

2024

Rafael Augusto Marques da Costa

**Roteamento, Nível de Modulação e Alocação de Espectro em Redes Ópticas
Elásticas via Algoritmo Genético**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Eletrônica, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Sinais e Sistemas de Comunicações.

Orientador: Prof. Dr. Lisandro Lovisolo

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Rubinstein

Rio de Janeiro

2024

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

C837 Costa, Rafael Augusto Marques da.
Roteamento, nível de modulação e alocação de espectro em redes
ópticas elásticas via algoritmo genético / Rafael Augusto Marques da
Costa. – 2024.
101 f.

Orientadores: Lisandro Lovisolo, Marcelo Rubinstein.
Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado do Rio de
Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia eletrônica - Teses. 2. Algoritmos genéticos - Teses.
3. Redes remotas (Redes de computadores) - Teses. 4. Ondas
elásticas - Teses. 5. Teoria bayesiana de decisão estatística - Teses. I.
Lovisolo, Lisandro. II. Rubinstein, Marcelo. III. Universidade do Estado
do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. IV. Título.

CDU 004.73

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou
parcial desta tese, desde que citada a fonte.

Documento assinado digitalmente
 **RAFAEL AUGUSTO MARQUES DA COSTA**
Data: 06/02/2025 11:34:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura

17 de dezembro de 2024

Data

Rafael Augusto Marques da Costa

**Roteamento, Nível de Modulação e Alocação de Espectro em Redes Ópticas
Elásticas via Algoritmo Genético**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Eletrônica, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Sinais e Sistemas de Comunicações.

Aprovado em: 17 de dezembro de 2024

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Lisandro Lovisolo (Orientador)

Faculdade de Engenharia - UERJ

Prof. Dr. Marcelo Rubinstein (Orientador)

Faculdade de Engenharia - UERJ

Prof. Dr. José Franco Machado do Amaral

Faculdade de Engenharia - UERJ

Prof. Dr. Murilo Araújo Romero

Escola de Engenharia de São Carlos - USP

Prof. Dr. Vinicius Nunes Henrique Silva

Escola de Engenharia - UFF

Rio de Janeiro

2024

AGRADECIMENTO

Agradeço aos meus amigos por tornarem essa jornada um pouco mais leve e pela parceria nos momentos mais alegres e nos mais difíceis. Em especial, agradeço à minha família por todo o apoio dado durante a realização desta dissertação e processo de pesquisa. Agradeço aos meus pais, irmã e avós, em especial aos meus avós, Antônio Daniel, José Marques e Yolanda Neves, que deixam saudades e que teriam muito orgulho de ver seu neto se tornando mestre.

Agradeço também aos orientadores Lisandro Lovisolo e Marcelo Rubinstein pelo auxílio e suporte acadêmico dado para a construção desta dissertação e de todo o conhecimento transmitido.

RESUMO

Marques, Rafael Augusto. *Roteamento, Nível de Modulação e Alocação de Espectro em Redes Ópticas Elásticas via Algoritmo Genético.* 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, 2024.

A presente dissertação propõe um algoritmo genético (GA - *Genetic Algorithm*) para tratar o problema de Roteamento, Modulação e Alocação de Espectro (RMLSA - *Routing, Modulation Level and Spectrum Assignment*) em Redes Ópticas Elásticas (EONs - *Elastic Optical Networks*). O algoritmo possui uma função de avaliação multi-objetivo configurada para minimizar simultaneamente o bloqueio de demandas e a fragmentação espectral da rede. Além disso, foi proposta uma otimização Bayesiana dos pesos dos parâmetros da função de avaliação do GA proposto. Essa abordagem permite encontrar uma configuração mais eficiente, a partir de um método de otimização que verifica o equilíbrio entre os critérios de desempenho de forma adaptativa. Os resultados demonstram um melhor desempenho em comparação com um algoritmo voraz, evidenciando a eficácia do algoritmo genético proposto.

Palavras-chave: Redes Ópticas Elásticas; RMLSA; DWDM; Algoritmo Genético; Otimização Bayesiana.

ABSTRACT

Marques, Rafael Augusto. *Routing, Modulation Level and Spectrum Allocation in Elastic Optical Networks via Genetic Algorithm*. 103 p. Dissertation (Master in Electronic Engineering) - Faculty of Engineering, State University of Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, 2024.

This thesis proposes a genetic algorithm (GA) to address the problem of Routing, Modulation, and Spectrum Assignment (RMLSA) in Elastic Optical Networks (EONs). The algorithm features a multi-objective evaluation function, configured to simultaneously minimize demand blocking and spectral fragmentation in the network. Additionally, a Bayesian optimization approach was proposed to adjust the weights of the parameters in the evaluation function of the proposed GA. This approach enables finding a more efficient configuration by employing an optimization method to adaptively balance the performance indicators. The results demonstrate improved performance compared to a greedy algorithm, highlighting the effectiveness of the proposed genetic algorithm.

Keywords: Elastic Optical Networks; RMLSA; DWDM; Genetic Algorithm; Bayesian Optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comparação entre caminhos ópticos que utilizam a grade fixa e a grade flexível. Fonte: Após [7].	22
Figura 2 - Rede ilustrativa de três nós para exemplificar as restrições de contiguidade e continuidade.	27
Figura 3 - Um exemplo do problema de fragmentação e da redução dos seus efeitos utilizando técnicas de desfragmentação. Fonte: Após [15].	48
Figura 4 - Codificação do cromossomo usando a tabela auxiliar.	53
Figura 5 - Rede estadunidense NSFNET. Fonte: [46].	64
Figura 6 - CDFs do bloqueio, da fragmentação, do percentual de taxa de transmissão atendida e da ocupação do GA e Voraz com 30 demandas.	68
Figura 7 - CDFs do bloqueio, da fragmentação, do percentual de taxa de transmissão atendida e da ocupação do GA e Voraz com 75 demandas.	69
Figura 8 - CDFs do bloqueio, da fragmentação, do percentual de taxa de transmissão atendida e da ocupação do GA e Voraz com 100 demandas.	69
Figura 9 - CDFs do bloqueio, da fragmentação, do percentual de taxa de transmissão atendida e da ocupação do GA e Voraz com 150 demandas.	70
Figura 10- CDFs do bloqueio, da fragmentação, do percentual de taxa de transmissão atendida e da ocupação do GA para fa_2 (ver equação (21)) e fa_3 (ver equação (22)) com 100 demandas de entrada.	71
Figura 11- CDFs para 75 demandas nos três esquemas de ordenação de demandas (RO, MSF e TTD).	72
Figura 12- CDFs para 100 demandas nos três esquemas de ordenação de demandas (RO, MSF e TTD).	73
Figura 13- CDFs para 150 demandas nos três esquemas de ordenação de demandas (RO, MSF e TTD).	73
Figura 14- CDFs do bloqueio, da fragmentação, do percentual de taxa de transmissão atendida e da ocupação do GA para fa_1 e $K = 2$ e $K = 4$ com 100 demandas de entrada.	75

Figura 15- CDFs do bloqueio, da fragmentação, do percentual de taxa de transmissão atendida e da ocupação do GA para $K = 2, 3, 4, 5$ com 100 gerações com 100 demandas de entrada.	75
Figura 16- CDFs de número de saltos por demanda para 75, 100 e 150 demandas nos três esquemas de ordenação de demandas.	77
Figura 17- CDFs de índice da última subportadora (UB) ocupada por enlace para 75, 100 e 150 demandas nos três esquemas de ordenação de demandas.	78
Figura 18- CDFs para bloqueio, fragmentação, percentual da taxa de transmissão atendida e ocupação para o GA puro e GA com a otimização Bayesiana dos pesos da função de avaliação com 150 demandas.	79
Figura 19- Evolução de α usando a otimização Bayesiana – Exemplo 1.	80
Figura 20- Evolução de α usando a otimização Bayesiana – Exemplo 2.	80
Figura 21- PDF valor de α	80
Figura 22- Arquitetura de um transmissor e receptor OFDM. Fonte: Após [48].	92
Figura 23- Representação de duas subportadoras sem uso do prefixo cíclico. (a) sinal transmitido e (b) sinal recebido. Fonte: Após [48].	93
Figura 24- Representação de duas subportadoras OFDM com o prefixo cíclico. (a) sinal transmitido e (b) sinal recebido. Fonte: Após [48].	94
Figura 25- Esquema de funcionamento de um sistema de detecção coerente. Fonte: Após [50].	95
Figura 26- Direcionamento do tráfego permitido com o uso de (a) BVT e (b) SBVT. Fonte: Após [51].	97
Figura 27- Exemplo arquitetura EON. Fonte: Após [51].	98
Figura 28- Exemplo arquitetura BV-OXC. Fonte: Após [51].	98
Figura 29- Agregação elétrica e óptica. Fonte: Após [6].	100
Figura 30- Amplificadores ópticos de linha. Fonte: Após [56].	102
Figura 31- Funcionamento esquemático de um amplificador EDFA. Fonte: Após [57].	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Formato de modulação e taxa de transmissão de cada subportadora OFDM para uma banda passante (B) de 12,5 GHz.	26
--	----

LISTA DE SIGLAS

BER	<i>Bit Error Rate</i>
BF	<i>Best-Fit</i>
BGP-LS	<i>Border Gateway Protocol - Link State</i>
BPF	<i>Band Pass Filter</i>
bps	<i>bits por segundo</i>
BV-OXC	<i>Bandwidth-Variable Optical Cross-Connect</i>
BV-SSS	<i>Bandwidth-Variable Spectrum Selective Switch</i>
BVT	<i>Bandwidth-Variable Transponder</i>
BV-WXC	<i>Bandwidth-Variable Wavelength Cross-Connect</i>
CO-OFDM	<i>Coherent Optical - Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
CS	<i>Complete Sharing</i>
CWDM	<i>Coarse Wavelength Division Multiplex</i>
D/A	Conversor Digital-para-Analógico
DC	<i>Data Center</i>
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i>
DP	<i>Dedicated Partition</i>
DWDM	<i>Dense Wavelength Division Multiplex</i>
EDF	<i>Erbium-Doped Fiber</i>
EDFA	<i>Erbium-Doped Fiber Amplifier</i>
EF	<i>Exact-Fit</i>
EON	<i>Elastic Optical Network</i>
FF	<i>First-Fit</i>
FLEF	<i>FirstLastExactFit</i>
GA	<i>Genetic Algorithm</i>
GB	<i>Guard Band</i>
GI	<i>Guard Insertion</i>
GMPLS	<i>Generalized MultiProtocol Label Switching</i>

I/Q	<i>In Phase/Quadrature</i>
IA	<i>Inteligência Artificial</i>
IDFT	<i>Inverse Discrete Fourier Transform</i>
IETF	<i>Internet Engineering Task Force</i>
ILA	<i>In Line Amplifier</i>
ILP	<i>Inductive Logic Programming</i>
ISI	<i>Inter-Symbol-Interference</i>
IS-IS-TE	<i>Intermediary system - Intermediary System - Traffic Engineering</i>
ITU-T	<i>International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector</i>
LDPS	<i>Link-Disjoint Path Search</i>
LF	<i>Last-Fit</i>
LMP	<i>Link Management Protocol</i>
LO	<i>Local Oscillator</i>
LPF	<i>Low Pass Filter</i>
LSP	<i>Lable Switched Path</i>
MILP	<i>Mixed Inductive Logic Programming</i>
MSCL	<i>Minimum Slot-Continuity Capacity Loss</i>
MSF	<i>Most Subcarriers First</i>
OEO	<i>Óptico-Eletro-Óptico</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OLA	<i>Optical Line Amplifier</i>
OSNR	<i>Optical Signal to Noise Ratio</i>
OSPF-TE	<i>Open Shortest Path First - Traffic Engineering</i>
PCE	<i>Path Computation Element</i>
PDF	<i>Probability Density Function</i>
PGA	<i>Permutation-Genetic Algorithm</i>
PMD	<i>Polarization Mode Dispersion</i>
PP	<i>Pseudo-Partition</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
QoT	<i>Quality of Transmission</i>

RF	<i>Random-Fit</i>
RGA	<i>Routing-Genetic Algorithm</i>
RIP	<i>Routing Information Protocol</i>
RMLSA	<i>Routing, Modulation Level, and Spectrum Allocation</i>
RO	<i>Random Order</i>
ROADM	<i>Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexers</i>
ROADM-CDC	<i>ROADM-Colorless-Directionless-Contentionless</i>
RPGA	<i>Routing-Permutation-Genetic Algorithm</i>
RSA	<i>Routing and Spectrum Allocation</i>
RSVP-TE	<i>Resource ReSerVation Protocol - Traffic Engineering</i>
RWA	<i>Routing and Wavelength Assignment</i>
S/P	Conversor Série-para-Paralelo
SA	Sistema Autônomo
SBVT	<i>Sliceable Bandwidth-Variable Transponder</i>
SDN	<i>Software Defined Network</i>
SLICE	<i>Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Network</i>
SP	<i>Shared Partition</i>
SSA	<i>Split Spectrum Approach</i>
TED	<i>Traffic Engineering Database</i>
TTD	Taxa de Transmissão Decrescente
UB	Última Subportadora
VNF	<i>Virtual Network Function</i>
VNF-SC	<i>Virtual Network Functions - Service Chain</i>
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>
WSS	<i>Wavelength Selective Switching</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

C	Taxa de Transmissão da Demanda
B	Largura de Banda Alocada
M	Nível de Modulação
$m^{(d)}$	Nível de modulação atribuído à demanda d
C_{slice}	Largura de Banda de Cada Fatia
m_k ou b_m	Quantidade de Bits por Símbolo
$b_m^{(d)}$	Quantidade de bits por símbolo atribuída à demanda d
S_g	Banda de Guarda
S_k	Número Mínimo de Fatias Requerido
A	Matriz de Adjacências
G	Grafo de Topologia de Rede
E	Número de Enlaces da Rede
V	Número de Nós da Rede
i	Nó de Origem de um Enlace
j	Nó de Destino de um Enlace
D	Conjunto de Demandas de Entrada da Rede
k	Número da Rota
$R^{(d)}$	Taxa de Transmissão da Demanda
F	Conjunto de Fatias Disponíveis em Cada Enlace
F_{total}	Quantidade de Fatias Totais por Enlace
n	Genes do Cromossomo
fa_1	Primeira Função de Avaliação
fa_2	Segunda Função de Avaliação
fa_3	Terceira Função de Avaliação
f_B	Função de Avaliação do GA otimizado com o Bayesiano
F	Quantidade de fatias disponíveis no enlace
$f_i^{(d)}$	Índice da primeira fatia de uma demanda
$f_f^{(d)}$	Índice da última fatia de uma demanda

H	Tabela Auxiliar para Codificação do Cromossomo
$P_{ij}^{(d)}$	Conjunto de rotas para cada demanda
$P_{ij}^{(k,d)}$	Rota k atribuída à demanda d
b_d^m	Número de fatias espectrais requeridas para alocar a demanda
β_m	Distância máxima suportada por cada nível de modulação
$\alpha^{(d)}$	Comprimento de cada rota
α_t	Valor atual da variável α
α_{t-1}	Valor anterior da variável α
σ	Significância do Critério de Parada
$X_{b_m}^{(d)}$	Indica se um nível de modulação foi atribuída a uma demanda
$Y_{e,f}^{(d)}$	Indica se uma demanda está alocada em uma fatia em um enlace
$Y_f^{(d)}$	Indica se uma demanda está alocada em uma fatia f
$W_k^{(d)}$	Indica se uma rota foi atribuída a uma demanda
$Saltos^{(d)}$	Número de Saltos por Demanda
X	População Inicial
GB	Banda de Guarda
$quant_demandas_bloq$	Quantidade de Demandas Bloqueadas
$quant_demandas_totais$	Quantidade de Demandas Totais
$quant_enl$	Quantidade de Enlaces Ocupados
$quant_fatias_lacunas$	Quantidade de Fatias na Lacuna
$total_fatias$	Quantidade de Fatias do Enlace
$o^{(d)}$	Variável lógica que indica demanda alocada ou bloqueada
$quant_fatias_ocupadas$	Quantidade de Fatias Ocupadas
$quant_nos$	Quantidade de Nós da rota de uma Demanda
$maior_índice_alocado$	Posição da Última Fatia da Demanda do Enlace

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	17
1	REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS	19
1.1	Redes WDM Tradicionais	19
1.2	EON - Conceitos Básicos	20
1.3	O Problema RMLSA	23
1.3.1	Roteamento.....	23
1.3.2	Modulação.....	25
1.3.3	Alocação de Espectro	26
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DO PROBLEMA RMLSA	29
2.1	Políticas de alocação de espectro	29
2.2	Técnicas de otimização discreta.....	32
2.3	Resolução do problema RMLSA via Inteligência Artificial (IA)	37
2.4	Redes virtuais e redes definidas por <i>software</i>	38
2.5	Algoritmos de desfragmentação de espectro.....	40
2.6	Otimização Bayesiana em combinação com Algoritmos Genéticos	41
3	MODELAGEM DO PROBLEMA RMLSA E ÍNDICES DE DE- SEMPENHO	43
3.1	Modelagem do Problema RMLSA	43
3.2	Índices de Desempenho	46
3.2.1	Bloqueio de Demandas	46
3.2.2	Fragmentação de Espectro	47
3.2.3	Ocupação Espectral.....	48
3.2.4	Percentual da Taxa de Transmissão Atendida	48
3.2.5	Número de Saltos por Demanda	49
3.2.6	Índice da Última Subportadora Ocupada por Enlace	50
3.2.7	Outros Aspectos de Desempenho	50
3.3	Solução Voraz	51

4	ALGORITMO GENÉTICO PROPOSTO	53
4.1	Pseudocódigo do GA Proposto.....	54
4.2	Funções de Avaliação	55
4.3	Parâmetros de Avaliação e de Controle	57
5	PARÂMETROS DO GA A PARTIR DE OTIMIZAÇÃO BAYE- SIANA	59
5.1	Teorema de Bayes.....	59
5.2	Otimização Bayesiana	59
5.3	Pseudocódigo da Otimização Bayesiana Proposto	61
6	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	63
6.1	Condições de Simulação	63
6.2	Topologia de Rede	63
6.3	Demandas Ofertadas.....	64
6.4	Estudo do Parâmetro K	65
6.5	Estudo da Ordenação das Demandas	65
6.6	Otimização Bayesiana	66
7	RESULTADOS	68
7.1	Performance Comparativa Algoritmo Genético x Algoritmo Voraz	68
7.2	Estudo da Influência do Bloqueio e Fragmentação	70
7.3	Estudo da Ordenação de Demandas	71
7.4	Estudo do Parâmetro K	74
7.5	Número de Saltos por Demanda e Índice da Última Subportadora Ocupada por Enlace	76
7.6	Otimização Bayesiana	78
	CONCLUSÃO	82
	REFERÊNCIAS	84
A	CO-OFDM	90
B	A ARQUITETURA EON	96

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, houve um aumento exponencial na demanda de tráfego de dados, exigindo melhorias significativas da infraestrutura de rede para comportá-la e oferecer serviços de comunicações adequados. As redes ópticas WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) se apresentam como uma alternativa para suportar as demandas resultantes no núcleo da rede. Serviços de *streaming*, redes móveis 5G, serviços de videoconferência, serviços de processamento em nuvem e aplicações como jogos online, IoT, entre outros, aumentaram ainda mais a demanda por cada vez mais largura de banda das redes WDM. Em resposta, surgiram as redes ópticas elásticas (EONs - *Elastic Optical Networks*) [1] com alocação mais flexível de bandas espectrais. As EONs oferecem capacidade aprimorada de lidar com a variedade de taxas demandadas da rede.

A alocação de rotas para atender às demandas da rede implica a escolha de níveis de modulação e faixas espectrais para atendimento das demandas. Tal problema é conhecido como Roteamento, Modulação e Alocação de Espectro (RMLSA - *Routing, Modulation Level, and Spectrum Assignment*) e trata da escolha de rotas entre os nós de origem e de destino das demandas, os seus níveis de modulação e as faixas espectrais necessárias, ao mesmo tempo que procura maximizar a quantidade de demandas atendidas ou outros compromissos de desempenho, utilizando os recursos da rede de forma eficiente [1].

Nesta dissertação, investiga-se a solução do RMLSA utilizando um algoritmo genético (GA - *Genetic Algorithm*) para buscar soluções; emprega-se uma função de avaliação que busca minimizar a fração de demandas bloqueadas e a fragmentação do espectro. Além disso, o GA proposto é avaliado em uma pluralidade de índices de desempenho como: bloqueio de demandas, fragmentação de espectro, percentual de taxa de transmissão atendida, ocupação espectral da rede, número de saltos por demanda e índice da última subportadora ocupada por enlace. Este algoritmo teve seu desempenho comparado com um algoritmo Voraz. Adicionalmente, propusemos um segundo algoritmo GA com a utilização de otimização Bayesiana para encontrar os melhores pesos para o bloqueio e a fragmentação na função de avaliação.

Este trabalho foi publicado no XLII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais [2] e no IEEE *Latin-American Conference on Communications* [3],

ambos de 2024.

A seguir, a organização do trabalho é apresentada. O Capítulo 1 discorre sobre EONs e o problema RMLSA. O Capítulo 2 trata da revisão bibliográfica dos algoritmos RMLSA. O Capítulo 3 trata do modelo matemático empregado neste trabalho juntamente com os índices de desempenho de rede. O Capítulo 4 apresenta o algoritmo genético proposto. O Capítulo 5 apresenta o algoritmo genético proposto com a otimização Bayesiana. O Capítulo 6 traz informações sobre a implementação e os cenários de testes. O Capítulo 7 apresenta os resultados obtidos. Por fim, a Conclusão do trabalho é apresentada.

1 REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS

Neste capítulo, descrevemos as redes WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) e as Redes Ópticas Elásticas (EONs - *Elastic Optical Network*) que serão objeto de estudo desta dissertação.

1.1 Redes WDM Tradicionais

As redes WDM são redes ópticas que permitem a transmissão de vários fluxos de dados ou sinais simultaneamente usando a técnica de multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM); isto é, elas empregam comprimentos de onda distintos dentro de uma mesma fibra óptica. Aperfeiçoando a capacidade de transmissão de dados dentro de uma mesma fibra óptica, o WDM apresenta duas variantes: o DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) e o CWDM (*Coarse Wavelength Division Multiplexing*), que se diferenciam pelo espaçamento entre os canais transmitidos, de forma que o DWDM permite o uso de mais canais em uma mesma fibra [4].

Neste trabalho, iremos nos referir a redes ópticas WDM tradicionais, aquelas cujo espectro de frequência é dividido de forma fixa, em que cada canal (ou comprimento de onda ou caminho óptico) dispõe de uma largura de banda normalmente de 50 GHz, independentemente da sua taxa de transmissão; ou seja, emprega-se assim o que se chama de grade fixa. Esta modalidade pode incorrer numa redução na eficiência de utilização do espectro de frequência, uma vez que é necessário alocar todos os recursos de um comprimento de onda específico por canal, mesmo que ele não empregue toda essa largura de banda [5].

Nas redes WDM, os dados são transmitidos em canais ópticos. O canal óptico é definido por uma frequência central e uma largura de banda – a largura de banda pode ser igual para todos os canais no caso das redes WDM tradicionais ou diferente em EONs, nas quais as larguras dos canais são flexíveis. Um canal óptico é identificado pela sua frequência central em Terahertz (THz) ou pelo seu comprimento de onda central em nanômetros [4]. Dessa forma, para este trabalho, os termos canal óptico e comprimento de onda serão usados como sinônimos.

Os caminhos ópticos ou circuitos ópticos são conexões ópticas formadas entre um nó de origem e um nó de destino, usando um mesmo comprimento de onda em cada

enlace intermediário. Nos nós intermediários da rede, os caminhos ópticos são roteados de uma porta óptica para outra. Em redes WDM tradicionais, dois ou mais caminhos ópticos diferentes em uma rede podem usar um mesmo comprimento de onda, desde que os caminhos entre os nós de origem e os nós de destino não usem um mesmo enlace intermediário [4].

A principal desvantagem das redes WDM tradicionais frente às EONs é ter que acomodar a pluralidade de taxas de transmissão de dados distintas demandadas por diferentes nós e serviços das redes contemporâneas, pois fornecem pouca flexibilidade de alocação espectral, fazendo com que parte do espectro seja desperdiçada. Além disso, a largura de banda fixa de 50 GHz por canal, ou até mesmo de 100 GHz, impossibilita taxas de transmissão superiores a 400 Gbps. Com o intuito de melhorar o aproveitamento de espectro, proporcionar flexibilidade na acomodação de demandas e de atingir taxas de transmissões maiores, as EONs foram propostas.

Nos referiremos às EONs como uma nova geração de redes WDM, cujo espectro de frequência é dividido de forma flexível, como será conceituado na Seção 1.2 a seguir.

1.2 EON - Conceitos Básicos

Conforme abordado anteriormente, as EONs são redes WDM que empregam uma alocação de espectro de frequência mais flexível em comparação às gerações anteriores. Existem duas formas de atribuir flexibilidade à alocação de espectro em EONs. A primeira, chamada de modelo sem grade, ocorre quando o caminho óptico emprega uma largura de banda capaz de prover exatamente o que é demandado, sendo a alocação de frequências centrais totalmente flexível/variável. Contudo, devido a uma maior complexidade e a limitações físicas, um segundo modelo, chamado SLICE (Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Network) ou “grade flexível”, foi proposto no artigo [1]. No SLICE, o espectro é dividido em fatias fixas de largura de banda estreitas e cada caminho óptico é formado por uma quantidade de fatias que totalize uma largura de banda próxima à demandada para a provisão do serviço.

Se, por um lado, a segunda abordagem apresenta a priori menor flexibilidade, por outro, a literatura mostra que, com granularidades suficientemente baixas, o desempenho da grade fixa flexível é semelhante ao do modelo sem grade [6]. Por esse motivo, a partir deste ponto, abordaremos apenas o modelo em grade fixa flexível, isto é, de baixa

granularidade com atribuição variável de subportadoras por demanda.

Na segunda arquitetura, o espectro de frequência é dividido em estreitas fatias de largura de banda na forma de subportadoras OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) (conforme o Apêndice A), em que cada canal teria uma quantidade de fatias de acordo com a sua taxa de transmissão demandada ou requisitada para o enlace entre os dois nós, expandindo ou diminuindo de acordo com as variações de tráfego ou novas requisições [1]. Isto é, os recursos são alocados de forma elástica.

Da característica de expandir ou contrair a largura de banda utilizada de acordo com o tráfego ou com requisições, deriva o nome EON. EONs permitem adaptação e adequação para tratar a crescente heterogeneidade das demandas de tráfego atuais, alavancadas por serviços de distribuição de vídeo em alta definição (1080p, 4K, 8K e Realidade Virtual), comunicações de vídeo em tempo real e pela ampla disseminação da banda larga de altas velocidades. Ainda segundo [1], em comparação às redes WDM tradicionais, as EONs proporcionam uma alocação de espectro mais eficiente, permitindo uma melhor acomodação de uma pluralidade de taxas de dados distintas, evitando desperdício de espectro e possibilitando taxas de transmissão mais elevadas que variam de 10 Gbps até vários Tbps por demanda.

A Figura 1 compara as arquiteturas de grade fixa e de grade flexível de forma esquemática, na parte superior, e no domínio do espectro de frequência, na parte inferior. Os nós clientes foram numerados em ambas as ilustrações para melhor visualização das demandas. Na grade fixa, todos os caminhos ópticos recebem a mesma largura de banda espectral independentemente de suas taxas de transmissão. Assim, quando um cliente requer taxa de transmissão menor que a capacidade do canal, há desperdício do espectro (como é o caso do nó cliente 2). Ainda, há desperdício de espectro quando um cliente não utiliza inteiramente a capacidade do canal (como é o caso do nó cliente 1 destacado em azul). Além disso, quando um cliente requer capacidade maior que a disponível em um canal, a demanda é separada em caminhos ópticos distintos (como é o caso do terceiro nó cliente) [7].

Por outro lado, na grade flexível, cada cliente trafega sobre um caminho óptico com largura de banda atribuída mais próxima da taxa de transmissão demandada, diminuindo o desperdício de espectro.

A arquitetura elástica proporciona ainda a segmentação e a agregação de canais.

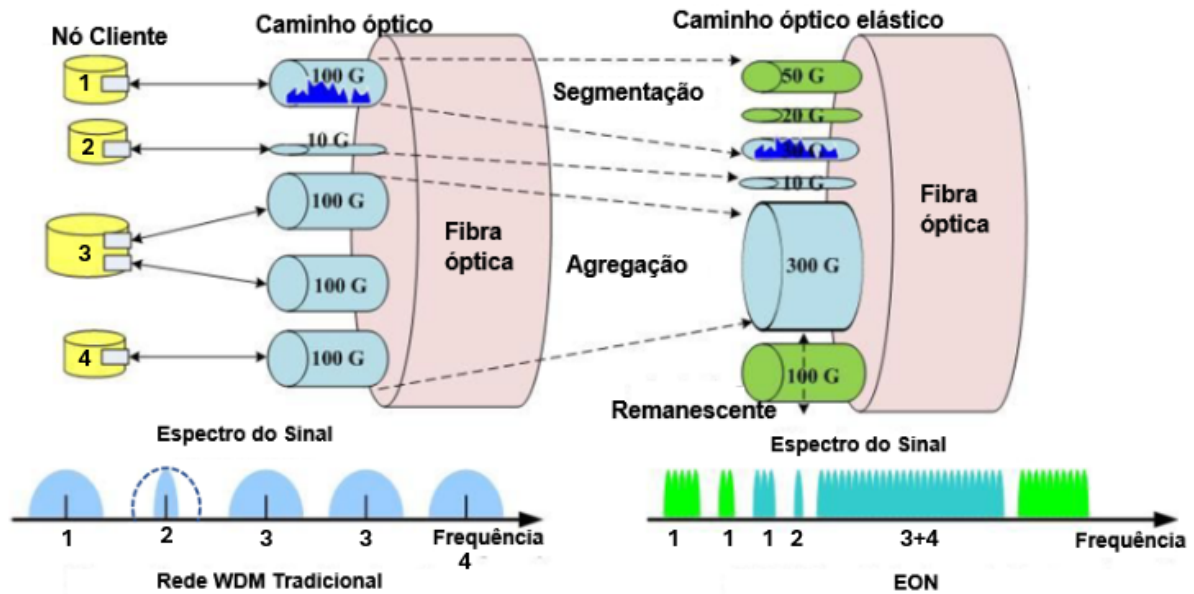


Figura 1 - Comparação entre caminhos ópticos que utilizam a grade fixa e a grade flexível. Fonte: Após [7].

