ILP, Algoritmo Genético e Caminho Mínimo para o Roteamento e Alocação de Espectro em Redes Ópticas Elásticas e suas Probabilidades de Bloqueio

Harrison Felipe Sanches Machado
Instituto Federal do Espírito Santo - Serra
ES-010 Km-6,5 - Manguinhos, Serra - ES, 29173-087
mbbotelho23@gmail.com

Leandro Colombi Resendo
Instituto Federal do Espírito Santo - Serra
ES-010 Km-6,5 - Manguinhos, Serra - ES, 29173-087
leandro@ifes.edu.br

RESUMO

Nesse trabalho é investigada a influência que a otimização de projetos rede tem sobre a probabilidade de bloqueio de uma rede elástica. Duas abordagens de otimização foram propostas para o problema de roteamento e alocação de espectro, o ILP-RSA e o GA-RSA. Os resultados numéricos mostram a comparação entre o ILP-RSA, GA-RSA e algoritmo de caminho mínimo. Além disso, cada configuração de rede foi avaliada no framework de simulação ElasticO ++. Minimizando o número de slots para o link mais carregado, os experimentos mostram que o GA-RSA pode encontrar configurações próximas do ideal, enquanto o roteamento de caminho mais curto tende a gerar poucos links sobrecarregados, mantendo o restante da rede subutilizado. Foi observado que o caminho mais curto precisou de 31,12% a mais de slots em cada link. Como resultado inesperado, o método de roteamento do caminho mais curto apresentou os melhores resultados para a probabilidade de bloqueio.

PALAVRAS CHAVE Programação Linear Inteira, Algoritmo Genético, Roteamento e Alocação de Espectro, ElasticO ++, Rede Ótica Elástica.
Tópicos (TEL&SI)

ABSTRACT

In this work it is investigated the influence of network design optimization has on blocking probability in an elastic optical network. Two optimization approaches were proposed to routing and spectrum allocation problem in elastic optical network, ILP-RSA and GA-RSA. After to tune the GA-RSA proposed, minimizing the most loaded link, the numerical results show the comparison of network configuration for ILP-RSA, GA-RSA, and shortest path algorithm. Moreover, each network configuration obtained was evaluated, using the framework of simulation ElasticO++. Minimizing the number of slots for the most loaded link, experiments show that GA-RSA could found network design configurations close to optimal, while shortest path routing tends to generate few links overloaded keeping the remainder of network underused. In addition, shortest path needs 31,12% more frequency slots in each link to allocate the traffic matrix. As an unexpected result, shortest path routing method presented best results for blocking probability.

KEYWORDS. Integer Linear Programming, Genetic Algorithm, Routing and Spectrum Allocation, ElasticO++, Elastic Optical Network.
Paper topics (TEL&SI)

1. Introdução

A rede óptica tradicional, que utiliza tecnologia *Wavelength Division Multiplexing* (WDM), é caracterizada por dividir a largura de banda óptica em vários canais de comprimento de onda não sobrepostos, dentro de uma faixa de frequência fixa. Com esse conjunto fixo de canais, as redes que usam a arquitetura WDM geralmente precisam atribuir canais maiores do que as demandas. Assim, frequentemente a rede WDM tem canais subutilizados [Cercós et al. 2015]. Para superar as desvantagens da tecnologia WDM, uma nova arquitetura de rede óptica foi projetada e tem sido aprimorada nos últimos anos, que é denominada rede de caminho óptico elástico ou EON (do inglês *elastic optical network*) [Capucho e Resendo, 2013]. Uma EON usa a tecnologia *OFDM (do inglês Orthogonal Frequency Division Multiplexing)*, que possibilita alocar o espectro óptico de acordo com a largura de banda exigida pelos clientes [Bandiri et al. 2020]. Na tecnologia EON, o espectro óptico é dividido em pequenos slots de frequência. Assim, cada demanda de conexão pode solicitar um conjunto de slots, que podem formar um subcanal (uma fatia, por exemplo) ou um supercanal (usando 16 fatias, por exemplo).

Análogo às redes ópticas WDM, na EON também é necessário otimizar o uso de recursos, portanto, o problema de RSA (do inglês *Routing and Spectrum Allocation*) tem sido investigado por diversos trabalhos. RSA é definido quando, dada uma topologia de rede óptica elástica e um conjunto de demandas de tráfego, é necessário encontrar uma rota para cada demanda de tráfego e alocar um número de slots de espectro necessários, de forma que a utilização do espectro seja otimizada [Datta e Reddy 2020]. Além disso, quando RSA trata da atribuição do formato de modulação é definido o Problema de RMSA (do inglês *Routing, Modulation and Spectrum Allocation*) [Abkenar e Rahbar 2016][Resendo 2015].

