



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**  
Centro de Tecnologia e Ciências  
Faculdade de Engenharia


Marcelo Fernandes Fontes

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

Rio de Janeiro  
2019

Marcelo Fernandes Fontes

## **Roteamento e Alocação de Espectro em Redes Ópticas Elásticas via Algoritmo Genético**



Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de Concentração: Redes de Telecomunicações.

Orientador: Lisandro Lovisolo  
Orientador: José Rodolfo Souza

Rio de Janeiro  
2019

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

F683 Fontes, Marcelo Fernandes.  
Roteamento e alocação de espectro em redes ópticas elásticas via algoritmo genético / Marcelo Fernandes Fontes. – 2019.  
117f.

Orientadores: Lisandro Lovisolo, José Rodolfo Souza.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia eletrônica - Teses. 2. Óptica de fibras - Teses. 3. Análise espectral - Teses. 4. Algoritmos genéticos - Teses. I. Lovisolo, Lisandro. II. Souza, José Rodolfo. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. IV. Título.

CDU 621.38

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

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

---

Assinatura

---

Data

Marcelo Fernandes Fontes

## **Roteamento e Alocação de Espectro em Redes Ópticas Elásticas via Algoritmo Genético**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de Concentração: Redes de Telecomunicações.

Aprovado em: \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2019.

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Lisandro Lovisolo (Orientador)  
Faculdade de Engenharia – UERJ

---

Prof. Dr. José Rodolfo Souza (Orientador)  
Faculdade de Engenharia – UERJ

---

Prof. Dr. Douglas Mota Dias  
Faculdade de Engenharia – UERJ

---

Prof. Dra. Natalia Castro Fernandes  
Escola de Engenharia – UFF

Rio de Janeiro  
2019

## DEDICATÓRIA

À minha esposa, Alyne, pelo amor, paciência e incentivo de todos os dias e às nossas filhas, Maria Beatriz e Analice, que representam o que há de melhor em nós dois.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus, pois minha fé Nele propiciou que este trabalho fosse mais uma das muitas conquistas alcançadas em minha vida.

Aos Professores Lisandro Lovisolo e José Rodolfo Souza, que com paciência e sabedoria me ajudaram a crescer profissionalmente e intelectualmente.

Aos meus pais, José Luiz Fontes e Eliana Fernandes Fontes, que sempre me apoiaram e incentivaram na conclusão deste que foi mais um grande passo em minha formação profissional. Minha mais sincera e profunda gratidão.

À FURNAS Centrais Elétricas S.A., em especial aos engenheiros Paulo Henrique Simas Garrofé, Robson de Matos Fernandes e Márcia Simões do Nascimento, que proporcionaram a oportunidade e condições na minha dedicação a este trabalho.

E a todos àqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram de alguma forma para que eu pudesse concluir este documento.

Deus não escolhe os capacitados,  
capacita os escolhidos. Fazer ou não fazer  
algo só depende de nossa vontade e  
perseverança.

Albert Einstein

## RESUMO

FONTES, Marcelo Fernandes. *Roteamento e alocação de espectro em redes ópticas elásticas via algoritmo genético*. 2019. 117f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, 2019.

Apresenta-se uma abordagem para obter soluções dos problemas de roteamento e alocação de espectro (RSA) e o de roteamento, modulação e alocação de espectro (RMSA) aplicado em uma Rede Óptica Elástica (EON). O problema é decomposto e analisado usando dois subproblemas em separado, que são empregados para obter soluções sequencialmente. O primeiro é o de roteamento e o outro de alocação de espectro (RSA), ou de modulação e alocação de espectro (RMSA) em uma EON. Para o primeiro, utilizam-se os algoritmos de Dijkstra e Yen; já, para o segundo, investigam-se duas abordagens: uma que emprega um algoritmo “voraz” (*greedy algorithm*) e outra usando um algoritmo genético (GA). Consideram-se cenários onde se empregam a Multiplexação por Divisão de Frequências Ortogonais (OFDM), que permite realizar a alocação espectral. O comprimento máximo do enlace é determinado pela modulação empregada pela técnica OFDM, ou seja, quanto mais bits forem comportados por símbolo, menor o alcance do enlace. Assim, há uma interdependência entre as rotas, modulação e quantidade de portadoras que é resolvida no problema RMSA. Um aspecto essencial desta dissertação é a definição de uma função-objetivo (*fitness function*) para o GA, que visa avaliar a qualidade da solução obtida. As simulações desenvolvidas analisam o desempenho das soluções dos problemas RSA e RMSA em EONs obtidas com as duas abordagens. Os itens avaliados são o comportamento das soluções obtidas em função do aumento de demandas por tráfego, que é analisado usando a probabilidade de bloqueio, assim como a capacidade de demandas atendidas e, além disso, avaliam-se os tempos de execução dos algoritmos.

Palavras-chave: Algoritmos de Dijkstra e Yen; Algoritmo “voraz”; Algoritmo Genético; Função Objetivo; Roteamento e Alocação de Espectro; Roteamento, Modulação e Alocação de Espectro; Rede Óptica Elástica.



## ABSTRACT

FONTES, Marcelo Fernandes. *Routing and spectrum allocation in elastic optical networks with genetic algorithm*. 2019. 117f. Dissertation (Master's Degree in Electronic Engineering) – Faculty of Engineering, State University of Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, 2019.

An approach is presented to obtain solutions of the Routing and Spectrum Allocation (RSA) problems and the Routing, Modulation and Spectrum Allocation (RMSA) applied in an Elastic Optical Network (EON). The problem is decomposed and analyzed using two separate subproblems, which are employed to obtain solutions sequentially. The first is routing and the other is spectrum allocation (RSA) or modulation and spectrum allocation (RMSA) in an EON. For the first, we use the algorithms of Dijkstra and Yen; For the second, two approaches are investigated: one employing a greedy algorithm and the other using a genetic algorithm (GA). Scenarios are considered where Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) is employed, which allows to perform spectral allocation. The maximum link length is determined by the modulation employed by the OFDM technique, that is, the more bits the symbol carries, the smaller the range of the link. Thus, there is an interdependence between routes, modulation and number of carriers that is solved in the RMSA problem. An essential aspect of this dissertation is the definition of a fitness function for the GA, which aims to evaluate the quality of the obtained solution. The simulations developed analyze the performance of RSA and RMSA problem solutions in EONs obtained with both approaches. The evaluated items are the behavior of the solutions obtained due to the increase in traffic demands, which is analyzed using the probability of blocking, as well as the capacity of demands met and, in addition, the execution times of the algorithms are evaluated.

Keywords: Dijkstra and Yen Algorithms; greedy algorithm; Genetic Algorithm; Fitness Function; Routing and Spectrum Assignments; Routing, Modulation and Spectrum Assignments; Elastic Optical Network.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tráfego total mensal em redes móveis, 2012 – 2017 [1].	21
Figura 2 – Divisão dos recursos espectrais em uma EON [11].	28
Figura 3 – Arquitetura de uma Rede Óptica Elástica.	33
Figura 4 – Diagrama em blocos de um sistema OFDM.	45
Figura 5 – Larguras de banda (Bw) típicas para amplificadores ópticos.	47
Figura 6 – Exemplo de alocação de espectro com banda de guarda [33].	50
Figura 7 – Nível de modulação aceitável em função da distância de transmissão [22].	51
Figura 8 – Grafo da Rede Óptica Elástica de 6 nós analisada [36].	60
Figura 9 – Total de conexões bloqueadas na solução do problema RSA quando é aumentada a quantidade de conexões simultâneas na rede de 6 nós.	62
Figura 10 – Total de conexões bloqueadas na solução do problema RMSA quando é aumentada a quantidade de conexões simultâneas na rede de 6 nós.	64
Figura 11 – Topologia e comprimentos das conexões da rede NSFNET dos EUA [14].	65
Figura 12 – Total de conexões bloqueadas quando é aumentada a quantidade de conexões simultâneas na solução do problema RSA na NSFNET.	67
Figura 13 – Quantidade de fatias espectrais totais utilizadas quando é aumentada a quantidade de conexões simultâneas na solução do problema RSA na NSFNET.	68
Figura 14 – Total de conexões bloqueadas quando é aumentada a quantidade de conexões simultâneas na solução do problema RMSA na NSFNET.	69
Figura 15 – Quantidade de fatias espectrais totais utilizadas quando é aumentada a quantidade de conexões simultâneas na solução do problema RMSA na NSFNET.	70
Figura 16 – Exemplos de “cromossomos” progenitores $p_1$ e $p_2$ .	73
Figura 17 – Exemplo do “cromossomo” gerado pela “mescla” de “genes” dos “cromossomos” $p_1$ e $p_2$ .	73
Figura 18 – Exemplo do “cromossomo” gerado pela “permutação” de “genes” entre os “cromossomos” $p_1$ e $p_2$ .	74
Figura 19 – Exemplo do “cromossomo” gerado pela mutação do “cromossomo” $p_0$ .	74
Figura 20 – Total de conexões bloqueadas quando é aumentada a quantidade de conexões simultâneas para solução do problema RSA na rede de 6 nós, com: (a) função $f_1$ ; (b) função $f_2$ e (c) função $f_3$ .	81
Figura 21 – Tempo total de processamento (em segundos) quando se aumenta a quantidade de conexões simultâneas na solução do problema RSA na rede de 6 nós.	87
Figura 22 – Total de conexões bloqueadas quando é aumentada a quantidade de conexões simultâneas para solução do problema RMSA na rede de 6 nós, aplicando-se a função $f_1$ .	88

<b>Figura 23 – Total de conexões bloqueadas quando é aumentada a quantidade de conexões simultâneas para solução do problema RMSA na rede de 6 nós, aplicando-se a função <math>f_2</math>.</b>	<b>89</b>
<b>Figura 24 – Total de conexões bloqueadas quando é aumentada a quantidade de conexões simultâneas para solução do problema RMSA na rede de 6 nós, aplicando-se a função <math>f_3</math>.</b>	<b>89</b>
<b>Figura 25 – Tempo total de processamento (em segundos) quando se aumenta a quantidade de conexões simultâneas na solução do problema RMSA na rede de 6 nós.</b>	<b>90</b>
<b>Figura 26 – Total de conexões bloqueadas quando é aumentada a quantidade de conexões simultâneas na solução do problema RSA da NSFNET, com: (a) função <math>f_1</math>; (b) função <math>f_2</math> e (c) função <math>f_3</math>.</b>	<b>92</b>
<b>Figura 27 – Tempo total de processamento (em segundos) quando se aumenta a quantidade de conexões simultâneas na solução do problema RSA na NSFNET.</b>	<b>93</b>
<b>Figura 28 – Total de conexões bloqueadas quando é aumentada a quantidade de conexões simultâneas para solução do problema RMSA na NSFNET, aplicando-se a função <math>f_1</math>.</b>	<b>94</b>
<b>Figura 29 – Total de conexões bloqueadas quando é aumentada a quantidade de conexões simultâneas para solução do problema RMSA na NSFNET, aplicando-se a função <math>f_2</math>.</b>	<b>94</b>
<b>Figura 30 – Total de conexões bloqueadas quando é aumentada a quantidade de conexões simultâneas para solução do problema RMSA na NSFNET, aplicando-se a função <math>f_3</math>.</b>	<b>95</b>
<b>Figura 31 – Total de conexões bloqueadas quando é aumentada a quantidade de conexões simultâneas na solução do problema RSA na rede de 6 nós.</b>	<b>96</b>
<b>Figura 32 – Tempo total de processamento (em segundos) quando se aumenta a quantidade de conexões simultâneas na solução do problema RSA na rede de 6 nós.</b>	<b>97</b>
<b>Figura 33 – Total de conexões bloqueadas quando é aumentada a quantidade de conexões simultâneas na solução do problema RMSA na EON de 6 nós.</b>	<b>98</b>
<b>Figura 34 – Quantidade de demandas atendidas para a EON de 6 nós pelo critério MSF utilizando o algoritmo “voraz” na solução do problema RMSA.</b>	<b>99</b>
<b>Figura 35 – Quantidade de demandas atendidas para a EON de 6 nós pelo critério MSF utilizando o GA na solução do problema RMSA.</b>	<b>99</b>
<b>Figura 36 – Tempo total de processamento (em segundos) quando se aumenta a quantidade de conexões simultâneas na solução do problema RMSA na rede de 6 nós.</b>	<b>100</b>
<b>Figura 37 – Total de conexões bloqueadas quando é aumentada a quantidade de conexões simultâneas na solução do problema RSA na NSFNET.</b>	<b>101</b>
<b>Figura 38 – Tempo total de processamento (em segundos) quando se aumenta a quantidade de conexões simultâneas na solução do problema RSA na NSFNET.</b>	<b>102</b>
<b>Figura 39 – Total de conexões bloqueadas quando é aumentada a quantidade de conexões simultâneas na solução do problema RMSA na NSFNET.</b>	<b>103</b>
<b>Figura 40 – Quantidade de demandas atendidas para a NSFNET pelo critério MSF utilizando o algoritmo “voraz” na solução do problema RMSA.</b>	<b>104</b>
<b>Figura 41 – Quantidade de demandas atendidas para a NSFNET pelo critério MSF utilizando o GA na solução do problema RMSA.</b>	<b>104</b>
<b>Figura 42 – Tempo total de processamento (em segundos) quando se aumenta a quantidade de conexões simultâneas na solução do problema RMSA na NSFNET.</b>	<b>105</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exemplos de valores de dispersão cromática para $1530\text{nm} \leq \lambda \leq 1565\text{nm}$ [31]. ..	48
Tabela 2 – Taxa de transmissão versus o máximo alcance conseguido em uma EON. ....	53
Tabela 3 – Capacidade de demandas atendidas com base na quantidade de fatias espectrais (contíguas e contínuas) em um mesmo enlace para diferentes valores de conexões simultâneas.....	63
Tabela 4 – Demandas atendidas com base na quantidade de enlaces compartilhados, utilizando-se $f_1$ e mescla de “genes” na solução do problema RSA.....	82
Tabela 5 – Demandas atendidas com base na quantidade de enlaces compartilhados, utilizando-se $f_1$ e permutação de “genes” na solução do problema RSA.....	82
Tabela 6 – Demandas atendidas com base na quantidade de fatias espectrais totais, utilizando-se $f_2$ e mescla de “genes” na solução do problema RSA.....	84
Tabela 7 – Demandas atendidas com base na quantidade de fatias espectrais totais, utilizando-se $f_2$ e permutação de “genes” na solução do problema RSA.....	84
Tabela 8 – Demandas atendidas com base na quantidade de conexões simultâneas, utilizando-se $f_3$ e mescla de “genes” na solução do problema RSA.....	85
Tabela 9 – Demandas atendidas com base na quantidade de conexões simultâneas, utilizando-se $f_3$ e permutação de “genes” na solução do problema RSA.....	86

## LISTA COM PSEUDOCÓDIGOS DE ALGORITMOS

Algoritmo 1 – Pseudocódigo do algoritmo de Dijkstra.....	42
Algoritmo 2 – Pseudocódigo do algoritmo de Yen.....	44
Algoritmo 3 – Pseudocódigo do algoritmo “voraz” aplicado a uma EON. ....	59
Algoritmo 4 – Pseudocódigo para o GA aplicado a uma EON. ....	79

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BV-WXC	<i>Bandwidth Variable Wavelength Cross Connect</i>
BVT	<i>Bandwidth Variable Transponder</i>
Bw	<i>Bandwidth</i>
CCIF	<i>International Telephone Consultative Committee</i>
CCITT	<i>Comité Consultatif International Téléphonique et Télégraphique</i>
CP	<i>Cyclic Prefix</i>
DV	<i>Distance Vector</i>
DWDM	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i>
EDFA	<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i>
EON	<i>Elastic Optical Network</i>
EOP	<i>Elastic Optical Path</i>
FA-RSA	<i>Fragmentation-Aware Routing and Spectrum Assignments</i>
FDM	<i>Frequency Division Multiplexing</i>
FEC	<i>Forward Error Correction</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FIFO	<i>First In First Out</i>
FS	<i>Frequency Slots</i>
FWDM	<i>Flexible Optical Wavelength Division Multiplexing</i>
GA	<i>Genetic Algorithm</i>
<i>GB</i>	<i>Guard Band</i>
HC	<i>Hybrid Communication</i>
HLF	<i>Highest Line rate First</i>
IDFT	<i>Inverse Discrete Fourier Transform</i>
IFFT	<i>Inverse Fast Fourier Transform</i>

IP	<i>Internet Protocol</i>
ILP	<i>Integer Linear Programming</i>
ISI	<i>Inter-Symbol Interference</i>
ITU-T	<i>International Telegraph Union – Telecommunication Standardization Sector</i>
LCAS	<i>Link Capacity Adjustment Scheme</i>
LDF	<i>Longest Distance First</i>
LIFO	<i>Last In First Out</i>
LS	<i>Link State</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>
MDF	<i>Most Demanding First</i>
MSF	<i>Most Subcarriers/ Slices First</i>
NE	<i>Network Element</i>
NP	<i>Nondeterministic Polynomial Time</i>
NSFNET	<i>National Science Foundation Network</i>
NZDSF	<i>Non-Zero-Dispersion-Shifted Fiber</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing</i>
OSNR	<i>Optical Signal-to-Noise Ratio</i>
OTN	<i>Optical Transport Network</i>
OTT	<i>Over-The-Top</i>
OXC	<i>Optical Cross Connect</i>
PMD	<i>Polarization Mode Dispersion</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
QoT	<i>Quality of Transmission</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>

Rand	<i>Random</i>
RCGE	<i>Request Classification Gene Encoding</i>
ROADM	<i>Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer</i>
RMLSA	<i>Routing, Modulation Level and Spectrum Assignment</i>
RMSA	<i>Routing, Modulation and Spectrum Assignment</i>
RS	<i>Random Services</i>
RSA	<i>Routing and Spectrum Assignment</i>
RWA	<i>Routing and Wavelength Assignment</i>
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>
SLICE	<i>Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Network</i>
SSMF	<i>Standard Single-Mode Fiber</i>
TDM	<i>Time Division Multiplexing</i>
VC	<i>Virtual Concatenation</i>
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>
WSS	<i>Wavelength Selective Switching</i>
WRN	<i>Wavelength Routed Network</i>
WXC	<i>Wavelength Cross Connect</i>



## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	matriz de adjacência (ou de custo)
$Bw$	largura de banda
$Bw_{OFDM}$	largura de banda do sinal OFDM
$c$	velocidade da luz na fibra óptica
$C_{i,k}$	representa uma rota da demanda $i$ dentre os $k$ possíveis caminhos
$C$	arranjo de células com a quantidade total de conexões referentes a uma mesma requisição
$C_n$	sinal complexo OFDM
$D$	matriz de rota e demanda
$d_n$	representa a $n$ -ésima demanda de $D$
$dn$	nó de desvio no algoritmo de Yen
$E$	conjunto de duplas de conexões simples em uma rede óptica
$ E $	quantidade de conexões simples em uma rede óptica
$e$	representa um enlace de $E$
$e_{i,j}$	representa o enlace entre os nós $i$ e $j$
$F$	matriz com a quantidade de fatias espectrais utilizadas para cada uma das conexões possíveis
$f_{(i,1)}$	representa um elemento da matriz $F$
$f_1$	função de aptidão (quantidade de enlaces compartilhados na EON)
$f_2$	função de aptidão (fatias espectrais totais utilizadas na EON)
$f_i$	frequência final do sinal OFDM
$f_0$	frequência inicial do sinal OFDM
$f_s$	frequência de amostragem do sinal OFDM
$k$	quantidade de rotas mais curtas definidas pelo algoritmo de Yen

$L$	matriz com a quantidade de enlaces compartilhados por duas ou mais conexões
$l_{(i,j)}$	representa um elemento da matriz $L$
$l_0$	máxima distância encontrada na rede
$m(t)$	informação binária do sinal OFDM
$N$	quantidade de subportadoras requeridas pelo símbolo OFDM
$N_i$	quantidade total de fatias espectrais requeridas
$n$	quantidade máxima de nós na EON
$n_i$	quantidade de fatias espectrais da demanda
$o_i$	nó de origem
$P$	arranjo de células referente ao tráfego (Conexão x Distância)
$P(d)$	conjunto de rotas pré-definidas para a demanda $d$
$p_{i,k}$	representa uma rota $k$ definida pelo algoritmo de Yen para a demanda $i$ , sendo que $p_{i,k} \in P$
$Q_i$	conjunto de pares de rotas $o_i$ e $t_i$
$q_n$	sinal OFDM em quadratura
$R$	volume de tráfego (capacidade ou taxa de dados) do sinal original em uma rota da EON baseada em OFDM
$R'$	volume de tráfego (capacidade ou taxa de dados) do sinal de saída do demodulador em uma rota da EON baseada em OFDM
$R_0$	capacidade associada ao caminho óptico com a máxima distância
$s$	fatia spectral ( <i>slot</i> )
$S$	conjunto de fatias espectrais ( <i>slots</i> ) presentes na EON
$ S $	quantidade máxima de fatias espectrais ( <i>slots</i> ) presentes em cada enlace da EON
$S_{OFDM}(m)$	sinal OFDM amostrado em banda básica
$T$	período de amostragem do sinal OFDM

$t_i$	nó de destino
$T_g$	tempo de guarda do sinal OFDM
$T_m$	período do símbolo OFDM
$T_s$	período de amostragem do sinal OFDM
$T_U$	tempo útil do sinal OFDM
$V$	conjunto de nós ou vértices de uma rede óptica
$ V $	quantidade de nós ou vértices em uma rede óptica
$x_i$	valor requerido pela demanda (fatias espectrais ou taxa de transmissão)
$\lambda$	comprimento de onda
$\rho$	eficiência espectral, expressa em bits/símbolo
$\omega_n$	frequência angular digital da portadora do sinal OFDM
$\phi$	largura de banda espectral
$\pi$	constante matemática ( $\approx 3,14159265359$ )

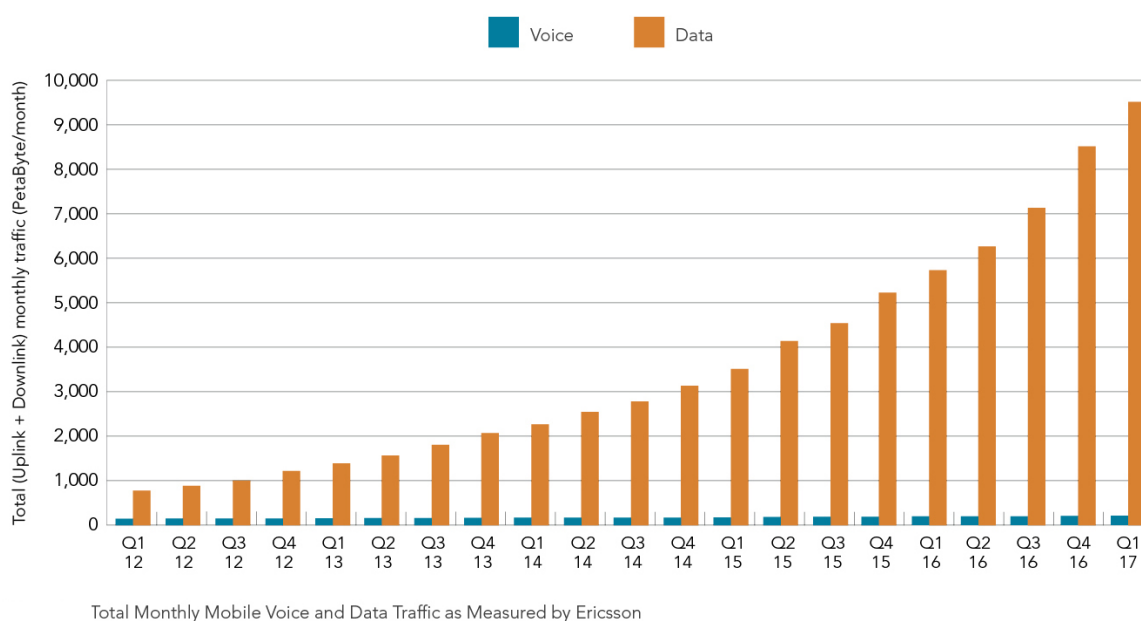
# SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>21</b>
<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>25</b>
<b>ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....</b>	<b>27</b>
<b>1. Roteamento, Multiplexação e Alocação do Espectro em Redes Ópticas Elásticas .....</b>	<b>28</b>
<b>1.1. Redes Ópticas Elásticas .....</b>	<b>28</b>
<b>1.2. A Técnica OFDM .....</b>	<b>30</b>
<b>1.2.1. O Intervalo de Guarda (Prefixo Cíclico) .....</b>	<b>31</b>
<b>1.3. EONs baseadas em OFDM .....</b>	<b>31</b>
<b>1.4. Descrição dos problemas RSA e RMSA .....</b>	<b>35</b>
<b>1.4.1. EONs Estáticas e Dinâmicas.....</b>	<b>36</b>
<b>1.4.1.1. Solução dos Problemas RSA e RMSA off-line .....</b>	<b>37</b>
<b>2. Problemas Constituintes .....</b>	<b>38</b>
<b>2.1. Introdução a Grafos.....</b>	<b>38</b>
<b>2.2. Algoritmos de Roteamento .....</b>	<b>40</b>
<b>2.2.1. Algoritmo de Dijkstra.....</b>	<b>41</b>
<b>2.2.2. Algoritmo de Yen .....</b>	<b>42</b>
<b>2.3. A Técnica OFDM em EONs .....</b>	<b>45</b>
<b>2.3.1. Espectro OFDM em EONs .....</b>	<b>46</b>
<b>2.3.2. Escolha da Modulação .....</b>	<b>50</b>
<b>2.4. Modelagem dos Problemas RSA e RMSA para uma EON.....</b>	<b>53</b>
<b>3. Algoritmo “Voraz” .....</b>	<b>57</b>
<b>3.1. RSA e RMSA usando Algoritmo “Voraz” .....</b>	<b>57</b>
<b>3.1.1. Algoritmo “Voraz” Proposto .....</b>	<b>58</b>
<b>3.1.2. Resultados do Algoritmo “Voraz” para Rede de 6 Nós .....</b>	<b>60</b>
<b>3.1.3. Resultados do Algoritmo “Voraz” para NSFNET .....</b>	<b>65</b>
<b>4. Algoritmo Genético .....</b>	<b>70</b>
<b>4.1. RSA e RMSA usando Algoritmo Genético.....</b>	<b>71</b>
<b>4.1.1. Operadores Genéticos do GA.....</b>	<b>72</b>
<b>4.1.2. Funções de Aptidão para o GA.....</b>	<b>75</b>
<b>4.1.2.1. Minimização do Compartilhamento de Rotas.....</b>	<b>75</b>
<b>4.1.2.2. Minimização das Fatias Espectrais Utilizadas .....</b>	<b>76</b>
<b>4.1.2.3. Minimização de Rotas e Fatias Espectrais .....</b>	<b>77</b>

4.1.3. Algoritmo GA Proposto .....	77
4.1.4. Resultados do GA para Rede de 6 Nós.....	80
4.1.5. Resultados do GA para NSFNET .....	90
5. Considerações Finais .....	95
5.1. Resultados Gerais para Rede de 6 Nós .....	96
5.2. Resultados Gerais para NSFNET .....	101
Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros .....	106
REFERÊNCIAS.....	108
Apêndice A – Matriz da Rede de 6 Nós aplicada ao Problema RSA .....	112
Apêndice B – Matriz da NSFNET aplicada ao Problema RSA.....	115

## INTRODUÇÃO

Os sistemas de telecomunicações estão passando por mudanças fundamentais, associadas ao desenvolvimento e à integração de diversas tecnologias de rede. Conseqüentemente, tornam-se cada vez mais complexos, em virtude da crescente demanda por tráfego de usuários, conforme pode ser visto na Figura 1, que apresenta o tráfego mensal de voz e dados nas redes móveis entre os anos de 2012 e 2017. Esse crescimento é resultado da expansão das quantidades de aplicações e de diferentes serviços de dados, principalmente para serviços OTT (*Over-The-Top*) de vídeo, imagens, voz, dentre outros. Isto exige redes ópticas de transporte eficientes e flexíveis, capazes de suportar conexões com variadas taxas e larguras de banda.



**Figura 1 – Tráfego total mensal em redes móveis, 2012 – 2017 [1].**

Um meio de transmissão capaz de suportar essa enorme demanda por banda é a fibra óptica. A tecnologia mais adotada nestes meios físicos de comunicação é a de multiplexação por divisão em comprimento de onda – WDM (*Wavelength*

*Division Multiplexing*), por permitir maior exploração da grande largura de banda de fibras ópticas [2]. Os modernos sistemas WDM comerciais com detecção coerente são capazes de oferecer taxas de 40 a 100 Gb/s por canal (comprimento de onda). Os canais WDM são posicionados em grades fixas estabelecidas pelo Setor de Normatização das Telecomunicações da União Internacional de Telecomunicações (ITU-T – *International Telecommunication Union-Telecommunication Standardization Sector*), com espaçamentos de 12,5 GHz, 25 GHz, 50 GHz ou 100 GHz [3]. As recomendações ITU-T estabelecem, ainda, que todos os canais em um enlace WDM transportem na mesma taxa.

A divisão do espectro em *slots* com largura de banda fixa nas redes WDM dificulta a transmissão em altas taxas por longas distâncias e inflexibiliza as taxas de transmissão em cada comprimento de onda [4]. Esta imposição reduz a eficiência na utilização dos recursos em função das diferentes granularidades das demandas geradas pelos clientes.

Em uma rede WDM, o atendimento a conexões corresponde ao processo de roteamento e alocação do comprimento de onda, usualmente descrito como problema RWA (*Routing and Wavelength Assignment*) [4][5]. A rede resultante é denominada rede com roteamento por comprimento de onda – WRN (*Wavelength Routed Network*) [5]. Cada comprimento de onda na rede WDM é separado dos adjacentes por uma banda de guarda (grades ITU-T), visando garantir a qualidade do sinal e sua filtragem pelos receptores. Esta configuração não permite granularidade variável, isto é, não permite acomodar conexões com distintas capacidades, mais adequadas ao atual perfil de tráfego em redes de comunicação.

Para contornar esta dificuldade, foi introduzido o conceito de rede óptica elástica – EON (*Elastic Optical Network*) [4]. Numa EON, seria possível alocar taxa – e, conseqüentemente, largura de banda – de modo adaptativo, atendendo a demanda dinâmica de tráfego; ou seja, canais com capacidade (taxa de transmissão, largura de banda e alcance) variável. Estas redes empregam normalmente a modulação por divisão em frequências ortogonais – OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*) [4][5], que permite minimizar os efeitos nocivos das dispersões cromáticas e do modo de polarização que surgem nos enlaces ópticos de longa distância e de alta taxa de transmissão [2].

O desenvolvimento de uma EON requer inovações tanto de *hardware* (mais dispendioso e complexo) quanto de *software*, além do desafio de controlar e gerenciar uma rede com tais características, incluindo o estabelecimento de caminhos ópticos elásticos.

Em uma EON, o atendimento às conexões é descrito de duas maneiras, sendo o primeiro por um problema de roteamento e alocação de comprimentos de onda conhecido como RSA (*Routing and Spectrum Assignment*) e o outro por um problema de roteamento e alocação de modulações e comprimentos de onda (RMSA – *Routing, Modulation and Spectrum Assignment*). Estes, assim como o RWA, é um problema NP-Completo<sup>1</sup> [5]. Entretanto, os problemas RSA e RMSA são mais desafiadores do que o problema RWA, pois implica não apenas na definição de rotas físicas na rede (roteamento) e alocação de comprimentos de onda, mas também no estabelecimento da capacidade de cada comprimento de onda, representada pela taxa de transmissão, no caso do problema RMSA, que por sua vez está condicionada ao comprimento do enlace. Os problemas RSA e RMSA podem ser decompostos em subproblemas a serem analisados em separado, sendo estes descritos a seguir.

O problema de roteamento é resolvido pelos algoritmos de Dijkstra e Yen [6]. O algoritmo de Dijkstra determina o caminho de menor custo entre uma fonte e todos os possíveis destinos na rede, montando, assim, uma tabela de roteamento para a fonte; após uma determinada quantidade de iterações, definem-se os caminhos de menor custo para os destinos. O algoritmo de Yen visa encontrar os *k* caminhos mais curtos entre a origem e o destino.

O problema de alocação espectral, assim como da escolha da modulação utilizada no problema RMSA, é característico em sistemas que utilizam OFDM. Cada subportadora transporta uma baixa taxa de dados que depende da modulação empregada. Assim, tem-se potencialmente uma maior granularidade nas taxas alocadas do que em redes WDM. Desta forma, é possível satisfazer diferentes demandas por tráfego, selecionando adequadamente os *slots* de frequência (quantidade de subportadoras) e a modulação nela empregada, alocando flexivelmente os transceptores e criteriosamente inserir e retirar os canais em cada nó da rede. Porém, o comprimento máximo do enlace será

---

<sup>1</sup> NP significa *Nondeterministic Polynomial Time*.



determinado pela modulação empregada. Quanto mais bits forem comportados por símbolo, menor o alcance do enlace. Assim, há uma interdependência entre rotas, modulação e quantidade de portadoras que deve ser resolvida no problema RMSA especificamente.

Uma solução para o problema RMSA deve fornecer as rotas, modulações e bandas usadas para atender às diferentes demandas dos usuários da rede ótica. Nesta dissertação, são estudadas duas abordagens para resolver este problema e o RSA. A primeira adota um algoritmo conhecido como “ganancioso”, “guloso” ou “voraz” (*greedy algorithm*), no qual se toma uma decisão que parece a mais promissora em um dado momento, sem jamais reconsiderá-la, independentemente das consequências futuras de tal decisão [7]. O outro algoritmo, que é o foco principal desta dissertação, emprega a computação evolucionária, para obter soluções [8].

Há na literatura alguns trabalhos similares, tais como [9] e [10], que utilizam o GA (*Genetic Algorithm* – Algoritmo Genético) para a solução do problema de roteamento e alocação de espectro em uma EON. Um aspecto fundamental do GA é a definição de uma função objetivo (*fitness function*) para descrever os problemas RSA e RMSA, que avalia a qualidade da solução obtida. Assim, nesta dissertação, serão apresentadas três funções objetivo, desenvolvidas para o GA proposto: uma que visa minimizar a quantidade de conexões compartilhadas entre as conexões pré-estabelecidas; outra que objetiva minimizar a quantidade total de fatias espectrais utilizadas na rede e, por último, a combinação das duas. Além disso, foram utilizados dois tipos de operadores genéticos de recombinação: o primeiro gera um novo “cromossomo” com base na mescla dos “genes” dos seus progenitores; já a outra forma de recombinação faz uma troca de “genes”, de forma aleatória, de apenas um “gene” dentre àqueles pertencentes aos “cromossomos” progenitores, gerando um novo “cromossomo”. A mutação ocorre através da substituição aleatória de algum dos “genes” pertencentes ao “cromossomo” gerado pelos progenitores.

