

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

Marcelo Fernandes Fontes¹; Lisandro Lovisoló¹; Douglas Mota Dias¹; José Rodolfo Souza¹; Harold Dias de Mello Junior²

¹Departamento de Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações (DETEL)

²Departamento de Engenharia Elétrica (ELE)

Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ

Rio de Janeiro – RJ, Brasil

ffontesmarcelo@gmail.com; {lisandro; douglas.dias; jrsouza; harold.junior}@uerj.br

Resumo — Neste artigo, um algoritmo genético (GA – *Genetic Algorithm*) é aplicado para obter soluções em um problema de Roteamento, Modulação e Alocação de Espectro (RMSA – *Routing, Modulation and Spectrum Assignments*) Estático (*off-line*) em Redes Ópticas Elásticas (EON – *Elastic Optical Network*). Emprega-se uma abordagem voraz, com base no critério MSF (*Most Subcarriers First*), visando a atender primeiramente as maiores demandas da EON, isto é, as que requerem maior largura de banda do canal de comunicação óptico, reduzindo o esforço computacional e apresentando soluções adequadas para redes com baixa complexidade. A codificação do GA é feita usando cromossomos cujos genes representam possíveis rotas, que são testadas e também utilizam o critério MSF. A qualidade dos resultados obtidos é razoável, inclusive para redes complexas.

Palavras Chave — Algoritmo Genético (GA), MSF (*Most Subcarriers First*), Redes Ópticas Elásticas (EONs), Roteamento, Modulação e Alocação de Espectro (RMSA).

I. INTRODUÇÃO

Os sistemas de telecomunicações têm enfrentando mudanças frequentes com o surgimento e a integração de diversas tecnologias. Consequentemente, têm se tornado cada vez mais complexos, em virtude da demanda crescente de tráfego por usuários, resultante da expansão de aplicações e serviços de dados. Tais demandas têm sido amplamente atendidas por redes ópticas de transporte eficientes e flexíveis, capazes de suportar conexões com variadas capacidades (taxas) e larguras de banda.

Redes ópticas empregam a multiplexação por divisão em comprimento de onda – WDM (*Wavelength Division Multiplexing*, em grande escala por permitir maior exploração da grande largura de banda [1]. Atualmente, sistemas WDM com detecção coerente são capazes de fornecer taxas de 40 Gb/s a 100 Gb/s por canal (comprimento de onda). Os canais WDM em geral são posicionados em grades fixas estabelecidas pela União Internacional de Telecomunicações (ITU-T), com espaçamentos de 12,5 GHz, 25 GHz, 50 GHz ou 100 GHz [2]. Algumas recomendações ITU-T estabelecem ainda que todos os canais em um sistema WDM operem na mesma taxa. Para atender a diferentes conexões faz-se o roteamento e alocação dos comprimentos de onda, que é usualmente descrito como um problema de RWA (*Routing and Wavelength Assignments*) [3][4], resultando em uma rede com

roteamento por comprimento de onda – WRN (*Wavelength Routed Network*) [4]. Cada comprimento de onda é empregado para atender a uma única conexão e é separada dos adjacentes por uma faixa de guarda (grades de ITU-T). Tal configuração não confere granularidade variável, isto é, não permite acomodar conexões com capacidades distintas, mais adequadas ao perfil atual de tráfego através de redes de comunicação [3].

A rede óptica elástica (EON) busca contornar essa limitação. Uma EON deve permitir alocar taxa – e, conseqüentemente, largura de banda – de modo adaptativo, atendendo à demanda dinâmica de tráfego; admitem-se canais WDM com capacidades (taxa de transmissão, largura de banda e alcance) variáveis. Em uma EON, emprega-se modulação por divisão em frequências ortogonais – OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*) [3][4][5], de forma a mitigar efeitos nocivos de dispersão cromática e de modo de polarização que surgem em enlaces de longas distâncias e altas taxas através de fibras ópticas [1]. Com o emprego do OFDM, a informação a ser transmitida pode ser distribuída por um grupo de subportadoras, possibilitando maior granularidade do que em redes WDM. Desta forma, é possível atender às diferentes demandas por tráfego selecionando adequadamente as fatias espectrais e alocando transceptores em função do arranjo de canais empregados através de cada nó da rede.

Para atender as conexões com uma EON, deve-se resolver o problema de roteamento, modulação e alocação do comprimento de onda (RMSA) – um problema de classe não determinístico polinomial (NP-Completo), assim como o RWA [1]. O problema RMSA implica não apenas na definição de rotas físicas na rede (roteamento) e alocação de comprimentos de onda, de forma a atender à capacidade demandada, porém também na definição da modulação que pode ser empregada, que é por sua vez dependente do comprimento do enlace. Na literatura, pode-se identificar algumas propostas para a solução do problema RMSA em EON usando GA [6][7][8] [9][10][11][12].

Devido à complexidade do problema RMSA, o GA proposto emprega o critério MSF (*Most Subcarriers First*). Este critério é empregado para ordenar as demandas requisitadas da rede em função da quantidade de subportadoras (fatias espectrais) requeridas para atendê-la. Observa-se que o

critério MSF corresponde a uma estratégia de otimização “gananciosa”, “gulosa” ou “voraz”, pois implica empregar uma decisão que parece a mais promissora naquele momento ou ponto, sem jamais reconsiderá-la, independentemente das consequências futuras de tal decisão [13]. Por outro lado, diferentes cromossomos irão codificar diferentes escolhas de rotas de um mesmo conjunto, como possíveis soluções de um problema RMSA, que são aplicadas usando o MSF. A aptidão de uma solução candidata é avaliada em função das frações dos enlaces da rede e das subportadoras ocupadas pela solução. Portanto, a função de aptidão deverá considerar: i) os comprimentos das rotas, pois o comprimento limita o tipo de modulação empregada nas subportadoras OFDM, quanto mais bits forem comportados por símbolo, menor o alcance do enlace; ii) a ocupação espectral da rede, uma vez que as subportadoras OFDM são empregadas nas conexões para prover as demandas requeridas.