Com uma extensa pesquisa sobre o problema de RSA [Chatterjee, Sarma e Oki 2015] investigaram abordagens incluindo seus prós e contras. No trabalho foram apresentados vários aspectos, como fragmentação, modulação, qualidade de transmissão, preparação de tráfego, capacidade de sobrevivência, economia de energia e custo de redes relacionadas ao RSA. Além disso, o artigo explora as demonstrações experimentais das funcionalidades de uma rede óptica elástica. Comparando RSA e RMSA, [Abkenar e Akbar 2016] apresentaram os principais algoritmos para otimizar esses problemas, considerando diferentes funções objetivo e restrições. Em geral, o trabalho investiga algoritmos para otimizar problemas de projeto de rede ópticas, separando os métodos em duas categorias: (1) algoritmos que suportam tráfego estático, para projeto de rede; e (2) algoritmos que suportam tráfego dinâmico.

Para um cenário de tráfego estático, os algoritmos são divididos em dois métodos; abordagens exatas, como programação linear inteira (*integer linear programming* - ILP), e heurísticas, como algoritmo genético, colônia de formigas e outras [Capucho e Resendo 2013]. A principal função objetivo dos algoritmos, encontrados na literatura, em um cenário de tráfego estático é a minimização do número de slots de frequência, porém outras métricas e características do problema podem ser encontradas. Por exemplo, [Datta et al. 2020] investigaram as demandas de tráfego *multicast* em EON, comparando a abordagem da árvore de Steiner para RSA com o roteamento baseado em árvore do caminho mais curto e alocação de espectro. Investigando proteção dedicada para redes ópticas flexíveis, [Xavier et al. 2017] propuseram um SCCSP (do inglês *Spectrum Continuity and Contiguity based Shortest Path)*, que escolhe o par de rotas de acordo com a continuidade e contiguidade do espectro fim-a-fim. O método propõe rotas de enlaces disjuntos para o mecanismo de proteção oferecendo capacidade de sobrevivência de falha de link. Procurando reduzir o consumo de energia, [Bandiri et al. 2020] apresentaram os métodos denominados Modulação e Codificação Adaptativa, que minimizam o consumo de energia mantendo como restrições qualidade de Serviço e Transmissão.

Levando em consideração o tráfego dinâmico, [Xiong et al, 2019] propôs um método de aprendizado de máquina para economia de energia em redes ópticas elásticas. Os autores usam um algoritmo de aprendizado de máquina para prever a carga de tráfego nos caminhos ópticos e reconstruir um modelo de energia considerando componentes de consumo em toda a rede, de modo

a reduzir o consumo de energia. No problema RSA para EON, as conexões são dinamicamente configuradas e interrompidas, o que causa a fragmentação do espectro. Portanto, podem ser encontrados trabalhos investigando o Problema de Fragmentação de Espectro em EON. Em [Yousefi et al. 2019] foram propostos seis algoritmos para lidar com o problema de fragmentação e melhorar a probabilidade de bloqueio. Nesses métodos, uma demanda de conexão é dividida em vários tamanhos para ser configurada em várias rotas. Ao fornecer essa oportunidade na alocação e atribuição de espectro, a probabilidade de bloqueio de conexão é reduzida.

Comumente, os trabalhos que lidam com matrizes de tráfego estáticas propõem abordagens para o projeto de redes que buscam minimizar o uso de recursos da rede. No entanto, devido ao escopo, tais trabalhos costumam negligenciar o impacto do projeto de rede em um cenário dinâmico. Por outro lado, trabalhos que investigam cenários dinâmicos usualmente desconsideram o projeto da rede.

Com uma solução de compromisso entre esses dois cenários de rede, estático e dinâmico, este trabalho propõe uma investigação sobre a influência da estratégia de roteamento de tráfego, gerada por uma abordagem de projeto de rede, na probabilidade de bloqueio. Como estratégia de projeto de rede foi proposto um modelo ILP (ILP-RSA) e um algoritmo genético (GA-RSA) para obter o esquema de roteamento minimizando o número de slots usados em uma rede de tráfego balanceado. Além disso, o um algoritmo de caminho mínimo é usado como referência na avaliação dos métodos. Em seguida, os três esquemas de roteamento, obtidos por uma abordagem ótima exata, uma heurística usando algoritmo genético e o caminho mínimo, foram avaliados medindo a probabilidade de bloqueio. Para avaliar cada solução de roteamento, foi modificado o módulo de roteamento do simulador de rede óptica elástica ElasticO ++ [Tessinari et al. 2016]. Os resultados numéricos mostram que ambas as abordagens de otimização propostas podem encontrar uma boa configuração de rede, mas o roteamento pelo caminho mínimo pode encontrar uma melhor probabilidade de bloqueio. No entanto, o algoritmo do caminho mais curto tende a gerar uma configuração de rede injusta, sobrecarregando poucos links e mantendo o restante da rede subutilizado.