Considerando os problemas RSA e RMSA em EONs, deve-se encontrar uma rota para cada requisição e alocar uma quantidade de fatias espectrais para a mesma, de forma que a parte utilizada do espectro seja minimizada. Duas diferentes formas de identificar estes problemas seriam a aplicação em redes *off-*

*line* ou *on-line*. Na primeira, todas as requisições são conhecidas antes de serem feitas as escolhas de caminho e as atribuições de fatias espectrais. No segundo, as requisições chegam seguindo uma sequência de chamadas, em tempo real, sendo os caminhos e os recursos espectrais de cada requisição determinados no momento da sua chegada [11]. Nesta dissertação todo estudo é feito para solucionar os problemas RSA e RMSA em EONs *off-line*, uma vez que os padrões de tráfego na rede são razoavelmente bem conhecidos com antecedência e as variações de tráfego ocorrem em escalas de tempo longas, sendo uma técnica eficaz para a provisão de um conjunto de conexões semipermanentes.

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em [9] Émile Archambault et al. investigaram o problema RSA *off-line* em EONs sem filtro, que usam uma arquitetura passiva de transmissão e seleção para oferecer agilidade na rede, isto é, menor processamento eletro-óptico. O problema RSA em redes sem filtro elásticas é formulado usando a programação linear inteira (ILP) para obter soluções ótimas para redes pequenas. Devido à complexidade do problema RSA, foram utilizados o algoritmo “voraz” e o GA, em redes ópticas elásticas sem filtro, considerando cenários de tráfego realistas. Foram consideradas quatro políticas para ordenar as demandas, a aleatória (Rand), a de maior distância primeiro (LDF), a de maior taxa de linha primeiro (HLF) e a mais exigente primeira (MDF). O algoritmo “voraz” realizou o roteamento e a atribuição de espectro nas fases subsequentes e encontrou soluções RSA viáveis em um curto tempo computacional. Já o GA resolveu conjuntamente os problemas de roteamento e atribuição de espectro e obteve soluções de qualidade superior à custa de um tempo computacional mais longo. Os resultados da simulação mostram que, para redes de grande porte, é possível obter economias significativas de largura de banda em soluções sem filtro flexíveis devido ao aumento da eficiência do espectro. Em [10] Cassio Batista et al. apresentaram uma abordagem de GA para resolver o problema de roteamento e atribuição de comprimento de onda (RWA) em redes óticas WDM com tráfego

estático (*off-line*). Os resultados da simulação mostraram que o GA teve um desempenho melhor do que as abordagens comumente utilizadas.

Em [12] Lijun Li et al. apresentaram a alocação elástica de recursos para tráfegos *multicast*, ou seja, para múltiplos destinatários simultaneamente, em redes ópticas baseadas em OFDM. O problema de RSA (*Routing and Spectrum Assignment*) foi decomposto em dois subproblemas, ou seja, o de roteamento baseado na codificação de rede e o de alocação de espectro com base na estratégia MSF, na qual as conexões que requerem uma maior quantidade de fatias espectrais tem prioridade; sendo resolvidos sequencialmente. Os resultados da simulação mostraram que o mecanismo RMSA proposto pode alocar recursos de espectro de maneira eficiente e flexível para o tráfego *multicast* de granularidade múltipla. Em comparação com outros esquemas RSA apresentados no trabalho, o esquema RSA proposto foi mais eficiente para utilização de recursos de espectro e balanceamento de carga.

Em [13] Xiao Luo et al. buscaram otimizar as diversas formas de transmissão de dados em EONs, empregando um esquema de comunicação híbrida (HC – *Hybrid Communication*). Propôs-se um modelo ILP para formular o problema RMLSA (*Routing, Modulation Level and Spectrum Assignment*) sob um esquema de comunicação híbrida (HC-RMLSA), ou seja, a transmissão de dados pode ser do tipo *unicast* (1 origem e 1 destino), *anycast* (1 origem e 1 destino, sendo este selecionado dentre outros), *multicast* (1 origem e vários destinos) ou *manycast* (1 origem e vários destinos, sendo este selecionado dentre outros). Uma abordagem baseada no algoritmo genético HC-RCGE-GA (*Hybrid Communication-Request Classification Gene Encoding-Genetic Algorithm*) é aplicado, sendo que os resultados apresentados demonstraram a alta eficiência do HC-RCGE-GA, lidando com diferentes proporções mistas do problema HC-RMLSA de múltiplos tráfegos, em cenários estáticos e dinâmicos, realizando uma comparação com outros algoritmos de referência.

## ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação apresenta, no Capítulo 1, as definições necessárias sobre redes ópticas elásticas (EONs) utilizando o método de transmissão OFDM, os problemas RSA e RMSA e os métodos aplicados na sua solução destes; sendo apresentada a aplicação dos problemas RSA e RMSA na Seção 1.4; no Capítulo 2, é feita uma formulação teórica do subproblema de roteamento, onde são apresentados alguns conceitos sobre Grafos, roteamento e algoritmos aplicados na solução deste problema (ressaltando os de Dijkstra e Yen); na Seção 2.3, é apresentado o estudo feito sobre modulação em uma EON; a alocação de espectro com o uso dos algoritmos “Voraz” é apresentado na Seção 3.1 e com o GA na Seção 4.1, com simulações na linguagem computacional MatLab para uma EON simples de 6 nós e a NSFNET (*National Science Foundation Network*) [14]; em seguida são apresentados os resultados no final de cada capítulo, sendo realizadas comparações e considerações sobre a utilização do algoritmo “voraz” e do GA para as redes analisadas e, por fim, são apresentadas as conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

## 1. Roteamento, Multiplexação e Alocação do Espectro em Redes Ópticas Elásticas

### 1.1. Redes Ópticas Elásticas

Ao contrário dos caminhos ópticos convencionais, os caminhos ópticos elásticos (EOP – *Elastic Optical Path*) [4] podem transmitir múltiplas taxas de dados simultaneamente, através da segmentação de um único comprimento de onda em “fatias espectrais” ou subportadoras (*slots*), com base na técnica de transmissão OFDM e a agregação de múltiplos *slots* ou usando diferentes modulações [5], conforme exemplificado na Figura 2. Como resultado uma EON oferece acomodação eficiente, escalável e adaptável a tráfegos de dados de baixa ou alta demanda, permitindo adequar-se, de acordo com o volume real de tráfego dos *hosts* a ela conectados [11].

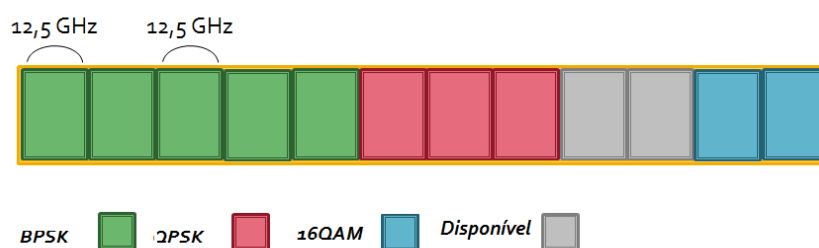


Figura 2 – Divisão dos recursos espectrais em uma EON [11].

Entretanto, as restrições de contiguidade (as fatias de espectro alocadas a uma conexão devem ser adjacentes) e continuidade (as mesmas fatias de espectro devem ser alocadas a uma dada conexão ao longo de toda a rota física) do espectro devem ser levadas em consideração para atender às demandas requeridas na EON. Na Figura 2, fatias espectrais pertencentes a uma mesma demanda são contíguas (mesma cor) e deverão ser contínuas (as mesmas) ao longo de toda a sua rota, entre a origem e o destino.

Além de conseguir ajustar dinamicamente os recursos espectrais de acordo com a demanda de largura de banda, outra grande vantagem das EONs é a sua alta capacidade de restauração adaptativa em caso de sérios problemas na rede [11]. Se por acaso ocorresse uma falha em alta escala, as rotas primárias e secundárias seriam interrompidas e as rotas de desvio (*backup*) não seriam capazes de prover os recursos espectrais suficientes para transportar a taxa de dados original e/ou o tamanho da rota de desvio poderia exceder o alcance óptico do sinal original. No entanto, a alocação adaptativa de espectro e a otimização de formatos de modulação e de largura de banda das EONs podem garantir uma conexão mínima para os tráfegos de alta prioridade [7] garantindo suas sobrevivências. A sobrevivência de uma rede refere-se à sua capacidade em reconfigurar-se, de modo a restaurar as interconexões afetadas por uma falha. Em uma rede óptica, três tipos de falhas são geralmente consideradas: falha de conexão (devido a cortes nos cabos ópticos), falha de nó (devido a um mau funcionamento do *switch* ou roteador) e falha no canal de comunicação (causado pela falha em equipamentos específicos, impossibilitados de transmitir ou receber através desse canal).

Os esquemas de proteção são realizados no projeto da rede ou em sua fase de planejamento, visando antecipar-se a falhas. Recursos de *backup* reservados por esses esquemas podem ser dedicados a uma única conexão ou compartilhados entre várias conexões. Durante a operação normal da rede, os recursos reservados permanecem inativos e, quando da ocorrência de uma falha, as conexões afetadas são redirecionadas para recursos reservados de acordo com o plano apurado na fase de planejamento (normalmente, no momento em que uma conexão foi estabelecida). Em uma EON, o problema de assegurar a proteção dedicada ou compartilhada em conexões pré-estabelecidas pode ser visto como um variante dos problemas RSA e RMSA, com restrições adicionais para justificar os caminhos de *backup* e compartilhamento (se houver) do espectro [7].

## 1.2. A Técnica OFDM

A técnica de transmissão OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing* – Multiplexação por Divisão de Frequências Ortogonais) [11] emprega múltiplas portadoras, sendo amplamente utilizada, devido a sua eficiência espectral. Os canais de transmissão possuem respostas impulsivas dispersivas com o tempo, provocando interferências entre símbolos (ISI – *Inter-Symbol Interference*), que devem ser eliminadas antes da demodulação do sinal pelo receptor. Para que esse efeito seja reduzido, sem alterar a taxa de transmissão de dados, é necessário aumentar a duração do símbolo e assim reduzir a ISI. Para isso aumenta-se a quantidade de canais de transmissão, com baixa taxa em cada um e, conseqüentemente, aumentando os períodos dos símbolos neles trafegados. Por exemplo, se admitirmos que o esquema de modulação é alterado, ao se transmitir por  $N$  canais ao mesmo tempo, pode-se ter uma duração de símbolos  $N$  vezes maior, enquanto se mantém a taxa de transmissão de dados inalterada [15].

Um dos primeiros exemplos de uso do OFDM foi o MODEM KINEPLEX para aplicações militares [16]. Porém, com o trabalho de Cooley e Tukey, sobre a FFT (*Fast Fourier Transform* – Transformada Rápida de Fourier) [11] é que a técnica teve um impulso, definindo a entrada do OFDM na era digital [15].

O sinal OFDM pode ser discretizado no domínio do tempo [15]. Sendo sua frequência de amostragem o inverso do período  $T$ , a frequência angular digital  $\omega_n = 2\pi f_n$ , as frequências das subportadoras dadas por  $f_s = n/T$  e o intervalo das amostras do sinal OFDM igual a  $T_m = mT_s$ , onde  $m = 0, 1, 2, 3, \dots, N - 1$ , sendo que  $T_s$  representa o tempo do símbolo do sinal OFDM e, portanto,  $T = NT_s$ , é possível escrever a Equação 1 [15]

$$S_{OFDM}(m) = \Re \left[ \sum_{n=0}^{N-1} C_n e^{\left(\frac{-j2\pi nm}{N}\right)} \right]$$

**Equação 1**

Assim, pela Equação 1, o sinal OFDM poder ser obtido através da IDFT (*Inverse Discrete Fourier Transform* – Transformada Discreta de Fourier Inversa) do vetor  $C_n$  que possui  $N$  símbolos complexos, porém apenas a parte real deste sinal é transmitida.

### 1.2.1.O Intervalo de Guarda (Prefixo Cíclico)

Na técnica OFDM, as subportadoras de frequências diferentes e ortogonais entre si são moduladas por símbolos (BPSK, QPSK ou M-QAM), gerando o símbolo OFDM a transmitir a partir da soma das subportadoras moduladas. Num cenário ideal (canal impulsivo), não haveria qualquer problema com a transmissão de símbolos OFDM sequencialmente, mas caso existisse um retardo no  $n$ -ésimo símbolo a sua parte final se sobreporia ao seguinte, ocorrendo uma ISI. Para mitigar isso, insere-se um atraso entre os símbolos, de modo que o primeiro não interfira no seguinte, mesmo após a dispersão pelo canal. Entretanto, há um problema prático, pois a “lacuna” criada deve ser preenchida. A solução encontrada foi “copiar” uma parte do final do sinal transmitido, repetindo-a na lacuna. Esta parte copiada, “prefixada” no início do símbolo OFDM, é definida como “prefixo cíclico” (CP – *Cyclic Prefix*), ou seja, adiciona-se um tempo de guarda entre os símbolos, que seja maior do que o espalhamento temporal do canal, sem prejudicar de forma intensa a taxa útil do sistema [15].

### 1.3. EONs baseadas em OFDM

O objetivo de uma EON é prover eficiência espectral no transporte de dados de diversos clientes através da introdução de um algoritmo de roteamento flexível e granular no domínio óptico, onde os recursos espectrais necessários para um dado *light path* (caminho luminoso ou rota física) são divididos do total disponível e alocados adaptativamente (taxa variável) pela rota [17].

A EON apresentada na Figura 3 é composta por comutadores ópticos (OXC – *Optical Cross Connect*) [17], também chamados de comutadores de comprimento



de onda (WXC – *Wavelength Cross Connect*) [17], que podem trabalhar com largura de banda variável (BV-WXC – *Bandwidth Variable WXC*) [17] e multiplexadores *add-drop* ópticos reconfiguráveis (ROADM – *Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer*) [18]. Há ainda os *transponders* de largura de banda variável (BVT – *Bandwidth Variable Transponder*) baseados em OFDM [18].

Os elementos básicos OXC na Figura 3 são chaves ópticas responsáveis pela comutação, chaveamento e roteamento de sinais em uma rede óptica, sendo capazes de suportar um caminho óptico elástico, alocando conexões cruzadas que correspondem à largura de banda do espectro, além de configurar a janela de comutação de uma maneira flexível de acordo com a largura espectral do sinal óptico recebido [17]. Assim, estes elementos de rede devem ser capazes de permitir a retirada e inclusão de comprimentos de onda ( $\lambda$ ) para qualquer direção e da retirada e inclusão de um mesmo  $\lambda$  para diferentes direções [17], sendo nestes casos denominados ROADM, no qual a multiplexação do sinal é realizada de maneira flexível, sem emprego de processamento eletrônico.

Algumas características dos equipamentos OXC são a facilidade de aumento de capacidade, grande quantidade de portas em cada equipamento, capacidade de chaveamento com alta confiabilidade, baixa perda, boa uniformidade dos sinais ópticos (independentemente dos comprimentos das rotas físicas) e capacidade de comutar uma rota específica sem interromper qualquer outra rota óptica.

O BVT é outro dispositivo capaz de suportar múltiplas taxas de dados transmitidas, alcançando uma alta utilização dos recursos espectrais disponíveis na rede, de acordo com a demanda do cliente e das condições do canal [17]. Este equipamento é baseado na técnica OFDM, que consiste de uma fonte óptica variável e um modulador óptico, sendo possível controlar a quantidade de subportadoras através do ajuste do dispositivo emissor de luz para diferentes frequências de oscilação [17].

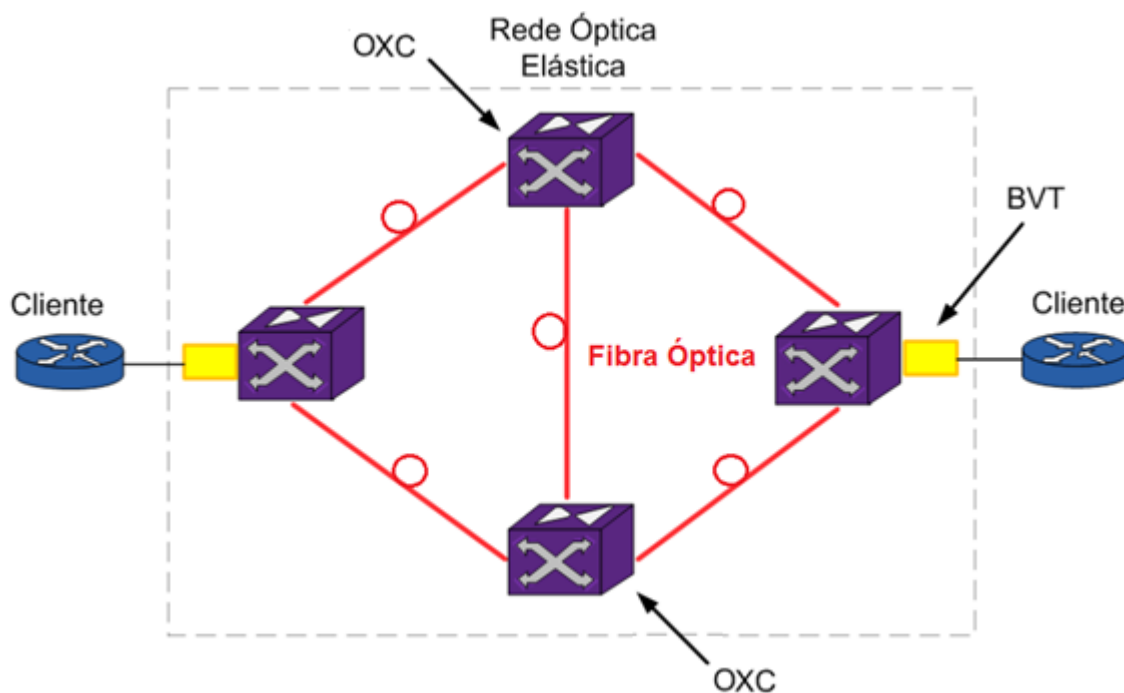


Figura 3 – Arquitetura de uma Rede Óptica Elástica.

O BVT precisa gerar o sinal óptico utilizando apenas recursos espectrais necessários, de acordo com a taxa de dados do cliente e das condições do canal, visando alcançar uma alta utilização dos recursos espectrais [17]. Para alcançar este objetivo, deve-se realizar o ajuste da quantidade de subportadoras, através do ajuste da fonte luminosa com diferentes frequências de oscilação; modulação adaptativa e geração de sinal, onde diversos canais OFDM podem ser alocados juntos, limitado pela capacidade máxima da quantidade de subportadoras.

Quando o sinal é transmitido por diversos equipamentos OXC, as subportadoras das bordas do espectro sofrem uma penalidade maior devido às imperfeições dos filtros ópticos seletivos de comprimento de onda (WSS – *Wavelength Selective Switching*) [17]. Com a inclusão de uma banda de guarda (*GB – Guard Band*) no sinal óptico OFDM transmitido entre caminhos ópticos adjacentes, este problema pode ser diminuído ao custo de reduzir a eficiência espectral [17]. Em um WSS com largura de banda variável (BV-WSS – *Bandwidth Variable WSS*) [17], os sinais ópticos recebidos com larguras de banda ópticas diferentes e frequências centrais podem ser encaminhados para qualquer uma das fibras ópticas de saída [18].

As redes ópticas convencionais possuem eficiência limitada devido à sua natureza rígida, pois quando o volume de tráfego de um cliente não é suficiente para utilizar toda a capacidade disponível, uma parte da largura de banda é desperdiçada. Entretanto, o aumento da eficiência espectral em uma EON baseada em OFDM apresenta grande vantagem quando comparada com um caminho óptico de largura de banda fixa de uma rede WDM [17].

Uma EON baseada em OFDM apresenta como principais benefícios o suporte à agregação de serviços com granularidade flexível, possibilitando acomodar diversas taxas de transmissão de dados; alta eficiência espectral através da alocação do espectro do sinal de maneira flexível, variando de acordo com a taxa de dados; o ajuste do formato de modulação e da quantidade de subportadoras possibilita conseguir alcances diferentes, de acordo com a necessidade requerida; e o consumo de energia eficiente, devido à possibilidade de se omitir subportadoras desnecessárias [17]. Além disso, as EONs, por serem adaptativas, atenuam o problema da falta de granularidade alocando dinamicamente o mínimo de recursos espectrais necessários no domínio óptico, proporcionando uma transmissão de dados eficiente, escalável e compatível com o volume atual do tráfego do usuário [18].

Para que as EONs se concretizem, algumas exigências devem ser atendidas através [19]:

1. da especificação da demanda, com fatias espectrais acomodando eficientemente o volume de tráfego com taxas diferentes;
2. do desenvolvimento de novos algoritmos RSA e RMSA, visando o planejamento da rede e alocação dinâmica dos recursos, permitindo conferir resiliência à rede, de tal modo que ela possa se recuperar de possíveis falhas;
3. da proposição de esquemas de gestão e controle (QoS); e
4. de estratégias para eficiência energética, reduzindo o consumo de energia na rede.

## 1.4. Descrição dos problemas RSA e RMSA

Em uma EON, os recursos espectrais necessários em uma determinada rota são “retirados” do conjunto disponível e alocados de forma adaptativa da origem ao destino, ao longo do caminho óptico. Cabe ressaltar que o espaçamento de canal em redes ópticas convencionais é fixo, assim os operadores de rede não precisam distinguir o próprio canal óptico e os recursos espectrais alocados em uma determinada rota, sendo que eles só precisam especificar a frequência central do canal óptico ao estabelecer a conexão óptica fim a fim. Entretanto, a frequência central e a largura espectral do recurso atribuído a um trajeto óptico são parâmetros variáveis em uma EON [18].

Uma vez que a largura de banda em uma EON varia, o estabelecimento e a terminação de diferentes conexões acabam resultando na divisão do espectro em diversos pequenos fragmentos não contíguos, assim como um disco rígido do computador sofre fragmentação, tornando impossível que novas requisições sejam atendidas [4]. Portanto, é comum quantificar os recursos do espectro utilizáveis na rede em unidades de frequência contíguas, com uma largura apropriada de, por exemplo, 12,5 GHz, como proposto na ITU-T G694.1 [3], sendo este um bloco de construção para os *slots* de frequência (FS – *Frequency Slots*) ou fatias espectrais.

Os problemas RSA e RMSA podem ser divididos em duas fases. A primeira etapa é criar uma lista de rotas com uma quantidade suficiente de unidades de fatias espectrais livres contíguas da origem ao destino e, no caso do problema RMSA, determinar o formato de modulação para cada par origem-destino para uma determinada taxa de bits, com base na distância total do caminho óptico utilizado. A segunda fase aloca unidades de fatias espectrais contínuas e contíguas à rota [5] para a solução de ambos os problemas, RSA e RMSA.

### 1.4.1.EONs Estáticas e Dinâmicas

Um dos principais desafios de uma EON é como determinar os recursos espectrais necessários e a alocação adaptativa dos recursos em um canal óptico. O espectro mínimo necessário é determinado pelas condições ao longo do caminho óptico que resultam na razão sinal-ruído (SNR – *Signal Noise Ratio*) e nas distorções lineares e não lineares, garantindo a taxa de dados necessária no alcance óptico [4].

Considerando o problema de roteamento e alocação do espectro em EONs, no qual são dados uma topologia de rede e um conjunto de requisições com demandas variadas (em termos de taxas de dados requeridas), deve-se encontrar uma rota para cada requisição e alocar uma quantidade de *slots* para a mesma, de acordo com a demanda requisitada; por exemplo, de forma que a parte utilizada do espectro seja minimizada, ou que sejam empregados menos enlaces ativos, dentre outros critérios possíveis. A aplicação de algoritmos visa melhorar o desempenho de uma EON no que diz respeito ao bloqueio, QoS e utilização do espectro, minimizando a extensão da fragmentação do espectro, sendo que, para tal abordagem, é necessário o desenvolvimento de métricas que quantifiquem o grau de fragmentação da rede [7].

Duas diferentes formas de identificar os problemas RSA e RMSA seriam em EONs *off-line* e *on-line*. No primeiro, todas as requisições são conhecidas antes de serem feitas as escolhas de caminho e as atribuições de fatias espectrais. No segundo, as requisições chegam seguindo uma ordem aleatória, sendo os caminhos e os recursos espectrais de cada requisição determinados no momento da sua chegada [11].

Em geral, os problemas RSA e RMSA *on-line* reservam espectro para possíveis expansões de demandas, porém tal reserva poderá prejudicar a necessidade de realocação do espectro em um momento futuro [4]. Os problemas RSA e RMSA *off-line* surgem sempre que os padrões de tráfego na rede são razoavelmente bem conhecidos com antecedência e as variações de tráfego ocorrem em escalas de tempo longos, sendo uma técnica eficaz para a provisão

de um conjunto de conexões semipermanentes [7]. Esta configuração de rede será a utilizada no estudo e simulações desta dissertação.

#### **1.4.1.1. Solução dos Problemas RSA e RMSA *off-line***

Visando facilitar a solução dos problemas RSA e RMSA *off-line*, estes foram separados em subproblemas constituintes dos RSA e RMSA que podem ser resolvidos sequencialmente.

O primeiro problema a ser resolvido refere-se ao roteamento físico da rede, onde aplica-se o algoritmo de Yen, baseado no de Dijkstra, descrito nas Seções 2.2.2 e 2.2.1, respectivamente.

A questão da modulação no problema RMSA está intimamente relacionada à distância total definida pelo melhor caminho encontrado e que proporcionaria solucionar ambos os problemas simultaneamente, ou seja, de roteamento e alocação de espectro, sendo apresentada em detalhes na Seção 2.3.

Visando solucionar o problema de alocação espectral, foram aplicados dois algoritmos. O primeiro emprega um método heurístico “ganacioso”, “guloso” ou “voraz” (*greedy heuristic methods*) [7], apresentado mais adiante no Capítulo 3. O segundo é um algoritmo evolucionário, apresentado com mais detalhes no Capítulo 4.

## 2. Problemas Constituintes

Os algoritmos de roteamento determinam o caminho que os dados percorrem entre o transmissor e o receptor em uma rede óptica, sendo que a meta natural é identificar o caminho de menor custo entre a fonte e o destino. Portanto, são utilizados grafos, que são um conjunto finito de nós ou vértices, formados pelos equipamentos de conexão cruzada (*cross-connects*) ópticos com largura de banda variável (BV OXC), com ramos (fibras ópticas) conectando estes nós, visando formular problemas de roteamento.

A seguir serão apresentadas as definições de grafo, ferramenta empregada para representar as conexões físicas das redes ópticas.

### 2.1. Introdução a Grafos

Formalmente um grafo  $G$  é uma estrutura  $(V, E)$  que consiste em um conjunto finito  $V$  de nós (ou vértices da rede) e um conjunto  $E$  de duplas de conexões simples, isto é, ponto a ponto entre  $o$ , nó de origem (fonte ou transmissor) e  $t$ , nó de destino (terminal, receptor ou sumidouro), ambos pertencentes a  $V$ .

Os grafos podem ser não direcionados ou direcionados. Um grafo não direcionado é formado por um conjunto finito de nós e de ramos, sendo cada ramo associado a dois vértices, porém a ordem dos vértices conectados é irrelevante. Já num grafo direcionado cada ramo é associado a dois vértices chamados de fonte (transmissor) e de alvo ou sumidouro (receptor). Desta forma, a ordem dos vértices conectados pelo ramo é relevante e os ramos passam a ser representados por setas, para indicar o sentido de conexão, isto é, cada seta tem origem no nó fonte e aponta para o nó alvo.

De um modo geral, pode haver ramos que conectam um nó a ele próprio, representando um laço, que é desenhado por uma linha (ou seta) com as duas extremidades em um mesmo nó. Além disso, um grafo pode, em princípio, ter dois ou mais ramos conectando os mesmos dois nós na mesma direção. Tais ramos são chamados de múltiplos ramos, sendo que em um diagrama cada ramo é

desenhado separadamente. Quando estas situações não acontecem, isto é, não há laços nem múltiplos ramos em um grafo este é chamado de simples. Cabe ressaltar que um grafo é completo quando cada par de nós está conectado a todos os outros nós e que subgrafos podem ser formados com a retirada de nós e ramos do grafo original. O grafo pode ainda ser dito conexo quando existe um ramo ligando cada par de nós distintos e, caso contrário, será dito desconexo.

Grafos rotulados têm informação associada a cada nó (rótulo do nó) como, por exemplo, o conjunto de rotas de uma companhia aérea forma um grafo rotulado, onde cada nó é uma cidade e o rótulo do nó é o nome da cidade.

Os ramos de um grafo podem ser chamados de ponderados quando possuírem um peso (ou custo) associado a cada ramo (escrito ao lado dos ramos). Por exemplo, uma rede de computadores pode ser representada por um grafo rotulado (cada nó é uma máquina rotulada pelo seu endereçamento IP e MAC) e ponderado, sendo que o peso pode ser o custo de utilização do canal de comunicação, o comprimento do enlace, a velocidade do enlace, dentre outros.

O grau de cada nó é representado pela quantidade de ramos que nascem ou morrem em cada nó, podendo ser desmembrado em grau de entrada (quantidade de ramos que morrem no nó) e grau de saída (quantidade de ramos que nascem no nó).

Uma forma conveniente de representar grafos é por meio da matriz de adjacência, onde um grafo de  $|V|$  é representado por uma matriz  $|V| \times |V|$ . Supondo que seja  $A$  esta matriz, os nós de um grafo ponderado são numerados de 1 a  $|V|$  e a matriz de adjacência  $A$  é definida como  $A_{ij} = p_{ij}$ , se houver um ramo entre os nós  $i$  e  $j$ , onde  $p_{ij}$  é o peso deste ramo e  $A_{ij} = \infty$  (infinito) caso contrário. Além disso, em um grafo direcionado, a linha  $i$  da matriz de adjacência representa os ramos que nascem no nó  $i$  e a coluna  $j$  os ramos que morrem no nó  $j$ , entretanto, se o grafo for não direcionado, a matriz  $A$  será simétrica.

Vimos do exposto que uma rota luminosa ou caminho óptico (*lightpath*) em um grafo é uma sequência de nós, tal que cada par de nós adjacentes seja conectados por um enlace. Assim, a rede óptica pode ser representada por um grafo que indica as conexões entre os nós e as características dos enlaces/ramos entre eles.



## 2.2. Algoritmos de Roteamento

A finalidade de um algoritmo de roteamento é, dado um conjunto de dispositivos de rede conectados por enlaces, descobrir um “bom” caminho entre a fonte e o destino. Normalmente um “bom” caminho é aquele que tem o “menor custo” [20].

Os algoritmos de roteamento podem ser de dois tipos: global ou descentralizado. Os algoritmos de roteamento global usam o conhecimento completo e global sobre a rede (conectividade e custo de enlaces), sendo mais conhecidos como algoritmos baseados em estado de enlace. Os algoritmos de roteamento descentralizado, por sua vez, utilizam o cálculo realizado de modo iterativo e tipicamente distribuído, como, por exemplo, os algoritmos baseados em vetores de distâncias.

Os algoritmos baseados no estado do enlace (LS – *Link-State-Based*) [20] devem conhecer a topologia da rede e os custos de cada enlace da rede, isto é, cada nó transmite pacotes contendo identidades e custos dos enlaces ligados a ele, sendo um exemplo o algoritmo de Dijkstra. Os algoritmos baseados no vetor de distâncias (DV – *Distance-Vector-Based*) [20] utilizam-se o princípio de Bellman-Ford (programação dinâmica), que fornece os registros da tabela de roteamento de um nó fonte e sugere a forma de comunicação vizinho para vizinho. Cada nó envia periodicamente sua própria estimativa de vetor de distância aos vizinhos e quando o nó recebe nova estimativa do vizinho, ele atualiza seu próprio DV usando a equação de Bellman-Ford.

De um modo geral, nos algoritmos DV, cada nó interage somente com os vizinhos diretamente conectados a ele e informa as estimativas de menor custo entre ele mesmo e todos os outros nós da rede (nós que ele sabe que existem). Já nos algoritmos LS, cada nó interage com todos os nós da rede (via *broadcast*) e informa somente os custos dos enlaces diretamente conectados a ele.

Com relação à robustez, quando há um mau funcionamento de um nó da rede, nos algoritmos LS, os nós podem informar custos de conexões incorretos, sendo que cada nó calcula sua própria tabela de roteamento. Já nos algoritmos DV, quando há um mau funcionamento de um nó da rede, o nó pode informar custo de

caminho incorreto, sendo que a tabela de cada nó é usada por outros e, portanto, pode haver propagação de erros pela rede.

### **2.2.1. Algoritmo de Dijkstra**

O algoritmo baseado no estado do enlace concebido por Edsger Wybe Dijkstra em 1956 e publicado em 1959 [21] soluciona o problema do caminho mais curto em um grafo que pode ser direcionado ou não direcionado, porém com ramos de peso não negativo. O algoritmo calcula o caminho de menor custo entre um nó fonte e todos os outros nós da rede, montando, assim, uma tabela de roteamento para este nó. Após  $k$  iterações, definem-se os caminhos de menor custo para  $k$  destinos.

O algoritmo de Dijkstra, para uma fonte  $u$  de uma rede com nós rotulados e ramos ponderados pode ser descrito pelo Algoritmo 1, que atua sobre o grafo  $(V, E)$  através da função de custo  $c(o, t)$  do enlace do nó de origem  $o$  ao nó de destino  $t$  (o custo será infinito se não houver ligação entre  $o$  e  $t$ ); sendo o valor atual do custo do caminho da fonte  $o$  ao destino  $t$  definido por  $D(v)$ , o nó predecessor ao longo do caminho da fonte ao nó  $t$ , isto é, imediatamente antes de  $t$  será  $P(v)$  e  $N'$  representa o conjunto de nós cujo caminho de menor custo é definitivamente conhecido.

```

1.      function Dijkstra ( $V, E, o, t, c$ )
2.       $N' = \{u\}$  % Conjunto de nós cujo caminho de menor custo é conhecido
3.      for  $\{u \in V\}$  do
4.           $D(v) = D(u) = \infty$ ; % nós não interligados
5.           $P(v) = P(u) = 0$ ; % distância acumulada até  $u$ 
6.      end
7.       $D(v) = 0$ ;
8.      for  $\{u \in V\}$  do
9.           $u$  = vértice desconhecido de menor custo;
10.         marcar  $u$  como conhecido;
11.         for  $\{w \in V \mid w$  adjacente a  $u\}$  do
12.              $D(w) = c(u, w)$ ;
13.             if  $w$  não é conhecido
14.                 if  $D(w) > D(u) + c(u, w)$ 
15.                      $D(w) = D(u) + c(u, w)$ ;
16.                      $P(w) = u$ ;
17.                 end if
18.             end if
19.         end for
20.     end for

```

Algoritmo 1 – Pseudocódigo do algoritmo de Dijkstra.

### 2.2.2. Algoritmo de Yen

No início dos anos 70, Jin Y. Yen [23] propôs um algoritmo para determinar os  $k$  caminhos mais curtos entre um par de nós distintos em uma rede, sem laços (*loopless*). O algoritmo recebe como entrada um grafo  $G = (V, E)$  e visa encontrar os  $k$  caminhos mais curtos entre o nó de origem  $o \in V$  e do nó de destino  $t \in V$ . Ele pode ser utilizado em grafos direcionados ou não e que não contenham laços, com pesos não negativos nos ramos.

