



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

MARCELO MACÊDO ALVES

**ABORDAGENS DE ROTEAMENTO FIXO-ALTERNATIVO COM METODOLOGIA
BSR PARA REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS**

Recife

2018

MARCELO MACÊDO ALVES

**ABORDAGENS DE ROTEAMENTO FIXO-ALTERNATIVO COM METODOLOGIA
BSR PARA REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS**

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

Área de concentração: Comunicações.

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

Recife

2018

Catálogo na fonte
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

A474a Alves, Marcelo Macêdo.
Abordagens de roteamento fixo-alternativo com metodologia BSR para redes ópticas elásticas / Marcelo Macêdo Alves - 2018.
81 folhas, il., tabs., abr. sigl. e símb.

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

Inclui Referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Redes ópticas. 3. Redes ópticas elásticas. 4. Roteamento e alocação de espectro. 5. Roteamento fixo-alternativo. I. Almeida Júnior, Raul Camelo de Andrade (Orientador). II. Título.

UFPE

621.3 CDD (22. ed.)

BCTG/2018-404

MARCELO MACÊDO ALVES

**ABORDAGENS DE ROTEAMENTO FIXO-ALTERNATIVO COM METODOLOGIA
BSR PARA REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS**

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

Aprovada em: 31/07/2018

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Raul Camelo de Andrade Almeida Júnior (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Joaquim Ferreira Martins Filho (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Danilo Ricardo de Araújo (Examinador Externo)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus que permitiu que tudo isso acontecesse, ao longo de minha vida, e não somente como universitário, mas em todos os momentos. À Universidade Federal de Pernambuco pelo ambiente criativo e amigável que proporciona. Ao meu orientador Raul C. Almeida Jr., pelo suporte, pelas suas correções e incentivos. À CAPES pelo apoio financeiro. Agradeço à minha esposa Cássia Regina Diniz Ró, que nos maus momentos esteve sempre presente; à minha mãe Sinober Macêdo Cruz, heroína que me deu apoio, incentivos nas horas difíceis, de desânimo e cansaço. À minha tia Maria Cícera Macêdo da Cruz Oliveira, pela dedicação e cuidados com o sobrinho. Ao meu pai Marco Antônio de Oliveira Alves que me fortaleceu e que para mim foi muito importante. Obrigado meus irmãos e sobrinhos, que mesmo nos momentos de minha ausência, sempre fizeram entender que o futuro é feito a partir da constante dedicação do presente. A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

RESUMO

Como o tráfego de rede aumenta continuamente, novas tecnologias capazes de usar de forma cada vez mais eficiente a capacidade das fibras ópticas são requeridas. Redes Ópticas Elásticas (EON) têm sido propostas como uma solução para melhorar a eficiência no uso do espectro quando comparadas às redes tradicionais *Wavelength Division Multiplexing* (WDM). A introdução das redes EON leva a desafios novos, como o problema de roteamento e alocação de formato de modulação e de espectro (RMSA). Esse é um problema fundamental na arquitetura das redes EON, semelhante ao roteamento e alocação de comprimento de onda (RWA) nas redes baseadas em WDM. Desde que o RMSA é um problema NP-Difícil, métodos heurísticos são normalmente utilizados para tráfego dinâmico. Na literatura, o algoritmo *Best Among the Shortest Routes* (BSR) foi proposto com roteamento fixo-alternativo para EONs. Neste trabalho, o BSR é estendido considerando-se a inclusão de restrições da camada física. São consideradas na proposta as diferentes larguras de banda das conexões decorrentes das taxas de bit requisitadas e dos formatos de modulação adequados para garantir a qualidade de transmissão do sinal ao longo das rotas candidatas à conexão. Além disso, duas heurísticas são propostas baseadas no BSR e são comparadas a dois métodos computacionais inteligentes em reduzir o número de bloqueios de conexões feitos por diferentes redes ópticas. Os resultados mostram uma redução de até 33% em reduzir o número de bloqueios de requisições feitos por cada rede óptica.

Palavras-chave: Redes ópticas. Redes ópticas elásticas. Roteamento e alocação de espectro. Roteamento fixo-alternativo.

ABSTRACT

As network traffic increases continuously, new technologies able to use more efficiently the capacity of optical fiber are required. Elastic Optical Networks (EON) have been proposed as a solution to improve the spectrum usage efficiency compared to traditional *Wavelength Division Multiplexing* (WDM) optical networks. The introduction of EON networks leads to new challenges such as the routing, modulation format and spectrum allocation (RMSA) problem. This is a fundamental issue in the architecture of EON networks, similar to the routing and wavelength allocation (RWA) in WDM-based networks. Since RMSA is an NP-Hard problem, heuristic methods are normally used under dynamic traffic. The algorithm Best Among the Shortest Routes (BSR) was proposed with fixed-alternate routing for EONs. In this work, the BSR is extended to consider the inclusion of physical layer constraints. The proposal deals with the different connections bandwidths resulting from the required bit rates and appropriate modulation formats to ensure the signal quality of transmission along the candidate routes of each connection. In addition, two heuristics are proposed based on BSR and they are compared to two intelligent computational methods in reducing the number of blocking connections made by different optical networks. The results show a reduction up to 33 % in reducing the number of blocking requests made by each optical network.

Keywords: Optical networks. Elastic optical networks. Routing and spectrum allocation. Fixed-Alternate routing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Previsão para o crescimento do tráfego global de Internet.	18
Figura 2 – Alocação de espectro em redes WDM e EON.	19
Figura 3 – Representação funcional de um WSS.	26
Figura 4 – Um esquema de funcionamento de um BV-WSS.	26
Figura 5 – Diagrama de constelação do formato de modulação QAM.	27
Figura 6 – Capacidade de transmissão para diferentes tipos de formato de modulação QAM.	28
Figura 7 – Taxa de transmissão por número de <i>slots</i> de frequência.	29
Figura 8 – Esquema de especificação de recursos espectrais para largura de banda fixa e largura de banda flexível.	29
Figura 9 – Arquitetura óptica do caminho óptico de ponta a ponta.	31
Figura 10 – Algoritmo BSR (a) quatro possíveis caminhos entre o nó origem 1 e destino 4, (b) estimativa da utilização de cada enlace da rede após o roteamento da iteração i , (c) valor do custo $c(l)_i$ para cada enlace da rede (d) custo para cada caminho (e) caminho escolhido de menor custo.	38
Figura 11 – Fluxograma do algoritmo BSR.	39
Figura 12 – O diagrama do algoritmo BSR <i>Offline</i> proposto.	42
Figura 13 – Topologia <i>NSFNET</i> usada nas simulações.	44
Figura 14 – PB para a Topologia <i>NSFNET</i> , com o algoritmo YEN.	45
Figura 15 – PB para a Topologia <i>NSFNET</i> , com o algoritmo YEN e BSR <i>Offline</i>	46
Figura 16 – Topologia <i>Pacific Bell</i> usada nas simulações.	47
Figura 17 – PB para a Topologia <i>Pacific Bell</i> , com o algoritmo YEN.	48
Figura 18 – PB para a Topologia <i>Pacific Bell</i> , com o algoritmo YEN e BSR <i>Offline</i>	48
Figura 19 – Topologia <i>Finland</i> usada nas simulações.	49
Figura 20 – PB para a Topologia <i>Finland</i> , com o algoritmo YEN.	50
Figura 21 – PB para a Topologia <i>Finland</i> , com o algoritmo YEN e BSR <i>Offline</i>	50
Figura 22 – Fluxograma da heurística BSR <i>Online</i>	52
Figura 23 – PB para a Topologia <i>NSFNET</i> com o algoritmo YEN e BSR <i>Online</i> , por iteração.	54
Figura 24 – PB para a Topologia <i>NSFNet</i> , com o algoritmo YEN e BSR <i>Online</i>	55
Figura 25 – PB para a Topologia <i>Pacific Bell</i> com o algoritmo YEN e BSR <i>Online</i> , por iteração.	56
Figura 26 – PB para a topologia <i>Pacific Bell</i> com o algoritmo YEN e BSR <i>Online</i>	56
Figura 27 – PB para a Topologia <i>Finland</i> com o algoritmo YEN e BSR <i>Online</i> , por iteração.	57
Figura 28 – Probabilidades de bloqueio para a topologia <i>Finland</i>	57
Figura 29 – Uma geração formada por dois indivíduos, numa rede óptica com m nós.	59

Figura 30 – Os valores locais e globais para uma função.	60
Figura 31 – Fluxograma do Algoritmo Genético.	61
Figura 32 – A etapa de <i>crossover</i> do GA.	62
Figura 33 – A etapa de mutação do GA.	62
Figura 34 – Convergência do GA para a topologia <i>NSFNET</i>	64
Figura 35 – Probabilidades de Bloqueio para a Topologia <i>NSFNET</i>	64
Figura 36 – Convergência do GA para a topologia <i>Pacific Bell</i>	65
Figura 37 – Probabilidades de Bloqueio para a Topologia <i>Pacific Bell</i>	66
Figura 38 – Convergência do GA para a topologia <i>Finland</i>	66
Figura 39 – Probabilidades de Bloqueio para a Topologia <i>Finland</i>	67
Figura 40 – Diferentes topologias das partículas no PSO	68
Figura 41 – Dois exemplos de partículas do Algoritmo PSO.	69
Figura 42 – Fluxograma do Algoritmo PSO.	70
Figura 43 – Convergência do PSO para a topologia <i>NSFNET</i>	72
Figura 44 – Probabilidades de Bloqueio para a Topologia <i>NSFNET</i>	72
Figura 45 – Convergência do PSO para a topologia <i>Pacific Bell</i>	73
Figura 46 – Probabilidades de Bloqueio para a Topologia <i>Pacific Bell</i>	73
Figura 47 – Convergência do PSO para a topologia <i>Finland</i>	74
Figura 48 – Probabilidades de Bloqueio para a Topologia <i>Finland</i>	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Valores de snr_b para alguns formatos de modulação	33
Tabela 2	– Parâmetros de Simulação	43
Tabela 3	– Parâmetros para a simulação prévia da rede	43
Tabela 4	– Número de <i>Slots</i> para cada requisição na topologia <i>NSFNet</i>	45
Tabela 5	– Número de <i>Slots</i> para cada requisição na <i>Pacific Bell</i>	47
Tabela 6	– Número de <i>Slots</i> para cada requisição na <i>Finland</i>	49
Tabela 7	– Parâmetros para a simulação <i>BSR Online</i>	54
Tabela 8	– Parâmetros para a execução do Algoritmo Genético	63
Tabela 9	– Parâmetros para a execução do Algoritmo PSO	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADM	<i>Add/Drop Multiplexers</i> - Multiplexadores Adicionar/Remover
ADSL	<i>Asymmetric Digital Subscriber Line</i> - Linha de Inscrição Digital Assimétrica
ASE	<i>Amplified Spontaneous Emission</i> - Emissão espontânea amplificada
BER	<i>Bit Error Rate</i> - Taxa de erro por bit
BLSA	<i>Balanced Load Spectrum Allocation</i> - Carga Equilibrada de Alocação de Espectro
BPS	<i>Bits Per Second</i> - Bits por segundo
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i> - Deslocamento de fase binária
BSR	<i>Best among the shortest routes</i> - Melhor entre as rotas mais curtas
BV-WSS	<i>Bandwidth-Variable Wavelength-Selective Switch</i> - Interruptor por largura de banda e comprimento de onda
BVT	<i>Bandwidth Variable Transponders</i> - <i>Transponders</i> variáveis por largura de banda
CAGR	<i>Compound Annual Growth Rate</i> - Taxa composta de crescimento anual
DWDM	<i>Dense Wavelength-Division Multiplexing</i> - Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda Densa
EDFA	<i>Erbium Doped Fiber Amplifiers</i> - Amplificadores de Fibra dopados com Érbio
EON	<i>Elastic Optical Networks</i> - Redes Ópticas Elásticas
FEC	<i>Forward Error Correction</i> - Correção Antecipada de Erros
GA	<i>Genetic Algorithm</i> - Algoritmo Genético
Gbps	<i>Gigabits per second</i> - Gigabits por segundo
HDTV	<i>High Definition Television</i> - Televisão de Alta Definição
ISP	<i>Internet Service Provider</i> - Provedor de internet
ITU-T	<i>Telecommunication Standardization Sector</i> - Setor de Normatização das Telecomunicações

LCoS	<i>Liquid Crystal on Silicon</i> - Cristal líquido em silício
MCP-ZBA	<i>Maximum Capacity Path and Zone Based Assignment</i> - Caminho a máxima capacidade e atribuição de com base em zona
OBS	<i>Optical Burst Switching</i> - Comutação de rajadas ópticas
OEO	<i>Optical-Electrical-Optical</i> - Óptico-Elétrico-Óptico
OPS	<i>Optical Packet Switching</i> - Comutação de pacotes ópticos
OSNR	<i>Optical Signal-to-Noise Ratio</i> - Taxa de Sinal-para-Ruído Óptico
PB	<i>Probabilidade de Bloqueio</i>
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i> - Optimização por enxame de partículas
P2P	<i>Peer-to-Peer</i> - Pessoa-para-Pessoa
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i> - Modulação de Quadratura em Amplitude
QoS	<i>Quality of Service</i> - Qualidade do Serviço
QoT	<i>Quality of Transmission</i> - Qualidade da Transmissão
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i> - Deslocamento de fase em quadratura
RAM	<i>Random Access Memories</i> - Memórias de Acesso Randômico
ROADM	<i>Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer</i> - Multiplexador Óptico de Adicionar/Remover Reconfigurável
RMSA	<i>Routing, Modulation and Spectrum Allocation</i> - Roteamento, Modulação e Alocação de Espectro
RSA	<i>Routing and Spectrum Allocation</i> - Roteamento e Alocação de Espectro
RWA	<i>Routing and Wavelength Allocation</i> - Roteamento e Alocação de Comprimento de Onda
SLICE	<i>Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Network</i> - Rede de caminho óptico elástico dividido por espectro
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i> - Taxa de Sinal-para-Ruído
VOIP	<i>Voice over Internet Protocol</i> - Voz por protocolo de internet
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i> - Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda

WLAN	<i>Wireless Local Access Network</i> - Rede de Acesso Local sem fio
WRN	<i>Wavelength Routing Network</i> - Rede de roteamento por comprimento de onda
WSS	<i>Wavelength-Selective Switch</i> - Interruptor por comprimento de onda
WXC	<i>Wavelength Cross-Connect</i> - Comprimento de onda de conexão cruzada
P	<i>Deterministic Polynomial time</i> - Tempo polinomial determinístico
NP	<i>Non Deterministic Polynomial time</i> - Tempo polinomial não determinístico

LISTA DE SÍMBOLOS

$M - QAM$	- Formato de modulação M-QAM
M	- Número de símbolos
snr_b	- Relação sinal-ruído por valor de bit
P_b	- A probabilidade de erro
RC	- Rotas Fixas de menor função custo
a	- Taxa de mudança do custo do enlace
L	- Conjunto de todos os enlaces da rede
l	- Um enlace pertencente a L
$c(l)$	- Custo do enlace l
$c(l)_i$	- Custo do enlace l na i -ésima iteração
$u(l)_i$	- Utilização do enlace l obtida na i -ésima iteração
T	- Número de iterações do BSR
IT_{MAX}	- Número máximo de iterações
SD_{MAX}	- Último par de nós da rede
B_{MAX}	- Última taxa de bits empregada na rede
\mathfrak{R}	- Conjunto de Rotas
M_{MIN}	- Primeiro formato de modulação empregado na rede
M_{MAX}	- Último formato de modulação empregado na rede
$OSNR_{SPAN}$	- OSNR resultante para cada span
$OSNR_{OUT}$	- OSNR de saída
$OSNR_{TH}$	- OSNR limiar
B	- Taxa de bits
r	- Número de requisições
d	- Distância entre amplificadores

ν	- Frequência Central do Grid
n_{slots}	- Número de Slots de Frequência
B_{Ref}	- Comprimento da Banda de Referência
B_{Slot}	- Largura da Banda de um Slot de Frequência
h	- Constante de Planck
P_{IN}	- Potência Óptica de Entrada
P_{OUT}	- Potência Óptica de Saída
G_n	- Ganho linear do amplificador
F_{amp}	- Fator de ruído do amplificador
N_{ASE}	- Ruído ASE gerado devido à transmissão do sinal
N_{OUT}	- Ruído ASE de saída
T	- Número de iterações do BSR
i	- Índice da iteração do BSR
S_i	- Solução de roteamento do BSR
$Tamanho_{POP}$	- Número de Indivíduos
$Taxa_{ELI}$	- Taxa do número de Indivíduos na fase elitismo
$Taxa_{MUT}$	- Taxa de mutação nos Indivíduos
$Taxa_{CROSS}$	- Taxa de cruzamento nos Indivíduos
ϕ_1	- Fator de decisão à escolha local
ϕ_2	- Fator de decisão à escolha global

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	ORGANIZAÇÃO TEXTUAL	21
2	AS REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS: EVOLUÇÃO E CARACTERÍSTICAS	23
2.1	A EVOLUÇÃO DAS REDES ÓPTICAS	23
2.2	AS REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS	25
2.2.1	Comparação entre Redes Ópticas SLICE e WDM	27
2.2.2	O problema de Roteamento e Alocação de Espectro em Redes SLICE	28
2.3	O MODELAMENTO DA CAMADA FÍSICA EM REDES SLICE	30
2.3.1	O modelamento do formato de modulação selecionado	33
2.3.2	A metodologia RMSA assumida	33
2.3.2.1	Cálculo de rotas	34
2.3.2.2	O nível de modulação	34
2.3.2.3	A alocação de espectro	34
3	HEURÍSTICAS PARA ROTEAMENTO EM EON COM RESTRIÇÕES NA CAMADA FÍSICA	35
3.1	O PROBLEMA RMSA PARA TRÁFEGO DE REDE DINÂMICO	35
3.1.1	O algoritmo <i>Best Among Shortest Routes - BSR</i>	36
3.1.2	Alguns Algoritmos de Roteamento Fixo-Alternativo	38
3.2	UMA HEURÍSTICA PARA O PROBLEMA RMSA BASEADA NUMA ESTIMATIVA DA OCUPAÇÃO ESPECTRAL DA REDE COM BSR	40
3.2.1	Discussões e resultados numéricos em diferentes topologias	42
3.3	UMA METODOLOGIA PARA O PROBLEMA RMSA BASEADA NA OCUPAÇÃO ESPECTRAL REAL DA REDE COM BSR	51
3.3.1	Discussões e resultados numéricos em diferentes topologias	53
4	ALGORITMOS INTELIGENTES PARA ROTEAMENTO EM EON COM RESTRIÇÕES NA CAMADA FÍSICA	58
4.1	UMA ABORDAGEM BASEADA EM UM ALGORITMO GENÉTICO PARA O PROBLEMA RMSA	58
4.1.1	A adaptação do Algoritmo Genético para o problema RMSA	60
4.1.2	Discussões e resultados numéricos em diferentes topologias	63

4.2	UM ALGORITMO DE BUSCA INTELIGENTE PARA O PROBLEMA RMSA	65
4.2.1	Uma adaptação do PSO para o problema RMSA baseada na metodologia BSR	68
4.2.2	Discussões e resultados numéricos em diferentes topologias . .	71
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	75
5.1	AS CONCLUSÕES VISTAS DESSE TRABALHO	75
5.2	PUBLICAÇÕES	75
5.3	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	76
	REFERÊNCIAS	77

1 INTRODUÇÃO

A demanda de tráfego de rede tem aumentado nos últimos tempos devido principalmente a serviços de Internet tais como televisão via Internet, vídeo sob demanda, computação em nuvem, aplicações P2P, dentre outros (TAKAGI et al., 2011). Segundo a Cisco (CISCO, 2018), o tráfego global da Internet atingirá 186 *exabytes* por mês em 2019, conforme mostra a Figura 1. Mais precisamente, esse tráfego aumenta a uma taxa composta de crescimento anual (*Compound Annual Growth Rate - CAGR*) de 24 por cento, e deve permanecer assim até 2021.

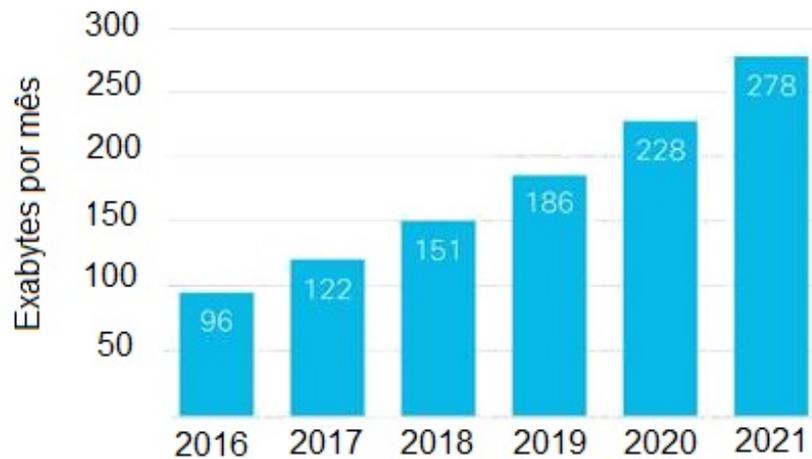
Nesse cenário de crescimento de dados sendo transmitidos pela Internet, a tecnologia DWDM (*Dense Wavelength-Division Multiplexing*) é a utilizada pelos ISPs (*Internet Service Provider*). A capacidade de transmissão de redes DWDM atinge altas taxas de bit com canais operando normalmente entre 40 Gbps a 100 Gbps (GERSTEL et al., 2012). Somado a isso, a técnica conhecida como agregação de tráfego (*traffic grooming*) permite o transporte de múltiplas requisições, sendo cada uma composta de baixas taxas de dados, em um caminho com alta capacidade. Desse modo, redes DWDM empregadas com a técnica de agregação de tráfego representam a solução encontrada para atender a atual demanda de tráfego (GARCIA, 2012).

Contudo, o desempenho das redes DWDM é influenciado pelos serviços de Internet que podem exigir diferentes demandas de tráfego. Enquanto e-mails ou mensagens instantâneas requerem pouca demanda de taxa de transmissão, outras aplicações como HDTV (*High Definition Television*) e P2P (*Peer-to-Peer*) requerem taxas na ordem de Gbps (*Gigabits per second*).

Mais precisamente, na tecnologia de redes WDM (*Wavelength Division Multiplexing*), o espectro é dividido em faixas de largura fixa, o que pode comprometer a eficiência na utilização dos recursos de rede. Quando a demanda de tráfego é menor do que a capacidade de um comprimento de onda, toda a faixa de comprimento de onda será alocada e, conseqüentemente, uma parte da banda é desperdiçada. Além disso, *traffic grooming* não elimina completamente o desperdício de largura de banda, o que implica em perda de capacidade de transmissão da rede. Como agravante, existe o fato de que a heterogeneidade na demanda de tráfego atual causa uma maior complexidade na gerência de tráfego na rede (TAKAGI et al., 2011). Devido a isso, o que se tem em mente é que há uma tendência de que novas tecnologias facilitarão a coexistência numa única rede de demandas de tráfego com diferentes requisições de banda com QoT (*Quality of Transmission*).

Recentemente, muitos estudos estão sendo realizados com uma nova proposta capaz de suportar taxa de dados flexíveis, adaptar-se dinamicamente às demandas de largura de banda variáveis e utilizar o espectro de forma mais eficiente (JINNO; TAKARA; KOZICKI, 2009). Ela é geralmente conhecida por SLICE (*Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Network*) ou Redes Ópticas Elásticas (JINNO et al., 2009) (ZHANG et al., 2013). Essa tecnologia é baseada

Figura 1 – Previsão para o crescimento do tráfego global de Internet.



Fonte: adaptado de (CISCO, 2018).

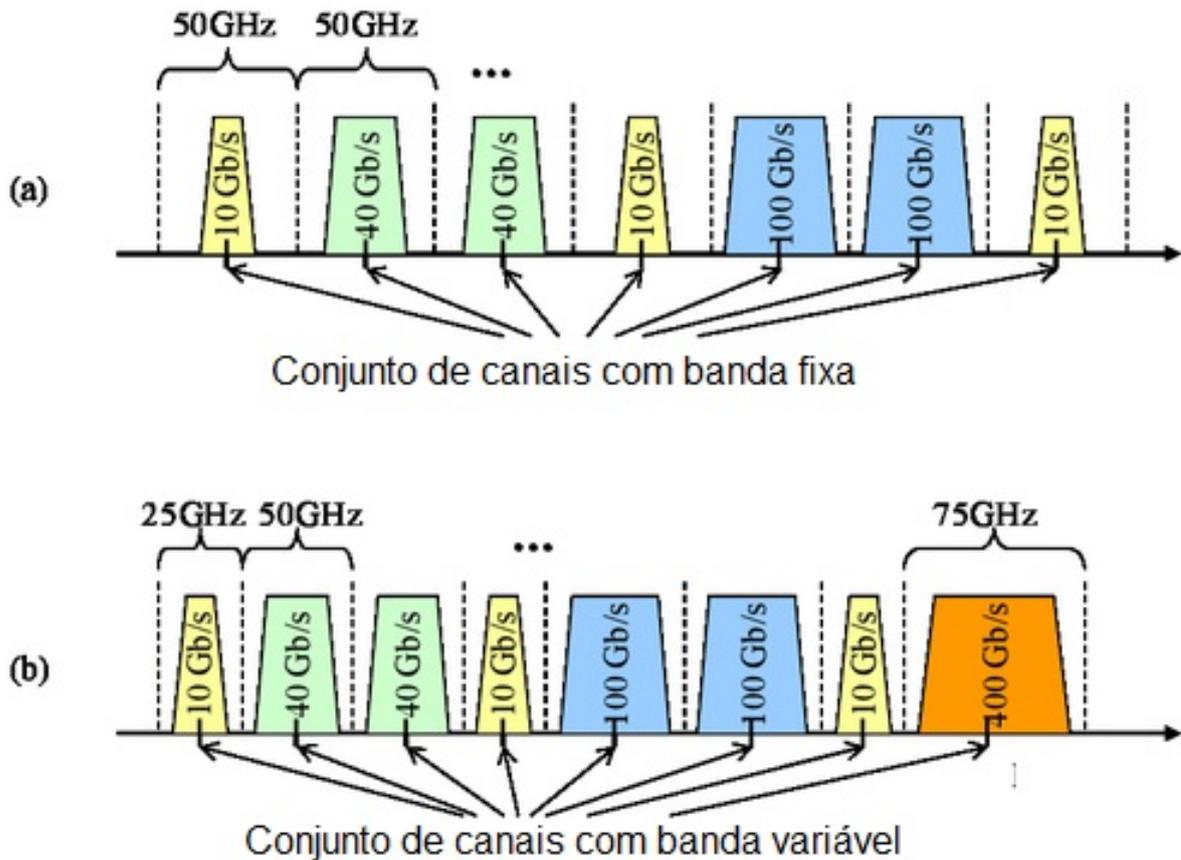
em sistemas de transmissão que permitam tráfego com taxa de transmissão variáveis capaz de, em conjunto, ocupar de forma eficiente o espectro, além de ser capaz de enfrentar as severas limitações de camada física em redes ópticas transparentes de grandes dimensões.