2. Descrição do Problema

Os autores em [Jinno M et al. 2009] e [Jinno et al. 2010] descreveram os conceitos de SLICE, apresentando a arquitetura de uma rede óptica SLICE (elástica). Além disso, nesses trabalhos foram destacadas as diferenças entre as redes ópticas SLICE e WDM, considerando a arquitetura dos nós da rede, e seus tipos de transponders.

As principais restrições do problema RSA são conhecidas como restrições de continuidade e contiguidade. Na restrição de continuidade de frequência, o mesmo conjunto de slots deve ser usado ao longo do caminho para atender a uma solicitação. Além disso, a tecnologia OFDM requer que um dado caminho do espectro deve ser alocado usando sub-portadoras (slots de frequência) consecutivas no domínio do espectro, para ser efetivamente modulado [Wang, Y, 2011]. Essa restrição é chamada de contiguidade de espectro [Xavier, André V. S et al, 2017]. No problema RSA, dado um conjunto de demandas, o objetivo é encontrar caminhos ópticos ponta-a-ponta e atribuir o número solicitado de FSs (do inglês *frequency slots)*, de forma contígua [Klinkowski e Walkowiak, 2011]. Portanto, cada conexão é interpretada como um conjunto de números sequenciais de slots, que devem ser separados de qualquer outra conexão por pelo menos um slot [K. Christodoulopoulos et al, 2010] [Velasco et al, 2012]

A Figura 1 ilustra 7 demandas em uma rede bidirecional de 6 nós. Além disso, o vetor direcional entre os nós representa os slots disponíveis, indexados de 0 a 10. Esta figura mostra que as demandas devem ser alocadas em frequências na mesma posição para todo o caminho óptico, ou a demanda será bloqueada (como ocorre com a demanda de 2 a 4). As demandas bloqueadas são aquelas que não podem alcançar o nó de destino sem sobrescrever outra já alocada. Além disso, este trabalho trata da banda de guarda como mais um slot em cada solicitação, representada por um

slot cinza. Adicionalmente, a figura também apresenta as variáveis de decisão usadas no modelo proposto na Seção 3. Por exemplo, a variável $C_{1,0}^{1,3}=1$ indica que a solicitação de demanda 1 para 3 é atendida pela rota 1 e o primeiro slot para esta demanda é 0, e a variável $X_{5,2,4}=1$ indica que o slot 4 do link (5,2) está sendo usado. Além disso, observe que desconsiderando a banda de guarda seria possível atribuir a solicitação de 2 a 4. Assim, o exemplo ilustra a importância de se considerar a banda de guarda, que foi negligenciada em [Capucho e Resendo 2013].

É bem sabido que a estratégia de roteamento influencia o desempenho da rede, principalmente a probabilidade de bloqueio. Este trabalho investiga uma solução de compromisso entre esquemas de roteamento para otimizar do uso de slots de frequência e a probabilidade de bloqueio. Três métodos são analisados: um método ótimo, por um modelo ILP proposto; uma heurística, por um algoritmo genético; e o caminho mais curto. Posteriormente, a topologia, a tabela de roteamento e a matriz de tráfego são simuladas no framework ElasticO ++. Os resultados mostram o impacto da otimização de recursos de rede na probabilidade de bloqueio das demandas.

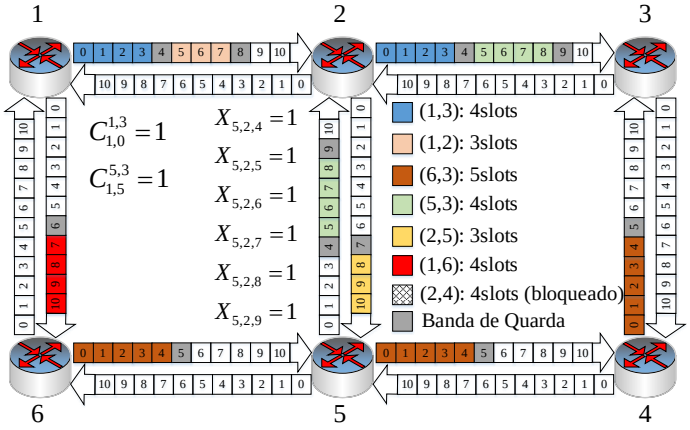


Figura 1: Rede bidirecional de 6 nós

3. Modelo de Programação Linear Inteira (ILP-RSA)

Nesta seção é detalhado o modelo matemático proposto para a obtenção do esquema de roteamento. A função objetivo utilizada foi a minimização do tráfego no enlace mais carregado, chamada de congestionamento. Este modelo foi inspirado no trabalho de [Capucho e Resendo 2013], porém no trabalho os autores negligenciaram a alocação de banda de guarda. Conforme ilustrado na Figura 1, a alocação da banda de guarda pode influenciar na atribuição das demandas. Para o modelo ILP proposto, em uma rede de topologia em malha, as solicitações da matriz de tráfego devem ser roteadas sem divisão de tráfego e sujeitas à restrição de continuidade e contiguidade.