A seguir, a Seção II descreve e apresenta algumas características de uma EON, formulando o problema RMSA; a Seção II.A apresenta o algoritmo de roteamento de Yen e a Seção II.B apresenta como empregar um algoritmo voraz (baseado no critério MSF) juntamente com o algoritmo de Yen para obter uma solução para o problema RMSA. Na Seção III, nossa proposição de GA para obter soluções para o problema RMSA é apresentada. Os resultados obtidos são apresentados na Seção IV e a Seção V traz as conclusões.

II. REDE ÓPTICA ELÁSTICA (EON)

Neste trabalho, restringimo-nos ao problema RMSA *off-line*, isto é, assumem-se padrões de tráfego razoavelmente conhecidos, permitindo estabelecer um conjunto de conexões semipermanentes. Uma EON pode ser representada por um grafo $G = (V, E)$, onde V representa o conjunto de nós (vértices) e E , o conjunto de ramos (segmentos de fibra óptica, enlaces ou *links*) que conectam dois nós em V .

O comprimento do enlace determina a ordem da modulação que pode ser empregada em cada subportadora OFDM, equivalentemente quanto mais bits um símbolo comportar, menor o alcance do enlace. Uma modulação espectralmente mais eficiente como o 16-QAM pode ser utilizada para caminhos ópticos mais curtos que uma modulação como o QPSK. Assim, há uma interdependência entre as rotas, modulação e quantidade de portadoras que é objeto do problema RMSA.

Denominaremos $S = \{s_1, s_2, s_3, \dots, s_{|S|}\}$ ao conjunto de fatias espectrais disponíveis em uma EON, sendo $|S|$ a quantidade de fatias espectrais (*slots*) totais disponíveis. Quando o sinal é transmitido por diversos nós ópticos, as subportadoras das bordas do espectro sofrem maiores distorções em função das imperfeições dos filtros ópticos seletivos de comprimento de onda (WSS – *Wavelength Selective Switching*) [14]. Porém, com a inclusão de uma banda de guarda (GB – *Guard Band*), sendo $GB = 2$ fatias espectrais, no sinal óptico OFDM transmitido entre caminhos

ópticos adjacentes, este problema pode ser diminuído [15].

O caminho (o_i, t_i) , sendo o_i (*origin*) o nó de origem e t_i (*termination*) o nó de destino de uma conexão i , deve ser contínuo (as mesmas fatias espectrais devem ser usadas pela conexão em todos os enlaces) e o espectro empregado por essa conexão deve ser contíguo, isto é, as fatias espectrais empregadas devem ser adjacentes.

O conjunto de demandas presentes na EON, ou seja, o número de fatias espectrais necessárias para cada uma das conexões pré-estabelecidas, é dado por $D = \{d_1, d_2, \dots, d_i\}$, sendo a demanda requerida (d_i) para uma dada conexão i entre os nós o_i e t_i , com uma taxa de transmissão requerida R_i , definida por $d_i = (o_i, t_i, R_i)$; onde $i = 1, 2, 3, \dots, |D|$. Doravante, foi considerado o conjunto D ordenado decrescentemente em função dos valores dos R_i .

A. Algoritmos de Roteamento

Para resolver problemas de roteamento pode empregar-se o algoritmo de Dijkstra [16] que provê o caminho de menor custo entre um nó fonte e todos os outros nós de uma rede – uma tabela de roteamento. Por outro lado, o algoritmo de Yen [17] emprega Dijkstra para encontrar os k caminhos mais curtos entre um nó de origem e um nó de destino. O algoritmo de Yen foi utilizado para encontrar uma quantidade k de possíveis rotas entre os nós o_i e t_i . Com isto constrói-se o conjunto P_i que representa as k rotas possíveis para a demanda d_i . Assim, é possível definir $P_i = [p_{i,1}; p_{i,2}; \dots; p_{i,k-1}; \dots; p_{i,k}]$; sendo as k rotas definidas pelo algoritmo de Yen para a conexão i , ou seja, $p_{i,k} = \{p_{i,k}\} = \{(o_i, e_{k_n}), (e_{k_n}, t_i)\}$; onde e_{k_n} são os enlaces (saltos) pelos quais passa a n -ésima rota. Adotou-se o critério de menor quantidade de saltos entre o nó de origem e o nó de destino para selecionar as k rotas retornadas pelo algoritmo de Yen. Uma forma conveniente de representar um grafo é por meio da matriz de adjacências A - um grafo de $|V|$ nós é representado por uma matriz $|V| \times |V|$ - os nós são numerados de 1 a $|V|$ e os elementos da matriz de adjacências são a_{ij} , se houver um ramo entre nós i e j , a_{ij} é o peso deste ramo (por exemplo, o comprimento dos enlaces), e $a_{ij} = \infty$, caso contrário.

B. Critério MSF e Algoritmo Voraz

O critério MSF está relacionado ao que se denomina um algoritmo voraz [13]. Quando o problema a ser resolvido pertence à classe não determinístico polinomial (NP-completo), um algoritmo voraz pode ser adequado para obter uma solução aproximada em tempo polinomial [18].