O pseudocódigo para o algoritmo de Yen será apresentado pelo Algoritmo 2 [6]. Entretanto, antes da utilização do algoritmo de Yen, necessita-se aplicar um algoritmo padrão para achar as possíveis rotas de menor custo no grafo, como, por exemplo, o algoritmo de Dijkstra descrito anteriormente. A partir deste caminho encontrado, são definidas as  $k - 1$  rotas mais curtas, com base na abordagem do uso de nós de desvio (*dn - deviation nodes*), sendo que tais nós podem ser todos os nós do caminho mais curto a ser percorrido, com exceção do último nó, sendo utilizados para provocar um desvio intencional na rota mais curta. Após ser encontrado o caminho entre dois nós conhecidos, com o auxílio do algoritmo de Dijkstra, o mesmo é adicionado em uma lista, denominada  $A$ . Os caminhos encontrados são adicionados à lista  $A$ , onde o caminho definido pelo algoritmo de Dijkstra é o primeiro da lista de resultados. A condição de parada do algoritmo de Yen é atingida quando não existirem mais caminhos para serem percorridos (ou quando terminar de percorrer um caminho) ou, ainda, se a quantidade de  $k$  caminhos mais curtos encontrados for maior ou igual ao especificado, descartando os caminhos adicionais encontrados.

```

1.  function Yen ( $V, E, o, t, c, k$ )
2.   $B \leftarrow \{\text{caminho de custo m\u00ednimo de } o \text{ a } t\}$ 
3.   $A \leftarrow 0$ 
4.  for  $v = 1, \dots, k$  do % aplica\u00e7\u00e3o do Algoritmo de Dijkstra
5.       $P(v) \leftarrow \text{caminho de custo m\u00ednimo em } B$ 
6.       $A \leftarrow A \cup \{P(v)\}$ 
7.       $B \leftarrow \text{atualize}(V, E, c, A)$ 
8.      devolva  $\langle P(1), \dots, P(k) \rangle$ 
9.  end for
10. Algoritmo atualize ( $V, E, c, A$ )
11.  $B \leftarrow 0$ 
12.  $(dn, V, E) \leftarrow \text{o n\u00f3 de origem } (dn) \text{ \u00e9 especificado como n\u00f3 de desvio}$ 
13. for  $u \in dn$  do
14.      $P(u) \leftarrow \text{caminho de } dn \text{ a } t \text{ de custo m\u00ednimo } c(dn, t) \text{ e que n\u00e3o}$ 
         $\text{possui arcos em } dn$ 
15.      $B \leftarrow B \cup \{P(u)\}$ 
16.     devolva  $B$ 
17. end for

```

**Algoritmo 2 – Pseudoc\u00f3digo do algoritmo de Yen.**

### 2.3. A Técnica OFDM em EONs

Nesta dissertação, consideramos uma EON na qual a técnica OFDM é empregada. Assim, a elasticidade é obtida através da escolha da quantidade de portadoras adequada para cada enlace.

A Figura 4 representa um diagrama em blocos simplificado do transmissor e do receptor de um sistema de transmissão baseado em OFDM.

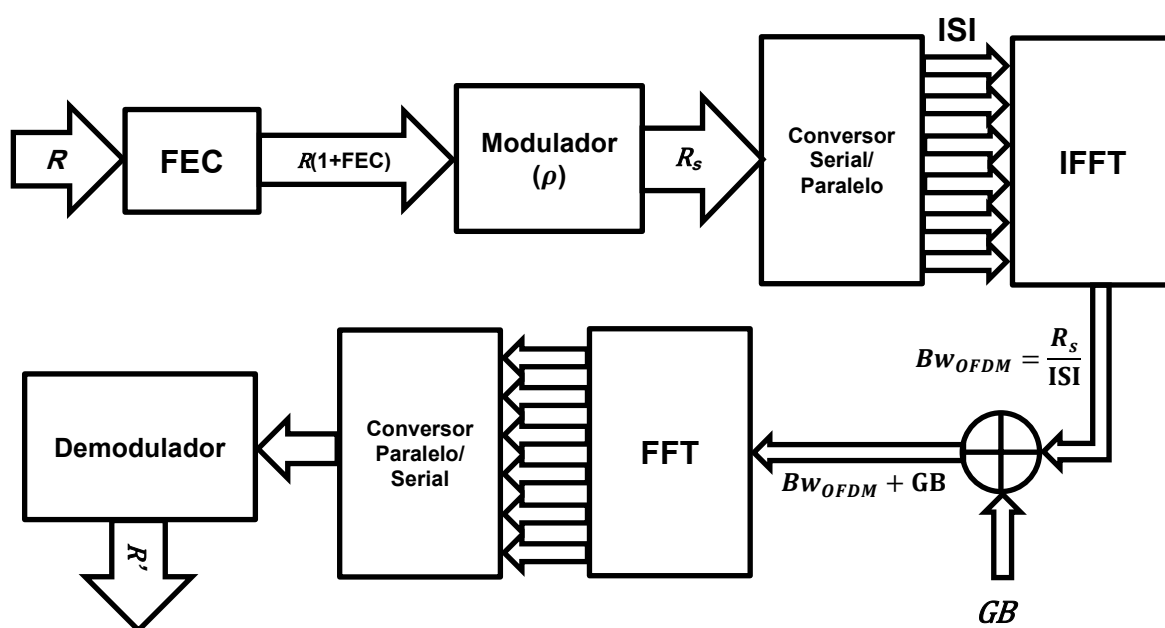


Figura 4 – Diagrama em blocos de um sistema OFDM.

O sinal original  $R$  recebe um FEC (*Forward Error Correction* – Código de Correção de Erros) que representa um fator de redundância adicionado à carga útil do canal, antes do sinal ser modulado. O sinal resultante  $R_s$  passa por um conversor serial para paralelo, estando presente na saída deste conversor os símbolos no formato de modulação (bits/símbolo) da sequência de entrada, definido pela distância de transmissão do sinal, formando um conjunto de  $N$  amostras do sinal  $R_s$ , sendo que cada amostra compõe o símbolo OFDM a ser transmitido. Entretanto, as fibras ópticas possuem respostas impulsivas dispersivas com o tempo, provocando interferências entre símbolos (ISI – *Inter-*

*Symbol Interference*), que devem ser amenizadas antes da demodulação do sinal pelo receptor. Assim, aplica-se a IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*) às  $N$  amostras do sinal  $R_s$  que recebem o prefixo cíclico  $GB$ , que é a cópia das últimas amostras da IFFT e as justapõem com as  $N$  amostras de saída, formando assim o símbolo  $BW_{OFDM}$ . Na recepção, aplica-se a FFT (*Fast Fourier Transform*) ao símbolo OFDM das  $N$  amostras restantes, após a remoção do  $GB$  de cada uma delas, que passam por um conversor paralelo para serial, sendo o sinal da saída deste dispositivo demodulado, resultando no sinal de recepção  $R'$ .

### 2.3.1. Espectro OFDM em EONs

Cada nó das EONs estudadas nesta dissertação é formado por elementos ópticos ativos (OXC), com rotas bidirecionais (*full duplex*) compostas por duas fibras ópticas de dispersão deslocada não zero (NZDSF – *Non-Zero-Dispersion-Shifted Fiber*) [24] em um grafo não direcionado, interligando dois nós distintos. A organização de padronização ITU-T definiu as bandas de comunicação para fibras ópticas monomodo padronizadas (SSMF - *Standard Single-Mode Fiber*) as bandas O, E, S, C, L e U. A banda de transmissão mais comum em sistemas comerciais é a banda C (Figura 5) [25], isto é, 1530 nm a 1565 nm, uma vez que a fibra apresenta a menor perda nessa faixa, com um mínimo em 1547,32 nm [26], o que torna as transmissões em fibras ópticas com mais de 100 km possíveis, antes da necessidade de amplificação. Portanto, nesta dissertação, a banda C foi usada para todas as simulações, visto que é a banda de comunicação mais comum para aplicações de transmissão de longa distância. Além disso, aplicou-se uma largura de banda ( $Bw$  – *Bandwidth*) do sinal de 4,475 THz [27] em cada enlace da rede e foram considerados dispositivos EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifier* – Amplificador a Fibra Dopada com Érbio) [26], para a regulação de potência do sinal transmitido, em todos os nós da EON. Estas características físicas serão empregadas para definir a quantidade de fatias espectrais totais presentes em cada enlace da rede, assim como o tipo de modulação OFDM empregada no atendimento de cada demanda.

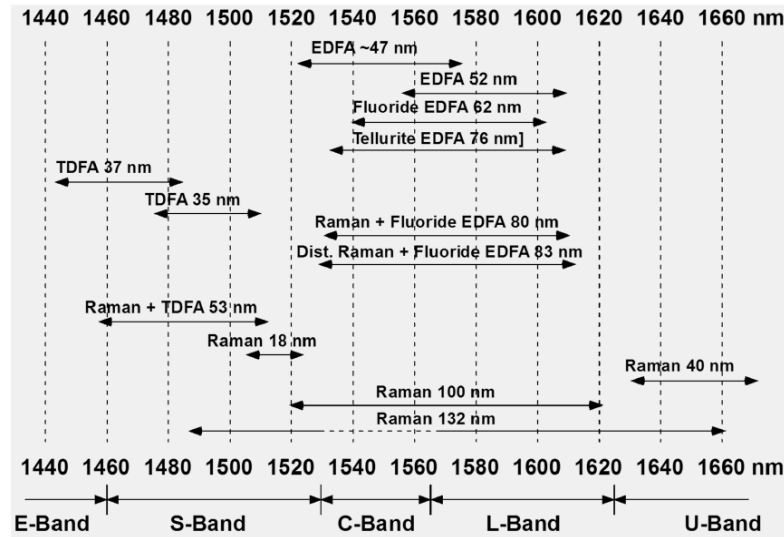


Figura 5 – Larguras de banda ( $B_w$ ) típicas para amplificadores ópticos.

A quantidade máxima de subportadoras será calculada como sendo a largura de banda  $B_w$  dividida pela frequência de uma fatia espectral  $s$  (12,5 GHz)

$$|S| = \frac{B_w}{s} = \frac{(4,475)(10^{12})}{(12,5)(10^9)} = 358 \quad \text{Equação 2}$$

Assim, pela Equação 2,  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_{358}\}$ , isto é,  $|S| = 358$  fatias do espectro.

Em uma EON baseada em OFDM, a largura de banda do sinal OFDM ( $B_{W_{OFDM}}$ ) de uma dada conexão é representada por [28]

$$B_{W_{OFDM}} = \left(\frac{2}{T_s}\right) + \left(\frac{N-1}{T_U}\right) \quad \text{Equação 3}$$

Sendo  $T_s$  a duração do símbolo OFDM,  $N$  é a quantidade de subportadoras requeridas pelo símbolo OFDM e  $T_U$  é o período de duração da carga útil do sinal transmitido (payload), isto é,  $T_U = T_s - T_g$ , sendo  $T_g$  a duração do intervalo do Prefixo Cíclico (CP) ou tempo de guarda. Assim,  $T_g$  deve ser maior do que o valor da máxima diferença do retardo do sinal (*delay spread*), representado pela dispersão cromática do meio óptico  $|D_t|$  (ps/nm.Km), introduzida pelo canal às distintas subportadoras. Desta forma, o cálculo de  $T_g$  pode ser realizado via [30]



$$\left(\frac{c}{f^2}\right) |D_t|(N)(\Delta f) \leq T_g \quad \text{Equação 4}$$

Onde  $c = 2,99792458 \cdot 10^8$  m/s é a velocidade da luz e  $\Delta f = (f_i - f_0)$ ;  $f_i$  é a frequência final e  $f_0$  é a frequência inicial do símbolo OFDM. Observa-se que  $f_i - f_0 = s \cdot i$ , com  $s = 12,5$  GHz e sendo  $i = 0, 1, \dots, N - 1$ . Assim, a equação anterior pode ser reescrita

$$\left(\frac{c}{f^2}\right) |D_t|(N)(i)(s) \leq T_g \quad \text{Equação 5}$$

Alguns exemplos de medidas da dispersão cromática de uma fibra óptica NZDSF, com valores de comprimento de onda compreendidos entre 1530 nm e 1565 nm, estão representados na Tabela 1 abaixo.

Example ID	$D_{min}$ (ps/nm·km)	$D_{max}$ (ps/nm·km)	Sign	Typical dispersion coefficient at 1550 nm (ps/nm·km)	Typical dispersion slope at 1550 nm (ps/nm <sup>2</sup> ·km)
A	1.3	5.8	+	3.7	0.070
B	2.0	6.0	+	4.2	0.085
C	2.6	6.0	+	4.4	0.045
D	5.0	10.0	+	8.0	0.058
E	1.0	6.0	-	-2.3	0.065

NOTE – Corresponding values of chromatic dispersion for the 1600 nm wavelength region are under consideration.

**Tabela 1 – Exemplos de valores de dispersão cromática para  $1530\text{nm} \leq \lambda \leq 1565\text{nm}$  [31].**

Sabendo-se que na grade flexível DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing* – Multiplexação Densa por Comprimento de Onda), com canal de comunicação operando na Banda C, as fatias espectrais de frequência permitidas apresentam uma frequência central ( $f_c$ ) nominal (em THz) definida por [32]

$$f_c = 193,75 \text{ THz} + i \cdot (\text{espaçamento do canal}); \quad \text{Equação 6}$$

Além disso, a largura da fatia espectral  $s$  e, conseqüentemente, a largura de banda espectral  $\phi$ , será

$$s = (12,5 \text{ GHz}).m; \text{ onde } m \text{ é um valor inteiro positivo.} \quad \text{Equação 7}$$

O valor nominal da frequência central da rede de grade fixa e da rede de grade flexível (EON) é semelhante, exceto que esta última tem um canal com uma granularidade mais precisa (6,25 GHz). A granularidade da fatia espectral é o dobro do espaçamento do canal, de modo que, ao escolher  $i$  e  $m$ , os recursos espectrais possam ser alocados sem deixar lacunas entre as fatias espectrais. Portanto, a fatia espectral de frequência considerada será um valor múltiplo de 12,5 GHz. Desta forma, tem-se

$$\phi \leq |S| = slot_{m\acute{a}x} = (12,5 \text{ GHz}).m_{m\acute{a}x}, \quad \text{Equação 8}$$

sendo  $|S|$  a quantidade máxima de fatias espectrais (*slots*) presentes na EON.

Como a granularidade da fatia espectral é definida como sendo o dobro do espaçamento do canal, a banda de guarda ( $GB$ ) é dada por [32]

$$GB = 2.m.s \quad \text{Equação 9}$$

Portanto, considera-se  $s = 12,5 \text{ GHz}$ , isto é,  $m = 1$  e, conseqüentemente,  $GB = 25 \text{ GHz}$  [22] e [32]; Assim, o espectro inicial de frequência é dividido em faixas de subportadora de 12,5 GHz, conforme apresentado na Figura 6, onde cada fatia espectral contígua pertencente à mesma demanda recebeu a mesma numeração (1, 2 ou 3). O valor de  $GB$  adotado representa o menor valor da grade (*grid*) de frequência de tamanho fixo especificado pelo padrão ITU-T G694.1 [3].

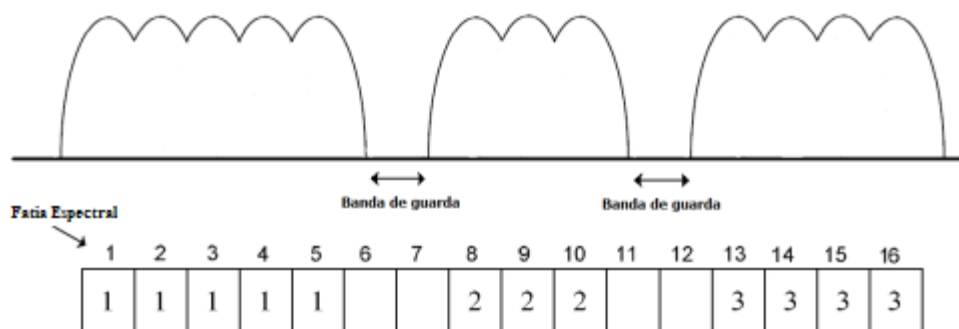


Figura 6 – Exemplo de alocação de espectro com banda de guarda [33].

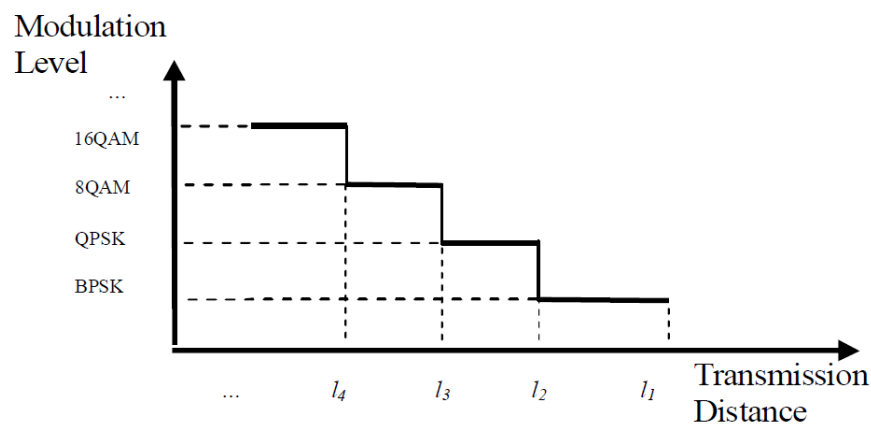
A Figura 6 apresenta um exemplo da utilização de um enlace em uma EON que aplica a técnica OFDM. Sinais de diferentes caminhos ópticos (denotados como “1”, “2” e “3”) são multiplexados no domínio da frequência. Neste exemplo, dividiu-se o espectro de frequência em um número de fatias espectrais ou subportadoras de frequência igual a  $F$  GHz, sendo a banda de guarda utilizada  $GB = 2F$  GHz. Cada caminho óptico utiliza certa quantidade de subportadoras adjacentes que se sobrepõem parcialmente no domínio do espectro, uma vez que são moduladas ortogonalmente, de modo a aumentar a eficiência espectral. Assim, a taxa de transmissão de dados elástica, usando uma quantidade variável de subportadoras OFDM de baixa taxa, melhora a flexibilidade e a granularidade da rede quando comparada a uma rede WDM de grade fixa.

### 2.3.2. Escolha da Modulação

Considerando o enlace  $(o_i, t_i, x_i)$ , sendo  $o_i$  o nó de origem,  $t_i$  o nó de destino e  $x_i$  a demanda efetivamente requerida pela conexão, ou seja,  $x_i = n_i$  para o problema RSA, onde  $n_i$  representa a quantidade de fatias espectrais requeridas pela demanda  $i$  e  $x_i = R_i$  para o problema RMSA, onde  $R_i$  representa a taxa de transmissão requerida pela demanda  $i$ . A demanda deverá utilizar um espectro contínuo, onde as mesmas fatias de espectro devem ser alocadas a uma dada conexão ao longo de toda a sua rota física, bem como um conjunto contíguo de subportadoras, isto é, no qual as fatias de espectro alocadas a uma conexão são adjacentes. A quantidade de subportadoras atribuídas a essa conexão depende

da densidade da constelação empregada (BPSK, QPSK ou M-QAM) no problema RSA, que depende, por sua vez, do caminho escolhido, pois a distância alcançada na transmissão do sinal está inversamente relacionada à quantidade de bit por símbolo transmitido.

No problema RSA, um formato de modulação espectralmente eficiente, mas de curto alcance como o 16-QAM pode ser utilizado para caminhos ópticos curtos, enquanto que um formato de modulação como o QPSK empregará-se em caminhos ópticos mais longos, conforme representado na Figura 7 [18], ou seja, quanto maior a distância, menos bits por símbolo podem ser empregados na transmissão de um sinal. Portanto, a escolha do formato de modulação a ser utilizado na transmissão dos dados é feita de acordo com a distância do caminho escolhido. Quanto maior o alcance do formato de modulação, menor será sua taxa de bits por símbolo e, conseqüentemente, maior será a quantidade de fatias espectrais utilizadas.



**Figura 7 – Nível de modulação aceitável em função da distância de transmissão [22].**

A capacidade de uma rota ( $R$ ), volume de tráfego ou capacidade requerida (taxa de dados), pode ser dada em função do comprimento desta rota [34]

$$R = |S| \log_2(1 + OSNR) = \frac{R_0}{2} \left( 1 + \log_2 \frac{2l_0}{l} \right)$$

**Equação 10**

sendo  $l \leq 2l_0$  onde  $l_0$  representa o comprimento máximo permitido para os enlaces (que está associado à distância máxima entre regeneradores/amplificadores óticos),  $R_0$  é a capacidade associada ao caminho óptico no pior caso (caminho com a máxima distância) e  $l$  é o comprimento da rota associada a uma dada transmissão. Observa-se que a relação sinal-ruído óptica (OSNR) melhora em 3dB à medida que a distância de transmissão diminui pela metade, permitindo que o formato de modulação aumente em 1 bit/símbolo. Assim, a modulação 8-QAM (3 bits/símbolo) pode ser utilizada em vez da QPSK (2 bits/símbolo) ou a 16-QAM (4 bits/símbolo) pode ser utilizada em vez da 8-QAM, quando a distância do enlace cai à metade [35].

A quantidade total de fatias espectrais requeridas  $N_i$  (subportadoras ou *slots*) para cada uma das conexões pré-estabelecidas (demanda específica), juntamente com a sua granularidade, representa o espectro real reservado para o canal óptico [29]

$$N_i = (n_i + GB) = \left( \frac{R}{\rho \cdot R_0} \right) + GB \quad \text{Equação 11}$$

onde  $n_i$  é a quantidade de fatias espectrais requeridas pela demanda,  $R = n_i/T_s$  e  $\rho$  é a eficiência espectral (*Spectral Efficiency*) expressa em bits/símbolo, sendo  $\rho = 1$  bits/símbolo para BPSK;  $\rho = 2$  bits/símbolo para QPSK;  $\rho = 3$  bits/símbolo para 8-QAM ou  $\rho = 4$  bits/símbolo para 16-QAM. Assim, a eficiência espectral  $\rho$  é dada pela Equação 12

$$\rho = \frac{N_i R}{(N_i + 1)s} \quad \text{Equação 12}$$

Portanto, com base na Equação 10, Equação 11, Equação 12 e conforme apresentado na Figura 7, observa-se que, para o pior caso, isto é, para as distâncias de transmissão mais longas da EON, deve-se adotar o esquema de modulação OFDM-BPSK e para distâncias de transmissão menores, o OFDM-16-

QAM pode ser empregado, sendo que a Tabela 2 ilustra isso, apresentando as taxas de transmissão aplicáveis em uma EON, considerando um  $r_{FEC}^2 = 1,2 \cdot 10^{-3}$  [18].

Modulação (OFDM)	Máxima Taxa de Transmissão (R)	Distância Máxima de Transmissão (Km)
16-QAM	1Tbps	$l \leq 250$
8-QAM	400Gbps	$250 < l \leq 500$
QPSK	100Gbps	$500 < l \leq 1000$
BPSK	40Gbps	$l \geq 2000$

Tabela 2 – Taxa de transmissão versus o máximo alcance conseguido em uma EON.

## 2.4. Modelagem dos Problemas RSA e RMSA para uma EON

Considerando uma EON definida pelo grafo  $G = (V, E)$ , onde cada nó da rede é formado por um elemento óptico ativo (OXC), com rotas bidirecionais (grafo não direcionado), podemos definir uma EON usando [37]:

- $E = \{e_1, e_2, \dots, e_{|E|}\}$ ;
- $|E|$  é a quantidade total de enlaces presentes na rede;
- $|V|$  é a quantidade de nós (vértices) presentes na rede;
- o conjunto de demandas de tráfego estáticas  $D = \{d_1, d_2, \dots, d_{|D|}\}$ , sendo:
  - cada demanda  $d_i = (o_i, t_i, x_i)$ , onde  $i = 1, 2, 3, \dots, |D|$ ;
    - ✓  $o_i$  é o nó fonte;
    - ✓  $t_i$  é o nó de destino;
    - ✓  $x_i = n_i$  é a quantidade de fatias de S requeridas pela demanda  $i$  para solucionar o problema RSA;
    - ✓  $x_i = R_i$  é a taxa de transmissão requerida pela demanda  $i$  para solucionar o problema RMSA.

<sup>2</sup>  $r_{FEC}$  representa um fator de redundância que pode ser adicionado à  $BW_{OFDM}$ . Portanto, para calcular a taxa real de dados enviados, a taxa de dados úteis é multiplicada pelo valor  $(1 + r_{FEC})$ , resultando na taxa de dados efetiva [30].

- o conjunto de pares de rotas  $Q_i = (o_i, t_i)$  para a demanda  $d \in D$ , onde cada conjunto  $Q_i$  compreende apenas as rotas originadas em  $o_i$  e que terminam em  $t_i$ ;
- $P$  representa o conjunto de todas as rotas possíveis para cada conexão requerida na EON, sendo que para cada rota  $p \in P$  existe um subconjunto  $p \subseteq E$ , ou seja,  $P \subset Q_i$ .

Assim, para definir os problemas RSA e RMSA, na ferramenta computacional MatLab, usamos:

- Matriz de Adjacências (ou de custo) sendo os pesos os comprimentos dos enlaces (distâncias), definida pela matriz de adjacência  $A$ ;
- Quantidade de subportadoras por conexão, isto é, demanda por conexão, definida pela matriz de rotas e demandas  $D$ ;
- Arranjo de células (*cell-array*<sup>3</sup>) referente ao tráfego (Conexão x Distância), representada pelo arranjo de células  $P$ ;
- Quantidade de fatias espectrais utilizadas para cada uma das conexões possíveis do arranjo de células referente ao tráfego, definida pela matriz  $F$ ;
- Quantidade de enlaces compartilhados por duas ou mais conexões, definida pela matriz  $L$ ; e
- Quantidade total de conexões referentes a uma mesma requisição, representada pelo arranjo de células  $C$ .

A matriz de adjacências ( $A$ ) para uma EON está baseada nas interligações entre os nós através do meio físico (fibra óptica), sendo que quando os nós não são adjacentes, isto é, quando não estão interligados diretamente pelo cabo óptico, o custo será infinito (distância entre os nós). Cabe ressaltar que tal custo será atribuído aos laços (interligação de um nó a ele mesmo), pois os mesmos são inexistentes.

---

<sup>3</sup> um arranjo de células (*cell-array*) provê um meio para combinar um conjunto misto de objetos (números, caracteres, matrizes ou outros arranjos de células) em um mesmo nome de variável, sendo que estas entidades dissimilares podem ser organizadas em uma única variável. Resumidamente, arranjos de células são tabelas de apontadores para dados de tipos potencialmente diferentes.

A matriz  $D$  representa um conjunto de possíveis conexões requeridas pela rede entre dois nós pré-definidos, sendo a primeira coluna os nós de origem, a segunda coluna os nós de destino e a terceira coluna a quantidade de fatias espectrais necessárias para cada conexão, sendo esta última definida pelas linhas da matriz.

$$D = \begin{bmatrix} o_1 & t_1 & d_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ o_i & t_i & d_i \end{bmatrix} = [d_1; d_2; \dots; d_i]$$

Esta matriz é ordenada seguindo o critério MSF, ou seja, as conexões estão em ordem decrescente de demandas, da primeira para a última linha. A partir de  $D$  encontram-se as quantidades máximas possíveis de rotas entre os nós de origem e destino através do algoritmo de Dijkstra e os  $k$  melhores caminhos dentre estes, com o algoritmo de Yen. Com isso constrói-se um arranjo de células:

$$P = [p_{1,k}; p_{2,k}; \dots; p_{i,k}; \dots; p_{|P|,k}];$$

onde  $p_{i,k}$  representa uma das possíveis  $k$  rotas definida pelo algoritmo de Yen para a demanda  $i$ . Assim,  $i = \{1, 2, 3, \dots, |D|\}$  e  $p_{i,k} = \{p_{i,k}\} = \{(o_i, e_{k_n}), (e_{k_n}, t_i)\}$ , sendo  $e_{k_n}$  os enlaces que pertencem à  $n$ -ésima rota dentre os  $k$  caminhos possíveis. Cabe ressaltar que cada uma das linhas  $p_{i,k}$  do arranjo de células  $P$  está associada diretamente a uma linha  $f_{i,1}$  da matriz coluna  $F$ , que representa a quantidade de fatias espectrais necessárias para cada uma das conexões possíveis das demandas pré-definidas na EON, acrescidas da Banda de Guarda ( $GB$ ) que, como dito anteriormente,  $GB = 2$  fatias espectrais.

$$F = [f_{1,1}; f_{2,1}, \dots; f_{i,1}, \dots; f_{|P|,1}]$$



A matriz  $L$ , por sua vez, é formada por elementos  $l_{ij}$ , que indicam a quantidade total de enlaces compartilhados entre duas células  $p_i$  da matriz  $P$ . Cabe ressaltar que  $l_{ij} = 0$  quando  $i = j$ , pois não há laços na rede considerada e que  $l_{ij} = l_{ji}$ , pois trata-se de uma matriz simétrica. Assim, a matriz  $L$  é formada por  $|P|$  linhas e  $|P|$  colunas, onde  $|P|$  equivale à quantidade de linhas do arranjo de células  $P$ .

$$L = \begin{bmatrix} l_{1,1} & \cdots & l_{1,|P|} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{|P|,1} & \cdots & l_{|P|,|P|} \end{bmatrix}$$

O outro arranjo de células é o de conexões ( $C$ ), no qual a quantidade total de linhas representa o total de conexões requeridas pela rede, que, obviamente, é igual à quantidade de linhas da matriz  $D$ .

$$C = [c_1; c_2; \dots; c_i]$$

Os valores  $c_i$  contidos em cada célula de  $C$  indicam as linhas do arranjo de células de  $P$  que estão relacionadas a uma mesma conexão, ou seja, representa uma rota da demanda  $i$  dentre os  $k$  caminhos definidos pelo algoritmo de Yen.

### 3. Algoritmo “Voraz”

Algoritmo “voraz” (*greedy algorithm*) é um termo genérico aplicado a algoritmos que tomam a decisão que parece mais promissora em um dado momento, sem jamais reconsiderá-la, independentemente das consequências futuras de tal decisão [7]. As escolhas feitas em cada iteração são definitivas e, em geral, estes algoritmos são rápidos, de fácil elaboração e eficientes [38][39]. Uma vez que o algoritmo “voraz” não leva em consideração as consequências de suas decisões, em geral não produz a melhor solução para um dado problema. Entretanto, quando o problema a ser resolvido pertencer à classe NP-completo, o algoritmo “voraz” torna-se atrativo na obtenção de uma solução aproximada em tempo polinomial [39].

#### 3.1. RSA e RMSA usando Algoritmo “Voraz”

O algoritmo “voraz” atende às demandas na matriz de tráfego, uma por uma, seguindo uma ordem particular. A ordem em que as conexões requeridas são atendidas é muito importante neste processo, sendo que diferentes configurações resultam em utilizações diferentes de espectro. Uma dessas políticas, que será adotada neste estudo, é a de atender primeiro quem requer a maior quantidade de subportadoras. Isto é, emprega-se o critério MSF [22], no qual as demandas são ordenadas de acordo com a quantidade total de fatias espectrais solicitadas, incluindo a banda de guarda, no caso do problema RSA ou na maior taxa de transmissão requerida na EON, para o problema RMSA, sendo atendida em primeiro lugar a que possuir maior demanda. O algoritmo não considera as consequências futuras da decisão, como, por exemplo, uma possível quantidade elevada de bloqueios na rede. Dependendo da quantidade das  $k$  melhores rotas definidas pelos algoritmos de roteamento, é feita uma busca em toda a rede, visando minimizar a quantidade de conexões não atendidas. Além disso, as conexões são feitas de forma a otimizar a utilização do espectro de frequência de cada *link*, isto é, caso uma sequência de fatias espectrais esteja disponível para

atender uma nova demanda, imediatamente após uma outra demanda já estabelecida, esta será usada preferencialmente.

### 3.1.1. Algoritmo “Voraz” Proposto

O pseudocódigo para o algoritmo “voraz” é representado pelo Algoritmo 3, com base nas notações apresentadas no Capítulo 2. Antes da utilização do algoritmo “voraz”, as demandas  $d_i$  são ordenadas seguindo o critério MSF, ou seja, os valores de  $n_i$  (RSA) ou  $R_i$  (RMSA) são dispostos em ordem decrescente na matriz  $D$ . Às fatias espectrais  $n_i$  são acrescentados os valores da banda de guarda  $GB$ , equivalente a 2 fatias espectrais de 12,5 GHz cada, reordenando a matriz  $F$ . O algoritmo de Dijkstra é aplicado, encontrando os possíveis caminhos entre dois nós conhecidos da matriz  $D$  e o algoritmo de Yen encontra os  $k$  caminhos de menor custo, baseado na matriz de adjacências  $A$ , dentre os fornecidos pelo algoritmo de Dijkstra. O algoritmo “voraz” aloca os valores de  $(n_i+GB)$  ou  $R_i$  para cada uma das demandas  $d_i$ , começando sempre pela que requer uma maior quantidade de fatias espectrais (RSA) ou taxa (RMSA) e seguindo a ordem decrescente, imposta pelo critério MSF. Caso haja alguma demanda que não possa ser atendida, esta será bloqueada, passando-se para a próxima, na sequência, até chegar à última conexão (última linha da matriz  $D$ ). O resultado final são as demandas que puderam ser atendidas e o tipo de modulação OFDM aplicada a cada uma, no caso do problema RMSA, com base na distância total do caminho definido.

```

1.  function voraz ( $A, D, C, S, F, d_i$ )
2.   $S = 358$  % quantidade máxima de fatias espectrais em cada enlace
3.   $A \leftarrow \{\text{rotas de } o_i \text{ a } t_j\}$  % matriz de adjacências
4.  for  $n = N_i$  do % gera  $N_d$  demandas  $d_n$  aleatoriamente
5.       $D \leftarrow \{\text{cria } d_i\}$  % demanda  $d_i = (o_i, t_i, x_i)$ , sendo  $x_i = n_i$  ou  $x_i = R_i$ 
6.       $F \leftarrow \{n_i + GB\}$  % fatias espectrais com banda de guarda
7.  end for
8.   $D \leftarrow$  reordenação de  $d_i$  % critério MSF
9.  for  $v = 1, \dots, n$  do % início da aplicação dos algoritmos de roteamento
10.      $P(v) \leftarrow k$ -caminhos de custo mínimo em  $A$  % algoritmo de Yen
11.      $d_i \leftarrow C_i \cap \{P(v)\}$  % define a melhor rota para  $d_i$ 
12.      $(n_i + GB) \leftarrow F \cap \{S\}$  % aloca fatias para a demanda  $i$ 
13.      $d_i \leftarrow$  atualize ( $D, C, F$ )
14.     Aplicar técnica OFDM
15.     devolva ( $d_1, \dots, d_{i-1}, d_i$ )
16. end for
17. Algoritmo atualize ( $D, C, F, d_i$ )
18.  $d_i \leftarrow \{\text{sem fatias ou taxa de transmissão disponíveis nos } k\text{-caminhos}\}$ 
19. for  $\{ \nexists d_i \subset F \}$  do
20.      $D \leftarrow \{d_i \text{ bloqueada}\}$ 
21.      $d_i \leftarrow$  atualize ( $D$ )
22. end for

```

**Algoritmo 3 – Pseudocódigo do algoritmo “voraz” aplicado a uma EON.**

A seguir serão apresentados os resultados obtidos com a aplicação do algoritmo “voraz” na solução dos problemas RSA e RMSA para uma EON de 6 nós (Figura 8) e a NSFNET (Figura 11).