Parâmetros

N: Conjunto de nós da rede, *s*, *d*, *i*, *j* $\in N$. Onde |*N*| é o número de nós. Além disso, *s* e *d* são usados para representar os nós de origem e destino de uma demanda, respectivamente;

F: Conjunto de slots de frequência, *k*, *f* $\in F$. Onde |*F*| é o número de slots em cada enlace;

R_{sd}: Conjunto de rotas possíveis entre os nós *s* e *d*, *r* $\in R_{sd}$;

GB: Slot usado para banda de guarda;

E[i][j]: Matriz de adjacência, representando a topologia da rede (que pode ser composta por conexões físicas e / ou lógicas);

traf[s][d]: Matriz de tráfego. É considerada uma demanda como um número de solicitação de slot de frequência, então cada demanda na matriz de tráfego é uma solicitação de uma quantidade de slot de frequência;

$\delta_{ij,r}^{sd}$**:** Indicador de caminho. É um binário que é definido como 1 se o link *ij* é usado na rota *r* para atender à demanda *sd* e zerado caso contrário. O Algoritmo de Yen [Yen, 1971] foi usado para gerar o conjunto com todos os *K* caminhos mais curtos (por saltos) entre os nós;

Variáveis

$X_{ij,k}$: é uma variável binária que indica o uso de um slot de frequência em um enlace, e é igual a 1 se o slot *k* for usado no enlace *ij* e 0 em caso contrário;

$C_{r,f}^{sd}$: é um binário, 1 se o slot de frequência *f* é o primeiro slot reservado para atender à demanda *sd* na rota *r*, e zero caso contrário.

M: Número de slots usados no enlace mais carregado;

Função Objetivo: Minimização da carga no enlace mais utilização. Essa métrica é conhecida como congestionamento e busca reduzir no número de slots usados na rede enquanto mantem o tráfego distribuído.

$$Min: M \tag{1}$$

Restrições:

$$\sum_{r\in R_{sd}}\sum_{f\in F} C_{r,f}^{sd} = 1; \quad \forall s,d \in N \tag{2}$$

A Expressão (2) garante que cada demanda terá um e apenas um "primeiro slot de frequência".

$$C_{r,f}^{sd} \le X_{ij,k}; \begin{cases} f = \{1,...,|F| - traf[s][d] - GB\}; \\ k = \{f,..., f - traf[s][d]\}; \\ \forall s,d \in N : s \ne d; r \in R_{sd}; i,j \in N : E[i][j] = 1; \end{cases} \tag{3}$$

A Expressão (3) garante que o primeiro slot, para cada demanda, não pode exceder a quantidade máxima de slots de frequência menos a quantidade de slot exigida pela demanda. Em outras palavras, devido à restrição de contiguidade de frequência, o primeiro slot não deve ser maior que a posição do slot *(N - traf[s][d] - GB*).

$$\sum_{sd\in N}\sum_{r\in R_{sd}}\sum_{f\in F} \delta_{ij,r}^{sd} \times C_{r,f}^{sd} \le X_{ij,k}; \begin{cases} \forall k \in F : k \ge f \text{ and} \\ k \le f + traf[s][d] + GB \end{cases} \tag{4}$$

A Expressão (4) atribui a quantidade de slots solicitados pela demanda nas frequências disponíveis em cada link ao longo das rotas, incluindo a banda de guarda (GB). Além disso, essa expressão garante a restrição de continuidade do slot de frequência.

$$\sum_{k\in F} X_{ij,k} \le M; \quad \forall i,j \in N : E[i][j] = 1; \tag{5}$$

A Expressão (5) garante que o número de slots usado em um enlace *ij* não deve exceder a quantidade máxima permitida.

O modelo tem $|N|^2\times|R_{sd}|\times|F| + |N|^2\times|F|$ variáveis de decisão binárias, correspondendo a $C_{r,f}^{sd}$ e $X_{ij,k}$ respectivamente, e 1 variável inteira (M). Por exemplo, a variável X_{ijk} deve indexar a combinação de cada par de nós ($|N|^2$) com cada slot de frequência ($|F|$), e então temos $|N|^2\times|F|$ variáveis. Além disso, o modelo tem $2\times|N|^2 + |N|^4\times|R_{sd}| + |F|$ restrições. Como exemplo, o número de equações da Restrição (2) depende do número de nós s e $d \in N$, portanto, esta restrição tem $|N|\times|N|$ igualdades.