Quando um cliente não utiliza totalmente a capacidade máxima de um canal, é possível segmentar o canal atribuído inicialmente a esse cliente em caminhos ópticos distintos; possibilitando que os recursos de espectro não utilizados sejam remanejados para outros clientes (como é o caso do nó cliente 1 da Figura 1). Já a agregação permite que um cliente cuja demanda seja maior que a capacidade de um canal agregue quantos canais forem precisos para supri-la, agregados em um único caminho óptico (como é o caso dos nós clientes 3 e 4 que foram agregados no lado direito da Figura 1). Diferentes taxas de transmissão e granularidades são possíveis graças às EONs possuírem recursos de agregação e segmentação de largura de banda. A segmentação permite que um cliente cuja demanda seja menor que a demanda máxima do canal utilize apenas parte da taxa de dados desse canal, segmentando o canal em caminhos ópticos distintos chamados “sub-comprimentos” de onda. Por outro lado, a agregação permite que um cliente cuja demanda seja maior que a demanda de um canal agregue quantos canais forem precisos para supri-la, agregados em um único caminho óptico e denominado “super-comprimento” de onda [1]. Essa configuração resulta em uma largura de banda remanescente/residual que pode ser utilizada por um novo caminho óptico, representado em verde do lado direito da Figura 1.

Na parte inferior da figura, as demandas dos nós clientes foram igualmente nume-

radas de forma a permitir a visualização da segmentação da demanda do nó 1 e o espectro remanescente, em verde, além da agregação da demanda dos nós clientes 3 e 4.

A grade flexível das EONs proporciona um melhor gerenciamento dos recursos de espectro, acomodando de forma mais eficiente múltiplas taxas de transmissão e evitando grandes espaçamentos de banda de frequência entre os canais quando há presença de enlaces com taxas de transmissão pequenas, comparativamente ao uso de grade fixa da geração anterior de WDM. Além disso, a grade flexível possibilita que haja caminhos ópticos remanescentes pelo melhor aproveitamento de espectro. Na Figura 1, esses caminhos são representados na cor verde.

A recomendação ITU-T (*International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector*) G.694.1 estabelece granularidades de 12,5 ou 6,25 GHz para cada fatia [8]. Para uma largura de banda total da fibra óptica igual a 4,475 THz [9] e granularidade de 12,5 GHz por fatia, têm-se 358 fatias (ou subportadoras) em cada enlace.

O Apêndice A trata de detalhes do funcionamento da tecnologia CO-OFDM, que permite a flexibilidade de alocação de frequência das EONs por meio de suas subportadoras ortogonais de pequena granularidade. Adicionalmente, o Apêndice B trata da arquitetura da eletrônica necessária para fazer com que a alocação flexível funcione na prática.

1.3 O Problema RMLSA

A seguir, serão tratados individualmente os três eixos do problema RMLSA: Roteamento, Modulação e Alocação de Espectro.

1.3.1 Roteamento

A seleção das rotas ou caminhos físicos das demandas é realizada por algoritmos de roteamento. Algoritmos de roteamento buscam caminhos que apresentem o menor custo entre agregados de comutadores nos nós de origem e destino¹.

Há duas classificações principais para os algoritmos de roteamento [10]: algoritmos

¹O custo é, em geral, uma mistura de métricas que pode envolver um ou mais aspectos dentre: retardo nas filas, congestionamentos, número de enlaces entre origem e destino, distância entre os nós, largura de banda disponível etc [10].

de roteamento global, que detêm/empregam informações completas da topologia da rede, denominados algoritmos de estado de enlace (LS - *Link State*); e algoritmos de roteamento descentralizado, sob demanda, que são os algoritmos de vetor distância (DV - *Distance Vector*).

Em EONs, é importante guardar caminhos livres para prover uma alocação de espectro mais eficiente (ao saber exatamente quais fatias estão disponíveis em todos os enlaces da rede), de forma que algoritmos do tipo LS são mais indicados, já que cada nó da rede guarda informações dos recursos disponíveis na rede inteira. Em especial, os protocolos OSPF-TE (*Open Shortest Path First - Traffic Engineering*) e IS-IS-TE (*Intermediary System - Intermediary System - Traffic Engineering*) são protocolos do tipo LS que carregam informações de engenharia de tráfego e que podem ser usados em EONs com esse objetivo.

Os protocolos OSPF-TE e IS-IS-TE utilizam o algoritmo de Dijkstra para encontrar rotas na rede [10]. Para realizar o roteamento, o algoritmo de Dijkstra calcula o caminho de menor custo entre um nó e todos os outros nós da rede. Dessa forma, todos os nós da rede possuem informações sobre a rota de menor custo para qualquer outro nó da rede. Após a i -ésima iteração do algoritmo, cada nó conhece os caminhos de menores custos para i nós de destino. A quantidade de interações realizada pelo algoritmo depende, portanto, da quantidade de nós conectados na rede [10].

Nos algoritmos de RMLSA, é vantajoso dispor de mais de uma opção de rota para atender cada demanda. Assim, se a primeira rota de menor custo para uma dada demanda não possuir recursos suficientes para atendê-la, pode ser testada uma segunda, uma terceira e assim sucessivamente para alocar uma rota para a demanda; se se atinge a K -ésima rota de menor custo (onde K é um parâmetro configurável) sem nenhuma capaz de atendê-la, a demanda é bloqueada. Tal estratégia é possível usando, por exemplo, o algoritmo de Yen [11] para encontrar as K -rotas de menor custo entre dois pontos da rede. No algoritmo de Yen, a primeira rota de menor custo é encontrada pelo algoritmo de Dijkstra. Para encontrar a segunda rota, o algoritmo divide o caminho mais curto em duas partes: uma “rota raiz” e uma “rota desviada”. A rota raiz é a parte que permanece fixa e a rota desviada sofre a exclusão de um dos nós e seus enlaces. Em seguida, há o recálculo do melhor caminho, obtendo novos caminhos possíveis. Esse processo é iterado K vezes para se obter K -rotas para uma demanda.

1.3.2 Modulação

Na técnica OFDM, cada subportadora pode comportar uma quantidade diferente de bits por símbolo, além de taxas de transmissão distintas, o que garante a flexibilidade no nível de modulação empregado. Dessa forma, é possível que cada caminho óptico (formado pelas portadoras que atendem a uma demanda na rota atribuída a ela) opere num nível de modulação que melhor acomode as características físicas e a taxa de transmissão demandada – desde que todos os caminhos ópticos alocados em um mesmo BVT/SBVT (*Bandwidth-Variable Transponder/Sliceable Bandwidth-Variable Transponder* - ver Apêndice B) utilizem a mesma técnica de modulação, de modo a garantir a ortogonalidade entre as subportadoras OFDM.

Para a escolha do nível de modulação adequado ao caminho óptico, é necessário satisfazer *trade-offs*/compromissos. Quanto maior o nível de modulação, maior a taxa de transmissão da subportadora OFDM e menor pode ser a quantidade de subportadoras necessárias. Porém, quando se aumenta o nível de modulação, diminui-se a distância entre os símbolos da constelação na recepção, implicando menor robustez à atenuação no caminho e ao ruído; e, conseqüentemente, menor será a distância possível do enlace/caminho para uma mesma tolerância ao OSNR (*Optical Signal to Noise Ratio*), ao BER (*Bit Error Rate*) alvo, ou à qualidade de transmissão (QoT) [6].

Observa-se que a taxa de transmissão através de um canal C depende da largura de banda total alocada B e do nível de modulação M via o Teorema da Capacidade do Canal de Shannon [12]

$$B = \frac{C}{\log_2 M}, \quad (1)$$

A quantidade de fatias alocada pode ser obtida dividindo B pela granularidade de fatia configurada para a rede (6,25 ou 12,5 GHz [8]).

Desta forma, dada uma rota para uma demanda, o comprimento do caminho óptico da rota define o nível de modulação empregado, de forma que quanto maior o percurso, menor o nível de modulação para manter uma taxa de erros desejada. Este é o princípio da “modulação adaptativa” usando OFDM: em portadoras diferentes (ou conjuntos de portadoras diferentes), empregam-se modulações distintas em função da condição do canal. Assim, a rota que atende à demanda define o nível de modulação adequado. Similarmente, o nível de modulação define a quantidade de fatias necessárias para atender à capacidade

demandada. Se no caminho óptico não houver tal quantidade de fatias disponíveis, esse caminho não pode atender à demanda, o que exige a escolha de um novo caminho. Tal procedimento pode ser iterado até que a demanda seja alocada ou até que um limiar máximo de tentativas seja atingido. Se há o esgotamento deste limiar, a demanda é bloqueada [13]. Note-se que a estratégia descrita parte de rotas para definir a configuração e os recursos necessários do enlace óptico.

A Tabela 1 relaciona o nível de cada formato de modulação à taxa de transmissão em uma subportadora. Considerando cada fatia com granularidade de 12,5 GHz, é possível calcularmos a taxa de transmissão C em cada fatia/subportadora OFDM em função do nível de modulação via Equação (1). Suponhamos que a demanda de entrada requer 100 Gbps; se o formato de modulação de 64QAM for escolhido, duas fatias (25 GHz) serão necessárias para atender esta demanda. No caso da modulação BPSK, serão necessárias 8 fatias (100 GHz).

Tabela 1 - Formato de modulação e taxa de transmissão de cada subportadora OFDM para uma banda passante (B) de 12,5 GHz.

Formato de Modulação	BPSK	QPSK	8QAM	16QAM	32QAM	64QAM
Nível de Modulação (M)	2	4	8	16	32	64
Taxa de Transmissão (C - Gbps)	12,5	25	37,5	50	62,5	75

1.3.3 Alocação de Espectro

Após o cálculo do caminho de menor custo e do nível de modulação apropriado ao tamanho deste caminho, é iniciada a etapa de alocação de espectro. A alocação de espectro é a atribuição das subportadoras (fatias) que atendem às demandas em cada enlace do caminho entre uma origem e destino da demanda. De um modo geral, em redes WDM tradicionais que utilizam a grade fixa, cada canal possui uma frequência central e uma largura de banda previamente atribuídas. A largura de banda, uma vez selecionada, é igual a todos os canais. Por outro lado, em EONs que utilizam grade flexível, o espectro é dividido em fatias de frequência com granularidade de 12,5 GHz [8] e cada canal pode utilizar uma quantidade de fatias contíguas até alcançar a quantidade necessária para suprir a sua demanda. Este fator torna o problema de alocação de espectro mais complexo, pois as frequências centrais e a largura de banda de cada canal não são mais conhecidas

previamente e há necessidade do Plano de Controle da rede comunicar constantemente a quantidade de fatias contíguas disponíveis para estabelecimento de novos circuitos em cada enlace [14].

Há na literatura diversas políticas para a alocação do espectro. A seguir, apresentamos oito estratégias de alocação utilizadas pelos algoritmos RMLSA.

A estratégia mais utilizada é a *First-Fit* (FF), na qual se escolhe a faixa de frequência disponível a partir das fatias de menores índices. *Last-Fit* (LF) é o inverso da FF, as fatias escolhidas são as de maiores índices. *Random-Fit* (RF), em que a faixa de frequência é escolhida aleatoriamente [15]. *Exact-Fit* (EF), em que a faixa de frequência escolhida corresponde a um bloco com tantas fatias quanto as demandadas, sem considerar o local específico desse bloco no espectro, desde que ele caiba perfeitamente [16]. E *Best-Fit* (BF), em que se escolhe a faixa de frequência cuja quantidade de fatias é a mais próxima da quantidade demandada, evitando sobras [17].

Além disso, há ainda a *Pseudo Partitioning* (PP), que utiliza a política FF para determinados serviços e a LF para outros serviços de acordo com a prioridade do cliente (regras de prioridade podem ser definidas pelo Provedor de Internet) [18]. A *Dedicated Partition* (DP) divide o espectro de acordo com o tipo de demanda, por exemplo, demandas que requerem poucas fatias ficam com os menores índices [19]. E a *FirstLastExactFit* (FLEF) primeiro tenta alocar as demandas usando a FF, o que garante uma alocação rápida, utilizando o primeiro bloco livre adequado; se a FF não encontrar um bloco apropriado, tenta usar a LF; finalmente, se nenhum dos dois critérios for bem-sucedido, a FLEF tenta encontrar um bloco com o tamanho exato (EF) [20].

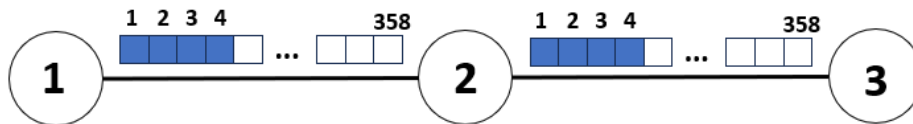


Figura 2 - Rede ilustrativa de três nós para exemplificar as restrições de contiguidade e continuidade.

A Figura 2 ilustra uma demanda trafegando em uma rede de três nós, onde o nó de origem da demanda é o nó 1 e o seu destino é o nó 3. Referencia-se à Figura 2 para exemplificar as duas principais restrições da alocação de espectro em EONs: contiguidade

e continuidade. Na Figura, as 358 fatias espectrais de cada enlace são representadas por quadrados, de modo que os quadrados coloridos representam, as fatias ocupadas e os quadrados em branco, as fatias não ocupadas. Diz-se que o requisito de contiguidade é atendido quando uma demanda pode ser inteiramente alocada em fatias adjacentes, por exemplo as fatias 1 a 4 na Figura 2 no enlace entre o nó 1 e 2. Ao passo que o requisito de continuidade é atendido quando é possível alocar uma demanda nas mesmas fatias de frequência/subportadoras por todos os enlaces entre a origem e o destino, como visto na Figura 2 as fatias 1 a 4 são usadas para alocar a demanda de exemplo em todos os enlaces entre sua origem (nó 1) e seu destino (nó 3). O requisito de contiguidade é necessário para mitigar a fragmentação do espectro, enquanto o requisito de continuidade reduz a complexidade da rede e os seus custos, uma vez que é mais simples e econômico manter a mesma faixa de espectro (fatias alocadas) em todos os enlaces ao longo do caminho, desde a origem até o destino [6].

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DO PROBLEMA RMLSA

Diversos trabalhos tratam do problema RMLSA em EONs. Nossa revisão bibliográfica divide os trabalhos relacionados usando classificações de: políticas de alocação de espectro (Seção 2.1), técnicas de otimização discreta (Seção 2.2), resolução do problema RMLSA via técnicas de Inteligência Artificial (Seção 2.3), redes virtuais e redes definidas por *software* (Seção 2.4), algoritmos de desfragmentação de espectro (Seção 2.5) e otimização Bayesiana em combinação com algoritmos Genéticos (Seção 2.6).

2.1 Políticas de alocação de espectro

O trabalho [12] está relacionado a políticas de alocação de espectro. Mais especificamente, são propostas três políticas de alocação que observam a relação entre recursos de espectro consumidos e a distância limite. É comparado o desempenho das políticas propostas com políticas empregadas pelo estado da técnica (*First-Last-Fit* e algoritmo de *Block-Assignment*).

A política *First-Last-Fit* divide o espectro em várias partições, nas partições ímpares é usada a política *First-Fit* e nas partições pares é usada *Last-Fit*. O algoritmo *Block-Assignment* divide o espectro em blocos de largura $2^0, 2^1, 2^2, 2^3 \dots$ e as conexões que chegam na rede são alocadas em um bloco que comporte a sua quantidade de fatias demandadas.

A Equação 2 calcula a quantidade de fatias que uma demanda requer com base no nível de modulação

$$S_k = \left\lceil \frac{C}{C_{slice} \cdot m_k} \right\rceil + S_g \quad (2)$$

em que S_k é o mínimo número de fatias requerido, C é a taxa da demanda, C_{slice} é a largura de banda de cada fatia, m_k é a quantidade de bits por símbolo e S_g é a quantidade de fatias da banda de guarda.

Em [12], é vantajoso concentrar fatias de frequência ocupadas. Esta observação vem da regra *First-Last-Fit*. Quando estamos concentrando fatias ocupadas em algumas frações do espectro, significa que fatias ociosas também estão concentradas em outras áreas e podem formar grandes blocos de espectro ocioso, diminuindo a fragmentação do espectro.

No algoritmo proposto em [12], o roteamento utiliza o algoritmo Yen e a alocação é feita por *First-Last-Fit*. São introduzidas, então, três políticas para selecionar a rota do algoritmo Yen a partir de relações entre os parâmetros de quantidade de fatias demandas (S_k - chamada de R pelos autores) (rotas diferentes possuem tamanhos diferentes, logo vão requerer um número de fatias diferentes) e a distância entre os blocos das partições usadas pelo *First-Last-Fit* (I).

Na primeira política R:I, um caminho no qual menos recursos são consumidos seria preferencialmente selecionado como rota. As distâncias até o limite de dois blocos só poderão ser comparadas se consumirem o mesmo número de recursos. Na segunda política I:R, o inverso ocorre.

Na última política R+I, uma combinação linear $\alpha R + (1 - \alpha)I$, ($0 < \alpha < 1$), é considerada como o objetivo de otimização, sendo possível ajustar os pesos dados para R ou I de acordo com o valor do α . Observa-se que esta política foi a que retornou a melhor performance com relação à probabilidade de bloqueio quando o α foi definido como 0,4; ou seja, um peso maior para a distância limite entre os blocos do que para a quantidade de fatias demandada. O mesmo ocorreu ao se comparar estas políticas com as outras políticas do estado da técnica (*First-Last-Fit* e algoritmo *Block-Assignment*).

Em [21], há a preocupação com a injustiça no acesso entre diferentes conexões de largura de banda e a fragmentação do espectro na rede, que são apontadas por este trabalho como dois significativos fatores que degradam a eficiência do provisionamento e impactam negativamente as EONs. Em vista disso, é proposta uma métrica de Índice de Fragmentação para capturar a essência da fragmentação e propor uma política de admissão que diferencia caminhos ópticos de largura de banda por particionamento de espectro de forma a alcançar melhor eficiência de provisionamento ao resolver esses dois problemas. São conceituadas a fragmentação horizontal e vertical. A primeira analisa os índices de espectro disponíveis em um enlace, enquanto a segunda analisa em quantos enlaces da rede estes índices estão também disponíveis. Os autores apresentam então a sua métrica de fragmentação por caminho inteiro ao invés de por enlace, abordando a disponibilidade de um menor caminho para alocar demandas.

Dessa forma, são então comparadas quatro abordagens de alocação de espectro: *Complete Sharing* (CS), *Pseudo-Partition* (PP), *Dedicated Partition* (DP) e *Shared Partition* (SP). A abordagem CS é similar à *First-Fit*, em que todo o espectro é compartilhado

de forma indiscriminada entre as demandas e as demandas que chegam ocupam os primeiros índices do espectro. A PP se preocupa com a justiça da alocação e divide o espectro em duas partes, em que demandas grandes são alocadas na primeira parte do espectro e demandas menores são alocadas na segunda.

A DP se preocupa com a justiça e a fragmentação do espectro. Nesta abordagem, o espectro é dividido de acordo com a taxa em que será alocada, havendo regiões do espectro que serão alocadas apenas demandas de 100G, noutra apenas demandas de 400G e assim por diante. Esta abordagem permite diminuir significativamente a fragmentação vertical do espectro, mas não tem efeitos significativos na fragmentação horizontal.

Por fim, a estratégia SP combina a DP com a CS, em que o espectro é dividido de acordo com as demandas, mas mais de um tipo de demanda pode ser alocada em cada região. Por exemplo, uma primeira região recebe sempre demandas de 400G e 1T, outra sempre 100G e 200G etc.

O quesito de justiça é avaliado de acordo com a taxa de bloqueio. Uma alocação é determinada como injusta se há uma grande disparidade da taxa de bloqueio entre cada tipo de demanda. Por exemplo, se as demandas de 100G são sempre alocadas e as demandas de 1T sofrem sempre bloqueio, há uma alocação injusta. Mostra-se que as alocações DP e SP são as mais justas, pois fornecem uma taxa de bloqueio uniforme com a variação das demandas.

Com relação à fragmentação, novamente as alocações DP e SP forneceram menores índices de fragmentação, tendo a DP com uma performance ligeiramente superior. Adicionalmente, é avaliada a eficiência no provisionamento de largura de banda de cada estratégia. Nesse cenário, a SP se mostrou mais eficiente.

Dessa forma, conclui-se que a estratégia SP é a que fornece um melhor equilíbrio entre todos os parâmetros analisados e fornece meios para determinar a quantidade de particionamento e a forma de alocação de demandas em cada particionamento para otimizar a alocação por meio dessa estratégia.

O trabalho de [22] propõe melhorias no algoritmo de atribuição de espectro *Minimum Slot-Continuity Capacity Loss* (MSCL). O MSCL é um algoritmo de atribuição de espectro que procura o conjunto de fatias contíguas na rota solicitada que leva à menor perda de capacidade nas futuras demandas de largura de banda variável. A avaliação do impacto da atribuição de pedidos na aceitação dos pedidos recebidos baseia-se numa

métrica pré-definida. Com isso, espera-se uma redução na probabilidade geral de bloqueio de solicitações na rede. A perda de capacidade resultante do estabelecimento da solicitação de conexão atual é avaliada considerando a perda de capacidade na rota candidata selecionada pelo algoritmo de roteamento e nas suas rotas interferentes. As rotas interferentes são aquelas que compartilham pelo menos um enlace com a rota selecionada.

O MSCL baseia-se no fato de que, para uma determinada rota candidata, podem ser utilizadas diferentes faixas espectrais para alocar um pedido, conduzindo a diferentes impactos na capacidade de estabelecer futuros canais de largura de banda heterogênea. Portanto, se tais impactos forem adequadamente quantificados, pode-se selecionar a faixa espectral que preserve os recursos da rede para o estabelecimento de futuras conexões de largura de banda heterogênea, tanto quanto possível.

É proposta então uma estrutura que permite a concepção e a implementação de uma família abrangente de algoritmos de atribuição de espectro que pode levar em conta, ao mesmo tempo, vários parâmetros diferentes dependentes do estado da rede, tais como rotas interferentes, ocupação espectral de rotas candidatas e suas rotas interferentes, capacidade da rede para alocar futuras conexões de n -fatias, capacidade de alocação espectral residual que permanece em cada enlace após um determinado estabelecimento, etc. Esta estrutura proposta gera menor fragmentação da rede e possibilita um aumento da capacidade de alocar demandas heterogêneas.

2.2 Técnicas de otimização discreta

Uma forma de atacar o problema RMLSA é a partir de técnicas de otimização discreta. Exemplos de técnicas de otimização discreta incluem: heurísticas (como os algoritmos vorazes, e os trabalhos abordados na Seção 2.1), meta-heurísticas (como os algoritmos genéticos), algoritmos de Programação Lógica Indutiva (ILP - *Inductive Logic Programming*), dentre outros.

Em [23], são abordados diversos aspectos da resolução dos problemas de RSA (*Routing and Spectrum Allocation*) e RMLSA. Primeiramente, introduzem-se diversos conceitos importantes, como a conceituação de EONs, restrições de continuidade e contiguidade e funções básicas da EON. Em seguida, são apresentados diversos algoritmos de RSA e de RMLSA da literatura e uma comparação de desempenho entre eles. Os algoritmos são divididos em algoritmos que suportam tráfego estático (testes offline) e algoritmos que

suportam tráfego dinâmico (testes online). Ressalta-se que os algoritmos de RSA não possuem ajuste no nível de modulação, enquanto os algoritmos de RMLSA realizam este ajuste.

Em [24], apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre os principais artigos no campo de algoritmos evolucionários para otimização discreta de forma geral (sem aplicação a um campo técnico específico). O objetivo do trabalho é o de apontar os principais avanços da área nos últimos 5-10 anos e apresentar os seus principais resultados. São apresentados os trabalhos que abordam o tempo de execução como importantes para fornecer provas matemáticas e para entender o funcionamento e a busca realizada pelos algoritmos evolucionários. Além disso, é pontuado também que outras áreas apresentam contribuições importantes para entender o comportamento de trabalho desses algoritmos, como estudos experimentais de som, análises de cenários de aptidão e análises baseadas em recursos.

Diversas abordagens são detalhadas no trabalho. Destacam-se as seguintes: análise refinada do tempo de execução da computação evolutiva, que investiga o tempo de execução em relação ao número de parâmetros de entrada utilizado, como valor-alvo fixo ou resultados alcançáveis dentro de um orçamento fixo. A análise parametrizada de tempo de execução leva em consideração parâmetros estruturais importantes de uma determinada instância do problema. É discutido como trabalhos teóricos recentes sugerem definir os parâmetros e diferentes maneiras de permitir que o próprio algoritmo otimize seus parâmetros, o que atualmente aparece como uma abordagem muito poderosa e fácil de usar.

Destaca-se a seção 3 do trabalho, que aborda estratégias de escolha dos parâmetros do algoritmo evolucionário para se adequar da melhor forma ao problema que se deseja solucionar. É descrito que trabalhos teóricos recentes ensinam estratégias para definir estes parâmetros e até meios automatizados para projetar o algoritmo evolucionário.

Primeiramente, é abordada a questão da taxa de mutação. Uma taxa de mutação muito baixa pode deixar o algoritmo lento e uma taxa de mutação alta pode deixar a escolha muito aleatória. A bibliografia mostra que a taxa de mutação igual a $1/n$ (n sendo a quantidade de bits do cromossomo) tem mostrado resultados satisfatórios para a maioria das aplicações. No entanto, os autores argumentam que esta taxa de mutação satisfatória não é universal e válida para qualquer tipo de função de otimização e que usar a taxa errada pode causar resultados desastrosos. Portanto, alguns trabalhos apontam

usar uma distribuição aleatória de taxas de mutação, onde diversos valores aleatórios são testados a cada geração e a cada execução do algoritmo.

Uma outra abordagem corresponde a realizar a evolução dos parâmetros do algoritmo durante a sua próxima execução, chamada de controle de parâmetros. Estes algoritmos funcionam definindo parâmetros (por exemplo, taxa de mutação) com base na aptidão de cada um desses parâmetros. No entanto, isto requer um grande conhecimento do problema para definir a função de aptidão mais adequada.

Pode-se também realizar o aumento de um determinado parâmetro em uma interação e verificar se a aptidão da população irá melhorar. Se melhorar, o parâmetro é acrescido ainda mais; se piorar, o parâmetro retorna a seu estágio anterior na próxima interação. Isso pode também ser feito multiplicando e dividindo o parâmetro por uma constante a cada interação.

Por fim, há também a abordagem de autoadaptação, em que os parâmetros do algoritmo são integrados ao ciclo evolucionário e fazem parte da solução (do cromossomo), estando sujeitos à variação e seleção, em que a solução final corresponde à solução para o problema e bons parâmetros para o algoritmo que culminaram naquela solução.

Em [25], é proposta a utilização das redes EONs em redes metropolitanas (*Metro Networks*) em anel. Inicialmente, são abordados conceitos iniciais, em que é especialmente vantajoso o uso de *transponders* flexíveis por essas redes, pois o uso de detecção coerente por estes *transponders* permite uma maior divisão espectral das taxas a serem transmitidas. Essa maior divisão espectral permite ainda que taxas de modulação maiores possam ser empregadas, pois poderiam aproveitar fatias menores do espectro em comparação à grade fixa.

O objetivo de [25] é resolver o problema RMLSA possibilitando a minimização da utilização de quantidade de *transponders* e alternativamente a minimização da utilização espectral através de um algoritmo ILP e uma abordagem heurística (a performance de ambos é comparada). Para a abordagem de ILP, são propostas duas funções objetivo (uma para minimizar a quantidade de *transponders* e outra para minimizar a ocupação espectral) e uma série de equações de restrições relacionadas à não bifurcação de fluxo de tráfego, à capacidade da rede, ao número de *transponders* em cada caminho óptico, etc.

No entanto, foi observado que o algoritmo ILP proposto possuía limitações com relação à escalabilidade da rede e tempo de processamento do algoritmo. Por este motivo,

a abordagem heurística foi empregada.

A heurística proposta parte das soluções anteriormente encontradas no ILP, com o objetivo de melhorá-las e com foco nas redes metropolitanas, que, por sua topologia em anel, fornecem restrições de roteamento que não são observadas no núcleo da rede. É proposto um algoritmo para minimizar a ocupação e outro para minimizar a quantidade de *transponders*.

O primeiro algoritmo identifica as demandas de tráfego que podem contornar a conversão óptico-eletro-óptico (OEO) em alguns nós e redirecioná-las ao longo de caminhos ópticos mais longos, permitindo a eliminação de um ou mais pares de transceptores e o não aumento da ocupação espectral, alterando o formato de modulação.