### 3.1.2. Resultados do Algoritmo “Voraz” para Rede de 6 Nós

Inicialmente, foram realizadas simulações em uma EON com uma topologia mais simples, composta por  $|V| = 6$  nós e  $|E| = 16$  conexões (Figura 8), onde  $l_0 = 2000\text{Km}$  e cuja resposta desejada (rota selecionada e fatias espectrais) fosse mais fácil de ser analisada, com o objetivo de observar o funcionamento correto do programa desenvolvido.

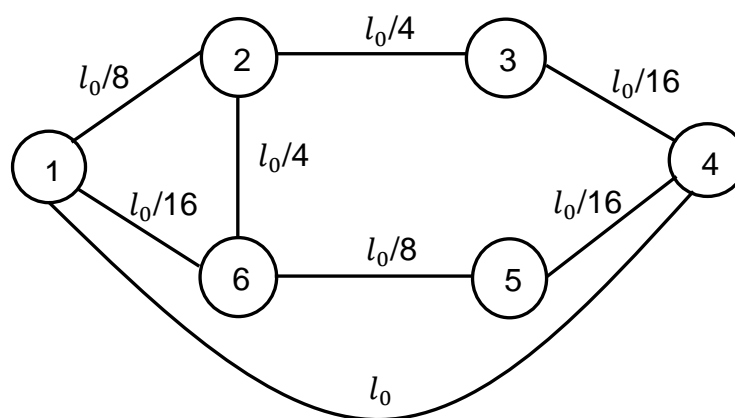


Figura 8 – Grafo da Rede Óptica Elástica de 6 nós analisada [36].

As conexões entre os nós, assim como as demandas requeridas  $d_i = (o_i, t_i, x_i)$ , são sorteadas aleatoriamente, restringindo-se apenas às rotas possíveis, ou seja, entre nós com rotulações diferentes; a demanda máxima de uma conexão não poderia ser superior à quantidade máxima de fatias espectrais em cada conexão, isto é,  $(n_i + GB) \leq \phi \leq |S|$ , no caso do problema RSA, ou deve ser inferior à maior taxa de transmissão disponibilizada pela EON, para o problema RMSA. Além disso, na aplicação dos algoritmos de roteamento, deve-se evitar ultrapassar a quantidade máxima dos caminhos permitidos pela rede, ou seja, os  $k$  melhores caminhos devem ser possíveis de obter, com base na matriz de adjacência  $A$ .

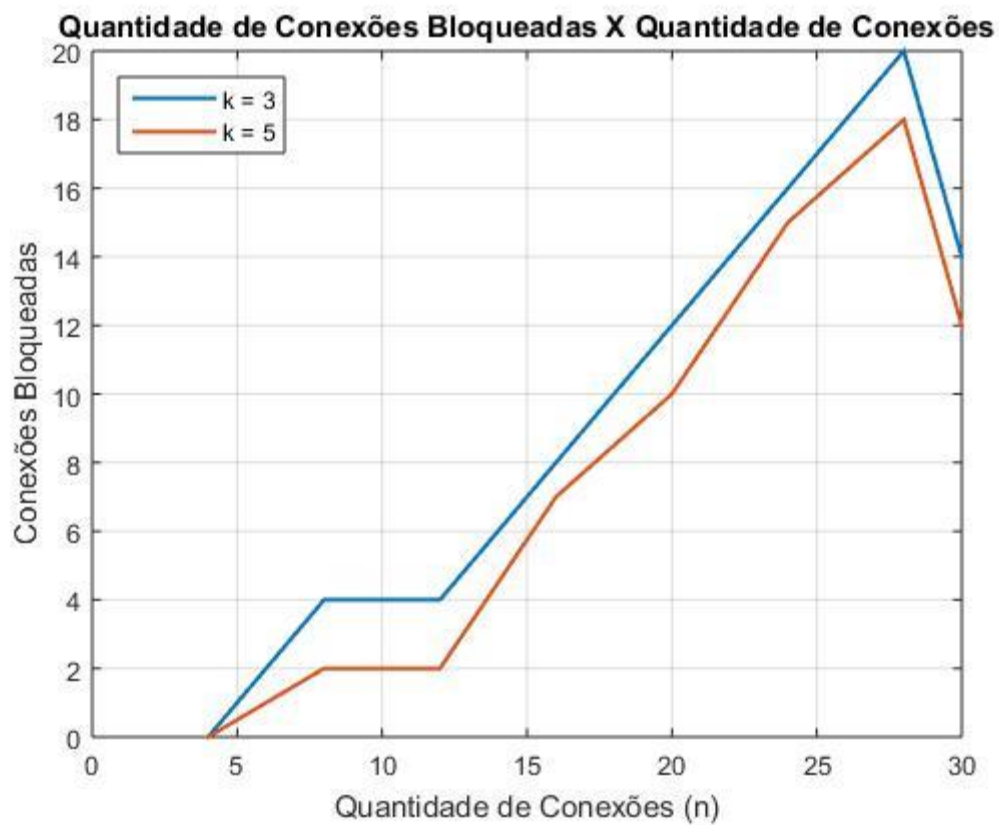
As simulações utilizaram o valor de  $k$  (quantidade de rotas mais curtas definidas pelo algoritmo de Yen) iguais a 3 e 5. Além disso, foi utilizado o conjunto de conexões de  $n = \{4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 30\}$ , ou seja, as simulações

consideraram desde 4 conexões simultâneas na rede até um máximo de 30 conexões simultâneas, para ambos os valores de  $k$  caminhos considerados.

Portanto, as matrizes  $D$  (geradas aleatoriamente) são apresentadas no Apêndice A e foram utilizadas nas simulações para solucionar o problema RSA da EON da Figura 8 e  $D = [o_i \quad t_i \quad n_i]$ , sendo  $i = \{1, 2, \dots, |D|\}$ .

Cabe ressaltar que todas as simulações foram feitas utilizando-se um computador com processador Intel® Core™ i5-4590 com CPU @ 3,30 GHz; memória instalada (RAM) de 4,00 GB (utilizável 3,30 GB) e sistema operacional Windows 7 Professional (Service Pack 1) de 64 bits; sendo o MatLab utilizado na versão R2015a (8.5.0.197613) 64-bits (Win64).

Os gráficos da Figura 9 representam a quantidade de conexões bloqueadas quando se aumenta a quantidade total de conexões, viando a solução do problema RSA para esta EON, para valores de  $k = 3$  e  $k = 5$ , chegando-se ao limite de 30 conexões simultâneas na rede. Um único ciclo de rodada foi considerada para esta simulação. Observa-se uma quantidade crescente de bloqueios, proporcional ao aumento da quantidade de conexões na EON, o que já era esperado. Entretanto, quando  $n = 28$ , a quantidade de bloqueios foi igual a 20 ( $k = 3$ ) e de 18 ( $k = 5$ ) e para  $n = 30$  (quantidade máxima considerada de conexões simultâneas na EON) a quantidade de bloqueios ficou igual a 14 ( $k = 3$ ) e 12 ( $k = 5$ ), respectivamente. Como o algoritmo “voraz” utiliza a política MSF para atendimento das demandas, faz com que as primeiras demandas a serem atendidas utilizem a primeira rota disponibilizada pelos algoritmos de roteamento, quando possível, o que bloqueia sucessivamente as demais conexões, que são apresentadas em ordem decrescente de prioridade, caso ainda haja fatias espectrais contínuas (as mesmas subportadoras em cada enlace e ao longo de toda a conexão) e contíguas (as fatias espectrais devem ser sequenciais, sem “lacunas” entre elas) nos enlaces da rede para esta demanda.



**Figura 9** – Total de conexões bloqueadas na solução do problema RSA quando é aumentada a quantidade de conexões simultâneas na rede de 6 nós.

k	Quantidade de Conexões	Bloqueios	Quantidade de Fatias Espectrais em um mesmo enlace da rede	Capacidade de Demandas Atendidas (%)
3	4	0	335	100
3	8	4	352	58,3
3	12	4	348	77
3	16	8	358	56,6
3	20	12	357	40,1
3	24	16	357	43,3
3	28	20	337	28,5
3	30	14	357	53,7
5	4	0	335	100
5	8	2	352	83,3
5	12	2	358	91,2
5	16	7	358	59,1
5	20	10	354	52,9
5	24	15	357	52,4
5	28	18	337	37
5	30	12	351	57,7

**Tabela 3 – Capacidade de demandas atendidas com base na quantidade de fatias espectrais (contíguas e contínuas) em um mesmo enlace para diferentes valores de conexões simultâneas.**

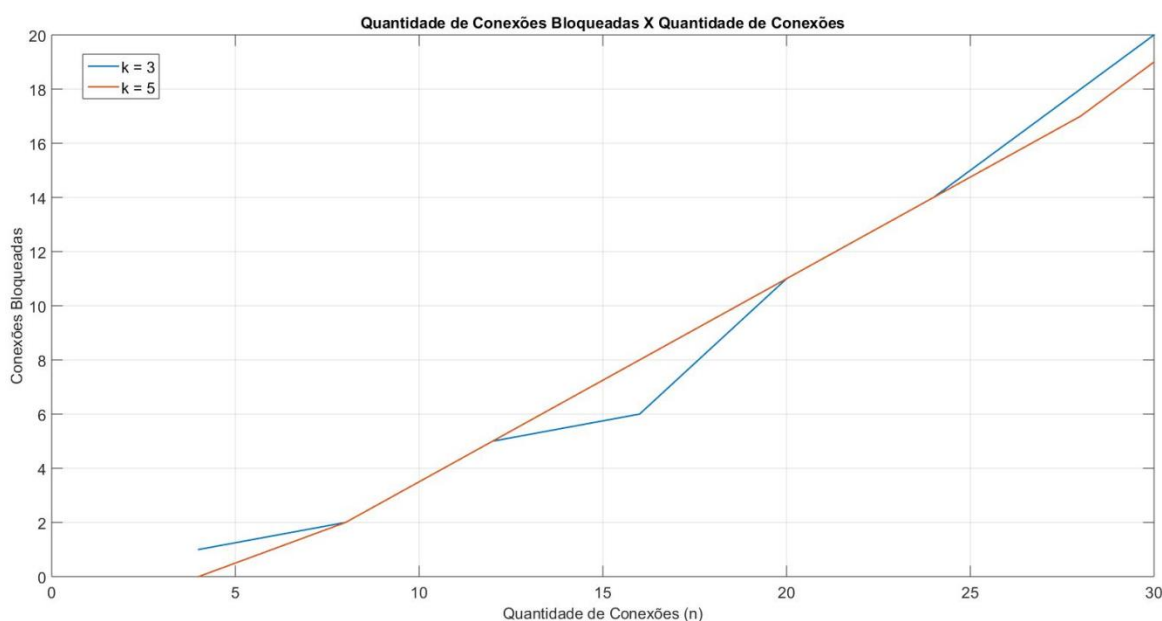
A Tabela 3 apresenta a quantidade total de fatias espectrais compartilhadas em um mesmo enlace da EON, ou seja, quanto foi utilizado de  $\phi$  para atender às demandas na solução do problema RSA. Observa-se que estes valores obedeceram ao especificado pela Equação 8, ou seja,  $|S| \leq \phi$ . Também é possível verificar que ao utilizar  $k = 5$ , ou seja, quando há um aumento na quantidade das rotas possíveis entre os nós de origem e destino, reduz-se a quantidade de fatias espectrais compartilhadas em cada enlace, com um aumento significativo na capacidade de demandas atendidas na rede.

Quando a quantidade de conexões chega a 30, observa-se uma redução na quantidade de conexões bloqueadas no gráfico da Figura 9, porém a capacidade de demandas atendidas continua baixa, conforme apresentado na Tabela 3. Isto se deve ao fato de ter sido utilizada uma única simulação para cada valor de  $n$ , o



que é possível de ser evitado considerando-se um valor médio, aumentando-se a quantidade de simulações para cada conexão simultânea na EON.

A solução do problema RMSA para a rede da Figura 8, considerou taxas que variaram de 40Gbps a 1Tbps, conforme apresentadas na Tabela 2, sendo que os gráficos da Figura 10 representam a quantidade de conexões bloqueadas quando se aumenta a quantidade total de conexões na EON, para valores de  $k = 3$  e  $k = 5$ , chegando-se ao limite de 30 conexões simultâneas na rede. Um único ciclo de rodada da simulação foi realizado, sendo que a quantidade de conexões aumenta, porém mantendo-se as conexões já estabelecidas anteriormente. Assim como na solução do problema RSA, há uma quantidade crescente de bloqueios, proporcional ao aumento da quantidade de conexões na EON. Entretanto, para  $k = 5$  e  $24 \leq n \leq 30$ , a quantidade de bloqueios é ligeiramente menor do que para  $k = 3$ , uma vez que há uma disponibilidade maior de rotas ofertadas pelo algoritmo de Yen.



**Figura 10 – Total de conexões bloqueadas na solução do problema RMSA quando é aumentada a quantidade de conexões simultâneas na rede de 6 nós.**

### 3.1.3. Resultados do Algoritmo “Voraz” para NSFNET

A topologia física apresentada na Figura 11 representa a rede NSFNET dos Estados Unidos da América do Norte (EUA), que também pode ser considerada como sendo um grafo de nós rotulados (nome das cidades) e com ramos ponderados (distância percorrida pelos cabos ópticos entre as cidades).

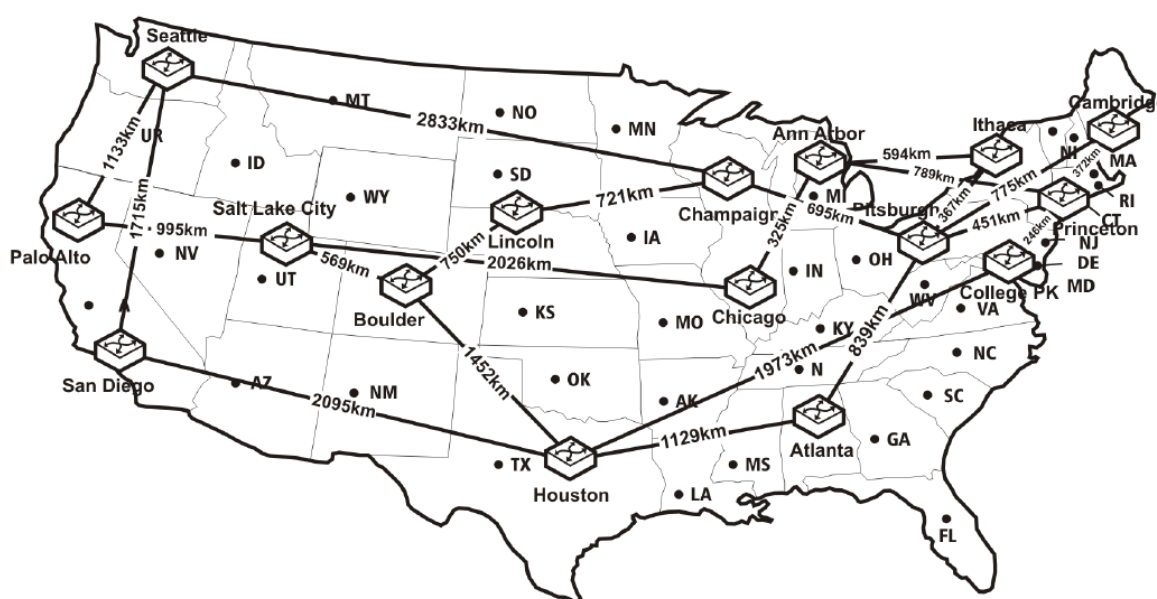


Figura 11 – Topologia e comprimentos das conexões da rede NSFNET dos EUA [14].

Assim como realizado para a rede óptica da Figura 8, foram realizadas simulações na solução do problema RSA para a EON da Figura 11, seguindo a mesma metodologia e adotando-se os mesmos parâmetros e características físicas descritos no Capítulo 2.

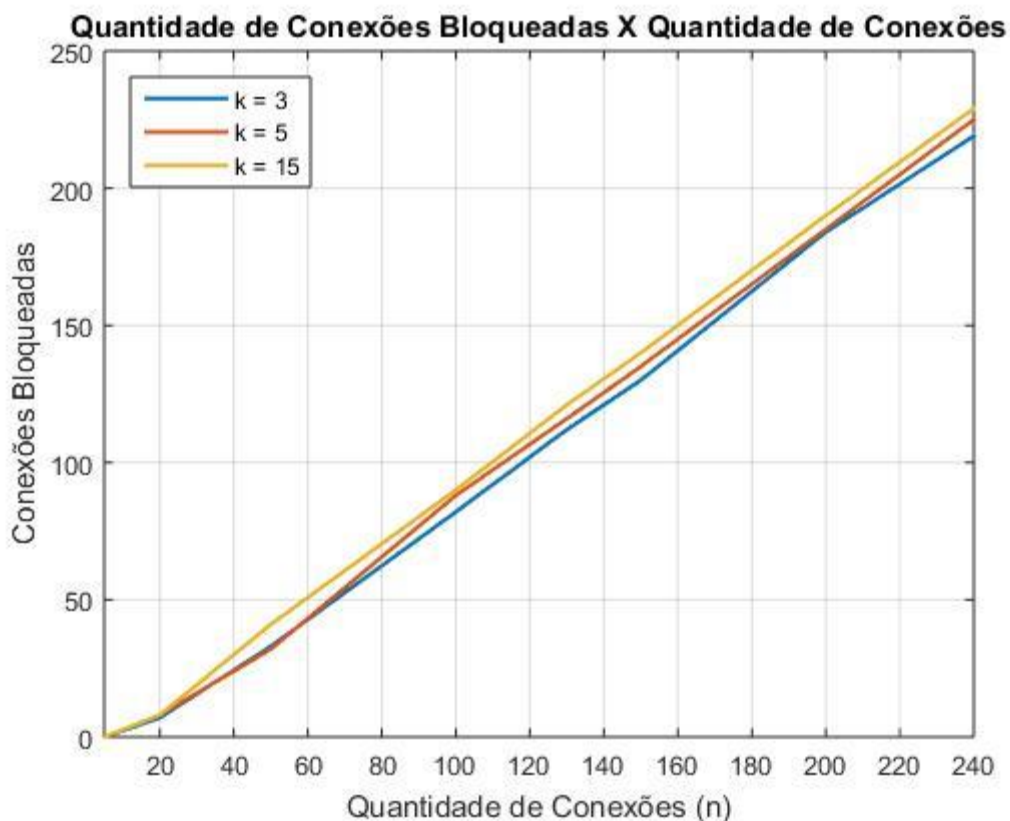
Os mesmos cuidados tomados nas simulações para a rede de 6 nós, também foram aplicados à NSFNET, visando possibilitar uma correta simulação, como a geração dos mesmos valores aleatórios de uma mesma demanda  $d_i = (o_i, t_i, x_i)$ , ao aumentar a quantidade de possíveis rotas para cada conexão; os nós de origem e destino são possíveis do ponto de vista de um grafo, isto é,  $o_i \neq t_i$  e a demanda não poderia ultrapassar a quantidade máximo admissível, ou seja,  $(n_i + GB) \leq \phi$ , no problema RSA, ou  $x_i = R_i$  deve ser menor do que a máxima taxa de transmissão disponibilizada pela EON, para o problema RMSA.

As simulações utilizam o valor de  $k$  (quantidade de rotas mais curtas definidas pelo algoritmo de Yen) iguais a 3, 5 e 15. Além disso, é utilizado o conjunto de conexões simultâneas na rede de  $n = \{5, 20, 50, 100, 130, 150, 200, 240\}$ , ou seja, as simulações consideraram desde 5 conexões simultâneas na rede até um máximo de 240 conexões simultâneas, para todos os valores de  $k$  caminhos considerados.

Assim como feito para a rede da Figura 8, todas as simulações foram feitas utilizando-se um computador com processador Intel® Core™ i5-4590 com CPU @ 3,30 GHz; memória instalada (RAM) de 4,00 GB (utilizável 3,30 GB) e sistema operacional Windows 7 Professional (Service Pack 1) de 64 bits; sendo o MatLab utilizado na versão R2015a (8.5.0.197613) 64-bits (Win64).

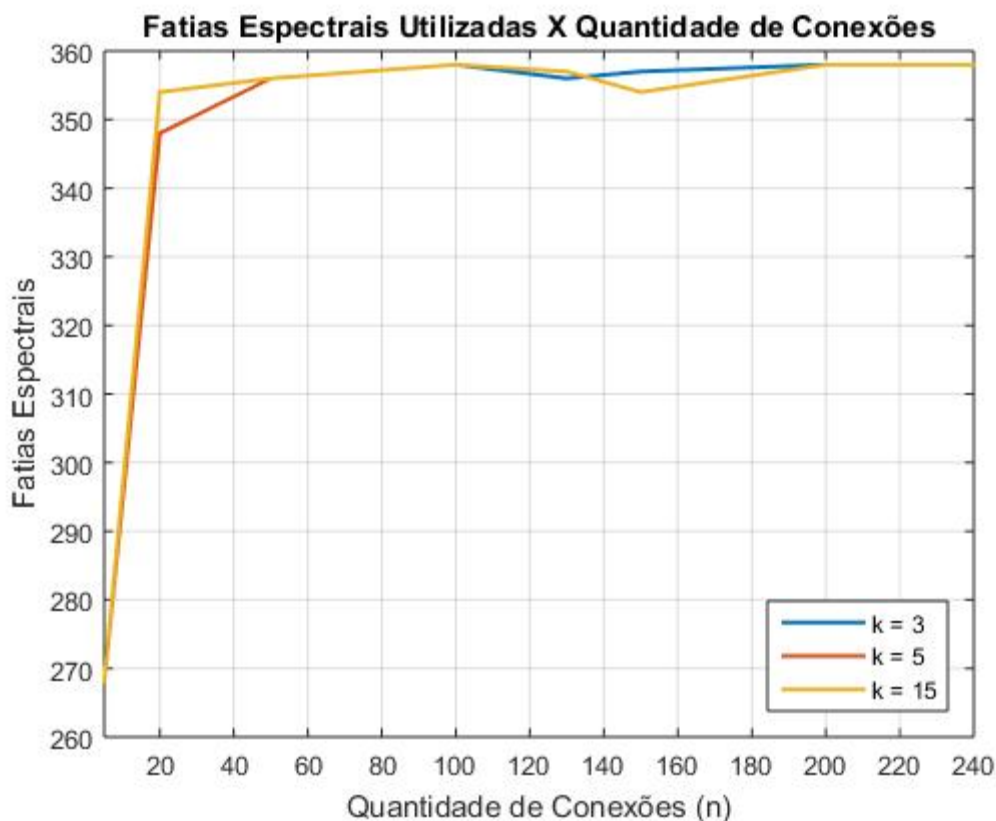
As matrizes  $D$  (geradas aleatoriamente) apresentadas no Apêndice B foram utilizadas nas simulações para a solução do problema RSA na EON da Figura 11 e  $D = [o_1 \ t_1 \ d_1; o_2 \ t_2 \ d_2; \dots; o_i \ t_i \ n_i]$ .

Os gráficos da Figura 12 apresentam a quantidade de conexões bloqueadas quando se aumenta a quantidade total de conexões simultâneas, visando solucionar o problema RSA da EON, para valores de  $k = 3$ ,  $k = 5$  e  $k = 15$ , chegando-se a 240 conexões simultâneas na EON. Uma vez que o algoritmo “voraz” aplica a política MSF para alocação do espectro, a primeira rota disponível definida pelo algoritmo de Yen (menor custo) também é selecionada. Observa-se, pelos gráficos da Figura 12, que tal decisão não foi a melhor, uma vez que, mesmo quando são aumentados os valores de  $k$ , há também um aumento na quantidade de bloqueios na rede, pois o algoritmo procura atender as demandas subsequentes com rotas que possuem um maior compartilhamento de enlaces e, conseqüentemente, menores são as chances de haver fatias espectrais disponíveis.



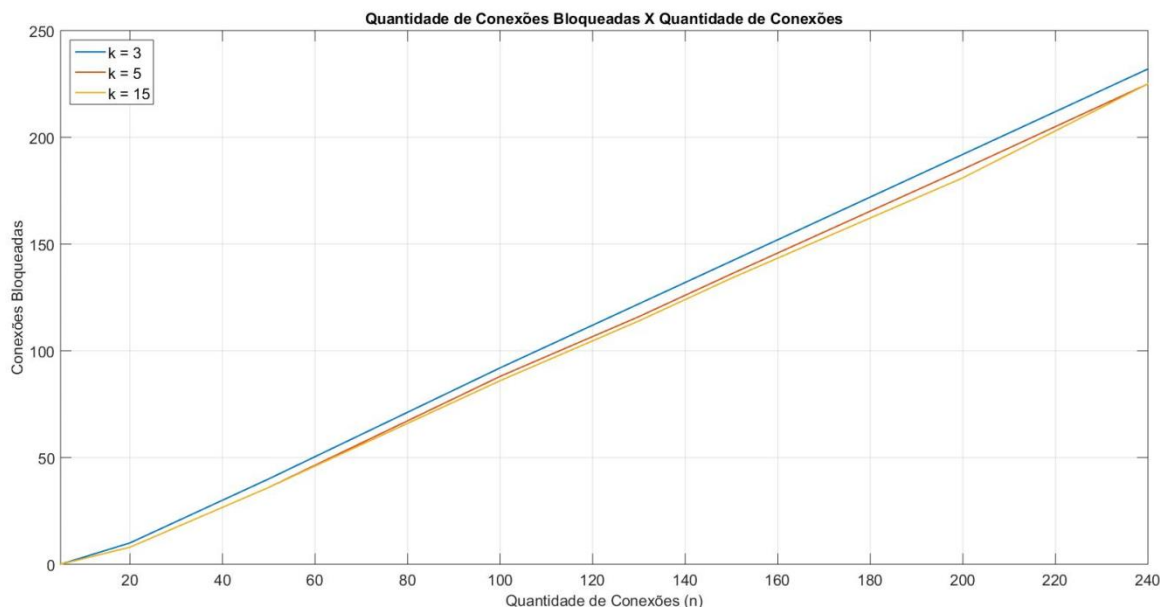
**Figura 12 – Total de conexões bloqueadas quando é aumentada a quantidade de conexões simultâneas na solução do problema RSA na NSFNET.**

Os gráficos da Figura 13 apresentam a quantidade máxima de fatias espectrais utilizadas na rede pelas demandas que puderam ser atendidas, visando solucionar o problema RSA. Observa-se que acima de 20 conexões simultâneas, esta quantidade chega ao limite máximo permitido  $\phi$ , sendo que o atendimento de novas conexões só seria possível por caminhos disjuntos e para demandas que requeiram uma quantidade menor de fatias espectrais, conforme já observado nos gráficos da Figura 12. Assim como feito na rede de 6 nós, foi utilizada uma única simulação para cada conexão simultânea na EON.



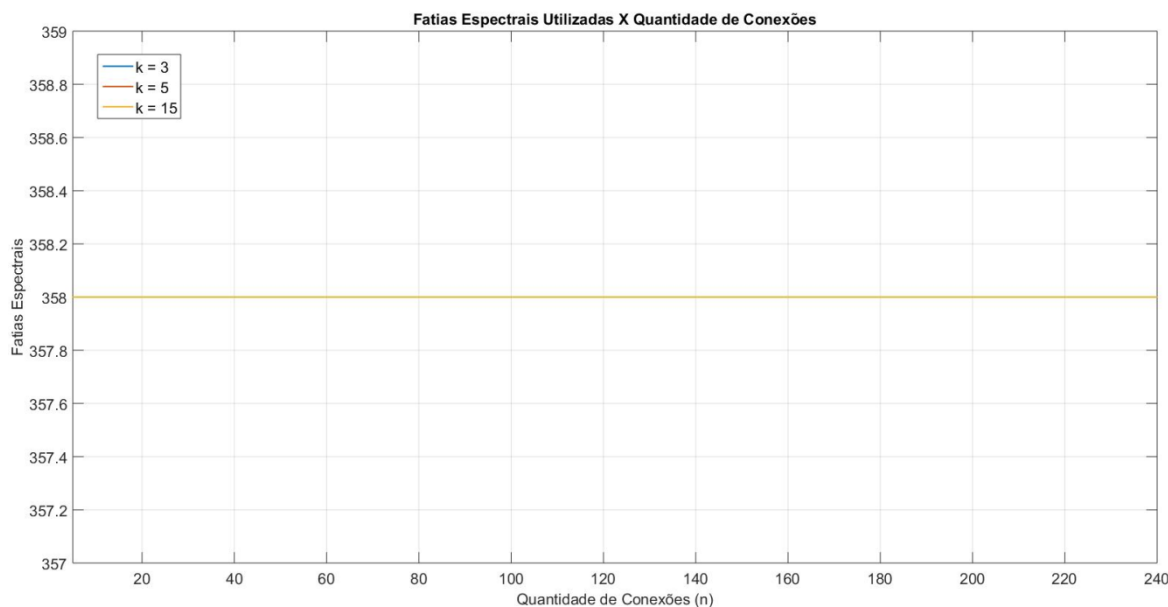
**Figura 13 – Quantidade de fatias espectrais totais utilizadas quando é aumentada a quantidade de conexões simultâneas na solução do problema RSA na NSFNET.**

Os gráficos da Figura 14 apresentam a quantidade de conexões bloqueadas quando se aumenta a quantidade total de conexões simultâneas, visando solucionar o problema RMSA da EON da Figura 11, para taxas que variaram de 40Gbps a 1Tbps, conforme as apresentadas na Tabela 2 e para valores de  $k = 3$ ,  $k = 5$  e  $k = 15$ , chegando-se a 240 conexões simultâneas na EON. Um único ciclo de rodada da simulação foi realizado, sendo que a quantidade de conexões aumenta, porém mantendo-se as conexões já estabelecidas anteriormente. Observa-se que a quantidade de conexões bloqueadas aumenta de maneira quase que linear, com o aumento da quantidade de conexões simultâneas na EON. Além disso, para  $k = 15$  é possível notar que a quantidade de bloqueios é ligeiramente menor do que para os outros valores de  $k$ .



**Figura 14 – Total de conexões bloqueadas quando é aumentada a quantidade de conexões simultâneas na solução do problema RMSA na NSFNET.**

Os gráficos da Figura 15 apresentam a quantidade máxima de fatias espectrais que são utilizadas em toda a rede quando se procura atender uma maior quantidade de demandas, visando solucionar o problema RMSA. Observa-se que esta quantidade alcança sempre o limite máximo permitido ( $\phi$ ) em cada *link* da EON, ou seja, para valores de  $5 \leq n \leq 240$ . Cabe ressaltar que, assim como feito para a rede da Figura 8, foi utilizada uma única simulação para cada conexão simultânea na NSFNET.



**Figura 15 – Quantidade de fatias espectrais totais utilizadas quando é aumentada a quantidade de conexões simultâneas na solução do problema RMSA na NSFNET.**

#### 4. Algoritmo Genético

O Algoritmo Genético (GA – *Genetic Algorithm*) foi inicialmente proposto na década de 1970 por John H. Holland [40], sendo uma técnica de busca e otimização inspirada na teoria da evolução das espécies. Num GA, codifica-se uma potencial solução para um problema, em uma estrutura de dados que tem a forma de um "cromossomo", sobre a qual se aplicam operadores de seleção, recombinação e mutação. Uma função objetivo de avaliação de aptidão ou custo (*fitness function*) é definida para avaliar a qualidade de uma possível solução para o problema. Cada indivíduo recebe uma "nota" a partir dessa função, permitindo a seleção dos indivíduos mais aptos. Os algoritmos genéticos são, em geral, vistos como otimizadores de funções, embora possam ser aplicados a vários tipos de problemas.

Um algoritmo genético se inicia com uma população inicial de "cromossomos" (conjunto inicial de possíveis soluções), em geral, escolhida de forma aleatória. Os "cromossomos" são avaliados e a eles são aplicados os operadores genéticos como seleção, cruzamento ou recombinação (*crossover*) e mutação, dando

origem a uma nova geração, de modo que aqueles que representarem uma melhor solução tenham maiores chances de reprodução, isto é, de produzir descendentes. Este processo de evolução é repetido iterativamente até satisfazer algum critério de parada.

O operador de seleção determina a probabilidade dos indivíduos serem selecionados pela avaliação da aptidão, sendo o mecanismo mais utilizado o de roleta, no qual cada indivíduo da população aumenta sua probabilidade de ser escolhido para gerar descendentes com a avaliação de aptidão de cada um. Assim a roleta é "girada" para "sortear" os indivíduos que se submeterão à aplicação dos operadores genéticos. Neste caso, os indivíduos mais aptos têm suas características propagadas através das gerações [8]. O operador de cruzamento é aplicado aos pares de indivíduos intercambiando partes de seus "materiais genéticos", numa tentativa de imitar a reprodução natural por acasalamento.

O operador de mutação realiza uma alteração aleatória no "material genético" (cromossomo) de um indivíduo, permitindo que o GA explore novos pontos no espaço de busca [8], podendo ser benéfico ou não para o resultado do problema. Ao final do "processo evolutivo", espera-se que a população final possua uma solução próxima da ótima.

Os algoritmos genéticos são uma potencial ferramenta para a solução do complexo problema de RMSA em redes DWDM, conforme apresentado a seguir.

#### **4.1. RSA e RMSA usando Algoritmo Genético**

Considerando-se os problemas RSA e RMSA *off-line* aplicados a uma EON e utilizando a política MSF, aplica-se um Algoritmo Genético<sup>4</sup> (GA), com o objetivo de minimizar a utilização da largura espectral total na rede, aumentando, assim, a probabilidade do atendimento de futuras novas demandas.

---

<sup>4</sup> As funções do GA no MatLab, que foi a ferramenta computacional utilizada nas simulações, trabalham com codificações binárias e de inteiros, tornando-se coerente adotar uma destas duas opções, visando proporcionar maior simplicidade e melhor desempenho nos resultados obtidos.



As notações auxiliares para aplicação do GA, além das apresentadas na Seção 2.4, estão descritas abaixo [37]:

- $\pi^i \rightarrow$  vetor de permutação das demandas pertencentes a  $D_i = \{d : d \in D, d_i = n\}$ , para cada  $n \in N = \{n : \exists d \in D, d_i = n\}$ .
- $\pi$  é vetor que representa a sequência de demandas a ser processada pelo algoritmo RMSA, onde  $\pi = [\pi_{máx}^i, \dots, \pi^i, \dots, \pi_{mín}^i]$ , onde  $\pi_{máx}^i$  é o vetor da conexão que requer maior quantidade de fatias espectrais (RSA) ou taxa de transmissão (RMSA) em cada enlace da rede e  $\pi_{mín}^i$  a que necessita de uma menor quantidade. Cabe ressaltar que cada um destes vetores é formado por um nó de origem, um nó de destino e fatias espectrais ou taxa de transmissão da demanda  $i$ .