Seja o conjunto D ordenado decrescentemente em função dos valores dos R_i . Emprega-se Yen para encontrar os k caminhos de menor custo com base na matriz A . Atende-se às demandas d_i , seguindo o critério MSF. Usando as k rotas definidas pelo algoritmo de Yen, usando o critério MSF, avalia-se a disponibilidade de fatias espectrais contínuas e contíguas disponíveis para prover as demandas. As conexões são atendidas em ordem decrescente de demandas, empregando o espectro (subportadoras OFDM) aplicando a

continuidade e a contiguidade ao mesmo. Se uma rota de Yen para uma conexão é incapaz de atender a uma demanda, passa-se à seguinte até que a demanda seja atendida ou as k possibilidades sejam testadas. A quantidade de subportadoras empregada numa conexão irá depender do comprimento do enlace, conforme é discutido na Seção IV.A. Como resultado, obtêm-se as demandas que puderam ser atendidas e a modulação aplicada nas subportadoras empregadas para atendê-la. Isto é, o problema RMSA é assim dividido em duas fases. Na primeira, cria-se uma lista de rotas com uma quantidade suficiente de fatias espectrais contíguas de o_i a t_i , determinando-se o formato de modulação para cada d_i , com base na distância total do caminho óptico utilizado. A segunda fase aloca unidades de fatias espectrais contínuas e contíguas à rota [4] para a solução do problema.

III. GA APLICADO NA SOLUÇÃO DO PROBLEMA RMSA

Algoritmos genéticos utilizam conceitos oriundos da teoria da Evolução das Espécies: seleção natural, reprodução, hereditariedade e mutação. Isso requer a codificação de possíveis soluções do problema em genes de cromossomos; se uma dessas soluções é avaliada como satisfatória, o cromossomo gera descendentes, caso contrário, é descartado. Para modelar o problema RMSA, codifica-se em cada gene um índice para cada k rota retornada pelo algoritmo de Yen. Assim, a título de exemplo, podem-se considerar os cromossomos iniciais p_1 e p_2 como os apresentados na Fig. 1. Assim, para modelar o problema RMSA define-se:

- π^i como o i -ésimo gene que contém um índice para um possível rota para a i -ésima demanda;
- portanto o cromossomo π é uma sequência de demandas específicas $\pi = [\pi^1_{máx}, \dots, \pi^i, \dots, \pi^{|D|}_{mín}]$, onde $\pi^i_{máx}$ é a conexão que requer maior taxa de transmissão em cada enlace da rede e $\pi^i_{mín}$ a que requer menor.

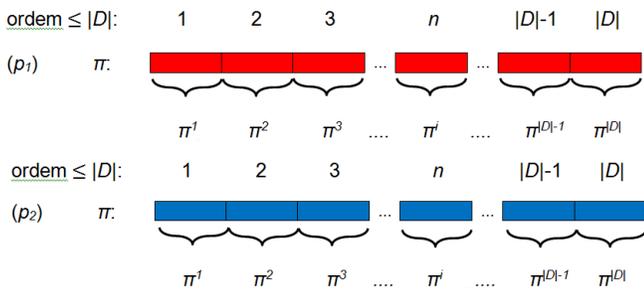


Fig. 1. Exemplos de dois possíveis cromossomos no GA.

A. Operadores Genéticos Empregados

A população inicial possui os valores dos genes atribuídos aleatoriamente, e evolui por meio de seleção, que escolhe os indivíduos (cromossomos) que irão se reproduzir por cruzamento ou recombinação (*crossover*) e mutação para formar a nova população, que se espera que contenha ao menos um indivíduo mais apto que os da geração anterior.

Neste trabalho foram realizadas duas formas de recombinação entre indivíduos. Na primeira, gera-se um novo cromossomo com base na “mescla” de genes, isto é, por meio de um ponto de troca localizado na metade do cromossomo dos progenitores. Com base na Fig. 1, o descendente p_0 contém metade dos genes sequenciais de p_1 e a outra metade de p_2 , Fig. 2.

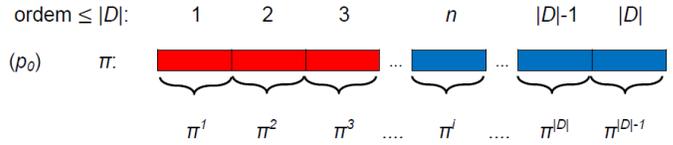


Fig. 2. Crossover por “mescla” de genes, usando-se a Fig. 1, como base.

Ainda considerando a Fig. 1, a outra forma de recombinação “permuta”, de forma aleatória, um dos genes de um dos cromossomos progenitores, substituindo-o pelo gene correspondente do outro cromossomo progenitor, de forma a gerar um terceiro cromossomo. O cromossomo p_0 da Fig. 3 apresenta uma modificação em π^i que é originário de p_2 , enquanto os genes restantes provêm de p_1 .

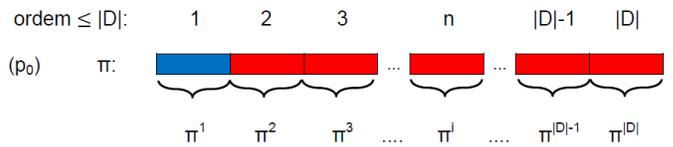


Fig. 3. Crossover por permutação de genes, usando-se a Fig. 1, como base.

A mutação altera os genes em si e não os cromossomos – trata-se de uma alteração (em geral, aleatória) de algum dos genes pertencentes ao cromossomo descendente p_0 , conforme apresentado na Fig. 4, com a substituição do último gene do cromossomo de p_0 . A mutação em geral tem ocorrência baixa e a escolha de sua frequência ou probabilidade de ocorrência é crítica, pois se muito baixa a evolução pode ser lenta e se muito alta pode acarretar grandes flutuações na aptidão de gerações sucessivas que a afastam da solução ótima [19].