Já o segundo algoritmo, acomoda as demandas em suas primeiras rotas e analisa se cada uma dessas ultrapassa um limite de *transponders* preestabelecido. Se o limite for ultrapassado, há um reroteamento dessa demanda. Depois disso, o algoritmo seleciona dois caminhos ópticos vizinhos e verifica se eles fornecem uma conversão OEO. Caso afirmativo, eles são reroteados para economizar *transponders*. A conversão OEO é geralmente feita para regenerar sinais com caminhos ópticos muito longos, ou se o comprimento de onda utilizado não está disponível em toda a rota, em que o sinal óptico é convertido em elétrico, regenerado e então convertido em um sinal óptico novamente para seguir o caminho.

Em [26], é proposto um algoritmo genético multiobjetivo que, no caso de baixo volume de tráfego, quando não há bloqueio, busca minimizar a quantidade de fatias alocadas, e no caso contrário, busca minimizar a taxa de bloqueio. O algoritmo é testado na rede NSFNET de 14 nós e na rede de 28 nós do *Backbone US*, convergindo com 25 gerações.

A função de aptidão proposta foi a soma das seguintes variáveis: índice da última fatia alocada em um enlace, quantidade de demandas bloqueadas e uma constante para punir soluções que apresentam bloqueio. Esta constante é calculada para um valor H (constante arbitrária) multiplicado por 0 (caso não haja bloqueio na rede) ou 1 (caso haja bloqueio). Caso haja empate entre as soluções, o critério de desempate é a solução que fornece a menor taxa de fragmentação da rede, que é uma característica indesejável que deve ser minimizada.

O algoritmo de roteamento empregado foi o *Link-Disjoint Path Search* (LDPS),

o nível de modulação é definido pelo comprimento do enlace e a quantidade de fatias é atribuída a partir do nível de modulação. Cada cromossomo é codificado usando uma quantidade de genes que corresponde à quantidade de rotas possíveis para as demandas na rede. Cada gene do cromossomo é formado por 3 informações (rota, nível de modulação e quantidade de fatias). Cada gene de cada cromossomo é então alocado na rede para determinar a quantidade de demandas bloqueadas de cada cromossomo. A aptidão de cada cromossomo é calculada pela função de avaliação e aptidão e a seleção é feita por torneio. Os pais selecionados sofrem operação de *crossover* e então é selecionada uma quantidade de pais e filhos para formar a próxima geração (mantendo o número populacional), que então sofrerão a operação de mutação.

As taxas de *crossover* e mutação são adaptativas com base na aptidão dos indivíduos; se a taxa de aptidão geral estiver baixa, o algoritmo computa um maior *crossover* e mutação para aumentar a variedade genética. Os níveis de modulação são atribuídos de acordo com as seguintes distâncias de limites superiores: BPSK para 10000 km, QPSK para 5000 km, 8-QAM para 2500 km, e 16-QAM para 1250 km.

O trabalho de [27] propõe a divisão de uma população inicial em duas populações no algoritmo genético para resolver o problema RMLSA em uma rede óptica. Essas duas populações evoluem em paralelo com estratégias de mutação e seleção diferentes, além de incorporarem uma operação de migração para intercambiar indivíduos entre as duas populações. A evolução em paralelo das duas populações fornece uma maior diversidade genética, ocasionando um maior número possíveis de soluções para o problema, o que aumenta as chances de encontrar boas soluções.

O objetivo do algoritmo genético é minimizar a quantidade de fatias de frequência alocadas em cada enlace na rede. Os indivíduos mais aptos de cada geração são os que conseguiram alocar o maior número de demandas usando a menor quantidade de fatias. A seleção foi feita por truncamento em uma população e por torneio na outra. A migração é feita a cada x quantidades de gerações ao trocar os indivíduos mais aptos de uma geração pelos indivíduos menos aptos da outra geração.

Os autores de [28] apresentam uma resolução do problema de RSA observando a taxa de fragmentação do espectro. É abordada uma estratégia para relaxar em certo nível a restrição de continuidade de espectro. Nesta abordagem, quando a fibra recebe uma demanda que ela não pode comportar, um fatiador (*hardware*) é empregado para dividir

a demanda em dois segmentos menores e, então, alocá-la.

O algoritmo proposto é dividido em três fases: configuração do fatiador de espectro, seleção do caminho e alocação de espectro. O número de fatiadores de espectro por nó de rede é igual ao grau do nó e a quantidade de fatias requerida pela demanda é calculada de acordo com o nível de modulação do caminho. O nível de modulação é escolhido de acordo com o comprimento da rota. É apresentada uma tabela com as distâncias em km que cada nível de modulação consegue transmitir mantendo uma boa QoT (*Quality of Transmission*).

Como resultado, foi obtido um algoritmo que forneceu a menor taxa de fragmentação e bloqueio dentre os algoritmos simulados. Isso mostra que dividir a demanda pode ser um caminho de pesquisa com resultados promissores.

Em [29], é apresentado um algoritmo genético para decidir se o problema de RSA deve ser resolvido realizando o roteamento em função da alocação de espectro ou a alocação de espectro em função do roteamento. Para cada par origem-destino, o algoritmo retorna a resolução do problema de RSA usando a prioridade que retorna a menor taxa de bloqueio.

A realização do roteamento em função da alocação de espectro abordada por [29] significa priorizar uma porção do espectro e, em seguida, verificar se há rotas entre origem e destino que podem alocar aquela demanda naquela porção específica do espectro. Por outro lado, a realização da alocação de espectro em função do roteamento significa encontrar uma lista de menores rotas entre origem e destino e verificar quais dessas rotas possuem fatias contínuas vagas suficientes para alocar a demanda.

Mostra-se que o uso das duas abordagens reduziu a taxa de bloqueio em 35% em comparação à resolução do problema de RSA de forma típica (alocação de espectro em função da rota).

2.3 Resolução do problema RMLSA via Inteligência Artificial (IA)

Fora do campo das técnicas de otimização discreta, os autores de [30] apresentam uma solução para o problema RMLSA usando técnicas de inteligência artificial (IA). Emprega-se para o roteamento o algoritmo A*, usado no campo de inteligência artificial para buscar o menor caminho em um grafo ponderado. Opcionalmente, pode ser empregada busca voraz para encontrar bons menores caminhos na rede e economizar tempo de busca (ao diminuir o universo de busca). A abordagem voraz é inserida no algoritmo

A* como heurística para priorizar os nós que provavelmente levarão a uma solução mais rápida, o que não é permitido no algoritmo de Dijkstra, por exemplo.

Para a utilização do algoritmo A* para realizar o roteamento na rede, o algoritmo padrão foi modificado para atender aos critérios de contiguidade e continuidade requeridos pelas redes EONs. O nível de modulação é definido, então, pelo comprimento do caminho óptico estabelecido e a quantidade de fatias da demanda é definida pelo nível de modulação encontrado. A alocação de espectro é realizada observando-se as restrições de continuidade e contiguidade.

O algoritmo A* modificado foi comparado com os algoritmos de Dijkstra e *Best First Search*. Ressalta-se que o algoritmo A* obtém uma solução próxima do ótimo, o algoritmo de Dijkstra obtém uma solução ótima e o *Best First Search* não garante que a solução encontrada é ótima. Os algoritmos foram testados em 6 topologias de rede com diferentes números de nós e enlaces. Por causa do uso de heurísticas, o algoritmo A* modificado por [30] proporcionou resultados bons, com um tempo de processamento menor que o algoritmo de Dijkstra em todas as topologias.

2.4 Redes virtuais e redes definidas por *software*

Os autores de [31] tratam da virtualização de funções de rede (NFV - *Network Functions Virtualization*) que são usadas para fornecer flexibilidade, escalabilidade e agilidade de implantação à rede, orquestrando e automatizando as funções de redes virtuais (VNFs - *Virtual Network Functions*). VNFs são módulos de software que permitem que diferentes funções de rede sejam executadas por uma infraestrutura comercial de computação independente em *data centers* (DC) ou recursos de computação de ponta, em vez de *hardware* dedicado.

Para acomodar serviços em uma rede habilitada para NFV, os provedores são obrigados a implantar cadeias de VNFs que consistem em várias VNFs que precisam ser colocadas em determinados pedidos. Para a implantação ideal das cadeias de serviço de VNF (VNF-SCs - *Virtual Network Functions - Service Chains*) solicitadas, minimizando o uso de recursos, há abordagens que consideram uma estratégia conjunta de posicionamento e roteamento de VNFs para localizar cada VNF e conceber a melhor rota para direcionar o tráfego com VNFs menos usadas.

Neste sentido, o uso de VNFs associado à agregação permitida pelas EONs fornece

vantagens com relação à capacidade de recuperação dos serviços na rede, em caso de uma falha. Dessa forma, é proposto um algoritmo do tipo MILP (*Mixed ILP*) que resolve o problema RMLSA da EON e aloca as funções da cadeia de serviço da rede de virtualização, além de minimizar os recursos de rede na implantação de VNFs e fornecer capacidade de recuperação à rede.

Para lidar com o problema da recuperação, é utilizado um *squeezing* de demanda. Isto é, em caso de uma falha, para haver recuperação da rede, normalmente há a reserva de um caminho de *backup* com a mesma taxa do caminho principal; caso este caminho caia, o *backup* reservado é acionado. Considerando a economia de recursos de espectro, é proposto usar o *squeezing*, em que o caminho *backup* possui apenas uma fração da taxa do caminho principal acordada previamente com o cliente.

No entanto, como o problema proposto é muito difícil, em grandes redes, executar o programa MILP proposto demora muito tempo. Por este motivo, são utilizadas heurísticas para tornar a execução do programa mais eficiente para estes casos. A heurística proposta envolve alocar o espectro e as funções virtuais da rede previamente a partir de um algoritmo de roteamento de Suurballe ² e introduzir essas informações no MILP para realizar o roteamento das demandas, definição do nível de modulação e alocação das VNFs. Um dos objetivos do MILP proposto é também minimizar a fragmentação do espectro.

Os autores de [32] tratam de redes definidas por *software* (SDNs - *Software Defined Networks*) incorporadas às EONs para melhorar seu desempenho, permitindo o provisionamento dinâmico e a liberação de caminhos ópticos, reduzindo o tempo necessário para o controle do caminho óptico, o que melhora o desempenho da rede. As SDNs permitem também total virtualização dos serviços da rede.

As SDNs são divididas em dois planos: o plano de dados (compreendendo os *transponders* e cross-conexões) e o plano de controle (responsável por gerenciar o espectro da rede através de controladores). A associação de EONs às SDNs permite uma maior flexibilidade no provisionamento de demandas em comparação aos dois tipos de redes.

A performance da rede foi avaliada em termos de taxa de bloqueio, admissibilidade de tráfego e quantidade de fatias contínuas vagas. É empregada a estratégia de alocação do tipo *First-Fit* e o menor caminho para o roteamento. É citado como um dos maio-

²O algoritmo de roteamento de Suurballe implementa Dijkstra duas vezes para encontrar dois caminhos independente entre dois nós da rede. Esta abordagem garante dois caminhos disjuntos, tornando a rede mais tolerante a falhas.

res desafios para a técnica a implementação de melhores hardwares para lidarem com o gerenciamento da alocação de espectro da rede viva, especialmente quando se trata da aplicação de técnicas de desfragmentação.

2.5 Algoritmos de desfragmentação de espectro

Em [33], é proposto um esquema que inicialmente atende a uma solicitação de conexão, usando para o roteamento K-rotas de menor custo e uma política de alocação de espectro *First-Fit*. Caso uma solicitação de conexão não possa ser atendida, o mecanismo proposto prossegue com o acionamento de Desfragmentação de Processo nos caminhos mais curtos separados do enlace, seguido pela divisão da demanda de tráfego nos caminhos disjuntos do enlace correspondentes.

A desfragmentação do processo é acionada nas conexões ativas imediatamente à direita e à esquerda do maior bloco de espectro contínuo disponível nos caminhos mais curtos separados do link, sequencialmente, até que a quantidade solicitada de fatias de frequência seja alcançada. Nesse trabalho, a reconfiguração inclui o reajuste do espectro sem alterar os caminhos de roteamento, reduzindo assim a interrupção desnecessária de serviço da rede, a complexidade e o custo do processo, levando à melhoria na qualidade do serviço (QoS - *Quality of Service*) da rede.

Constatou-se que, no esquema proposto, a taxa de bloqueio de largura de banda, a taxa de utilização do espectro e o grau de fragmentação foram melhorados significativamente. A abordagem proposta visa mitigar os efeitos da rede causados pela estratégia de roteamento de múltiplos caminhos. Este tipo de roteamento consiste em dividir uma demanda em múltiplos caminhos, cada caminho carregando uma fração da demanda. Esta abordagem também é chamada de *Split Spectrum Approach* (SSA).

O trabalho [34] aborda um algoritmo de desfragmentação de espectro em redes ópticas elásticas. Primeiramente, são apresentados os tipos de desfragmentação existentes, sendo elas a desfragmentação proativa e reativa. A desfragmentação proativa visa resolver o problema RMLSA se preocupando com a fragmentação de espectro de forma a alocar as demandas de modo a contínuo para evitar pequenas porções de fatias não ocupadas. Uma desvantagem dessa técnica é que na rede viva não é possível prever o desligamento e o surgimento de demandas. Na dinâmica da rede, com o passar do tempo, esta técnica não evita que o espectro se torne fragmentado.

A desfragmentação reativa visa mover demandas no espectro da rede de forma a possibilitar o provisionamento de uma demanda que originalmente seria bloqueada por falta de fatias contínuas disponíveis. Essa técnica possibilita o provisionamento de demandas que seriam bloqueadas, diminuindo a taxa de bloqueio. No entanto, não é possível nessa técnica organizar todo o espectro da rede em caso de uma alta fragmentação.

É proposto, então, um algoritmo que concilia as duas técnicas de desfragmentação proativa e reativa. Nessa abordagem, utiliza-se a proatividade para alocar demandas nos índices iniciais e finais do espectro para deixar o meio livre para demandas futuras e a reatividade para mover demandas que poderiam estar bloqueando o provisionamento de novas demandas na rede.

Por fim, é apresentado também um algoritmo auxiliar que realiza o reroteamento de demandas para realizar essa mudança de alocação, quando necessário. Além disso, é utilizada uma técnica chamada *Hop-Tuning* para mover as demandas sem causar interrupção no tráfego da rede viva.

2.6 Otimização Bayesiana em combinação com Algoritmos Genéticos

A seguir, serão descritos alguns trabalhos da literatura que tratam da otimização Bayesiana para ajustar parâmetros de algoritmos Genéticos. Não foram encontrados trabalhos da área de redes ou de EONs. Por este motivo, os artigos relacionados tratam de áreas técnicas distintas.

Os autores em [35] apresentam uma abordagem de otimização Bayesiana para ajustar um Algoritmo Genético de Agrupamento para resolver problemas de logística. Em particular, o artigo aborda o problema de coleta e entrega em vários depósitos com janelas de tempo e frotas de veículos heterogêneas. A otimização Bayesiana é empregada para determinar o tamanho populacional, o máximo número de gerações, e as taxas de mutação e *crossover*. Quanto à otimização Bayesiana, foi empregado *Expected Improvement* para a função de aquisição e Processo Gaussiano como modelo probabilístico para prever a função objetivo do problema.

Em [36], é abordado um algoritmo genético com otimização Bayesiana para calibração automática de parâmetros de modelos de solo para aplicação a modelos de argila e areia. Este trabalho também utilizou a *Expected Improvement* para a função de aquisição e Processo Gaussiano como modelo probabilístico. A otimização Bayesiana empregada

otimiza o espaço de busca para o GA em vez de otimizar diretamente parâmetros específicos do GA. A abordagem Bayesiana se concentra em identificar o intervalo provável dos parâmetros do modelo de solo onde o ótimo global provavelmente reside para então aplicar o GA nestes intervalos.

O trabalho [37] compara o desempenho do modelo de otimização Bayesiana com o GA para encontrar uma configuração ideal para o número de processos de trabalho e executores para uma topologia de tempestade com o objetivo de aumentar a performance do modelo. Como resultado, os autores concluíram que o GA superou consistentemente o método Bayesiano, especialmente no tratamento de interações de parâmetros complexos. No GA, foi empregado o tamanho populacional igual a cinquenta indivíduos, a seleção foi a roleta e não foi revelada as probabilidades de mutação e *crossover*. O critério de parada era atingido quando a aptidão média da população se estabilizou por pelo menos cinco gerações (definido como variação inferior a 1% na aptidão média). Para a otimização Bayesiana, foram também usados a *Expected Improvement* para a função de aquisição e o Processo Gaussiano para o modelo probabilístico.

3 MODELAGEM DO PROBLEMA RMLSA E ÍNDICES DE DESEMPENHO

Este capítulo trata do modelo matemático do problema de Roteamento, Nível de Modulação e Alocação de Espectro em Redes Ópticas Elásticas. Um dos objetivos desta dissertação é resolver este problema de forma a maximizar a utilização dos recursos espectrais da rede. Além disso, são apresentados os índices de desempenho considerados pela modelagem do problema usada por esta dissertação. Por fim, é apresentado o pseudocódigo do algoritmo voraz usado para validar o GA proposto.

3.1 Modelagem do Problema RMLSA

O problema RMLSA pode ser modelado considerando a topologia da rede como um grafo não orientado $G = (V, E)$, em que $V = \{v^{(1)}, v^{(2)}, \dots, v^{(V)}\}$ são os nós da rede, sendo cada nó um elemento de conexão cruzada (OXC), e $E = \{e^{(1)}, e^{(2)}, \dots, e^{(E)}\}$ é o conjunto de enlaces que conectam os nós da rede. Define-se o conjunto de demandas de entrada da rede representado por $\mathcal{D} = \{d^{(1)}, d^{(2)}, \dots, d^{(D)}\}$, de modo que cada $d^{(d)} = \{i^{(d)}, j^{(d)}, R^{(d)}\}$, sendo i o nó de origem, j o nó de destino e $R^{(d)}$ a taxa de transmissão requerida em bits por segundo (bps); em nosso caso, $R^{(d)}$, mas, outras taxas podem ser definidas conforme critérios de comercialização. Ressalta-se que o conjunto de níveis de modulação são indicados por M ou B_m . Ademais, o conjunto de fatias disponíveis em cada enlace é representado por F e o conjunto de rotas possíveis para a demanda $d^{(d)}$ é $P_{ij}^{(d)}$, conectando o nó $i^{(d)}$ ao nó $j^{(d)}$. Em particular, k possíveis rotas $P_{ij}^{(d)}$ podem ser obtidas pelo algoritmo de Yen (Seção 1.3.1).

A solução para o problema RMLSA consiste em encontrar as rotas $P_{ij}^{(d)}$, usando F fatias espectrais (entre as portadoras $f_i^{(d)}$ e $f_j^{(d)}$) com o maior nível de modulação $m^{(d)}$ que atende o comprimento $\alpha^{(d)}$ da rota $P_{ij}^{(d)}$ entre $i^{(d)}$ e $j^{(d)}$ considerando ainda a distância máxima de operação para os diferentes níveis de modulação para todas as demandas $\mathcal{D} = \{d^{(1)}, d^{(2)}, \dots, d^{(D)}\}$. Essencialmente, a solução para o problema RMLSA pode ser formulada matematicamente como a minimização do somatório das funções custo C das variáveis $P_{ij}^{(d)}$ e $f^{(d)}$, conforme a seguir:

$$\min_{P_{ij}^{(d)}, f^{(d)}} \sum_d C(P_{ij}^{(d)}, f^{(d)}) \quad \forall d \in D, \quad (3)$$

de modo que o nível de modulação de cada demanda $m^{(d)}$ seja:

$$m^{(d)} = \max\{m \mid \alpha^{(d)} \leq \beta_m\}. \quad (4)$$

Nota-se que a função custo para $P_{ij}^{(d)}$ é o comprimento total da rota e para $f^{(d)}$ é a quantidade de fatias, de modo que ambos devem ser minimizados. Além disso, β_m é a máxima distância suportada pelo nível de modulação m (modulação adaptativa - ver Seção 1.3.2). Neste trabalho, apenas o comprimento da rota será considerado como β_m . O nível de modulação deve ser maximizado para que a quantidade de fatias seja minimizada.

A topologia da rede é tipicamente representada por grafos. Nesta abordagem, um grafo G corresponde a uma dada rede óptica, os vértices V do grafo representam um número finito de nós da rede e as arestas E do grafo representam um número finito de enlaces entre um nó de origem i e um nó de destino j [38]. Este grafo é matematicamente formulado como $G = (V, E)$.

Computacionalmente, os grafos de redes podem ser representados na forma de uma matriz de adjacências A que apresenta a cada elemento A_{ij} o custo do enlace entre nós i e j da EON. Se não houver uma aresta conectando um determinado par de nós (i, j) , o elemento A_{ij} referente a estes nós é definido como infinito (∞). Neste trabalho, o custo de cada enlace é igual a distância física em quilômetros entre os nós i e j . As demandas $\mathcal{D} = \{d^{(1)}, d^{(2)}, \dots, d^{(D)}\}$ apresentadas à rede são compostas de um nó de origem, um nó de destino e uma taxa de transmissão requerida.

Por fim, ressalta-se que a solução do problema RMLSA precisa respeitar certas restrições. Primeiramente, apenas um nível de modulação $m^{(d)}$ pode ser atribuído por demanda $d^{(d)}$. Cada demanda $d^{(d)}$ deve ser roteada apenas por uma única rota dentre as K -rotas disponíveis. Além disso, o comprimento de cada rota $\alpha^{(d)}$ deve ser menor ou igual à distância máxima suportada pelo nível de modulação β_m ; e não pode haver sobreposição de espectro alocado, isto é, cada fatia deve ser designada a uma única demanda. Por fim, os critérios de contiguidade (as fatias da demanda $d^{(d)}$ são alocadas de forma adjacente no mesmo enlace) e continuidade (os mesmos índices de fatias são atribuídos à demanda $d^{(d)}$ ao longo de todos os enlaces da sua rota) devem ser satisfeitos. Estas restrições estão

formuladas matematicamente a seguir a partir do uso de variáveis booleanas, conforme apresentado por [25].

Definimos a variável $X_{b_m}^{(d)}$ para indicar se o nível de modulação b_m foi atribuído à d -ésima demanda $d^{(d)}$; de forma que, se o nível de modulação b_m é atribuído à demanda $d^{(d)}$, $X_{b_m}^{(d)}$ será igual a 1 e para os demais níveis b_m será igual a zero. Assim:

$$\sum_m X_{b_m}^{(d)} = 1, \quad \forall d \in D, \text{ e } m \in M. \quad (5)$$

O mesmo raciocínio pode ser aplicado para a restrição de rota, de modo que:

$$\sum_k W_k^{(d)} = 1, \quad \forall d \in D, \text{ e } k = 1 \dots K, \quad (6)$$

onde $W_k^{(d)}$ é uma variável booleana que indica se a k -ésima rota dentre as K possíveis foi atribuída para atender $d^{(d)}$.

O comprimento do enlace (da rota selecionada) que atende à demanda d , $\alpha^{(d)}$, deve ser menor ou igual à distância máxima β_m suportada pelo nível de modulação empregado $b_m^{(d)}$ para atender à demanda:

$$\alpha^{(d)} \leq \beta_m, \quad \forall d \in D, \text{ e } m \in M. \quad (7)$$

Sobreposição de espectro:

$$\sum_{d \in D, f \in F} Y_{e,f}^{(d)} \leq 1, \quad \forall f \in F, \quad d \in D, \quad e \in E. \quad (8)$$

A avaliação de sobreposição deve ser feita a cada enlace e a cada fatia, por este motivo, os índices das demandas d são relacionados a cada enlace $e^{(d)}$ de E e a cada fatia $f^{(d)}$ de F . $Y_{e,f}^{(d)}$ é uma variável booleana que indica se a demanda $d^{(d)}$ está alocada na fatia f no enlace e . Utilizou-se o sinal $\leq$, pois a fatia pode estar ocupada (valor 1 para $Y_{e,f}^{(d)}$) ou não ocupada (valor 0 para $Y_{e,f}^{(d)}$). Se o resultado do somatório é maior que 1, então a fatia está sendo usada por mais de uma demanda, não atendendo à restrição. Se o resultado for 0 ou 1, a fatia não está sendo usada ou está sendo usada por uma única demanda.

Contiguidade:

$$Y_f^{(d)} \geq Y_{f+1}^{(d)}, \quad \forall f \in F = \{1, 2, \dots, F-1\}, \quad d \in D, \quad (9)$$

onde $Y_f^{(d)}$ é uma variável booleana que indica se a demanda $d^{(d)}$ está alocada na fatia f , de modo que $Y_{f+1}^{(d)}$ indica o estado da fatia seguinte. Ressalta-se que F vai até $F-1$ nesta formulação, para que ao usar $Y_{f+1}^{(d)}$ na última fatia do espectro obtenha-se F e não $F+1$, que está fora do limite espectral estipulado pelo problema.

Continuidade:

$$Y_{e,f}^{(d)} = Y_{e+1,f}^{(d)}, \quad \forall e \in \mathcal{P}_{i,j}^{(k,d)}, \quad f \in F, \quad d \in D, \quad (10)$$

onde, novamente, $Y_{e,f}^{(d)}$ é uma variável booleana que indica se a demanda $d^{(d)}$ está alocada na fatia f no enlace e , de forma que $Y_{e+1,f}^{(d)}$ representa esta alocação no enlace seguinte a e . Nota-se que $P_{i,j}^{(k,d)}$ representa a rota k alocada para a demanda $d^{(d)}$.

3.2 Índices de Desempenho

Ressalta-se que uma rota ou caminho óptico pode atravessar diversos enlaces e nós da rede. O desempenho de uma configuração da EON e, portanto, das soluções encontradas por algoritmos que resolvem o problema RMLSA, pode ser avaliado segundo alguns parâmetros de desempenho. Neste sentido, os índices de desempenho podem avaliar a performance a nível da rede, dos enlaces individuais e das demandas. Por exemplo, índices de desempenho relacionados à performance da rede como um todo são bloqueio de demandas, fragmentação espectral, ocupação e percentual da taxa de transmissão atendida. Os índices de enlaces são o índice da última subportadora ocupada por enlace além dos parâmetros anteriores também poderem ser individualizados a nível de enlace. Por fim, o índice de demandas é o número de saltos por demanda. A seguir, descreveremos em mais detalhes cada um desses índices de desempenho.

3.2.1 Bloqueio de Demandas

A taxa de bloqueio de demandas (ou de demandas bloqueadas) é a razão entre as demandas não atendidas, portanto, bloqueadas, e a quantidade de demandas total, isto é,

que se deseja que a rede atenda. Tipicamente, um bloqueio ocorre quando não há recursos espectrais suficientes nos enlaces para estabelecer um novo caminho óptico [39].

Este índice de desempenho pode ser formulado matematicamente como a razão (percentual) entre a quantidade de demandas bloqueadas e a quantidade total de demandas que se deseja que a rede atenda:

$$\text{Bloqueio} = \frac{\text{quant_demandas_bloq}}{\text{quant_demandas_totais}} \times 100. \quad (11)$$

3.2.2 Fragmentação de Espectro

Um importante fator na alocação de espectro é a sua fragmentação. A fragmentação se refere à existência de subportadoras vagas (não utilizadas) entre as subportadoras usadas para atender às diferentes demandas. Uma alocação fragmentada do espectro acarreta uma utilização ineficiente dos recursos. Essas regiões, por conta do seu tamanho reduzido, têm um número limitado de recursos, mas que em conjunto poderiam atender outras. Isto é, a fragmentação pode gerar desperdício de recursos e aumentar gradativamente o bloqueio na rede. Além disso, a fragmentação de espectro torna mais difícil atender aos requisitos de alocação de contiguidade e continuidade [15].

A Figura 3 ilustra um exemplo de fragmentação do espectro. Na Figura 3.(a), é possível perceber que, por exemplo, as fatias (eixo horizontal) de índices 2 e 3 estão vagas nos enlaces (eixo vertical) 1 e 3, mas não no 2. Nesse cenário, uma demanda que precisasse atravessar os três enlaces não poderia utilizar essas fatias. Já na Figura 3.(b), após desfragmentar o espectro, as fatias 2, 3 e 6 ficam disponíveis nos três enlaces. Desta forma, uma demanda que requeresse duas fatias atravessando os enlaces 1, 2 e 3 poderia utilizar as fatias 2 e 3, atendendo aos requisitos de contiguidade e continuidade [15].

A fragmentação é descrita neste trabalho como a razão entre a quantidade de fatias das lacunas (*quant_fatias_lacunas* - fatias espectrais/subportadoras livres entre conjuntos de fatias empregadas para atender quaisquer duas demandas vizinhas no espectro num enlace) e a quantidade total de fatias do enlace (no caso, $F_{total} = 358$ fatias), isto é:

$$\text{Fragmentação} = \frac{\sum_{i=1}^{\text{quant_enl}} \text{quant_fatias_lacunas}_i}{\text{quant_enl} \times F_{total}} \times 100. \quad (12)$$

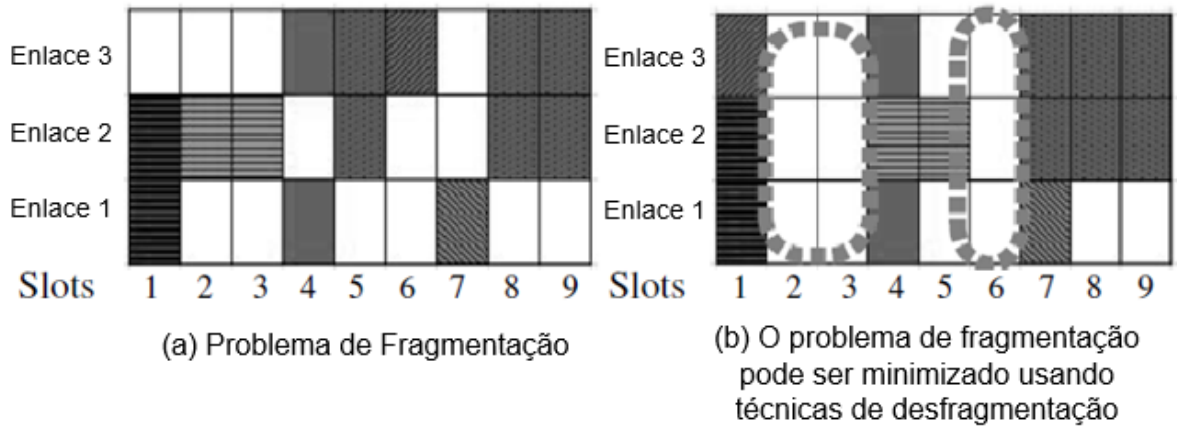


Figura 3 - Um exemplo do problema de fragmentação e da redução dos seus efeitos utilizando técnicas de desfragmentação. Fonte: Após [15].