#### 4.1.1. Operadores Genéticos do GA

O GA começa com uma população inicial de “cromossomos”, sendo que cada “cromossomo” é uma possível solução codificada. Assim, considerando-se os cromossomos iniciais  $p_1$  e  $p_2$  como sendo formado por “genes” (vetores de  $\pi$ ), conforme apresentado na Figura 16. Cabe ressaltar que a ordem que cada “gene” ocupa no “cromossomo” representa esta mesma posição na matriz  $D$ , sendo que um vetor  $\pi^i$  está associado a uma demanda  $d_i$ . Além disso, o vetor  $\pi$  está associado às matrizes  $P$  (possíveis  $k$  rotas para cada conexão requerida por  $d_i$ ) e  $F$  (fatias espectrais para cada conexão), sendo que cada “gene” é formado por uma combinação entre elas, ou seja, o número inscrito (“alelo”) de cada “gene” para cada “cromossomo” da Figura 16 representa a posição  $k \in P$  ocupada nas matrizes  $P$  e  $F$ , descritas na Seção 2.4, com  $\pi^i = \{1, 2, 3, \dots, |P|\}$ .

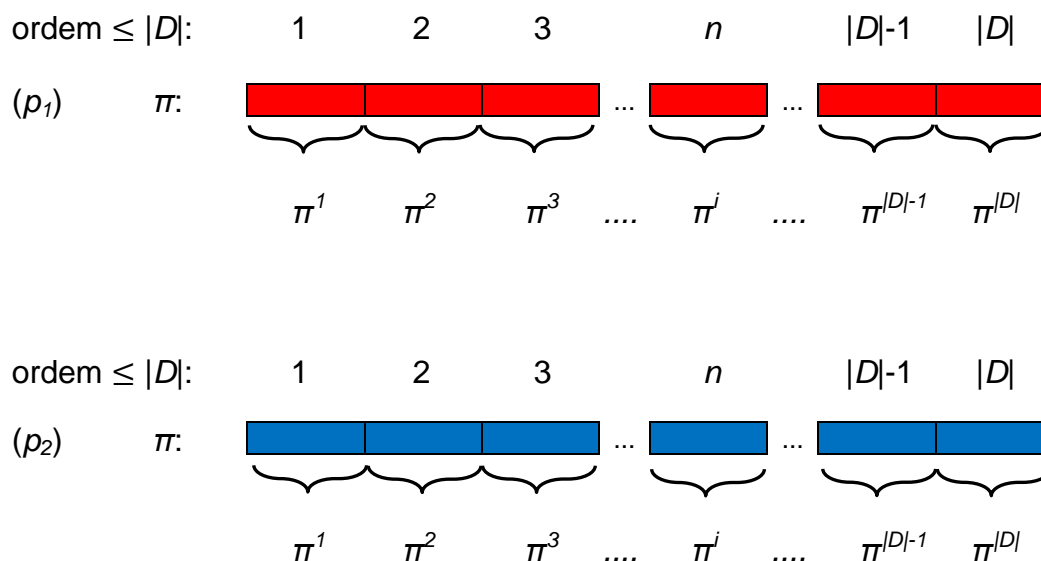


Figura 16 – Exemplos de “cromossomos” progenitores  $p_1$  e  $p_2$ .

A recombinação foi feita de duas formas. A primeira gera um novo “cromossomo” com base na mescla dos “genes” dos seus progenitores da Figura 16, ou seja, contém alguns “genes” de  $p_1$  e outros de  $p_2$ , resultando no “cromossomo”  $p_0$  da Figura 17.

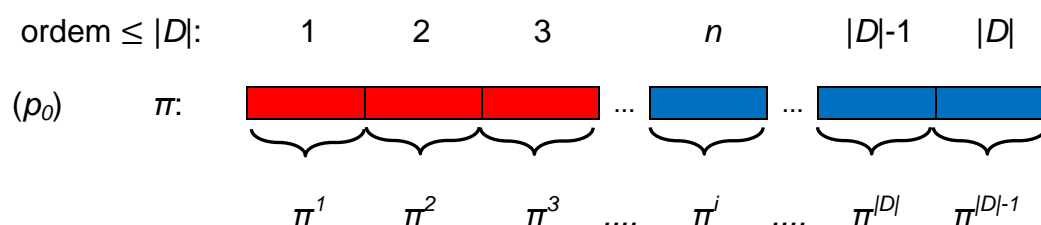
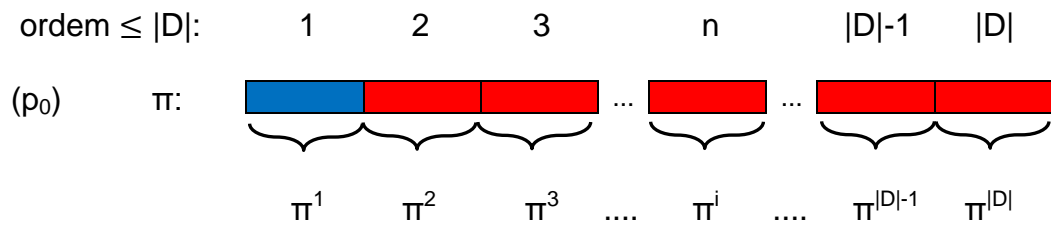


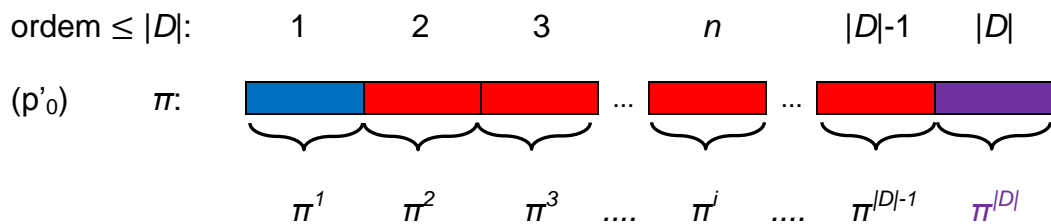
Figura 17 – Exemplo do “cromossomo” gerado pela “mescla” de “genes” dos “cromossomos”  $p_1$  e  $p_2$ .

A outra forma de recombinação faz uma troca de “genes”, de forma aleatória, em apenas um dos “cromossomos” progenitores da Figura 16, por exemplo, em  $p_1$ , substituindo-o por outro “gene” pertencente ao “cromossomo”  $p_2$ , de forma a gerar um terceiro “cromossomo” ( $p_0$ ), diferente destes. Portanto, o “cromossomo”  $p_0$  da Figura 18 apresenta uma modificação no vetor  $\pi^1$  de  $p_1$ , isto é, o primeiro “gene” de  $p_0$  é originário de  $p_2$ , e todo o restante foi fornecido por  $p_1$ , gerando, assim, um novo “cromossomo”.



**Figura 18 – Exemplo do “cromossomo” gerado pela “permutação” de “genes” entre os “cromossomos”  $p_1$  e  $p_2$ .**

Já a mutação pode ocorrer através da substituição aleatória de algum dos “genes” pertencentes ao cromossomo  $p_0$  (*offspring*), gerando o cromossomo  $p_0'$ , conforme apresentado na Figura 19, com a substituição do último “gene” do cromossomo de  $p_0$  por  $\pi^x$ :



**Figura 19 – Exemplo do “cromossomo” gerado pela mutação do “cromossomo”  $p_0$ .**

Os valores de aptidão dos indivíduos da população inicial e das gerações seguintes, usados para realizar a seleção dos indivíduos mais aptos, são calculados usando a função de aptidão (função objetivo ou *fitness function*) que determina a qualidade de uma solução. Esta função deve ser definida baseada nas características de cada problema, sendo que a evolução satisfatória do algoritmo genético está diretamente relacionada à sua adequada elaboração.

A função de aptidão (*fitness function*) a ser definida no estudo deverá levar em consideração o comprimento total da rota (definição da rota baseada nas tabelas dos  $k$ -caminhos mais curtos definidos por Yen) e a ocupação espectral da rede, isto é, a fração da capacidade da rede alocada para as demandas requeridas (estado da rede).

## 4.1.2. Funções de Aptidão para o GA

Como vimos, a ideia do GA é escolher dentre candidatos possíveis os mais aptos e fazê-los gerar descendentes que sejam ainda mais aptos. Isso depende de avaliar a aptidão dos candidatos. Em nosso problema o “cromossomo” codifica as rotas e as fatias espectrais de cada demanda, assim cumpre avaliar a aptidão da configuração da rede codificada no “cromossomo”, visando atender as demandas impostas à EON. Portanto, são propostas três funções de aptidão, descritas nas Seções 4.1.2.1, 4.1.2.2 e 4.1.2.3 a seguir.

### 4.1.2.1. Minimização do Compartilhamento de Rotas

A primeira função de aptidão considera as rotas das conexões demandadas, sendo que os *links* (ou enlaces) que tenham menores quantidades de “saltos”, isto é, menos enlaces compartilhados, terão preferência no atendimento da conexão. Cada célula  $l_{(i,j)}$  da matriz  $L$  apresenta a quantidade de vezes que o enlace é compartilhado por conexões, sendo igual a zero quando não há compartilhamento algum. Utiliza-se esta informação para minimizar a quantidade de enlaces compartilhados ao longo de todo o caminho da conexão, considerando as  $k$  possíveis rotas retornadas pelo algoritmo de Yen.

Portanto, a primeira função é definida através do somatório de cada um dos enlaces compartilhados no estabelecimento das conexões da EON. Desta forma, a função objetivo é

$$f_1 = \sum_{i=1}^{|V|-1} \sum_{j=i+1}^{|V|} l_{i,j}$$

**Equação 13**

O objetivo da Equação 13 é minimizar a quantidade de enlaces compartilhados pelas conexões simultâneas da EON, sendo o resultado esperado

uma possível rota para cada demanda requerida, com alocação do espectro necessário para cada conexão.

#### 4.1.2.2. Minimização das Fatias Espectrais Utilizadas

A outra função de aptidão visa analisar a alocação espectral total de uma EON. Desta forma, fatias espectrais que já estiverem sendo utilizadas por uma conexão, correspondendo à sua ocupação em algum enlace da rota, terão influência negativa na aptidão de um indivíduo, aumentando a probabilidade do seu descarte entre gerações e possibilitando a escolha de outros candidatos que possuam enlaces com fatias espectrais contínuas e contíguas disponíveis.

A quantidade total de subportadoras utilizadas na EON pode ser calculado como sendo o somatório de fatias espectrais  $s_{|S|} \in S$  utilizadas nos enlaces da EON [41] para atender às demandas  $x_i$ , ou seja, as  $n_i$  fatias espectrais requeridas para cada uma das  $i$  conexões simultâneas da EON (RSA) ou  $R_i$  taxas de transmissão das  $i$  demandas solicitadas (RMSA). Desta forma, a função objetivo é

$$f_2 = \sum_{i=1}^{|D|} x_i |p_{i,k}|$$

**Equação 14**

Sendo  $|p_{i,k}|$  definido na Seção 2.4. O objetivo da Equação 14 é de minimizar a largura espectral total utilizada em toda EON, sendo o resultado esperado uma possível rota para cada demanda requerida, com alocação do espectro necessário para cada conexão.

### 4.1.2.3. Minimização de Rotas e Fatias Espectrais

Finalmente, a última função objetivo combina os critérios apresentados pelas duas funções anteriores, ou seja, objetiva minimizar a quantidade de enlaces compartilhados por uma dada conexão e a quantidade de fatias espectrais totais ocupados na rede.

A partir das funções objetivo anteriores podemos definir uma terceira, como sendo a combinação destas, representada por

$$f_3 = f_1 + f_2$$

**Equação 15**

O objetivo da Equação 15 é minimizar a quantidade de enlaces compartilhados e a largura espectral total utilizada pelas conexões da EON. O seu resultado também deverá fornecer uma possível rota para cada demanda requerida baseada na topologia dada, com alocação do espectro necessário para cada conexão.

Assim, o valor da função de aptidão (ou objetivo) pode ser calculado através de  $f_1$ ,  $f_2$  ou  $f_3$ , na qual os indivíduos com boa aptidão (valores baixos) poderão ser selecionados para a próxima geração.

### 4.1.3. Algoritmo GA Proposto

O pseudocódigo para o algoritmo genético é apresentado pelo Algoritmo 4, com base nas notações apresentadas nos Capítulos 2 e 4. Antes da utilização do GA, o algoritmo de Dijkstra é aplicado, encontrando os possíveis caminhos entre dois nós conhecidos da matriz  $D$  e o algoritmo de Yen encontra os  $k$  caminhos de menor custo, baseado na matriz de adjacências  $A$ , dentre os fornecidos pelo algoritmo de Dijkstra.

A população inicial do GA é formada por “cromossomos” que apresentam “genes” compostos por rotas e fatias espectrais requeridas por cada demanda  $d_i$ ,

isto é, cada “gene” é uma demanda, formada por elementos do arranjo de células  $P$  (uma das  $k$  possíveis rotas para uma determinada demanda) e  $F$  (fatias espectrais para cada uma das conexões pertencentes a  $P$ ). Os indivíduos da população são avaliados por uma das funções de aptidão apresentadas na Seção 4.1.2, para os quais são alocados valores de  $(n_i + GB)$ , ao solucionar o problema RSA ou  $R_i$ , no caso do problema RMSA, para cada conexão, procurando atender o critério MSF. Os indivíduos mais aptos (melhor avaliados) são selecionados para combinação e mutação, gerando a próxima geração. O processo é repetido até o critério de parada ser alcançado. Caso haja alguma demanda que não possa ser atendida, esta será bloqueada. O resultado final são as demandas que puderam ser atendidas e, ao considerarmos o problema RMSA, também o tipo de modulação OFDM aplicada a cada uma, com base na distância total do caminho definido.

```

1.  function GA ( $A, D, P, S, F, d_i, \pi, f_1, f_2, f_3$ )
2.   $S = 358$  % quantidade máxima de fatias espectrais em cada enlace
3.   $A \leftarrow$  {rotas de  $o_i$  a  $t_i$ } % matriz de adjacências
4.  for  $n = N_i$  do % gera  $N_i$  demandas  $d_i$  aleatoriamente
5.       $D \leftarrow$  {cria  $d_i$ } % demanda  $d_i = (o_i, t_i, x_i)$ 
6.       $F \leftarrow$  { $n_i + GB$ } % fatias espectrais com banda de guarda
7.  end for
8.   $D \leftarrow$  reordenação de  $d_i$  % critério MSF
9.  for  $v = 1, \dots, n$  do % início da aplicação dos algoritmos de roteamento
10.      $P(v) \leftarrow$   $k$ -caminhos de custo mínimo em  $A$ 
11.      $d_i \leftarrow P \cap \{P(v)\}$  % define a melhor rota para  $d_i$ 
12.      $|D| = 1$  % N° de Gerações
13.     melhor "cromossomo" ( $p_i$ ) = melhor "cromossomo" ( $p_{i+1}$ )
14.     while N° Gerações < N° máximo de Gerações do
15.          $D \leftarrow \{d_1, \dots, d_i\}$  % População Inicial
16.          $(p_i, p_{i+1}) \in D$  % "cromossomos" da População
17.          $(p_i, p_{i+1}) \leftarrow$  Aplicação dos operadores genéticos
18.          $p_0 \leftarrow f_1, f_2, f_3$  % melhor "cromossomo" analisado pelas
            funções de aptidão
19.          $p'_0 \leftarrow f_1, f_2, f_3$  % melhor "cromossomo" com mutação
            analisado pelas funções de aptidão
20.          $(n_i + GB) \leftarrow F \cap \{S\}$  % aloca fatias para a demanda
21.          $d_i \leftarrow$  atualize ( $D, P, F$ )
22.     end while
23.      $(p_0, p'_0) \leftarrow$  Aplicar técnica OFDM
24.     devolva  $\langle \pi_1, \dots, \pi_{i-1}, \pi_i \rangle$ 
25.      $d_i \leftarrow$  atualize ( $D, P, F, \pi$ )
26. end for
27. Algoritmo atualize ( $D, P, F, d_i, \pi$ )
28.  $d_i \leftarrow$  {sem fatias ou taxa de transmissão disponíveis nos  $k$ -caminhos}
29. for  $\{ \nexists d_i \subset F \}$  do
30.      $D \leftarrow \{d_i \text{ bloqueada}\}$ 
31.      $d_i \leftarrow$  atualize ( $D$ )
32. end for

```

**Algoritmo 4 – Pseudocódigo para o GA aplicado a uma EON.**



#### 4.1.4. Resultados do GA para Rede de 6 Nós

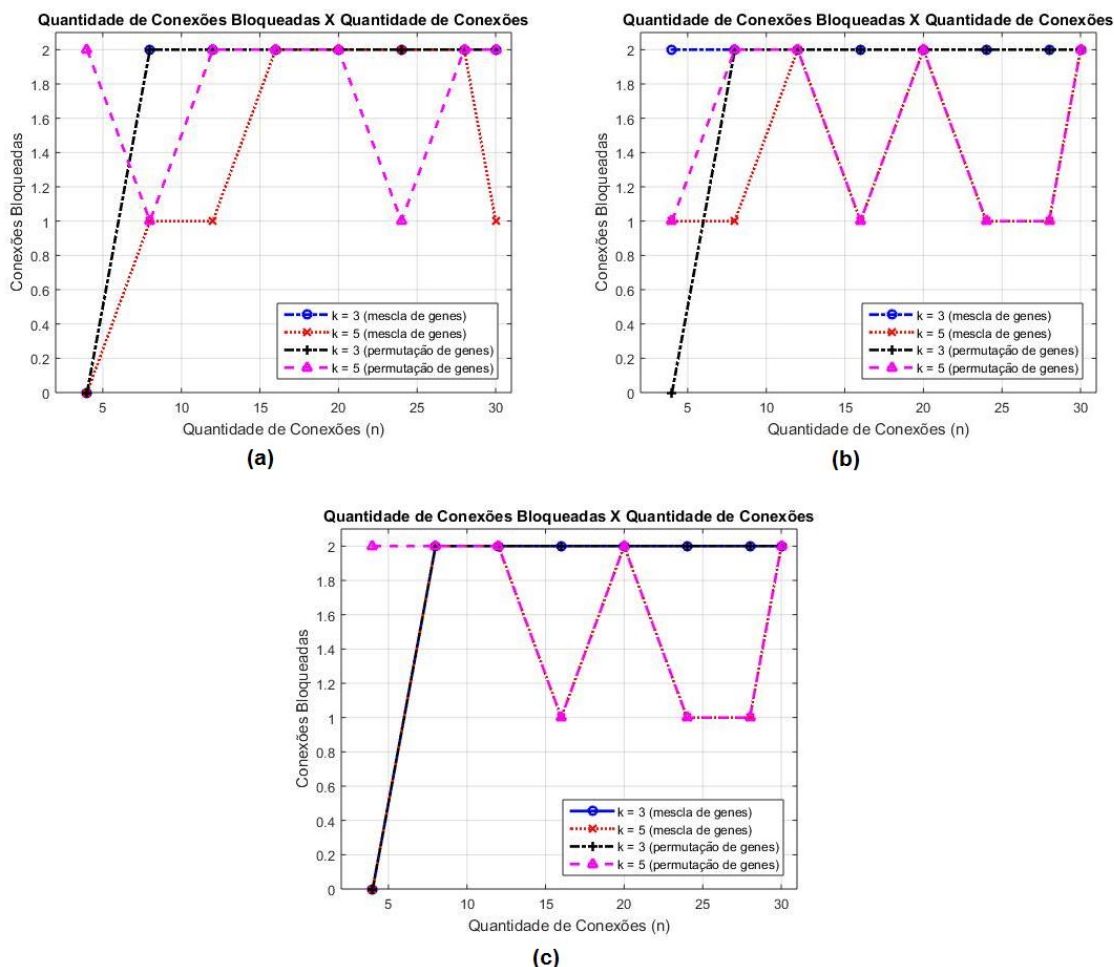
Assim como realizado para o algoritmo “voraz” e com o objetivo de facilitar comparações entre eles, foram realizadas inicialmente simulações na mesma rede óptica (Figura 8), seguindo a mesma metodologia e adotando-se os mesmos parâmetros e características físicas, com uma posterior análise na NSFNET.

A elaboração do GA apresenta uma população inicial de 150 "cromossomos", escolhidos de forma aleatória. Cabe ressaltar que uma quantidade grande de indivíduos na população é necessária para manter boa diversidade, porém se este valor for muito grande, o tempo de processamento pode se tornar proibitivo.

Algumas vezes o algoritmo não converge ou não converge para a solução ótima, que pode ter aparecido em uma iteração (geração) anterior. Portanto, o processo de evolução nas simulações foi repetido até o critério de parada ser atingido, ou seja, após 100 gerações, sendo este valor o que apresentou boa convergência do algoritmo na solução dos problemas apresentados.

A mutação é um fator de ocorrência pequena em uma população e a escolha do valor apropriado a ser aplicado é muito importante, uma vez que, um valor muito pequeno leva a uma evolução lenta, enquanto que um valor muito alto pode levar a grandes flutuações na função de aptidão, que nunca convergirá. Assim, o valor de 0,1 (10%) é razoável, sendo considerado para todas as simulações realizadas.

Os gráficos da Figura 20 apresentam a quantidade de conexões bloqueadas quando se aumenta a quantidade total de demandas requeridas na EON da Figura 8, chegando-se ao limite de 30 conexões simultâneas na rede, para valores diferentes da quantidade de rotas possíveis  $k$ , com os diferentes operadores genéticos de recombinação para solução do problema RSA. Também se utilizam as três funções de aptidão, ou seja,  $f_1$ ,  $f_2$  e  $f_3$ .



**Figura 20 – Total de conexões bloqueadas quando é aumentada a quantidade de conexões simultâneas para solução do problema RSA na rede de 6 nós, com: (a) função  $f_1$ ; (b) função  $f_2$  e (c) função  $f_3$ .**

A função de aptidão  $f_1$  utilizada para gerar os resultados dos gráficos da Figura 20.a, apresentou um melhor desempenho para  $n \leq 8$  e  $k = 5$ , utilizando a recombinação baseada na mescla de “genes”. Entretanto, para valores de  $n > 8$ , o resultado apresentado foi pior do que os apresentados na Figura 20.b, utilizando  $f_2$  e na Figura 20.c, utilizando  $f_3$ .

A Tabela 4 apresenta a capacidade de demandas atendidas, com base na quantidade máxima de enlaces que tiveram compartilhamento na EON, quando utilizada a função de aptidão  $f_1$  com o operador de recombinação (*crossover*) que “mescla” os “genes” dos “cromossomos” dos progenitores. Os resultados da Tabela 5 também foram conseguidos utilizando-se a mesma função de aptidão, porém com a permutação de “genes”.

k	Quantidade de Conexões	Bloqueios	Quantidade de enlaces compartilhados	Capacidade de Demandas Atendidas (%)
3	4	0	0	100
3	8	2	1	62
3	12	2	1	67,2
3	16	2	3	74,6
3	20	2	3	79,2
3	24	2	3	79,9
3	28	2	6	88,8
3	30	2	6	86,7
5	4	0	0	100
5	8	2	1	62
5	12	2	1	67,2
5	16	2	3	74,6
5	20	2	3	79,2
5	24	2	3	79,9
5	28	2	6	88,8
5	30	2	6	86,7

Tabela 4 – Demandas atendidas com base na quantidade de enlaces compartilhados, utilizando-se  $f_1$  e mescla de “genes” na solução do problema RSA.

k	Quantidade de Conexões	Bloqueios	Quantidade de enlaces compartilhados	Capacidade de Demandas Atendidas (%)
3	4	0	0	100
3	8	1	1	80,3
3	12	1	1	83,3
3	16	2	1	86,3
3	20	2	3	79,2
3	24	2	3	79,9
3	28	2	3	88,8
3	30	1	3	93,3
5	4	2	0	29
5	8	1	1	80,3
5	12	2	1	67,2
5	16	2	1	86,3
5	20	2	3	79,2
5	24	1	3	89,8
5	28	2	6	88,8
5	30	2	6	93,3

Tabela 5 – Demandas atendidas com base na quantidade de enlaces compartilhados, utilizando-se  $f_1$  e permutação de “genes” na solução do problema RSA.

Comparando-se a Tabela 4 com a Tabela 5, observamos uma melhoria na capacidade de atendimento às demandas ao utilizarmos o operador de recombinação de permutação de “genes”. Entretanto, a capacidade de conexões atendidas é de 29% na Tabela 5, sendo menor do que a conseguida na Tabela 4, de 100%, para uma quantidade de conexões iguais a 4 e  $k = 5$ .

A função de aptidão  $f_2$  utilizada para gerar os resultados dos gráficos na Figura 20.b, apresentou um melhor desempenho para  $n \leq 8$  e  $k = 5$ , utilizando a recombinação baseada na permutação de “genes”, igualando-se, entretanto, aos resultados encontrados na Figura 20.c, quando  $n > 8$ , independentemente do valor de  $k$  e do operador de recombinação utilizado.

A Tabela 6 apresenta a capacidade de demandas atendidas, com base na quantidade de fatias espectrais totais utilizadas na EON, quando utilizada a função de aptidão  $f_2$  com o operador genético de cruzamento que utiliza a “mescla” dos “genes” entre os “cromossomos” dos progenitores. Já na Tabela 7 também é utilizada a mesma função de aptidão no fornecimento dos resultados apresentados, porém com a permutação de “genes”.

k	Quantidade de Conexões	Bloqueios	Quantidade de Fatias Espectrais totais utilizadas na EON	Capacidade de Demandas Atendidas (%)
3	4	2	335	29
3	8	2	448	62
3	12	2	489	67,2
3	16	2	471	74,6
3	20	2	511	79,2
3	24	2	636	79,9
3	28	2	614	88,8
3	30	2	667	86,7
5	4	0	335	100
5	8	2	448	62
5	12	2	489	67,2
5	16	2	471	74,6
5	20	2	511	79,2
5	24	2	636	79,9
5	28	2	614	88,8
5	30	2	667	86,7

Tabela 6 – Demandas atendidas com base na quantidade de fatias espectrais totais, utilizando-se  $f_2$  e mescla de “genes” na solução do problema RSA.

k	Quantidade de Conexões	Bloqueios	Quantidade de Fatias Espectrais totais utilizadas na EON	Capacidade de Demandas Atendidas (%)
3	4	1	335	62,8
3	8	1	344	80,3
3	12	2	419	67,2
3	16	1	471	86,3
3	20	2	433	79,2
3	24	1	530	89,8
3	28	1	604	94,4
3	30	2	612	86,7
5	4	1	335	62,8
5	8	2	344	62
5	12	2	419	67,2
5	16	1	471	86,3
5	20	2	496	79,2
5	24	1	530	89,8
5	28	1	604	94,4
5	30	2	612	86,7

Tabela 7 – Demandas atendidas com base na quantidade de fatias espectrais totais, utilizando-se  $f_2$  e permutação de “genes” na solução do problema RSA.

Comparando-se a Tabela 6 com a Tabela 7, observamos uma melhoria na capacidade de atendimento às demandas ao utilizar o operador de recombinação de permutação de “genes”. Entretanto, comparando os gráficos da Figura 20, observa-se que ao utilizar a função de aptidão conjunta  $f_3$ , quando  $n \leq 12$  é observado que a quantidade de conexões bloqueadas manteve-se constante tanto para  $k = 3$  quanto para  $k = 5$ , independentemente do tipo de operador de recombinação utilizado. Portanto, observa-se que as funções de aptidão utilizadas tiveram desempenhos parecidos, sendo que as funções de aptidão representadas por  $f_2$  e  $f_3$  tiveram menor variação nos resultados para solucionar o problema RSA na EON.

k	Quantidade de Conexões	Bloqueios	Capacidade de Demandas Atendidas (%)
3	4	0	100
3	8	2	62
3	12	2	67,2
3	16	2	74,6
3	20	2	79,2
3	24	2	79,9
3	28	2	88,8
3	30	2	86,7
5	4	0	100
5	8	2	62
5	12	2	67,2
5	16	2	74,6
5	20	2	79,2
5	24	2	79,9
5	28	2	88,8
5	30	2	86,7

Tabela 8 – Demandas atendidas com base na quantidade de conexões simultâneas, utilizando-se  $f_3$  e mescla de “genes” na solução do problema RSA.

k	Quantidade de Conexões	Bloqueios	Capacidade de Demandas Atendidas (%)
3	4	0	100
3	8	2	62
3	12	2	67,2
3	16	1	86,3
3	20	2	79,2
3	24	1	89,8
3	28	1	94,4
3	30	2	86,7
5	4	2	29
5	8	2	62
5	12	2	67,2
5	16	1	86,3
5	20	2	79,2
5	24	1	89,8
5	28	1	94,4
5	30	2	86,7

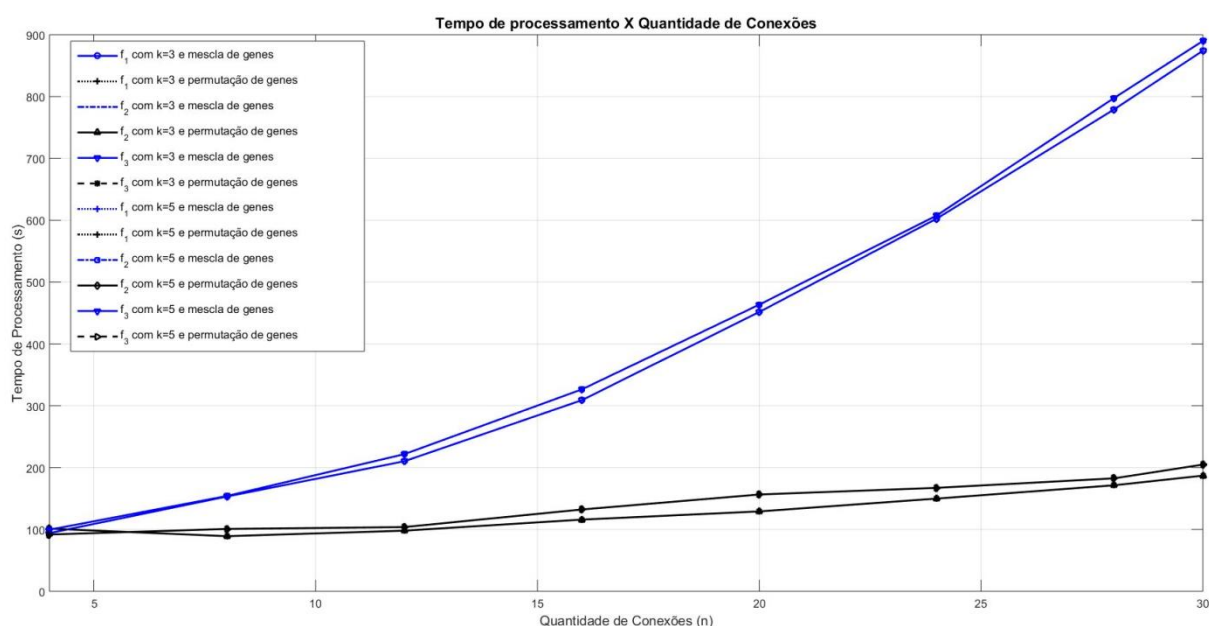
**Tabela 9 – Demandas atendidas com base na quantidade de conexões simultâneas, utilizando-se  $f_3$  e permutação de “genes” na solução do problema RSA.**

A Tabela 8 apresenta a capacidade de demandas atendidas, com base na quantidade de conexões simultâneas realizadas na EON, quando utilizada a função de aptidão  $f_3$  com a recombinação que utiliza a “mescla” dos “genes” entre os “cromossomos” dos progenitores. Os resultados da Tabela 9 também são conseguidos com esta mesma função de aptidão, porém com a permutação de “genes”.

Comparando-se a Tabela 8 com a Tabela 9, também observamos uma melhoria na capacidade de demandas atendidas para  $16 \leq n \leq 28$  e  $k = 5$ , quando é utilizado o operador de recombinação de permutação de “genes”. Entretanto, para uma quantidade de conexões iguais a 4 e  $k = 5$  na Tabela 9, a capacidade atendida de conexões é menor do que a conseguida na Tabela 8. Verifica-se que os resultados de ambas as tabelas foram bem próximos, porém a Tabela 9 apresentou uma menor quantidade de bloqueios por conexões simultâneas.

A Figura 21 apresenta uma comparação entre os tempos de processamento para cada tipo de iteração desenvolvida para o estudo, com  $k = 3$  e  $k = 5$ ,

utilizando-se o operador genético de recombinação baseado na “mescla” ou na permutação de “genes”, além das três funções de aptidão  $f_1$ ,  $f_2$  e  $f_3$ . No cálculo do tempo de processamento da programação, utilizaram-se os comandos *tíc* e *toc* do MatLab, visando determinar o tempo decorrido ao longo de toda a iteração. Para tal, utiliza-se o comando *tíc* no início da iteração e o tempo decorrido será computado como sendo todo o processamento das linhas de comando até o ponto em que o comando *toc* é aplicado.



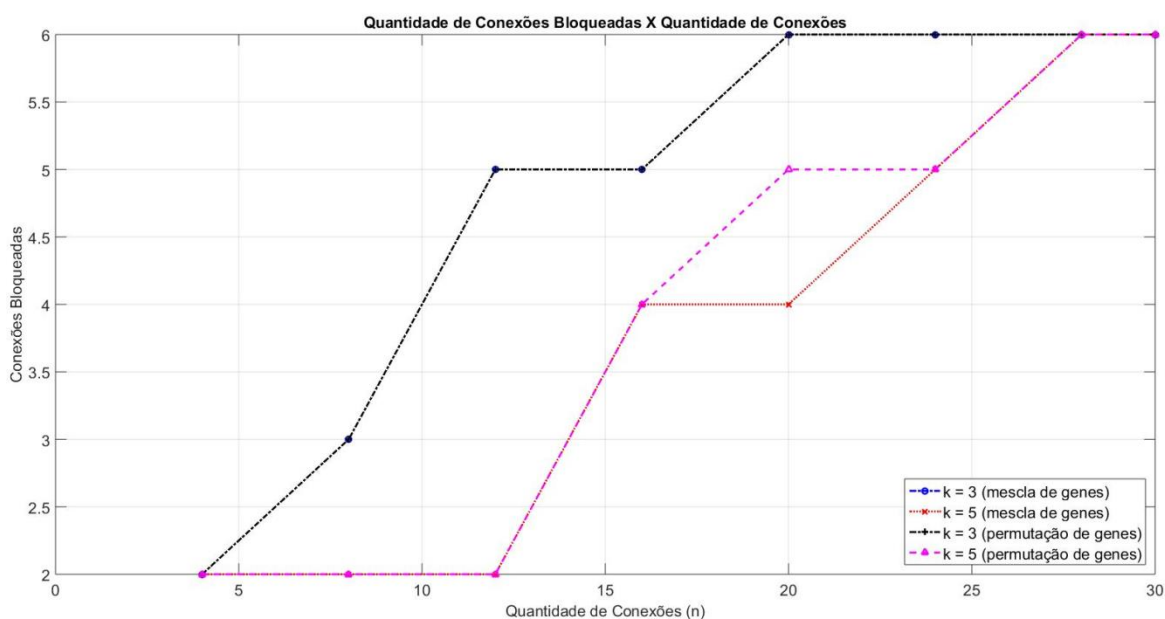
**Figura 21 – Tempo total de processamento (em segundos) quando se aumenta a quantidade de conexões simultâneas na solução do problema RSA na rede de 6 nós.**

Analisando os gráficos da Figura 21, observa-se que o tempo de processamento das simulações ao utilizar-se o operador genético de recombinação com base na permutação de “genes” é sempre menor, independentemente do valor de  $k$ , do que ao utilizar-se a recombinação baseada na mescla de “genes”. Além disso, o tempo de processamento aumenta com o aumento da complexidade da rede, ou seja, quanto maiores forem os valores de  $k$  e das demandas requeridas, mais tempo é necessário para o processamento do GA proposto para obter a solução do problema RSA da EON.