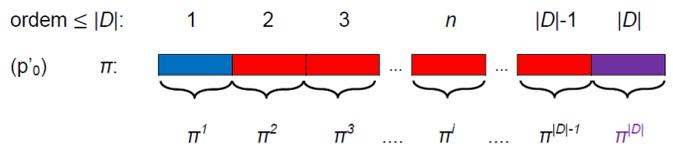


Fig. 4. Operador de mutação aplicado ao cromossomo da Fig. 3.

B. Funções de Aptidão para o GA

A aptidão dos indivíduos é empregada para realizar a seleção dos mais aptos que irão gerar descendentes. Para isso deve-se definir uma função avaliação de aptidão (*fitness function*) que determina a qualidade da solução do problema. Para que o GA evolua satisfatoriamente é necessária uma função adequada que avalie a solução codificada em função do problema. Obviamente, no caso em questão, tem-se interesse em saber se as demandas foram atendidas analisando, por exemplo, a

porcentagem de conexões atendidas ou bloqueadas ou a fração da taxa demandada da rede efetivamente atendida. Mas estes aspectos nada informam sobre a ocupação das subportadoras OFDM – o recurso disponível através dos enlaces para atender as demandas requeridas à rede e resolver o problema RMSA.

1. Minimização do Compartilhamento de Rotas

A primeira função de aptidão considera somente as rotas das conexões demandadas. Corresponde ao somatório dos enlaces compartilhados no estabelecimento destas conexões, conforme

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

onde $l_{i,j}$ é quantidade de conexões que empregam o enlace entre os nós i e j . Minimizando f_1 , os conjuntos de conexões retornadas pelo algoritmo de Yen com quantidades menores de ramos compartilhados são favorecidos. Isso resultará em menor ocupação dos ramos e, a princípio, em mais subportadoras disponíveis em cada um deles para provimento das taxas demandadas.

2. Minimização das Fatias Espectrais Utilizadas

A outra função de aptidão visa a analisar a alocação espectral total de uma EON. Desta forma, fatias espectrais que já estiverem sendo utilizadas por uma conexão, em qualquer enlace da rota, devem impactar negativamente a aptidão de um indivíduo. Pretende-se com isso favorecer soluções que permitam empregar fatias espectrais contíguas.

A quantidade total de subportadoras utilizadas na EON pode ser definida como o somatório de fatias espectrais $s_{|S|} \in S$ utilizadas nos enlaces da EON [20] que atendem às taxas (R_i) das i demandas solicitadas, isto é, de acordo com

$$f_2 = \sum_{i=1}^{|D|} |S_i| |e_{k_i}|, \quad (2)$$

na qual $|e_{k_i}|$ representa o comprimento total dos enlaces (saltos) e $|S_i|$ a quantidade de fatias espectrais empregadas, na i -ésima rota. Pretende-se com isso minimizar o uso do espectro na EON como um todo.

3. Minimização de Rotas e Fatias Espectrais

Combinam-se os critérios anteriores para minimizar a função descrita por

$$f_3 = f_1 + f_2. \quad (3)$$

C. Emprego do GA para o Problema RMSA

A população inicial é formada por cromossomos que contém genes que indexam um dos k caminhos definidos pelo algoritmo de Yen, ordenados decrescentemente em função das demandas d_i , pelo critério MSF. Para cada uma das rotas são

alocadas fatias espectrais, com base no comprimento total da rota, tipo de modulação empregada e estado da rede. Assim, para cada cromossomo têm-se as demandas que puderam ser atendidas, e o tipo de modulação empregada nas subportadoras OFDM para cada uma delas, com base na distância do caminho que está codificado no gene.

Os indivíduos da população são avaliados e os mais aptos são selecionados para combinação e mutação, reproduzindo a próxima geração. O processo é repetido até o critério de parada ser alcançado.

D. Sobre a Implementação

O mecanismo de seleção adotado foi o de roleta. A chance de cada indivíduo se reproduzir é (inversamente) proporcional ao valor da função de aptidão. Previamente, um gene como um valor entre 1 e k foi definido. Assim, a mutação de um gene corresponde à troca da rota (mutação inteira em num espaço módulo k). Foi considerada uma taxa de 10% em todas as simulações apresentadas.

Similarmente, neste estudo inicial sobre nossas proposições para otimização do problema RMSA usando GA, para obtenção dos resultados apresentados na seção a seguir, foram utilizadas populações iniciais de 150 indivíduos/cromossomos, com genes aleatoriamente escolhidos e como critério de parada foi empregado o alcance de 100 gerações, que se demonstrou razoável (convergência do algoritmo avaliada por diferenças de ordem 1 parte em 10^6 nos valores da função de avaliação). Metade da população é substituída pelos descendentes mais bem avaliados pela função de aptidão, assim a população corrente é constituída em parte por estes descendentes e pelos progenitores mais aptos (elitismo).

Utilizou-se o MatLab® [23], adaptando algumas funções da *toolbox* de GA (CF-GA) às características do problema RMSA.

IV. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

As EONs consideradas são compostas por nós ópticos ativos (OXC – *Optical Cross-Connect*) e rotas bidirecionais (*full duplex* e grafo não direcionado) interligando dois nós que estejam ligados, além disso pressupõem-se a utilização de dispositivos EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifier* – Amplificador a Fibra Dopada com Érbio) [22], em todos os nós da EON.

A. Estrutura OFDM

Consideram-se fibras ópticas monomodo de dispersão deslocada não nula (NZDSF – *Non-Zero-Dispersion-Shifted Fiber*) [21], operando na banda C (1530nm a 1565nm) [15], com frequência central em 193,75 THz ($\lambda = 1547,32\text{nm}$) [22] e largura de banda (B_w – *Bandwidth*) de 4,475 THz [24]. Assim, a quantidade de subportadoras OFDM é

$$|S| = B_w / s_0 = (4,475 \cdot 10^{12}) / (12,5 \cdot 10^9) = 358.$$

A modulação a ser empregada nas conexões depende do comprimento do enlace. Nas simulações deste trabalho foram

empregadas as regras apresentadas na Tabela 1, onde l é o comprimento total da rota.