Como pode ser observado na Figura 2, as redes ópticas elásticas (*Elastic Optical Networks* - EON), em comparação às redes tradicionais WDM, acomodam de forma mais eficiente múltiplas taxas de dados e variação elástica de recursos alocados. Dessa forma, para realizar a alocação espectral em uma rede WDM (Figura 2 (a)), deve-se utilizar a capacidade total da faixa associada de um comprimento de onda no percurso fim-a-fim. Já em EON (Figura 2 (b)), um sinal óptico é gerado com a utilização apenas dos recursos espectrais suficientes para transmitir o sinal do cliente, e assim, ocorre um melhor aproveitamento dos recursos espectrais e redução de desperdício de banda.

Nas redes WDM, o problema de roteamento e alocação de comprimentos de onda é conhecido como RWA (*Routing and Wavelength Allocation*) (KOGANTIA; SIDHUA, 2014). Ele tem como objetivo maximizar o número de conexões estabelecidas pela rede, levando em consideração a maneira como a conexão é trafegada na rede e como os comprimentos de onda são alocados. Além disso, há a restrição de continuidade de comprimento de onda, em redes sem conversão de comprimento de onda, o que significa que a faixa espectral da conexão deve ser mantida ao longo dos enlaces da rota.

Por outro lado, como em EON a alocação de banda é feita de maneira flexível, esse problema torna-se o problema de roteamento e alocação de espectro (*Routing and Spectrum Allocation* - RSA). Por esse motivo, o RSA é mais desafiador que o RWA, visto que a granularidade espectral dos caminhos ópticos depende do caminho a ser percorrido. O RSA

Figura 2 – Alocação de espectro em redes WDM e EON.



Fonte: O autor, 2018.

apresenta ainda a restrição de contiguidade, ou seja, os *slots* de frequência atribuídos a uma conexão devem ser contíguos no espectro ao longo dos enlaces em sua rota.

Há ainda o problema de roteamento, alocação de modulação espectro (*Routing, Modulation and Spectrum Allocation* - RMSA) em EON. A principal diferença entre RSA e RMSA é que, no RSA, a demanda de tráfego é assumida diretamente em slots, enquanto que para o RMSA, a demanda de tráfego é feita em BPS (*Bits Per Second*) e o formato de modulação e as especificações de QoS são levados em consideração para a definição da largura de banda da requisição. Como o problema RMSA engloba o problema RSA, de uma forma sucinta, esses dois problemas serão descritos a seguir como RMSA.

O problema RMSA pode ser dividido em tráfego estático (*off-line*) e tráfego dinâmico (*on-line*). No primeiro caso, as requisições são previamente conhecidas. Dessa maneira, o algoritmo é encarregado de definir por onde as demandas de tráfego serão distribuídas. Em outras palavras, para cada requisição da rede será definida a rota e a faixa de frequência utilizada, sendo que o propósito fundamental no problema estático é encontrar a quantidade mínima de recursos capazes

de atender toda demanda de tráfego ou, encontrar o máximo de tráfego que pode ser transportado na rede para uma determinada quantidade de recursos. No caso dinâmico, as requisições não são previamente conhecidas e chegam, ou partem da rede aleatoriamente, de acordo com a dinâmica e aleatoriedade definida para a rede. Assim, para cada requisição, as rotas entre os pares de nós da rede são selecionadas de acordo com a disponibilidade espectral corrente da rede, ou seja, os recursos espectrais são alocados e liberados com a rede óptica em operação. O objetivo geral, nesse contexto, é reduzir a probabilidade de bloqueio das requisições, pois normalmente não é possível, ou é muito custoso, prover recursos suficientes para atender a demanda de tráfego sem que haja bloqueio.

Em relação ao roteamento em redes EON, ele pode ser feito segundo três abordagens: roteamento fixo, roteamento fixo-alternativo e roteamento dinâmico (MURTHY; GURUSAMY, 2002). A classe de roteamento fixo é a mais simples de todas. Nela, apenas uma rota entre um par origem destino na rede pode ser usada na alocação do espectro e essa rota é sempre a mesma, ou seja, independe do estado da rede pré-estabelecido. Já na classe de roteamento fixo-alternativo, um conjunto de rotas entre um par origem destino é criado para atender as demandas. Dentre os elementos desse conjunto de rotas e seguindo uma ordem pré-estabelecida, aquela que primeiro possuir recursos espectrais suficientes para atender a requisição é selecionada para a alocação de espectro. Portanto, o conjunto de rotas e a ordem que elas são testadas são sempre o mesmo, mas a possibilidade de se tentar mais de uma rota reduz a chance de não encontrar recursos na rede capazes de atender a requisição. Na classe de roteamento dinâmico, todas as rotas entre um par da rede pode ser selecionada para a alocação de espectro e a sua escolha dependerá, tecnicamente, do estado da rede.

Quanto à arquitetura de uma rede óptica, ela pode ser classificada em opaca, transparente ou translúcida (SHEN; TUCKER, 2007). Nas redes ópticas opacas, todos os caminhos ópticos passam por uma conversão OEO (*Optical-Electrical-Optical*). A conversão OEO é responsável por converter um sinal óptico de entrada em um sinal eletrônico, para então ser processado eletronicamente antes de ser convertido, novamente, em um sinal óptico de saída. Já nas redes transparentes, não há conversão OEO nos nós que compõem a rede óptica. Nesse caso, o sinal óptico é comutado sem sair do domínio óptico. Embora a ausência de conversores OEO reduza consideravelmente o custo de implementação dessa arquitetura de rede óptica, surge uma dificuldade adicional de operação da rede, pois o sinal óptico (ao se propagar através dos enlaces de fibra óptica), amplificadores ópticos ou outros elementos sem qualquer regeneração sofrem degradações tal que a taxa de erro de bit (*Bit Error Rate - BER*) torna-se cada vez maior e pode atingir níveis intoleráveis (GAGNAIRE; ZAHR, 2009) (SHEN; TUCKER, 2007). Uma solução para esse caso é um balanceamento entre as duas abordagens anteriores, o que implica em empregar conversão OEO em alguns poucos nós da rede. Com esse novo tipo de abordagem, a rede é chamada de translúcida.

Neste trabalho, buscando simplicidade em reproduzir o comportamento de uma rede

óptica em funcionamento, são consideradas simulações em redes ópticas transparentes sob tráfego dinâmico. Sendo assim, aqui é reproduzida a degradação do sinal transmitido ao longo dos elementos de rede e sua BER é respeitada conforme um valor estabelecido para garantir sua qualidade de transmissão. Além disso, essas restrições físicas são feitas sob uma abordagem de roteamento fixo-alternativo. Dessa forma, para estabelecer uma conexão na rede óptica, há mais rotas alternativas disponíveis do que se fosse usado o roteamento fixo. Lembrando que, o método dinâmico encontra um melhor roteamento na rede óptica, embora sua complexidade seja maior. Mais uma vez, a simplicidade foi decisiva na escolha, nesse caso para o algoritmo de roteamento.

Todavia, análogo ao problema RWA, que é NP-Completo (KOGANTIA; SIDHUA, 2014), o RMSA é um problema da classe NP-Difícil (SHIRAZIPOURAZAD; ZHOU; DERAKHSHANDEH, 2013). Isso significa que há um algoritmo de complexidade polinomial não determinístico para o problema RWA. Já no caso RMSA, não foi encontrado ainda uma forma para solucionar esse problema em tempo polinomial (CHRISTODOULOPOULOS; TOMKOS; VARVARIGOS, 2010).

Assim, técnicas de programação computacional alternativas são usadas para aperfeiçoar possíveis soluções para os problemas da classe NP-Difícil. Algumas heurísticas foram propostas para otimizar o roteamento e a alocação de espectro em EON. Aqui, são apresentados dois métodos heurísticos para resolver o RMSA. Eles utilizam o roteamento fixo-alternativo baseada na metodologia BSR, que tem sido apresentada como uma boa alternativa para o balanceamento de carga na rede (ASSIS; F.; ALMEIDA, 2014; SANTOS et al., 2017). Sua ideia principal é, através de um processo iterativo, escolher uma ou mais rotas entre todas as possíveis combinações de rotas entre os pares origem-destino, com um número mínimo de saltos, as quais podem fornecer um balanceamento de carga eficiente entre os enlaces da rede (ASSIS; F.; ALMEIDA, 2014). Como pode ser visto futuramente, as heurísticas propostas conseguiram um bom desempenho em reduzir o número de bloqueios pela rede óptica, quando comparadas a métodos tradicionais de roteamento.

Além disso, as heurísticas de computação propostas são comparadas a meta-heurísticas de buscas. O objetivo disso é comparar o desempenho das heurísticas propostas com métodos computacionais tradicionais existentes na literatura, que nesse caso, tratam-se do Algoritmo Genético e *Particle Swarm Optimization* (PSO), adaptados para solucionar o problema RMSA.

1.1 ORGANIZAÇÃO TEXTUAL

O restante desse trabalho está organizado da seguinte forma:

- **Capítulo 2** - Realiza um estudo sobre as Redes Ópticas e sua evolução até os dias de hoje. As Redes Ópticas, atualmente, estão usando a tecnologia WDM. Nesse Capítulo, essa tecnologia é comparada à tecnologia Redes SLICE. O problema de Roteamento e Alocação de Espectro também é visto nesse capítulo, além do modelamento físico utilizado;

- **Capítulo 3** - Nesse capítulo, são apresentadas duas heurísticas para o algoritmo BSR baseadas na metodologia de roteamento fixo-alternativa, considerando a taxa de bit requisitada e o nível de modulação da conexão em função das restrições da camada de física com a propagação do sinal óptico.
- **Capítulo 4** - Após as apresentações das heurísticas desse trabalho, abordagens usando computação inteligentes são utilizadas. Nesse caso, essas abordagens são usadas para obter uma forma alternativa às heurísticas propostas para o problema RMSA. Como também, seus resultados são comparados aos apresentados pelas heurísticas baseadas no BSR.
- **Capítulo 5** - Apresenta as conclusões do estudo comparativo realizado, analisando de forma resumida os resultados apresentados, bem como, os futuros trabalhos que podem ser realizados sobre esse tema.

2 AS REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS: EVOLUÇÃO E CARACTERÍSTICAS

Ao longo dos anos, os serviços de telecomunicações fornecidos aos clientes, tais como HDTV (*High Definition Television*), videoconferência, VOIP (*Voice over Internet Protocol*), dentre outros tiveram uma crescente demanda por largura de banda. EON são vistas, atualmente, como a principal tecnologia de comunicação para suportar essa crescente demanda de tráfego. Neste capítulo, é apresentada a evolução das redes ópticas até as redes EON, suas principais características e o modelamento de camada física utilizado neste trabalho.

2.1 A EVOLUÇÃO DAS REDES ÓPTICAS

O sistema de comunicação óptico com fibra óptica como o meio de transmissão é a solução encontrada há algumas décadas para suportar a crescente demanda por tráfego que circula via Internet. Inicialmente demonstradas em 1980, com uma taxa de transmissão de 45 Mb/s em um único enlace, as redes ópticas deram um salto na capacidade de transmissão ao longo dos anos. No começo, todo o sistema era constituído por um único comprimento de onda, que suportava um único canal de comunicação (TOMKOS et al., 2012) (ALFERNES, 2012). Esse sistema funcionou bem no começo, mas logo se notou a diferença entre a capacidade de transmissão dos *transponders* (alguns poucos Gbps) e a grande largura de banda das fibras ópticas em faixa de operação comercial.

Após algumas gerações, as redes WDM foram propostas, com o intuito de permitir a transmissão, numa única fibra, de múltiplos canais contíguos de transmissão compatíveis com a tecnologia vigente. Com essa tecnologia, o espectro de frequência disponível é dividido em um número de comprimentos de onda não sobrepostos entre si. A partir de então, a quantidade de canais de comunicação ópticos obteve um expressivo aumento. Entretanto, a tecnologia de alguns dispositivos da época limitou a capacidade de transmissão das primeiras redes com WDM. Só após inovações em dispositivos, tais como ROADM (*Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer*), amplificadores ópticos EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifiers*), dentre outros se tornou possível a transmissão simultânea de 16 canais com capacidade de 40 Gb/s por fibra, em 1997 (SHAKYA, 2015).

Não obstante a isso, novos esforços foram feitos para aumentar ainda mais a capacidade de transmissão das redes ópticas. Os dispositivos ópticos e a gerência da rede passaram a ter uma inteligência artificial, de forma que alguma funcionalidade de rede fosse introduzida à camada fotônica além de uma simples transmissão na fibra óptica (KAVIAN; GHASSEMLOOY, 2013). Com a ajuda dos ADMs (*Add/Drop Multiplexers*), as WRNs (*Wavelength Routing Network*) surgiram com o objetivo de fornecer à rede novas funcionalidades ópticas. Em uma delas, o roteamento entre os nós da rede é baseado no comprimento de onda do sinal de entrada e não mais de forma ponto-a-ponto, onde o conteúdo é extraído e reinserido por nós da rede. Além disso,

com a introdução de multiplexação por divisão de polarização, modulação por fase e multi-nível, juntamente com formatos de detecção coerentes e equalização digital no domínio elétrico, foi viável o surgimento de DWDM (*Dense Wavelength-Division Multiplexing*). Com essa tecnologia, a capacidade de transmissão subiu para 100 Gb/s para cada canal óptico (BEYRANVAND; SALEHI, 2013) (SIMEONIDOU; AMAYA; ZERVAS, 2012) (ESSIAMBRE et al., 2010).

Entretanto, vale ressaltar que, quando a demanda de tráfego excede a capacidade de transmissão de um único canal, mais de um comprimento de onda deve ser agrupado para a alocação espectral. Devido a isso, observou-se que a má utilização da capacidade espectral também é um problema que deve ser levado em conta num projeto de rede de transmissão, mesmo que não exista uma divisão espectral que seja ótima para todas as demandas de tráfego. Esse problema pode se agravar ainda mais com a implantação de sistemas com taxas mais elevadas para cada canal de comunicação (SARADHI; SUBRAMANIAM, 2009). Dentre essas razões, outras abordagens de sistemas ópticos foram desenvolvidas, na década de 90, como a OPS (*Optical Packet Switching*) e a OBS (*Optical Burst Switching*).

Na tentativa de conseguir uma melhor eficiência espectral, os paradigmas OPS e OBS utilizam o domínio do tempo para permitir o compartilhamento de recursos da rede. A multiplexação estatística de tráfego sobre os recursos compartilhados no tempo pode cumprir os requisitos de eficiência de futuras redes de transporte. No entanto, OPS pode ser visto como uma solução ainda em longo prazo, visto que suas tecnologias ainda estão em fase de amadurecimento. Um dos grandes entraves às redes OPS foi a inexistência de um elemento capaz de criar memórias RAM (*Random Access Memories*), tanto para a parte de sincronização em redes OPS síncronas tanto para a resolução de contenção, comum às redes de pacotes. Em relação às redes OBS, a dificuldade de se conseguir agendar os recursos da rede com um tráfego viajando a altas velocidades não conseguiu convencer a grande maioria dos pesquisadores e investidores. Assim, seus poucos produtos comerciais ainda não encontraram sucesso no mercado (SARADHI; SUBRAMANIAM, 2009).

Além disso, uma longa linha de transmissão de fibra óptica exigia conversores O-E-O para regeneração do sinal óptico. O uso do EDFA eliminou a necessidade dessa conversão, simplificando significativamente o sistema. O EDFA é um amplificador óptico onde as perdas sofridas pelo sinal propagado através de fibras ópticas, tornam-se mais baixas em todas as faixas de comprimentos de onda. Desse modo, um EDFA é usado para compensar a perda de uma fibra óptica na comunicação óptica de longa distância de forma a amplificar múltiplos sinais ópticos simultaneamente (MEAR et al., 1987).

No fim da década de 2000, a frequência voltou a ser explorada como o domínio que pode ser trabalhado para conseguir uma maior eficiência espectral, a custos e riscos aceitáveis. Os comprimentos de onda em redes WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) operam em faixas rígidas de frequência definidas pelo ITU-T (*Telecommunication Standardization Sector*), em 50 GHz, 100 GHz ou 200 GHz (CHRISTODOULPOULOS; TOMKOS; VARVARIGOS, 2010).

Adotando uma abordagem diferente, muitos esforços ultimamente têm focado em arquiteturas que suportam conexões de espectros variáveis. EON (*Elastic Optical Networks*) é um termo científico empregado para descrever uma solução que migrou do sistema de grade fixa para um sistema que suporta conexão de banda variável (MOREA; CHONG; RIVAL, 2011). Projetos como Alcatel-Lucent da Bell Labs são alguns financiadores dessa tecnologia (LAYEC et al., 2013).

2.2 AS REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS

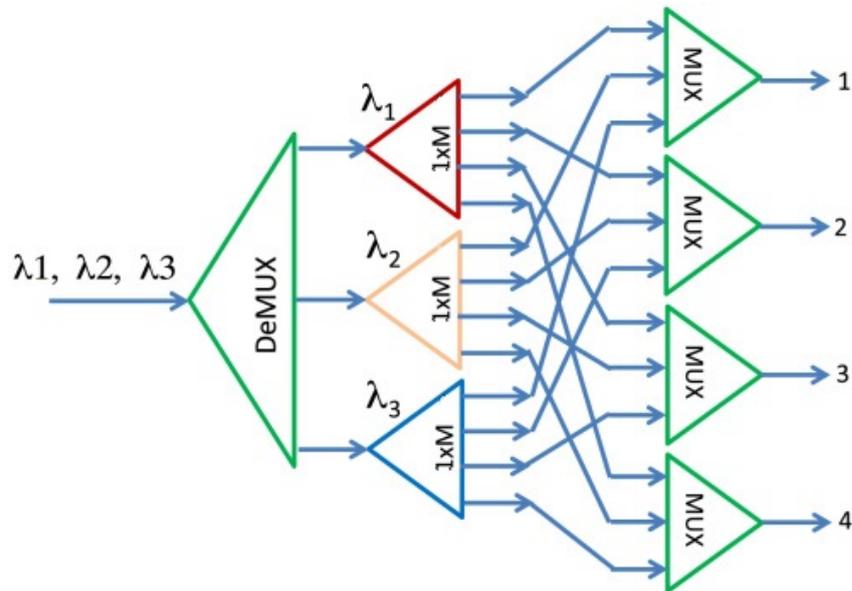
O conceito de Redes Ópticas Elásticas, ou simplesmente EON, foi introduzido no trabalho (JINNO et al., 2009). O termo “flexibilidade” refere-se à capacidade dessas redes em ajustar dinamicamente seus recursos, tanto de largura de banda óptica quanto de formatos de modulação, de acordo com os requisitos de cada conexão e o acúmulo de ruído no sinal decorrente da transmissão através dos dispositivos de rede. Vale ressaltar que, os termos “flexibilidade”, “flexgrid”, “elasticidade” e “gridless” são equivalentes e usados pela comunidade científica para descrever esse tipo de rede (TOMKOS et al., 2014).

Alguns recursos físicos como WXC (*Wavelength Cross-Connect*), WSS (*Wavelength-Selective Switch*) e BV-WSS (*Bandwidth-Variable Wavelength-Selective Switch*) possibilitaram o surgimento das redes SLICE. WXC são elementos de rede que precisam ser localizados em cada nó atravessado por um caminho óptico. Sua função é alocar uma conexão cruzada de largura de banda suficientemente larga para permitir o encaminhamento do espectro a ser alocado. Em razão disso, cada WXC deve configurar a largura de banda de forma flexível de acordo com a largura espectral do sinal óptico. A função do dispositivo WSS é direcionar os comprimentos de onda para os destinos apropriados. Seu funcionamento consiste em uma estrutura 1xN (uma entrada e N saídas) ou Nx1 (N entradas e uma saída), ou seja, ela é composta por multiplexadores e demultiplexadores cuja matriz de comutação é formada por chaves ópticas seletoras. Com isso, um sinal óptico de entrada em um WSS é decomposto em várias fatias de espectro separadamente, e então, cada uma delas pode ser direcionada para qualquer um dos multiplexadores de saída de acordo com a posição das chaves ópticas (SIMEONIDOU; AMAYA; ZERVAS, 2012). A Figura 3 mostra uma representação funcional de um WSS e um conjunto de comprimentos de onda direcionadas para algum multiplexador adequado. Após isso, cada multiplexador direciona seu sinal para cada multiplexador de saída.

Já o BV-WSS é um tipo especial de WSS. Sua função é agrupar granularidades de comutação vizinhas, de maneira que seja possível a flexibilidade da largura do canal. Para o WSS ter a mesma funcionalidade de banda variável, é utilizada a tecnologia LCoS (*Crystal on Silicon*). Essa tecnologia combina cristal líquido com a tecnologia de semicondutor (JINNO et al., 2009). Na Figura 4 é mostrado um esquema para um BV-WSS. Nessa figura, também são mostrados os canais de diferentes larguras que podem ser facilmente distribuídos à fibra desejada.

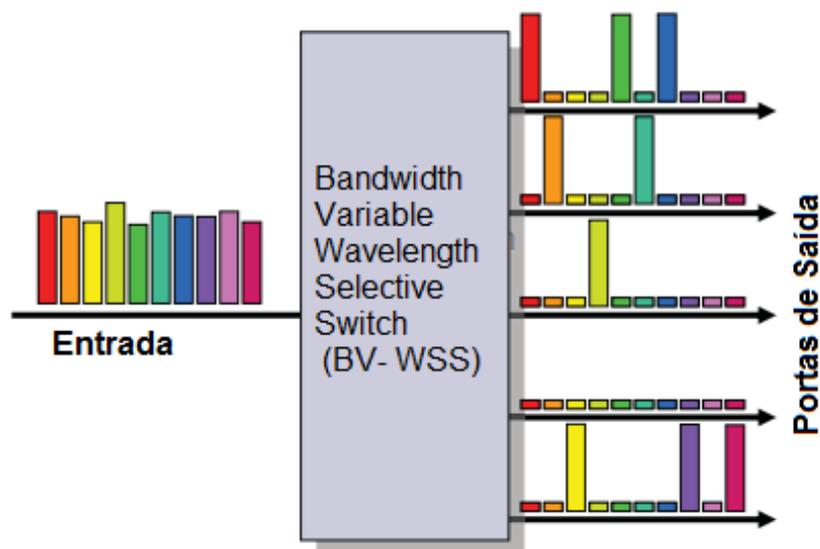
A transmissão de informações em EON dá suporte à utilização de diversos formatos

Figura 3 – Representação funcional de um WSS.



Fonte: adaptado de (ZHANG et al., 2013).

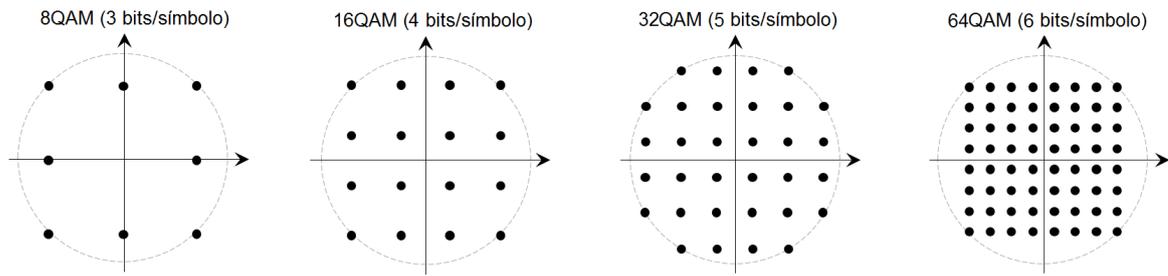
Figura 4 – Um esquema de funcionamento de um BV-WSS.



Fonte: adaptado de (ZHANG et al., 2013).

de modulação, mediante o uso de *transponders* com largura de banda variável. Portanto, nessa tecnologia, pode haver diferentes formatos de modulação sendo utilizados ao mesmo tempo, na rede em operação. Alguns formatos de modulação podem ser citados como BPSK (*Binary Phase Shift Keying*), QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*) e QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*). Cada um deles transmite uma determinada quantidade de bits por símbolo. Mais precisamente, devido à distribuição da sua constelação, cada formato de modulação transporta

Figura 5 – Diagrama de constelação do formato de modulação QAM.