A solução do problema RMSA para a rede da Figura 8, considerou taxas que variaram de 40Gbps a 1Tbps, conforme apresentadas na Tabela 2, sendo que os



gráficos da Figura 22, Figura 23 e Figura 24 representam a quantidade de conexões bloqueadas quando se aumenta a quantidade total de conexões na EON, para os valores de  $k = 3$  e  $k = 5$ , aplicando-se os operadores genéticos de recombinação baseados na “mescla” e “recombinação” de “genes”, chegando-se ao limite de 30 conexões simultâneas na rede. Um único ciclo de rodada da simulação foi realizado, sendo que a quantidade de conexões aumenta, porém mantendo-se as conexões já estabelecidas anteriormente.



**Figura 22 – Total de conexões bloqueadas quando é aumentada a quantidade de conexões simultâneas para solução do problema RMSA na rede de 6 nós, aplicando-se a função  $f_1$ .**

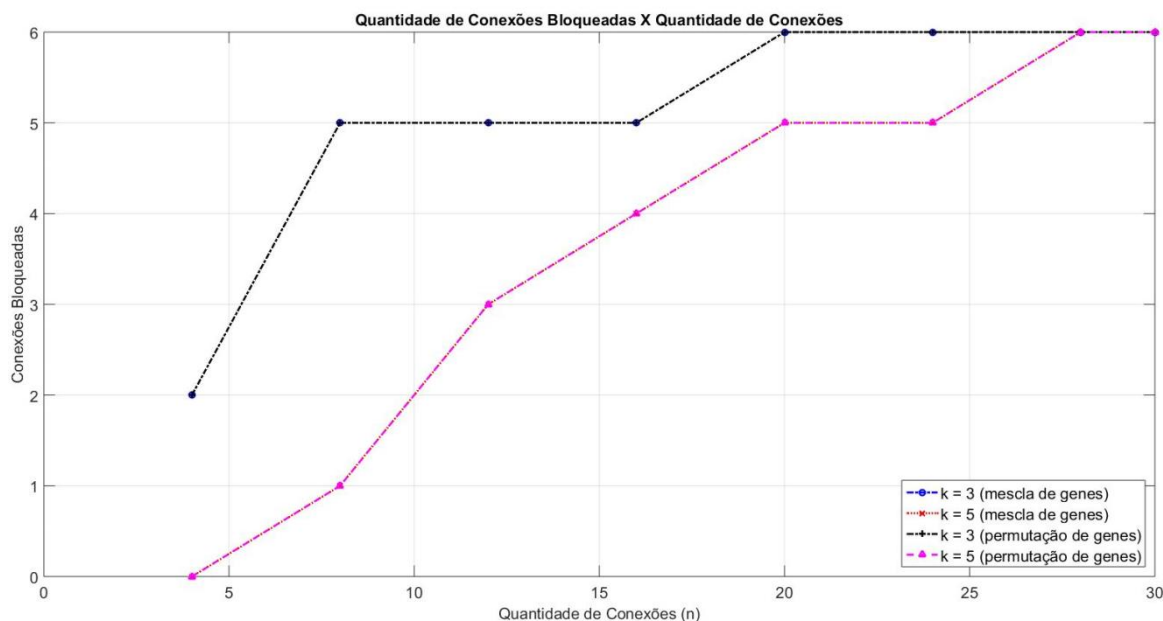


Figura 23 – Total de conexões bloqueadas quando é aumentada a quantidade de conexões simultâneas para solução do problema RMSA na rede de 6 nós, aplicando-se a função  $f_2$ .

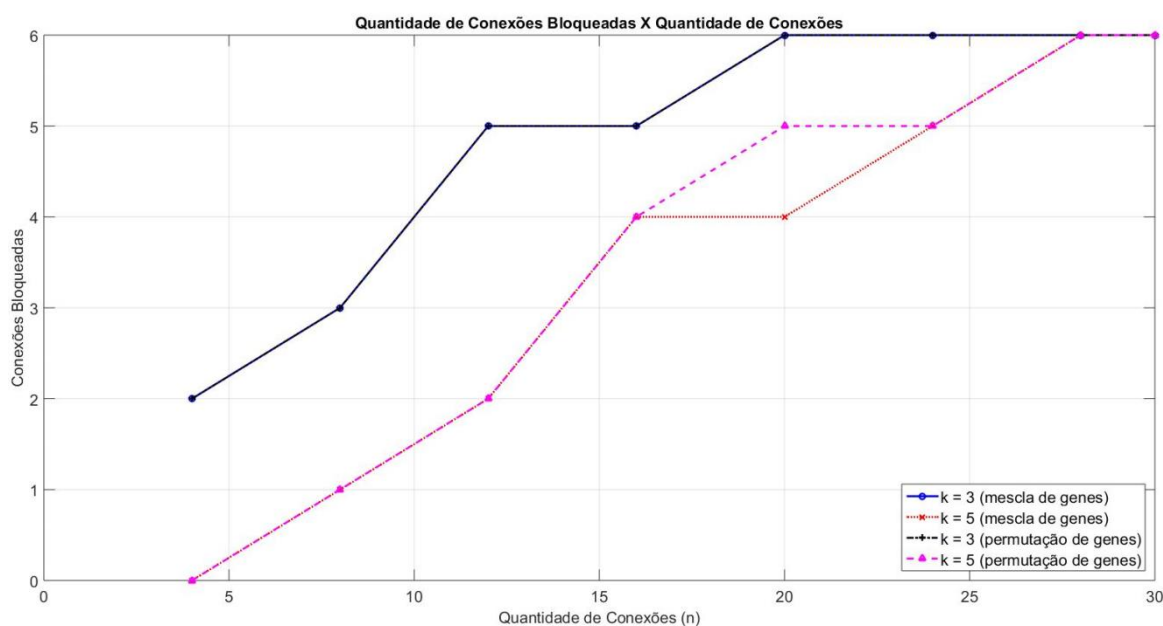
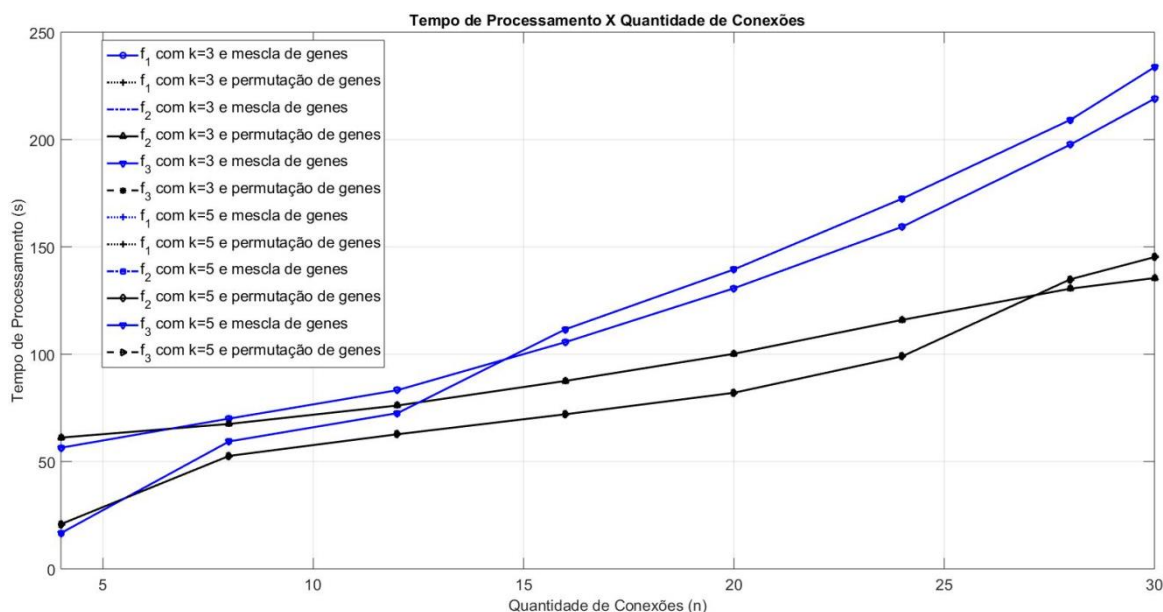


Figura 24 – Total de conexões bloqueadas quando é aumentada a quantidade de conexões simultâneas para solução do problema RMSA na rede de 6 nós, aplicando-se a função  $f_3$ .

Comparando-se os gráficos da Figura 22, Figura 23 e Figura 24, observa-se que o uso da função de aptidão  $f_3$ , com  $k = 5$  e aplicando-se o operador genético de recombinação baseado na “mescla” de “genes”, conseguiram-se os melhores

resultados, com uma menor quantidade de bloqueios, ao aumentar-se a quantidade de conexões simultâneas na EON. Entretanto, em todos os gráficos destas figuras, observa-se que a quantidade máxima de bloqueios alcançada foi a mesma (6 conexões bloqueadas), porém, na Figura 24 este valor só é alcançado para  $28 \leq n \leq 30$ .



**Figura 25 – Tempo total de processamento (em segundos) quando se aumenta a quantidade de conexões simultâneas na solução do problema RMSA na rede de 6 nós.**

Analisando os gráficos da Figura 25, observa-se que, assim como visto na Figura 21, o tempo de processamento das simulações ao utilizar-se o operador genético de recombinação com base na permutação de “genes” é sempre menor, independentemente do valor de  $k$  e da função objetivo considerada.

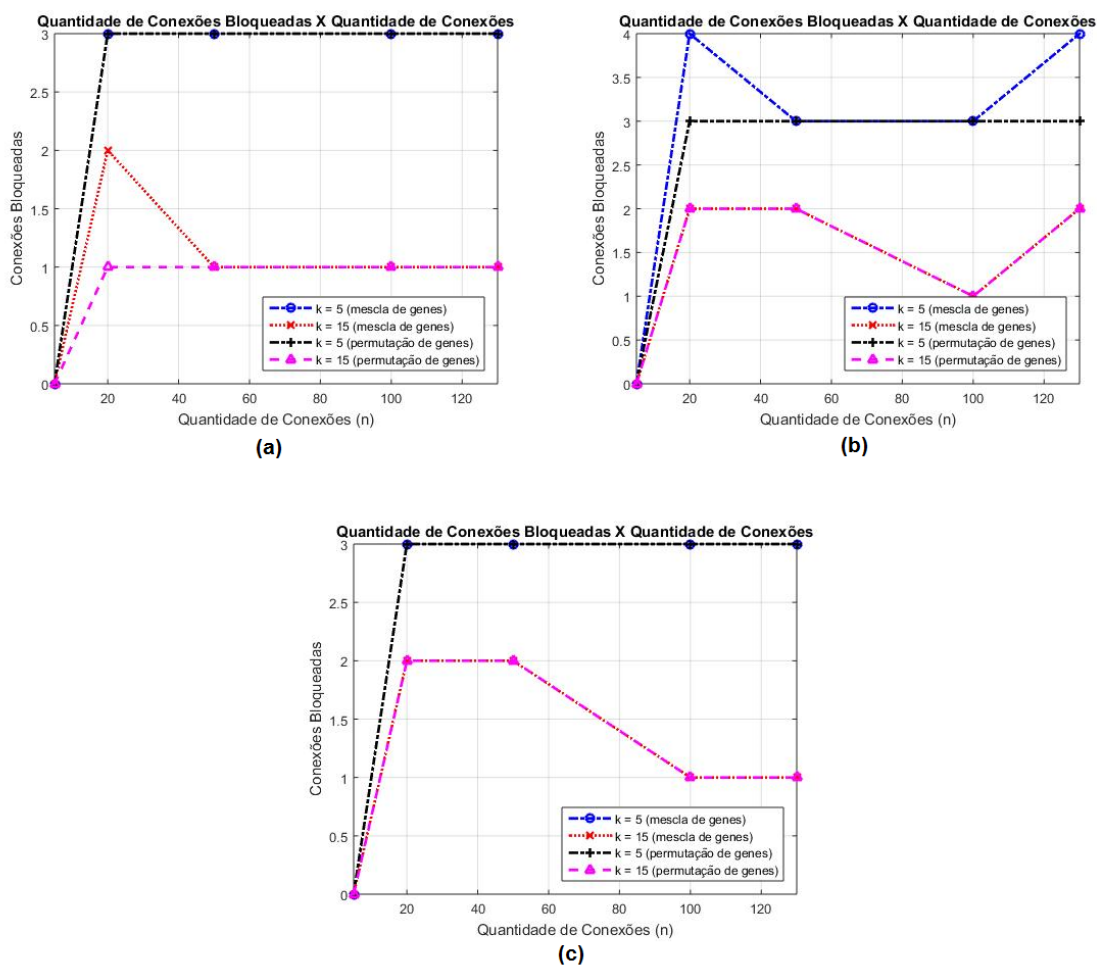
#### 4.1.5. Resultados do GA para NSFNET

Assim como realizado para o algoritmo “voraz” e com o objetivo de facilitar comparações entre eles, foram realizadas simulações na mesma EON (Figura 11), seguindo a mesma metodologia e adotando-se os mesmos parâmetros e características físicas descritos no Capítulo 2.

As simulações utilizam o valor de  $k$  (quantidade de rotas mais curtas definidas pelo algoritmo de Yen) iguais a 5 e 15 e um conjunto de conexões de  $n = \{5, 20, 50, 100, 130\}$  e, portanto, as matrizes D utilizadas são as mesmas apresentadas na Seção 3.1.3. Além disso, a elaboração do GA apresenta uma população inicial de 150 "cromossomos", escolhidos de forma aleatória. O processo de evolução foi repetido até o critério de parada ser atingido, ou seja, após 100 gerações. Cabe ressaltar que a taxa de mutação considerada é de 0,1 para todas as simulações realizadas.

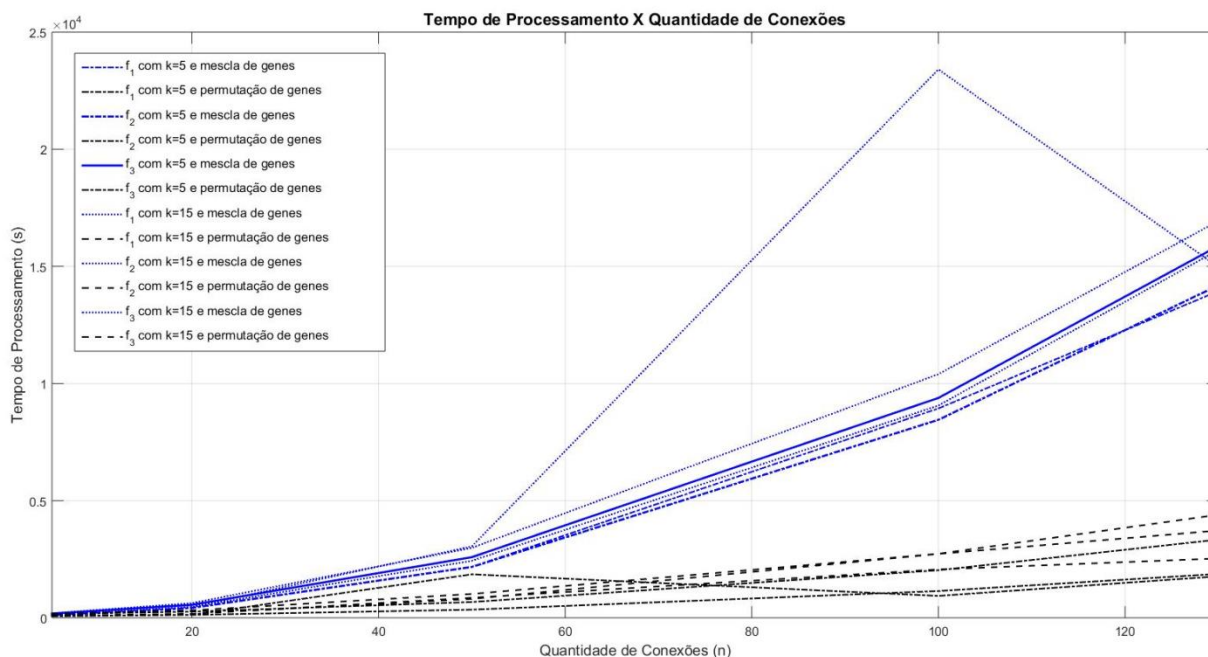
Os gráficos da Figura 26 apresentam a quantidade de conexões bloqueadas quando se aumenta a quantidade total de demandas requeridas na EON, para diferentes valores de  $k$  e utilizando-se as duas formas de recombinação. Também são utilizadas as três funções de aptidão, ou seja,  $f_1$ ,  $f_2$  e  $f_3$ .

A função de aptidão  $f_1$  usada para gerar os resultados dos gráficos da Figura 26.a, apresentou um melhor desempenho para  $n \geq 20$  e  $k = 15$ , utilizando a recombinação baseada na "permutação" de "genes". A função  $f_3$  utilizada para fornecer os resultados dos gráficos da Figura 26.c, apresentou um desempenho equivalente ao da função  $f_1$  para valores de  $n \geq 100$  e  $k = 15$ , também utilizando a "permutação" de "genes". Além disso, os gráficos da Figura 26.b mostram que a função  $f_2$  teve um desempenho inferior quando comparada com os gráficos da Figura 26.a e Figura 26.c. Porém, observa-se que em todos os gráficos da Figura 26, o melhor valor conseguido pelas funções de aptidão ocorre quando utilizam-se  $k = 15$  e a recombinação baseada na "permutação" de "genes".



**Figura 26 – Total de conexões bloqueadas quando é aumentada a quantidade de conexões simultâneas na solução do problema RSA da NSFNET, com: (a) função  $f_1$ ; (b) função  $f_2$  e (c) função  $f_3$ .**

A Figura 27 apresenta uma comparação entre os tempos de processamento para cada tipo de iteração desenvolvida para o estudo, com  $k = 5$  e  $k = 15$ , utilizando-se o operador genético de recombinação baseado na “mescla” ou na “permutação” de “genes”, além das três funções de aptidão  $f_1$ ,  $f_2$  e  $f_3$ . No cálculo do tempo de processamento da programação, também foram utilizados os comandos *tic* e *toc* do MatLab, visando determinar o tempo decorrido total das iterações.



**Figura 27 – Tempo total de processamento (em segundos) quando se aumenta a quantidade de conexões simultâneas na solução do problema RSA na NSFNET.**

Analisando os gráficos da Figura 27, observa-se que o tempo de processamento das simulações quando se utiliza o operador genético de recombinação com base na “permutação” de “genes” é sempre menor, independentemente do valor de  $k$ . O mesmo aconteceu para uma rede de menor complexidade, como a de 6 nós estudada, apresentada na Figura 8. Além disso, o *outlier* observado é um comportamento característico do processamento simultâneo de algum programa de computador com a simulação.

A solução do problema RMSA para a rede da Figura 11, considerou taxas que variaram de 40Gbps a 1Tbps, conforme apresentadas na Tabela 2, sendo que os gráficos da Figura 28, Figura 29 e Figura 30 representam a quantidade de conexões bloqueadas quando se aumenta a quantidade total de conexões na EON, para os valores de  $k = 5$  e  $k = 15$ , aplicando-se os operadores genéticos de recombinação baseados na “mescla” e “recombinação” de “genes”, chegando-se ao limite de 130 conexões simultâneas na rede. Um único ciclo de rodada da simulação foi realizado, sendo que a quantidade de conexões aumenta, porém mantendo-se as conexões já estabelecidas anteriormente.

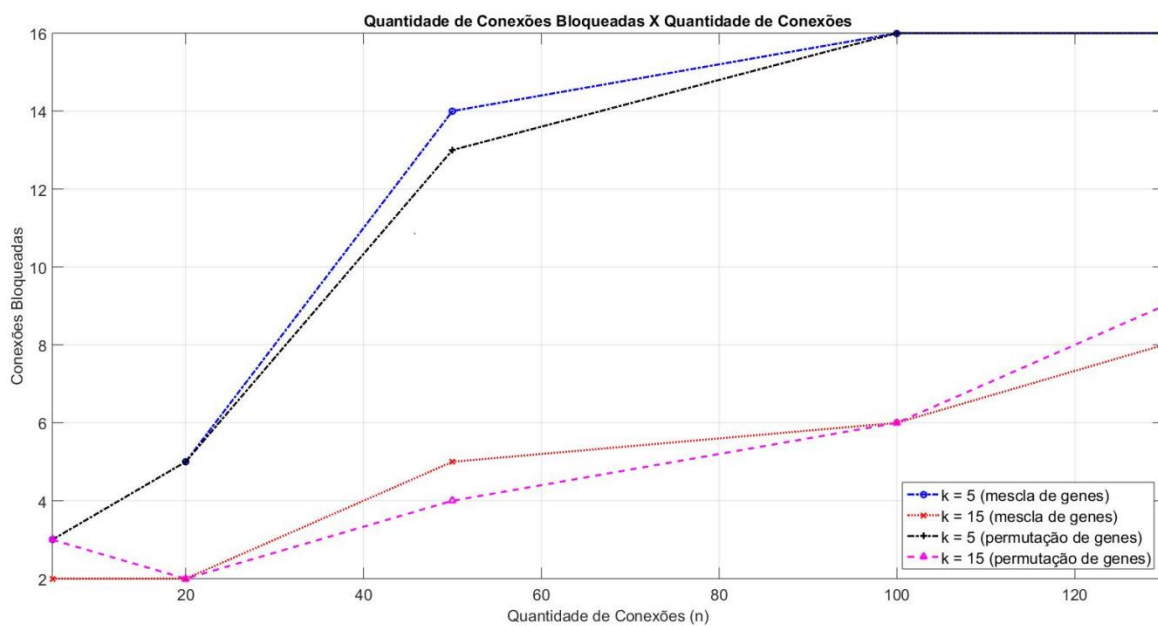


Figura 28 – Total de conexões bloqueadas quando é aumentada a quantidade de conexões simultâneas para solução do problema RMSA na NSFNET, aplicando-se a função  $f_1$ .

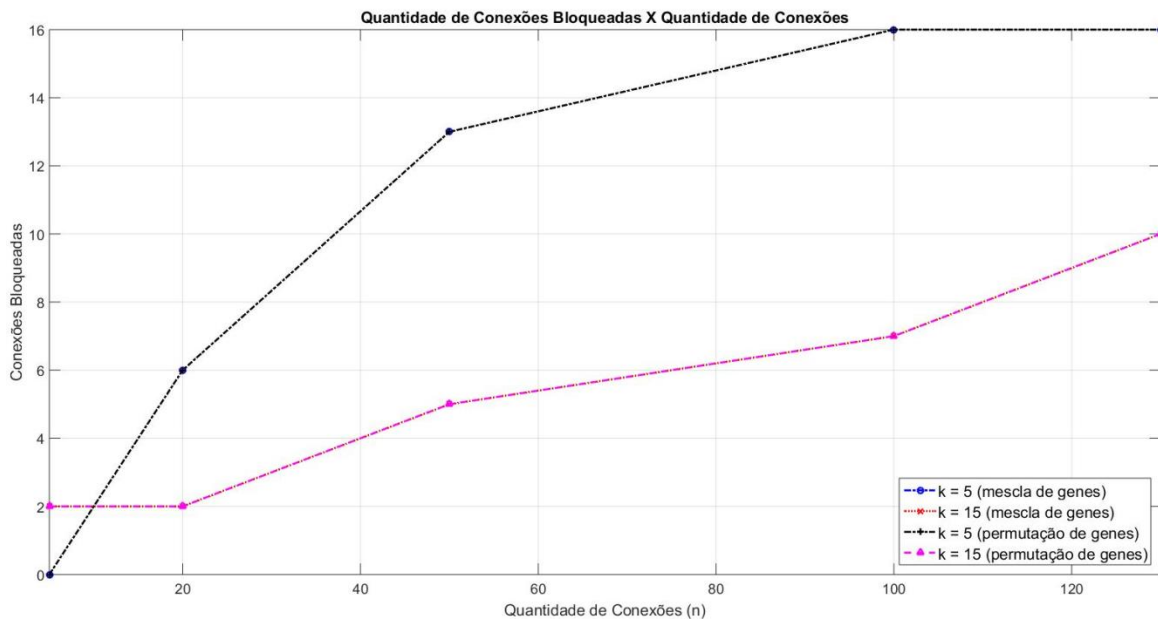
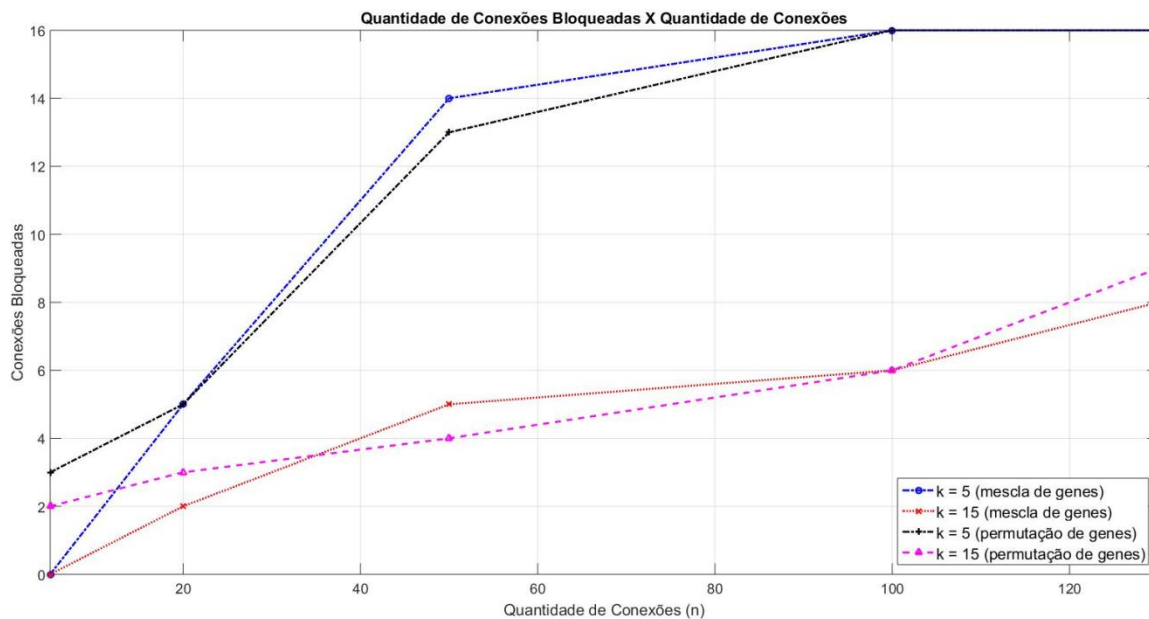


Figura 29 – Total de conexões bloqueadas quando é aumentada a quantidade de conexões simultâneas para solução do problema RMSA na NSFNET, aplicando-se a função  $f_2$ .



**Figura 30 – Total de conexões bloqueadas quando é aumentada a quantidade de conexões simultâneas para solução do problema RMSA na NSFNET, aplicando-se a função  $f_3$ .**

Comparando-se os gráficos da Figura 28, Figura 29 e Figura 30, observa-se que o uso da função de aptidão  $f_3$ , com  $k = 15$  e aplicando-se o operador genético de recombinação baseado na “mescla” de “genes”, conseguiram-se, em média, os melhores resultados, com uma menor quantidade de bloqueios, ao aumentar-se a quantidade de conexões simultâneas na EON. Entretanto, para valores de  $50 \leq n \leq 100$  da Figura 30, observa-se que para  $k = 15$  e a utilização da recombinação pela “permutação” de “genes” obteve melhores resultados, ou seja, menor quantidade de conexões bloqueadas.

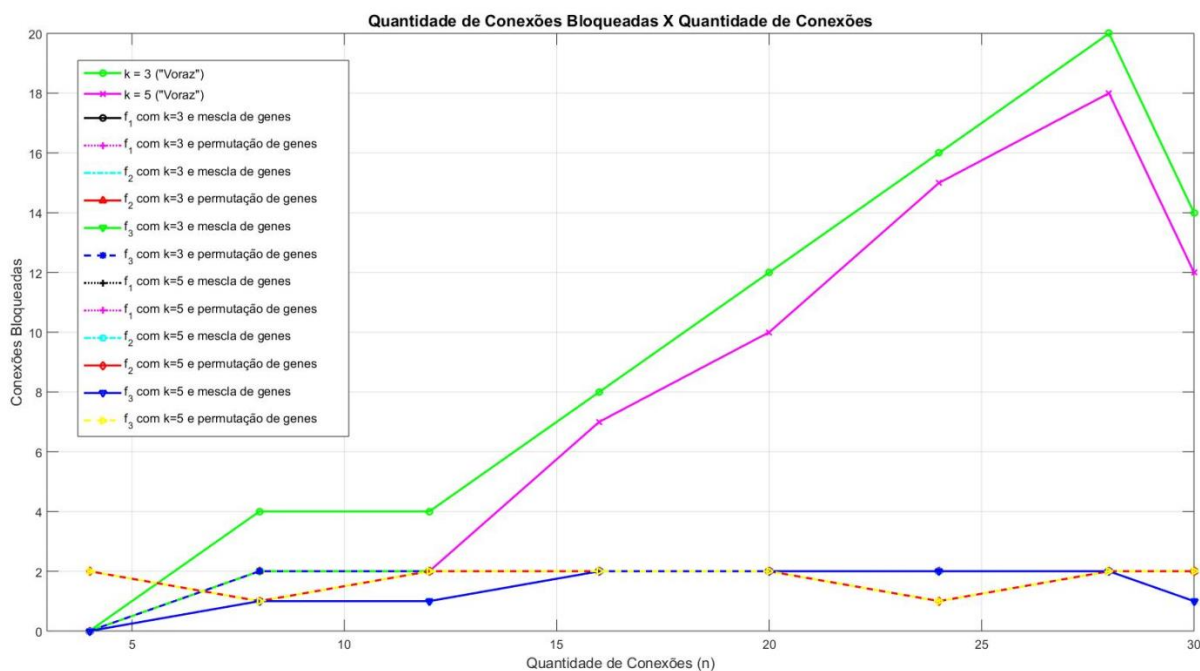
## 5. Considerações Finais

Neste capítulo são apresentadas comparações entre os resultados obtidos com os algoritmos genético e “voraz”, desenvolvidos para solução dos problemas RSA e RMSA, apresentados nas Seções 3.1 e 4.1. As simulações buscaram uma resposta aos problemas RSA e RMSA para as EONs da Figura 8 e da Figura 11.



## 5.1. Resultados Gerais para Rede de 6 Nós

Os gráficos da Figura 31 apresentam comparações de desempenho entre os algoritmos “voraz” e GA, ou seja, a quantidade de conexões bloqueadas quando se aumenta a quantidade total de demandas requeridas na EON, chegando-se ao limite de 30 conexões simultâneas, com valores de  $k = 3$  e  $k = 5$ ; dois tipos de operadores genéticos de recombinação (“mescla” ou na “permutação” de “genes”); com as funções de aptidão  $f_1$ ,  $f_2$  e  $f_3$  aplicadas na solução pelo GA e uma taxa de mutação de 0,1 para todas as simulações realizadas, conforme descrito na Seção 4.1.4.

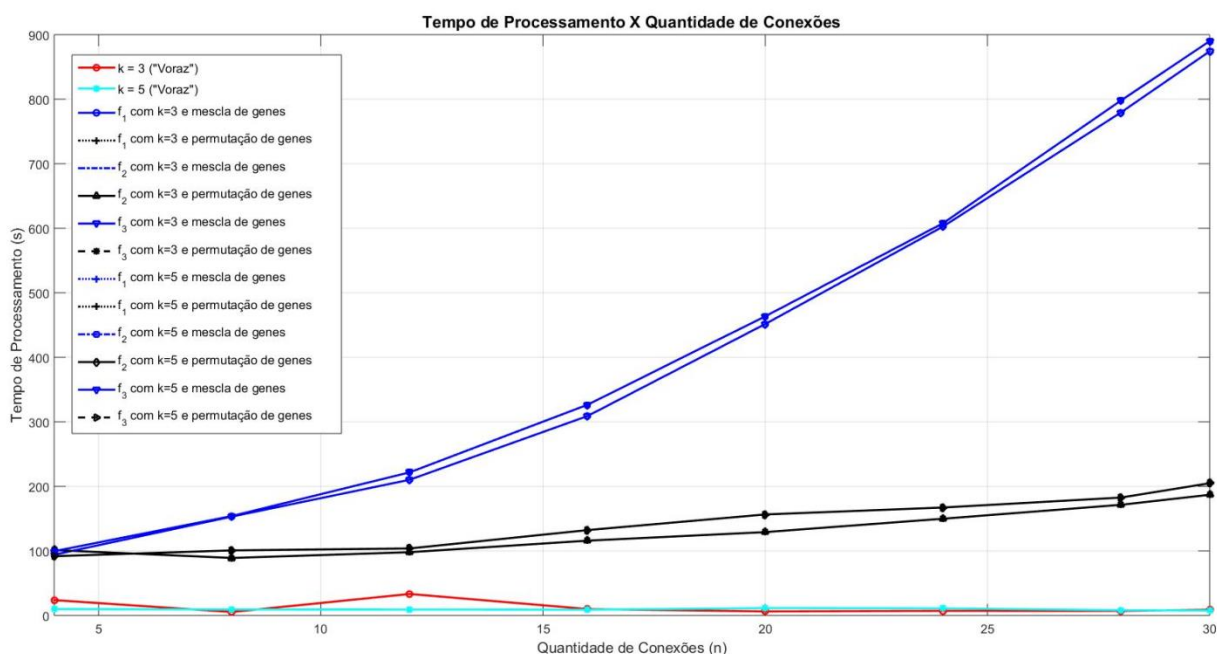


**Figura 31 – Total de conexões bloqueadas quando é aumentada a quantidade de conexões simultâneas na solução do problema RSA na rede de 6 nós.**

Analisando a Figura 31, é possível verificar que o algoritmo genético apresenta os melhores resultados para a solução do problema RSA da EON, independentemente do tipo de função de aptidão, quantidade de rotas consideradas ou do tipo de operador de recombinação genético utilizado. Observa-se que quanto maior a quantidade de conexões simultâneas na rede,

maior será a quantidade de bloqueios, quando é utilizada a solução do problema RSA através do algoritmo “voraz”. Entretanto, este algoritmo mostrou-se adequado quando  $n \leq 12$  com  $k = 5$ , pois até esta quantidade de conexões o seu desempenho iguala-se ao do algoritmo genético.