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

Tabela 1. Taxa de transmissão versus o máximo alcance obtido em uma EON.

B. EON Simples

Como primeiro teste do GA proposto para otimização do problema RSA, foi considerada a EON simples representada pela Fig. 5, para a qual $l_0 = 2000\text{Km}$; $V = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$, isto é, esta possui $|V| = 6$ nós, e $E = \{e_1, e_2, \dots, e_{16}\} = \{(1,2), (1,4), (1,6), (2,1), (4,1), (6,1), (2,3), (2,6), (3,2), (6,2), (3,4), (4,3), (4,5), (5,4), (5,6), (6,5)\}$, com $|E| = 16$ conexões.

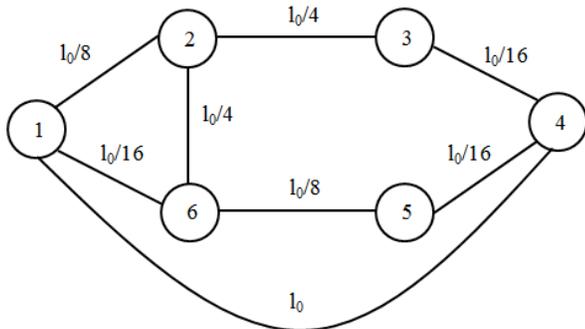


Fig. 5. Grafo da EON de 6 nós analisada.

Os resultados obtidos com GA da Seção III e os obtidos com o algoritmo “voraz” (MSF) da Seção II foram comparados, de forma a verificar se a abordagem confere ganhos, com diferentes intensidades de tráfego, taxas que variaram de 40Gbps a 1Tbps em todos os cenários implementados e quantidades de conexões $n = \{4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 30\}$ para $k = \{3, 5\}$, aplicando-se as três funções de aptidão discutidas e com dois tipos de operadores genéticos de recombinação (mescla ou permutação). Nos gráficos da Fig. 6 são apresentadas as quantidades de conexões bloqueadas quando se aumenta a quantidade total de demandas requeridas da EON, chegando-se ao total de 30 conexões simultâneas. Para as 14 variantes de algoritmos para cada quantidade de demandas $|D|$ as conexões e taxas requerida são as mesmas. Na Fig. 6, é possível verificar que o GA apresenta melhores resultados que o algoritmo MSF (voraz) em qualquer caso, o que atesta a adequação do GA para RSA proposto. Observa-se, ainda, que quanto maior for a quantidade de conexões simultâneas demandada maior é o ganho decorrente do emprego do GA, uma vez que a quantidade de conexões bloqueadas para de crescer.

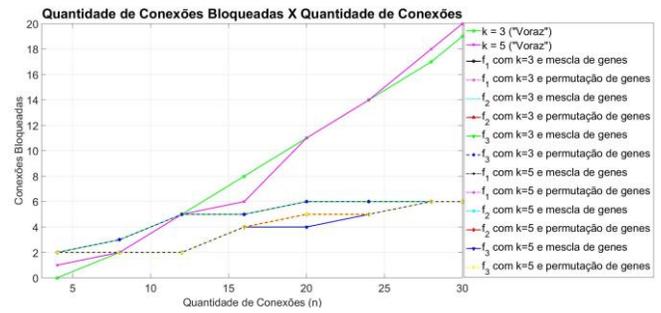


Fig. 6. Total de conexões bloqueadas quando é aumentada a quantidade de conexões simultâneas na EON de 6 nós.

Na Fig. 7 são apresentadas as demandas totais atendidas nos casos discutidos anteriormente. Observa-se que, ao utilizar o critério MSF via algoritmo voraz, a demanda total atendida diminui com o aumento da demanda requerida para $k = 5$, apesar de ser bem maior do que para $k = 3$, pois há mais conexões possíveis para atender uma mesma demanda, o que se traduz em mais enlaces com fatias espectrais contínuas e contíguas disponíveis ainda não utilizadas. Por outro lado, na Fig. 7 (b), que procura atender o critério MSF via GA, observa-se que para $k = 5$, a reprodução via mescla de genes leva a melhores resultados. Além disso, foram traçadas curvas de referência (cor cinza) na Fig. 7 (b), uma perpendicular ao eixo das ordenadas, que traz a soma das capacidades de todos os enlaces (capacidade máxima da rede), que neste caso é 5,84Tbps, uma horizontal (capacidade total da rede) e outra diagonal, sendo a razão entre as taxas requeridas pelas demandas d_i e a capacidade máxima da rede. Observa-se que o algoritmo apresentado é capaz de atender satisfatoriamente às demandas apresentadas até quase a capacidade total da rede.