3.2.3 Ocupação Espectral

A ocupação espectral é o percentual de fatias ocupadas em todos os enlaces da rede. Este parâmetro pode ser calculado individualmente para cada enlace da rede ou pode-se computar a média da ocupação em todos os enlaces. É ainda possível realizar uma média ponderada, onde os enlaces mais importantes possuem maior peso no cômputo da ocupação geral da rede.

A ocupação espectral avalia qual a capacidade da rede em atender novas demandas. Em uma rede viva, é possível utilizar este índice durante o traçado de caminhos para novas demandas, na etapa de roteamento, a fim de evitar enlaces demasiadamente ocupados e mitigar o bloqueio.

Usamos como medida da ocupação espectral a média das ocupações espectrais em cada enlace:

$$\text{Ocupação} = \frac{\sum_{i=1}^{\text{quant_enl}} \text{quant_fatias_ocupadas}_i}{\text{quant_enl} \times \text{total_fatias}} \times 100. \quad (13)$$

3.2.4 Percentual da Taxa de Transmissão Atendida

Este índice é a proporção entre a taxa de transmissão atendida pela rede e a taxa de transmissão demandada, considerando todas as demandas. Assim, computa-se tal índice

como:

$$\text{Taxa_atendida} = \frac{\sum_{d=1}^D o^{(d)} R^{(d)}}{\sum_{d=1}^D R^{(d)}} \times 100, \quad (14)$$

onde $R^{(d)}$ é a taxa da demanda d , e $o^{(d)} = 1$ se a demanda for atendida e $o^{(d)} = 0$, caso contrário.

3.2.5 Número de Saltos por Demanda

Entre um nó de origem e um de destino, cada vez que o caminho óptico atravessa um nó, passando de um enlace para outro, há um salto [10]. Por exemplo, em uma rede de três nós, sendo o nó 1 conectado ao nó 2 e este conectado ao nó 3, uma rota de uma demanda que tem origem no nó 1 e destino no nó 3 possui dois saltos.

Do exposto, o número de saltos por demanda é obtido por:

$$\text{Saltos}^{(d)} = \text{quant_nos} - 1, \quad (15)$$

onde quant_nos é a quantidade de nós da rota da demanda.

O número de saltos por demanda tem relação com a ocupação da rede, indicando a quantidade de enlaces usados na rota correspondente. Este parâmetro também pode ter impacto no bloqueio, na fragmentação e on percentual da taxa de transmissão atendida pela rede. Isso porque uma rota com muitos saltos implica mais enlaces/recursos da rede sendo ocupados por uma única demanda. Além disso, uma rota com mais saltos pode ter um comprimento maior do que outra com um número menor de saltos, de forma que esta primeira requererá um nível de modulação mais robusto ao ruído e que, conseqüentemente, portará menos bits por símbolos. Em vista disso, o caminho óptico nessa rota precisará de mais fatias do que em rotas menores. Visto isso, é desejável que este parâmetro seja minimizado e que as demandas possam ser alocadas com a menor quantidade de saltos quanto possível.

Ressalta-se ainda que um número médio de saltos baixo significa que o algoritmo conseguiu atender a demanda passando por um menor número de enlaces, o que implica uma menor utilização de fatias de frequência da rede como um todo [40].

3.2.6 Índice da Última Subportadora Ocupada por Enlace

O índice da última subportadora ocupada por enlace traz outra perspectiva sobre a ocupação da rede. O índice da última subportadora OFDM ocupada em um enlace permite avaliar o quanto de largura de banda ainda há disponível para alocação de novas demandas naquele enlace.

O índice da última subportadora ocupada por enlace é dado por

$$\text{última}_{\text{subportadora}}^{(e)} = \text{maior_índice_alocado}, \quad (16)$$

onde `maior_índice_alocado` é o índice da última fatia da última demanda alocada no enlace. Nota-se que este parâmetro é calculado para cada enlace da rede. Para enlaces não ocupados, tal índice é igual a zero.

3.2.7 Outros Aspectos de Desempenho

Além dos índices descritos anteriormente, existem outras formas de avaliação do desempenho do estado da técnica, mas que não serão empregados para avaliar os algoritmos propostos por este trabalho. Em particular, é possível também avaliar o que se chama de Qualidade de Transmissão (QoT - *Quality of Transmission*), a eficiência energética, o tempo de execução do algoritmo, e o número médio de fatias de frequência ocupadas por número de demandas, especialmente em cenários com pouca ou nenhuma fragmentação.

A QoT é estimada a partir da OSNR do canal e da correspondente Taxa de Erro de Bits (BER). A QoT se degrada devido a várias deficiências da camada física, incluindo efeitos lineares e não lineares que ocorrem ao longo da fibra óptica. Dessa forma, a QoT é uma métrica importante que determina a disponibilidade de uma conexão, sendo a garantia de QoT uma premissa do estabelecimento bem-sucedido de conexões em redes ópticas [41]. Ressalta-se que é possível obter dados de OSNR relacionando o comprimento do enlace, o nível de modulação e a taxa de transmissão da demanda.

A eficiência energética é associada à energia elétrica consumida pelos equipamentos de rede ao longo de todos os enlaces. Com a finalidade de diminuir o consumo energético da rede, lança-se mão de técnicas de roteamento que diminuem o consumo de energia através da utilização do modo de suspensão (*sleep mode*) em *transponders* não utilizados e da diminuição de conversões óptico-elétronóptico ao longo das rotas [6].

O número médio de fatias de frequência ocupada por demanda é relacionado ao nível de modulação atribuído para as demandas. O nível de modulação dita o número de bits por símbolo. Dessa forma, quanto maior o nível de modulação, maior é a taxa por subportadora e menor é a quantidade de fatias necessárias para acomodar a demanda, e vice-versa. Um menor número médio de fatias utilizadas para alocar uma demanda significa uma utilização mais eficiente do espectro de frequências. Porém, o aumento do nível de modulação aumenta a BER do canal, diminuindo a QoT [40].

Por fim, a fim de avaliar a eficiência do algoritmo de resolução do problema RMLSA, é possível mensurar o tempo de execução por número de demandas, sendo uma relação entre o tempo de execução de um algoritmo que visa solucionar o problema RMLSA com a quantidade de demandas de entrada da rede para avaliar a eficiência computacional do algoritmo [40]. Diferente dos parâmetros apresentados anteriormente, a avaliação do tempo de execução do algoritmo não é capaz de mensurar a qualidade da solução fornecida pelo algoritmo em si, mas é uma métrica usada para avaliar o custo computacional para alcançar aquela solução.

3.3 Solução Voraz

Para realizarmos uma análise de desempenho do algoritmo genético proposto no Capítulo 4, usaremos uma solução voraz para resolver o problema de RMLSA proposta em [42]. Um algoritmo voraz faz uma escolha sem jamais reconsiderá-la, independentemente das consequências futuras dessa escolha. Em outras palavras, a cada passo do algoritmo, a decisão tomada é a que parece ser a melhor no momento, não havendo revisões ou ajustes posteriormente. [43]. Além disso, neste trabalho, as demandas são ordenadas das maiores para as menores taxas de transmissão (ordem decrescente).

O Algoritmo 1 apresenta o pseudocódigo da solução voraz proposta. A partir de uma matriz de adjacência A e das demandas ordenadas D , executa-se o algoritmo de Yen para encontrar as K -rotas de menor custo para cada demanda $d^{(d)}$ e construir o vetor $P_{ij}^{(d)}$ como o conjunto de rotas para cada demanda $d^{(d)}$. Para cada demanda $d^{(d)}$ e para cada rota k , calcula-se o comprimento da rota, a quantidade de fatias e o nível de modulação a partir da taxa de transmissão da demanda $R^{(d)}$ e da distância da rota (modulação adaptativa - Equação 1). Nota-se que após o cálculo da quantidade de fatias usada é adicionada a banda de guarda GB igual a duas fatias para cada demanda. Após

as condições iniciais do algoritmo, verifica-se se há recursos espectrais disponíveis para atender $d^{(d)}$ em todos os enlaces atravessados pela rota k ; realiza-se a alocação de espectro de cada demanda seguindo a política de alocação *First-Fit*. Caso não haja recursos na rota k , a alocação é tentada na rota seguinte dentre as K rotas de menor custo. Não havendo recursos para alocar $R^{(d)}$ em nenhuma das as K rotas possíveis, o bloqueio é computado.

Algoritmo 1 Algoritmo Voraz

Require: Matriz de adjacências A com os comprimentos dos enlaces da rede

Require: Demandas ordenadas da rede: $\mathcal{D} = \{d^{(1)}, d^{(2)}, \dots, d^{(D)}\}$

Ensure: Rotas $P_{ij}^{(d)}$, fatias espectrais e nível de modulação das demandas

```

1: for  $d = 1 \dots D$  do
2:   Aplicar Yen para encontrar as  $K$ -rotas de menor custo para  $d^{(d)}$ 
3:   for  $k = 1 \dots K$  do
4:     Calcular a quantidade de fatias e o nível de modulação a partir de  $R^{(d)}$  e da
       distância da rota
5:     Adicionar  $GB$  à quantidade de fatias calculada
6:     Bloqueada  $\leftarrow$  true
7:     if há recursos espectrais disponíveis para atender  $d^{(d)}$  em todos os enlaces atra-
       vessados pela rota  $k$  then
8:       Alocar a demanda  $d^{(d)}$  na rota  $k$  seguindo a política First-Fit
9:       Armazenar as fatias ocupadas e o nível de modulação usados pela demanda
        $d^{(d)}$ 
10:      Marcar tais fatias como ocupadas nos enlaces atravessados pela rota  $k$ 
11:      Bloqueada  $\leftarrow$  false
12:      break
13:    else
14:      Testar a próxima rota  $k + 1$  de  $P_{ij}$ 
15:    end if
16:  end for
17:  if Bloqueada then
18:    Atribuir o estado de bloqueio para a demanda  $d^{(d)}$ 
19:  end if
20: end for

```

4 ALGORITMO GENÉTICO PROPOSTO

Os algoritmos genéticos são inspirados na teoria da seleção natural das espécies de Charles Darwin. Eles são usados para encontrar soluções de problemas usando populações. Cada indivíduo representa uma possível solução. Avaliam-se os desempenhos dos indivíduos usando uma função de aptidão para selecionar aqueles que se mantêm na população e via acasalamento (*crossover*) irão gerar descendentes. Com isso, exploram-se soluções para o problema a fim de se obter um melhor desempenho.

Cada cromossomo codifica um indivíduo da população. Em outras palavras, cada cromossomo representa uma possível solução para o problema RMLSA. Um cromossomo contém $n = 1 \dots D$ genes, i.e, a quantidade de genes é igual à quantidade de demandas apresentadas à rede. O d -ésimo gene codifica uma rota para a d -ésima demanda, indexando uma das K rotas de menor custo para a demanda $d^{(d)}$. Uma tabela auxiliar H armazena as k -rotas de todas as demandas, bem como os seus níveis de modulação e quantidades de fatias requeridas. Dessa forma, os genes são os índices das linhas dessa tabela auxiliar, com a obrigatoriedade de que cada cromossomo deva conter índices representativos de rotas de todas as demandas inseridas na rede, sem repetição de demandas em um mesmo cromossomo. Tal esquema de codificação é ilustrado na Figura 4.

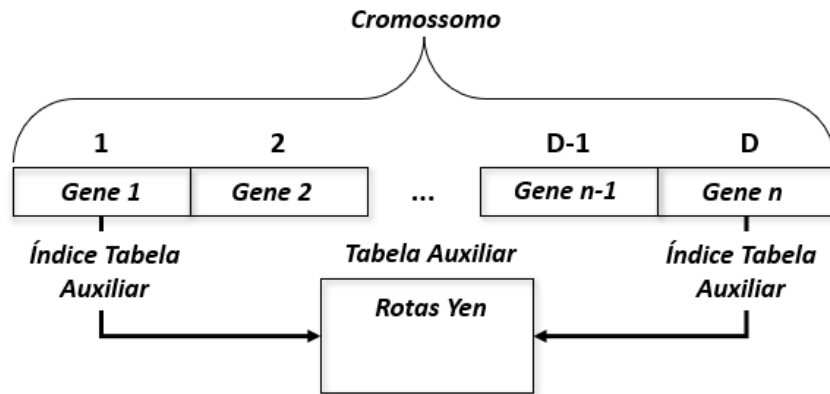


Figura 4 - Codificação do cromossomo usando a tabela auxiliar.

Para a seleção, os indivíduos são concatenados sobre uma linha tal que o comprimento da seção correspondente ao indivíduo é proporcional à sua aptidão. Anda-se ao longo da linha com passos de tamanho igual - inicia-se de um ponto menor que o tamanho do passo, sorteado aleatoriamente - e o indivíduo correspondente à seção alcançada no passo é selecionado. Emprega-se elitismo de forma que o indivíduo que apresenta a melhor

aptidão em uma geração é replicado na próxima. Os indivíduos são aleatoriamente selecionados para acasalamento (*crossover*). No acasalamento, aleatoriamente, formam-se pares de indivíduos que geram descendentes com metade dos genes de cada progenitor, trocados na metade dos progenitores (*crossover* realizado no ponto 50% de cada cromossomo).

O operador de mutação altera as rotas (genes) dos descendentes aleatoriamente – troca-se a rota codificada no gene por outra dentre as K possíveis. Isso muda o caminho óptico e pode mudar o comprimento da rota e, conseqüentemente, o nível de modulação e o número de fatias necessárias para atender à demanda. A probabilidade de mutação para cada gene foi arbitrada em 0,02 (2%) e todos os K caminhos têm probabilidades iguais. O critério de parada é o número de gerações. Para aumentar a variedade genética da nossa população inicial, arbitramos a quantidade de indivíduos na população como $X = 1 \dots (K + 1) \times D$. Por exemplo, para $K = 3$ e 100 demandas, o tamanho da população é de 400 indivíduos. Durante a execução do algoritmo, os cromossomos são decodificados usando a tabela auxiliar e ocorre a alocação dos recursos do enlace, usando a política de alocação *First-Fit*.

4.1 Pseudocódigo do GA Proposto

O Algoritmo 2 apresenta o pseudocódigo do algoritmo genético proposto. A partir da matriz de adjacência A e das demandas ordenadas D , executa-se o algoritmo de Yen para encontrar as K -rotas de menor custo para cada demanda $d^{(d)}$ para construir o vetor $P_{ij}^{(d)}$ como o conjunto de rotas para cada demanda $d^{(d)}$. Para cada demanda $d^{(d)}$ e para cada rota k , calcula-se o comprimento da rota, a quantidade de fatias e o nível de modulação a partir da taxa de transmissão da demanda $R^{(d)}$ e da distância da rota (modulação adaptativa - Equação 1). Nota-se que após o cálculo da quantidade de fatias usando é adicionada a banda de guarda GB igual a 2 duas fatias para cada demanda. A partir desses dados é criada a tabela auxiliar H para a codificação dos cromossomos. Ressalta-se que a taxa de transmissão da demanda $R^{(d)}$ deste trabalho é uma dentre $R^{(d)} = \{1, 10, 30, 40, 50, 100, 200, 400, 800, 1000 \text{ Gbps}\}$.

Em seguida, a população inicial é criada com o total de $(k + 1) \times D$ indivíduos. A população inicial é escolhida de forma aleatória. Porém, impõe-se que nela todas as rotas possíveis para todas as demandas estejam presentes. Isso se deve a uma observação empírica de que, quando rotas são ignoradas, diminuindo a diversidade populacional, o

algoritmo pode demorar muito a encontrar uma solução com bom desempenho ou pode até mesmo não encontrá-la.

Dada a população inicial, o GA decodifica os cromossomos e para cada gene n , é realizada a verificação de se há recursos espectrais disponíveis para atender $d^{(d)}$ em todos os enlaces atravessados pela rota k . Caso positivo, a demanda $d^{(d)}$ é alocada na rota k seguindo a política de alocação *First-Fit*, as fatias ocupadas são marcadas pelo algoritmo no espectro e há o armazenamento das informações do índice das fatias alocadas e o nível de modulação. Caso contrário, aquela demanda é computada como um bloqueio. Ao término do cromossomo, é calculada a fragmentação, a ocupação e o percentual de taxa de transmissão atendida. Ressalta-se que, neste trabalho, o nível de modulação é um dentre $M = \{BPSK, QPSK, 8QAM, 16QAM, 32QAM, 64QAM\}$ ou $B_m = \{2, 4, 8, 16, 32, 64\}$.

A solução ao problema RMLSA representado por cada cromossomo é avaliada segundo uma função de avaliação dentre as apresentadas a seguir. O melhor indivíduo de cada geração será diretamente encaminhado para a geração seguinte sem sofrer alterações (elitismo). Em seguida, os indivíduos são selecionados em pares para realização do acasalamento, de forma que para cada par é aplicado os operadores de acasalamento e de mutação. Ressalta-se que todos os cromossomos sofrem acasalamento. Por fim, a nova população substitui a anterior e é iniciada uma nova geração. O processo é repetido até que o critério de parada seja atingido.

4.2 Funções de Avaliação

A avaliação confere uma aptidão para a alocação do espectro na rede das soluções (cromossomos). Neste trabalho, consideramos três funções de avaliação fa_1 , fa_2 , fa_3 . A função de avaliação fa_1 atribui uma aptidão menor para os indivíduos que possuem menor fragmentação e menor bloqueio; neste sentido, quanto menor a aptidão, melhor é a solução, lembrando que o indivíduo de menor aptidão é selecionado para o acasalamento. A função de avaliação fa_1 considera um compromisso entre o bloqueio e a fragmentação, com o objetivo de minimizar dois aspectos de desempenho importantes de uma EON. A partir de experimentos prévios, arbitrou-se um peso de cinco para o bloqueio ($\alpha = 5$) e três para a fragmentação ($\beta = 3$). Assim, a aptidão atribuída à solução codificada em um

Algoritmo 2 Algoritmo Genético

Require: Matriz de adjacências A com os comprimentos dos enlaces da rede

Require: Demandas ordenadas da rede: $\mathcal{D} = \{d^{(1)}, d^{(2)}, \dots, d^{(D)}\}$

Ensure: Rotas $P_{ij}^{(d)}$, fatias espectrais, nível de modulação das demandas e melhor indivíduo

```

1: for  $d = 1 \dots D$  do
2:   Aplicar Yen para encontrar as  $K$ -rotas de menor custo para  $d^{(d)}$ ;
3:   for  $k = 1 \dots K$  do
4:     Calcular a quantidade de fatias e o nível de modulação a partir de  $R^{(d)}$  e da
       distância da rota
5:     Adicionar  $GB$  à quantidade de fatias calculada
6:     Criar a tabela auxiliar  $H$  com todas as rotas para todas as demandas, a quanti-
       dade de fatias e o nível de modulação de cada rota
7:   end for
8: end for
9: Inicializar a população com  $(k + 1) \times D$  indivíduos
10: while número final de gerações não for satisfeito do
11:   Bloqueada  $\leftarrow$  true
12:   for  $X = 1 \dots \{(k + 1) \times D\}$  do
13:     Decodificar o cromossomo
14:     for  $n = 1 \dots D$  do
15:       if há recursos espectrais disponíveis para atender  $d^{(d)}$  em todos os enlaces
         atravessados pela rota  $k$  then
16:         Alocar a demanda  $d^{(d)}$  na rota  $k$  seguindo a política First-Fit
17:         Armazenar as fatias ocupadas e o nível de modulação usados pela demanda
            $d^{(d)}$ 
18:         Marcar tais fatias como ocupadas nos enlaces atravessados pela rota  $k$ 
19:         Bloqueada  $\leftarrow$  false
20:         break
21:       end if
22:     end for
23:     if Bloqueada then
24:       Atribuir o estado de bloqueio para a demanda  $d^{(d)}$ 
25:     end if
26:     Calcular a taxa de fragmentação, ocupação e percentual de taxa de transmissão
       atendida
27:     Avaliar a aptidão na população segundo função de avaliação
28:   end for
29:   Selecionar o melhor indivíduo para ser incluído na geração seguinte (elitismo)
30:   Selecionar os indivíduos para formar pares para acasalamento
31:   for cada par de indivíduos selecionados do
32:     Aplicar operador de crossover para gerar novos indivíduos
33:     Aplicar operador de mutação nos novos indivíduos
34:   end for
35:   Substituir a população atual pelos novos indivíduos
36: end while

```

cromossomo é:

$$fa_1(\text{Bloqueio}, \text{Fragmentação}) = \begin{cases} 0, & \text{se Bloqueio} = 0 \text{ e Fragmentação} = 0 \\ 0, 5, & \text{se Bloqueio} = 0 \text{ e Fragmentação} \neq 0 \\ \alpha \times \text{Bloqueio} + \beta \times \text{Fragmentação}, & \text{c.c} \end{cases},$$

Estas três condições da função de avaliação representam os três principais cenários, destacando cenários muito positivos, nos quais seria importante que aqueles indivíduos com essas características tivessem boa avaliação: o melhor caso, quando ambos o bloqueio e a fragmentação são zero; o caso intermediário, quando o bloqueio é zero, mas a fragmentação é diferente de zero; e todos os demais casos. Inicialmente, α e β foram arbitrados, respectivamente, em 5 e 3 a partir de observações empíricas, mas no Capítulo 5 veremos uma técnica de otimização para minimizar fa_1 .

A função fa_1 avalia o desempenho, usando o bloqueio: o percentual de demandas não atendidas por falta de recursos. Ele deve ser pequeno, idealmente nulo, de forma que o maior número possível de demandas (clientes) seja atendido. Ela é ponderada com a fragmentação: a quantidade de fatias espectrais disjuntas alocadas para atender às demandas. As demandas devem ser o mais contíguas possível, com menos fatias livres entre as fatias que atendem às demandas – a fragmentação da banda pode dificultar a alocação de demandas futuras, desperdiçando recursos e acarretando baixa eficiência [15].

Com o objetivo de verificar o impacto dos parâmetros Bloqueio e Fragmentação sobre a função de avaliação fa_1 , o GA proposto foi testado com a minimização de duas funções de avaliação adicionais

$$fa_2(\text{Bloqueio}) = \text{Bloqueio} \quad \text{e} \quad (17)$$

$$fa_3(\text{Fragmentação}) = \text{Fragmentação}, \quad (18)$$

4.3 Parâmetros de Avaliação e de Controle

Os parâmetros de desempenho bloqueio, fragmentação, percentual de taxa de transmissão atendida, ocupação, número de saltos por demanda e índice da última sub-portadora ocupada por enlace serão usados neste trabalho como parâmetros de avaliação, que são aqueles usados em uma das funções de avaliações fa_1 , fa_2 e fa_3 e parâmetros de

controle que são aqueles não usados na função de avaliação implementada. Por exemplo, em um cenário de simulação usando a função fa_1 , os parâmetros de avaliação são bloqueio (Eq. 11) e fragmentação (Eq. 12) e os parâmetros de controle são ocupação (Eq. 13), percentual de taxa de transmissão atendida (Eq. 14), número de saltos por demanda (Eq. 15) e índice da última subportadora ocupada por enlace (Eq. 16).

5 PARÂMETROS DO GA A PARTIR DE OTIMIZAÇÃO BAYESIANA

5.1 Teorema de Bayes

O teorema de Bayes é baseado no princípio da probabilidade condicional, que versa sobre a probabilidade de um evento ocorrer dado que outro evento já ocorreu, sendo que deste último evento sabe-se a sua probabilidade [44].

Visto isso, a probabilidade de um evento B ocorrer $P(B|A)$ é calculada conforme a equação a seguir:

$$P(B|A) = \frac{P(A|B) \times P(B)}{P(A)}, \quad (19)$$

de modo que $P(A|B)$ é a probabilidade de A acontecer, dado que B já ocorreu (probabilidade condicional de A dado B - probabilidade *a posteriori*), $P(B)$ é a probabilidade de B ocorrer e $P(A)$ é a probabilidade de A ocorrer (probabilidades *a priori* - antes de A ou B ocorrerem, respectivamente) [44].

5.2 Otimização Bayesiana

A otimização bayesiana é amplamente utilizada na literatura para realizar ajuste de hiperparâmetros no mundo de aprendizado de máquina. Neste trabalho, a otimização bayesiana foi empregada para encontrar os pesos de bloqueio e fragmentação na função de avaliação do GA Fa_1 .

Em particular, a otimização Bayesiana é uma classe de métodos de otimização de aprendizado de máquina para otimizar funções objetivo que levariam muito tempo para serem avaliadas. Neste trabalho, a função objetivo seria a Fa_1 do GA e os parâmetros otimizados seriam os pesos α e β de bloqueio e fragmentação. Partindo do princípio de que o todo da função objetivo é desconhecida, a otimização bayesiana consiste em um modelo probabilístico para modelar e prever a função objetivo a partir de alguns pontos conhecidos desta função. A otimização bayesiana utiliza também uma função de aquisição que decide a próxima amostra tem chances de minimizar ou maximizar a função objetivo (dependendo da aplicação, para este trabalho se quer minimizar Fa_1) [45].

O modelo estatístico ou probabilístico, que é tipicamente um processo gaussiano, fornece uma distribuição de probabilidade *a posteriori* bayesiana (com base nos dados passados da função objetivo) que descreve valores potenciais para função objetivo em um

ponto candidato. Cada vez que o algoritmo observa a função objetivo em um novo ponto, ou seja, conhecendo melhor a forma da função, essa distribuição *a posteriori* é atualizada usando o teorema de Bayes. Além disso, a função de aquisição é responsável por medir o valor que seria gerado pela avaliação da função objetivo em um novo ponto, com base na distribuição *a posteriori* atual sobre a função objetivo [45].

O modelo de processo gaussiano é amplamente usado pela literatura devido a sua simplicidade e facilidade de otimizar. Este modelo trata os valores de entrada como uma distribuição gaussiana (normal), com uma função média, que é o valor esperado da função objetivo a cada ponto e uma função covariância, que define a correlação entre os valores da função objetivo em distintos pontos do espaço. Este modelo estatístico é também usado para definir e otimizar a função de aquisição [45].

A função de aquisição utiliza a previsão do modelo estatístico para encontrar um novo ponto que tenha boa probabilidade de minimizar ou maximizar a função objetivo. Uma função de aquisição muito empregada é o *Expected Improvement*, que busca maximizar um ganho esperado com relação ao melhor valor observado até o momento da função objetivo a partir da probabilidade da nova amostra melhorar os resultados, isto é, usando a média e a covariância do modelo estatístico. Esta função proporciona um balanço entre *Exploration* (exploração de regiões desconhecidas, quando a covariância está alta) e *Exploitation* (exploração de regiões com maior probabilidade de encontrar valores ótimos, quando a média está baixa) [45].

Em síntese, a otimização bayesina explora o espaço de busca levando em consideração a performance anterior, de modo que a performance anterior afeta as decisões do algoritmo para decisões futuras. Para problemas de buscas, a função objetivo não é inteiramente conhecida, dessa forma, o algoritmo emprega um modelo gaussiano a partir do teorema de bayes para criar um modelo teórico que prevê a função objetivo. Este modelo é atualizado a cada interação do algoritmo à medida que a otimização vai conhecendo a real função objetivo. Além disso, na abordagem de *Expected Improvement* para a função de aquisição, sabendo um valor mínimo da função objetivo atual, a função de aquisição observa uma região não explorada da função objetivo e usa o modelo gaussiano para calcular o valor teórico para aquele novo ponto. Se este novo ponto obter um valor menor que o mínimo atual, este novo ponto possui boas chances de minimizar a função objetivo e é, então, testado na função objetivo real.

5.3 Pseudocódigo da Otimização Bayesiana Proposto

Como visto anteriormente, a otimização bayesiana foi implementada para encontrar bons pesos para o bloqueio e a fragmentação em f_{a_1} de forma a minimizar esta função. Com o objetivo de simplificar o problema e diminuir o tempo de execução do algoritmo, os pesos α e β de f_{a_1} foram combinados em um único α , conforme a seguinte função:

$$f_B(\text{Bloqueio}, \text{Fragmentação}) = \begin{cases} 0, & \text{se Bloqueio} = 0 \text{ e Fragmentação} = 0 \\ 0,5, & \text{se Bloqueio} = 0 \text{ e Fragmentação} \neq 0 \\ \alpha \times \text{Bloqueio} + (1 - \alpha) \times \text{Fragmentação}, & \text{c.c} \end{cases},$$

Ressalta-se que o espaço de busca de α varia de 0 a 1.

A seguir, o Algoritmo 3 apresenta o pseudocódigo para a otimização bayesiana implementada.

Primeiramente, é criado um modelo probabilístico gaussiano de f_B para prever o seu comportamento. A partir deste modelo, a função de aquisição encontra um valor de α no espaço de busca para a interação atual denominado α_t . α_t é encontrado pela função de aquisição calculado o valor de $f_B(\alpha_t)$ previsto com base no modelo, de modo que se o valor de $f_B(\alpha_t)$ previsto for menor que o menor valor de f_B até o momento, este α_t será escolhido, caso contrário, um novo valor de α_t é investigado.