4. Algoritmo Genético (GA-RSA)

Para soluções heurísticas do problema RSA, nesse trabalho é proposto um algoritmo genético. O conceito básico de um AG é a ideia de seleção natural de Darwin. Portanto, o algoritmo simula processos naturais de sobrevivência, reprodução de populações e sua capacidade de manter boas características da população, presentes em sua evolução [David Goldberg's, 1989]. Assim, após criar uma população inicial (um conjunto de soluções) alguns são selecionados para reproduzir, mesclando a característica de dois indivíduos, gerando novos elementos. Em seguida, tentando explorar características diferentes daquelas encontradas na população inicial, algumas soluções são selecionadas para alterar uma característica de forma aleatória. Este processo é chamado de mutação. Por fim, os indivíduos são selecionados, por meio de uma função de aptidão, para manter o número de soluções na população.

A) Modelo de entrada e solução

O algoritmo recebe como entrada uma topologia de rede e uma matriz de tráfego, com as demandas. Assim, o primeiro passo é gerar o conjunto de rotas possíveis para cada demanda, que são calculadas usando o algoritmo de Yen [J. Yen, 1971]. Os indivíduos são modelados por meio de uma matriz de números inteiros, onde o número k na posição sd representa o índice da rota utilizada para atender a demanda entre os nós s e d. Este valor é denominado gene sd. Portanto, a população é representada por um conjunto de matrizes.

B) População Inicial

Para iniciar o processo do algoritmo é formada uma população de α indivíduos. O melhor valor para α no problema investigado é analisado na Seção 5. O caminho mínimo é uma rota amplamente usada para economizar recursos de rede, como número de slots. Porém, uma solução utilizando apenas o caminho mais curto para cada demanda tende a gerar gargalos na rede. Para evitar esse fenômeno, 30% das demandas são selecionadas aleatoriamente para ser roteadas pelo caminho mínimo e o restante das demandas são atendidas por rotas escolhidas aleatoriamente. Essa estratégia cria uma população diversificada e com boas características.

C) Seleção de reprodutores

Para a seleção dos reprodutores foi utilizada uma seleção por torneio [David Goldberg's, 1989]. A função de aptidão utilizada é a mesma apresentada na função objetivo do modelo ILP-RSA, pelas Expressões (1) e (5). A função de aptidão avalia o melhor reprodutor em um duelo entre dois indivíduos selecionados aleatoriamente na população. Esse processo selecionará β por cento de indivíduos para o processo de cruzamento.

D) Crossover

Nesse processo, após selecionar aleatoriamente dois indivíduos, um ponto é escolhido, também aleatoriamente, para dividir a solução em duas partes. Em seguida, dois novos indivíduos terão seus cromossomos compostos pela primeira metade dos cromossomos do primeiro reprodutor e o restante pelos cromossomos do segundo reprodutor. Os novos indivíduos gerados são descendentes da população inicial e formarão uma nova geração de indivíduos. No processo de Manutenção da População, as soluções serão avaliadas e selecionadas para compor a nova geração.

E) Mutação

Neste processo, uma solução é selecionada aleatoriamente e sua característica é alterada. A mutação será feita em μ por cento da população, sendo esse parâmetro analisado na Seção 5.

F) Manutenção da População

Após o *Crossover* e a Mutação os melhores indivíduos irão compor a nova geração, mantendo o mesmo número de elementos da população inicial. O critério de parada usado no algoritmo é o número de gerações, λ. Quando o critério de parada é alcançado, o algoritmo retorna o melhor indivíduo encontrado.

5. Resultados Numéricos

Esta seção apresenta resultados dos métodos GA-RSA e ILP-RSA para três topologias de rede com 6, 8 e 10 nós, ilustradas na Figura 2. Os experimentos foram divididos em 3 partes: ajuste da heurística; comparação de abordagens de otimização, e; simulação de roteamento de rede obtida por abordagens de otimização. Os experimentos foram executados em um processador i7 de 1,99 GHz com 16 GB de RAM