Fonte: adaptado de (CHINDAPOL; RITCEY, 2001).

no máximo $\log_2(M)$ bits de informação por símbolo, onde M é o número de símbolos a serem transmitidos. A Figura 5 mostra o diagrama de constelação para a modulação QAM (TOMKOS et al., 2012) (KAVIAN; GHASSEMLOOY, 2013).

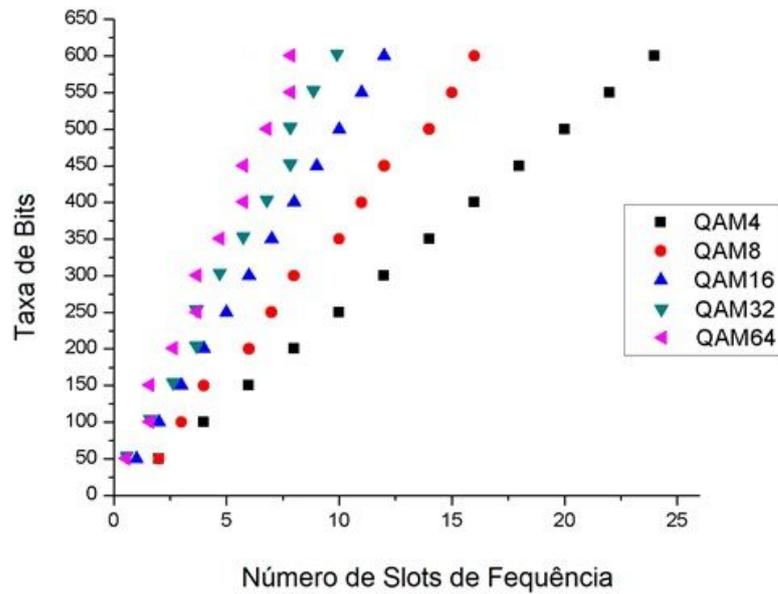
Ainda nesse contexto, no estabelecimento de uma conexão, para a escolha do formato de modulação deve ser levada em conta a distância entre o nó de origem e o nó destino. Como exemplificação, a Figura 6 mostra alguns pontos para cada formato de modulação QAM e seus números de *slots* de frequência calculados. Portanto, para uma mesma condição de transmissão e garantindo a qualidade do sinal transmitido (*Quality of Transmission - QoT*), o número de *slots* calculados crescem à medida que a taxa de bit transmitida aumenta. Além disso, aqueles formatos QAM que possuem maiores taxas de bit por símbolo são mais eficientes por necessitarem de menos *slots* de frequência para a transmissão.

2.2.1 Comparação entre Redes Ópticas SLICE e WDM

Na tecnologia que permite largura de banda flexível, mais de um canal, ou conjunto de *slots* de frequência, pode ser combinado para a criação de um super-canal, aumentando assim, a capacidade de transmissão de um canal. A Figura 7 mostra um modelo de número de *slots* alocados por taxa de transmissão. Nesse caso, os dados a serem transmitidos são divididos em vários canais. Os canais ópticos são alocados de forma contígua e sem banda de guarda entre si. Dessa forma, é permitida a sobreposição de sub-portadoras adjacentes, como mostrado na parte inferior da Figura 7. Assim, existe um melhor aproveitamento de recursos espectrais do que outros sistemas de modulação, como o utilizado tradicionalmente em WDM (BEYRANVAND; SALEHI, 2013).

Para uma melhor comparação da eficiência espectral entre redes SLICE e WDM, na Figura 8(a) e na Figura 8(b) são mostrados os espectros de frequência em uso por uma rede WDM e a rede SLICE, respectivamente. A Figura 8(a) segue a grade de frequência padrão ITU-T WDM, onde a distância entre os *slots* de frequência varia de 100 GHz, 50 GHz, 25 GHz ou 12,5 GHz. A largura de banda está centralizada em torno da frequência de 193,1 THz. Note que, é requerida uma banda de guarda entre os comprimentos de onda alocados. Já na Figura 8(b), é

Figura 6 – Capacidade de transmissão para diferentes tipos de formato de modulação QAM.



Fonte: O autor, 2018.

especificada a alocação flexível de *slots* de frequência de comprimento 12,5 GHz, encontrados em redes SLICE (JINNO et al., 2010). Desse modo, a alocação de recursos espectrais pode ser flexível, além de não ser necessária uma banda de guarda entre sub-portadoras adjacentes, e assim, uma boa parte de recursos espectrais pode ser economizada.

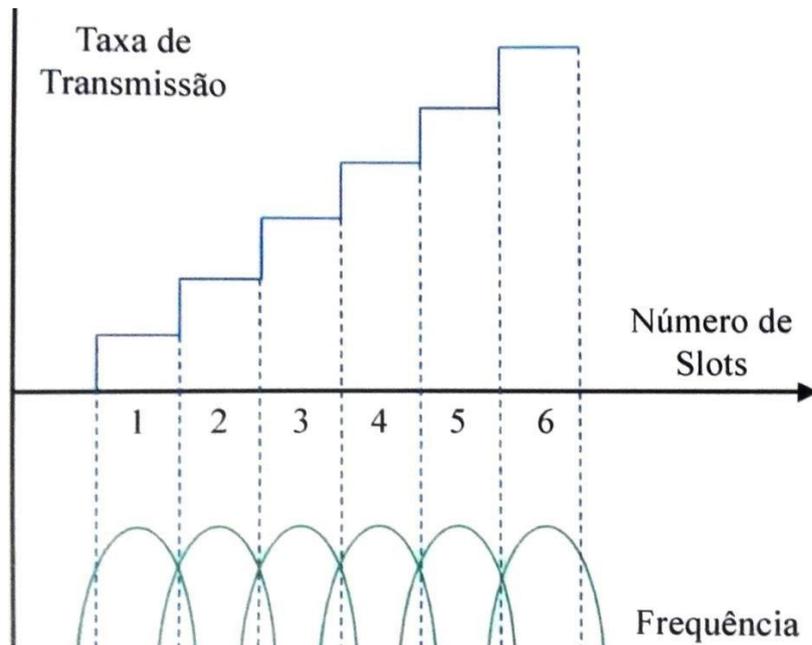
Em resumo, a alocação de espectro em redes WDM ocorre de maneira fixa, ou seja, para cada caminho óptico é alocada uma largura de banda fixa independente daquela que foi requisitada. O mesmo não acontece em redes SLICE, onde há uma flexibilidade na alocação de largura de banda e, conseqüentemente, uma grande economia de recursos espectrais.

Essa tecnologia permite que o sinal possa ser composto por um conjunto de sub-portadoras ortogonais que se sobrepõem parcialmente no domínio da frequência. Desse modo, uma alocação mais flexível e uma eficiente utilização de recursos espectrais são obtidas. A largura de banda correspondente às várias sub-portadoras utilizadas para o caminho óptico pode ser assumida em forma de quantidade de *slots* (WANG; CAO; PAN, 2011).

2.2.2 O problema de Roteamento e Alocação de Espectro em Redes SLICE

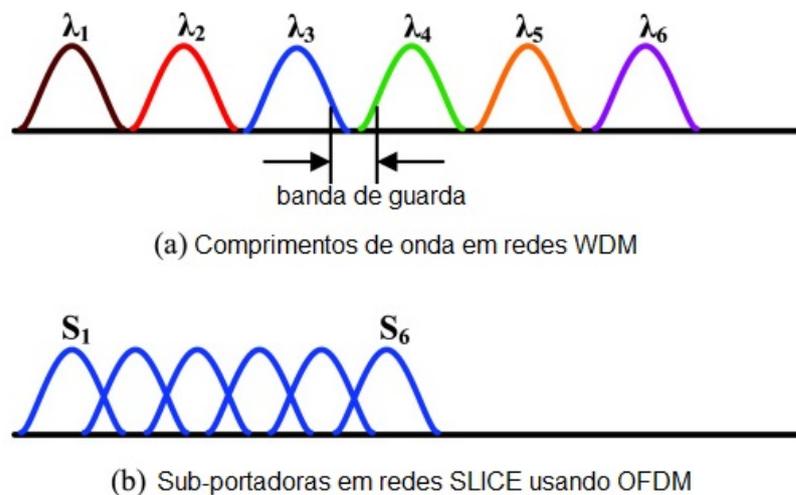
O problema RMSA pode ser dividido em dois subproblemas: o roteamento de caminhos ópticos e a alocação de espectro. Na literatura, existem algumas metodologias com o objetivo de resolver esse problema, ou seja, encontrar uma solução que permita encontrar uma rota e um conjunto de *slots* de frequência entre dois nós da rede, onde uma conexão possa ser estabelecida.

Figura 7 – Taxa de transmissão por número de *slots* de frequência.



Fonte: adaptado de (RUAN; ZHENG, 2014).

Figura 8 – Esquema de especificação de recursos espectrais para largura de banda fixa e largura de banda flexível.



Fonte: adaptado de (ZHANG et al., 2013).

Todavia, o problema RMSA é da classe NP-Difícil, o que significa que o tempo de execução do problema cresce de maneira exponencial em relação ao conjunto de entrada quando resolvido por uma máquina computacional determinística (WANG; CAO; PAN, 2011). Dessa forma, heurísticas são criadas para encontrar um conjunto de soluções, que se aproximam da solução ótima, em um tempo computacional reduzido (VARVARIGOS;

CHRISTODOULOPOULOS, 2013) (CORMEN et al., 2002).

Com as heurísticas em mãos, o problema de roteamento e alocação de espectro pode ser tratado de duas formas: individualmente ou conjuntamente. Caso tratado individualmente, os recursos de rede podem não ser utilizados de forma tão eficiente. Já em conjunto, pode-se obter uma maior eficiência no uso dos recursos, porém com uma complexidade algorítmica maior.

Neste trabalho, foi aplicado o tratamento individual para o subproblema de roteamento em redes ópticas elásticas levando em consideração restrições na camada física. Para isso, o método heurístico BSR (*Best among the shortest routes*) serve para definir o conjunto de rotas dentre todas as rotas possíveis com o número mínimo de saltos que podem fornecer um balanceamento de carga eficiente entre os enlaces da rede.

Em trabalhos anteriores, nas adaptações do BSR para redes ópticas elásticas, o pedido de conexão é definido pelo número de *slots* de frequência, independentemente do formato de modulação utilizado (ASSIS; F.; ALMEIDA, 2014; SANTOS et al., 2017). Já aqui, é considerado o pedido de conexão com demanda por uma taxa de transmissão, ao invés de um conjunto de *slots*. Dessa forma, o pedido de conexão é mais similar ao que acontece em redes ópticas reais. Além disso, é levado em consideração que o sinal transmitido ao longo dos enlaces ópticos e elementos de nós têm sua inteligibilidade comprometida ao se propagar através da rede.

Devido a isso, foi necessário um projeto de reprodução da camada física, levando em conta suas restrições para transmissão de um sinal óptico pela estrutura na rede.

2.3 O MODELAMENTO DA CAMADA FÍSICA EM REDES SLICE

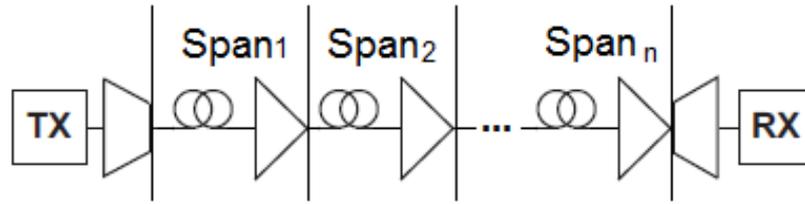
Uma modelagem física óptica é utilizada em EON, entre outros objetivos, para calcular a OSNR no nó destino da conexão, conhecendo-se os valores das perdas nos dispositivos, ganhos e cálculos de ruído ASE (*Amplified Spontaneous Emission*) gerados em amplificadores ópticos presentes nos nós e enlaces de rede (SIMEONIDOU; AMAYA; ZERVAS, 2012).

A qualidade do sinal transmitido (*Quality of Transmission* - QoT) é influenciada pelo número de amplificadores na rede. Neste trabalho, os amplificadores de linha têm seus ganhos escolhidos de forma a compensar a diminuição de potência do sinal quando passam através das fibras ópticas. Cada segmento de fibra óptica é seguido por um amplificador de linha que ajusta a potência do sinal, mas introduz ruído. Portanto, a qualidade do sinal ao passar por um amplificador de linha é afetada.

Sendo assim, um coeficiente de perda de fibra α em unidade de dB/Km é convertido para unidade de Km^{-1} de acordo com a Equação 1, onde E é igual a constante de base dos logaritmos naturais.

$$\alpha = \alpha_{dB} \frac{\ln(10)}{10}. \quad (1)$$

Figura 9 – Arquitetura óptica do caminho óptico de ponta a ponta.



Fonte: O autor, 2018.

Portanto, a perda de potência causada pela transmissão de um sinal através de uma fibra óptica é dado pela Equação 2, onde P é a potência de saída, P_0 é a potência de entrada, α é o coeficiente de perda da fibra em unidade de Km^{-1} e L o comprimento da fibra em unidade de Km (ZAGZEBSKI, 1996).

$$\frac{P}{P_0} = e^{-\alpha L}. \quad (2)$$

Dessa forma, para compensar a diminuição da potência do sinal propagado através de uma fibra óptica, é sempre introduzido após a fibra um amplificador. Porém, o sinal propagado sofre a perda de qualidade de transmissão feita pela geração de um ruído ASE, que é calculado pela Equação 3. Neste caso, N_{ASE} é a potência do ruído ASE gerado devido à transmissão do sinal medido em *Watt* em duas polarizações da onda eletromagnética em função do ganho linear do amplificador G_n , onde F_{amp} é o fator de ruído do amplificador, h é a constante de *Planck*, ν a frequência do sinal óptico e B_{Ref} a largura de banda de referência (MELLO et al., 2014). Vale ressaltar que, para compensar a perda de transmissão através da fibra óptica, o ganho do amplificador G_n em *Watt* é igual ao inverso da diminuição da potência calculada na Equação 2.

$$N_{ASE} = F_{amp} h \nu B_{Ref} (G_n - 1). \quad (3)$$

O *Span* refere-se a um segmento de fibra e um amplificador de linha cuja potência do sinal de saída é igual à de entrada adicionada de um ruído ASE. A Figura 9 mostra um caminho óptico de ponta a ponta formado pelos seguintes elementos físicos: um transmissor óptico de largura de banda variável, um nó óptico, um conjunto formado por n *Spans*, um nó óptico e um receptor óptico de largura de banda variável.

De um modo geral, a potência de saída de um conjunto formado por n *Spans* é dada conforme a Equação 4, considerando que P_{IN} é a potência de entrada, P_{OUT} a potência de saída, i o índice do *Span* no conjunto de *Spans*, n o índice do último *Span* do conjunto, l_i a perda correspondente ao comprimento do enlace i e G_i o ganho linear do amplificador i .

$$P_{OUT} = P_{IN} \prod_{i=1}^n l_i G_i. \quad (4)$$

Neste trabalho, como o ganho do amplificador compensa integralmente a perda do enlace, a Equação 4 pode ser simplificada, como mostra a Equação 5.

$$P_{OUT} = P_{IN}. \quad (5)$$

A potência do ruído ASE calculado na Equação 3 é referente ao gerado por um certo amplificador em sua saída. Esse ruído será agregado ao ruído pré-existente na banda do sinal, que sofrerá atenuações e ganhos da transmissão nos *Spans* subsequentes até o nó destino. Dessa forma, de acordo com a Figura 9, a potência do ruído ASE na saída do *Span*₁ é dada pela Equação 6, onde N_{IN} é a potência do ruído de entrada.

$$N_1 = N_{IN} l_1 G_1 + N_{ASE_1}. \quad (6)$$

Já a potência do ruído na saída do *Span*₂ é feita de forma similar, porém é considerado a potência no *Span*₁, conforme é mostrado na Equação 7.

$$N_2 = N_{IN} l_1 G_1 l_2 G_2 + N_{ASE_1} l_2 G_2 + N_{ASE_2}. \quad (7)$$

Se n for considerado o número de total de *Spans* num enlace de comunicação da rede, a potência do ruído por n *Spans* é dada pela Equação 8.

$$N_n = N_{IN} \prod_{i=1}^n l_i G_i + \sum_{i=1}^{n-1} N_{ASE_i} \prod_{j=i+1}^n l_j G_j + N_{ASE_n}. \quad (8)$$

Neste trabalho, como o ganho do amplificador compensa integralmente a perda sofrida pela transmissão do sinal no enlace e todos os amplificadores têm o mesmo ganho, a Equação 8 pode ser simplificada, como mostra a Equação 9.

$$N_{OUT} = N_{IN} + \sum_{i=1}^n N_{ASE_i}. \quad (9)$$

Assim, este modelo analítico demonstra a qualidade do sinal óptico ao trafegar através dos enlaces da rede óptica.

$$OSNR_{OUT} = \frac{P_{OUT}}{N_{OUT}}. \quad (10)$$

Tabela 1 – Valores de snr_b para alguns formatos de modulação

Formato de Modulação	snr_b dB
16-QAM	10,52
32-QAM	12,57
64-QAM	14,77

Fonte: O autor, 2018.

2.3.1 O modelamento do formato de modulação selecionado

A probabilidade de erro para um formato de modulação $M - QAM$ pode ser calculada usando a equação 11, onde M é o número de símbolos e snr_b é a relação sinal-ruído por valor de bit (MELLO et al., 2014).

$$P_b = \frac{2}{\log M} \left(\frac{\sqrt{M} - 1}{\sqrt{M}} \right) \text{erfc} \left[\sqrt{\frac{3snr_b \log M}{2(M - 1)}} \right]. \quad (11)$$

Considerando uma probabilidade de erro de bit $P_b = 10^{-3}$, cada formato de modulação tem um valor requerido snr_b . Como exemplo, a Tabela 1 mostra valores diferentes de snr_b para diferentes formatos de modulação para uma *Hard-Decision* FEC (*Forward Error Correction*) (SHAFIK; RAHMAN; ISLAM, 2006).

Para uma determinada solicitação de taxa de bit B e um formato de modulação M , o limiar da relação sinal-ruído ($OSNR_{TH}$) pode ser expresso de acordo com a equação 12, onde B_{REF} é o comprimento da banda de referência (CAVALCANTE et al., 2015).

$$OSNR_{TH} = \frac{1}{2} \frac{B}{B_{REF}} snr_b. \quad (12)$$

Dessa forma, para garantir a qualidade de transmissão do sinal óptico baseada em um formato de modulação M e taxa de bit B , a $OSNR_{OUT}$ calculada na Equação 10 deve ser menor ou igual a OSNR limiar, calculada na Equação 12.

Além disso, o número de slots de frequência (n_{slots}) para uma determinada solicitação de taxa de bit é calculado pela equação 13, em que B_{slot} é a largura de banda de um *slot* de frequência.

$$n_{slots} = \frac{B}{2B_{slot} \log_2 M}. \quad (13)$$

2.3.2 A metodologia RMSA assumida

O esquema RMSA considerado é apresentado nesta seção. Basicamente, ele é composto por três etapas: cálculo de rotas, escolha do formato de modulação e alocação de espectro.

Quando uma solicitação de conexão chega à rede, o algoritmo RMSA pesquisa todas as rotas candidatas, identifica o formato de modulação necessário e, conseqüentemente, o número de *slots* necessários para atender à solicitação. Cada estágio do RMSA é detalhado a seguir.

2.3.2.1 Cálculo de rotas

O algoritmo YEN (YEN, 1971) é usado para encontrar as k -rotas entre os nós de origem e de destino de cada solicitação de conexão. A única mudança em relação ao tradicional YEN é o processo iterativo que atualiza os custos dos enlaces para melhor acomodar o tráfego na rede. Nos próximos capítulos, esse processo será mais bem detalhado.

2.3.2.2 O nível de modulação

O sinal transmitido através das k -rotas pode não ser capaz de ter QoT aceitável para garantir uma probabilidade de erro de bit pré-estabelecida. Isto é devido a vários fatores. Neste trabalho, considera-se apenas a adição do ruído ASE causado pelos amplificadores ao longo dos enlaces como um empecilho à propagação do sinal óptico. Portanto, a qualidade da transmissão deve ser avaliada para cada uma das rotas, a fim de determinar o formato de modulação a ser utilizado para atender aos requisitos de QoT e consumir menos largura de banda possível.

Dada a taxa de requisição combinada com a Equação 11 é informado o valor limite de uma OSNR aceitável para um dado formato de modulação. Para uma determinada rota, sua relação sinal-ruído deve ser maior ou igual ao valor específico de $OSNR_{TH}$. Neste estágio, as rotas que não possuem QoT são removidas do conjunto de k . Esse processo também será mais bem detalhado nos capítulos posteriores.

2.3.2.3 A alocação de espectro

Como neste trabalho estão sendo detalhados métodos eficientes de roteamento fixo-alternativo, o algoritmo de alocação de espectro é dado por sua simplicidade. Dessa maneira, o *First – Fit* é usado como algoritmo de alocação de espectro (YUMER; AKAR; KARASAN, 2014). Nesta heurística, o primeiro conjunto de *slots* que se adequa a uma rota fim-a-fim será usado para acomodar a conexão.

3 HEURÍSTICAS PARA ROTEAMENTO EM EON COM RESTRIÇÕES NA CAMADA FÍSICA

Nesse capítulo, são apresentadas duas heurísticas para o problema de roteamento em redes SLICE para tráfego dinâmico. Elas são uma adaptação do algoritmo BSR para redes ópticas elásticas sob múltiplos formatos de modulação. Como também, cada uma é comparada no nível de quantidade de bloqueios de rede aos métodos tradicionais de roteamento.

3.1 O PROBLEMA RMSA PARA TRÁFEGO DE REDE DINÂMICO

Na rede em operação, quando o tráfego de rede é dinâmico, as requisições de caminhos ópticos chegam à rede de forma aleatória e permanecem seguindo uma distribuição exponencial, além de seus pedidos de banda também serem aleatórios. Dessa maneira, o problema RMSA também se torna dinâmico, na medida em que o plano de controle da rede não possui qualquer conhecimento futuro das requisições de banda que irão ser aplicadas à rede. Além disso, caso não seja possível atender a uma determinada requisição, deve ocorrer um bloqueio à chamada na rede, ou seja, a falta de recursos de rede ou de requerimento de QoT causam o não estabelecimento da conexão entre os pares de nós da rede.

Com o objetivo de reduzir a probabilidade de bloqueio de futuras requisições por banda, os provedores de serviços de transporte procuram fornecer eficientemente os recursos ao longo da operação da rede óptica, de forma a deixar a capacidade aberta para o atendimento de futuras requisições. Perante a isso, várias estratégias foram propostas na literatura para melhorar o desempenho das redes SLICE em termos de probabilidade de bloqueio sob tráfego dinâmico (ZHU et al., 2013) (DURÁN et al., 2012). Em alguns desses estudos, o problema RMSA é dividido em roteamento e alocação de espectro, onde são apresentadas heurísticas para cada um dos problemas individualmente (CHRISTODOULOPOULOS; TOMKOS; VARVARIGOS, 2010). Em outros casos, algoritmos tradicionais em redes WDM foram adaptados para aplicação em redes SLICE (DURÁN et al., 2012).

Na literatura, a classe de roteamento fixo é ainda bastante estudada devido a sua menor complexidade. Basta saber que muitas redes ópticas em operação, ainda hoje, possuem um mecanismo de gerência ainda operando manualmente ou automatizado, mas bastante limitado. Nessa classe de roteamento, algoritmos de menor caminho ou menor salto são usados geralmente para definir uma rota fixa entre cada par origem-destino na rede. Um dos algoritmos mais famosos para o cálculo de menor caminho é o *Dijkstra* (DIJKSTRA, 1959).

A consequência em escolher apenas uma rota entre cada par de nós da rede é limitar a capacidade de atendimento das requisições. Dado que a escolha de uma rota pode ocasionar perda de desempenho nas outras rotas que compartilham ao menos um enlace consigo, a pouca opção na escolha da rota, por esses algoritmos, pode ser determinante para a maneira ineficiente

de roteamento. Logo, como esses algoritmos tradicionais não têm o objetivo de balancear a carga na rede, é possível o surgimento de enlaces congestionados e, assim, a degradação do desempenho no atendimento à demanda das requisições de banda.

Em razão disso, foi desenvolvido um algoritmo cuja preocupação é de manter o balanceamento de carga entre os enlaces na rede óptica, de acordo com a carga esperada em cada enlace da rede. Dessa maneira, recursos fornecidos pela rede óptica são mais bem aproveitados do que quando usados algoritmos tradicionais de roteamento. Tal algoritmo será descrito em detalhes seguir.

3.1.1 O algoritmo *Best Among Shortest Routes - BSR*

Inicialmente proposto para redes WDM, o algoritmo de roteamento BSR foi idealizado para aperfeiçoar o aproveitamento de recursos de rede (DURÃES et al., 2010). Sua primeira abordagem foi o de roteamento fixo, portanto, uma menor complexidade computacional é requerida. O BSR tem como principal característica a de definir um conjunto de rotas que causam um eficiente balanceamento de carga na rede, procurando as soluções dentre as rotas de menor número possível de *hops* (saltos). Isso é feito ao se atribuir aos enlaces custos relacionados a utilização de forma que a escolha das rotas de menor função custo de roteamento evite gargalos de congestionamento nas rotas entre os pares de nós da rede.