Tendo sido escolhido o valor de α_t , este α_t é enviado para o GA para calcular o valor real de $f_B(\alpha_t)$, que são então armazenados. Conhecendo um novo ponto da função objetivo $f_B(\alpha_t)$, o modelo probabilístico é atualizado.

A partir da segunda interação, o algoritmo começa a realizar o teste do critério de parada. O critério de parada do algoritmo bayesiano foi escolhido quando a variação de um α atual (α_t) fosse menor que uma significância ϵ de um α da interação anterior (α_{t-1}):

$$\text{Parada} : \frac{|\alpha_t - \alpha_{t-1}|}{\alpha_{t-1}} < \epsilon. \quad (20)$$

Por fim, se o critério de parada é atendido, o algoritmo computa o melhor α dentre α_t e α_{t-1} , isto é, o α que retornar o menor valor de $f_B(\alpha)$. Então, os valores de bloqueio, fragmentação, percentual de taxa de transmissão atendida e ocupação do GA para melhor α são armazenados.

Algoritmo 3 Otimização Bayesiana

Require: Espaço de busca para α , modelo probabilístico, função de aquisição, Algoritmo Genético (GA) com função de avaliação $f_B(\alpha)$.

Ensure: Critério de parada (T)

```

1: Criar o modelo probabilístico para prever  $f_B$  e a incerteza no espaço de busca
2: for  $t = 1 \dots T$  do
3:   Encontrar valor de  $\alpha_t$  no espaço de busca pela função de aquisição
4:   Usar o modelo probabilístico para prever  $f_B(\alpha_t)$ 
5:   if  $f_B(\alpha_t)$  previsto menor do que o menor valor de  $f_B$  até o momento then
6:     Enviar  $\alpha_t$  para o GA (Algoritmo 2) e calcular o valor real de  $f_B(\alpha_t)$ 
7:     Armazenar o valor de  $\alpha_t$  e de  $f_B(\alpha_t)$ 
8:     Atualizar o modelo probabilístico com os novos dados de  $\alpha_t$  e de  $f_B(\alpha_t)$ 
9:   else
10:    Encontrar um novo valor de  $\alpha_t$  no espaço de busca pela função de aquisição
11:   end if
12:   if  $t \geq 2$  then
13:     Verificar o critério de parada para  $\alpha_t$  e  $\alpha_{t-1}$ 
14:     if Parada Atendida then
15:       Melhor coeficiente  $\alpha$  é um dentre  $\alpha_t$  ou  $\alpha_{t-1}$  que retorne o menor  $f_B(\alpha)$ 
16:       Armazenar valores de bloqueio, fragmentação, percentual de taxa de trans-
         missão atendida e ocupação do GA para melhor  $\alpha$ 
17:     end if
18:   end if
19: end for

```

6 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

6.1 Condições de Simulação

Os algoritmos GA e Voraz foram avaliados através de simulação no software Matlab R2019a, executado em um computador com as seguintes especificações:

- Windows 11;
- Processador Intel Core i7 12ª geração 2,10 GHz;
- 32 GB de memória RAM DDR5;
- 1TB de armazenamento SSD;
- Placa de Vídeo NVIDIA GeForce RTX 3060 com 8GB de VRAM.

Como apresentado no Capítulo 4, as K rotas possíveis para uma demanda foram encontradas através do algoritmo de Yen. Em particular, o usuário determina a quantidade de k -melhores caminhos desejados e o algoritmo encontra as k -rotas de menor custo entre os nós de origem (i) e destino (j) para cada demanda (d_i).

Neste trabalho, usamos inicialmente $K = 3$ em ambos os algoritmos. O tamanho da população inicial é igual a $X = (K + 1) \times D$ e a taxa de mutação é arbitrada em 0,02 (2%), nos experimentos.

A operação de seleção foi a roleta. Nessa abordagem, é como se todos os cromossomos fossem dispostos em uma roleta de forma que a área ocupada por cada cromossomo é diretamente proporcional à sua aptidão. Quanto mais bem avaliado o cromossomo, maior a sua área e mais chances ele tem de ser escolhido para o acasalamento. O critério de parada é o atingimento de 50 gerações.

6.2 Topologia de Rede

Para testar os algoritmos em uma rede com características reais, foi utilizada a rede NSFNET, um *backbone* estadunidense, conforme a Figura 5. A NSFNET possui 16 nós e as distâncias entre os nós correspondem às distâncias reais entre as cidades nas quais estão dispostos os nós. As distâncias e as conexões entre os nós (entre as cidades) são usadas para construir a matriz de adjacências A e são especialmente importantes para definir

o nível de modulação a utilizar nas rotas empregadas para cada demanda (modulação adaptativa).

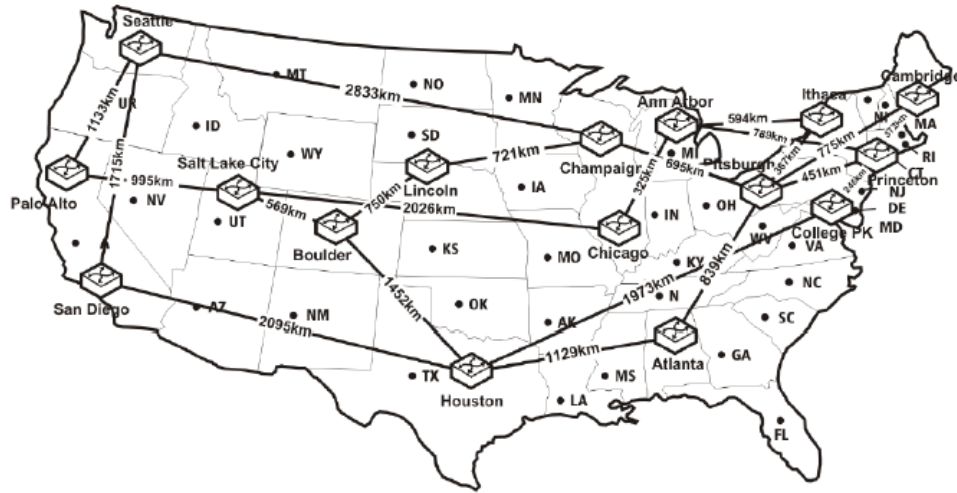


Figura 5 - Rede estadunidense NSFNET. Fonte: [46].

6.3 Demandas Ofertadas

O algoritmo genético foi testado com múltiplas rodadas (a seguir discutimos o número de rodadas empregado) para 30, 75, 100 e 150 demandas de entrada, que resultam em populações com 120, 300, 400 e 600 indivíduos $((K + 1) \times D)$, respectivamente. Cada rodada executa o GA com 50 gerações. Em cada rodada, a origem, o destino e as taxas da demanda são sorteados. A distribuição empregadas é uniforme. A origem e o destino podem ser quaisquer pontos distintos da rede NSFNet. As taxas de transmissão variam entre 10 Gbps e 1 Tbps dentre uma lista de 10 taxas possíveis $(R^{(d)} = \{1, 10, 30, 40, 50, 100, 200, 400, 800, 1000 \text{ Gbps}\})$. O mesmo conjunto de demandas é apresentado ao algoritmo voraz e ao genético.

Os algoritmos são executados 132 vezes (rodadas) de forma a obter as Funções de Distribuição de Probabilidade (CDFs - *Cumulative Distribution Functions*) dos índices de desempenho empregados para os diferentes números de demandas. Tal quantidade foi obtida através do teste de Wilcoxon (U de Mann-Whitney) [47] através do qual se determina a quantidade de execuções a partir da qual se pode dizer que as sequências de índices advêm de uma mesma distribuição com grande probabilidade. O teste de Wilcoxon é um teste não paramétrico que verifica a hipótese nula de que duas séries de amostras

advêm da mesma distribuição. Neste trabalho, utilizou-se o nível de significância igual a 5%. Isso significa que se o valor-p calculado através do teste for menor que 0,05, a hipótese nula é rejeitada e as séries comparadas fazem parte de duas distribuições distintas [47].

Observou-se que, ao comparar séries de amostras com diferentes tamanhos dos resultados obtidos pelo GA proposto e pelo algoritmo voraz, as séries com tamanho 132 amostras retornaram o valor-p maior que o nível de significância.

6.4 Estudo do Parâmetro K

Conforme observado anteriormente, o parâmetro K é responsável por determinar a quantidade de rotas alternativas à rota de menor custo das demandas a partir do algoritmo de Yen. Além disso, este parâmetro determina a quantidade de possíveis soluções para o problema RMLSA e é considerado no tamanho da população inicial e consequentemente na população de cada geração. Nota-se, portanto, que este parâmetro pode ter um impacto significativo nos resultados do GA proposto.

Os cenários de simulação descritos anteriormente foram executados para $k = 3$. No entanto, em vista deste contexto e da influência deste parâmetro no funcionamento do algoritmo, executaremos simulações para $k = 2, 4$, e 5 a fim de se verificar a influência da quantidade de rotas por demanda no resultado final de bloqueio, fragmentação, percentual de taxa de transmissão atendida e ocupação.

Por fim, conforme apresentado mais detalhadamente no Capítulo 7, ao simular o cenário de rede para $k = 4$, inicialmente observou-se uma piora nos resultados medidos. Inicialmente, era esperado que ao aumentar o k , haveria mais opções de soluções para o problema RMLSA e aumentariam as chances de se encontrar soluções melhores. Isso poderia significar que o tamanho da população ou a quantidade de gerações não foram suficientes para varrer o maior espaço de busca. Com a finalidade de sanar esta questão, este cenário de simulação utilizou 100 gerações, em invés das 50 anteriormente utilizadas.

6.5 Estudo da Ordenação das Demandas

Para todos os cenários simulados até aqui, as demandas foram ordenadas em ordem decrescente de acordo com a taxa de transmissão demandada. Em complementação, testamos a hipótese de que os resultados fornecidos pelo GA variariam dependendo da ordem

em que as demandas (e suas rotas) são codificadas no cromossomo. Em outras palavras, testamos o GA proposto em cenários onde as demandas são alocadas em ordens específicas (determinadas por heurísticas) ou não, para validar o algoritmo. Mais especificamente, avaliamos o desempenho das soluções fornecidas pelo GA para três esquemas de ordenação diferentes para as demandas solicitadas: Taxa de Transmissão Decrescente (TTD), Maiores Subportadoras Primeiro (MSF - *Most Subcarriers First*) e Ordem Aleatória (RO - *Random Order*).

No esquema TTD, as demandas são ordenadas de forma decrescente a partir da taxa de bits de transmissão requerida. A maior taxa de transmissão é alocada primeiro. No MSF, as demandas são novamente ordenadas de forma decrescente, porém, agora de acordo com o número de fatias requerido para atender à taxa de transmissão da demanda. Note-se que o número de fatias (subportadoras) varia devido ao nível de modulação que, por sua vez, depende da distância do enlace óptico entre os nós de origem e destino que definem a demanda. Nota-se que isso requer avaliar o número de fatias empregadas para todas as demandas para as rotas codificadas nos genes correspondentes nos cromossomos previamente para alocar os recursos. Por fim, no esquema RO, os recursos para as demandas são alocados aleatoriamente, designando as demandas usando uma distribuição uniforme; ou seja, não existe nenhuma classificação de demanda específica.

6.6 Otimização Bayesiana

Anteriormente, para a função de avaliação f_{a1} , os pesos para o bloqueio e a fragmentação foram arbitrados respectivamente em 5 e 3. Como última contribuição deste trabalho, foi proposta a utilização de uma otimização Bayesiana para encontrar os pesos de bloqueio e fragmentação que minimizassem a função de avaliação do GA proposto. O objetivo da utilização desta otimização é justamente eliminar esta etapa arbitrária e oferecer um método mais confiável para obter os pesos dessas variáveis na função de avaliação. A função f_B apresentada anteriormente na Seção 5.3 precisou ser modificada, pois como o valor médio da fragmentação era muito maior do que o valor do bloqueio, o algoritmo tendia a escolher um α próximo de 1, que anulava a componente da fragmentação para minimizar a função objetivo. Com o intuito de manter o caráter multiobjetivo da nossa

função de avaliação, a função de avaliação f_B foi modificada conforme a seguir:

$$f_B(\text{Bloqueio}, \text{Fragmentação}) = \begin{cases} 0, & \text{se Bloqueio} = 0 \text{ e Fragmentação} = 0 \\ 0,5, & \text{se Bloqueio} = 0 \text{ e Fragmentação} \neq 0 \\ \frac{0,5+\alpha}{2} \times \text{Bloqueio} + \frac{1,5-\alpha}{2} \times \text{Fragmentação}, & \text{c.c} \end{cases},$$

O intervalo de variação do coeficiente α também precisou ser modificado para de 0,5 a 1 e os coeficientes 0,5 e 1,5 foram adicionados para evitar a anulação de qualquer uma das variáveis. Por fim, a divisão por dois implica que se Bloqueio = Fragmentação = Y, o terceiro termo na equação acima resulta em $(0,5+1,5)Y/2 = Y$ (normalização). Com essa formulação combina-se os dois critérios, forçando a consideração dos dois índices de desempenho conjuntamente.

A função de aquisição do algoritmo Bayesiano empregada é a *Expected-Improvement-Plus* e para o modelo probabilístico emprega-se a Regressão do Processo Gaussiano. Tal função de aquisição busca melhorar o modelo *Expected-Improvement*, que visa maximizar o ganho esperado em relação a um valor conhecido da função objetivo. A *Expected-Improvement-Plus*, usada neste trabalho, inclui um fator de penalização que prioriza a exploração em regiões subavaliadas. Por fim, o modelo probabilístico de Regressão do Processo Gaussiano é usado para fazer previsão do comportamento da função objetivo a ser minimizada ao modelá-la como um processo gaussiano.

Como critério de parada do algoritmo Bayesiano avalia-se se o α atual (α_t) varia de menos de 5% relativamente ao α da interação anterior (α_{t-1}), i.e., avalia-se a equação (20) para $\epsilon = 0,05$.

7 RESULTADOS

7.1 Performance Comparativa Algoritmo Genético x Algoritmo Voraz

O GA proposto (inicialmente sem a otimização Bayesiana) foi comparado com o algoritmo Voraz para 30, 75, 100 e 150 demandas de entrada e em quatro índices de desempenho (métricas) de rede: probabilidade de bloqueio e fragmentação (parâmetros da função de avaliação), percentual da taxa de transmissão total atendida e ocupação espectral da rede (parâmetros de controle do algoritmo). A análise a seguir se refere aos percentis 90 das métricas.

A Figura 6 apresenta as CDFs para 30 demandas de entrada. A probabilidade de bloqueio foi de 0% e o percentual da taxa atendida foi de 100% em todos os casos. A diferença significativa neste cenário ocorre na fragmentação e na ocupação; o GA apresentou fragmentação de 24,12% contra 34,83% do Voraz, e a ocupação foi de 21,93% contra 14,97%.

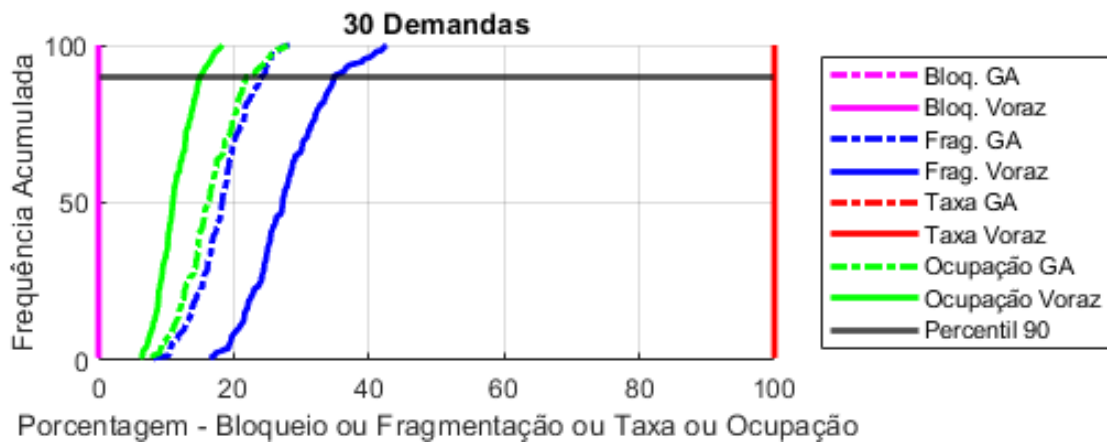


Figura 6 - CDFs do bloqueio, da fragmentação, do percentual de taxa de transmissão atendida e da ocupação do GA e Voraz com 30 demandas.

A Figura 7 apresenta as CDFs para 75 demandas de entrada. A taxa de bloqueio foi de 0% no GA contra 1,33% no Voraz e o percentual da taxa atendida foi de 100% para ambos os algoritmos. O GA apresentou fragmentação de 43,46% contra 61,69% do Voraz e a ocupação foi de 48,31% contra 34,03%.

A Figura 8 apresenta as CDFs para 100 demandas. A probabilidade de bloqueio foi de 3% no GA contra 18,80% no Voraz e o percentual da taxa atendida foi de 100%

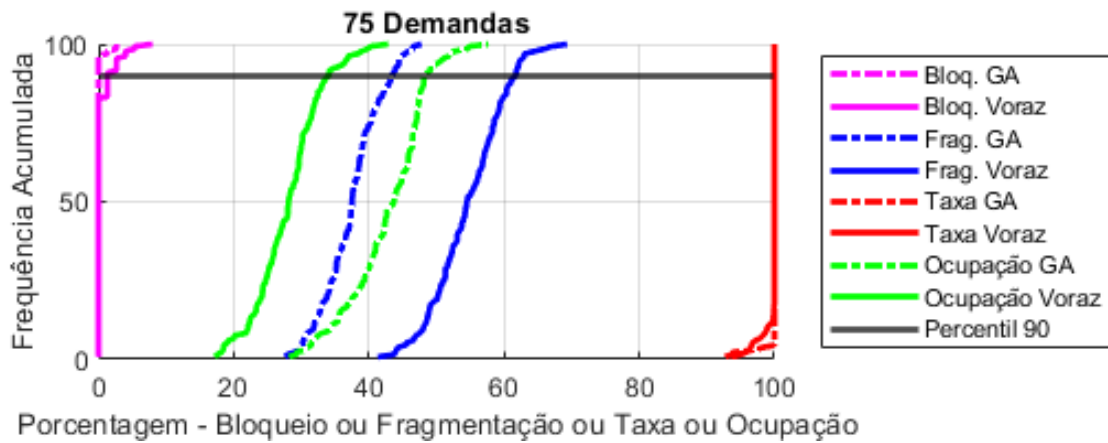


Figura 7 - CDFs do bloqueio, da fragmentação, do percentual de taxa de transmissão atendida e da ocupação do GA e Voraz com 75 demandas.

para ambos os algoritmos. O GA apresentou fragmentação de 41,74% contra 56,35% do Voraz e a ocupação foi de 56,58% contra 44,06%.

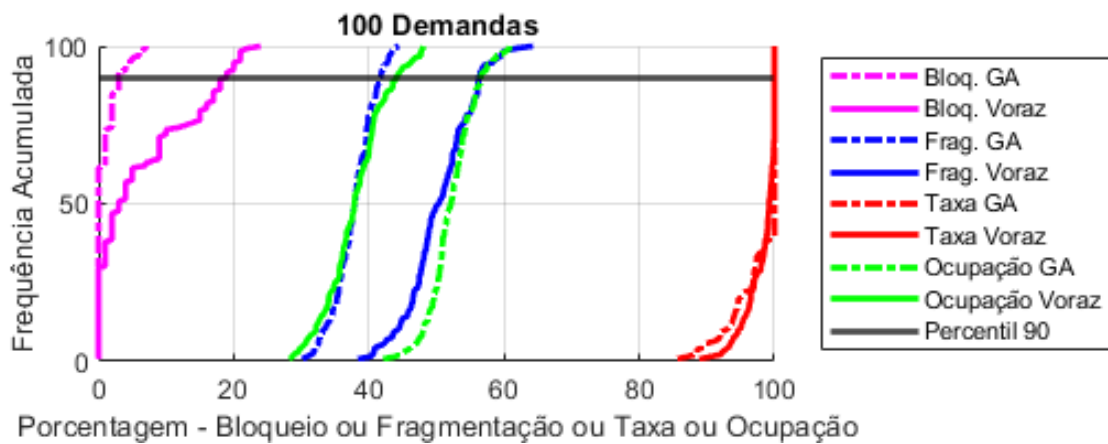


Figura 8 - CDFs do bloqueio, da fragmentação, do percentual de taxa de transmissão atendida e da ocupação do GA e Voraz com 100 demandas.

A Figura 9 apresenta as CDFs para 150 demandas. A probabilidade de bloqueio foi de 13,33% no GA contra 50,53% no Voraz e o percentual da taxa atendida foi de 94,30% contra 95,34%. O GA apresentou fragmentação de 39,14% contra 46,62% do Voraz e a ocupação foi de 66,35% contra 54,34%.

O índice da taxa atendida com o GA é ligeiramente inferior ao do Voraz no cenário de 150 demandas. Isso provavelmente se deve ao fato de o GA selecionar indivíduos que eventualmente bloqueiam mais demandas de tamanho intermediário para conseguir alocar uma quantidade maior de demandas totais e atender a mais clientes, ao passo que

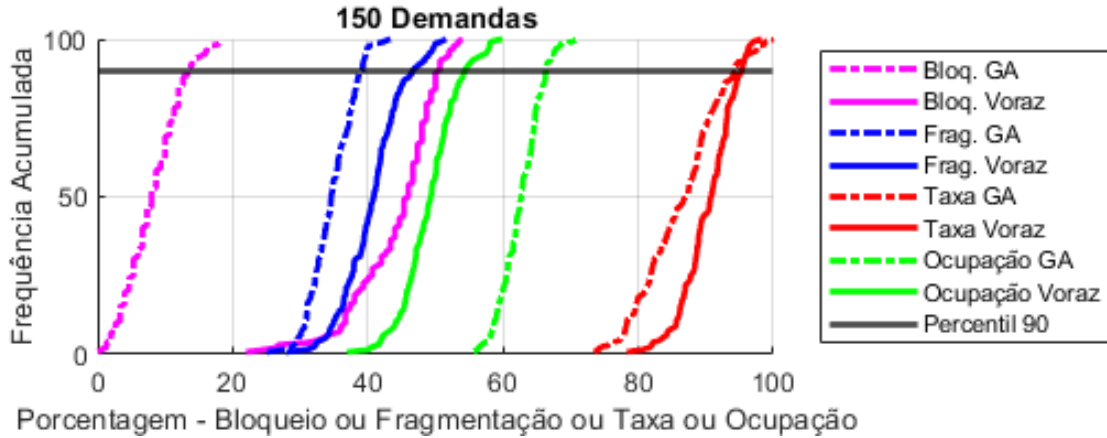


Figura 9 - CDFs do bloqueio, da fragmentação, do percentual de taxa de transmissão atendida e da ocupação do GA e Voraz com 150 demandas.

o algoritmo Voraz aloca suas demandas por ordem de tamanho, de forma que as maiores demandas encontram sempre a rede vazia e conseguem ser atendidas, resultando em uma taxa de transmissão total maior. Observa-se que a probabilidade de bloqueio menor do GA faz com que suas soluções ocupem mais a rede. Para atender mais demandas, as soluções do GA utilizam mais fatias.

De uma forma geral, em termos de bloqueio e fragmentação (os critérios de desempenho que o GA considera), conclui-se que o algoritmo Genético proposto obtém soluções com desempenhos muito superiores às do algoritmo Voraz, em especial nos cenários com 100 e 150 demandas. No caso da fragmentação, a maior diferença ocorre quando o número de demandas é igual a 75.

7.2 Estudo da Influência do Bloqueio e Fragmentação

Com o objetivo de verificar o impacto dos parâmetros Bloqueio e Fragmentação sobre a função de avaliação f_{a1} , o GA proposto foi avaliado com duas outras funções de avaliação:

$$f_{a2}(\text{Bloqueio}) = \text{Bloqueio} \quad \text{e} \quad (21)$$

$$f_{a3}(\text{Fragmentação}) = \text{Fragmentação}, \quad (22)$$

cada uma delas minimizando individualmente um parâmetro de desempenho quando o número de demandas é igual a 100. A Figura 10 apresenta a CDF do GA proposto para

fa_2 e fa_3 . A probabilidade de bloqueio foi de 3% para fa_2 e de 32% para fa_3 , enquanto o percentual da taxa atendida foi de 100% para fa_2 e de 96,29% para fa_3 . A fragmentação foi de 54,02% para fa_2 e 34,09% para fa_3 , enquanto a ocupação foi de 53,96% para fa_2 contra 56,36% para fa_3 .

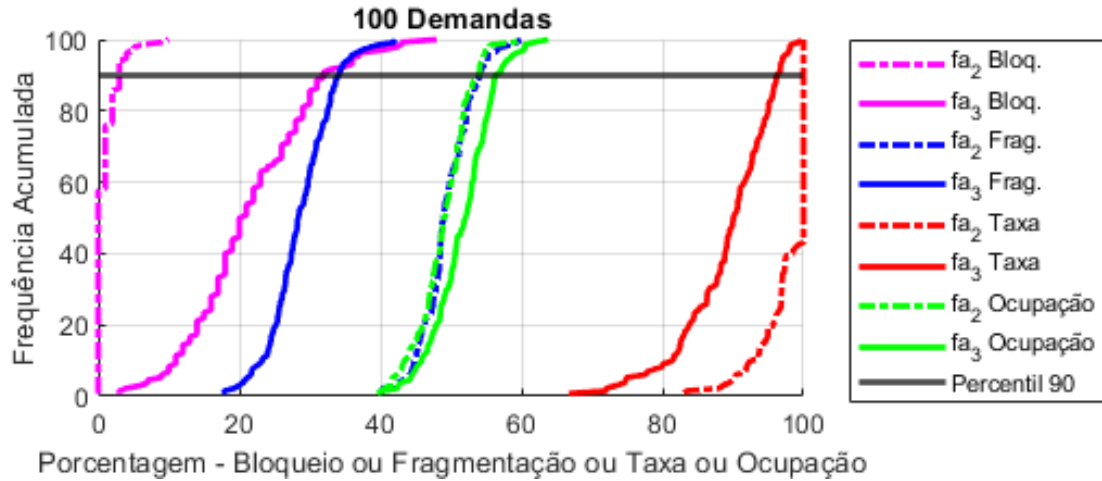


Figura 10 - CDFs do bloqueio, da fragmentação, do percentual de taxa de transmissão atendida e da ocupação do GA para fa_2 (ver equação (21)) e fa_3 (ver equação (22)) com 100 demandas de entrada.

Com a função fa_2 , a probabilidade de bloqueio se mantém igual enquanto a fragmentação piora, comparativamente a fa_1 ; já, com fa_3 , a fragmentação diminui, porém a probabilidade de bloqueio e a taxa atendida se deterioram. Estes resultados corroboram o desempenho obtido com os pesos atribuídos a fa_1 , que podemos ver na Figura 8 e Figura 10.

7.3 Estudo da Ordenação de Demandas

Para estes resultados, foi variado o esquema de ordenação para 75, 100 e 150 demandas. A Figura 11 apresenta as CDFs dos índices de desempenho considerando 75 demandas para os três esquemas de alocação de demandas. A linha horizontal preta corresponde ao percentil 90. Ela cruza a CDF de bloqueio em 0% e o percentual da taxa de transmissão atendida em 100% para todos os esquemas. Para a fragmentação, o percentil 90 foi de 44,35% para o RO, 43,45% para TTD e 41,48% para MSF, e a ocupação foi de 44,87, 48,31 e 48,75%, respectivamente. Também calculou-se a variância desses indicadores de desempenho para avaliar sua dispersão em torno de suas médias. A variância do

bloqueio foi igual a 0,22, 0,18 e 0,01%² para RO, TTD e MSF, respectivamente. Para a fragmentação, foi 6,96, 18,42 e 11,98%². Para o percentual de taxa de transmissão atendida, foi de 0,0008, 1,04 e 0,08%². Por fim, para ocupação, foi 23,66, 33,41, 27,60%².

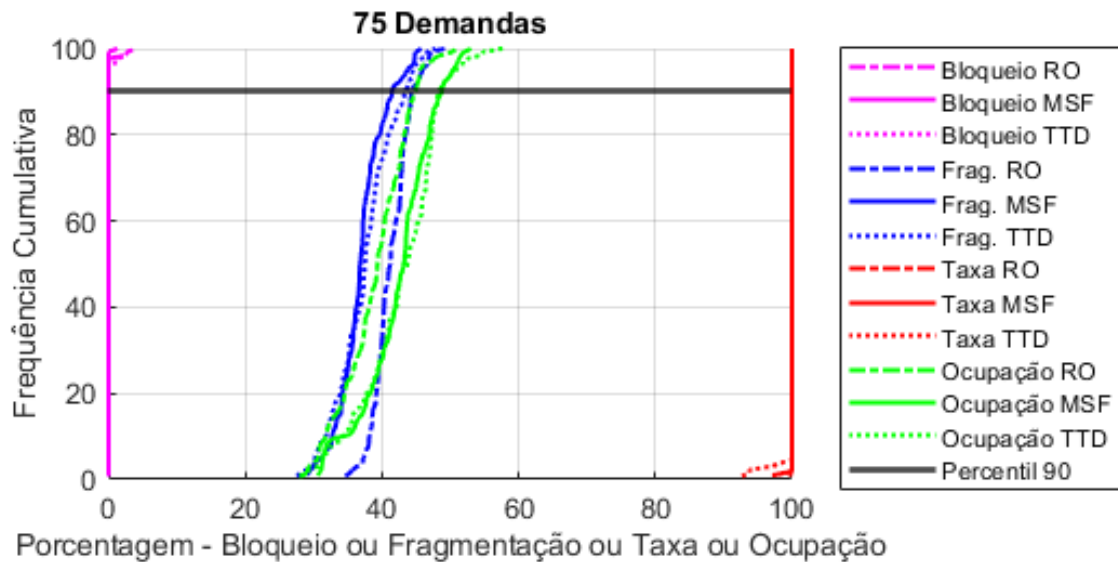


Figura 11 - CDFs para 75 demandas nos três esquemas de ordenação de demandas (RO, MSF e TTD).