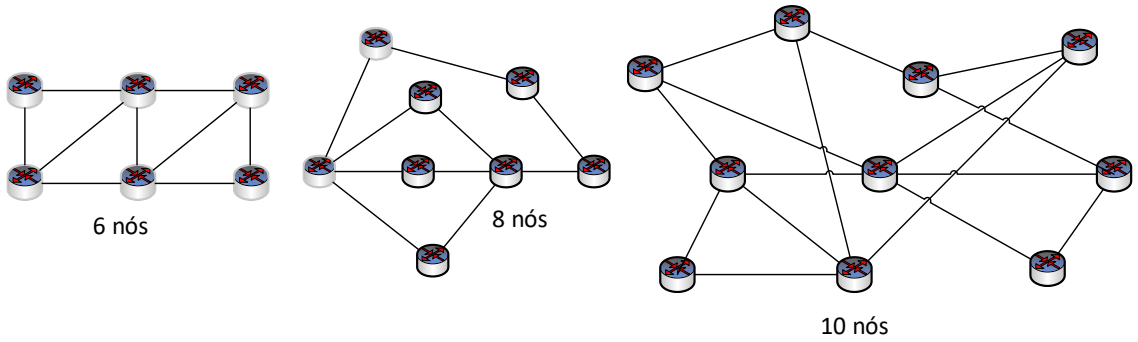


Figura 2: Redes Investigadas

5.1 Ajustes do GA-RSA

Para o ajuste dos parâmetros da heurística foram comparados diferentes tamanhos de população, probabilidade de um indivíduo sofrer mutação e número de gerações, para as três redes analisadas. Os testes para tamanho da população e mutação foram realizados com diferentes tamanhos de geração, 30, 60, 90 e 100.

A Figura 3(a)-(c) apresenta o *fitness* da população com 60, 90, 120 e 150 indivíduos, para rede com 6, 8 e 10 nós, respectivamente. Como pode ser visto na Figura 3(a), para rede de 6 nós, o tamanho de população converge após 60 gerações. Como cada número de gerações é uma nova simulação, devido à aleatoriedade do AG, de 90 para 100 gerações pode-se observar o aumento de 1 *slot* na função objetivo do experimento de 90 indivíduos. As Figuras 3(b) e (c) mostram que os resultados podem ser afetados pelo tamanho da rede, isso é causado pelo aumento da variação da solução. O GA-RSA apresentou bons resultados mesmo para experimentos de 30 gerações. Portanto, o número de indivíduos na população é mais impactante do que o número de gerações. Por exemplo, na rede de 10 nós, o número de indivíduos afeta muito a aptidão heurística, enquanto o número de gerações foi quase irrelevante para o desempenho do AG.

Levando em consideração os resultados da Figura 3 (a)-(c), foram usados 30 gerações e 150 indivíduos para o restante dos experimentos. Adicionalmente, o experimento com esses parâmetros, para a rede de 10 nós, foi executado em 148 segundos de tempo de processamento.

A Figura 3 (d) mostra os experimentos com fator de mutação, para as 3 redes analisadas. O percentual de mutação na população variou de 1 a 4 por cento, considerando 30 gerações e 150 indivíduos. Em geral, os aumentos da taxa de mutação não ajudaram a heurística a encontrar boas soluções. Por exemplo, em uma rede de 8 nós, o aumento da taxa de mutação foi diretamente proporcional ao aumento do fitness obtido pelo GA-RSA. Nas redes com 6 e 10 nós, os resultados

da heurística apresentaram comportamentos semelhantes. Portanto, para o restante dos experimentos, a taxa de mutação é fixada em 1%.