Para entender bem o funcionamento do algoritmo BSR, note que cada par origem-destino na rede óptica pode ter mais de uma rota de menor função custo de roteamento, as chamadas rotas candidatas. Assim, dada uma topologia de rede, existe um número grande (M) de soluções para o planejamento das rotas fixas. Nesse caso, o cálculo de todas as combinações de rotas fixas que representam as possíveis soluções encontradas para o planejamento de rotas fixas é dado pela Equação 1 (SANTOS; ASSIS, 2011).

$$M = \prod_{i=1, j=1, i \neq j}^{N, N} RC_{par(i, j)}, \quad (1)$$

tal que RC significa qual o número de rotas de menor função custo de roteamento para o $par(i, j)$. Vale ressaltar que, esse valor cresce exponencialmente com a quantidade de possíveis rotas de menor função custo RC e com a quantidade de número de nós da rede. Por exemplo, mesmo com valores modestos como $RC_{par(i, j)} = 3 \forall_{i, j}$ e $N = 10$, a quantidade de possíveis soluções é $M = 3^{10 \times 9}$, que é um número consideravelmente grande para se tentar exaustivamente. A ideia do BSR é de gerar um processo iterativo que conduza a averiguar boas soluções de roteamento e escolha a melhor delas.

Abaixo, encontram-se algumas notações utilizadas na apresentação do algoritmo BSR:

- L - Conjunto de todos os enlaces da rede;
- l - Um enlace que pertence a L ;

- $c(l)_i$ - Custo do enlace l na iteração i ;
- $u(l)_i$ - Utilização do enlace l obtida na iteração i ;
- T - Número máximo de iterações do BSR.

De forma mais detalhada, o algoritmo procede da seguinte forma: a cada iteração da simulação, o custo de cada enlace sofre uma alteração proporcional à taxa de aprendizagem a . Sendo assim, $(1 - a)$ é a taxa de mudança do custo do enlace a cada iteração i , em decorrência da utilização estimada para o enlace. A Equação 2 mostra o ajuste no custo do enlace em função do seu custo no início da iteração e de sua utilização esperada em decorrência do roteamento gerado:

$$c(l)_{i+1} = ac(l)_i + (1 - a)u(l)_i, \quad (2)$$

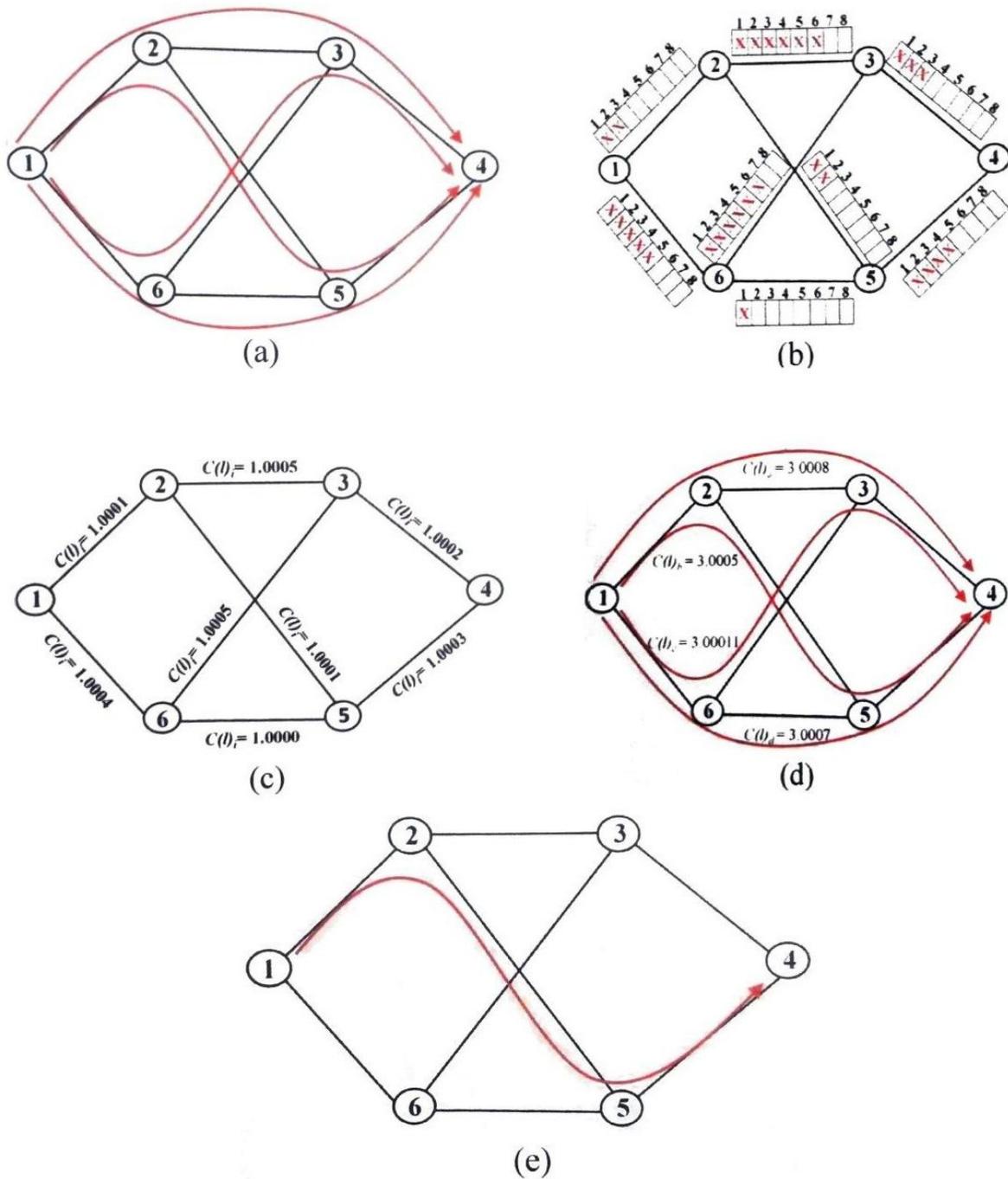
onde, $1 \leq i \leq T$.

Com os custos $c(l)_{i+1}$ em mãos, um algoritmo de menor custo entre os enlaces, como o algoritmo *Dijkstra* que calcula o menor caminho simples entre qualquer par de nós da rede ou o de YEN (YEN, 1970) para encontrar as k rotas de menor custo, pode ser usado para encontrar a solução do roteamento S_{i+1} , na iteração $i + 1$.

De maneira mais sucinta, a Figura 10 detalha o funcionamento do algoritmo BSR para uma requisição entre o nó 1 e o nó 4. Na Figura 10 *a*, são mostrados os possíveis caminhos de menor custo entre o par de nós em questão. Dentre esses caminhos, o algoritmo BSR escolhe qual caminho mais curto, baseado no custo dos caminhos candidatos. Esse procedimento é realizado para todos os pares de nós da rede. A Figura 10 *b* apresenta a ocupação espectral na rede óptica, baseada na escolha de roteamento realizada anteriormente. Nesse exemplo, cada enlace da rede possui 8 *slots* de frequência. Aqueles que foram utilizados pelo roteamento sofrem um aumento na estimativa de sua utilização $u(l)$. O BSR baseia-se na ocupação espectral para definir a ocupação dos enlaces. Para isso, a Equação 2 é utilizada para calcular os novos valores $c(l)_{i+1}$ que serão utilizados no próximo roteamento do algoritmo, tal qual é mostrado na Figura 10 *c*. Dessa forma, com os custos de cada enlace já definidos, um caminho entre o nó 1 e o nó 4 é novamente (também entre todos os outros pares de nós da rede) escolhido pelo algoritmo de roteamento, como exemplificado na Figura 10 *d*. Para esse exemplo, o algoritmo de roteamento escolheu a rota 1-2-5-4 devido ao menor custo calculado, cujo valor é de 3,0005, como mostrado na Figura 10 *e*.

A solução final do algoritmo BSR somente é dada após as T iterações. Ela será a solução cujo valor de bloqueio de requisição na rede óptica será o menor dentre os valores simulados para cada S_i . A Figura 11 detalha melhor o fluxograma do algoritmo de roteamento BSR.

Figura 10 – Algoritmo BSR (a) quatro possíveis caminhos entre o nó origem 1 e destino 4, (b) estimativa da utilização de cada enlace da rede após o roteamento da iteração i , (c) valor do custo $c(l)_i$ para cada enlace da rede (d) custo para cada caminho (e) caminho escolhido de menor custo.

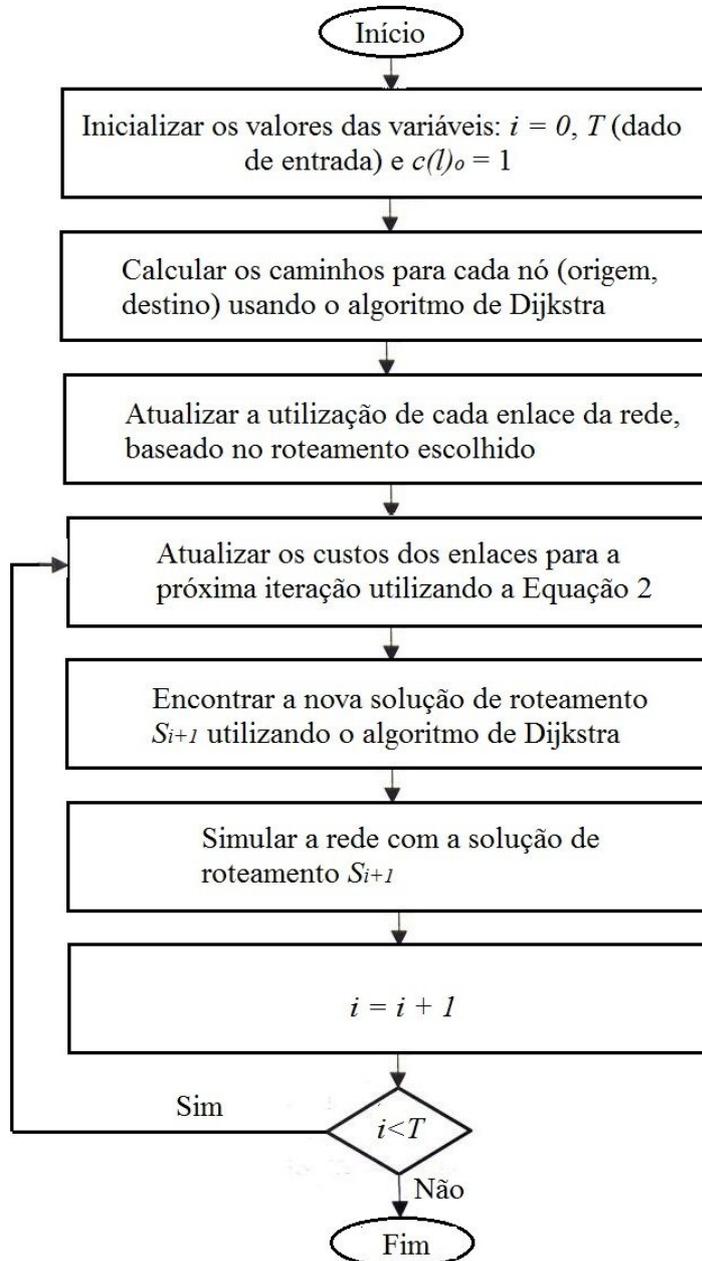


Fonte: adaptado de (SANTOS, 2015).

3.1.2 Alguns Algoritmos de Roteamento Fixo-Alternativo

Baseado na abordagem de roteamento fixo-alternativo, diversos trabalhos foram propostos na literatura para encontrar um conjunto de rotas com menor função custo entre um par origem destino da rede. Esses trabalhos utilizam como base o algoritmo de roteamento

Figura 11 – Fluxograma do algoritmo BSR.



Fonte: adaptado de (SANTOS, 2015).

Yen, cujo resultado será dado pelos k -menores caminhos entre dois nós da rede (YEN, 1970). Vale ressaltar que, no caso de mais uma rota ser necessária como solução do algoritmo de roteamento, o algoritmo *Dijkstra* não é utilizado.

Para tráfego estático, o algoritmo BLSA é um exemplo que utiliza a abordagem fixo-alternativa (WANG; CAO; PAN, 2011). Sua principal função é reduzir a quantidade de *slots* de frequência alocados na rede (WANG; CAO; PAN, 2011). Em outro trabalho, o algoritmo de roteamento calcula os menores caminhos na rede, com base na quantidade de *slots* contínuos disponíveis (JINNO et al., 2010). Já o algoritmo MCP-ZBA apresenta uma política de alocação de espectro baseada em zonas e um mecanismo de roteamento de caminhos alternativos (SCARAFICCI; FONSECA, 2014).

O algoritmo *Yen - BSR* foi proposto para realizar o roteamento de espectro de forma alternativa com o objetivo de reduzir a probabilidade de bloqueio da rede. Inicialmente, ele foi idealizado para resolver o problema de roteamento de comprimentos de onda em redes WDM (SANTOS; ALMEIDA; ASSIS, 2014). Posteriormente, esse algoritmo foi proposto para arquitetura de rede SLICE (SANTOS et al., 2012). Ele utiliza a estrutura do algoritmo BSR, descrito anteriormente, sendo originalmente proposto para o roteamento fixo. No entanto, há uma adaptação desse algoritmo para o roteamento fixo-alternativo, que possibilita o roteamento por k -caminhos mais curtos e reduz a probabilidade de bloqueio de requisições quando comparado a outros algoritmos (SANTOS, 2015).

Todavia, no algoritmo YEN-BSR as requisições na rede são feitas por número de *slots*, por ser uma forma mais simples de desenvolvimento. Neste trabalho, as requisições são feitas por taxa de bit, pois, dessa forma é como funciona em prática a requisição em uma rede óptica. Assim, através da taxa de bit e do formato de modulação é calculado o número de *slots* de frequência para a requisição e é averiguada se uma rota pode ser estabelecida ou não, em cada demanda.

Com isso, nesse trabalho são apresentadas duas heurísticas para o problema RMSA com roteamento fixo-alternativo baseado na política de balanceamento de carga do BSR. Indo mais além, também essas heurísticas consideram restrições de camada física para determinar qual requisição será atendida pela rede, algo que não se encontra na literatura.

3.2 UMA HEURÍSTICA PARA O PROBLEMA RMSA BASEADA NUMA ESTIMATIVA DA OCUPAÇÃO ESPECTRAL DA REDE COM BSR

A primeira heurística proposta, neste trabalho, é chamada de *BSR Offline*, pois é executada durante a fase de planejamento da rede. Dessa forma, para conseguir uma boa distribuição do tráfego na rede e assim melhorar o uso da banda da rede, ela tenta estimar a ocupação do espectro da rede em função do tráfego demandado para cada par origem-destino. Pela simplicidade dos cálculos e pelo fato da rede não está em operação, o processamento dessa heurística é realizado num curto espaço de tempo.

Através de um conjunto de requisições em taxa de bit, o algoritmo processa a alocação de espectro de todas as conexões que satisfaçam requisitos da camada de rede e da camada física. Para cada pedido de conexão aceito, todos os enlaces da rede que conectam os nós a partir da origem até o nó destino têm uma penalidade acrescida. Dessa maneira, uma presunção de como a rede óptica irá se comportar com um conjunto de requisições de diferentes larguras de banda é realizada.

Até então, a rede óptica não está em operação e, de forma presumida, um custo de utilização de cada enlace da rede óptica foi atribuído, baseado no algoritmo BSR. O que ocorre a partir disso é ativação da rede óptica utilizando como algoritmo de *YEN* para o roteamento fixo-alternativo e a partir dos custos de cada enlace, ordenar qual rota é prioritária e quais rotas são alternativas para uma requisição entre um par de nó origem-destino da rede.

De forma mais formal, tal qual como mostrado na Figura 12, o algoritmo da seguinte heurística proposta é iterativo, portanto ele começa na primeira iteração ($IT = 1$) e termina na iteração máxima ($IT = IT_{MAX}$). Todos os pares origem-destino da rede são enumerados, por esse motivo para o pré-processamento será assumido o primeiro par origem-destino ($SD = 1$) para o último par da rede ($SD = SD_{MAX}$). Para cada par da rede, são computadas k -rotas de menor função custo, utilizando o algoritmo de roteamento Yen. O conjunto \mathfrak{R} é formado pelas k rotas computadas pelo Yen. Todas as taxas de bit quem podem ser requisitadas são enumeradas, portanto para o pré-processamento será assumida a primeira taxa de bit ($B = 1$) até a última taxa de bit ($B = B_{MAX}$). Um conjunto de rotas \mathfrak{R}' será assumido como uma cópia de \mathfrak{R} . A prioridade será atribuída ao formato de modulação de maior eficiência espectral. Com isso, quando possível, menos *slots* de frequência serão alocados para cada requisição. Diante disso, todos os formatos de modulação são enumerados para a simulação. Em outras palavras, será assumido o primeiro formato de modulação ($M = M_{MAX}$) até o último formato de modulação ($M = M_{MIN}$). O número de *slots* de frequência S será calculado em funções da taxa de bit B e um formato de modulação M , utilizando a Equação 13 do Capítulo 2. A $OSNR_{TH}$ será calculada para o formato de modulação M e taxa de bit B . As rotas em \mathfrak{R}' com QoT aceitável para o formato de modulação M terão suas ocupações espectrais atualizadas e, logo após, serão removidas de \mathfrak{R}' . O processo de tentativa de transmissão atendendo QoT é repetido para rotas que não foram atendidas pelos recursos físicos da rede, com um formato de modulação $M - 1$. Nessa fase, formatos de modulação menos eficientes a nível espectral são atribuídos a essas rotas. Caso, todos os formatos de modulação tenham sido testados, a ocupação espectral nos enlaces dessa rota por essa taxa de bit é ignorada. Depois, o processo é repetido para a próxima taxa de bit. A iteração termina quando todos os pares origem-destino da rede são visitados. Antes disso, todos os enlaces da rede têm sua ocupação espectral atualizada, conforme está descrito na Equação 2.

Por fim, uma simulação é realizada com a rede em funcionamento. Baseado nos custos de todos os enlaces, o algoritmo de roteamento adotado faz uso da abordagem fixo-alternativo, e a partir daí, o número de requisições atendidas e requisições bloqueadas formam a probabilidade

funcionamento, sofrendo chamadas ao longo do tempo na forma de taxa de bit. Como mencionado anteriormente, as chegadas assumidas são Poissonianas e o tempo de permanência da conexão é exponencialmente distribuído.

Tabela 2 – Parâmetros de Simulação

Parâmetro	Valor	Significado
r	10^7	Número de Requisições
d	50 Km	Distância entre amplificadores
g	10 dB	Ganho de cada amplificador
ν	193.4 THz	Frequência Central do Grid
B_{Ref}	12.5 GHz	Comprimento da Banda de Referência
B_{Slot}	12.5 GHz	Largura de Banda do Slot de Frequência
$F_0(NF)$	3.162 (5 dB)	Figura de Ruído do Amplificador
h	6.63×10^{-34}	Constante de Planck em $\text{m}_2\text{kg/s}$
P_{in}	0 dBm	Potência óptica de entrada
$OSNR_{in}$	30 dB	OSNR de entrada
$Slots_n$	128	Número de slots de frequência

Fonte: O autor, 2018.

Outros parâmetros de simulação podem ser encontrados na Tabela 2. Como o BSR *Offline* requer um processamento prévio para definir os custos dos enlaces durante a simulação da rede, como padrão seu processamento foi realizado conforme os parâmetros da Tabela 3.

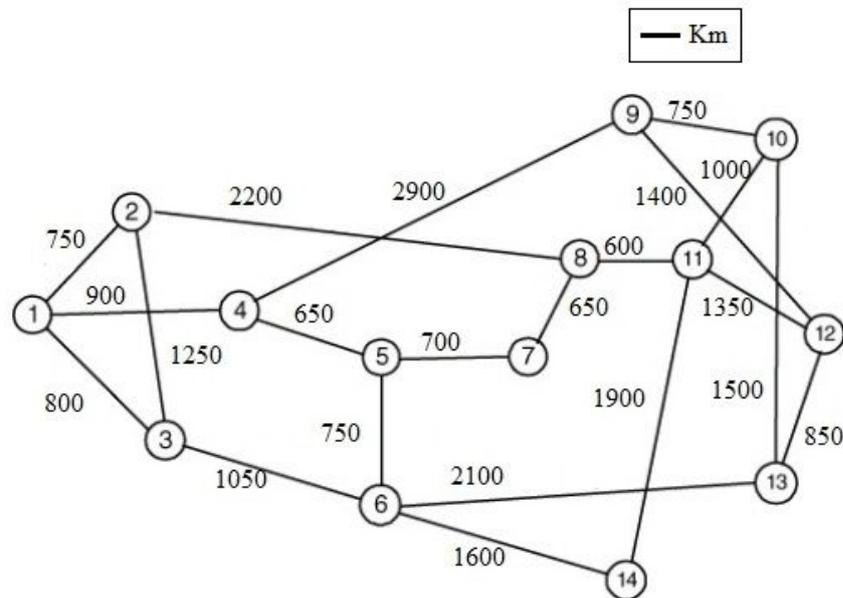
Tabela 3 – Parâmetros para a simulação prévia da rede

Parâmetro	Valor	Significado
IT_{MAX}	1000	Número de Iterações
SD	Aleatório	Par de nós origem-destino

Fonte: O autor, 2018.

A quantidade de *slots* de frequência dado um formato de modulação M e taxa de bit B é calculada e verificada se está disponível para alocação, de acordo com o algoritmo de alocação de espectro *First – Fit*, em todos os enlaces que compõe a rota selecionada pelo algoritmo de roteamento. Vale ressaltar que, por simplificação, cada enlace tem o mesmo número de *slots* de frequência. Além disso, também é verificado se a $OSNR_{OUT}$ da rota selecionada para o estabelecimento da conexão, é menor ou igual a $OSNR_{TH}$ em função de M e B . Caso tanto a restrição de continuidade de espectro quanto QoT não sejam respeitadas, o pedido de conexão é bloqueado.

Para garantir a qualidade de transmissão da conexão, para cada par origem-destino da rede é calculada a distância baseada no menor número de nós entre cada par origem-destino da

Figura 13 – Topologia *NSFNET* usada nas simulações.

Fonte: O autor, 2018.

rede. A máxima distância dessas menores distâncias encontradas é considerada a maior distância de conexão da rede e, a partir daí, é calculada a taxa de bit para cada formato de modulação.

Para cada requisição entre um par origem-destino da rede, é selecionada aleatoriamente uma taxa de bit dentro de um conjunto de taxas de bit. Esse conjunto é formado pelas taxas de bit suportadas pelos formatos de modulação QAM 64, QAM 32 ou QAM16 para garantir a qualidade de transmissão.

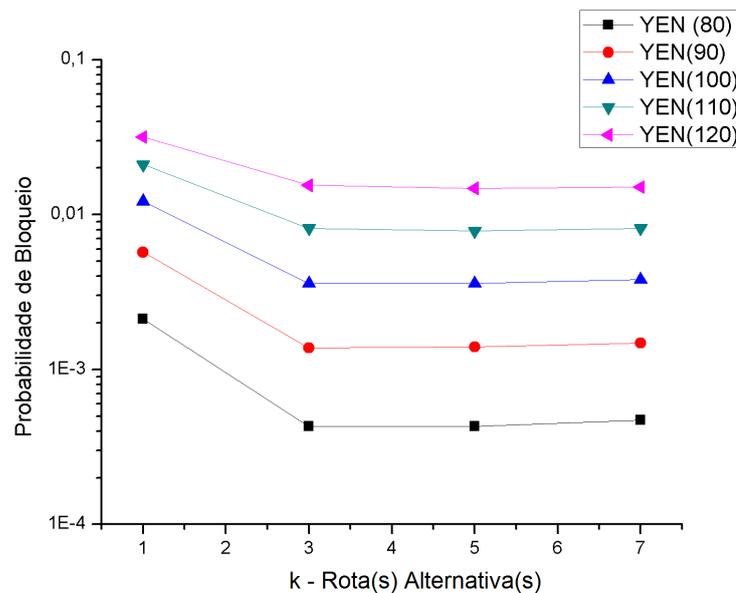
A primeira simulação foi feita na topologia *NSFNet* (YE et al., 2003). Essa topologia de rede é mostrada na Figura 13. Como pode ser observado, a maior distância considerada nessa topologia está na rota partindo do nó 1, passando pelo nó 4 e pelo nó 9, para então chegar ao nó 12. Essa rota tem comprimento de 5200 Km. Portanto, dado o formato de modulação QAM 64, para se garantir a QoS é utilizada uma taxa de bit próxima de 150 Gbps. Da mesma forma, para os formatos de modulação QAM 32 e QAM 16, as taxas de bit 250 Gbps e 400 Gbps foram escolhidas para serem moduladas respeitando as restrições da camada física, respectivamente. Perante isso, tal qual mostrado na Tabela 4, uma quantidade de *slots* de frequência é calculada para cada formato de modulação e taxa de bit.

A Figura 14 mostra os resultados da *Probabilidade de Bloqueio - PB* em função do número de rotas alternativas (k) iguais a 1, 3, 5 e 7, na escala logarítmica, quando o algoritmo de roteamento YEN não faz uso da política de balanceamento de carga do BSR. Assim, para cada par de nó origem-destino da rede é considerada pelo YEN, a rota que possuir menos nós através do seu caminho. Além disso, para cada número de rotas alternativas é simulado 5 pontos

Tabela 4 – Número de *Slots* para cada requisição na topologia *NSFNet*

Formato de Modulação	Taxa de bit	Número de <i>Slots</i>
QAM 64	400Gbps	6
	250Gbps	4
	150Gbps	2
QAM 32	400Gbps	7
	250Gbps	4
	150Gbps	3
QAM 16	400Gbps	8
	250Gbps	5
	150Gbps	3

Fonte: O autor, 2018.

Figura 14 – PB para a Topologia *NSFNET*, com o algoritmo YEN.