A Figura 12 mostra os resultados para 100 demandas de entrada. Os percentis 90 do bloqueio foram 4% para o RO, 3% para o TTD e 1,80% para o MSF, enquanto para o percentual de taxa de transmissão atendida foi de 100% para todos os esquemas de ordenação de demanda. Para a fragmentação, foi de 46,48% para o RO, 41,74% para o TTD e 41,76% para o MSF, enquanto para a ocupação, foi de 52,82, 56,58 e 56,56%, respectivamente. A variância do bloqueio foi igual a 3,05, 2,65 e 0,81%² para o RO, o TTD e o MSF, respectivamente. Para a fragmentação, foi de 8,05, 9,25 e 7,83%², para o percentual da taxa de transmissão atendida, de 0,16, 11,27 e 3,98%² e, por fim, para a ocupação, de 12,02, 12,08, 13,32%², respectivamente.

A Figura 13 apresenta as CDFs para 150 demandas. O bloqueio tem um percentil 90 igual a 9,33% para o RO, 13,33% para o TTD e 13,20% para o MSF, enquanto o percentual da taxa de transmissão atendida foi de 99,66, 94,30 e 96,49%, a fragmentação de 43,41, 39,14 e 39,89% e a ocupação de 60,27, 66,35 e 66,17%, respectivamente. A variância do bloqueio foi igual a 6,11, 16,79 e 19,74%² para RO, TTD e MSF, e 5, 10,66 e 9,82%² para a fragmentação. Para o percentual da taxa de transmissão, foi de 0,83, 35,31 e 44,72%², e para a ocupação, de 5,99, 8,96, 9,63%², respectivamente.

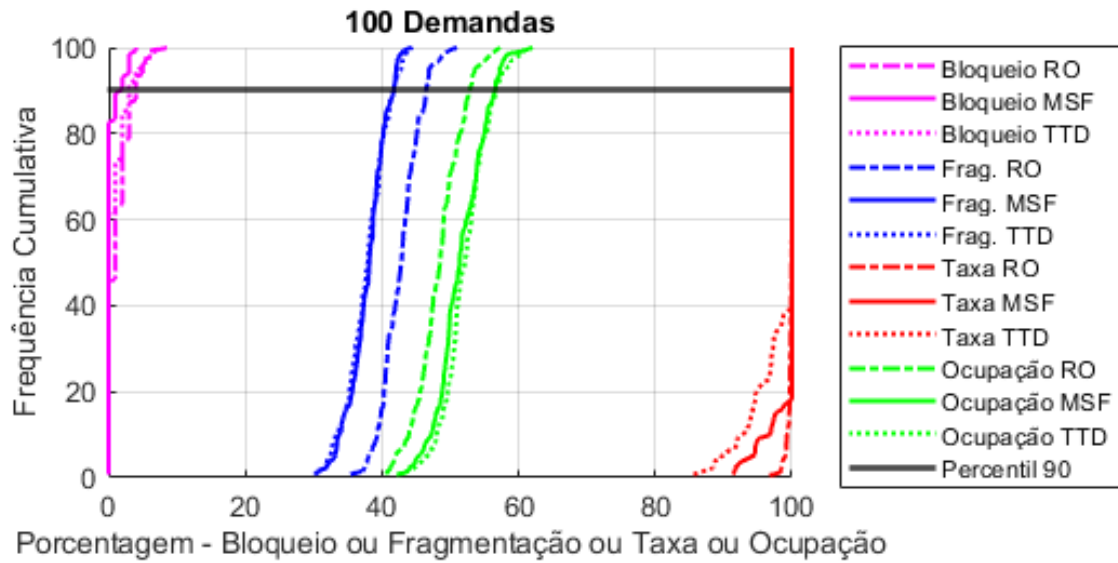


Figura 12 - CDFs para 100 demandas nos três esquemas de ordenação de demandas (RO, MSF e TTD).

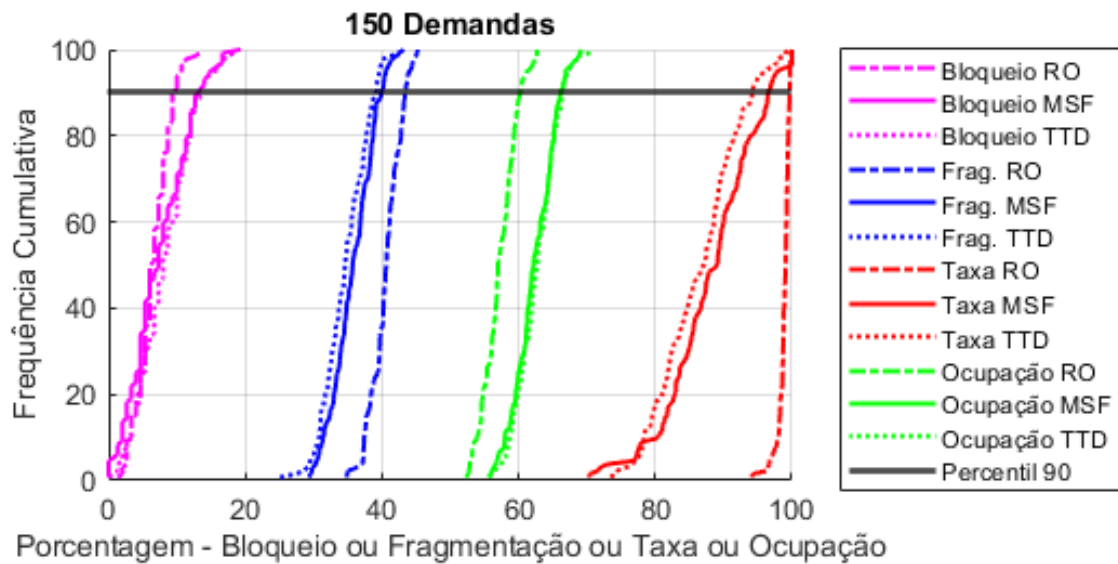


Figura 13 - CDFs para 150 demandas nos três esquemas de ordenação de demandas (RO, MSF e TTD).

Os três esquemas de alocação apresentam percentis 90 muito semelhantes em todos os índices. Assim, pode-se concluir que o uso dos critérios de alocação RO, TTD ou MSF não impacta significativamente o desempenho das soluções fornecidas pelo GA proposto. No entanto, uma análise mais cuidadosa é necessária.

As variâncias dos índices de desempenho, em geral, apresentam valores mais próximos (variação em torno da média é próximo, o que indica comportamento estatístico

similar) para o MSF e TTD, enquanto para as soluções usando RO, elas são menos próximas. Além disso, na maioria dos índices, o RO leva a uma variância menor do que o MSF e TTD, o que significa que o desempenho das soluções RO varia menos do que os fornecidos pelo MSF e TTD.

A partir das CDFs da Figura 11 à Figura 13, nota-se que o desempenho do GA proposto é próximo quando as demandas são alocadas usando os critérios MSF ou TTD, enquanto o RO se afasta deles para todos os índices. O RO apresenta um desempenho ligeiramente melhor do que o MSF e TTD para todos os índices, exceto para a fragmentação. Isso pode indicar que ordenar as demandas (MSF ou TTD) para alocação de recursos é mais indicado quando se pretende reduzir a fragmentação, e usar RO é mais indicado para reduzir o bloqueio ou a ocupação e aumentar o percentual da taxa de transmissão atendida. À primeira vista, isso ocorre porque o critério RO permite explorar soluções que de outra forma não seriam consideradas pelo MSF ou TTD, uma vez que a priorização das demandas em função de sua taxa de transmissão ou largura espectral faz com que a população convirja mais rapidamente, mas reduz sua variabilidade. Essa hipótese deve ser investigada em trabalhos futuros.

7.4 Estudo do Parâmetro K

Com o objetivo de verificar o impacto da variação do parâmetro K na função de avaliação fa_1 , foi simulado o cenário de 100 demandas para $K = 2$ e $K = 4$. A Figura 14 apresenta a CDF do GA proposto para fa_1 com $K = 2$ e $K = 4$. O bloqueio foi de 3% para $K = 2$ e de 4% para $K = 4$ e o percentual da taxa atendida foi de 100% para ambos. A relação de fragmentação foi de 42,06% para $K = 2$ e 42,55% para $K = 4$, enquanto a ocupação foi de 54,46% para $K = 2$ contra 58,45% para $K = 4$.

Comparando a Figura 8 e a Figura 14, nota-se pouca variação nas CDFs para $K = 2$ e $K = 3$. Como $K = 4$ oferece mais opções de rotas, inicialmente esperávamos resultados melhores; no entanto, esta hipótese não se confirmou. Isso pode significar que o tamanho da população ou a quantidade de gerações não foram suficientes para varrer o maior espaço de busca. Outra justificativa seria que as novas rotas possíveis são mais compridas e requerem mais fatias.

Com o objetivo de testar este ponto, executamos o GA proposto para 100 gerações e $K = 2, 3, 4, 5$. Observando o percentil 90, o indicador de bloqueio foi de 2% para todos

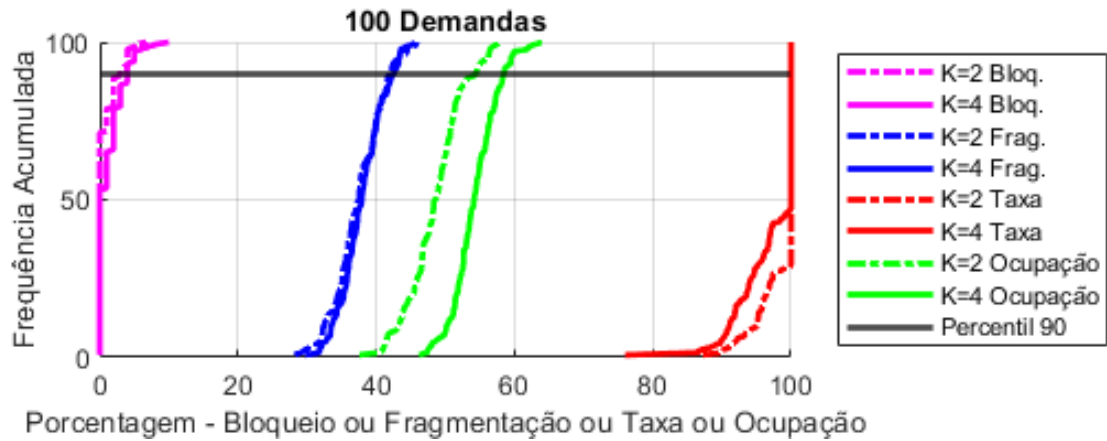


Figura 14 - CDFs do bloqueio, da fragmentação, do percentual de taxa de transmissão atendida e da ocupação do GA para fa_1 e $K = 2$ e $K = 4$ com 100 demandas de entrada.

os valores de K , exceto para $K = 5$ que foi igual a 4%, ao passo que o percentual da taxa de transmissão atendida foi de 100% para todos os K . Para a fragmentação, foram observados os seguintes valores 39,86%, 40,09%, 39,48% e 39,15%, respectivamente. Para a ocupação, obteve-se 53,83%, 57,35%, 59,53% e 60,25%, respectivamente.

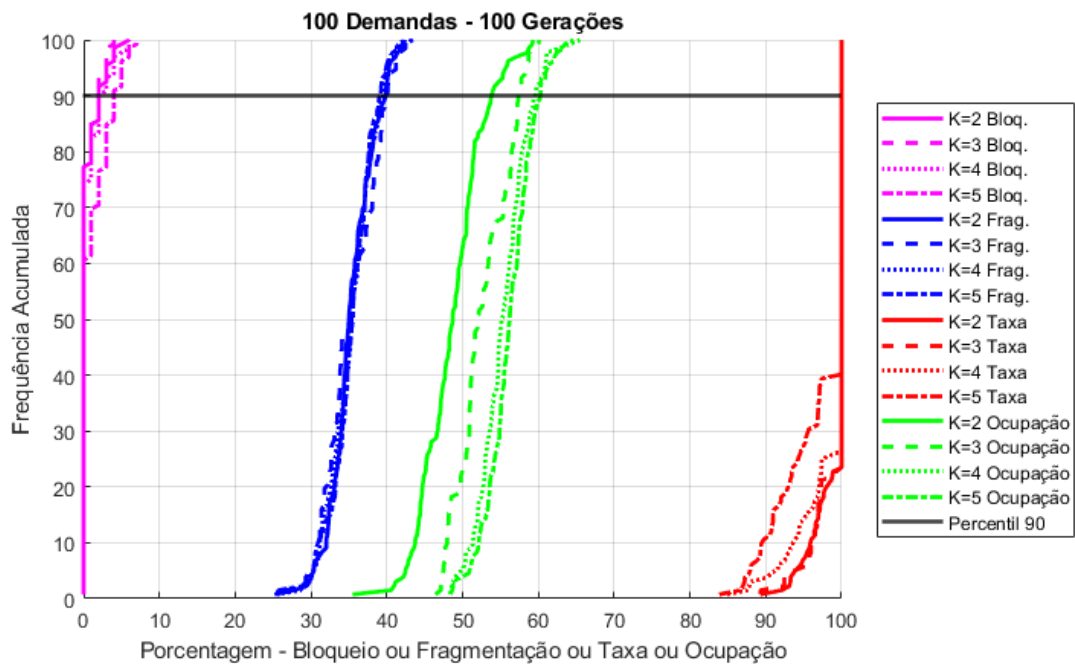


Figura 15 - CDFs do bloqueio, da fragmentação, do percentual de taxa de transmissão atendida e da ocupação do GA para $K = 2, 3, 4, 5$ com 100 gerações com 100 demandas de entrada.

Comparando a Figura 8 (com $K = 3$ e 50 gerações) e a Figura 15 (com 100

gerações), houve uma melhora significativa em termos de bloqueio e fragmentação para todos os K s, com exceção do bloqueio, taxa de transmissão e ocupação para $K = 5$, embora a ocupação tenha piorado para todos os K , com exceção de $K = 2$. Para o caso $K = 5$, nossa hipótese ainda é que 100 gerações talvez não sejam suficientes para lidar com o aumento da população causado pela maior quantidade de enlaces por demanda. A piora da ocupação para os demais K s, com exceção de $K = 2$, provavelmente se deve a uma diminuição do bloqueio, o que faz com que a rede precise ficar mais ocupada.

Destaca-se que $K = 2$ retornou os melhores resultados em comparação aos outros valores de K s, pois a ocupação foi significativamente menor do que seus pares, enquanto o bloqueio e a taxa de transmissão foram iguais. Além disso, o indicador de fragmentação se manteve estável para todos os K testados. Isso pode indicar que diminuir o K e aumentar a quantidade de gerações pode fornecer melhores resultados em comparação a aumentar ambos os parâmetros do GA.

7.5 Número de Saltos por Demanda e Índice da Última Subportadora Ocupada por Enlace

O número de saltos por demanda é uma interface para a ocupação da rede, indicando mais ou menos enlaces usados na rota correspondente, de modo a poder ser correlacionado com o bloqueio, a fragmentação e o percentual da taxa de transmissão atendida pela solução. O índice da última subportadora ocupada por enlace é outra perspectiva sobre a ocupação da rede e indica a largura de banda para fácil alocação de demandas futuras.

A Figura 16 mostra as CDFs discretas do número de saltos por demanda para 75, 100 e 150 demandas de entrada, respectivamente, com os três esquemas de ordenação. Note-se que o percentil 90 do número de saltos por demanda é 6 para todos os cenários simulados, exceto para TTD e MSF quando a rede tem que atender 150 demandas, quando cai para 5. A moda deste primeiro indicador é sempre 4, e a mediana é 4 em quase todos os casos, exceto para 150 demandas de entrada sob os critérios TTD ou MSF quando cai para 3 (possivelmente as funções de aptidão favorecem soluções com menos saltos para reduzir o bloqueio).

Os resultados do número de saltos por demanda são substancialmente semelhantes em todos os cenários de simulação. Isso provavelmente ocorre porque o algoritmo Yen

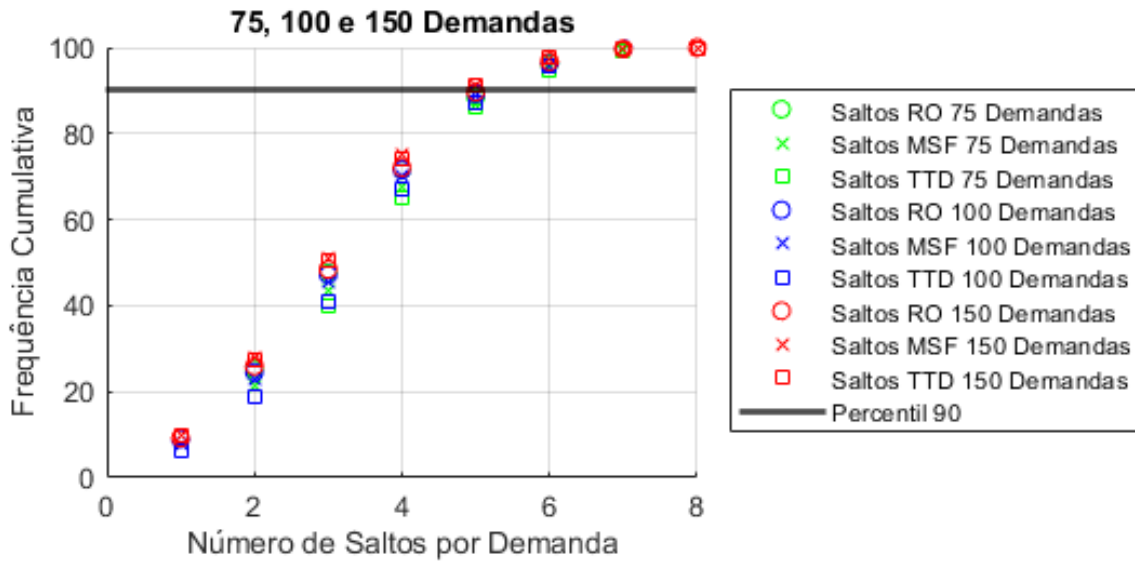


Figura 16 - CDFs de número de saltos por demanda para 75, 100 e 150 demandas nos três esquemas de ordenação de demandas.

(usado para definir as rotas possíveis) não tem conhecimento da função de aptidão.

A Figura 17 mostra as CDFs do índice da última subportadora ocupada por enlace para 75, 100 e 150 demandas de entrada, respectivamente, com os três esquemas de ordenação de demandas. Enlaces não usados estão presentes nas CDFs e são computados como 0 subportadoras usadas. Para 75 demandas, esse parâmetro foi igual a 348, 353 e 350 para o RO, TTD e MSF, respectivamente. Para 100 demandas, foi 354, 357 e 354. Por fim, para 150 demandas, foi 357, 354 e 358. A moda para esse parâmetro foi 352, 348 e 330 para 75 demandas, 358, 358 e 350 para 100 demandas. Para 150 demandas, esse parâmetro foi igual a 358, 353 e 358 (RO, TTD e MSF). A mediana foi igual a 269, 317 e 314 para 75 demandas, 323, 343 e 336 para 100 demandas e 341, 340 e 349 para 150 demandas (RO, TTD e MSF).

Quanto mais próxima a curva atinge o canto inferior direito, mais ocupados os enlaces de rede estão. Consequentemente, embora os percentis 90 da última subportadora se aproximem do maior índice de subportadoras possível (358), a concavidade (bocal) das CDFs na Figura 17 mostra que o cenário com 75 demandas apresenta mais elances com menor ocupação do que o cenário com 150 demandas. Além disso, nota-se que as CDFs resultantes do uso do RO estão um pouco acima das curvas MSF e TTD, que apresentem desempenhos mais semelhantes também para os outros indicadores de desempenho, conforme destacado na Seção 7.3.

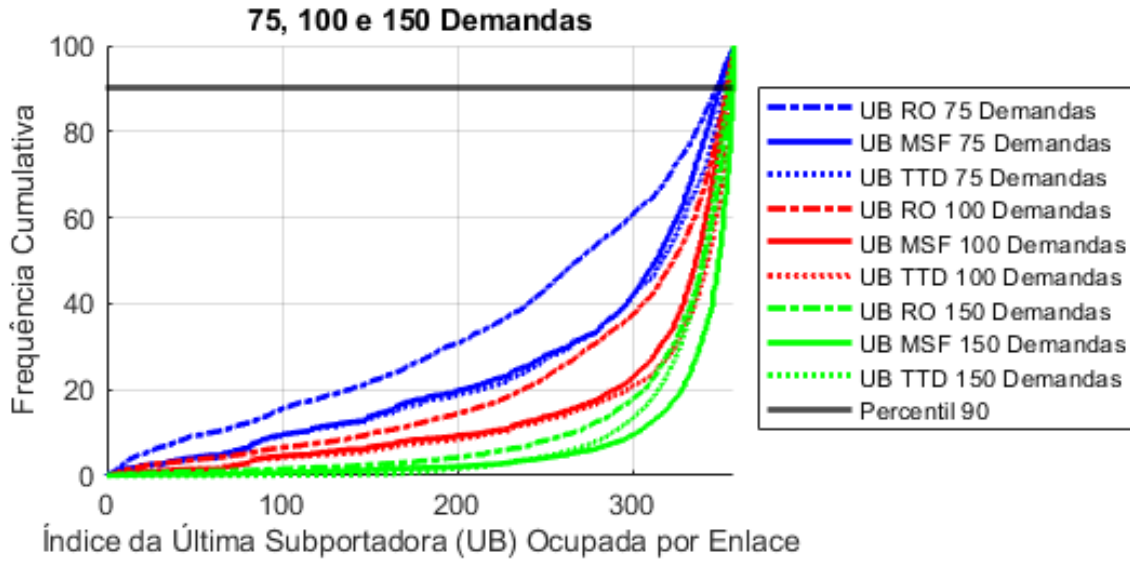


Figura 17 - CDFs de índice da última subportadora (UB) ocupada por enlace para 75, 100 e 150 demandas nos três esquemas de ordenação de demandas.

7.6 Otimização Bayesiana

Os resultados dos índices de desempenho considerando a otimização dos pesos da função de avaliação pelo método Bayesiano foram inicialmente comparados com os obtidos pelo GA puro usando a fa_1 (i.e., a equação fa_1 com $\alpha = 5$ e $\beta = 3$) com ordenação de demandas decrescente por taxa de transmissão. Devido a limitações de recursos computacionais que implicam em restrições temporais, foram realizadas 82 rodadas do algoritmo Bayesiano para otimização dos pesos da função de avaliação do GA sob o cenário de 150 demandas; estas são com os resultados obtidos pelo GA original (com fa_1) para as mesmas demandas. Nota-se que a quantidade de rodadas de 82 passa no teste de Mann-Whitney descrito na Seção 6.3.

A Figura 18 apresenta as CDFs dos índices de desempenho do GA otimizado por Bayesiano em comparação com o GA puro (para 150 demandas). A discussão de resultados a seguir se refere ao Percentil 90. A probabilidade de bloqueio foi de 12,66% para o GA + Bayesiano e de 13,86% para o GA puro. A fragmentação foi de 39,17% contra 39,23%. Para o percentual de taxa de transmissão atendida foi observado 91,98% para o GA + Bayesiano contra 94,30% para o GA puro, e para a ocupação foi de 66,24% nos dois cenários. Nota-se que não houve modificações significativas nesses índices de desempenho. Apesar da maior diferença (porém ligeira) no bloqueio e no percentual

de taxa de transmissão atendida, as diferenças não são significativas. Além disso, a fragmentação e a ocupação se mantiveram muito similares.

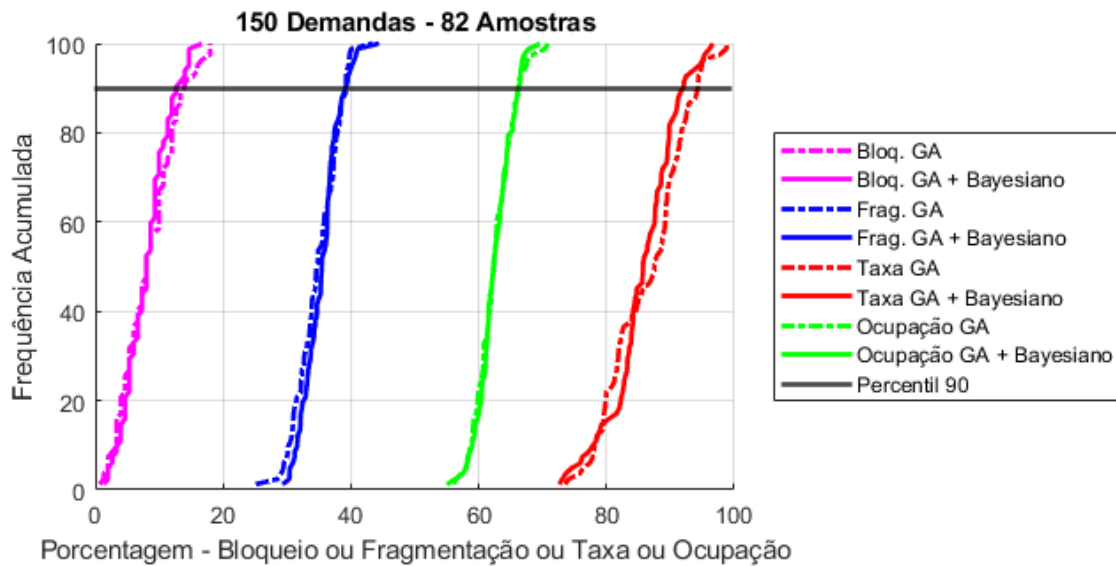


Figura 18 - CDFs para bloqueio, fragmentação, percentual da taxa de transmissão atendida e ocupação para o GA puro e GA com a otimização Bayesiana dos pesos da função de avaliação com 150 demandas.

Apesar da pequena diferença de desempenho observada, os resultados confirmam a hipótese de que o método Bayesiano pode ser empregado para otimizar pesos da função de avaliação do GA, de forma a eliminar a etapa de escolha de parâmetros arbitrada. A Figura 19 e a Figura 20 apresentam os gráficos gerados pela ferramenta MatLab com a evolução do parâmetro α pela otimização Bayesiana de duas rodadas de otimização de α , em que foram observadas grandes variações no valor da função de avaliação do GA entre a primeira iteração e a última da otimização Bayesiana. É possível notar que o algoritmo testa valores de α em todo o espaço de busca, entre 0,5 e 1, até que a condição de parada seja atendida para retornar o α que resulta na menor função de avaliação. Para a rodada ilustrada na Figura 19, o valor de α ótimo está em torno de 0,78 para uma função de avaliação próxima a 16,2 e na Figura 20, o valor de α está em torno de 0,98 para a função de avaliação perto de 10,3.

A Figura 21 apresenta a Função Densidade de Probabilidade (PDF - *Probability Density Function*) para o valor de α considerando todas as 82 interações. Ressalta-se que foi utilizada a PDF, em vez da CDF, pois seria mais importante avaliarmos a densidade de probabilidade do α em torno de um ponto específico; isto é, o α encontrado pelo método

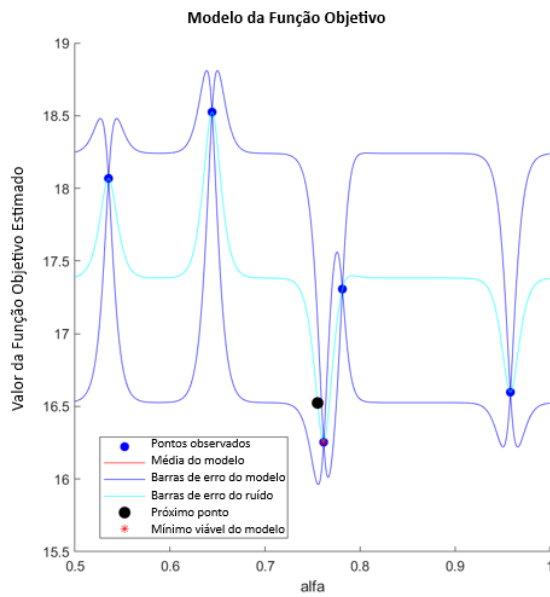


Figura 19 - Evolução de α usando a otimização Bayesiana – Exemplo 1.

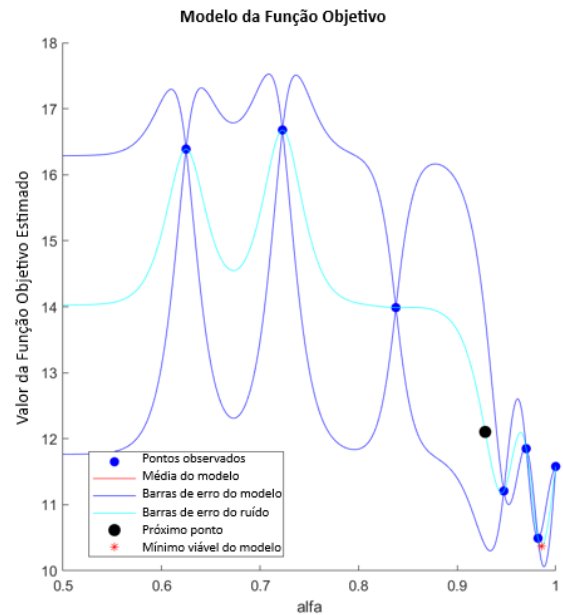


Figura 20 - Evolução de α usando a otimização Bayesiana – Exemplo 2.