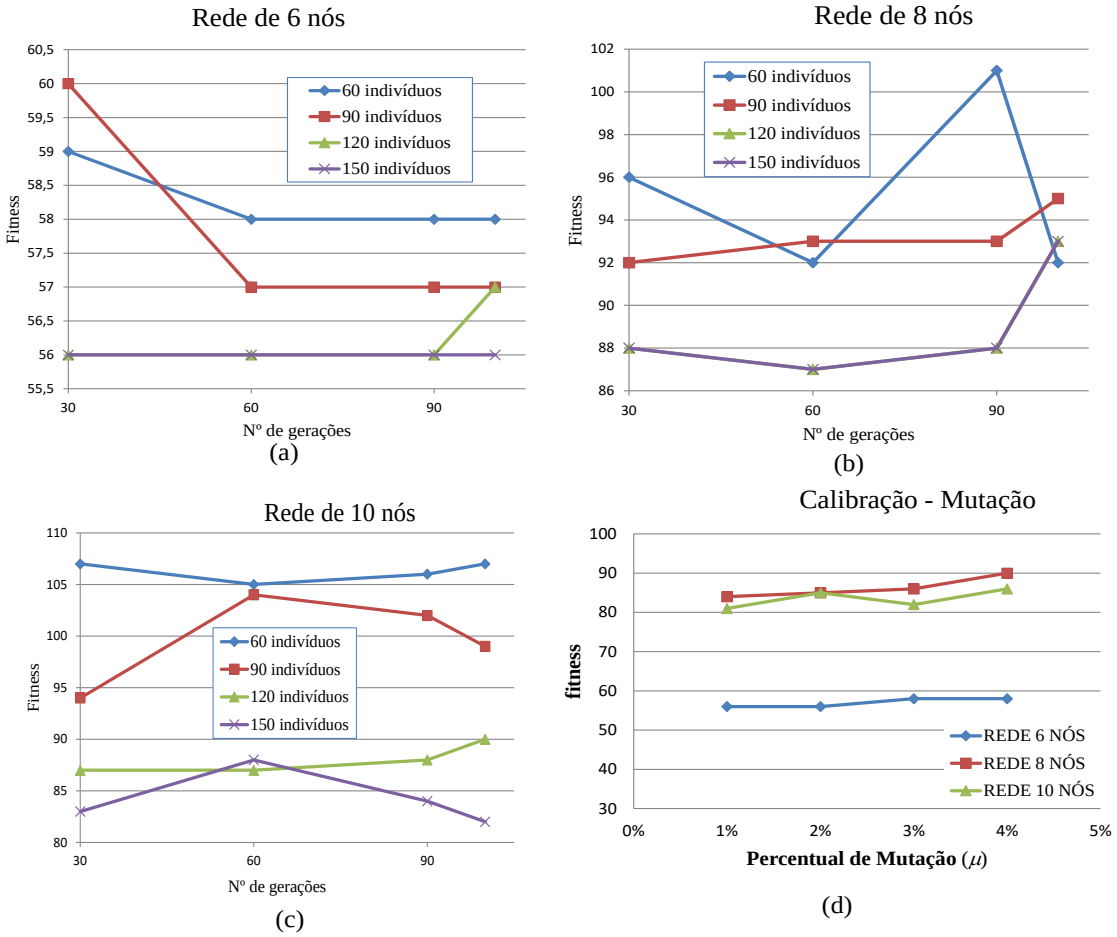


Figura 3: Calibração do tamanho da população e número de gerações da GA-RSA, para as redes de 6 (a), 8 (b) e 10 (c) nós, e a taxa de mutação (d)

5.2 Comparação entre as abordagens de otimização

Esta seção apresenta os resultados comparando os métodos ILP-RSA, GA-RSA e roteamento por caminho mínimo. Para criar a matriz de tráfego, utilizando o ElasticO ++ foram gerados 10.000 pedidos de tráfego com demanda de 40 Gb/s (requer 4 slots), 100 Gb/s (requer 8 slots), ou 400Gb/s (requer 16 slots). Em seguida, a matriz de tráfego é preenchida com a média de solicitações entre cada nó origem e destino. O Cplex Studio 12.8 foi usado para resolver a as instâncias geradas pelo modelo ILP-RSA. O limite de tempo para obtenção dos resultados ótimos foi delimitado em 2 horas e 5% foi o pior gap alcançado, na instância da rede de 10 nós, conforme apresentado na Tabela 1. Além de função objetivo (*fitness*) e do tempo de processamento, na Tabela 1 também é apresentada a média carga dos enlaces. Como esperado, o ILP-RSA obteve os melhores resultados para todas as instâncias, mesmo para rede de 10 nós, onde apresentou um gap de 5%. No entanto, o GA-RSA encontrou bons resultados, obtendo o resultado ótimo para a rede de 6 nós, e apenas 3 slots a mais no pior caso, para a rede de 10 nós. Além disso, o algoritmo de roteamento clássico de caminho mais curto encontrou 30,12% mais slots do que o GA-RSA, para rede de 10 nós. Além disso, a estratégia de caminho mais curto apresentou uma pequena carga média de links, mesmo com um *fitness* alto. Por exemplo, em uma rede de 10 nós o enlace de maior carga possuía 108 slots ocupados, enquanto a carga média dos enlaces foi de 57. Isso significa que esta solução

gerou uma configuração de roteamento com gargalo em algum enlace, mantendo outros subutilizados.

TABELA 1. COMPARAÇÃO DO *FITNESS* PARA ILP-RSA VS GA-RSA VS CAMINHO MÍNIMO

Redes	ILP-RSA				GA-RSA			Caminho mínimo	
	Fitness	**Média**	**gap**	**Tempo (seg)**	***Fitness***	**média**	**Tempo (seg)**	***Fitness***	**Média**
6	56	45,6	-	24	56	36	30	76	16
8	84	78,2	-	1060	86	70,2	106	103	35,5
10	80	69,9	5	7200	83	66	148	108	57

5.3 Simulação das configurações de rede

Nesta seção são apresentados os resultados da simulação da configuração da rede obtida pelo ILP-RSA, GA-RSA e o caminho mínimo, para as 3 redes. As solicitações de tráfego foram geradas conforme descrito na Seção 5.2. Cada capacidade de link da rede foi fixada com os resultados obtidos pelo algoritmo de caminho mais curto, sendo 76 slots para rede de 6 nós, 103 slots para rede de 8 nós e 108 slots para rede de 10 nós. Configurando a tabela de roteamento no ElasticO++, a alocação do espectro foi realizada pelo algoritmo de *first-fit*, previamente implementado neste framework.