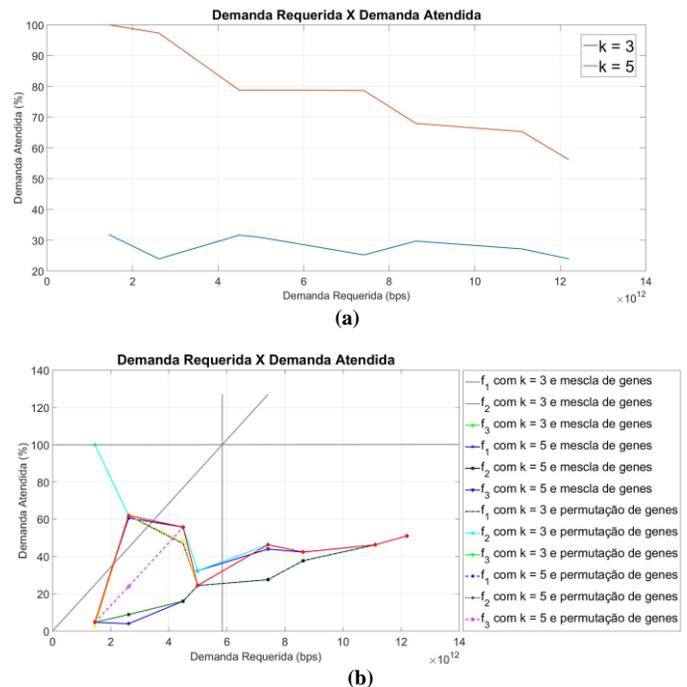


Fig. 7. Quantidade de demandas atendidas para a EON de 6 nós pelo critério MSF utilizando (a) algoritmo voraz e (b) GA.

Para finalizar esta análise inicial sobre o comportamento do GA aplicado ao problema proposto de RMSA, a Fig. 8 traz os tempos de processamento de cada um dos cenários e algoritmos considerados nas Fig. 6 e Fig. 7. Analisando os gráficos da Fig. 8 (a) e Fig. 8 (b) é possível verificar que o melhor desempenho da solução obtida via GA vem às custas de maior custo computacional.

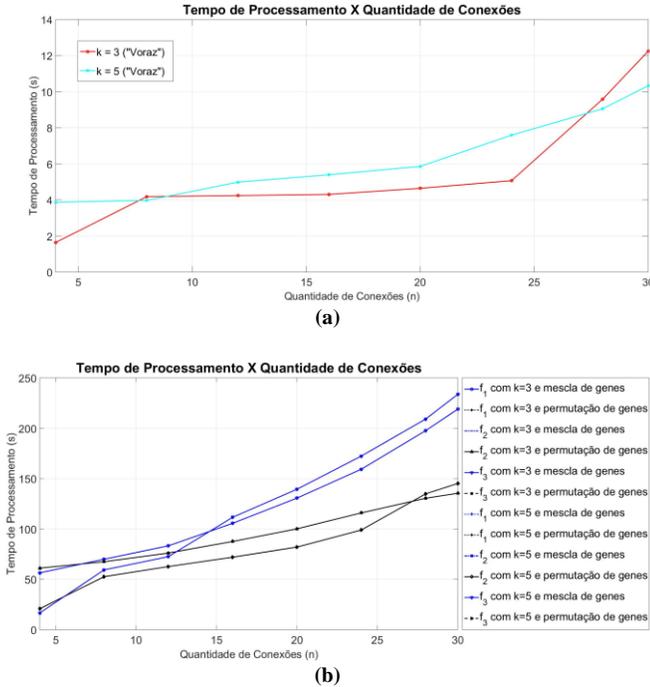


Fig. 8. Tempo total de processamento (em segundos) quando aumenta-se a quantidade de conexões simultâneas na EON de 6 nós utilizando (a) algoritmo voraz e (b) GA.

C. NSFNET

A topologia apresentada na Fig. 9 representa a NSFNET (*National Science Foundation Network*) dos Estados Unidos da América do Norte (EUA) [25], equivalendo a um grafo de nós rotulados (nome das cidades) e com ramos ponderados (distância percorrida pelos cabos ópticos entre as cidades).

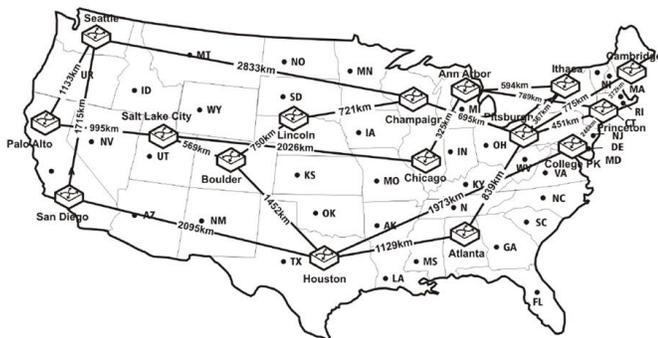


Fig. 9. Topologia e comprimentos das conexões da rede NSFNET do EUA.

A metodologia e as taxas de transmissão da subseção anterior foram aplicadas em simulações para atender a diferentes demandas por tráfego através da EON da Fig. 9, sendo $n = \{5, 20, 50, 100, 130\}$ e, desta vez, com $k = \{5, 15\}$. Os gráficos da Fig. 10 apresentam as quantidades de conexões bloqueadas quando se aumenta a quantidade total de demandas requeridas na EON. Comparando-se o gráfico da Fig. 10 (a) com o da Fig. 10 (b), é possível verificar que o GA apresenta os melhores resultados para a solução do problema RMSA. Para um $k = 15$ e aplicando-se f_3 com a permutação dos genes, obtém-se a menor quantidade de bloqueios, atendendo 83% das 130 conexões demandadas da EON.