Bayesiano que mais frequentemente minimizava a função de avaliação do GA.

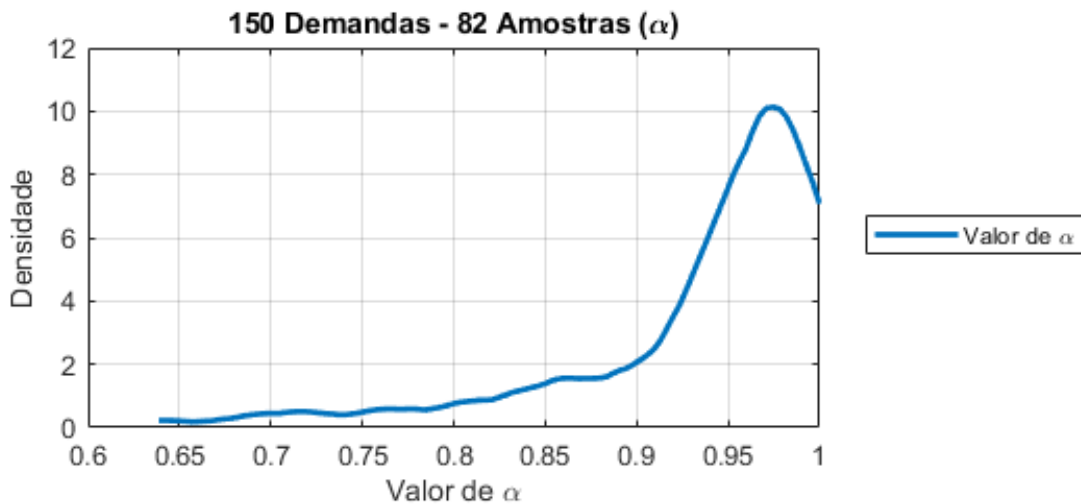


Figura 21 - PDF valor de α .

Observa-se que o pico da PDF corresponde a α igual a 0,9744. Aplicando-o na função f_B , temos os pesos de 0,7372 para o bloqueio e 0,2628 para a fragmentação. Para fins comparativos, normalizando os pesos 5 e 3 usados em f_{a1} temos 0,625 (5/8) para o peso dado aos bloqueio e 0,375 (3/8) para o da fragmentação. A proximidade entre os valores dos pesos provavelmente é a justificativa para que os resultados para os indicadores de desempenho da Figura 18 tenham ficado tão próximos na comparação do GA puro com

o GA + Bayesiano.

Os resultados mostram que a utilização da otimização Bayesiana para a definição de parâmetros do GA é uma técnica eficiente e confiável. Em trabalhos futuros, ela pode ser empregada em uma função de avaliação mais complexa que considere, por exemplo, o bloqueio, a fragmentação, a ocupação e o percentual da taxa de transmissão atendida. Além disso, cumpre testá-la em outros problemas.

CONCLUSÃO

As redes ópticas elásticas permitem flexibilidade e melhor alocação de espectro, favorecendo o atendimento a demandas com taxas de transmissão cada vez maiores. Entretanto, seu uso enseja resolver o problema RMLSA. Este trabalho apresentou um algoritmo genético que procurou minimizar simultaneamente o bloqueio, percentual de demandas não atendidas por falta de recursos na rede, e a fragmentação espectral, percentual de lacunas no espectro da rede.

Utilizamos uma abordagem estocástica, envolvendo uma análise de CDFs e percentis 90, para avaliar a proposta. No cenário da rede NSFNET, quando 150 demandas de taxas de transmissão diversas são apresentadas à rede, observou-se que o GA proposto resulta em percentis 90% iguais a 13,33% para bloqueio contra os 50,53% obtidos por um critério de alocação voraz dos recursos da rede e o percentual da taxa atendida foi de 94,30% contra 95,34% da abordagem voraz. Em relação às outras métricas, o GA apresentou, frente ao critério voraz, fragmentação de 39,14% contra 46,62% e ocupação foi 66,35% contra 54,34%.

Além disso, este trabalho estudou o comportamento do GA proposto sob três esquemas de ordenação de demandas de entrada na rede: Taxa de Transmissão Decrescente (TTD), Primeiro as Subportadoras de Maiores Índices (MSF - *Most Subcarriers First*) e Ordenação Aleatória (RO - *Random Order*). Os resultados mostraram que não há diferenças significativas de desempenho entre eles. No entanto, o uso de nenhuma ordenação (escolha aleatória das demandas para economizar recursos) levou a taxa de bloqueio, percentual de taxa de transmissão atendida e ocupação ligeiramente melhores, enquanto as estratégias que empregam ordenação de demandas mostraram uma taxa de fragmentação menor.

Por fim, a fim de propor alternativas à arbitragem dos pesos dos parâmetros da função multiobjetivo do GA, implementamos uma otimização Bayesiana para encontrar os pesos das taxas de bloqueio e de fragmentação na função de avaliação do GA proposto. Considerando o mesmo cenário, e a análise dos percentis 90 das CDFs, isto é, a NSFNET deveria atender 150 demandas aleatórias, a probabilidade de bloqueio foi de 12,66% para o GA + Bayesiano e de 13,86% para o GA puro. A fragmentação foi de 39,17% contra

39,23%. Para o percentual de taxa de transmissão atendida, foram obtidos 91,98% para o GA + Bayesiano e 94,30% para o GA puro e a ocupação foi de 66,24% nos dois cenários. Os resultados confirmam que é possível empregar a otimização Bayesiana para determinar os pesos em funções de avaliação com múltiplos critérios em algoritmos genéticos, de forma a eliminar a escolha arbitrária desses parâmetros. Nota-se que estes resultados para o GA puro não são diretamente comparáveis aos resultados anteriores, uma vez que a quantidade de rodadas era diferente.

Em trabalhos futuros, pretende-se investigar novas funções de avaliação para o problema RMLSA em EONs, considerando, por exemplo, a maximização da taxa de transmissão, novos cenários de simulação – topologia e escolha das demandas da EON, o impacto da quantidade de rotas possíveis K e alternativas para determinação dos parâmetros do algoritmo genético. Além disso, pretendemos investigar novas funções de avaliação, considerando, por exemplo, o índice da última subportadora atribuída para melhorar o balanceamento de enlaces e equipar a rede com capacidade para alocar demandas futuras. Novas implementações usando GA em combinação com a otimização Bayesiana de seus parâmetros podem ser adicionalmente propostas para funções de avaliação mais complexas do RMLSA, que considerem, por exemplo, simultaneamente, o bloqueio, a fragmentação, a ocupação e o percentual de taxa de transmissão atendida. Complementarmente, o uso da otimização Bayesiana para otimizar os parâmetros de algoritmos genéticos em outros problemas pode ser outro caminho interessante.

REFERÊNCIAS

- [1] 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.
- [2] MARQUES, R. et al. Roteamento, Nível de Modulação e Alocação de Espectro em Redes Ópticas Elásticas via Algoritmo Genético. *XLII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBRT)*, 2024.
- [3] MARQUES, R.; LOVISOLO, L.; RUBINSTEIN, M. Routing, Modulation Level and Spectrum Allocation in EONs via Genetic Algorithm Under Different Assignment Criteria. *IEEE Latin-American Conference on Communications*, 2024.
- [4] RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K.; SASAKI, G. *Optical Networks*. 3. ed. Burlington: Morgan Kaufmann, 2009.
- [5] CHRISTODOULOPOULOS, K.; TOMKOS, I.; VARVARIGOS, E. Elastic Bandwidth Allocation in Flexible OFDM-based Optical Networks. *Journal of Lightwave Technology*, v. 29, n. 9, p. 1354–1366, May 2011.
- [6] COSTA, L. R. *Eficiência Energética em Redes Ópticas Elásticas*. Tese (Doutorado em Informática) — Universidade de Brasília, Brasília, 2021.
- [7] ZHANG, G. et al. A Survey on OFDM-based Elastic Core Optical Networking. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 15, n. 1, p. 65–87, 2012.
- [8] ITU-T. *ITU-T G.694.1: Spectral Grids for WDM Applications: DWDM Frequency Grid*. Oct 2020. <https://handle.itu.int/11.1002/1000/14498>.
- [9] LU, W. et al. Dynamic Service Provisioning of Advance Reservation Requests in Elastic Optical Networks. *Journal of Lightwave Technology*, v. 31, n. 10, p. 1621–1627, Mar 2013.
- [10] KUROSE, J. F.; ROSS, K. W. *Redes de Computadores e a Internet: uma Abordagem Top-Down*. 8. ed. Porto Alegre: Bookman, 2020.

- [11] YEN, J. Y. Finding the k Shortest Loopless Paths in a Network. *Management Science*, v. 17, n. 11, p. 712–716, 1971.
- [12] YUAN, J. et al. A RMSA Algorithm for Elastic Optical Network with a Tradeoff Between Consumed Resources and Distance to Boundary. *Optical Fiber Technology*, Elsevier, v. 46, p. 238–247, 2018.
- [13] IYER, S. Performance Benefits of Regeneration Flexibility and Modulation Convertibility in Elastic Optical Networks. *Telecommunication Systems*, p. 1–14, 2017.
- [14] ZHANG, F. et al. *GMPLS OSPF-TE Extensions in Support of Flexible-Grid in DWDM networks*. 2012. Draft-zhang-ccamp-flexible-grid-ospf-ext-00.txt.
- [15] CHATTERJEE, B. C.; SARMA, N.; OKI, E. Routing and Spectrum Allocation in Elastic Optical Networks: A Tutorial. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 17, n. 3, p. 1776–1800, 2015.
- [16] ROSA, A. et al. Spectrum Allocation Policy Modeling for Elastic Optical Networks. *High Capacity Optical Networks and Emerging/Enabling Technologies*, p. 242–246, 2012.
- [17] LEIVA, A. et al. A Joint RSA Algorithm for Dynamic Flexible Optical Networking. *IEEE Latin America Transactions*, v. 13, n. 11, p. 3531–3537, 2015.
- [18] WANG, R.; MUKHERJEE, B. Spectrum Management in Heterogeneous Bandwidth Networks. *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, p. 2907–2911, 2012.
- [19] TESSINARI, R. S.; COLLE, D.; GARCIA, A. S. Cognitive Zone-Based Spectrum Assignment Algorithm for Elastic Optical Networks. *2018 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, p. 112–117, 2018.
- [20] CHATTERJEE, B. C.; FADINI, W.; OKI, E. A Spectrum Allocation Scheme Based on First–Last–Exact Fit Policy for Elastic Optical Networks. *Journal of Network and Computer Applications*, v. 68, p. 164–172, 2016.
- [21] WANG, R.; MUKHERJEE, B. Spectrum Management in Heterogeneous Bandwidth Optical Networks. *Optical Switching and Networking*, Elsevier, v. 11, p. 83–91, 2014.

- [22] LIRA, C. J.; JR, R. C. A.; CHAVES, D. A. Spectrum Allocation Using Multiparameter Optimization in Elastic Optical Networks. *Computer Networks*, Elsevier, v. 220, p. 109478, 2023.
- [23] ABKENAR, F. S.; RAHBAR, A. G. Study and Analysis of Routing and Spectrum Allocation (RSA) and Routing, Modulation and Spectrum Allocation (RMSA) Algorithms in Elastic Optical Networks (EONs). *Optical Switching and Networking*, Elsevier, v. 23, p. 5–39, 2017.
- [24] DOERR, B.; NEUMANN, F. A Survey on Recent Progress in the Theory of Evolutionary Algorithms for Discrete Optimization. *ACM Transactions on Evolutionary Learning and Optimization*, v. 1, n. 4, p. 1–43, 2021.
- [25] ROTTONDI, C. et al. Routing, Modulation Level, and Spectrum Assignment in Optical Metro Ring Networks Using Elastic Transceivers. *Journal of Optical Communications and Networking*, v. 5, n. 4, p. 305–315, 2013.
- [26] ZHOU, X. et al. Dynamic RMSA in Elastic Optical Networks with an Adaptive Genetic Algorithm. *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, p. 2912–2917, 2012.
- [27] GONG, L. et al. A Two-Population Based Evolutionary Approach for Optimizing Routing, Modulation and Spectrum Assignments (RMSA) in O-OFDM Networks. *IEEE Communications letters*, v. 16, n. 9, p. 1520–1523, 2012.
- [28] LIU, H. et al. Spectrum Slicing-based Fragmentation Aware Routing and Spectrum Allocation in Elastic Optical Networks. *Optical Switching and Networking*, v. 45, p. 100673, 2022.
- [29] DINARTE, H. A. et al. Routing and Spectrum Assignment: A Metaheuristic for Hybrid Ordering Selection in Elastic Optical Networks. *Computer Networks*, v. 197, p. 108287, 2021.
- [30] LOHANI, V.; SHARMA, A.; SINGH, Y. N. Routing, Modulation and Spectrum Assignment using an AI based Algorithm. *11th International Conference on Communication Systems & Networks (COMSNETS)*, p. 266–271, 2019.

- [31] LI, H. et al. Deployment of VNF Service Chains with Grooming and Resilience in Elastic Optical Networks. *Optical Fiber Technology*, v. 81, p. 103482, 2023.
- [32] CHATTERJEE, B. C.; SATO, T.; OKI, E. Recent Research Progress on Spectrum Management Approaches in Software-defined Elastic Optical Networks. *Optical Switching and Networking*, v. 30, p. 93–104, 2018.
- [33] THANGARAJ, J. et al. Multi-path Provisioning in Elastic Optical Network With Dynamic on-request Optimal Defragmentation Strategy. *Optical Switching and Networking*, v. 41, p. 100607, 2021.
- [34] FERNÁNDEZ-MARTÍNEZ, S.; BARAN, B.; PINTO-ROA, D. P. Spectrum Defragmentation Algorithms in Elastic Optical Networks. *Optical Switching and Networking*, v. 34, p. 10–22, 2019.
- [35] RÜTHER, C.; RIECK, J. A bayesian optimization approach for tuning a grouping genetic algorithm for solving practically oriented pickup and delivery problems. *Logistics*, v. 8, n. 1, p. 14, 2024.
- [36] LIU, M.; ZHUANG, P.; LAI, F. A bayesian optimization-genetic algorithm-based approach for automatic parameter calibration of soil models: Application to clay and sand model. *Computers and Geotechnics*, v. 176, p. 106717, 2024.
- [37] TROTTER, M.; LIU, G.; WOOD, T. Into the storm: Descrying optimal configurations using genetic algorithms and bayesian optimization. *IEEE 2nd International Workshops on Foundations and Applications of Self* Systems (FAS* W)*, p. 175–180, 2017.
- [38] KERIVIN, H.; WAGLER, A. On Superperfection of Edge Intersection Graphs of Paths. *Graphs and Combinatorial Optimization: from Theory to Applications: CTW2020 Proceedings*, Springer, p. 79–91, 2021.
- [39] MONTEIRO, N.; SOARES, A. IRON: Uma Abordagem Inteligente para Roteamento em Redes Ópticas Elásticas. *Anais do XXXIX Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, p. 308–321, 2021.

- [40] VILLAMAYOR-PAREDES, M. M. R. et al. Routing, Modulation Level, and Spectrum Assignment in Elastic Optical Networks. A Route-Permutation Based Genetic Algorithms. *Optical Switching and Networking*, v. 47, p. 100710, 2023.
- [41] ZHANG, L. et al. A Survey on QoT Prediction Using Machine Learning in Optical Networks. *Optical Fiber Technology*, v. 68, p. 102804, 2022.
- [42] FONTES, M. F. et al. *Roteamento e Alocação de Espectro em Redes Ópticas Elásticas via Algoritmo Genético*. Dissertação (Mestrado) — Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2019.
- [43] TALEBI, S. et al. Spectrum Management Techniques for Elastic Optical Networks: A Survey. *Optical Switching and Networking*, v. 13, p. 34–48, 2014.
- [44] ALBUQUERQUE, J. P. d. A.; FORTES, J. M. P.; FINAMORE, W. A. *Probabilidade, Variáveis Aleatórias e Processos Estocásticos*. 2^a. ed. Rio de Janeiro, Brasil: Editora Interciência, 2018. ISBN 978-8571934108.
- [45] FRAZIER, P. I. A Tutorial on Bayesian Optimization. *arXiv preprint arXiv:1807.02811*, 2018.
- [46] BIBI, H. et al. Dynamic Wavelength Grouping for Quality of Service in Optical Packet Switching. *IEEE Access*, v. 9, p. 60946–60959, 2021.
- [47] WILCOXON, F. et al. Critical Values and Probability Levels for the Wilcoxon Rank Sum Test and the Wilcoxon Signed Rank Test. *Selected Tables in Mathematical Statistics*, v. 1, p. 171–259, 1970.
- [48] SHIEH, W.; BAO, H.; TANG, Y. Coherent Optical OFDM: Theory and Design. *Optics Express*, v. 16, p. 841–859, 2008.
- [49] IP, E. et al. Coherent Detection in Optical Fiber Systems. *Optics Express*, v. 16, n. 2, p. 753–791, 2008.
- [50] AGRAWAL, G. *Sistemas de Comunicação por Fibra Óptica*. 4^a. ed. São Paulo: GEN LTC, 2014. ISBN 978-8535264258.

- [51] XAVIER, A. V. S. *Roteamento e Proteção Dedicada em Redes Ópticas Usando Inteligência Computacional*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2016.
- [52] ZHANG, G.; LEENHEER, M. D.; MUKHERJEE, B. Optical Traffic Grooming in OFDM-based Elastic Optical Networks. *Journal of Optical Communications and Networking*, v. 4, n. 11, p. B17–B25, 2012.
- [53] GERSTEL, O. A. Flexible Use of Spectrum and Photonic Grooming. *Silicon and Nanophotonics and Photonics in Switching Integrated Photonics Research. OSA Technical Digest (CD)*, Optical Society of America, 2010.
- [54] MA, Y. et al. Recent Progress of Wavelength Selective Switch. *Journal of Lightwave Technology*, v. 39, n. 4, p. 896–903, 2020.
- [55] JÚNIOR, J. W. S. *Posicionamento e Alocação Conjunta De Regeneradores em Redes Ópticas Elásticas*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.
- [56] GoPhotonics. *What is an In-Line Optical Amplifier?* 2023. <https://www.gophotonics.com/community/what-is-an-in-line-optical-amplifier>. Acesso em: 12/08/2024.
- [57] SHAIK, A. *EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier)*. 2018. <https://www.physics-and-radio-electronics.com/blog/edfa-erbium-doped-fiber-amplifier/>. Acesso em: 12/08/2024.

A CO-OFDM

Como mencionado anteriormente, o modelo de grade flexível proposto por [1] faz uso da tecnologia OFDM para utilizar múltiplas subportadoras de baixas taxa de dados, que com o recurso de agregação permitem alcançar taxas maiores, garantindo a flexibilidade das EONs. Neste apêndice, detalhamos como funciona essa técnica de multiplexação e a detecção coerente.

Ao aumentar a taxa de transmissão da rede para acima de 100 Gbps, aumenta-se a dispersão cromática e de modo de polarização (PMD - *Polarization Mode Dispersion*)³ devido às características físicas das fibras ópticas, tornando também muito custoso medir e compensá-las.

Isso motivou a aplicação da tecnologia OFDM em redes ópticas (que já contava com larga aplicação em enlaces de radio-frequência e sistemas de comunicações móveis⁴) visando prover mecanismos para aumentar as taxas de transmissão e estimar e mitigar os efeitos da dispersão [48].

O que se denomina CO-OFDM (*Coherent Optical - Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) refere-se à multiplexação OFDM aplicada em redes ópticas com a utilização de detecção coerente. Esta técnica proporciona as seguintes vantagens: a flexibilidade advinda pelo uso de subportadoras de baixas taxas, devido à sobreposição de portadoras derivada da ortogonalidade entre elas, o que permite uma maior capacidade de alocação por parte do OFDM, e estimação e mitigação da dispersão cromática e da PMD usando a detecção coerente.

Referindo-se à modulação OFDM, a ortogonalidade entre as subportadoras permite a sobreposição espectral com recuperação na recepção sem interferência. Uma importante vantagem do OFDM é a possibilidade de cada subportadora OFDM de um caminho óptico ser modulada individualmente em um mesmo modulador óptico I/Q (*In*

³A dispersão é um fenômeno associado à propagação de ondas eletromagnéticas em meios físicos. As componentes de frequência do sinal transmitido chegam ao receptor em diferentes tempos, implicando em um alargamento dos pulsos ópticos e causando interferência intersimbólica. A dispersão cromática decorre da constituição da fibra óptica. As componentes de frequência de um pulso se propagam com velocidades diferentes. A dispersão de modo de polarização ocorre devido ao núcleo da fibra não ser perfeitamente circular e, dessa forma, diferentes polarizações do sinal trafegam a diferentes velocidades na fibra [4].

⁴A tecnologia OFDM foi consagrada para comunicações móveis por permitir maiores taxas de transmissão e robustez do sinal, principalmente em relação ao desvanecimento (interferência importante no cenário móvel).

Phase/Quadrature), ao passo que em redes WDM tradicionais mudar o nível e/ou o formato de modulação requer usar um novo *transponder* [48]. A modulação e a demodulação das subportadoras pode ser implementada através da Transformada de Fourier Discreta Inversa (IDFT - *Inverse Discrete Fourier Transform*) e da Transformada de Fourier Discreta (DFT - *Discrete Fourier Transform*), respectivamente.

A Figura 22 mostra as arquiteturas de um transmissor e de um receptor OFDM. Do lado da transmissão, os bits de dados de entrada são primeiramente convertidos de serial para paralelo no conversor série-paralelo (S/P) e mapeados em símbolos correspondentes das subportadoras, perfazendo um símbolo OFDM (o conjunto de subportadoras moduladas correspondente ao intervalo de transmissão das mesmas no tempo). O sinal no domínio do tempo digital é obtido através da IDFT do símbolo OFDM. Em seguida, é inserido o prefixo cíclico (explicado mais à frente) no que se chama de tempo de guarda (GI - *Guard Insertion*). O tempo de guarda é inserido para evitar a interferência intersimbólica (ISI - *Inter-Symbol-Interference*) devido à dispersão do canal. A sequência de valores é convertida em um sinal analógico através de um conversor digital-analógico (D/A). Por fim, esse sinal passa por um filtro passa baixa (LPF - *Low Pass Filter*), é modulado em frequência, e passa por um filtro passa faixa (BPF - *Band Pass Filter*), para selecionar a frequência do canal desejado. O receptor realiza o processo inverso. Chama-se atenção para os processos de remoção do prefixo cíclico e de recuperação de símbolos que possam ter se perdidos durante a transmissão. Nota-se ainda utilização de um bloco de compensação dos efeitos do canal, como a dispersão cromática, para eliminar estes efeitos no sinal de chegada. Em ambos os equipamentos, os osciladores locais (LOs - *Local Oscillators*) são responsáveis por gerar os sinais senoidais de referência que definem a separação das subportadoras OFDM no domínio espectral do sinal contínuo [48].

A inserção do prefixo cíclico confere ao OFDM maior robustez contra efeitos de dispersão cromática e PMD. Para ilustrar esse conceito serão utilizados exemplos. A Figura 23 apresenta um sinal composto de duas subportadoras, uma lenta e outra rápida, como exemplo de um sinal OFDM, sem o prefixo cíclico. A subportadora lenta possui uma frequência de oscilação menor, enquanto a subportadora rápida possui uma frequência de oscilação maior. A duração de cada símbolo OFDM é T_s e a janela DFT é igual ao período do símbolo. A Figura 23(a) representa o sinal transmitido e a Figura 23(b) o sinal recebido.

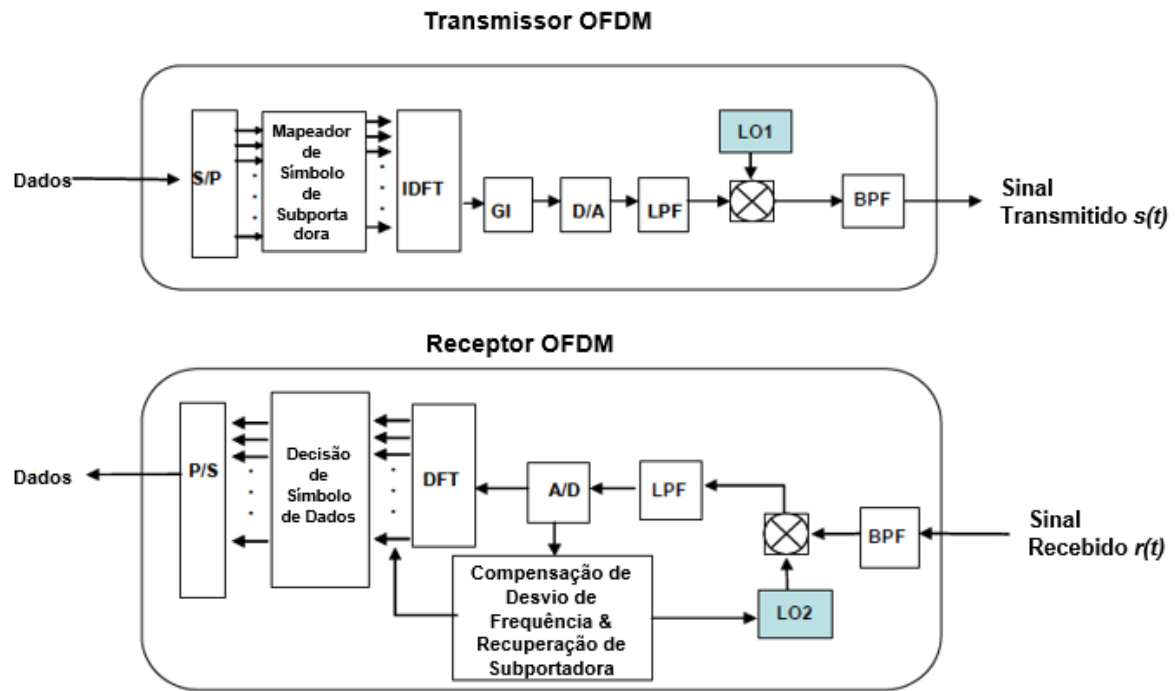


Figura 22 - Arquitetura de um transmissor e receptor OFDM. Fonte: Após [48].

É possível perceber que na recepção (Figura 23(b)), após sofrer com dispersão, a subportadora rápida ficou com um atraso t_d em relação à subportadora lenta e invadiu o período do símbolo seguinte, causando interferência intersimbólica, e com isso, a janela DFT ficou incompleta, isto é, parte do símbolo ficou faltando. Além, disso, o atraso relativo entre as subportadoras fez com que elas percam a ortogonalidade entre si, resultando em uma interferência entre subportadoras, visto que a forma de onda OFDM na janela DFT para subportadora rápida está incompleta [48].

Para resolver esse problema de ISI, é inserido um prefixo cíclico através da extensão cíclica da forma de onda do símbolo OFDM durante um intervalo de guarda Δ_G . Como pode ser visto na Figura 24(a), a forma de onda no intervalo de guarda é essencialmente uma cópia do fim do símbolo OFDM em seu início. Como resultado, na recepção ilustrada na Figura 24(b), tem-se que o símbolo da subportadora rápida está inteiramente contido na duração do símbolo (a janela DFT), uma vez que parte do prefixo cíclico cai dentro do tempo de símbolo para substituir a parte do sinal que seria ignorada. Dessa forma, a subportadora rápida recebida é quase uma cópia da subportadora rápida transmitida com um desvio de fase adicional, que é contornado na recepção através da remoção do prefixo cíclico para seu processamento. Para que a inserção do prefixo cíclico permita remover

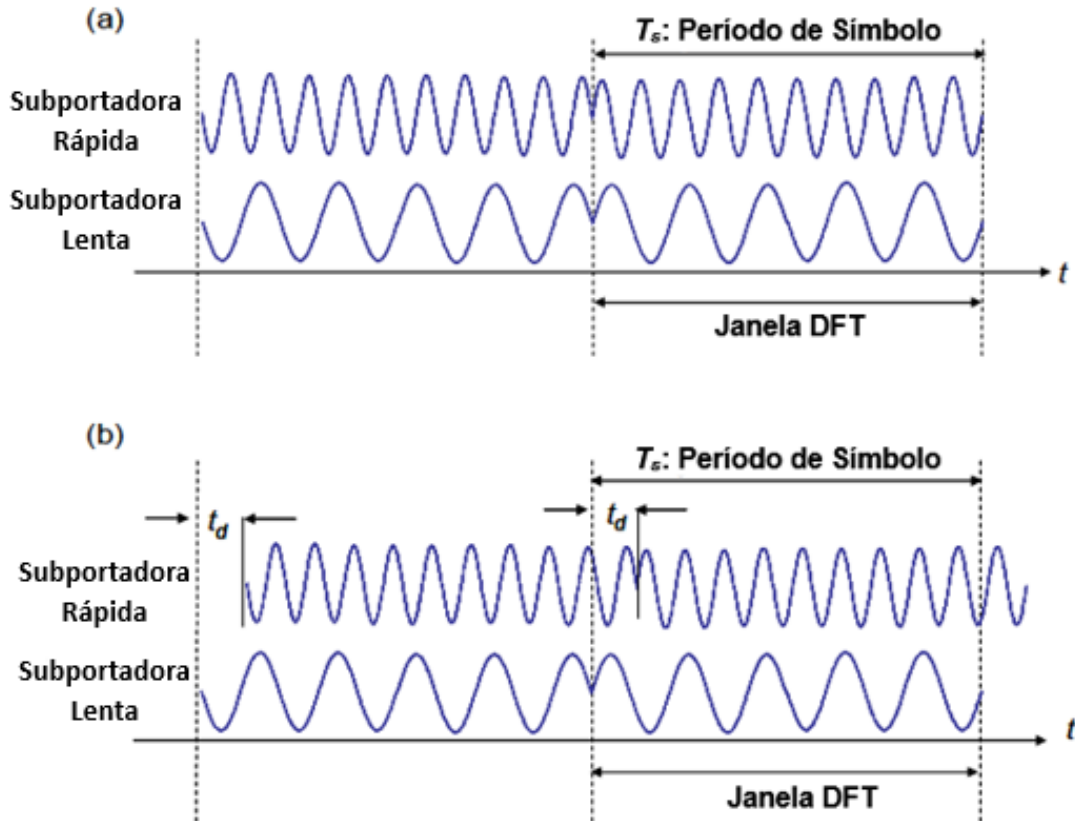


Figura 23 - Representação de duas subportadoras sem uso do prefixo cíclico. (a) sinal transmitido e (b) sinal recebido. Fonte: Após [48].

a interferência intersimbólica satisfatoriamente, o atraso t_d , causado pela dispersão, deve ser menor que o intervalo de guarda Δ_G .