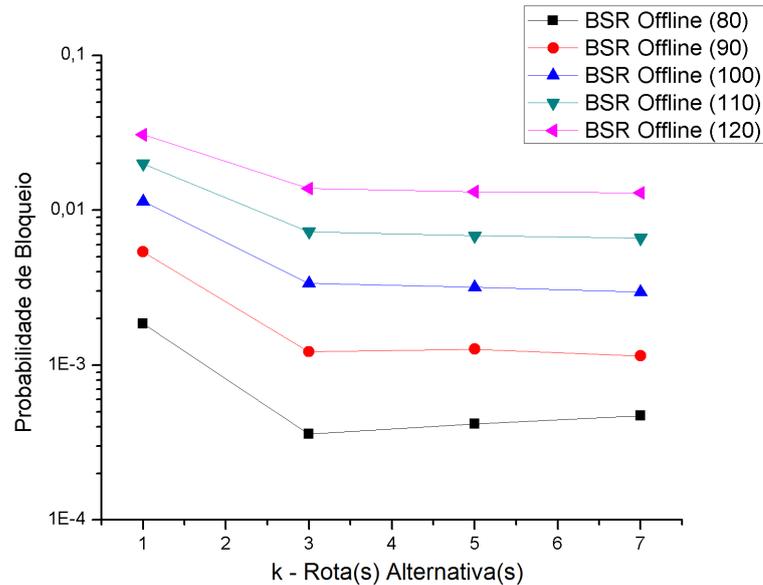
Fonte: O autor, 2018.

referentes a carga na rede em *Erlang*, tal que a carga máxima se encontre uma PB menor que 5%.

Já a Figura 15 mostra os resultados da PB em função do número de rotas alternativas (k), como no caso anterior. Mas agora, o algoritmo de roteamento YEN utiliza os custos dos enlaces definidos pelo processamento do BSR *Offline*, para realizar o roteamento de cada par origem-destino da rede óptica.

Como pode ser notado, houve pouca diferença nos resultados. Mesmo assim, com a heurística BSR *Offline* em definir o custo de cada enlace da rede, baseado na sua utilização,

Figura 15 – PB para a Topologia *NSFNET*, com o algoritmo YEN e BSR *Offline*.



Fonte: O autor, 2018.

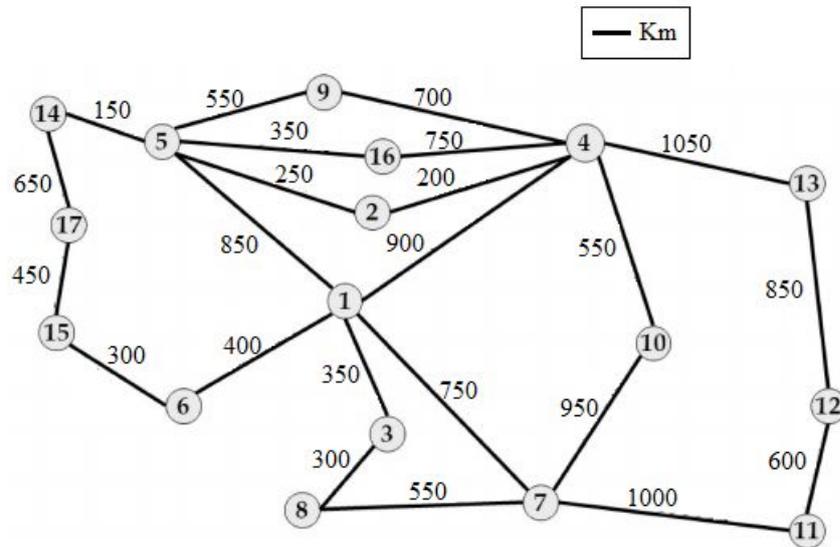
resultou em alguma melhoria. Vale ressaltar que, para $k = 1$, existe apenas uma única rota disponível para o roteamento do pedido de conexão. Por isso, sua PB é maior que os demais valores de k , onde há mais rotas alternativas para o estabelecimento da conexão, e assim, menor chance de haver um bloqueio na chamada.

Além disso, o conjunto de uma única rota ($k = 1$) para cada par origem-destino definida junto com a política BSR *Offline* obteve uma pequena melhoria em relação ao YEN, onde a rota é determinada pelo menor número de nós através do seu caminho.

Para os valores de $k > 1$, há mais rotas alternativas disponíveis para o estabelecimento da conexão. Porém, não houve diminuição significativa no número de bloqueios de rede ao aumentar o valor de k . Isso significa que, o valor de $k = 3$, ou três rotas alternativas para cada conexão, é suficiente para atender a demanda de pedidos de conexão realizados na simulação.

Outra simulação foi feita na topologia *Pacific Bell* (BASTOS-FILHO et al., 2011). Essa topologia de rede é mostrada na Figura 16. As taxas de bit 300 *Gbps*, 600 *Gbps* e 900 *Gbps* para serem aleatoriamente selecionadas como requisição entre um par origem-destino da rede. Esses valores de taxas de bit foram calculados como no caso anterior, levando em conta que a maior rota considerada está entre o caminho do nó 15, depois nó 6, nó 1, nó 4, nó 13 e finalmente o nó 12. Tal qual mostrado na Tabela 5, uma quantidade de *slots* de frequência é calculada para cada formato de modulação e taxa de bit.

A Figura 17 mostra os resultados da probabilidade de bloqueio em função do número de rotas alternativas (k), quando o algoritmo de roteamento YEN não possui auxílio da heurística

Figura 16 – Topologia *Pacific Bell* usada nas simulações.

Fonte: O autor, 2018.

Tabela 5 – Número de *Slots* para cada requisição na *Pacific Bell*

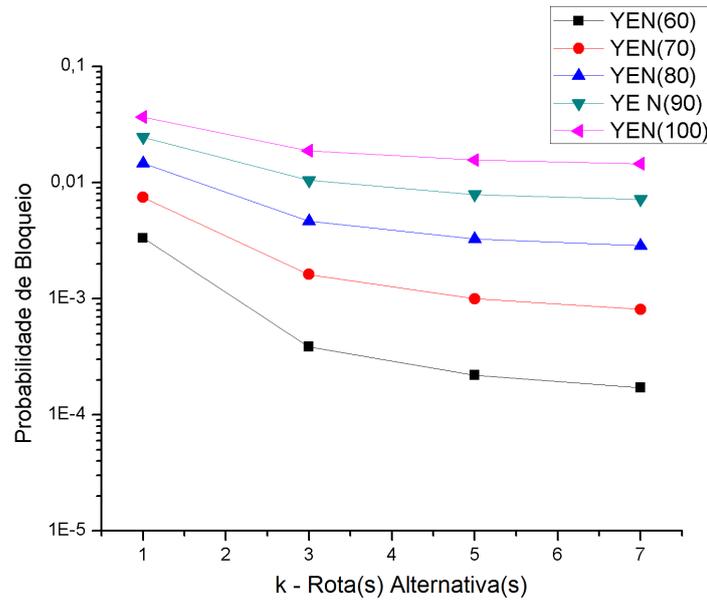
Formato de Modulação	Taxa de bit	Número de Slots
QAM 64	600Gbps	8
	400Gbps	6
	200Gbps	3
QAM 32	600Gbps	10
	400Gbps	7
	150Gbps	4
QAM 16	600Gbps	12
	400Gbps	8
	200Gbps	4

Fonte: O autor, 2018.

BSR *Offline* para definir os custos dos enlaces.

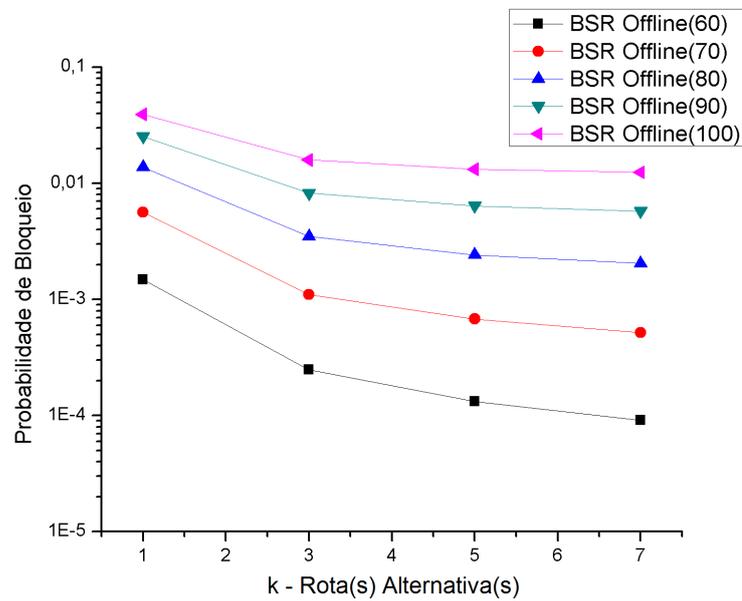
Já a Figura 18 mostra os resultados da PB em função do número de rotas alternativas (k), com o algoritmo de roteamento YEN utilizando os custos dos enlaces definidos pelo processamento do BSR *Offline* para realizar o roteamento de cada par origem-destino da rede óptica. Diferentemente do caso da topologia *NSFNet*, houve uma melhoria notória quando o BSR *Offline* é aplicado como definidor de custos dos enlaces. Além disso, para esse caso, aumentando o valor de k , ou seja, quanto mais rotas alternativas estiverem incluídas como candidatas ao estabelecimento de uma requisição de conexão, menor o número de bloqueios realizado pela rede óptica.

Figura 17 – PB para a Topologia *Pacific Bell*, com o algoritmo YEN.



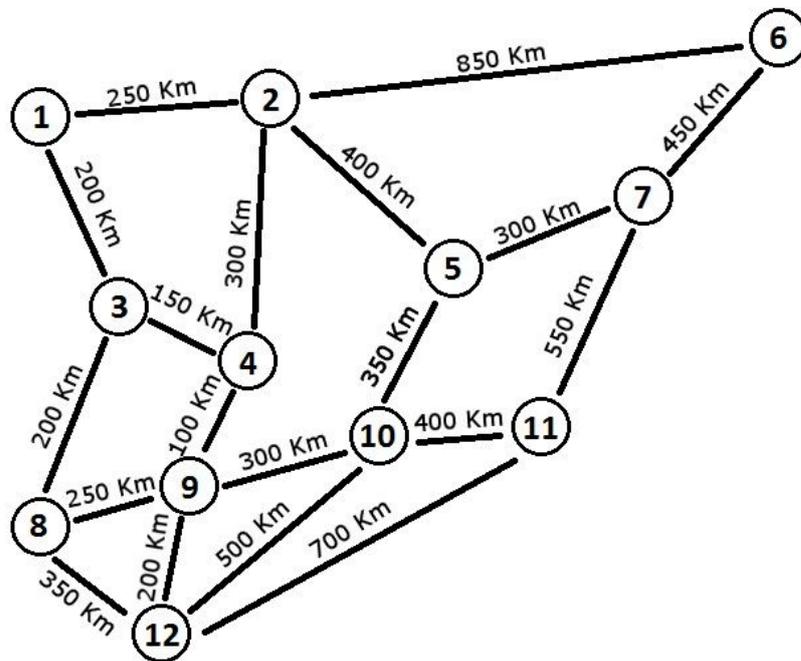
Fonte: O autor, 2018.

Figura 18 – PB para a Topologia *Pacific Bell*, com o algoritmo YEN e BSR *Offline*.



Fonte: O autor, 2018.

Mais uma simulação foi feita na topologia *Finland* (BASTOS-FILHO et al., 2013). Essa topologia de rede é mostrada na Figura 19. As taxa de bit 400 Gbps, 600 Gbps e 1000 Gbps foram selecionadas para o conjunto de taxas de bit requisitadas, considerando que a maior rota

Figura 19 – Topologia *Finland* usada nas simulações.

Fonte: O autor, 2018.

está no caminho entre o nó 6, nó 7, nó 11 e nó 12. Tal qual mostrado na Tabela 6 uma quantidade de *slots* de frequência requerida para cada formato de modulação e taxa de bit é apresentada.

Tabela 6 – Número de *Slots* para cada requisição na *Finland*

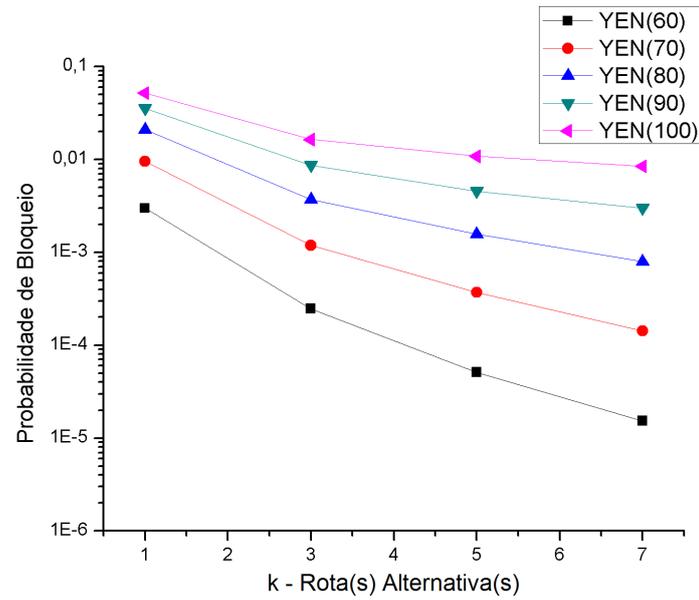
Formato de Modulação	Taxa de bit	Número de <i>Slots</i>
QAM 64	1000Gbps	14
	600Gbps	8
	400Gbps	5
QAM 32	1000Gbps	16
	600Gbps	10
	400Gbps	6
QAM 16	1000Gbps	20
	600Gbps	12
	400Gbps	7

Fonte: O autor, 2018.

A Figura 20 mostra os resultados da probabilidade de bloqueio do número de rotas alternativas (k), quando o algoritmo de roteamento YEN não possui auxílio da heurística BSR *Offline* para definir os custos dos enlaces.

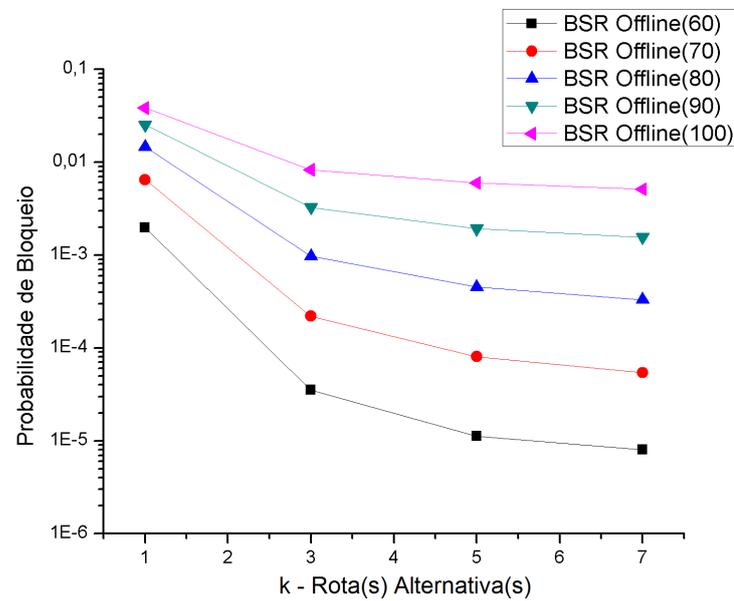
Da mesma forma que na topologia *Pacific Bell*, na Figura 21 também nota-se uma melhoria quando o BSR *Offline* é utilizado.

Figura 20 – PB para a Topologia *Finland*, com o algoritmo YEN.



Fonte: O autor, 2018.

Figura 21 – PB para a Topologia *Finland*, com o algoritmo YEN e BSR *Offline*.



Fonte: O autor, 2018.

Diante das simulações até então apresentadas, o algoritmo de roteamento baseado estimativa da ocupação da rede dado o algoritmo BSR em balancear a carga na rede, mostrou uma melhor eficácia quando comparado ao tradicional algoritmo de roteamento para tráfego dinâmico

YEN. Isso se deve ao fato dos custos de cada enlace serem baseados na utilização e, a partir de então, ser aplicado o critério de balanceamento de carga. Com isso, a rede óptica consegue atender mais chamadas de conexões, e como consequência, reduzir o número de bloqueio de requisições.

3.3 UMA METODOLOGIA PARA O PROBLEMA RMSA BASEADA NA OCUPAÇÃO ESPECTRAL REAL DA REDE COM BSR

Uma das vantagens da metodologia anterior, como algoritmo de roteamento da rede óptica, é sua rápida solução para o problema RMSA. Isso se deve a pouca necessidade de recursos computacionais para definir o custo de cada enlace da rede. Basta notar que, para definição dos custos dos enlaces o BSR *Offline* necessita de 1.000 iterações sob a rede sem estar em funcionamento, ou seja, sem requisições. Assim, quando a rede estiver em execução com um número alto de requisições, o algoritmo de roteamento baseia-se nesses custos para realizar sua abordagem fixo-alternativo.

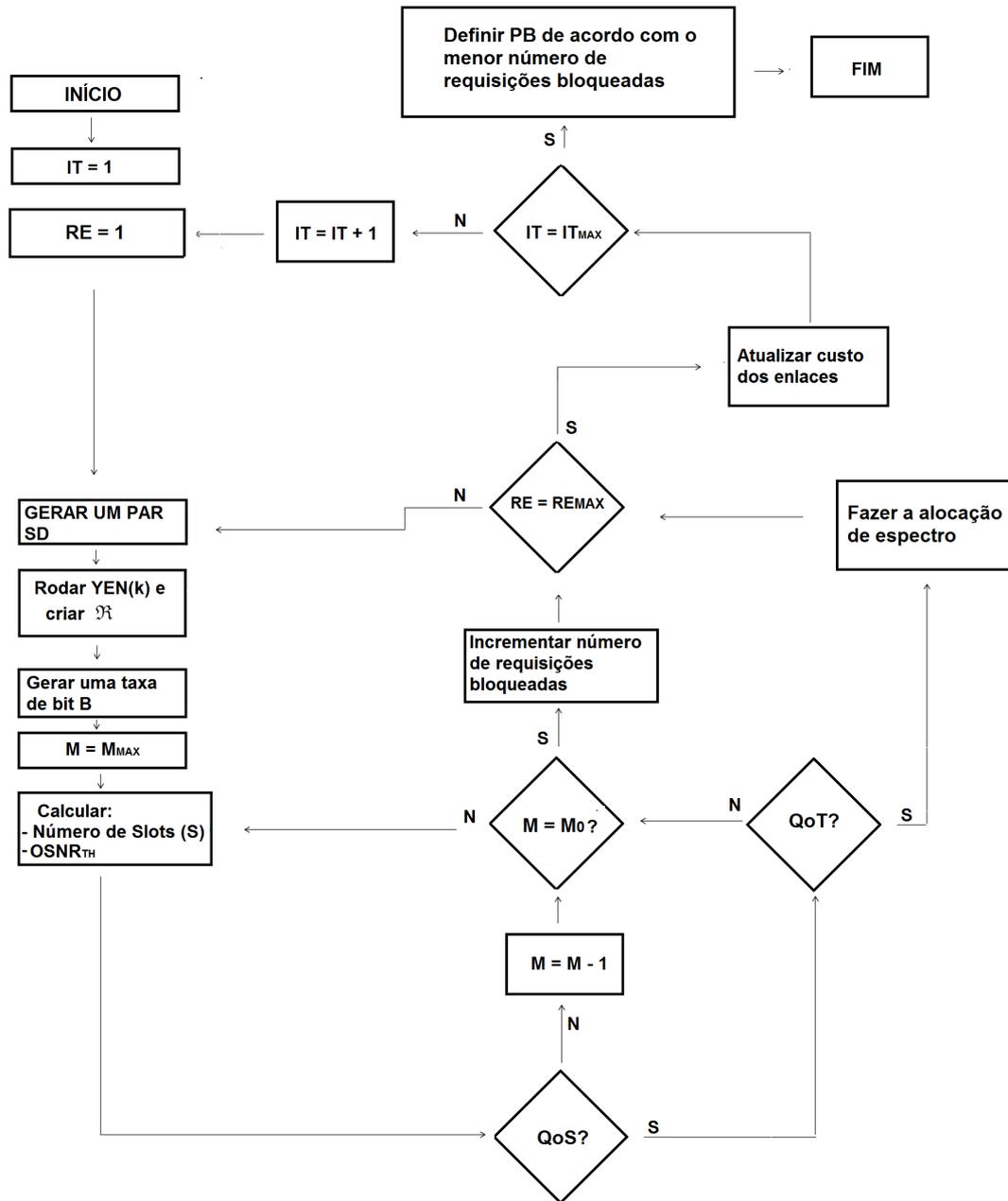
Entretanto, por se tratar de uma presunção da ocupação espectral na rede, algumas informações sobre o estado da rede em execução não são conhecidas, como por exemplo, se uma determinada requisição de bits entre um par de nós da rede foi realmente estabelecida.

Dessa forma, faz-se necessário a criação de outra heurística para o problema RMSA, agora baseada na ocupação real de espectro na rede óptica. Diante disso, a nova heurística requer uma maior demanda computacional em relação à anterior, pois o cálculo de ocupação de cada enlace óptico é realizado durante o funcionamento da rede, ou seja, diante de um número alto de requisições de conexão. Por esse motivo, essa metodologia é chamada de BSR *Online*.

O fluxograma da Figura 22 ilustra as operações desse heurística BSR proposta. Basicamente, o BSR *Online* simula uma rede óptica em funcionamento. Mas de uma maneira formal, observe que o algoritmo proposto é iterativo, terminando quando um número máximo de iterações ($IT = IT_{MAX}$) é atingido. O algoritmo funciona da seguinte maneira: em cada etapa do processo iterativo, RE refere-se a requisição que varia até um número máximo de requisições (RE_{MAX}). Para cada requisição, um par de nó origem-destino (SD) na topologia da rede é gerado aleatoriamente. O primeiro par de origem-destino referido por $SD = 1$ e o último por $SD = SD_{MAX} = N(N - 1)$, tal N é o número de nós na rede. Para cada par de nós SD , as rotas menos custosas são calculadas usando o algoritmo de roteamento Yen e armazenadas em \mathfrak{R} .

Neste momento, as possíveis taxas de bit solicitadas entre esse par de nós são levadas em conta. Essas taxas de bit são representadas por B , onde $B = 1$ é a primeira taxa de bit solicitada e $B = B_{MAX}$ a última. As taxas de bit entre os pares de nós são escolhidas aleatoriamente de um conjunto pré-definido taxas de bit.

Posteriormente, como M está representando o formato de modulação usado, o formato

Figura 22 – Fluxograma da heurística BSR *Online*

Fonte: O autor, 2018.

de modulação com maior eficiência espectral é indicado por M_{MAX} . Vale ressaltar que, $M = 1$ é o formato de modulação de menor eficiência espectral. A prioridade do algoritmo de modulação proposto é para os formatos de modulação mais eficientes espectrais, já que novamente, o formato de modulação de eficiência espectral mais alto requer menos largura de banda de rede a ser transmitida. Isto leva a menos ocupação de rede, e assim, mais disponibilidade para atender futuras requisições.

Para cada taxa de bit, o algoritmo precisa determinar em qual das k -rotas podem ser usadas para transmissão usando um formato de modulação específico, o que permite o cálculo do número de *slots* usados por cada requisição. Dessa forma, para cada formato de modulação, o número de *slots* de frequência (s) necessário para atender a solicitação é calculado usando a regra de cálculo apresentada no capítulo anterior. Lembrando que, essa informação é passada para o algoritmo de alocação de espectro para a atribuição espectral conforme a taxa de bit e formato de modulação utilizados.

Em seguida, a ocupação é determinada pelo número de *slots* de frequência alocados para a taxa de bit B e o formato de modulação M . O processo se repete para um formato de modulação espectralmente menos eficiente e para as rotas que falharam nos requisitos de alocação de espectro (QoS) e camada física (QoT). Quando todos os formatos de modulação são testados e nenhum deles pode suportar a comunicação entre o SD dado um B , um pedido de conexão bloqueada é incrementado.

Caso dado um pedido de conexão entre os nós SD exista *slots* disponíveis para alocação entre os enlaces do par origem-destino, respeitando os critérios de continuidade e contiguidade, como também o critério de QoT ao longo dos enlaces, o algoritmo de alocação de espectro fica encarregado de realizar a alocação de acordo com o número de *slots* calculados. Caso RE atinja o número máximo de requisições (RE_{MAX}) o processo é interrompido. Então, verifica-se o número de iterações IT atinge o número máximo de iterações IT_{MAX} . Todo o processo é interrompido se IT for IT_{MAX} . Caso contrário, o processo se repete até atingir o número máximo de iterações.

Por fim, a probabilidade de bloqueio é definida como a menor encontrada em todas as iterações do BSR *Online*.