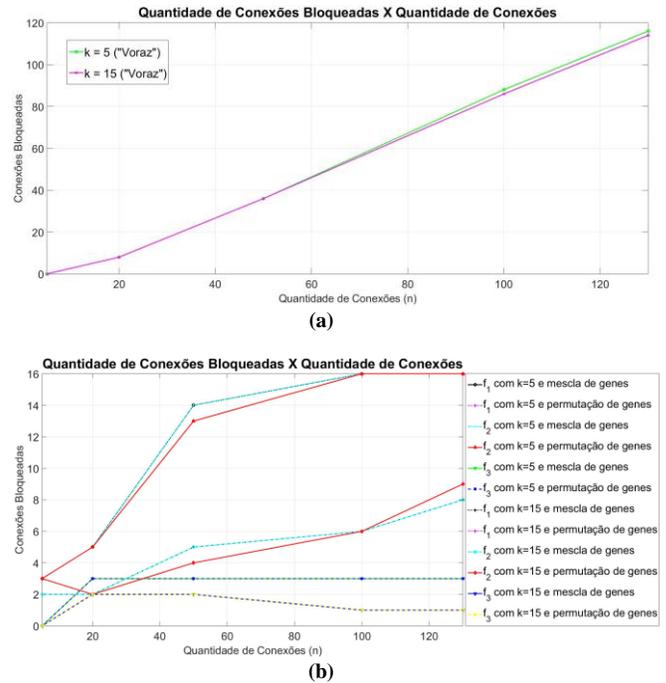


Fig. 10. Total de conexões bloqueadas quando é aumentada a quantidade de conexões simultâneas na NSFNET utilizando (a) algoritmo voraz e (b) GA.

Na Fig. 11, têm-se as frações de taxas atendidas, pela EON da Fig. 9. Analisando-se a Fig. 11 (a) observa-se que, ao utilizar o algoritmo voraz, a quantidade de demandas atendidas diminui com o aumento da demanda e, na Fig. 11 (b), observa-se que o GA com $k = 15$, função de aptidão f_3 e permutação de genes obtém-se o melhor resultado geral. Traçamos retas de referência em função da capacidade total, como apresentadas na Fig. 7. Além disso, a linha horizontal (que passa pelo ponto onde as duas retas de referência se encontram) indica a capacidade máxima da EON. Observa-se que mesmo para uma rede complexa como a NSFNET é possível atender a demandas por taxas elevadas de transmissão. Vemos que neste caso, o algoritmo proposto é capaz de ocupar muito mais a capacidade total da rede do que no anterior.

V. CONCLUSÃO

Redes ópticas elásticas permitem taxas de dados flexíveis, podendo adequar-se às demandas dos usuários. O problema RMSA reside em estabelecer as rotas, subportadoras OFDM e modulações empregadas para prover as diversas conexões solicitadas a uma rede óptica flexível. O comprimento total da rota é fundamental na solução do problema RMSA, pois define a modulação a empregar e consequentemente a quantidade de fatias espectrais que serão empregadas. Isto é o roteamento impacta na locação de espectro.

Uma possível solução consiste em considerar esses problemas interligados seguindo um critério MSF. Inicialmente, as demandas são ordenadas em ordem decrescente e se processa as demandas nesta ordem. Para cada demanda, a partir de um conjunto de possíveis rotas para estabelecer a conexão, verifica-se a disponibilidade de espectro. Caso disponível, passa-se para a próxima demanda. Caso contrário, testa-se outra rota possível. Proceda-se assim até a última rota.

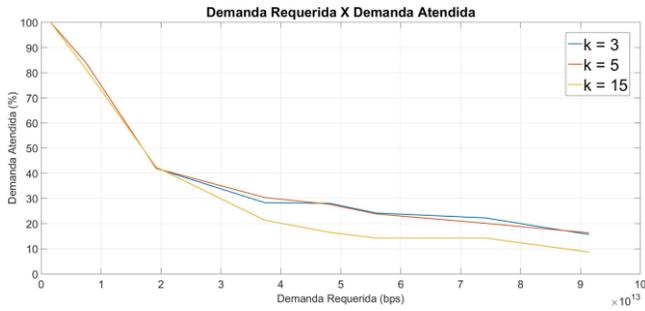
A solução alternativa para o problema RMSA é baseada em GA. No cromossomo, as demandas também estão ordenadas conforme o critério MSF. O algoritmo proposto foi capaz de atender a demandas com elevadas taxas de transmissão, tanto para uma rede simples, de 6 nós, quanto para uma rede complexa como a NSFNET.

AGRADECIMENTOS

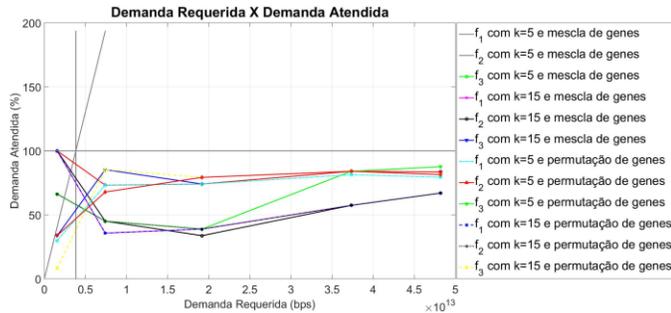
Os autores agradecem o apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), da Coordenação de Aperfeiçoamento do Ensino Superior Educação Pessoal (CAPES) e da Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) [Processo E-26/010.001800/2016].