A inserção do prefixo cíclico cria uma “zona de guarda” temporal entre símbolos OFDM sucessivos. Isso permite que o símbolo anterior atrasado se extinga antes que o símbolo corrente atinja o receptor. A desvantagem dessa técnica é uma ligeira redução da eficiência espectral, devido à adição de redundância, além de um leve aumento do consumo de energia na transmissão.

Outra técnica relevante para o CO-OFDM é a detecção coerente. Na detecção não coerente, o receptor computa variáveis de decisão em função da energia do símbolo recebido considerando uma recepção síncrona. Dessa forma, a perda das informações da fase do sinal impede a redução das distorções causadas por dispersão cromática e por PMD por causa de limitações dos filtros lineares utilizados, uma vez que a detecção baseada somente na amplitude de energia do sinal permite a codificação de apenas um grau de liberdade por polarização por canal [49]. Por outro lado, através da mistura do sinal

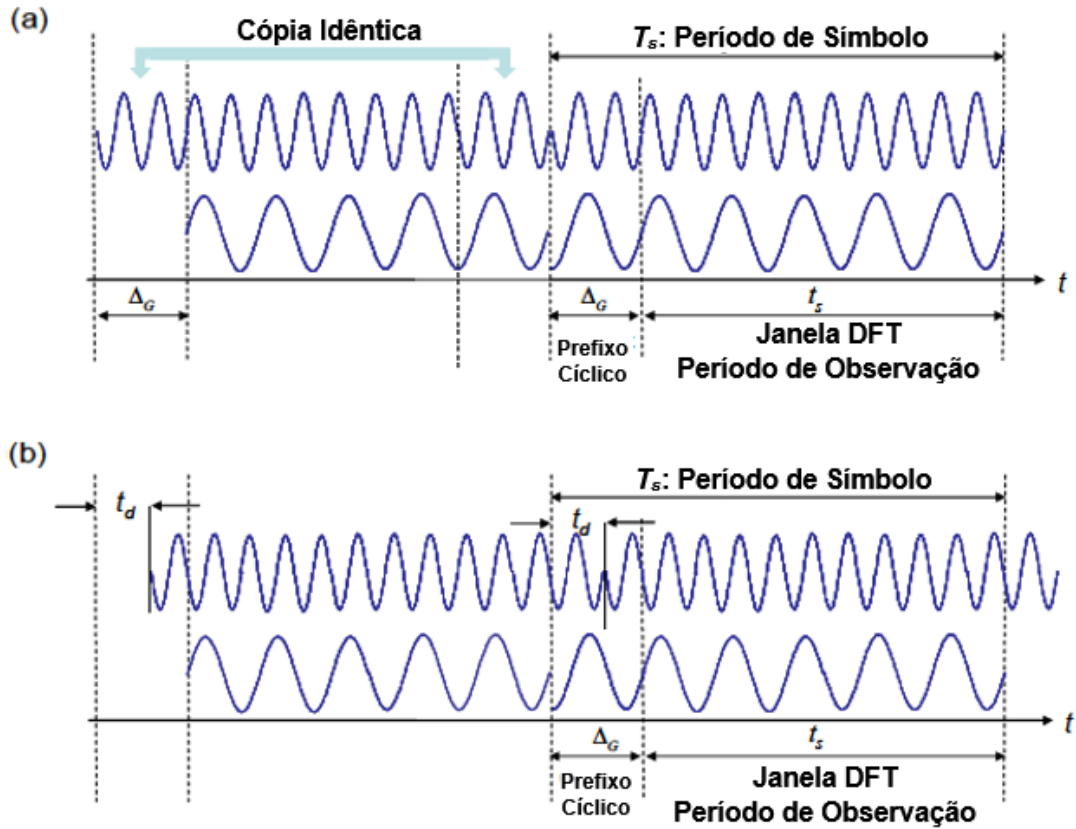


Figura 24 - Representação de duas subportadoras OFDM com o prefixo cíclico. (a) sinal transmitido e (b) sinal recebido. Fonte: Após [48].

óptico recebido com um oscilador local (LO - *Local Oscillator*) antes da fotodetecção, é possível a recuperação tanto da amplitude quanto da fase do sinal devido ao fenômeno de batimento óptico. A detecção coerente confere maior flexibilidade na transmissão do sinal, uma vez que os dados podem ser modulados em amplitude ou em fase, ou ainda em fase e quadratura, além de tornar a compensação de dispersões mais factível por conter informações completas do campo elétrico [49].

A Figura 25 apresenta o conceito de oscilador local na detecção coerente. Na recepção, um laser de pequena largura de linha⁵ é empregado para gerar um sinal óptico (chamado de oscilador local) que é combinado com um sinal óptico recebido. A combinação destes dois sinais gera o fenômeno de batimento óptico, onde a intensidade do sinal resultante (também denominado de sinal intermediário) depende da diferença de fase entre o sinal recebido e o LO. Logo, sabendo a fase do sinal resultante e a fase do LO, é possível recuperar a fase do sinal recebido [49], [50].

⁵Largura de linha é a largura espectral de radiação do laser.

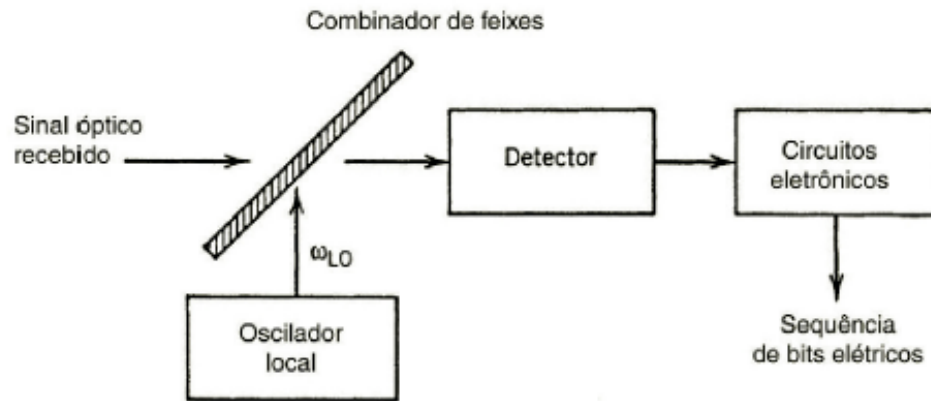


Figura 25 - Esquema de funcionamento de um sistema de detecção coerente. Fonte: Após [50].

A combinação das técnicas discutidas (detecção coerente e modulação OFDM) permite: o aumento de eficiência de espectro com a sobreposição de subportadoras propiciada pela ortogonalidade entre elas; o ajuste fino de granularidade devido ao uso de subportadoras de baixas taxas de dados; o ajuste adaptativo do nível de modulação em cada subportadora dependendo do comprimento do enlace da demanda a que atende; tolerância a perdas da camada física; tolerância a dispersão provocadas pelas características físicas das fibras ópticas; e redução do consumo de energia pela desativação dos recursos não utilizados dos transmissores.

B A ARQUITETURA EON

A arquitetura de uma rede EON é formada, primeiramente, por elementos transmissores e receptores chamados de *transponders* do tipo BVT (*Bandwidth-Variable Transponder*) ou SBVT (*Sliceable Bandwidth-Variable Transponder*). Os BVTs possibilitam que subportadoras OFDM possam ser agregadas em um único caminho óptico de modo a acomodar o espectro necessário (variável) para atender a uma demanda. É possível controlar o número de subportadoras usadas em cada caminho óptico, atendendo à exigência de flexibilidade de EONs, quanto maior a quantidade de subportadoras, maior é a largura de banda e a taxa de transmissão do canal [7].

Contudo, os BVTs possuem limitação quanto ao número máximo de subportadoras controladas. Quando não é utilizada toda a sua capacidade, os recursos do *transponder* são desperdiçados. Para solucionar esse problema e evitar desperdício de espectro, foram propostos os SBVTs [7]. Em [1] é apresentado o conceito de “*sliceable transponders*” (*transponders* segmentáveis) em que um único *transponder* é dividido em diversos *transponders* virtuais; este é o conceito base de funcionamento dos SBVTs. Os SBVTs acomodam um caminho óptico de baixa capacidade sem que os recursos restantes do *transponder* sejam desperdiçados.

A diferença entre BVTs e SBVTs é mostrada na Figura 26. Nela, é possível perceber que o SBVT direciona as subportadoras de maneira flexível a partir da demanda de tráfego, podendo gerar múltiplos caminhos ópticos, ao contrário do BVT que permite apenas um único caminho óptico e desperdiça os recursos não alocados nesse caminho. O elemento adicional ROADM (*Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexers*) permite inserir ou retirar remotamente comprimentos de onda em um nó de rede e será explicado mais à frente.

Outro elemento importante na arquitetura EON é o BV-OXC (Comutador Óptico de Largura de Banda Variável - *Bandwidth-Variable Optical Cross-Connect*), também chamado de BV-WXC (*Bandwidth-Variable Wavelength Cross-Connect*). Um BV-OXC/BV-WXC estabelece um canal fim-a-fim com a largura de banda estipulada pelos BVTs/SBVTs de acordo com a demanda de cada cliente. Os BV-OXCs permitem uma taxa de transmissão de dados variável em cada canal, variando a quantidade de subportadoras do canal quanto necessário. Quando os *transponders* aumentam a taxa de transmissão do canal,

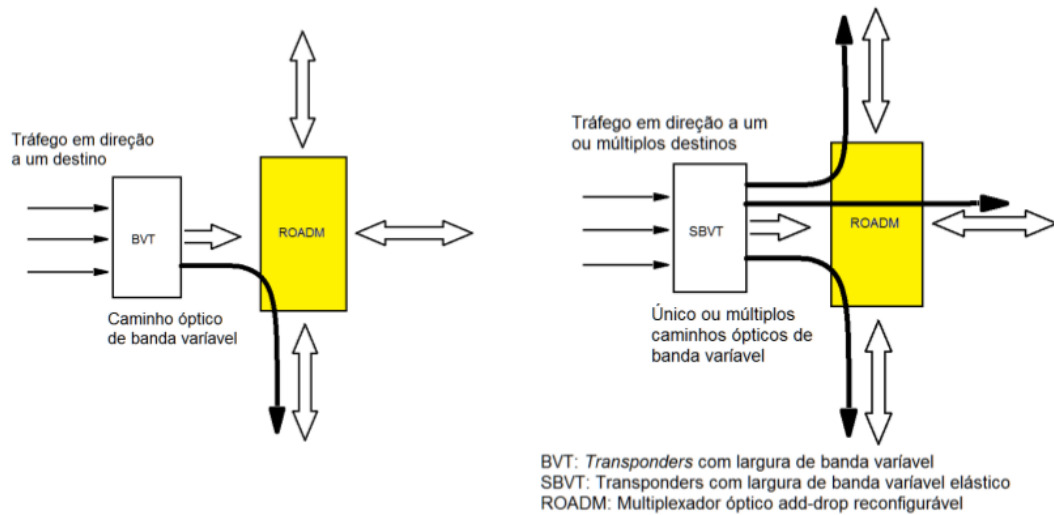


Figura 26 - Direcionamento do tráfego permitido com o uso de (a) BVT e (b) SBVT. Fonte: Após [51].

os BV-OXCs presentes ao longo do caminho óptico são capazes de aumentar as suas janelas de comutação, através do agrupamento de subportadoras próximas, garantindo a flexibilidade da rede. Os BV-OXC são referenciados ao longo deste trabalho apenas como comutadores ópticos.

A Figura 27 mostra um exemplo de arquitetura EON composta pelas principais tecnologias (*transponders* - representados por um retângulo preto, e comutadores ópticos - representados pelo símbolo de “X”) ópticas, responsáveis pela largura de banda variável presente em EONs [7].

O funcionamento dos comutadores ópticos é ilustrado na Figura 28. Nela, para cada conexão de entrada, o BV-OXC fornece um caminho óptico flexível dependente da largura espectral do sinal de entrada. Para isso, faz-se uso do BV-SSS (Comutador Seletivo de Espectro de Banda Variável – *Bandwidth Variable Spectrum Selective Switch*), responsável pela adição/remoção (*add/drop*) dos sinais e roteamento das conexões que passam pelo comutador.

Cabe destacar que há desperdício de espectro quando uma requisição emprega uma banda de transmissão menor que a de uma subportadora OFDM quando se usam *transponders* BVTs/SBVTs. É possível resolver essa questão agregando no meio eletrônico, através de multiplexação de camada elétrica (*electrical grooming*) [52], as requisições de tráfego de baixas taxas de transmissão em um único caminho óptico; mas só é possível a utilização mais eficiente de espectro proporcionada pela agregação elétrica, se tais de-

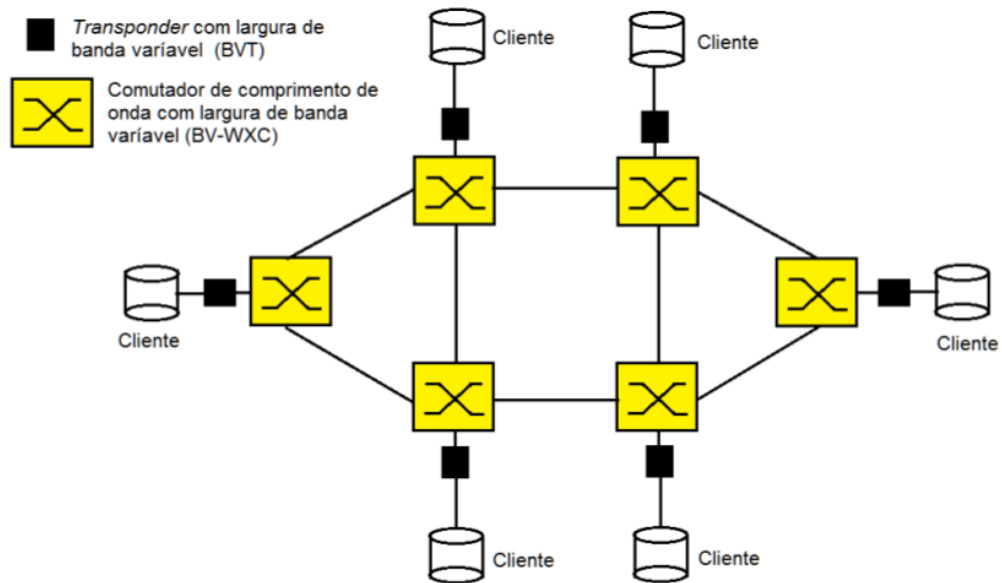


Figura 27 - Exemplo arquitetura EON. Fonte: Após [51].

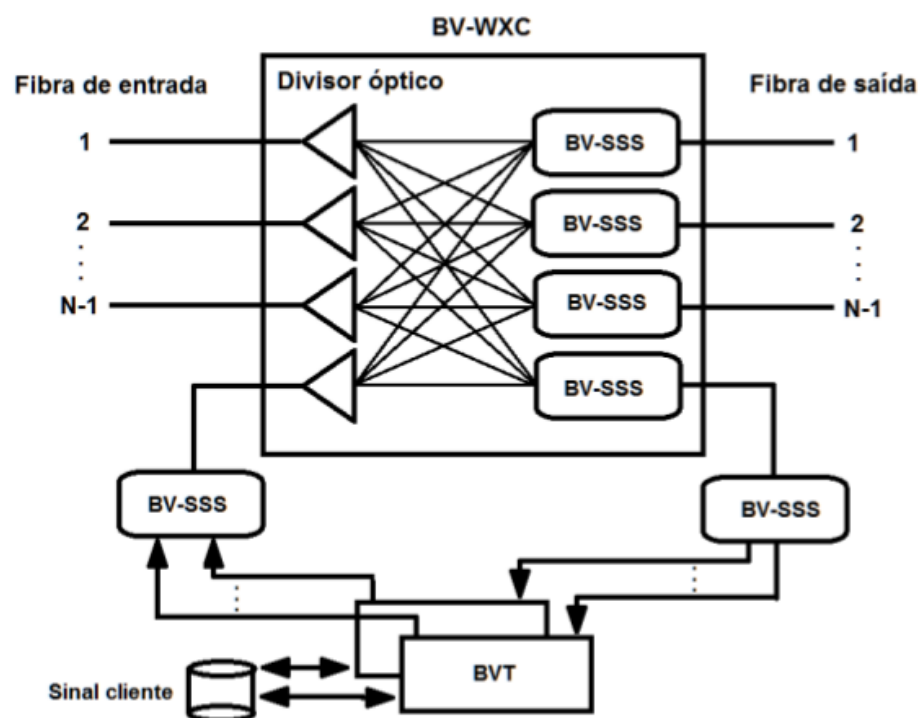


Figura 28 - Exemplo arquitetura BV-OXC. Fonte: Após [51].

mandas têm a mesma origem e destino.

O uso de BV-OXCs e de SBVTs possibilita a agregação de tráfego na camada óptica (*optical grooming*), em que diferentes fluxos ópticos são agregados em um único

transponder SBVT, desde que tenham todos a mesma origem. A agregação óptica combina diversos caminhos ópticos para diversos destinos, mas originados em um mesmo SBVT, sem necessidade de converter o sinal óptico em elétrico (de forma transparente). Isso é possível pois os BV-OXCs possibilitam a comutação de subportadoras OFDM diretamente na camada óptica. Esse agrupamento é chamado de túnel óptico [53]. Nota-se que essa técnica permite a eliminação de banda de guarda entre subportadoras agregadas em um mesmo túnel, aumentando a eficiência espectral; porém, é necessária a utilização das bandas de guarda entre túneis distintos [52].

A Figura 29 ilustra de forma esquemática as agregações elétrica e óptica. Por exemplo, a demanda 2 (Req 2), de origem no nó A e com destino ao nó C, está agregada eletricamente entre o nó A e o nó B com a demanda 3 (Req 3) e do nó B para o nó C com a demanda 5 (Req 5), pois essas requisições possuem origem e destino iguais. Quanto à agregação óptica, no nó A, as demandas 1, 2 e 3 (Req 1, Req 2 e Req 3) estão agregadas opticamente, pois possuem a mesma origem, mas destinos diferentes. Neste exemplo, as três requisições (Req 1, Req 2 e Req 3) são transmitidas em um mesmo túnel óptico entre o nó A e o nó B e em seguida a demanda 3 (Req 3) é retirada para o seu destino, a demanda 2 (Req 2) é agregada eletricamente com a demanda 5 (Req 5) para continuar ao seu destino e a demanda 1 (Req 1) flui do nó A para o nó C por outro túnel óptico.

Uma arquitetura EON emprega ainda multiplexadores e demultiplexadores (MUX/DEMUX). Esses componentes fundamentais agregam e separam os sinais ópticos de entrada e de saída, respectivamente. Os multiplexadores são encarregados de combinar em uma única fibra óptica os canais ópticos provenientes de várias fontes, podendo ser de mesmo comprimento de onda ou diferentes, ao passo que os demultiplexadores realizam o processo inverso, ou seja, separam canais ópticos agregados em múltiplos comprimentos de onda [54].

Dentre os MUX/DEMUX, destacam-se os multiplexadores ópticos *add/drop* reconfiguráveis (ROADM – *Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexers*), que permitem inserir ou retirar remotamente comprimentos de onda de um nó de rede. Juntamente com a tecnologia WSS (*Wavelength Selective Switching*), os ROADMs oferecem a arquitetura ROADM-WSS, possibilitando sistemas de múltiplos graus, ou seja, múltiplas direções. Contudo, persiste o problema de inflexibilidade na operação de inserção e remoção de sinais da arquitetura ROADM-WSS, que é resolvido com o advento da estrutura ROADM-

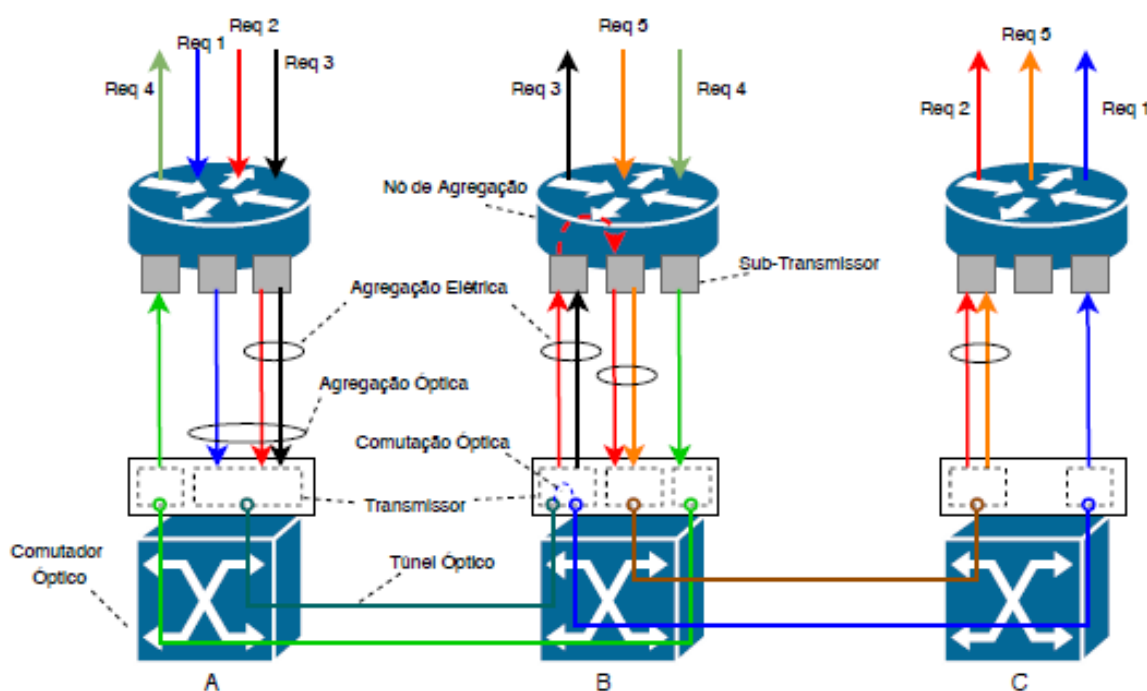


Figura 29 - Agregação elétrica e óptica. Fonte: Após [6].

CDC, dotada de independência de comprimento de onda (*C – Colorless*) e direção (*D – Directionless*) sem a adição de contenção (*C – Contentionless*). Anteriormente, o problema de inflexibilidade de operação dos ROADMs-WSS ocorria quando duas demandas tentavam usar o mesmo percurso (porta) e o mesmo comprimento de onda, simultaneamente, o que ocasionava perda de pacotes. Esta configuração de ROADMs-CDC se destaca pelas suas funcionalidades sem grade ou de grade flexível, permitindo a configuração da largura espectral reservada aos canais ópticos. Em um ROADM, uma demanda pode ser conectada a qualquer porta de entrada (incolor, que independente do comprimento de onda do sinal óptico), qualquer porta pode ser conectada a qualquer direção (sem direção). Isso garante que não haverá duas demandas acessando o mesmo recurso (porta ou comprimento de onda), pois um recurso utilizado será bloqueado para novas demandas (sem contenção) [54].

Quando não é possível empregar um nível de modulação robusto que possibilite a recepção do sinal no destino com qualidade, como em rotas de longas distâncias e/ou em trechos com muitas emendas e equipamentos e/ou fibras com muitos anos de uso, faz-se necessária a utilização de regeneradores ópticos, dispositivos responsáveis por recuperar o

sinal originalmente transmitido, corrigindo distorções do percurso. Há duas classes de regeneradores, os exclusivamente ópticos, nos quais o processamento é realizado no domínio óptico sem a necessidade de conversão para o sinal elétrico, e os regeneradores óptico-eletro-óptico (OEO), nos quais o sinal óptico é convertido em sinal elétrico, processado e, então, convertido novamente em sinal óptico [55]. Esse processo de conversão e processamento é custoso em termos de tempo e dinheiro, o que faz com que esses dispositivos sejam utilizados apenas como último recurso.

Além disso, há três níveis de regeneração que são utilizados de acordo com o grau de degradação do sinal. No 1R (*Re-amplify*), há apenas a amplificação da potência do sinal, usando um dos dois tipos de amplificadores abordados nos parágrafos anteriores (sem regeneração de sinal). No 2R (*Re-amplify and Re-shaping*), além da amplificação, o sinal é remodulado, corrigindo distorções causadas na portadora ao longo do percurso. No 3R (*Re-amplify, Re-shaping and Re-timing*), além de amplificar e remodular, o sinal óptico é convertido para o domínio elétrico para ressincronização e para posteriormente ser convertido para o domínio óptico novamente para retransmissão do sinal tal qual gerado na origem, esta conversão possibilitando inclusive a mudança no nível de modulação [55].

Adicionalmente, as EONs podem empregar amplificadores ópticos de linha (OLA - *Optical Line Amplifier*) como uma alternativa aos regeneradores ópticos, uma vez que o elevado tráfego de dados torna os regenerados mais complexos e caros. Conforme mostra a Figura 30, os OLAs podem desempenhar três papéis diferentes a depender da sua localização. Quando situado ao longo da fibra óptica, o OLA é conhecido como amplificador de linha (ILA - *In Line Amplifier*), e é usado para compensar perdas por atenuação na própria fibra e também por perdas de inserção de BV-OXCs. Quando o OLA está localizado antes do receptor, é conhecido como pré-amplificador ou amplificador de entrada, e é utilizado para aumentar a potência do sinal visando atender à sensibilidade do receptor (potência mínima que o receptor consegue detectar um sinal de entrada). Por fim, quando o OLA está localizado no lado do transmissor é conhecido como *booster*, também denominado de amplificador de saída, e é utilizado para amplificar/reforçar o sinal de saída do transmissor antes dele propagar-se pela fibra óptica [6].

Existem dois principais modelos de amplificadores ópticos sem fazer uso da conversão óptica-elétrico-óptica (OEO), são eles: amplificador de fibra dopada a Érbio (EDFA - *Erbium-Doped Fiber Amplifier*) e RAMAN. A Figura 31 apresenta um esquemático do



Figura 30 - Amplificadores ópticos de linha. Fonte: Após [56].

funcionamento dos EDFAs. O sinal de entrada é multiplexado com um laser de bombeio através de uma unidade de multiplexação OFDM e em seguida segue para um trecho de fibra óptica dopado com Érbio (EDF - *Erbium-Doped Fiber*). O laser de bombeio é responsável por estimular os átomos de Érbio que liberam fótons na mesma faixa de frequência do sinal óptico trafegando pela fibra, amplificando-o. A Figura apresenta ainda isoladores ópticos para evitar reflexões indesejadas do sinal [6].

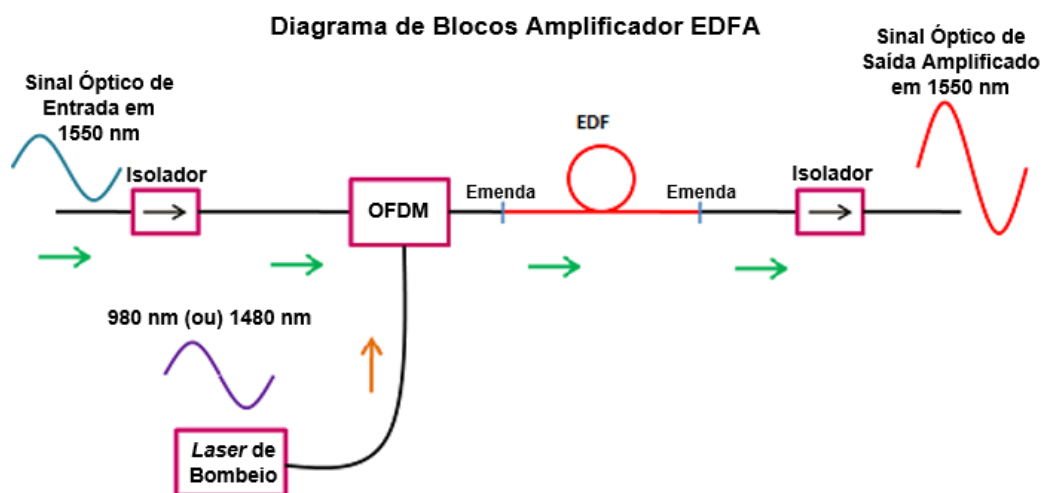


Figura 31 - Funcionamento esquemático de um amplificador EDFA. Fonte: Após [57].

Os amplificadores do tipo RAMAN utilizam o efeito do Espalhamento Raman, em que um laser de bombeio de alta potência em uma frequência diferente da do sinal óptico é utilizado para excitar os átomos da fibra óptica. Em decorrência dessa excitação, há a emissão de fótons cuja energia é absorvida pelo sinal transmitido (mais fraco), havendo uma transferência de energia dos fótons espalhados para o sinal mais fraco, amplificando-o. Amplificadores RAMAN são usados complementarmente aos amplificadores EDFAs em percursos de fibra muito extensos, pois apresentam maiores ganhos [4].