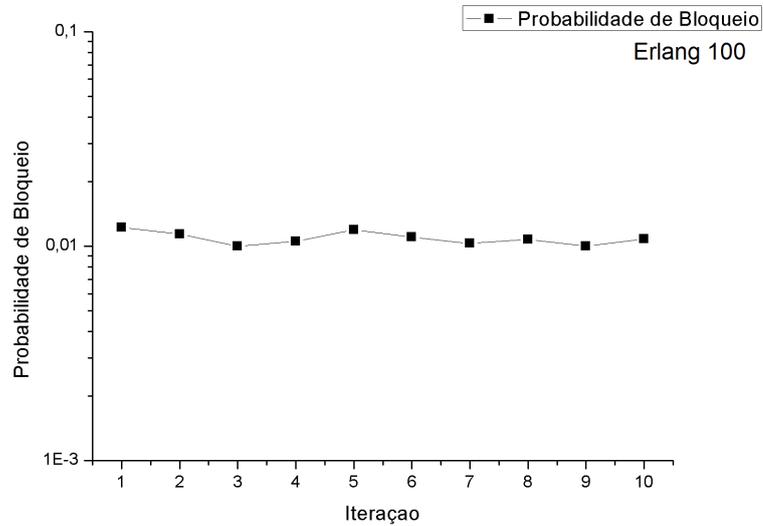
3.3.1 Discussões e resultados numéricos em diferentes topologias

Com o mesmo objetivo da heurística anterior, a simulação dessa nova heurística foi realizada para demonstrar sua efetividade quando comparada ao tradicional algoritmo de roteamento YEN, e também, ao BSR *Offline* em reduzir os bloqueios de chamada na rede óptica. E como mesmo caso que o anterior, os parâmetros de simulação também são os mesmos da Tabela 2.

Porém, nesse caso, tal qual é mostrado na Tabela 7, são encontrados parâmetros usados na simulação dessa heurística. Além disso, aqui é mostrado o gráfico do número de bloqueios para o número máximo de iterações para cada topologia. Esse gráfico só leva em conta, o resultado do número de bloqueio para o caso em que a carga (*Erlang*) está na metade entre a carga máxima e a mínima, para uma específica simulação.

Portanto, para simulação completa dessa heurística são necessárias 10 iterações para encontrar a menor PB de bloqueio entre elas. Cada iteração simula o funcionamento da rede

Figura 23 – PB para a Topologia *NSFNET* com o algoritmo YEN e BSR *Online*, por iteração.



Fonte: O autor, 2018.

através de 10^7 requisições de chamadas de conexão. Na heurística BSR *Offline* são necessárias 1000 iterações para definição dos custos dos enlaces da rede e uma simulação de rede em funcionamento com 10^7 requisições para se obter a PB.

Mesmo com mais complexidade computacional, essa heurística conseguiu obter melhores resultados em reduzir a PB em diferentes topologias quando comparada a heurística BSR *Offline*, como será demonstrado a seguir.

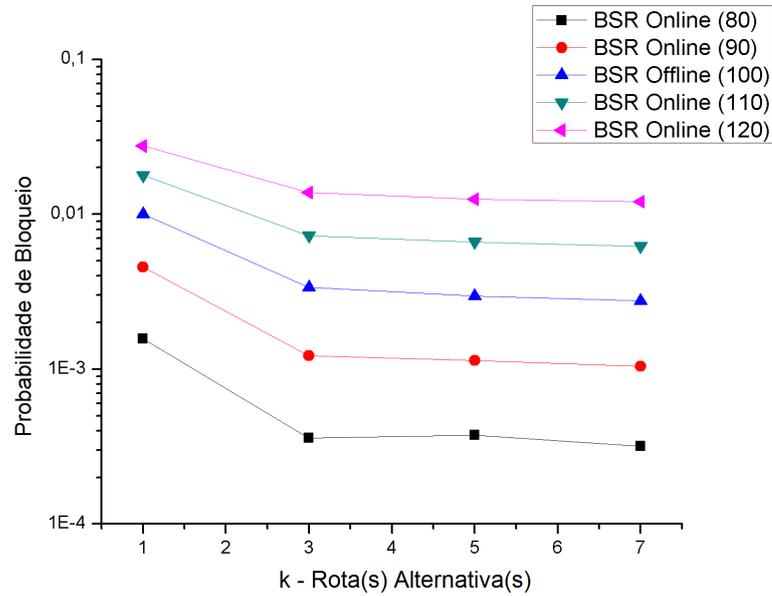
Tabela 7 – Parâmetros para a simulação BSR *Online*

Parâmetro	Valor	Significado
IT_{MAX}	10	Número de Iterações
SD	Aleatório	Par de nós origem-destino

Fonte: O autor, 2018.

A Figura 23 mostra a PB da simulação na topologia *NSFNet* durante 10 iterações. Vale ressaltar que, só está apresentado o valor de bloqueio para uma carga de requisições média entre a carga máxima e a carga mínima. Dessa maneira, o menor valor probabilidade de bloqueio em 10 iterações é considerado a solução final do algoritmo. Como pode ser notado, na Figura 23, não houve uma diferença notável da primeira iteração sobre as demais iterações em reduzir a PB feita pela rede óptica. Além de que, à medida o BSR *Online* sofra mais iterações não significa necessariamente que o número de PB reduza a cada iteração, pois cada distribuição diferente da ocupação espectral na rede pode não ser a melhor em reduzir a PB.

Figura 24 – PB para a Topologia *NSFNet*, com o algoritmo YEN e BSR *Online*.



Fonte: O autor, 2018.

Isso resulta em pouca variação da PB para os valores de $k > 1$, como mostra a Figura 24. Vale lembrar que, essa pouca variação também foi encontrada na simulação da heurística BSR *Offline*. Mesmo assim, aqui foi encontrada uma diminuição no número de bloqueios feitos pela rede, em relação ao caso que o BSR *Offline* é definidor dos custos dos enlaces da rede.

Além disso, na primeira iteração todos os custos dos enlaces estão iguais a 1. Dessa forma, a PB encontrada na primeira iteração equivale a do algoritmo YEN sem auxílio de alguma heurística BSR, como foi mostrada anteriormente. Portanto, o desempenho dessa heurística em reduzir o número de bloqueios feito pela rede está ligado ao menor valor de PB encontrado em 10 iterações.

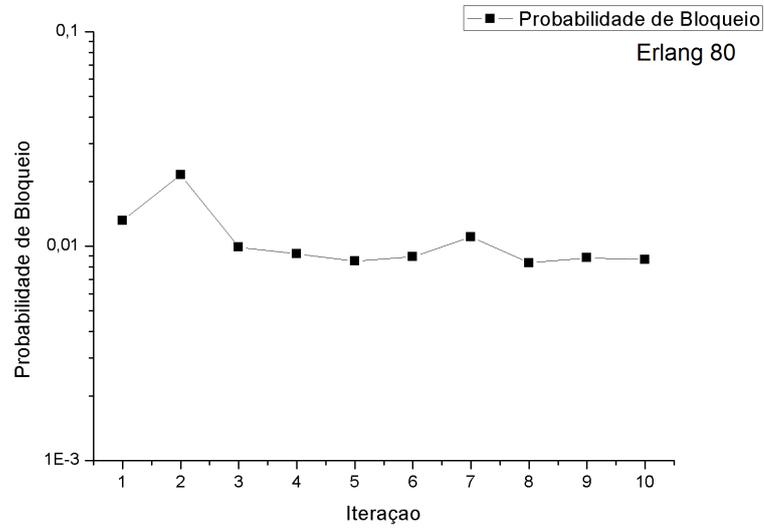
Da mesma forma, para a topologia *Pacific Bell*, não houve uma variação no número da PB da primeira iteração em relação a menor PB encontrada em 10 iterações, como mostra a Figura 25.

Mesmo assim, foi encontrada uma melhora na redução da quantidade de PB feita pela rede, em relação ao caso da simulação com o BSR *Offline*, como mostra a Figura 26.

Porém, o mesmo não acontece na simulação com a topologia *Finland*. Nesse caso, há uma variação notável da PB na primeira iteração e da menor PB encontrada em 10 iterações, como mostrada na Figura 27.

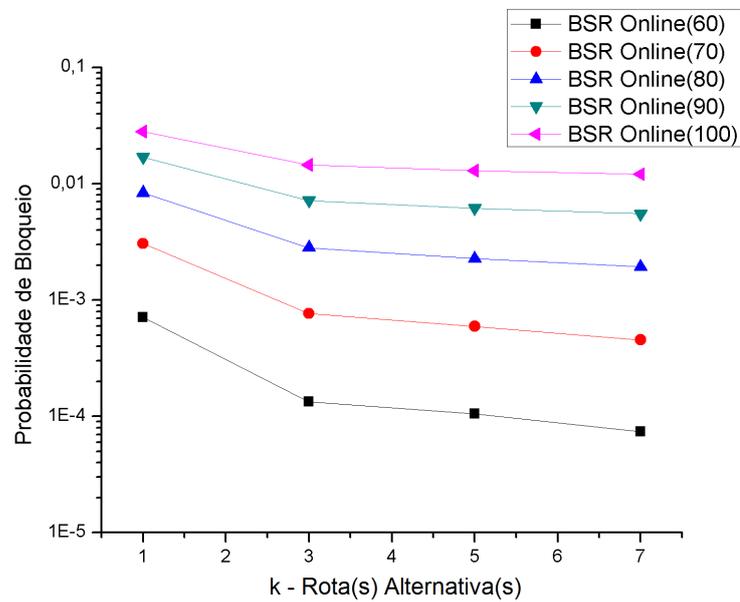
Sendo assim, a heurística BSR *Online* junto com o algoritmo de roteamento YEN conseguem uma melhora em reduzir o número de PB em relação ao caso quando o YEN é usado

Figura 25 – PB para a Topologia *Pacific Bell* com o algoritmo YEN e BSR *Online*, por iteração.



Fonte: O autor, 2018.

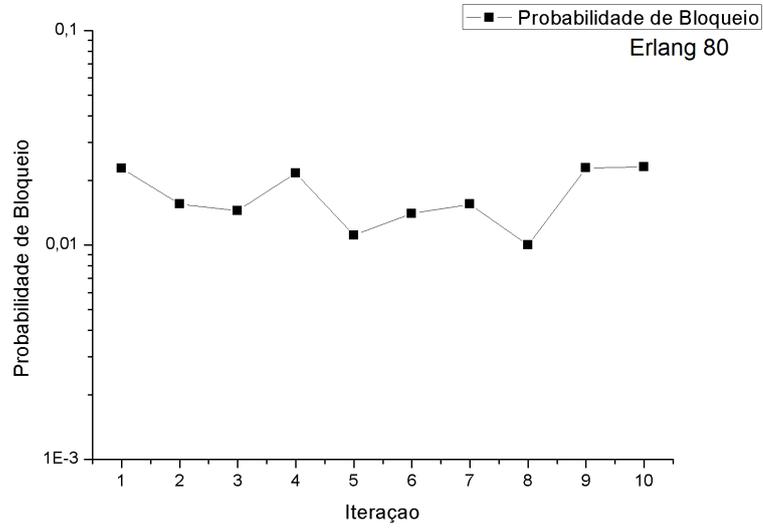
Figura 26 – PB para a topologia *Pacific Bell* com o algoritmo YEN e BSR *Online*.



Fonte: O autor, 2018.

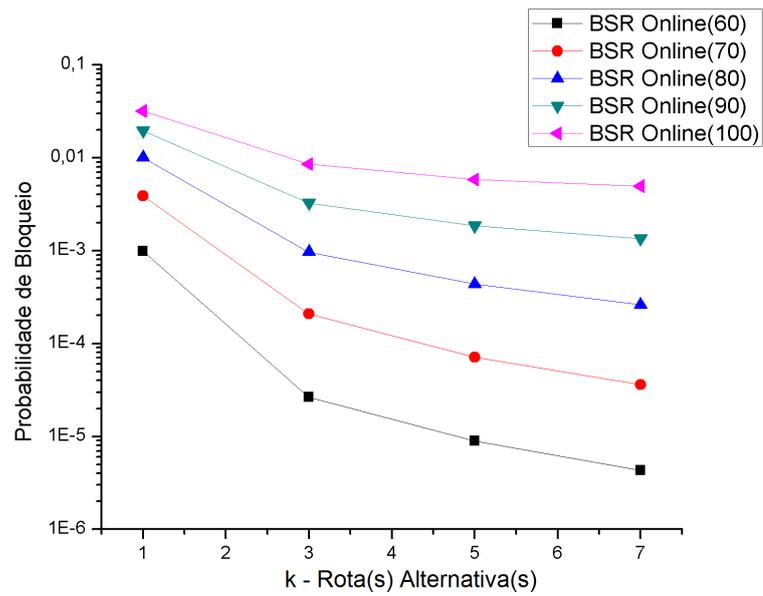
com o BSR *Offline*, como mostra a Figura 28

Figura 27 – PB para a Topologia *Finland* com o algoritmo YEN e BSR *Online*, por iteração.



Fonte: O autor, 2018.

Figura 28 – Probabilidades de bloqueio para a topologia *Finland*.



Fonte: O autor, 2018.

4 ALGORITMOS INTELIGENTES PARA ROTEAMENTO EM EON COM RESTRIÇÕES NA CAMADA FÍSICA

Como mencionado, o problema RMSA é da classe NP-Difícil. Sendo assim, nesse capítulo, é revisado o significado disso, como também, apresentado dois algoritmos de busca inteligente para o problema RMSA com restrições na camada física. Além do mais, os resultados de simulação são comparados aos apresentados no capítulo anterior.

4.1 UMA ABORDAGEM BASEADA EM UM ALGORITMO GENÉTICO PARA O PROBLEMA RMSA

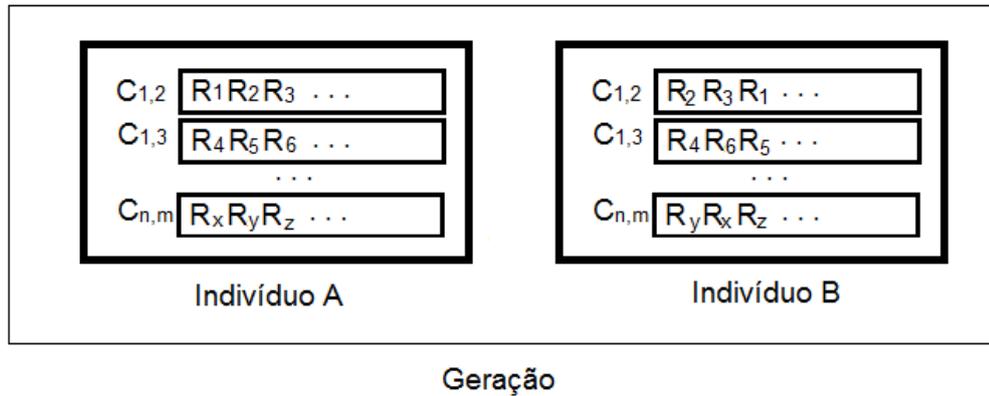
Algoritmos Genéticos são métodos de busca baseados em princípios de evolução natural de seres vivos. Foram introduzidos por Holland (HOLLAND, 1975) e popularizados por Goldberg (GOLDBERG, 1989). De acordo com essa metodologia, através de um processo evolutivo que inclui cruzamento e mutação de genes, são selecionados os indivíduos mais aptos a sobreviverem em um meio. Considerando que indivíduos são formados por cromossomos e esses são formados por genes. Logo, os indivíduos nesse caso representam soluções para o problema, de tal modo que o processo evolutivo faz com que eles sejam cruzados, e assim, sejam gerados novos indivíduos, além de haver uma probabilidade de mutação em um dos seus genes. Ao final de cada geração é selecionado o melhor indivíduo, isto é, a melhor solução encontrada para o problema.

Transferindo esse pensamento para o problema RMSA, cada gene é uma rota entre um par de nó origem-destino de uma rede óptica. Sendo que, o cromossomo é formado pelos genes que representam todas as possíveis rotas entre um nó origem e nó destino da rede. O indivíduo é então uma solução para o problema RMSA, pois é formado pelas rotas que devem ser priorizadas pelo algoritmo de roteamento baseadas na sua ordenação em cada cromossomo. Além disso, a alocação de espectro é realizada pelo algoritmo *First - Fit*, como nas heurísticas do capítulo anterior.

Tal qual é mostrado na Figura 29, uma geração é formada por um conjunto de indivíduos. Cada indivíduo é formado por um número de cromossomos dado pelo produto de m e n , em que m é o número de nós da rede e n é igual a $m - 1$. Dessa forma, cada cromossomo representa o conjunto de rotas entre cada par origem-destino da rede. Como pode ser observado na figura, cada indivíduo difere um do outro pela ordenação das rotas, que nesse caso define qual a priorização deve ser feita pelo algoritmo de roteamento, com a metodologia fixo-alternativa. Vale ressaltar que, o tamanho de cada cromossomo pode variar, mas quando a política fixo-alternativa utiliza k rotas alternativas, o número máximo de rotas em cada cromossomo é igual a k .

Em outras palavras, através do processo evolutivo do algoritmo genético, é selecionado um indivíduo o qual contém o conjunto de rotas ordenadas que resultam na menor probabilidade de bloqueio de chamadas na rede.

Figura 29 – Uma geração formada por dois indivíduos, numa rede óptica com m nós.



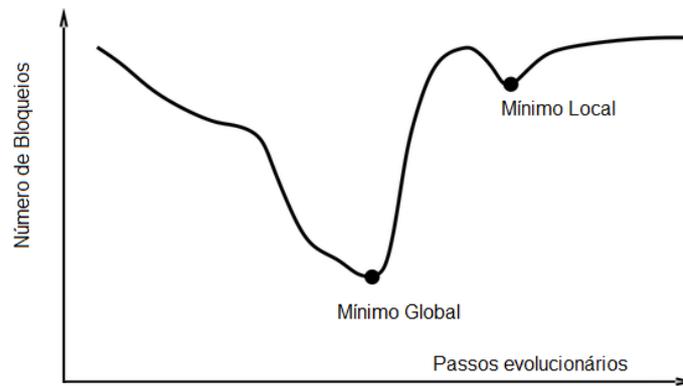
Fonte: O autor, 2018.

Dessa forma, o algoritmo genético é uma metodologia que não possui qualquer informação sobre o problema a ser otimizado. Cabe ao projetista do algoritmo, então, saber como ele deve ser adequado para um problema específico, que nesse caso, é o RMSA. Além disso, várias abordagens para o problema RMSA podem ser implementadas tendo como base o algoritmo genético.

Embora aparentemente simples, por ser em parte um algoritmo genérico para todos os problemas, existe uma dificuldade ao escolher um algoritmo de otimização para solucionar um problema. Para uma melhor explicação, considere o problema como uma função de um conjunto de entradas em uma saída que é a solução. Existem vários pontos de mínimos nesta função (pontos que minimizam o valor da função), mas muitos não representam o menor valor que a função pode atingir, conforme ilustrado na Figura 30. No caso do RMSA, considerando apenas a parte do roteamento, cada ponto é um conjunto de rotas, associados com um valor de quantidade de bloqueios. Tais pontos são denominados mínimos locais, uma vez que a função nestes pontos atingem valores menores do que na vizinhança destes pontos. Entretanto, a melhor solução para este problema está no ponto em que a função possui valor mínimo, o mínimo global (GALVÃO; VALENÇA, 1999).

Por isso, em um tempo hábil, não é possível por um algoritmo de otimização, como o algoritmo genético, fornecer a solução ótima para o problema. O que é feito então pelos algoritmos de otimização é encontrar a solução mais próxima da ideal para o problema. Essa limitação de resposta computacional aqui encontrada é similar à apresentada no capítulo anterior através de heurística para o problema RMSA. Perante a isso, os resultados dessa metodologia serão comparados aos resultados encontrados anteriormente.

Figura 30 – Os valores locais e globais para uma função.



Fonte: O autor, 2018.

4.1.1 A adaptação do Algoritmo Genético para o problema RMSA

O primeiro passo de um Algoritmo Genético (*Genetic Algorithm - GA*) típico é a geração de uma população inicial, que é formada por um conjunto aleatório de cromossomos que representam em conjunto possíveis soluções do problema a ser resolvido.

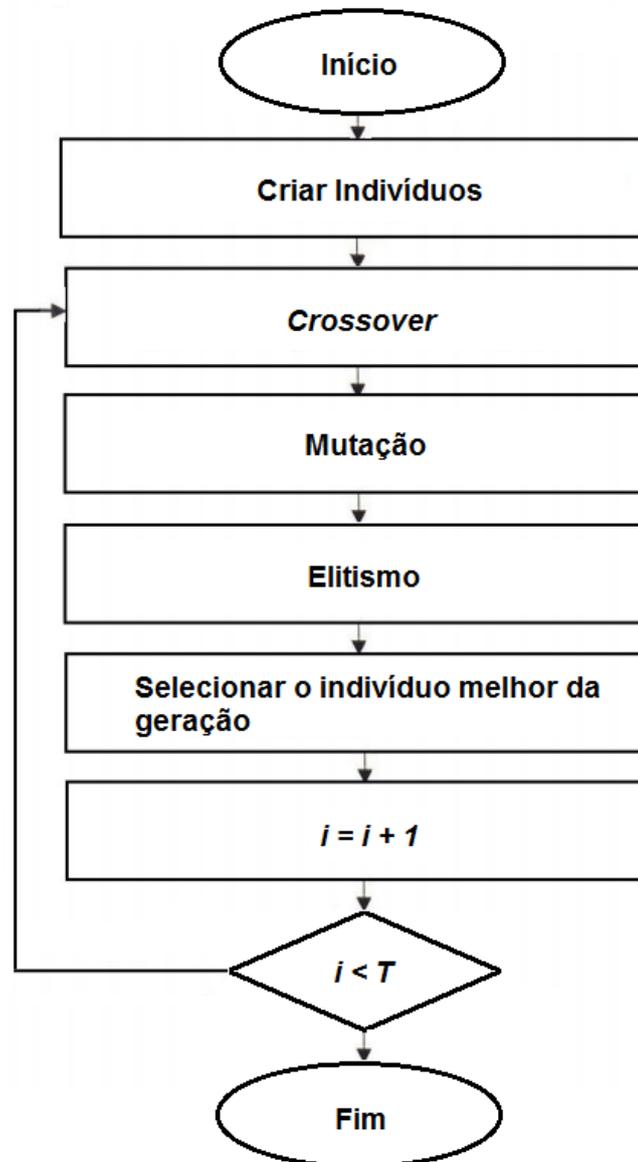
Dessa forma, através do processo evolutivo do Algoritmo Genético, será selecionado o indivíduo que contém o melhor conjunto de rotas para uma simulação da rede óptica em funcionamento. Para o problema RMSA, o melhor indivíduo é aquele que fornece o menor número de bloqueio para os pedidos de conexões na rede óptica.

A informação do indivíduo selecionado pelo Algoritmo Genético é através do seu processo evolutivo. Durante esse processo, os indivíduos mais aptos são aqueles cuja priorização de rotas resultam no menor número de bloqueios da rede.

De acordo com o GA, o processo evolutivo ocorre através de algumas etapas. A primeira delas trata-se do *crossover*, que é a fase em que os indivíduos irão formar novos indivíduos através de trocas de genes entre eles. Dada uma $Taxa_{CROSS}$ em porcentagem, uma parte do indivíduo A e do indivíduo B irão formar um novo indivíduo C. Mais especificamente, o indivíduo C é formado pelos cromossomos de A segundo a $Taxa_{CROSS}$ e pelos cromossomos de B segundo $1 - Taxa_{CROSS}$. Dessa forma, após essa fase, o número de indivíduos da geração terá seu valor duplicado. A Figura 32 detalha melhor essa etapa. Nessa Figura, o novo indivíduo recebeu cromossomos de A e B. Conforme a $Taxa_{CROSS}$, os cromossomos do indivíduo A são predominantes no novo indivíduo. Enquanto que apenas o último cromossomo do novo indivíduo é proveniente do indivíduo B.

Após a fase de *crossover*, na fase de mutação, pode ocorrer uma mudança na posição do gene dentro do cromossomo de algum indivíduo da geração. Dada uma $Taxa_{MUT}$ no intervalo entre 0 e 1, para cada gene de cada indivíduo da geração, é sorteado um número decimal dentro

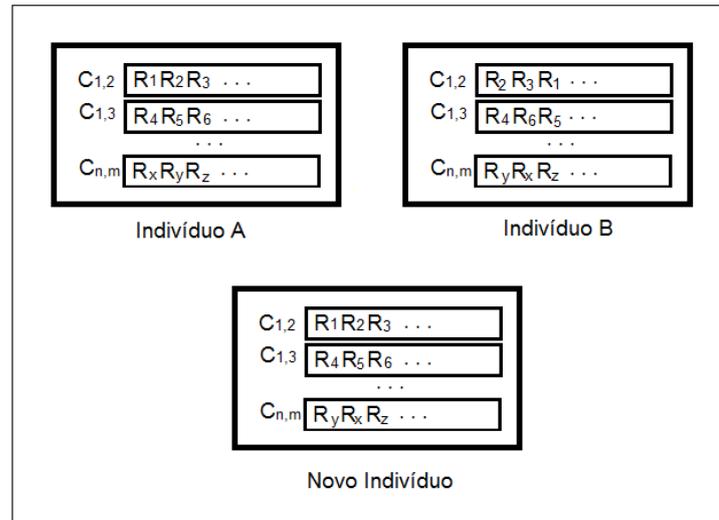
Figura 31 – Fluxograma do Algoritmo Genético.



Fonte: O autor, 2018.

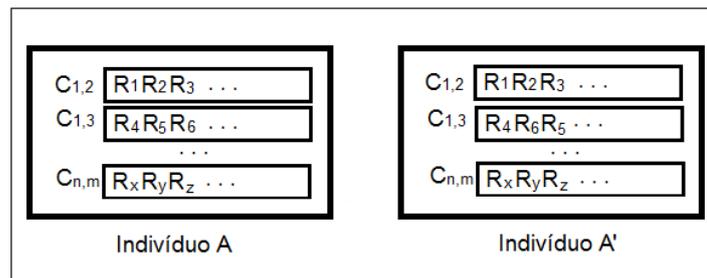
do mesmo intervalo. Caso o número sorteado seja menor que a $Taxa_{MUT}$, sua posição dentro do cromossomo será trocada com o gene posterior. Caso esse gene seja o último dentro do cromossomo, sua posição é trocada com o primeiro gene do cromossomo. A Figura 33 descreve a etapa de mutação do GA. Nesse caso, após essa etapa, o cromossomo referente ao conjunto de rotas entre o nó 1 e 3 foi alterado, conseqüentemente, a ordem foi alterada. Desse modo, a rota 6 é mais priorizada pelo algoritmo de roteamento em detrimento da rota 5.