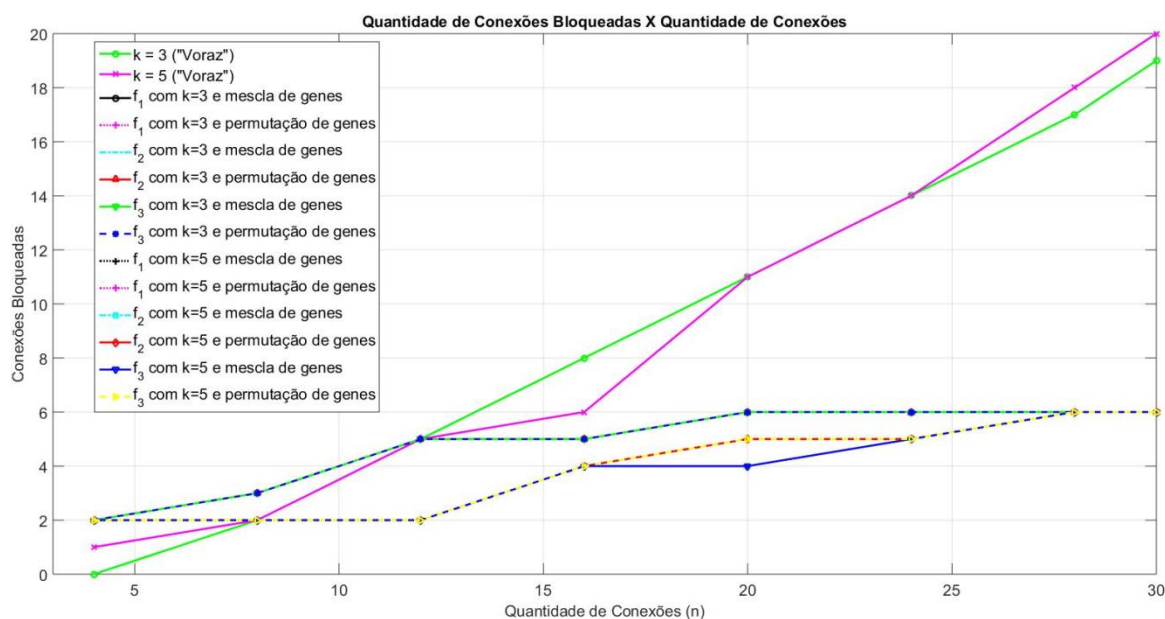
Os gráficos da Figura 32 comparam os tempos de processamento necessário quando se aumenta a quantidade de conexões simultâneas na EON, para diferentes valores de  $k$  e com a aplicação dos operadores genéticos de ‘mescla’ ou ‘permutação’ de “genes”, juntamente com os quais são utilizadas as funções de aptidão  $f_1$ ,  $f_2$  e  $f_3$  na solução do problema RSA da rede de 6 nós.



**Figura 32 – Tempo total de processamento (em segundos) quando se aumenta a quantidade de conexões simultâneas na solução do problema RSA na rede de 6 nós.**

Analisando os gráficos da Figura 32 é possível ratificar uma das características principais do algoritmo “voraz”, ou seja, seu processamento foi extremamente rápido, em detrimento da qualidade do resultado obtido. O mesmo não é verificado pelo GA, que obtém soluções melhores para o problema, porém com um tempo de processamento muito maior.

Os gráficos da Figura 33 apresentam comparações de desempenho entre os algoritmos “voraz” e GA, ou seja, a quantidade de conexões bloqueadas quando se aumenta a quantidade total de demandas requeridas na EON, chegando-se ao total de 30 conexões simultâneas, com valores de  $k = 3$  e  $k = 5$ ; dois tipos de operadores genéticos de recombinação (“mescla” ou na “permutação” de “genes”); aplicando-se as funções de aptidão  $f_1$ ,  $f_2$  e  $f_3$  na solução do problema RMSA na rede de 6 nós.



**Figura 33 – Total de conexões bloqueadas quando é aumentada a quantidade de conexões simultâneas na solução do problema RMSA na EON de 6 nós.**

Analisando a Figura 33, é possível verificar que o algoritmo genético apresenta os melhores resultados para a solução do problema RMSA da EON, independentemente do tipo de função de aptidão aplicada, quantidade de rotas consideradas ou do tipo de operador de recombinação genético utilizado. Observa-se que quanto maior a quantidade de conexões simultâneas na rede, maior será a quantidade de bloqueios através do algoritmo “voraz”. Entretanto, este algoritmo mostrou-se adequado quando  $n \leq 12$  com  $k = 5$ , pois até esta quantidade de conexões o seu desempenho iguala-se ao do algoritmo genético.

Os gráficos da Figura 34 e Figura 35 apresentam as demandas que puderam ser atendidas, aplicando-se o algoritmo “voraz” e o GA, respectivamente, na EON da Figura 8, procurando seguir o critério MSF.

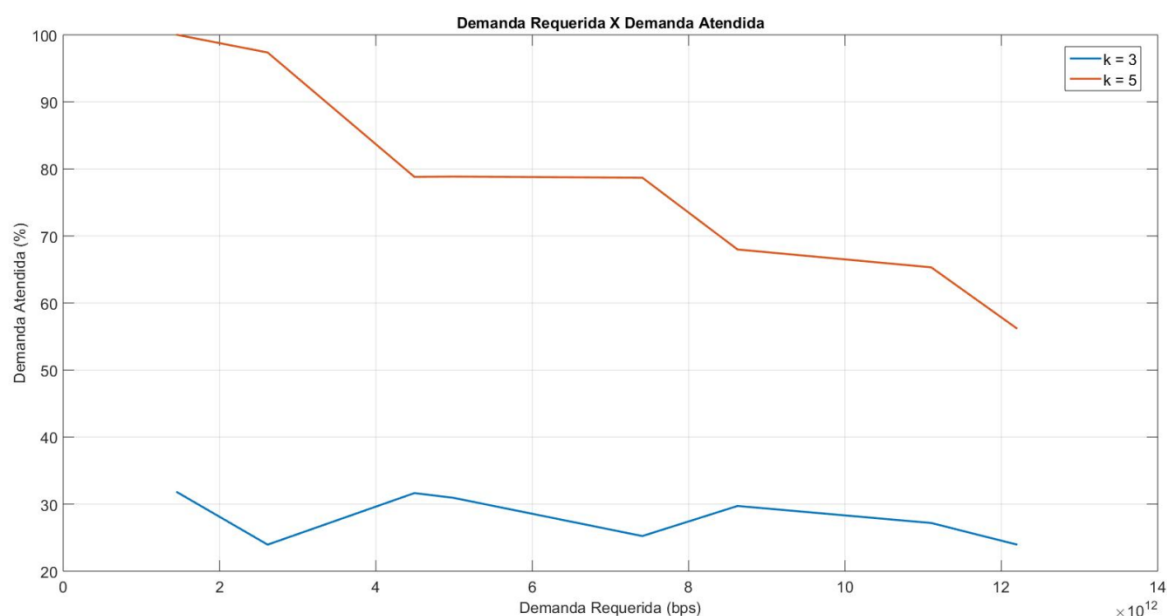


Figura 34 – Quantidade de demandas atendidas para a EON de 6 nós pelo critério MSF utilizando o algoritmo “voraz” na solução do problema RMSA.

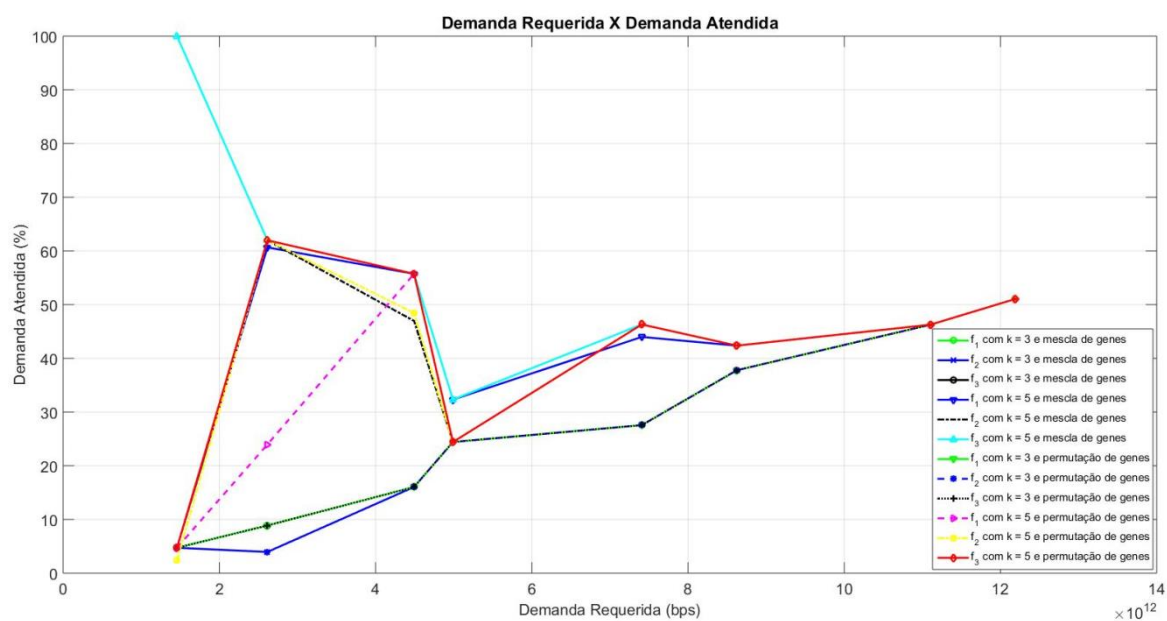
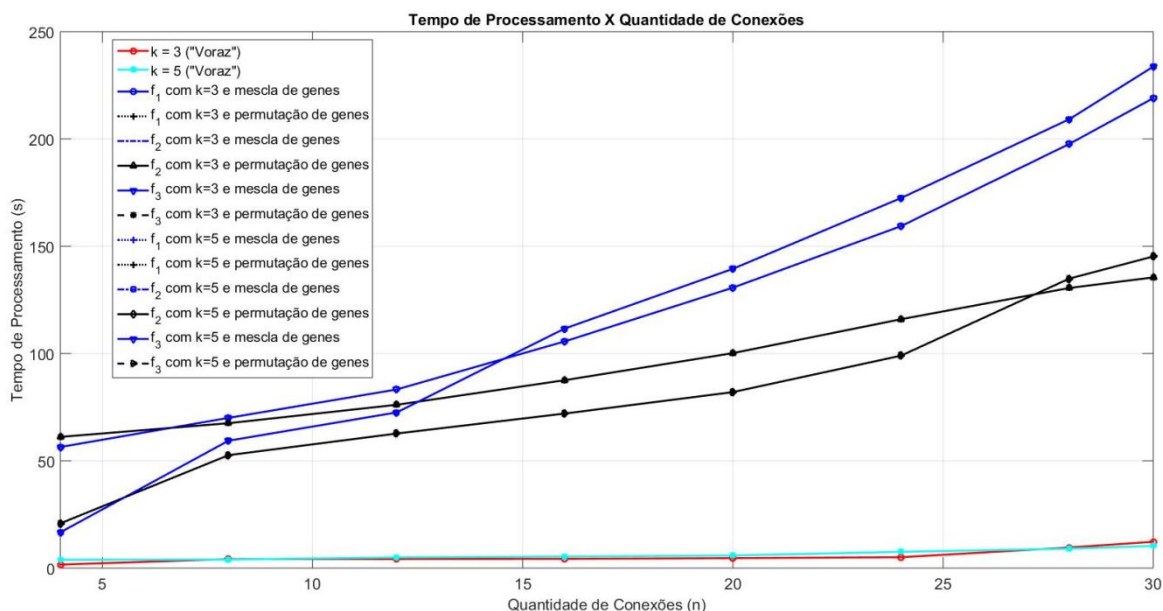


Figura 35 – Quantidade de demandas atendidas para a EON de 6 nós pelo critério MSF utilizando o GA na solução do problema RMSA.

Analisando a Figura 34 observa-se que, ao utilizar o critério MSF via algoritmo “voraz”, a quantidade de demandas atendidas diminui com o aumento da demanda requerida, porém para  $k = 5$  este valor é maior do que para  $k = 3$ , uma vez que há um maior número de conexões possíveis em atender uma mesma demanda, isto é, *links* com fatias espectrais contínuas e contíguas disponíveis ainda não utilizadas. Já na Figura 35, que procura atender o critério MSF via GA, observa-se que para  $k = 5$  com a utilização da “mescla” de “genes” foi a que apresentou os melhores resultados em atendimento de demandas, porém todos os valores de demandas atendidas convergiram para 51% quando a demanda requerida foi de 12,192Tbps.

A Figura 36 compara os tempos de processamento para cada algoritmo de alocação de espectro utilizado na EON da Figura 8, conforme a quantidade de conexões simultâneas na rede aumenta, com diferentes valores de  $k$  e aplicando-se os operadores genéticos de recombinação de “mescla” ou “permutação” de “genes” em conjunto com uma das funções de aptidão  $f_1$ ,  $f_2$  ou  $f_3$ .



**Figura 36 – Tempo total de processamento (em segundos) quando se aumenta a quantidade de conexões simultâneas na solução do problema RMSA na rede de 6 nós.**

Analisando os gráficos da Figura 36 é possível ratificar uma das características principais do algoritmo “voraz”, ou seja, seu processamento foi extremamente rápido, em detrimento da qualidade do resultado obtido. O mesmo não é verificado pelo GA, que obtém soluções melhores para o problema, porém com um tempo de processamento muito maior.

## 5.2. Resultados Gerais para NSFNET

Na Figura 37 é apresentada a comparação do desempenho entre os algoritmos “voraz” e GA, ou seja, a quantidade de conexões bloqueadas quando se aumenta a quantidade total de demandas requeridas na EON, chegando-se ao limite de 130 conexões simultâneas, com valores de  $k = 5$  e  $k = 15$ ; dois tipos de operadores genéticos de recombinação (“mescla” ou na “permutação” de “genes”); sendo as funções de aptidão  $f_1$ ,  $f_2$  e  $f_3$  aplicadas na solução do problema RSA na NSFNET.

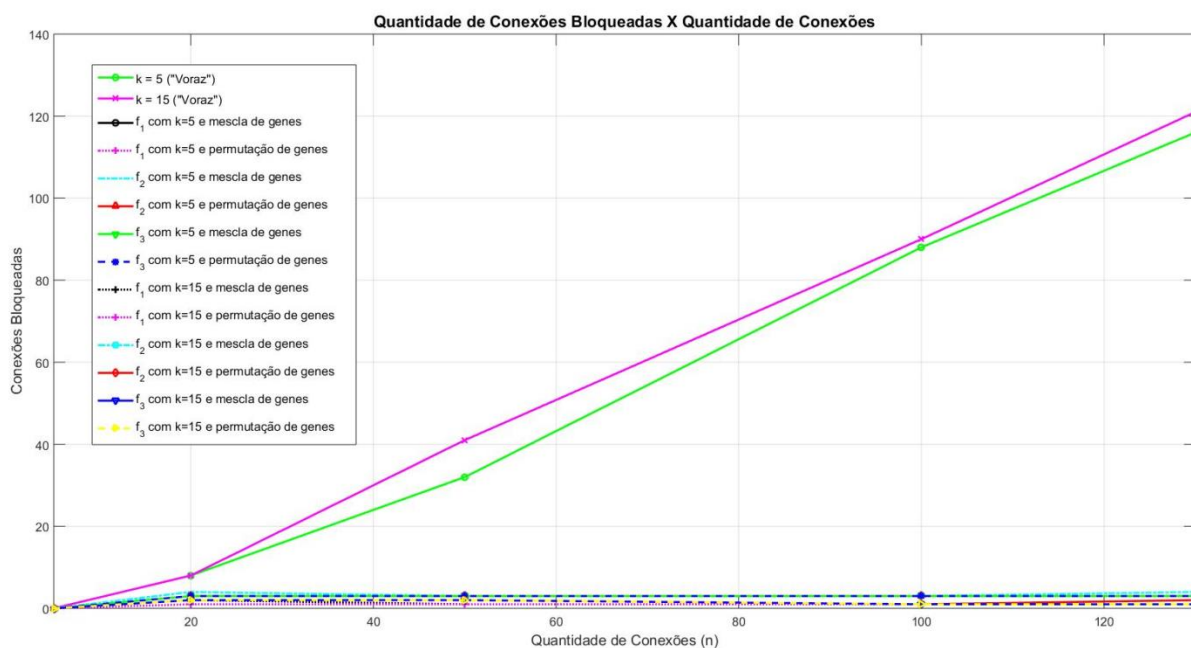
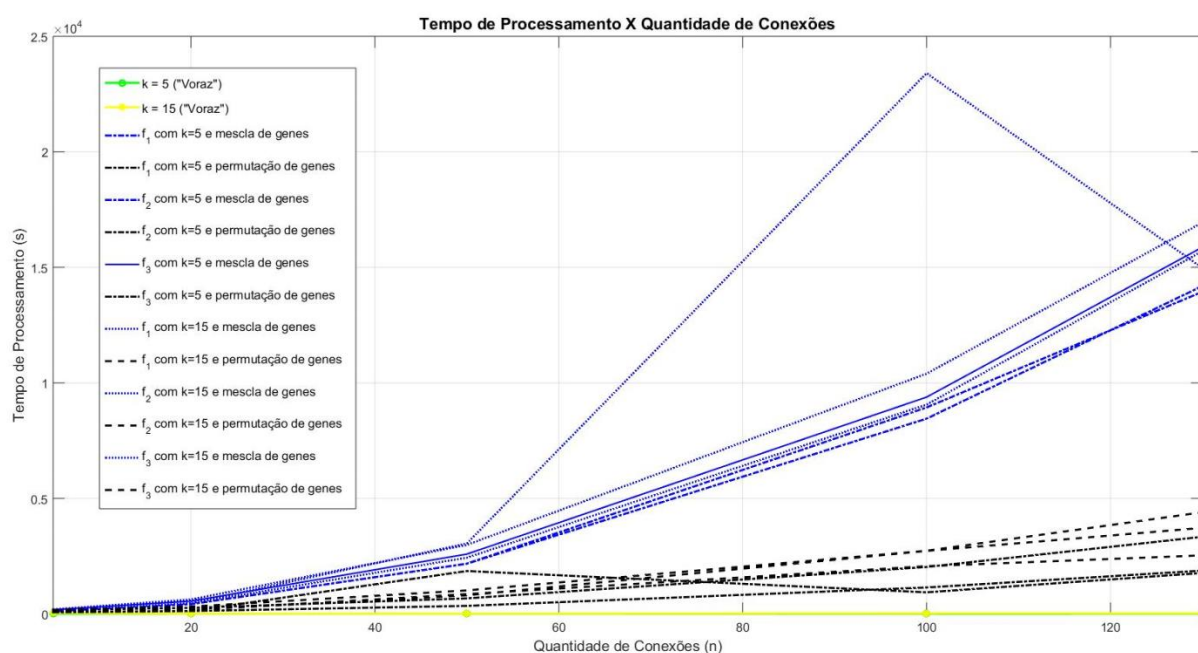


Figura 37 – Total de conexões bloqueadas quando é aumentada a quantidade de conexões simultâneas na solução do problema RSA na NSFNET.



Analisando a Figura 37 é possível verificar novamente que o GA continua apresentando os melhores resultados para a solução do problema RSA da EON, quando comparado com o algoritmo “voraz”. Observa-se, ainda, que quanto maior a quantidade de conexões simultâneas na rede, maior será a quantidade de bloqueios, quando é utilizada a solução do problema RSA através do algoritmo “voraz”.

A Figura 38 compara os tempos de processamento para cada algoritmo de alocação de espectro utilizado conforme a quantidade de conexões simultâneas na rede aumenta, com diferentes valores de  $k$  e com os operadores genéticos de recombinação de “mescla” ou “permutação” de “genes” e aplicando-se as funções de aptidão  $f_1$ ,  $f_2$  e  $f_3$  na solução do problema RSA da NSFNET.

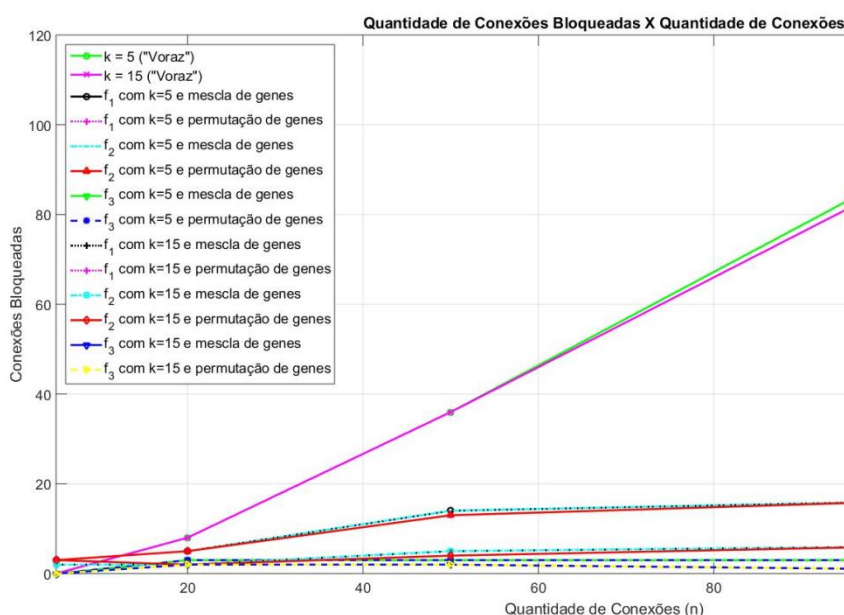


**Figura 38 – Tempo total de processamento (em segundos) quando se aumenta a quantidade de conexões simultâneas na solução do problema RSA na NSFNET.**

Analisando os gráficos da Figura 38 é possível verificar, mais uma vez, a rapidez de processamento do algoritmo “voraz”, porém com resultados inferiores

aos fornecidos pelo GA, que, novamente obtém as melhores soluções para o problema, porém com um tempo de processamento muito maior.

Os gráficos da Figura 39 apresentam comparações de desempenho entre os algoritmos “voraz” e GA, procurando-se atender o critério MSF para a NSFNET, ou seja, a quantidade de conexões bloqueadas quando se aumenta a quantidade total de demandas requeridas na EON, chegando-se a um total de 130 conexões simultâneas, com diferentes valores de  $k$ ; dois tipos de operadores genéticos de recombinação (“mescla” ou na “permutação” de “genes”) e aplicando-se as funções de aptidão  $f_1$ ,  $f_2$  e  $f_3$  na solução do problema RMSA da EON.



**Figura 39 – Total de conexões bloqueadas quando é aumentada a quantidade de conexões simultâneas na solução do problema RMSA na NSFNET.**

Analisando a Figura 39, é possível verificar que o algoritmo genético apresenta os melhores resultados para a solução do problema RMSA. Além disso, para um  $k = 15$  e aplicando-se  $f_3$  com a “permutação” dos “genes”, há uma menor quantidade de bloqueios, sendo possível atender 83% das demandas ao requerer-se 130 conexões simultâneas na EON.



Os gráficos da Figura 40 e Figura 41 apresentam as demandas que foram atendidas, primeiro aplicando-se o algoritmo “voraz” (Figura 40) e em seguida o GA (Figura 41), na EON da Figura 11, procurando seguir o critério MSF.

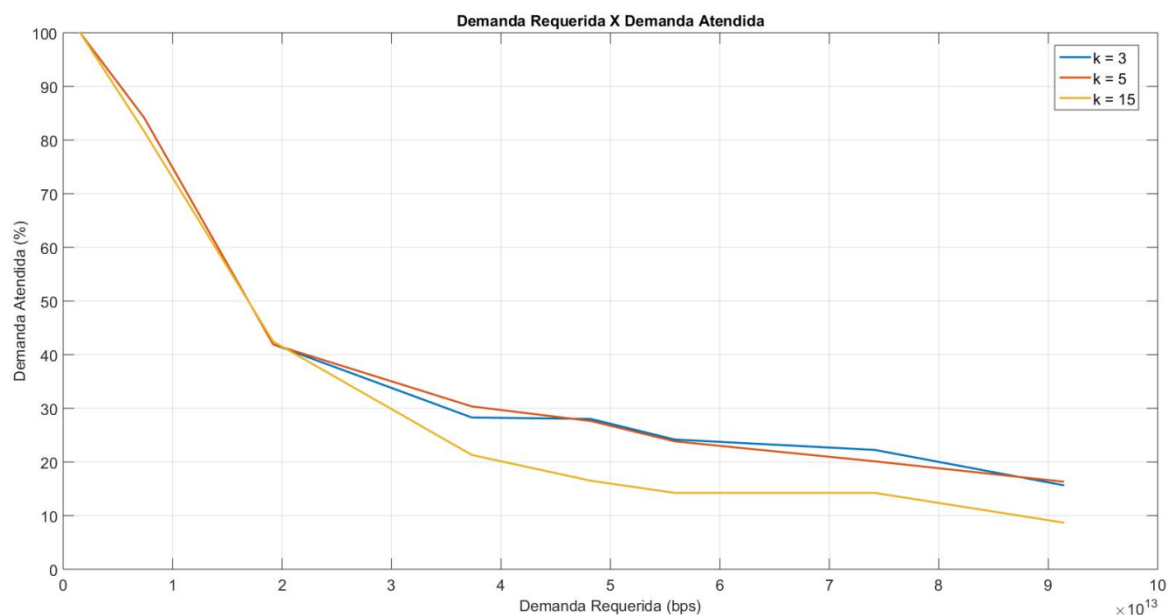


Figura 40 – Quantidade de demandas atendidas para a NSFNET pelo critério MSF utilizando o algoritmo “voraz” na solução do problema RMSA.

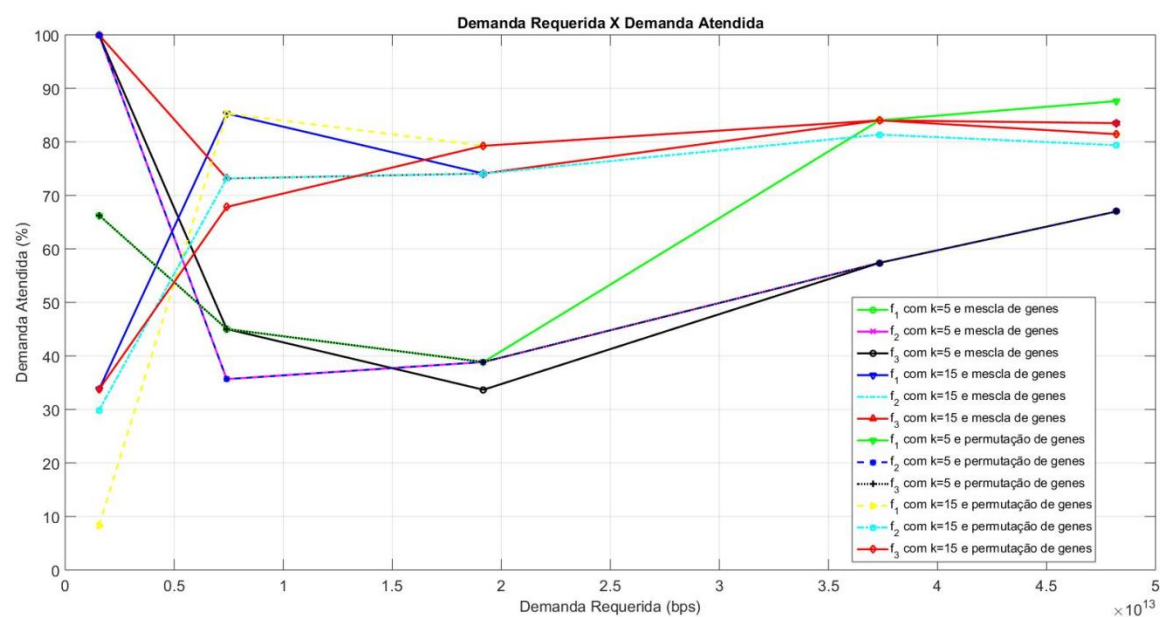
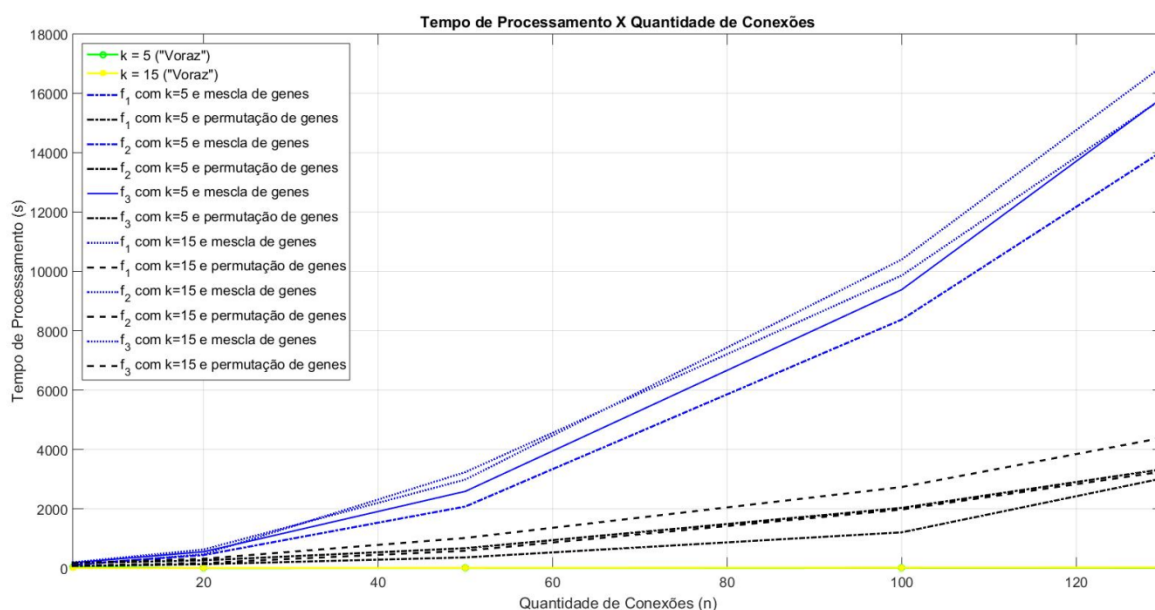


Figura 41 – Quantidade de demandas atendidas para a NSFNET pelo critério MSF utilizando o GA na solução do problema RMSA.

Analisando a Figura 40 observa-se que, ao utilizar o critério MSF via algoritmo “voraz”, a quantidade de demandas atendidas diminui com o aumento da demanda requerida, chegando a 16% de demandas atendidas para  $k = 3$  e  $k = 5$ , para 91,359Tbps. Entretanto, pela Figura 41, que procura atender o critério MSF via GA, observa-se que para  $k = 15$  e utilizando-se a função de aptidão  $f_3$  com a “permutação” dos “genes”, chegou-se a um melhor resultado geral.

A Figura 42 compara os tempos de processamento para cada algoritmo de alocação de espectro utilizado conforme a quantidade de conexões simultâneas na rede aumenta, com diferentes valores de  $k$  e com os operadores genéticos de recombinação de “mescla” ou “permutação” de “genes” e aplicação das funções de aptidão  $f_1$ ,  $f_2$  e  $f_3$  para a solução do problema RMSA na NSFNET.



**Figura 42 – Tempo total de processamento (em segundos) quando se aumenta a quantidade de conexões simultâneas na solução do problema RMSA na NSFNET.**

Analisando os gráficos da Figura 42 para a NSFNET é possível verificar, assim como ocorreu para a EON da Figura 8, que o tempo de processamento foi extremamente rápido, em detrimento da qualidade do resultado obtido. O mesmo não é verificado pelo GA, que obtém soluções melhores para o problema, porém com um tempo de processamento muito mais elevado.

## Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

As redes ópticas elásticas, por possuírem uma taxa de dados flexível, que adequa-se à demanda dos usuários, sendo relativamente ágeis, reconfiguráveis e eficientes em termos energéticos e de recursos espectrais, têm demonstrado atender de forma mais promissora às alterações de demandas por tráfego.

A técnica de transmissão óptica OFDM, por sua vez, tem demonstrado ser a tecnologia mais promissora na realização de transmissões à alta velocidade, devido à sua tolerância aos efeitos da dispersão cromática, à alta eficiência espectral e sua escalabilidade para taxas variáveis, baseadas em tecnologias de multiplexação de subportadoras.

O comprimento da rota é fundamental para os problemas RSA e RMSA, pois define a quantidade de fatias espectrais que serão utilizadas no atendimento de uma conexão. Portanto, antes da aplicação do algoritmo “voraz” seguindo-se o critério MSF, definiu-se uma solução para o problema do roteamento através dos algoritmos de Dijkstra e Yen, dando preferência aos enlaces não utilizados que, por conseguinte, teriam fatias espectrais disponíveis, minimizando assim a largura espectral utilizada.

A solução do problema do roteamento gera um desbalanceamento indesejado de carga na rede, uma vez que fatias espectrais podem ser alocadas, para uma mesma demanda, levando em consideração apenas o comprimento total da rota. Assim, enlaces entre nós com maior demanda de tráfego poderiam ficar com uma ocupação alta e, eventualmente, ocasionar bloqueios por falta de fatias espectrais contínuas e/ ou contiguas, enquanto que outros enlaces poderiam estar com baixa ocupação. Portanto, o estado da rede também é relevante para a avaliação dos indivíduos pelo GA.

A dissertação apresenta propostas visando solucionar os problemas RSA e RMSA em EONs de baixa e alta complexidade, ou seja, o atendimento às conexões preservando o máximo de capacidade da rede. Uma abordagem muito promissora é a baseada no algoritmo genético, que utiliza conceitos baseados na evolução de espécies na natureza, como hereditariedade, mutação, seleção

natural e reprodução, sendo uma potencial ferramenta para a solução do problema RSA e do complexo problema RMSA em redes ópticas elásticas.

Nesta dissertação, propôs-se um GA para solucionar os problemas RSA e RMSA. Observou-se que o algoritmo genético, apesar de apresentar um tempo de processamento muito maior, forneceu melhores resultados para ambos os problemas, com uma quantidade muito menor de bloqueios e, conseqüentemente, uma maior capacidade no atendimento das demandas. Assim, as simulações realizadas mostram que, a utilização do GA em conjunto com o critério MSF, mostrou-se viável para solução dos problemas RSA e RMSA em uma EON *off-line*, de baixa (rede de 6 nós) e alta complexidade (NSFNET), para valores elevados de demandas (conexões, taxas de transmissão, modulação e fatias espectrais requeridas).