REFERÊNCIAS

- [1] Agrawal, G. P.; Fiber-Optic Communication Systems; John Wiley & Sons; Inc., 3ª Ed., 2002.
- [2] Recomendação ITU-T G694.1: Spectral Grids for WDM Applications: DWDM frequency Grid (06/2002).
- [3] Gerstel, O. et al.; Elastic Optical Networking: A New Dawn for the Optical Layer?; IEEE Communications Magazine, v. 50, n. 2, p. s12-s20, Feb. 2012.
- [4] 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, Apr. 2011.
- [5] Christodouloupoulos, K.; Tomkos, I.; Varvarigos, E.; Elastic bandwidth allocation in flexible OFDM – based optical networks; IEEE J. Lightw. Technol. 29 (9); 2011; 1354 – 1366.
- [6] Archambault, E.; Alloune, N.; Furdek, M.; Xu, Z.; Tremblay, C.; Muhammad, A.; Chen, J.; Wosinska, L.; Littlewood, P.; Bélanger, M. P.; Routing and Spectrum Assignment in Elastic Filterless Optical Networks; Article in IEEE/ACM Trans. on Networking; March 2016.
- [7] Abkenar, F. S.; Rahbar A. G.; Study and Analysis of Routing and Spectrum Allocation (RSA) and Routing, Modulation and Spectrum Allocation (RMSA) Algorithms in Elastic Optical Networks (EONs); Optical Switching and Networking 23 (2017) 5–39.
- [8] Gong, L.; Zhou, X.; Lu, W.; Zhu Z.; A Two-Population Based Evolutionary Approach for Optimizing Routing, Modulation and Spectrum Assignments (RMSA) in O-OFDM Networks; IEEE COMMUNICATIONS LETTERS, VOL. 16, NO. 9, Sept. 2012.



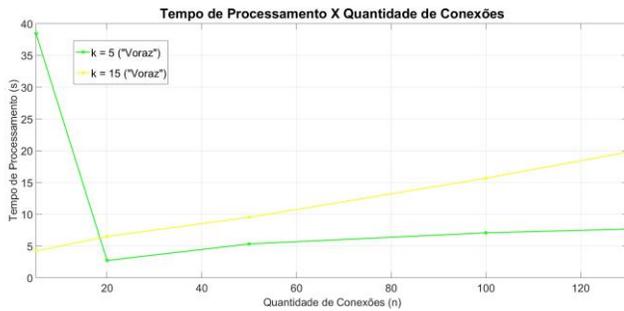
(a)



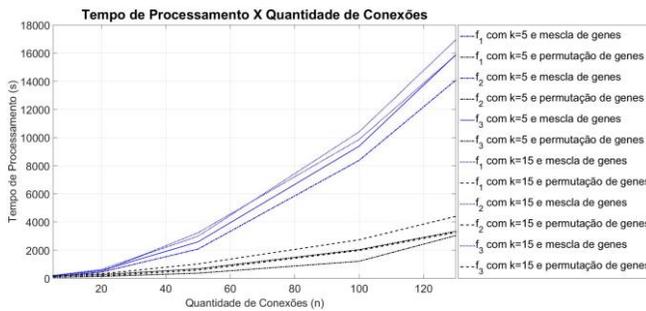
(b)

Fig. 11. Quantidade de demandas atendidas para a NSFNET pelo critério MSF utilizando (a) algoritmo voraz e (b) GA.

A Fig. 12 compara os tempos de processamento. Verifica-se novamente que o GA requer um tempo de processamento razoável, mas obtém resultados muito melhores que o algoritmo voraz. Torna-se notório o impacto que k (a quantidade possível de rotas para cada conexão) tem no tempo de processamento do algoritmo.



(a)



(b)

Fig. 12. Tempo total de processamento (em segundos) quando se aumenta a quantidade de conexões simultâneas na NSFNET utilizando (a) algoritmo voraz e (b) GA.

- [9] Zhou, X.; Lu, L.; Gong, L.; Zhu, Z.; Dynamic RMSA in Elastic Optical Networks with an Adaptive Genetic Algorithm; Globecom 2012 – Optical Networks and Systems Symposium; 2012 IEEE.
- [10] Lohani, V.; Sharma, A.; Singh, Y. N.; Routing, Modulation and Spectrum Assignment using an AI based Algorithm; 2019 11th International Conference on Communication Systems & Networks (COMSNETS); 2019 IEEE.
- [11] 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 Telecom., Szachowa, Str., Warsaw, Poland.
- [12] Batista, C.; Teixeira, D.; Coelho, T.; Araújo, J.; Static-Traffic Routing and Wavelength Assignment in Transparent WDM Networks Using Genetic Algorithm; IFIP LANC 2018 - Session 2: Network Management - ISBN: 978-1-4503-5922-1; São Paulo, Brazil, Oct. 3-4, 2018.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Li, Y., et al.: Flexible grid label format in wavelength switched optical network; IETF RFC Draft (Jul. 2011).
- [16] Dijkstra, E. W.; A Note on Two Problems in Connection with Graphs; Numerische Mathematik 1; 269-271; 1959.
- [17] Yen, J. Y.; Finding the k Shortest Loopless Paths in a Network; Management Science; Vol. 17, N°. 11, July, 1971.
- [18] Cormen, T.H.; Leiserson, C.E.; Rivest, R.L.; Stein, C.; Algoritmos, teoria e prática; Ed. Campus, Rio de Janeiro, 2002. ISBN 85-352-0926-3.
- [19] Holland, J.H. (1975); Adaptation in Natural and Artificial Systems; University of Michigan Press, Ann Arbor. (2nd Edition, MIT Press, 1992).
- [20] Klinkowski, M.; An Evolutionary Algorithm Approach for Dedicated Path Protection Problem in Elastic Optical Networks; Department of Transmission and Optical Technologies, National Institute of Telecom., Szachowa, Str., Warsaw, Poland; DEC-2011/01/D/ST7/05884.
- [21] 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 Jul. 2010.
- [22] Recomendação ITU-T G.692; Optical Interfaces for Multichannel Systems with Optical Amplifiers; approved under the WTSC Resolution No. 1; 23rd of Oct. 1998.
- [23] Chipperfield, A., et al: Genetic Algorithm TOOLBOX. For Use with MATLAB (Version 1.2) Sheffield: University of Sheffield, 1994.
- [24] 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.
- [25] Azodolmolky, S. et al.; Experimental Demonstration of an Impairment Aware Network Planning and Operation Tool for Transparent/Translucent Optical Networks; June 15, 2010.