Após a fase de mutação, o processo evolucionário entra na fase de elitismo. Nessa fase, é selecionado um conjunto com os melhores indivíduos dessa geração, de acordo com uma

Figura 32 – A etapa de *crossover* do GA.

Fonte: O autor, 2018.

Figura 33 – A etapa de mutação do GA.



Fonte: O autor, 2018.

$Taxa_{ELI}$ em porcentagem. O que significa para o problema RMSA é que são selecionados os indivíduos que resultaram nos menores números de bloqueios de rede. Além disso, são selecionados $1 - Taxa_{ELI}$ indivíduos aleatórios da geração. Após essa fase, o número de indivíduos da geração é igual ao número inicial de indivíduos.

Feito isso, o processo evolutivo do Algoritmo Genético é repetido até um valor conhecido e o indivíduo com mais aptidão é o selecionado pelo algoritmo. Nesse caso, o indivíduo que resulta em menores bloqueios na rede em operação é o escolhido.

A Figura 31 mostra um fluxograma de funcionamento do Algoritmo Genético, onde i é o índice de cada geração e T o número máximo de gerações do algoritmo.

4.1.2 Discussões e resultados numéricos em diferentes topologias

Similar às simulações apresentadas no capítulo anterior, a simulação desse novo método que busca solucionar o problema RMSA é realizada para demonstrar sua efetividade quando comparada ao tradicional algoritmo de roteamento Yen, e também, aos algoritmos BSRs apresentados anteriormente.

Da mesma forma que antes, aqui é mostrado o gráfico do número de bloqueios para o número de iterações para cada topologia. Para isso, a simulação desse novo método ocorre em duas etapas. A primeira delas é a etapa em si do processo evolutivo do algoritmo genético. O resultado dessa etapa é um indivíduo que representa o conjunto de uma ou mais rotas para todos os pares nó-destino da rede óptica. Lembrando que, as rotas para cada par origem-destino é ordenada conforme a preferência dada pelo algoritmo de roteamento baseado na abordagem fixo-alternativa.

Além disso, também é mostrado um gráfico da convergência do processo evolucionário para cada topologia. Esse processo é executado até a iteração máxima e é usado para selecionar o indivíduo mais apto para o problema RMSA. Vale ressaltar que, para fins de aumento de desempenho, só foi levada em conta o resultado do número de bloqueio para o caso em que a carga (*Erlang*) está na metade entre a carga máxima e a mínima, para uma específica simulação. Os parâmetros de execução do algoritmo genético são encontrados na Tabela 8. Os parâmetros de simulação são os mesmos das simulações do capítulo anterior.

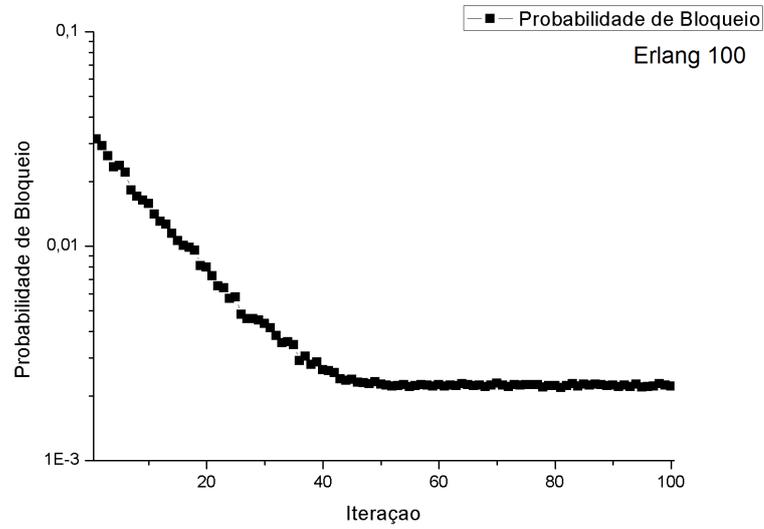
Tabela 8 – Parâmetros para a execução do Algoritmo Genético

Parâmetro	Valor	Significado
IT_{MAX}	100	Número de Iterações
$Tamanho_{POP}$	50	Número de Indivíduos
$Taxa_{CROSS}$	0.6	Taxa de cruzamento nos Indivíduos
$Taxa_{MUT}$	0.05	Taxa de mutação nos Indivíduos
$Taxa_{ELI}$	0.5	Taxa do número de Indivíduos na fase elitismo

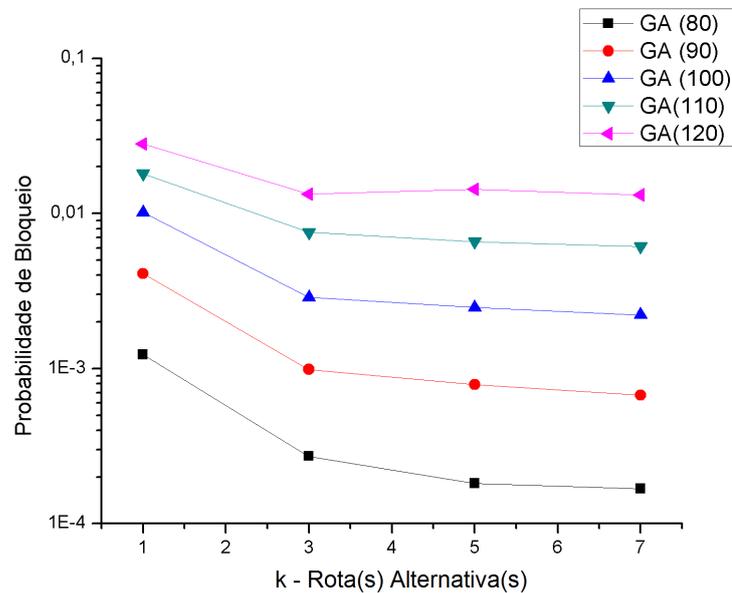
Fonte: O autor, 2018.

O processo evolutivo ocorre de maneira iterativa até a iteração máxima (IT_{MAX}) que é 100. O gráfico de convergência para a topologia *NSFNET* é mostrado na Figura 34. Diferentemente do capítulo anterior, o gráfico de convergência aqui tende ser uma curva decrescente, já que à medida que as iterações são executadas menores são os valores de PB encontradas. Em outras palavras, isso mostra que o número de bloqueios na rede tende a convergir para um mínimo local.

Conforme é mostrado na Figura 35, o nível de convergência encontrado pelo processo evolutivo do GA resulta num bom desempenho em reduzir a quantidade de bloqueio na

Figura 34 – Convergência do GA para a topologia *NSFNET*

Fonte: O autor, 2018.

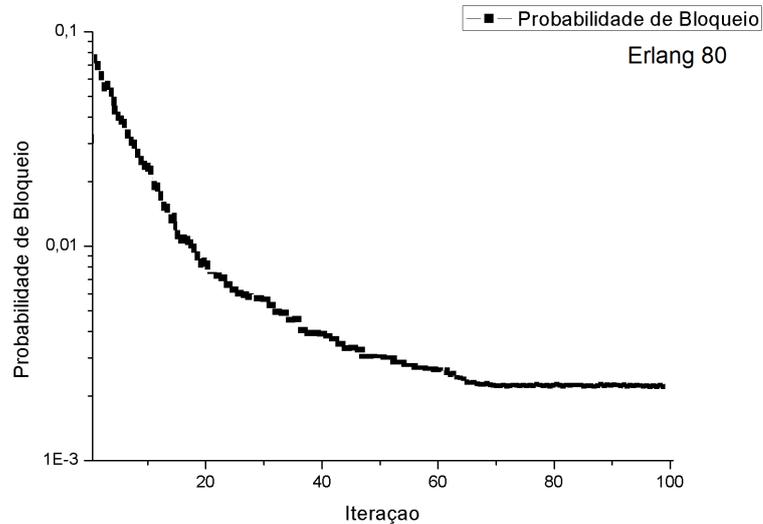
Figura 35 – Probabilidades de Bloqueio para a Topologia *NSFNET*

Fonte: O autor, 2018.

topologia *NSFNET*, quando seus resultados são comparados aos das heurísticas apresentadas anteriormente.

A mesma conclusão não pode ser feita para o GA simulado junto com a topologia *PacificBell*. Mesmo com um bom nível de convergência mostrado na Figura 36, na primeira

Figura 36 – Convergência do GA para a topologia *Pacific Bell*



Fonte: O autor, 2018.

iteração o valor de bloqueio é muito alto e a simulação converge para uma PB similar a que foi encontrada com a metodologia BSR *Online*, mostrada no capítulo anterior.

Dessa forma, o gráfico de PB para a topologia *PacificBell*, mostrado na Figura 37, mostra que não há melhoria significativa nos resultados quando comparada aos resultados encontrados pela metodologia BSR *Online*, nessa mesma topologia.

Seguindo o mesmo raciocínio, agora na topologia *Finland*, na Figura 38, pode ser visto que não houve uma grande convergência como mostrado nos casos anteriores.

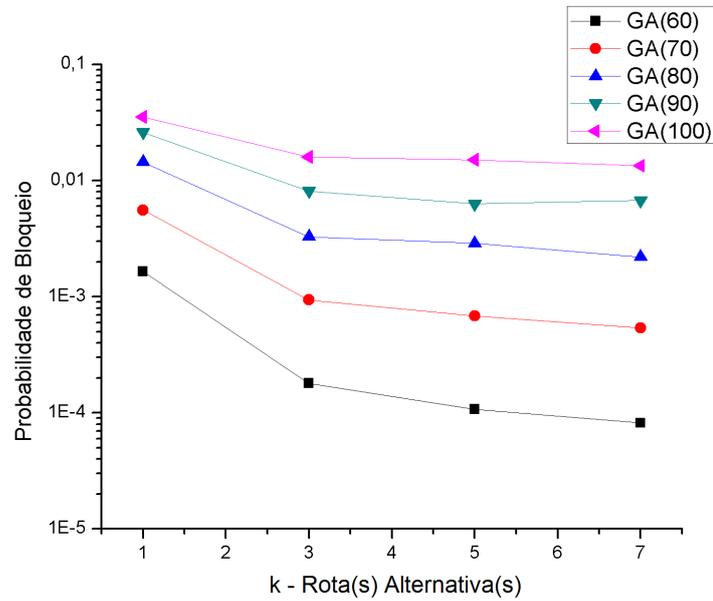
Dessa forma, como mostrado na Figura 39, a simulação do GA com a topologia resulta em piores resultados da PB quando comparados aos resultados encontrados pela metodologia BSR *Online*, nessa mesma topologia.

Portanto, o GA resultou em um bom desempenho em reduzir a PB em relação ao BSR para a topologia *NSFNET*. Enquanto que para as demais topologias, o GA não conseguiu o mesmo desempenho.

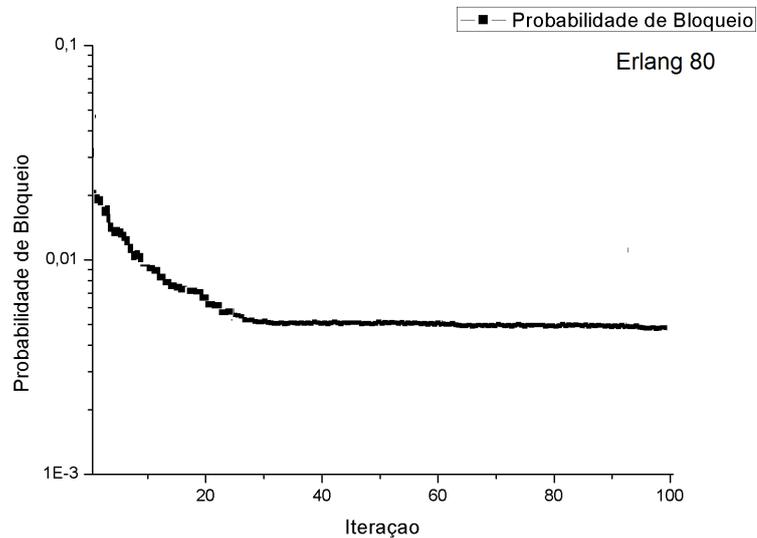
4.2 UM ALGORITMO DE BUSCA INTELIGENTE PARA O PROBLEMA RMSA

Assim como o GA, o PSO (*Particle Swarm Optimization*) é uma técnica de otimização computacional. Ela foi desenvolvida por Eberhart e Kennedy, em 1995, e foi inspirada pelo comportamento social de alguns animais na natureza (KENNEDY; EBERHART, 1995).

O PSO usa uma população de partículas que se movimentam através de um espaço de soluções para o problema. A cada iteração, as velocidades das partículas são ajustadas de acordo

Figura 37 – Probabilidades de Bloqueio para a Topologia *Pacific Bell*

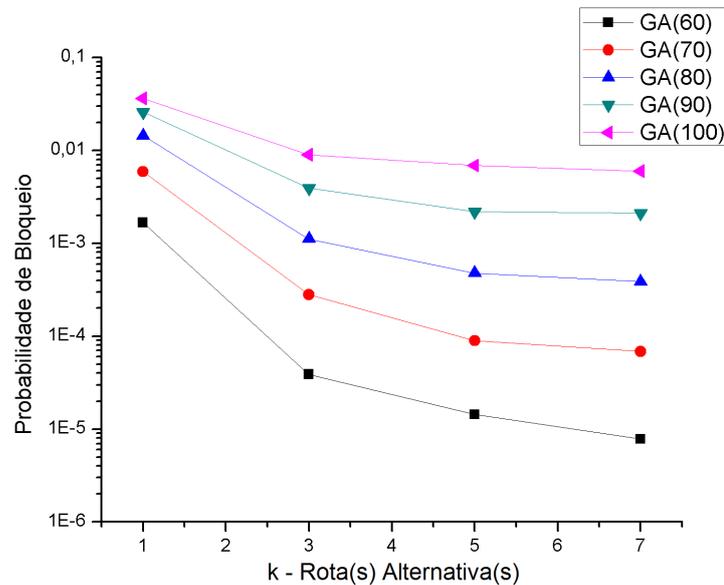
Fonte: O autor, 2018.

Figura 38 – Convergência do GA para a topologia *Finland*

Fonte: O autor, 2018.

com o histórico da melhor posição do grupo. Por isso, o movimento das partículas em busca de uma solução para o problema que se assemelha a um enxame de mosquitos, enxame de pássaros ou um cardume de peixes (EBERHART; SHI; KENNEDY, 2001).

O algoritmo PSO é uma técnica baseada em inteligência computacional que é não

Figura 39 – Probabilidades de Bloqueio para a Topologia *Finland*

Fonte: O autor, 2018.

amplamente afetada pelo tamanho e não linearidade do problema, e pode convergir para a solução ideal em muitos problemas onde a maioria dos métodos analíticos não converge. Pode, portanto, ser efetivamente aplicada a diferentes problemas de otimização. Vários trabalhos foram publicados nos últimos anos à respeito desse tema (EBERHART; SHI; KENNEDY, 2001).

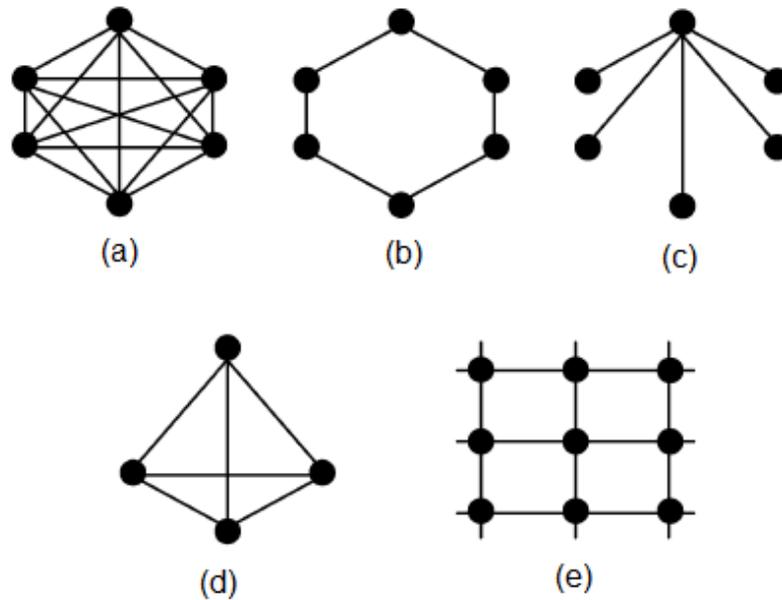
Em comparação a outros algoritmos inteligentes, o PSO é mais eficiente em manter a diversidade das soluções, já que todas as suas partículas usam a informação relacionada com a partícula de maior sucesso, a fim de melhorar a si mesmas, enquanto que, no GA, as piores soluções são descartadas e somente os bons são salvos. Portanto em GA, a população evolui em torno de um subconjunto dos melhores indivíduos (VALLE et al., 2008).

A ligação entre as partículas retrata a forma como o PSO conduzirá a uma melhor solução. Na vizinhança, ou seja, onde as partículas são adjacentes umas às outras, elas são atraídas para a melhor solução encontrada por qualquer membro do enxame. Isso representa um caso em que as partículas estão conectadas em que cada partícula tem acesso à informação de todos os outros membros da comunidade, como mostra a Figura 40 (a).

Em relação à complexidade, a ligação entre as partículas pode ser de forma mais simples. Em se tratando disso, algumas topologias alternativas são a topologia em anel, em que cada partícula é conectada com dois vizinhos (Figura 40 (b)), a topologia em que os indivíduos são isolados uns dos outros e toda a informação é comunicada a um indivíduo único (Figura 40 (c)) e a topologia em pirâmide (Figura 40 (d)).

A topologia que é mostrada na Figura 40 (a) converge rapidamente, mas pode ficar presa

Figura 40 – Diferentes topologias das partículas no PSO



Fonte: adaptado de (VALLE et al., 2008).

em um mínimo local, enquanto as outras têm mais chances de encontrar uma solução ideal, embora com convergência mais lenta (KENNEDY; EBERHART, 1995). Na literatura, é sugerida a configuração de Von Neumann (40 (e)) como melhor alternativa. Mesmo assim, para selecionar a estrutura de vizinhança mais eficiente, em geral, depende do tipo de problema. Uma estrutura pode executar mais eficientemente para certos problemas, mas ainda assim ter desempenhos inferiores para outros problemas (VALLE et al., 2008).

4.2.1 Uma adaptação do PSO para o problema RMSA baseada na metodologia BSR

O PSO é modelado de forma que, no espaço numérico real, cada solução possível para o problema RMSA é representada por um indivíduo que se move através do hiperespaço de soluções. A posição de cada partícula é determinada pelo vetor de localização que leva em conta sua velocidade, como é definida na Equação 1, onde \vec{x} é a posição da partícula, i é o índice da partícula, \vec{v} a velocidade da partícula e t a iteração do algoritmo PSO (KENNEDY, 1997).

$$\vec{x}_i(t) = \vec{x}_i(t-1) + \vec{v}_i(t). \quad (1)$$

A informação disponível para cada indivíduo é baseada em sua própria experiência e o conhecimento do desempenho dos outros indivíduos em sua vizinhança. Dada à importância relativa desses dois fatores, é importante aplicar pesos relacionados à decisão do indivíduo ou do grupo como todo. Dessa forma, a Equação 2 define a velocidade do indivíduo i na iteração

Figura 41 – Dois exemplos de partículas do Algoritmo PSO.

Enlace	Custo
Enlace ₁	x
Enlace ₂	y
Enlace ₃	z

(a)

Enlace	Custo
Enlace ₁	w
Enlace ₂	k
Enlace ₃	l

(b)

Fonte: O autor, 2018.

t , onde ϕ_1 é a constante de peso da decisão tomada pela melhor partícula da iteração e ϕ_2 a constante de peso da decisão tomada pela melhor partícula de todas as iterações. Sendo que o adjetivo melhor refere-se ao desempenho da partícula em minimizar ou maximizar a solução encontrada para o problema. O que no caso do problema RMSA seria minimizar a quantidade de bloqueios feitos pela rede óptica.

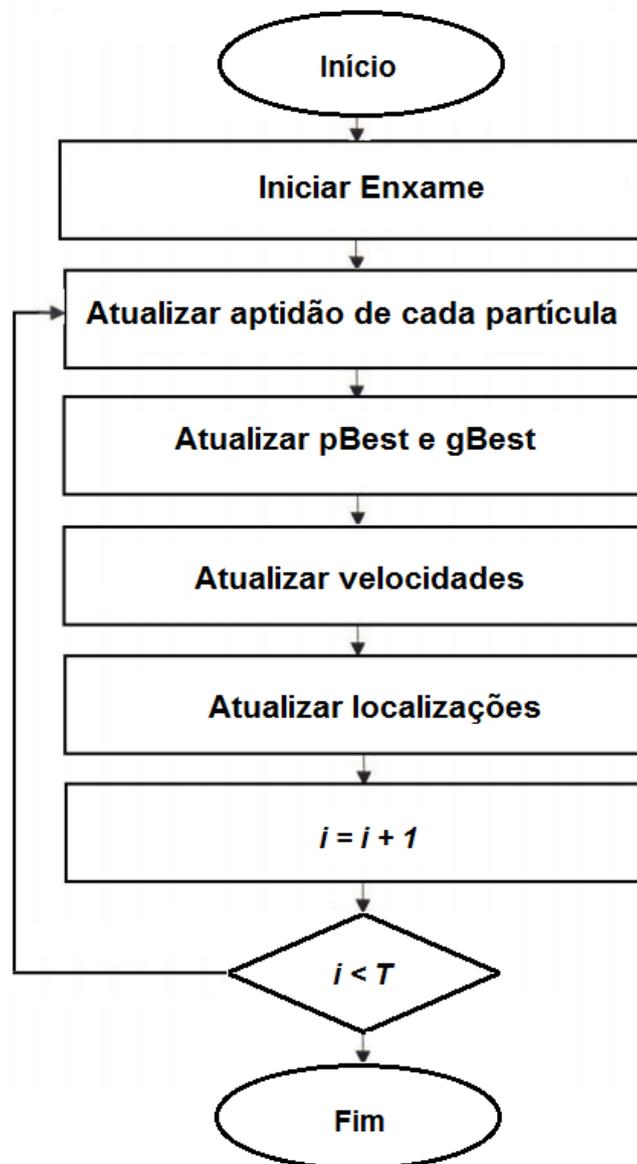
$$\vec{v}_i(t) = \vec{v}_i(t-1) + \phi_1(\vec{p}_i - \vec{x}_i(t-1)) + \phi_2(\vec{p}_g - \vec{x}_i(t-1)). \quad (2)$$

Em se tratando da adaptação do algoritmo PSO para o problema RMSA, cada localização de uma partícula x é uma representação de um conjunto de pesos associados à cada enlace da rede óptica, conforme mostra Figura 41, onde são encontrados dois exemplos de partículas. Na Figura 41 (a), a localização da partícula é referente ao caso em que os custos de uma topologia hipotética com três enlaces cujos custos são de valores x , y e z , respectivamente, onde cada custo pertence ao espaço real entre 0 e 1. Da mesma forma, na Figura 41 (b), são definidos outros valores de custos de enlace. O processo de inicialização dos indivíduos que irão buscar soluções para o problema RMSA é aleatória, dentro do espaço real entre 0 e 1. Em outras palavras, o custo de cada enlace é inicialmente feito de forma aleatória, o que leva ao algoritmo PSO uma otimização do custo de cada enlace de forma a minimizar o número de bloqueios feitos pela rede a diversas requisições de banda.

Logo, o algoritmo PSO é iniciado com uma população ou um conjunto de partículas, com custos aleatórios. Através desses custos, o algoritmo de roteamento baseia-se em definir a rota mais apropriada para uma conexão entre um par de nó origem-destino da rede óptica, que é a rota que contém o menor somatório dos custos de enlace. Como o algoritmo de roteamento é fixo-alternativo, as rotas alternativas são ordenadas de acordo com o menor somatório dos custos de cada enlace.

Com isso, o PSO entra em um processo iterativo em que cada partícula recebe um valor referente ao número de bloqueios feitos pela rede óptica em execução de acordo com os custos

Figura 42 – Fluxograma do Algoritmo PSO.



Fonte: O autor, 2018.

de cada enlace.

Durante a iteração, os valores de *pBest* e *gBest* referentes a solução que resultou em menos bloqueio de rede da iteração e a solução que resultou em menos bloqueio de rede de todas as iterações, respectivamente, são atualizadas. Buscando redução do tempo das simulações, a topologia das partículas do PSO é igual à da Figura 40 (a). Sendo assim, a velocidade de cada partícula é atualizada de acordo com a melhor solução já encontrada e com a melhor solução da iteração.

Conforme definidos na Equação 1 e na Equação 2, os valores de localização e de velocidade são atualizados baseados na política de decisão do algoritmo.

Feito isso, o PSO é repetido várias vezes até um valor conhecido e o indivíduo com mais aptidão é o selecionado pelo algoritmo. Nesse caso, o indivíduo que resulta em menores bloqueios na rede em operação é o escolhido.

A Figura 42 mostra um fluxograma de funcionamento do Algoritmo PSO, onde i é o índice de cada geração e T o número máximo de gerações do algoritmo.