O algoritmo de Yen juntamente com o “voraz” realizaram o roteamento e a atribuição de espectro seguindo o critério MSF e encontrou soluções para os problemas RSA e RMSA viáveis em um curto tempo computacional. Já o algoritmo de Yen em conjunto com o GA resolveram os problemas de roteamento, modulação e atribuição de espectro e obteve soluções de qualidade superior à custa de um tempo computacional mais longo. O GA mostrou-se, ainda, ser o mais indicado na solução de ambos os problemas em EONs maiores e mais complexas, como pode ser verificado com os resultados apresentados para a NSFNET.

Conclui-se que os resultados numéricos apresentados mostram que o GA supera o algoritmo “voraz” e fornece soluções para os problemas RSA e RMSA próximos aos ideais, com uma quantidade reduzida de bloqueios na rede, porém com um elevado tempo de processamento. Além disso, o assunto não é exaurido com o estudo apresentado nesta dissertação, pois outras análises podem ser feitas, tais como a criação de novas funções de aptidão para buscar um melhor desempenho na solução dos problemas RSA e RMSA *off-line*; a possibilidade de incluir outros parâmetros, como restrições físicas da rede (OSNR, PMD etc.); a comparação com outros trabalhos de referência e a elaboração conjunta com outros algoritmos evolucionários.

## REFERÊNCIAS

- [1] site <http://www.akamai.com/stateoftheinternet>;
- [2] Agrawal, G. P. ; **Fiber-Optic Communication Systems**; John Wiley & Sons; Inc., 3ª Ed., 2002;
- [3] Recomendação ITU-T G694.1: **Spectral Grids for WDM Applications: DWDM frequency Grid** (06/2002);
- [4] Gerstel, O. et al.; **Elastic Optical Networking: A New Dawn for the Optical Layer?**; IEEE Communications Magazine, v. 50, n. 2, p. s12-s20, February 2012;
- [5] Wang, Y.; Cao, X.; Pan Y.; **A Study of the Routing and Spectrum Allocation in Spectrum-sliced Elastic Optical Path Networks**; IEEE; INFOCOM, Shanghai; p. 1503-1511, ISSN. 0743-166X, April 2011;
- [6] Pascoal, M. M. B.; **Algoritmos para a Enumeração dos k trajetos mais curtos**; Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do programa de Mestrado em Matemática, na área de especialização em Matemática Aplicada; Universidade de Coimbra, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Matemática; 1997;
- [7] Talebi, S. et al.; **Spectrum Management Techniques for Elastic Optical Networks**; Operations Research and Department of Computer Science, North Carolina State University, Raleigh, NC 27695-8206 USA; King Abdulaziz University, Jeddah, Saudi Arabia;
- [8] Benayon, Eduardo Rodrigues (orientador: Souza, José Rodolfo); **Roteamento e Alocação de Comprimento de Onda em Redes WDM Segundo Algoritmo Baseado em Regras da Natureza**; Dissertação de Mestrado da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia – 2012;
- [9] Émile Archambault; Nabih Alloune; Marija Furdek; Zhenyu Xu; Christine Tremblay; Ajmal Muhammad; Jiajia Chen; Lena Wosinska; Paul Littlewood; Michel P. Bélanger; **Routing and Spectrum Assignment in Elastic Filterless Optical Networks**; Article in IEEE/ACM Transactions on Networking; March 2016;
- [10] Cassio Batista; Diego Teixeira; Thiago Coelho; Josivaldo Araújo; **Static-Traffic Routing and Wavelength Assignment in Transparent WDM Networks Using Genetic Algorithm**; IFIP Latin American Networking Conference - IFIP LANC 2018 - Session 2: Network Management - ISBN: 978-1-4503-5922-1; São Paulo, Brazil, October 3-4, 2018;
- [11] Horota, A. et al.; **Algoritmo de Roteamento e Atribuição de Espectro com Minimização de Fragmentação em Redes Ópticas Elásticas**; p. 895-908, Anais do 32º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos – SBRC 2014;

- [12] Lijun Li; Huanlai Xing; Zhenni Wang; Hui Shi; **Elastic Resource Allocation for Multi-Granularity Multicasting Traffic in OFDM-Based Optical Networks**; Optics and Photonics Journal, 2018, 8, 323-336; ISSN Online: 2160-889X; ISSN Print: 2160-8881; <http://www.scirp.org/journal/opj>;
- [13] Xiao Luo; Chen Shi; Xue Chen; Liquian Wang; **Joint Optimization of Unicast, Anycast, Multicast and Manycast Traffic in Elastic Optical Networks**; Optical Society of America; **OCIS codes:** (060.4256) Networks, network optimization; (060.1155) All-optical networks; OFC 2018 © OSA 2018;
- [14] Azodolmolky, S. et al.; **Experimental Demonstration of an Impairment Aware Network Planning and Operation Tool for Transparent/ Translucent Optical Networks**; June 15, 2010;
- [15] Carlos Augusto Rocha; **Métodos de Interpolação para Sistemas OFDM**; Dissertação de Mestrado; INATEL – Instituto Nacional de Telecomunicações; Santa Rita do Sapucaí, 2007;
- [16] Mosier, R. R.; Clabaugh R. G. Kineplex; **A Bandwidth Efficient Binary Transmission System**; AIEE Trans., v. 76, p.723-728, Jan.1958;
- [17] Pereira, Pedro Morey; **Redes Ópticas Elásticas** – Monografia (Graduação em Engenharia de Computação) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2013;
- [18] Jinno, M. et al.; **Elastic and Adaptive Optical Networks: Possible Adoption Scenarios and Future Standardization Aspects**; IEEE Communications Magazine, v. 49, n. 10, p. 164-172, October 2011;
- [19] Jinno, M. et al.; **Spectrum-Efficient and Scalable Elastic Optical Path Network: Architecture, Benefits, and Enabling Technologies**; IEEE Communications Magazine, v. 47, n. 11, p. 66-73, November 2009;
- [20] Kurose, J. F.; Ross, K. W.; **Computer Networking – A Top-Down Approach**; Sixth Edition; Pearson Education, Inc.; 2013;
- [21] Edsger Wybe Dijkstra; **A Note on Two Problems in Connection with Graphs**; Numerische Mathematik 1; 269-271; 1959;
- [22] Christodoulopoulos, K. et al.; **Elastic Bandwidth Allocation in Flexible OFDM – Based Optical Networks**; IEEE, Lightwave Technology, Journal of, v. 29, Issue. 9, p. 1354-1366, ISSN. 0733-8724, May 2011;
- [23] Yen, Jin Y.; **Finding the k Shortest Loopless Paths in a Network**; Management Science; Vol. 17, Nº. 11, July, 1971;
- [24] Recomendação ITU-T G.653; **Characteristics of a dispersion-shifted, single-mode optical fibre and cable**; by Study Group 15 (1998-2010); approved on 29 July 2010;

- [25] Recomendação ITU-T Manual 2009; **Optical fibres, Cables and Systems**; ITU 2010;
- [26] Recomendação ITU-T G.692; **Optical Interfaces for Multichannel Systems with Optical Amplifiers**; approved under the WTSC Resolution No. 1; 23<sup>rd</sup> of October 1998;
- [27] Lu, W. et al.; **Dynamic Service Provisioning of Advance Reservation Requests in Elastic Optical Networks**; in Journal of Lightwave Technology (Volume: 31 , Issue: 10); IEEE Aerospace and Electronic Systems Society; 26 March 2013; p. 1621 - 1627, DOI: 10.1109/JLT.2013.2254468;
- [28] Shieh, W.; **OFDM for Flexible High-Speed Optical Networks**; in JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY; VOL. 29; No. 10; Digital Object Identifier 10.1109/JLT.2011.2132115; MAY 15; 2011;
- [29] Xiang Zhou; Wei Lu; Long Gong; Zuqing Zhu; **Dynamic RMSA in Elastic Optical Networks with an Adaptive Genetic Algorithm**; Optical Networks and Systems Symposium; Globecom 2012;
- [30] Lerma, A. M. L.; **Algoritmos de Planificación para Redes Elásticas**; PROYECTO FIN DE CARRERA; Dpto. Tecnología Electrónica y de las Comunicaciones; Escuela Politécnica Superior; Universidad Autónoma de Madrid; Julio de 2013;
- [31] Recomendação ITU-T G.655; **Characteristics of a non-zero dispersion-shifted, single-mode optical fibre and cable**; by Study Group 15 (2009-2012) under Recommendation ITU-T A.8 procedures; approved on 13 November 2009;
- [32] Li, Y., et al.: **Flexible grid label format in wavelength switched optical network**; IETF RFC Draft (Jul. 2011);
- [33] Christodoulopoulos, K.; Tomkos, I.; Varvarigos, E. A.: **Routing and spectrum allocation in OFDM-based optical networks with elastic bandwidth allocation**; in GLOBAL TELECOMMUNICATIONS CONFERENCE 2010, 2010, Miami, Flórida; Proceeding... IEEE, 2010, p. 1-6, ISBN 978-1-4344-5636-9;
- [34] Bocoï, A. et al.; **Reach-Dependent Capacity in Optical Networks Enabled by OFDM**; In: Optical Fiber Communication Conference 2009, San Diego, CA; Publisher IEEE, 2009, p. 1-3, ISBN 978-1-4244-2606-5, 22-26 March 2009;
- [35] El-Gorashi, T. E. H. et al.; **Green Optical Orthogonal Frequency-Division Multiplexing Networks**; Optoelectronics, IET, v. 8, Issue: 3, p. 137-148, ISSN 1751-8768; June 2014;
- [36] Fernandes, C. E. M.; **Algoritmos de Alocação de Rota e Comprimento de Onda em Redes Óticas Limitadas por PMD e XPM/ SPM**; Dissertação

apresentada ao programa de Pós-graduação em Ciência da Computação da UERN-UFERSA, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação; Mossoró 2010;

[37] Klinkowski, M.: **A Genetic Algorithm for Solving RSA Problem in Elastic Optical Networks with Dedicated Path Protection**; Department of Transmission and Optical Technologies, National Institute of Telecommunications, Szachowa, Str., Warsaw, Poland;

[38] Gilles Brassard; Paul Bratley; **Fundamentals of Algorithmics**; Prentice Hall, Nova Iorque; 1995. ISBN 01-333-5068-1;

[39] Thomas H. Cormen; Charles E. Leiserson; Ronald L. Rivest; Clifford Stein; **Algoritmos, teoria e prática**; Editora Campus, Rio de Janeiro, 2002. ISBN 85-352-0926-3;

[40] Holland, J. H.; **Adaptation in Natural and Artificial Systems**; The University of Michigan Press, Ann Arbor; 1975;

[41] Klinkowski, M.; **An Evolutionary Algorithm Approach for Dedicated Path Protection Problem in Elastic Optical Networks**; Department of Transmission and Optical Technologies, National Institute of Telecommunications, Szachowa, Str., Warsaw, Poland; DEC-2011/01/D/ST7/05884.



## Apêndice A – Matriz da Rede de 6 Nós aplicada ao Problema RSA

$$D = \begin{bmatrix} 2 & 4 & 333 \\ 1 & 4 & 303 \\ 4 & 1 & 242 \\ 5 & 6 & 13 \end{bmatrix}; \text{ para } n = 4$$

$$D = \begin{bmatrix} 3 & 6 & 342 \\ 2 & 4 & 318 \\ 6 & 3 & 268 \\ 4 & 1 & 249 \\ 5 & 1 & 195 \\ 1 & 6 & 181 \\ 5 & 6 & 91 \\ 6 & 1 & 80 \end{bmatrix}; \text{ para } n = 8$$

$$D = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 342 \\ 5 & 3 & 331 \\ 1 & 6 & 300 \\ 4 & 1 & 290 \\ 6 & 1 & 195 \\ 5 & 1 & 125 \\ 6 & 5 & 92 \\ 4 & 2 & 91 \\ 2 & 4 & 87 \\ 6 & 3 & 70 \\ 3 & 6 & 54 \\ 5 & 6 & 50 \end{bmatrix}; \text{ para } n = 12$$

$$D = \begin{bmatrix} 3 & 4 & 333 \\ 5 & 1 & 282 \\ 5 & 6 & 278 \\ 1 & 5 & 233 \\ 6 & 1 & 215 \\ 2 & 1 & 203 \\ 5 & 3 & 189 \\ 4 & 2 & 189 \\ 1 & 6 & 168 \\ 6 & 5 & 121 \\ 2 & 4 & 111 \\ 3 & 6 & 94 \\ 6 & 3 & 59 \\ 3 & 5 & 58 \\ 5 & 2 & 47 \\ 4 & 1 & 5 \end{bmatrix}; \text{ para } n = 16$$

$$D = \begin{bmatrix} 3 & 5 & 325 \\ 5 & 1 & 310 \\ 1 & 3 & 304 \\ 2 & 4 & 285 \\ 5 & 3 & 222 \\ 4 & 5 & 207 \\ 5 & 6 & 196 \\ 6 & 5 & 183 \\ 6 & 4 & 154 \\ 4 & 1 & 144 \\ 3 & 4 & 143 \\ 5 & 4 & 125 \\ 5 & 2 & 94 \\ 6 & 1 & 93 \\ 2 & 1 & 65 \\ 4 & 2 & 52 \\ 1 & 5 & 52 \\ 3 & 6 & 49 \\ 1 & 6 & 31 \\ 6 & 3 & 28 \end{bmatrix}; \text{ para } n = 20$$

$$D = \begin{bmatrix} 6 & 3 & 337 \\ 2 & 4 & 322 \\ 1 & 3 & 310 \\ 4 & 2 & 304 \\ 1 & 2 & 222 \\ 4 & 5 & 207 \\ 6 & 4 & 196 \\ 6 & 1 & 183 \\ 6 & 5 & 175 \\ 6 & 2 & 175 \\ 4 & 1 & 149 \\ 3 & 4 & 144 \\ 3 & 5 & 125 \\ 2 & 1 & 121 \\ 5 & 6 & 94 \\ 2 & 5 & 86 \\ 5 & 4 & 86 \\ 5 & 3 & 66 \\ 3 & 6 & 52 \\ 1 & 6 & 52 \\ 4 & 6 & 49 \\ 5 & 2 & 44 \\ 5 & 1 & 28 \\ 1 & 5 & 18 \end{bmatrix}; \text{ para } n = 24$$

$$D = \begin{bmatrix} 2 & 5 & 326 \\ 1 & 5 & 323 \\ 5 & 1 & 322 \\ 3 & 1 & 318 \\ 4 & 3 & 316 \\ 1 & 2 & 306 \\ 1 & 3 & 287 \\ 5 & 3 & 284 \\ 4 & 2 & 278 \\ 1 & 6 & 265 \\ 1 & 4 & 257 \\ 5 & 6 & 255 \\ 4 & 5 & 249 \\ 4 & 6 & 242 \\ 4 & 1 & 233 \\ 3 & 5 & 220 \\ 2 & 4 & 218 \\ 6 & 3 & 179 \\ 3 & 6 & 176 \\ 6 & 5 & 171 \\ 3 & 4 & 120 \\ 6 & 2 & 119 \\ 5 & 2 & 94 \\ 2 & 3 & 71 \\ 5 & 4 & 49 \\ 6 & 4 & 39 \\ 2 & 1 & 36 \\ 6 & 1 & 11 \end{bmatrix}; \text{ para } n = 28$$

$$D = \begin{bmatrix} 2 & 4 & 349 \\ 5 & 4 & 347 \\ 6 & 3 & 316 \\ 6 & 1 & 294 \\ 6 & 4 & 292 \\ 4 & 2 & 292 \\ 2 & 1 & 287 \\ 1 & 6 & 285 \\ 5 & 1 & 258 \\ 4 & 3 & 254 \\ 4 & 1 & 243 \\ 1 & 3 & 235 \\ 3 & 1 & 232 \\ 2 & 3 & 206 \\ 1 & 2 & 186 \\ 6 & 2 & 185 \\ 4 & 5 & 179 \\ 6 & 5 & 175 \\ 5 & 2 & 168 \\ 4 & 6 & 162 \\ 5 & 3 & 154 \\ 2 & 6 & 86 \\ 3 & 5 & 66 \\ 1 & 5 & 60 \\ 3 & 2 & 54 \\ 3 & 6 & 35 \\ 5 & 6 & 26 \\ 2 & 5 & 22 \\ 1 & 4 & 16 \\ 3 & 4 & 11 \end{bmatrix}; \text{ para } n = 30$$

## Apêndice B – Matriz da NSFNET aplicada ao Problema RSA

$D = [3 \ 15 \ 252; 16 \ 3 \ 234; 5 \ 9 \ 99; 11 \ 2 \ 61; 14 \ 15 \ 12]$ , para  $n = 5$ ;

$D = [13 \ 16 \ 343; 11 \ 13 \ 325; 5 \ 1 \ 310; 11 \ 1 \ 310; 5 \ 9 \ 291; 12 \ 1 \ 285; 12 \ 7 \ 276; 3 \ 15 \ 207; 2 \ 14 \ 196; 7 \ 15 \ 154; 16 \ 8 \ 143; 14 \ 15 \ 94; 8 \ 11 \ 93; 16 \ 1 \ 65; 16 \ 3 \ 52; 11 \ 2 \ 52; 12 \ 6 \ 49; 13 \ 3 \ 38; 11 \ 3 \ 31; 8 \ 7 \ 2]$ , para  $n = 20$ ;

$D = [5 \ 1 \ 349; 14 \ 15 \ 326; 15 \ 3 \ 323; 6 \ 14 \ 322; 10 \ 5 \ 318; 11 \ 1 \ 316; 11 \ 2 \ 306; 10 \ 9 \ 292; 12 \ 6 \ 292; 10 \ 4 \ 287; 11 \ 3 \ 284; 3 \ 5 \ 278; 3 \ 15 \ 265; 13 \ 5 \ 258; 1 \ 9 \ 257; 10 \ 2 \ 255; 12 \ 8 \ 254; 5 \ 9 \ 249; 13 \ 3 \ 243; 3 \ 10 \ 242; 12 \ 13 \ 235; 14 \ 5 \ 233; 9 \ 3 \ 220; 12 \ 7 \ 218; 6 \ 3 \ 206; 12 \ 1 \ 186; 15 \ 6 \ 185; 11 \ 13 \ 179; 13 \ 7 \ 179; 15 \ 5 \ 176; 9 \ 12 \ 175; 11 \ 12 \ 171; 8 \ 1 \ 168; 10 \ 8 \ 120; 15 \ 16 \ 119; 2 \ 14 \ 94; 16 \ 3 \ 86; 7 \ 15 \ 71; 2 \ 8 \ 66; 14 \ 4 \ 60; 2 \ 4 \ 54; 16 \ 6 \ 49; 13 \ 16 \ 39; 16 \ 8 \ 36; 5 \ 11 \ 35; 8 \ 7 \ 26; 13 \ 15 \ 22; 16 \ 1 \ 16; 4 \ 5 \ 11; 8 \ 11 \ 11]$ , para  $n = 50$ ;

$D = [10 \ 9 \ 356; 10 \ 6 \ 352; 3 \ 16 \ 351; 11 \ 1 \ 338; 14 \ 5 \ 335; 14 \ 2 \ 333; 16 \ 9 \ 332; 1 \ 3 \ 325; 5 \ 7 \ 323; 3 \ 14 \ 320; 10 \ 5 \ 319; 15 \ 13 \ 312; 2 \ 8 \ 307; 9 \ 12 \ 306; 8 \ 6 \ 305; 12 \ 13 \ 304; 16 \ 1 \ 300; 15 \ 5 \ 292; 11 \ 12 \ 280; 7 \ 4 \ 272; 4 \ 14 \ 266; 12 \ 6 \ 263; 3 \ 10 \ 263; 2 \ 4 \ 260; 4 \ 2 \ 252; 4 \ 2 \ 252; 3 \ 15 \ 248; 14 \ 9 \ 241; 12 \ 1 \ 236; 7 \ 13 \ 231; 13 \ 3 \ 228; 2 \ 14 \ 227; 9 \ 14 \ 225; 4 \ 7 \ 222; 9 \ 6 \ 219; 16 \ 2 \ 213; 1 \ 9 \ 205; 4 \ 8 \ 202; 7 \ 5 \ 201; 13 \ 2 \ 200; 9 \ 3 \ 193; 7 \ 3 \ 192; 3 \ 5 \ 191; 16 \ 8 \ 186; 8 \ 11 \ 183; 13 \ 1 \ 178; 8 \ 1 \ 175; 13 \ 11 \ 175; 1 \ 4 \ 167; 13 \ 14 \ 167; 5 \ 8 \ 166; 11 \ 13 \ 159; 16 \ 3 \ 159; 9 \ 10 \ 149; 7 \ 15 \ 148; 14 \ 4 \ 142; 11 \ 3 \ 130; 11 \ 8 \ 129; 10 \ 4 \ 124; 7 \ 2 \ 120; 6 \ 3 \ 119; 10 \ 2 \ 118; 2 \ 5 \ 108; 5 \ 1 \ 107; 8 \ 5 \ 106; 5 \ 3 \ 103; 5 \ 9 \ 101; 15 \ 12 \ 97; 5 \ 11 \ 76; 12 \ 7 \ 75; 8 \ 10 \ 75; 1 \ 15 \ 74; 9 \ 5 \ 74; 7 \ 9 \ 69; 15 \ 16 \ 68; 15 \ 3 \ 66; 8 \ 7 \ 64; 12 \ 8 \ 64; 6 \ 14 \ 64; 5 \ 15 \ 63; 10 \ 8 \ 60; 15 \ 6 \ 53; 13 \ 16 \ 51; 2 \ 13 \ 48; 13 \ 5 \ 48; 9 \ 7 \ 45; 16 \ 10 \ 44; 16 \ 15 \ 43; 14 \ 15 \ 38; 13 \ 7 \ 38; 10 \ 12 \ 36; 11 \ 2 \ 30; 2 \ 3 \ 23; 8 \ 2 \ 21; 6 \ 11 \ 20; 4 \ 3 \ 19; 12 \ 4 \ 18; 13 \ 15 \ 16; 5 \ 6 \ 12; 4 \ 5 \ 11; 16 \ 6 \ 9]$ , para  $n = 100$ ;

$D = [13 \ 11 \ 352; 9 \ 10 \ 350; 16 \ 9 \ 341; 3 \ 5 \ 340; 3 \ 7 \ 334; 12 \ 6 \ 333; 9 \ 7 \ 333; 2 \ 4 \ 329; 8 \ 7 \ 328; 8 \ 2 \ 326; 15 \ 1 \ 319; 2 \ 8 \ 318; 1 \ 2 \ 311; 13 \ 14 \ 297; 14 \ 2 \ 294; 16 \ 1 \ 289; 16 \ 15 \ 285; 8 \ 6 \ 276; 1 \ 9 \ 274; 13 \ 2 \ 272; 1 \ 11 \ 271; 6 \ 3 \ 270; 14 \ 12 \ 270; 13 \ 16 \ 267; 12 \ 8 \ 265; 12 \ 5 \ 265; 13 \ 5 \ 264; 5 \ 11 \ 258; 12 \ 13 \ 252; 9 \ 3 \ 251;$

9 8 251; 16 10 248; 9 4 248; 15 16 245; 9 12 244; 7 1 243; 1  
 15 242; 7 5 240; 3 12 238; 11 13 234; 5 3 234; 16 2 233; 1 3  
 233; 14 5 225; 11 1 222; 11 5 221; 14 15 218; 13 1 213; 16 8  
 199; 4 5 199; 2 3 198; 10 5 195; 9 6 193; 11 2 190; 13 10  
 189; 1 12 187; 16 12 184; 3 14 174; 5 8 165; 9 5 164; 12 4  
 162; 3 11 161; 12 7 155; 8 13 153; 8 11 153; 4 14 152; 10 8  
 151; 10 2 151; 1 7 148; 15 3 144; 16 3 144; 5 15 143; 5 9  
 142; 10 4 141; 5 1 136; 11 8 129; 10 14 125; 13 7 120; 4 3  
 116; 10 12 114; 11 3 114; 7 9 113; 1 4 113; 6 16 112; 10 6  
 107; 9 2 105; 4 7 104; 15 5 98; 3 4 95; 3 10 92; 8 3 91; 8  
 5 90; 8 1 86; 6 11 78; 9 14 76; 4 2 76; 5 6 70; 3 15 67; 6  
 14 66; 15 10 65; 7 13 63; 2 6 61; 14 4 60; 2 11 60; 16 6  
 59; 13 15 59; 12 1 58; 16 7 55; 13 3 55; 15 12 51; 7 2 48;  
 10 9 47; 12 15 46; 2 14 45; 7 3 45; 2 5 43; 9 16 40; 5 7  
 39; 7 4 38; 2 13 36; 15 6 36; 4 8 33; 11 12 28; 8 10 27; 11  
 7 22; 3 16 14; 14 13 14; 14 9 9; 15 13 8; 7 15 3], para n =  
 130;

D = [16 1 352; 13 15 351; 5 7 350; 5 9 348; 4 14 347; 2 15  
 347; 7 8 346; 12 8 344; 1 3 340; 9 16 336; 15 13 335; 6 3  
 334; 15 14 333; 13 16 333; 16 9 332; 8 5 329; 12 15 320; 1 12  
 319; 11 3 315; 3 1 315; 11 4 313; 6 11 313; 6 14 311; 12 11  
 308; 10 14 305; 1 7 303; 6 16 299; 8 6 299; 13 7 298; 6 2  
 296; 11 1 289; 11 8 289; 9 15 288; 11 2 286; 15 10 285; 9 3  
 283; 2 3 281; 16 10 280; 14 15 278; 11 13 270; 16 8 270; 15 9  
 267; 13 14 264; 15 3 263; 13 1 261; 1 15 260; 12 7 257; 1 4  
 257; 3 10 255; 16 6 255; 8 3 254; 5 8 248; 13 2 245; 7 1  
 241; 8 11 238; 10 4 238; 3 16 238; 3 4 238; 15 16 236; 8 13  
 236; 6 8 233; 6 9 232; 3 11 231; 5 14 231; 13 10 223; 12 1  
 221; 14 11 221; 16 11 213; 15 12 212; 6 10 211; 10 6 210; 11  
 12 209; 4 3 208; 9 4 206; 16 12 200; 14 2 200; 16 7 196; 1 9  
 196; 7 13 194; 7 5 194; 3 12 186; 11 5 180; 10 9 180; 2 5  
 176; 11 7 175; 7 4 173; 9 14 170; 3 14 168; 5 11 162; 12 13  
 161; 4 7 161; 3 7 159; 14 12 155; 2 6 149; 12 6 148; 13 11  
 145; 9 10 144; 3 5 143; 10 5 139; 15 1 133; 10 2 133; 12 4  
 131; 9 5 130; 5 15 129; 8 2 129; 7 9 128; 16 5 126; 3 15 125;  
 7 15 124; 9 12 122; 2 14 119; 5 6 118; 14 13 117; 8 1 110; 8  
 7 109; 5 1 108; 2 8 103; 14 4 102; 1 2 101; 4 2 101; 4 8  
 96; 9 8 96; 2 13 92; 9 7 88; 9 2 86; 8 12 83; 16 3 83; 10  
 12 74; 7 2 70; 8 10 68; 2 4 55; 5 10 50; 2 10 50; 13 3  
 50; 14 5 48; 16 15 44; 7 3 44; 16 2 34; 15 5 30; 14 9 26;  
 9 6 26; 13 5 20; 1 11 17; 2 11 17; 12 5 17; 5 3 16; 10  
 13 12; 4 5 10; 15 6 8; 10 8 7], para n = 150;

D = [5 2 348; 1 15 347; 8 1 346; 15 1 344; 4 3 342; 13 3 341;  
 13 12 340; 3 4 340; 11 13 338; 7 3 336; 7 4 335; 14 2 334; 7  
 13 331; 6 2 330; 1 11 330; 9 16 328; 15 6 327; 9 11 326; 16  
 15 324; 14 13 322; 7 5 320; 9 5 320; 10 16 317; 12 1 313; 15

5 311; 7 11 308; 6 9 306; 13 9 302; 6 12 302; 15 9 299; 3 5  
 296; 1 14 296; 12 2 295; 13 4 293; 4 16 293; 1 6 291; 4 5  
 287; 12 4 285; 9 4 284; 13 15 284; 7 12 284; 1 13 284; 2 4  
 282; 11 4 281; 10 2 280; 7 8 279; 5 15 276; 5 9 269; 16 3  
 269; 2 3 268; 4 7 267; 10 14 264; 12 13 262; 14 8 260; 14 15  
 259; 2 6 258; 4 11 251; 4 13 250; 7 1 249; 9 3 249; 8 12 249;  
 16 6 248; 16 5 247; 6 16 246; 2 9 243; 11 2 241; 10 6 236;  
 11 7 234; 15 2 234; 8 5 233; 13 2 232; 12 15 232; 1 8 232;  
 13 6 232; 6 8 227; 16 8 227; 7 9 225; 11 8 225; 6 14 224; 10  
 4 220; 15 16 220; 9 7 215; 2 10 214; 1 12 214; 5 1 214; 10 12  
 211; 12 11 209; 9 12 208; 4 10 208; 12 9 207; 8 2 207; 11 12  
 204; 12 8 204; 5 6 199; 5 12 197; 8 3 194; 3 7 192; 13 11  
 192; 14 12 190; 11 5 189; 16 9 188; 1 9 186; 5 3 184; 4 15  
 184; 2 16 183; 16 12 181; 3 6 179; 16 4 178; 16 14 178; 6 4  
 176; 3 13 167; 14 9 166; 3 9 164; 3 12 164; 3 15 161; 15 12  
 161; 11 1 160; 8 4 159; 13 8 159; 13 14 158; 4 14 153; 8 6  
 153; 2 8 146; 4 2 145; 11 16 132; 1 5 130; 9 10 123; 13 5  
 122; 12 6 119; 1 10 119; 9 8 117; 4 9 117; 1 3 116; 4 8 115;  
 13 7 111; 1 4 107; 15 14 106; 14 4 105; 2 7 104; 11 3 102;  
 10 13 101; 9 2 100; 13 10 99; 7 15 97; 9 15 96; 8 13 96; 10  
 9 93; 8 10 91; 10 11 90; 8 7 88; 16 10 87; 5 14 85; 1 2  
 84; 11 6 82; 13 1 82; 9 14 79; 16 2 76; 9 6 74; 3 16 73; 3  
 10 72; 6 11 68; 10 8 65; 7 2 61; 16 1 55; 10 5 53; 14 6  
 52; 3 1 49; 6 3 49; 1 7 47; 16 7 45; 12 10 44; 15 3 44; 14  
 11 42; 8 15 41; 2 11 41; 3 2 39; 6 1 38; 6 5 34; 14 5 33;  
 13 16 31; 12 16 27; 10 1 27; 5 8 25; 15 13 25; 12 7 25; 2  
 13 25; 5 11 22; 3 11 21; 2 14 20; 3 14 20; 12 5 19; 8 11  
 18; 2 15 13; 4 12 13; 5 10 12; 2 5 11; 15 10 8; 6 10 8; 16  
 11 7; 5 7 6], para  $n = 200$ ; e

$D = [6$  13 356; 11 6 353; 5 9 353; 4 14 352; 4 13 352; 1 14  
 351; 11 2 349; 5 13 347; 4 6 346; 15 7 346; 15 2 344; 16 1  
 344; 16 12 342; 2 12 342; 2 4 339; 13 10 338; 3 8 338; 2 13  
 337; 13 6 336; 5 15 330; 2 8 329; 3 9 328; 8 4 327; 3 5 323;  
 9 6 322; 11 9 322; 6 7 320; 3 4 319; 8 5 317; 1 13 316; 16  
 14 316; 5 1 315; 6 10 311; 6 14 310; 12 6 308; 3 16 304; 7 1  
 303; 8 2 300; 16 3 300; 11 14 300; 9 13 299; 9 14 298; 2 11  
 298; 12 5 297; 10 12 296; 7 3 294; 10 16 292; 13 11 291; 1 7  
 290; 9 11 289; 10 15 287; 15 11 286; 12 7 284; 2 15 283; 5 16  
 280; 9 15 275; 1 4 274; 12 14 273; 2 16 273; 2 3 273; 1 11  
 273; 9 16 270; 14 5 269; 4 11 268; 15 3 263; 3 10 260; 8 16  
 257; 4 3 253; 13 1 252; 1 15 250; 2 7 246; 15 16 241; 12 10  
 241; 1 3 240; 10 2 238; 1 16 237; 10 7 234; 16 8 233; 8 6  
 232; 14 15 232; 15 5 232; 7 12 231; 10 5 230; 16 13 228; 9 5  
 228; 2 6 228; 6 11 224; 9 8 224; 1 2 223; 5 2 222; 13 2 222;  
 10 6 221; 2 5 221; 12 3 218; 3 1 215; 1 12 215; 9 1 214; 3  
 13 210; 11 10 205; 11 16 205; 12 11 205; 10 11 204; 14 8 199;  
 12 9 196; 11 7 191; 3 15 191; 15 14 191; 6 4 189; 7 13 183; 4  
 16 182; 13 8 182; 7 14 180; 11 13 180; 7 15 178; 16 10 178; 1

6 178; 12 4 177; 14 13 176; 16 4 174; 5 7 173; 7 2 172; 9 3  
 167; 6 1 167; 11 3 167; 5 10 166; 16 11 166; 5 8 164; 9 12  
 163; 1 10 162; 15 4 162; 8 9 162; 15 10 160; 11 8 158; 4 2  
 157; 11 1 155; 13 3 151; 9 10 150; 3 7 150; 6 3 147; 12 13  
 145; 6 9 141; 15 13 138; 8 7 138; 14 1 137; 11 12 137; 14 3  
 136; 5 12 136; 13 7 134; 14 2 134; 2 10 133; 3 14 133; 15 8  
 131; 8 12 130; 16 15 130; 11 4 128; 8 14 125; 12 8 125; 4 9  
 123; 5 4 123; 13 9 122; 1 5 122; 14 16 122; 6 16 120; 2 9  
 118; 11 5 117; 3 6 115; 4 12 112; 5 3 111; 15 9 107; 10 4  
 106; 11 15 105; 12 15 104; 7 16 103; 10 3 102; 10 13 101; 15 1  
 98; 7 9 94; 13 4 94; 13 12 92; 3 12 90; 16 7 88; 13 5 87;  
 6 15 85; 1 8 83; 16 5 81; 8 1 79; 12 16 75; 9 2 73; 14  
 11 69; 6 12 68; 7 6 67; 1 9 66; 14 12 60; 6 5 60; 2 14  
 60; 3 11 55; 10 14 54; 7 10 54; 15 12 54; 10 1 54; 7 5 54;  
 10 8 48; 14 4 48; 2 1 48; 9 4 47; 10 9 45; 13 16 45; 16  
 2 43; 13 15 43; 16 6 42; 8 11 41; 12 2 37; 9 7 36; 6 8  
 35; 4 8 32; 14 10 28; 8 13 27; 4 1 25; 12 1 25; 8 10 24; 5  
 14 24; 8 3 23; 4 7 23; 14 9 22; 7 8 20; 4 15 19; 15 6  
 19; 4 5 19; 16 9 18; 14 6 17; 14 7 17; 5 6 11; 7 4 9; 8  
 15 9; 3 2 8; 7 11 4; 6 2 2; 5 11 1; 13 14 1; 4 10 1],  
 para  $n = 240$ .