4.2.2 Discussões e resultados numéricos em diferentes topologias

Como o PSO trata-se de um processo iterativo, aqui é mostrado o gráfico do número de bloqueios para o número de iterações para cada topologia. Assim, a partícula selecionada pelo algoritmo PSO contém o conjunto de custos de utilização dos enlaces da rede óptica que resultaram na menor quantidade de bloqueios feita pela rede. Vale ressaltar que, por simplificação foi escolhida a topologia mostrada na Figura 40 (a).

Adicionalmente, também é mostrado um gráfico da convergência do processo iterativo para cada topologia. Esse processo é executado até a iteração máxima e é usado para selecionar a partícula mais apta para o problema RMSA. Da mesma forma que antes, para fins de aumento de desempenho, só foi levado em conta o resultado do número de bloqueio para o caso em que a carga (*Erlang*) está na metade entre a carga máxima e a mínima, para uma específica simulação. Os parâmetros de execução do algoritmo PSO são encontrados na Tabela 9. Os parâmetros de simulação são os mesmos das simulações do capítulo anterior.

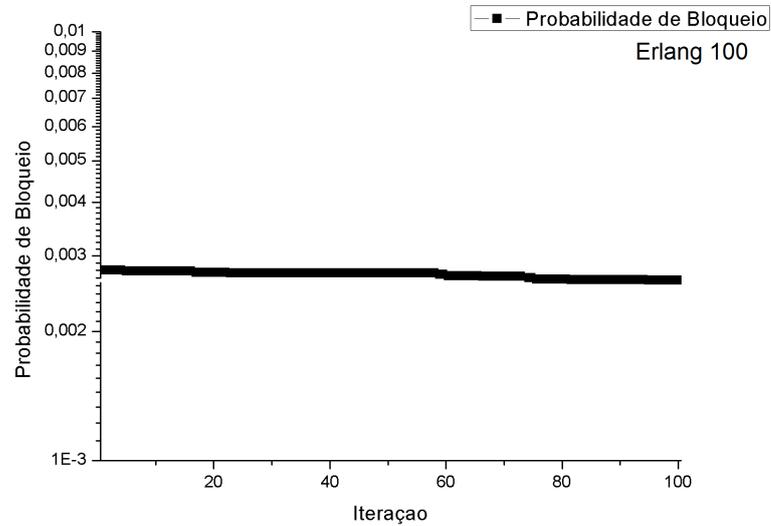
Tabela 9 – Parâmetros para a execução do Algoritmo PSO

Parâmetro	Valor	Significado
IT_{MAX}	100	Número de Iterações
$POP_{Tamanho}$	30	Número de Indivíduos
ϕ_1	2	Fator de decisão à escolha local
ϕ_2	2	Fator de decisão à escolha global

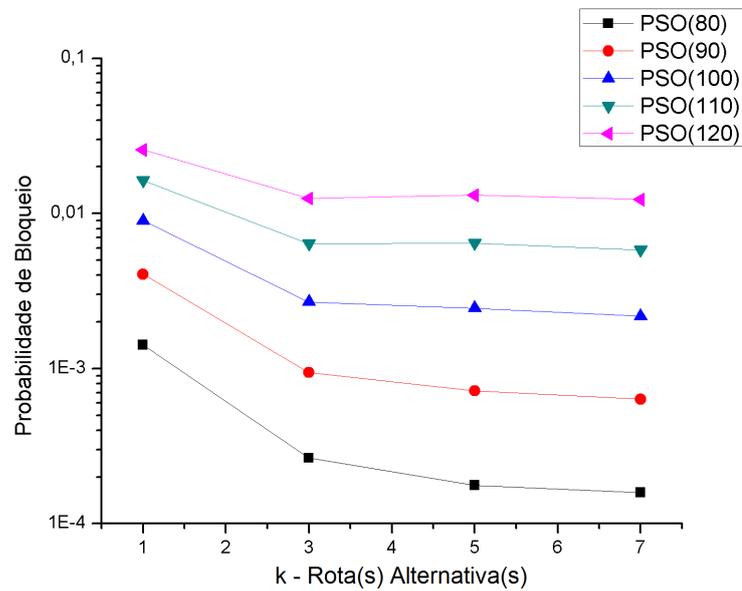
Fonte: O autor, 2018.

O processo iterativo ocorre 100 vezes, que se trata da iteração máxima (IT_{MAX}). Sendo, que a cada iteração o número de bloqueios na rede tende a convergir para um mínimo local. No caso da topologia *NSFNET*, a convergência após 100 iterações não variou da mesma forma que no algoritmo GA, como pode ser visto na Figura 43.

Isso indica que, o PSO rapidamente converge para um mínimo local, conforme mostra a Figura 44. Entretanto, o algoritmo não foi capaz de fornecer outras soluções melhores.

Figura 43 – Convergência do PSO para a topologia *NSFNET*

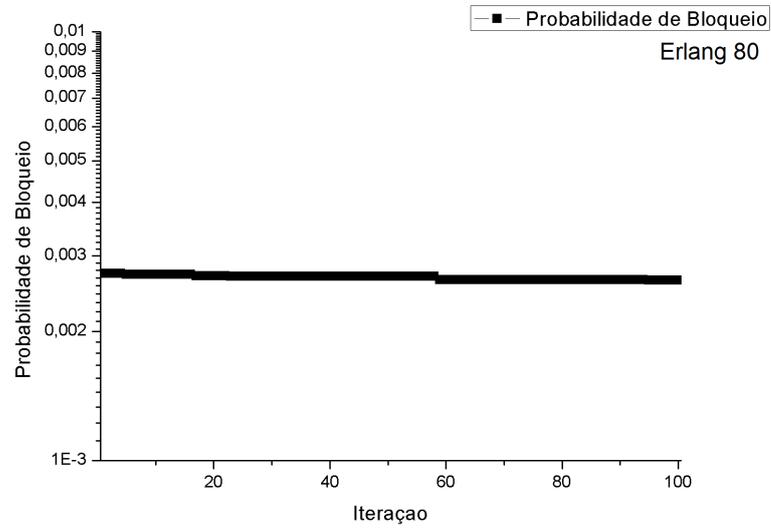
Fonte: O autor, 2018.

Figura 44 – Probabilidades de Bloqueio para a Topologia *NSFNET*.

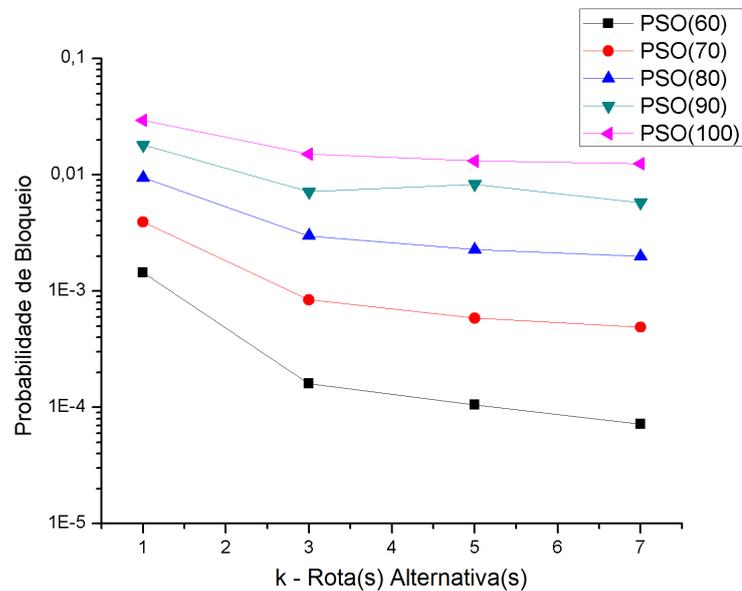
Fonte: O autor, 2018.

O mesmo acontece com a simulação na topologia *Pacific Bell*. O algoritmo PSO não conseguiu uma ampla convergência em 100 iterações, conforme mostra a Figura 45.

Mesmo assim, o resultado da simulação em reduzir a PB foi equivalente ao encontrado pelo GA, conforme mostra a Figura 46.

Figura 45 – Convergência do PSO para a topologia *Pacific Bell*

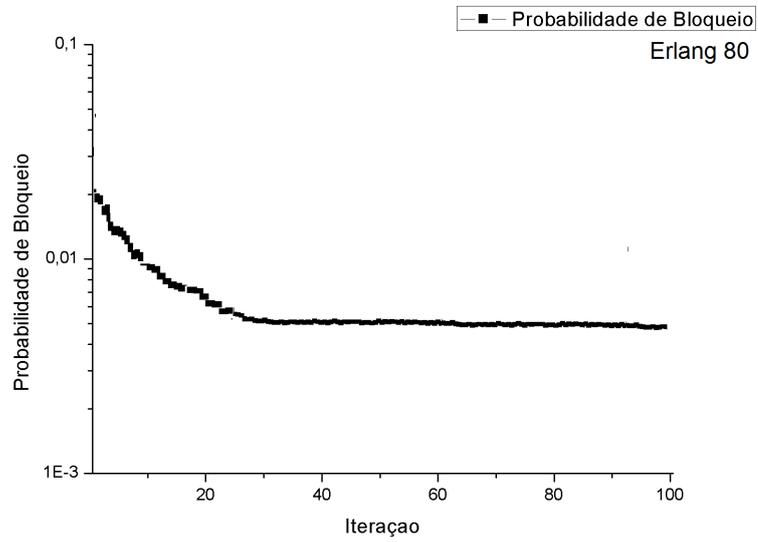
Fonte: O autor, 2018.

Figura 46 – Probabilidades de Bloqueio para a Topologia *Pacific Bell*.

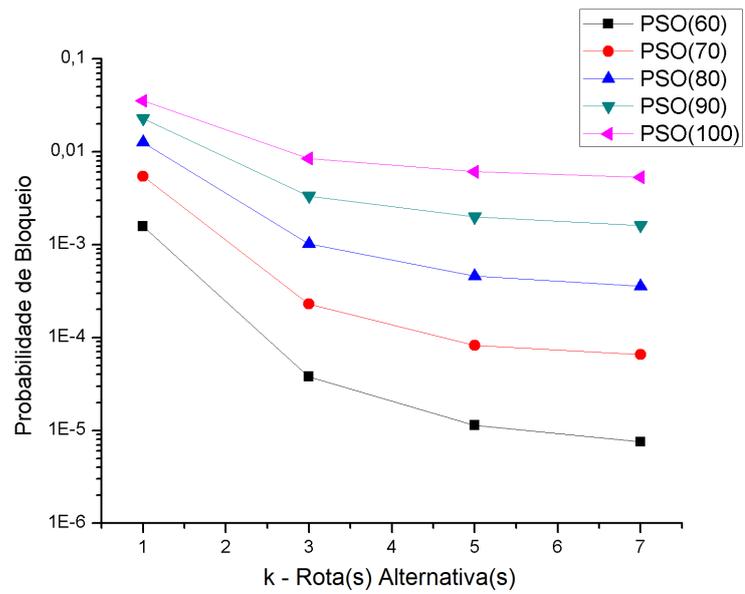
Fonte: O autor, 2018.

A simulação do algoritmo PSO na topologia *Finland* foi a única que resultou em uma ampla convergência, conforme mostra a Figura 47.

Nesse caso, o algoritmo PSO conseguiu melhorar seus resultados, de forma a reduzir o número de PB nessa topologia, conforme mostra a Figura 48.

Figura 47 – Convergência do PSO para a topologia *Finland*

Fonte: O autor, 2018.

Figura 48 – Probabilidades de Bloqueio para a Topologia *Finland*.

Fonte: O autor, 2018.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Esta dissertação apresentou dois algoritmos de roteamento com roteamento fixo-alternativo para Redes Ópticas SLICE levando em conta restrições da camada física e foram comparadas às duas abordagens de aprendizagem de máquina para o problema RMSA. Sendo assim, esse capítulo visa concluir as ideias desse trabalho, como também, prever o que pode ser feito a respeito desse tema.

5.1 AS CONCLUSÕES VISTAS DESSE TRABALHO

A demanda de tráfego de rede tem aumentado nos últimos tempos devido principalmente a serviços de Internet. Para isso, uma das soluções propostas é usar EON para melhorar a eficiência espectral da rede flexibilizando as taxas de dados requisitadas. Contudo, a introdução dessa proposta leva a novos desafios. Um deles é o problema RMSA para tráfego dinâmico.

Como proposto na literatura, o algoritmo de roteamento BSR é uma alternativa para o roteamento em redes ópticas elásticas, pois faz uma política de balanceamento de carga que não acontece quando se usa os tradicionais algoritmos de roteamento. Contudo, nesse trabalho visou estender essa metodologia a considerar restrições de camada física da rede óptica.

Dois abordagens baseadas no algoritmo BSR foram apresentadas. Uma delas chamada de BSR *Offline* mostrou ser rápida, pois é executada durante a fase de planejamento da rede. Contudo se mostrou menos eficaz que a outra abordagem apresentada: BSR *Online*. Portanto, cabe ao projetista da rede escolher entre velocidade e desempenho perante as duas propostas apresentadas.

Indo mais além, duas soluções para o problema RMSA também foram apresentadas, com o objetivo de comparar o BSR às soluções conhecidas pela maioria da comunidade que visa solucionar o RMSA. Apesar das soluções terem demonstrado um bom desempenho em diminuir o número de bloqueios perante o algoritmo BSR para uma topologia, para as outras o desempenho não se mostrou tão eficaz.

5.2 PUBLICAÇÕES

Algumas publicações foram feitas a partir desse tema. Em (ALVES et al., 2016), a metodologia BSR *Offline* foi apresentada juntamente com o roteamento fixo-alternativo e restrições da camada física, juntamente com um modelamento similar ao apresentado nesse trabalho. É bom ressaltar que, não é encontrado na literatura algoritmo baseado na política BSR com restrições na camada física.

Em (SANTOS et al., 2017), foi apresentada uma abordagem BSR *Online* com

roteamento fixo-alternativo. Sendo que nessa publicação, não foi considerada restrições de camada física.

5.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Visto o que foi abordado nesse trabalho, seguem algumas sugestões em prol da solução otimizada para o problema RMSA:

- Adotar outras abordagens para modelagem da camada física;
- Adicionar outros fatores de ruído a modelagem da camada física, como os não-lineares;
- Abordar um algoritmo de atribuição de espectro junto ao BSR.
- Utilizar outros algoritmos de otimização para o problema RMSA.

REFERÊNCIAS

- ALFERNESS, R. The evolution of configurable wavelength multiplexed optical networks - a historical perspective. *Proceedings of the IEEE*, v. 100, p. 1023, 2012. Citado na página 23.
- ALVES, M. et al. Um algoritmo bsr com metodologia de roteamento fixo-alternativo para redes Ópticas elásticas. *MOMAG*, 2016. Citado na página 75.
- ASSIS, K. D. R.; F., S. A.; ALMEIDA, R. C. Optimization in spectrum-sliced optical networks. *Optical Metro Networks and Short-Haul Systems VI. International Society for Optics and Photonics*, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 30.
- BASTOS-FILHO, C. J. A. et al. Wavelength assignment for physical-layer-impaired optical networks using evolutionary computation. *Journal of Optical Communications and Networking*, v. 3, p. 178–188, 2011. Citado na página 46.
- BASTOS-FILHO, C. J. A. et al. Comparing osnr based policies for an adaptive-alternative ia-rwa algorithm applied to all-optical networks. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, v. 12, 2013. Citado na página 48.
- BEYRANVAND, H.; SALEHI, J. A quality-of-transmission aware dynamic routing and spectrum assignment scheme for future elastic optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, v. 31, p. 3043 – 3054, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 27.
- CAVALCANTE, M. A. et al. Análise do impacto do ruído ase em redes Ópticas elásticas transparentes utilizando múltiplos formatos de modulação. *XXXIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, 2015. Citado na página 33.
- CHINDAPOL, A.; RITCEY, J. A. Design, analysis and performance evaluation for bicm-id withsquare qam constellations in rayleighfading channels. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 19, p. 944–957, 2001. Citado na página 27.
- CHRISTODOULOPOULOS, K.; TOMKOS, I.; VARVARIGOS, E. A. Routing and spectrum allocations in ofdm-based optical networks with elastic bandwidth allocation. *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010)*, p. 1–6, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 21, 24 e 35.
- CISCO. *The Zettabyte Era: Trends and Analysis*. 2018. Disponível em: <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/VNI_Hyperconnectivity_WP.html>. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.
- CORMEN, T. H. et al. *Introduction to Algorithms*. 3. ed. [S.l.]: The MIT Press, 2002. Citado na página 30.
- DIJKSTRA, E. W. A note on two problems in connection with graphs. *Numerical Mathematics*, v. 1, p. 269–271, 1959. Citado na página 35.
- DURÃES, G. M. et al. The choice of the best among the shortest routes in in transparent optical networks. *Computer Networks*, v. 54, p. 2400–2409, 2010. Citado na página 36.

- DURÁN, R. J. et al. Performance comparison of methods to solve the routing and spectrum allocation problem. *14th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, p. 1–4, 2012. Citado na página 35.
- EBERHART, R.; SHI, Y.; KENNEDY, J. *Swarm Intelligence*. [S.l.]: Morgan Kaufmann, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 66 e 67.
- ESSIAMBRE, R. et al. Capacity limits of optical fiber networks. *Journal of Lightwave Technology*, v. 28, p. 662 – 701, 2010. Citado na página 24.
- GAGNAIRE, M.; ZAHR, S. Impairment-aware routing and wavelength assignment in translucent optical networks: State of the art. *IEEE Communication Magazine*, v. 47, p. 55–61, 2009. Citado na página 20.
- GALVÃO, C.; VALENÇA, M. Sistemas inteligentes: aplicações a recursos hídricos e ciências ambientais. *Coleção ABRH de Recursos Hídricos*, p. 99–150, 1999. Citado na página 59.
- GARCIA, A. A. *Elastic spectrum allocation in flexgrid optical networks*. Dissertação — Optical Communications Group, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Espanha, 2012. Citado na página 17.
- GERSTEL, O. et al. Elastic optical networking: a new dawn for the optical layer? *IEEE Communications Magazine*, v. 50, p. s12 – s20, 2012. Citado na página 17.
- GOLDBERG, D. E. *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. [S.l.]: Addison-Wesley, 1989. Citado na página 58.
- HOLLAND, J. H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. [S.l.]: MIT Press, 1975. Citado na página 58.
- JINNO, M. et al. Distance-adaptive spectrum resource allocation in spectrum-sliced elastic optical path network [topics in optical communications]. *IEEE Communications Magazine*, v. 48, p. 138 – 145, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 40.
- JINNO, M.; TAKARA, H.; KOZICKI, B. Dynamic optical mesh networks: drivers, challenges and solutions for the future. *Proceedings of 35th European Conference on Optical Communication (ECOC)*, p. 7.7.4, 2009. Citado na página 17.
- JINNO, M. et al. Spectrum-efficient and scalable elastic optical network: Architecture, benefits, and enabling technologies. *IEEE Communications Magazine*, v. 47, p. 66–73, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 25.
- KAVIAN, Y. S.; GHASSEMLOOY, Z. *Intelligent Systems for Optical Networks Design: Advancing Techniques*. [S.l.]: IGI Global, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 27.
- KENNEDY, J. The particle swarm: Social adaptation of knowledge. *Proc. IEEE Int. Conf. Evol. Comput*, p. 303 – 308, 1997. Citado na página 68.
- KENNEDY, J.; EBERHART, R. Particle swarm optimization. *Proc. IEEE Int. Conf. Neural Netw. (ICNN)*, v. 4, p. 1942 – 1948, 1995. Citado 2 vezes nas páginas 65 e 68.
- KOGANTIA, R. T.; SIDHUA, D. Analysis of routing and wavelength assignment in large wdm networks. *The 9th International Conference on Future Networks and Communications (FNC'14)*, v. 34, p. 71–78, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 21.

LAYEC, P. et al. Elastic optical networks: The global evolution to software configurable optical networks. *Bell Labs Technical Journal*, v. 18, p. 133 – 151, 2013. Citado na página 25.

MEAR, R. et al. Low noise erbium doped fiber amplifier operating at 1.54 micrometers. *Electron. Lett.* 23, p. 1026–1028, 1987. Citado na página 24.

MELLO, D. A. A. et al. Optical networking with variable-code-rate transceivers. *Journal of Lightwave Technology*, v. 32, p. 257–266, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 33.

MOREA, A.; CHONG, A.; RIVAL, O. Impact of transparent network constraints on capacity gain of elastic channel spacing. *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC)*, p. 1 – 3, 2011. Citado na página 25.

MURTHY, C. S. R.; GURUSAMY, M. Wdm optical networks - concepts, design and algorithms. *Prentice Hall PTR*, 2002. Citado na página 20.

RUAN, L.; ZHENG, Y. Dynamic survivable multipath routing and spectrum allocation in ofdm-based flexible networks. *Journal of Optical Communications and Networking*, v. 6, p. 77 – 85, 2014. Citado na página 29.

SANTOS, A. F. et al. Ybs heuristic for routing and spectrum allocation in flexible optical networks. *IEEE 18th International Conference on High Performance Switching and Routing (HPSR)*, p. 1 – 6, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 21, 30 e 75.

SANTOS, A. F.; ALMEIDA, R. C.; ASSIS, K. Yen-bsr: A new approach for the choice of routes in wdm networks. *Journal of Optical Communications*, v. 35, p. 293–296, 2014. Citado na página 40.

SANTOS, A. F. et al. Roteamento e alocação de espectro em redes Ópticas: O conceito slice. *XXX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, 2012. Citado na página 40.

SANTOS, A. F. dos. *Algoritmos para roteamento e alocação de espectro em redes ópticas elásticas*. Dissertação — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Teses de Doutorado, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia, 2015. Citado 3 vezes nas páginas 38, 39 e 40.

SANTOS, C. C.; ASSIS, K. D. R. Optical networks security: Design to avoid the jamming attacks. *13th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, p. 1–4, 2011. Citado na página 36.

SARADHI, C. V.; SUBRAMANIAM, S. S. Physical layer impairment aware routing (pliar) in wdm optical networks: issues and challenges. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, v. 11, p. 109 – 130, 2009. Citado na página 24.

SCARAFICCI, R. A.; FONSECA, N. L. da. Alternative routing and zone-based spectrum assignment algorithm for flexgrid optical networks. *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, p. 3295 – 3300, 2014. Citado na página 40.

SHAFIK, R. A.; RAHMAN, M. S.; ISLAM, A. R. On the extended relationships among evm, ber and snr as performance metrics. *4th International Conference on Electrical and Computer Engineering*, 2006. Citado na página 33.

SHAKYA, S. *Management of Spectral Resources in Elastic Optical Networks*. Dissertação — Georgia State University, Atlanta, Estados Unidos, 2015. Citado na página 23.

- SHEN, G.; TUCKER, R. S. Translucent optical networks: The way forward. *IEEE Communications Magazine*, v. 45 (2), p. 48–54, 2007. Citado na página 20.
- SHIRAZIPOURAZAD, S.; ZHOU, C.; DERAKHSHANDEH, A. S. Z. On routing and spectrum allocation in spectrum-sliced optical networks. *Proceedings of IEEE INFOCOM*, p. 385–389, 2013. Citado na página 21.
- SIMEONIDOU, D.; AMAYA, N.; ZERVAS, G. Infrastructure and architectures on demand for flexible and elastic optical networks. *38th European Conference and Exhibition on Optical Communications*, p. 1 – 3, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 24, 25 e 30.
- TAKAGI, T. et al. Dynamic routing and frequency slot assignment for elastic optical path networks that adopt distance adaptive modulation. *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC)*, p. 1–3, 2011. Citado na página 17.
- TOMKOS, I. et al. A tutorial on the flexible optical networking paradigm: State of the art, trends, and research challenges. *Proceedings of the IEEE*, v. 102, p. 1317 – 1337, 2014. Citado na página 25.
- TOMKOS, I. et al. The evolution of optical networking. *Proceedings of the IEEE*, v. 100, p. 1017 – 1022, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 27.
- VALLE, Y. et al. Particle swarm optimization: Basic concepts, variants and applications in power systems. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, v. 12, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 67 e 68.
- VARVARIGOS, E. A.; CHRISTODOULOPOULOS, K. Algorithmic aspects in planning fixed and flexible optical networks with emphasis on linear optimization and heuristic techniques. *Journal of Lightwave Technology*, v. 32, p. 681 – 693, 2013. Citado na página 30.
- WANG, Y.; CAO, X.; PAN, Y. A study of the routing and spectrum allocation in spectrum-sliced elastic optical path networks. *INFOCOM, 2011 Proceedings IEEE*, p. 1503 – 1511, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 28, 29 e 40.
- YE, Y. et al. Algorithms for the design of wdm translucent optical networks. *Optics Express*, v. 11, p. 2917–2926, 2003. Citado na página 44.
- YEN, J. *Finding the k Shortest Loopless Paths in a Network*. [S.l.]: Management Science, 1971. Citado na página 34.
- YEN, J. Y. An algorithm for finding shortest routes from all source nodes to a given destination in general networks. *Quarterly of Applied Mathematics*, v. 27, p. 526–530, 1970. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 40.
- YUMER, R.; AKAR, N.; KARASAN, E. Class-based first-fit spectrum allocations with fragmentation avoidance for dynamic flexgrid optical networks. *Optical Switching and Networking*, v. 15, p. 44–52, 2014. Citado na página 34.
- ZAGZEBSKI, J. A. *Essentials of Ultrasound Physics*. [S.l.]: Mosby Inc., 1996. Citado na página 31.
- ZHANG, G. et al. A survey on ofdm-based elastic core optical networking. *IEEE Communications Survey and Tutorials*, v. 15(1), p. 65–87, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 17, 26 e 29.

ZHU, Z. et al. Dynamic service provisioning in elastic optical networks with hybrid single/multi-path routing. *Journal of Lightwave Technology*, v. 31, p. 15–22, 2013. Citado na página 35.