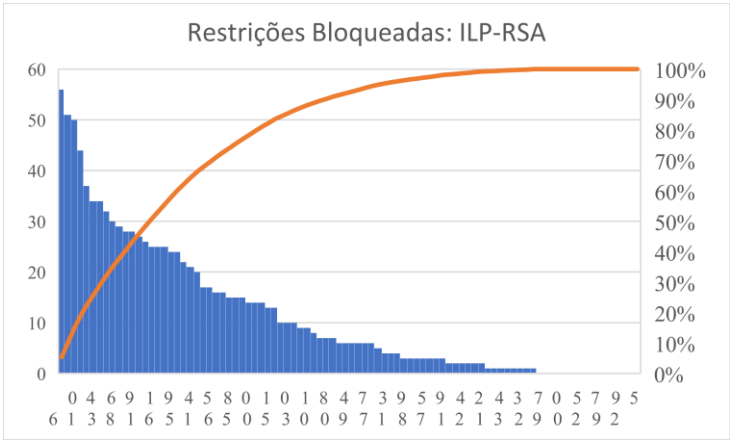
A Tabela 2 mostra os resultados da probabilidade de bloqueio encontrado pelo ElasticO++. Para cada estratégia de roteamento é apresentado o número de solicitações bloqueadas, quantas demandas foram atribuídas antes do primeiro bloqueio e a porcentagem do tráfego total (Gbps) bloqueado. Inesperadamente, o algoritmo do caminho mais curto obteve os melhores resultados de probabilidade de bloqueio para as três redes. No entanto, isso pode ser explicado pelo fato de que o roteamento pelo caminho mais curto costuma congestionar um enlace mantendo o resto da rede subutilizado, enquanto o ILP-RSA e o GA-RSA distribuem o tráfego pela rede. Como consequência, o bloqueio gerado pelo roteamento usando o caminho mais curto estará sempre no mesmo enlace, pois esta estratégia bloqueia um conjunto específico de demandas. Enquanto ILP-RSA e GA-RSA tendem a distribuir a probabilidade de bloqueio.

TABELA 2. SIMULAÇÃO DA PROBABILIDADE DE BLOQUEIO PARA ILP-RSA VS GA-RSA VS CAMINHO MÍNIMO

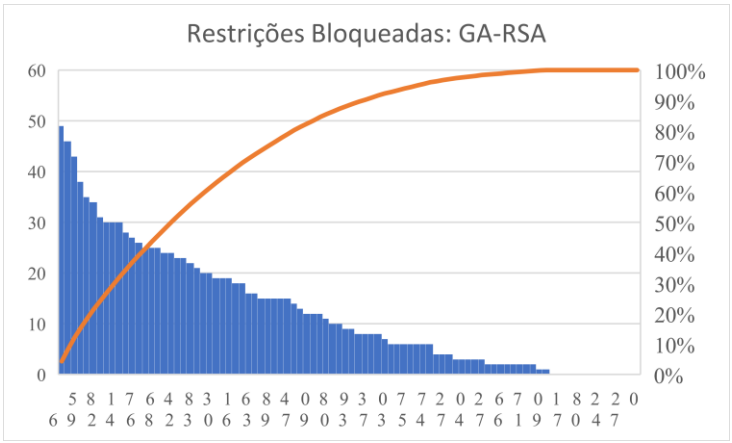
Redes	ILP-RSA			GA-RSA			Caminho Mínimo		
	bloqueio (req)	1º bloqueio	bloqueio (Gbps)	bloqueio (req)	1º bloqueio	bloqueio (Gbps)	bloqueio (req)	1º bloqueio	bloqueio (Gbps)
6	4240	79	58.64%	4235	62	60.11%	3237	85	45.94%
8	2757	129	41.09%	2995	97	45.72%	2300	158	36.79%
10	1042	277	18.22%	1019	277	18.31%	678	317	12.24 %

A Figura 4(a)-(c) apresenta, para rede de 10 nós, o Histograma de Pareto de cada requisição bloqueada obtido pelo ElasticO++ para a simulação de esquemas de roteamento gerados pelas abordagens ILP-RSA, GA-RSA e Caminho Mínimo, respectivamente. Nos três casos foram observadas demandas com alta concentração de bloqueio e outras sem bloqueio durante a simulação. Conforme mostrado na Tabela 2, a estratégia de caminho mais curto alcançou a melhor probabilidade de bloqueio. Esta estratégia ilustrada pela Figura 4(c), apresentou o dobro de demandas sem bloqueio quando comparada ao GA-RSA. Por exemplo, o GA-RSA obteve 14 demandas sem bloqueio, enquanto Caminho Mínimo obteve 34. No entanto, para o projeto de rede,

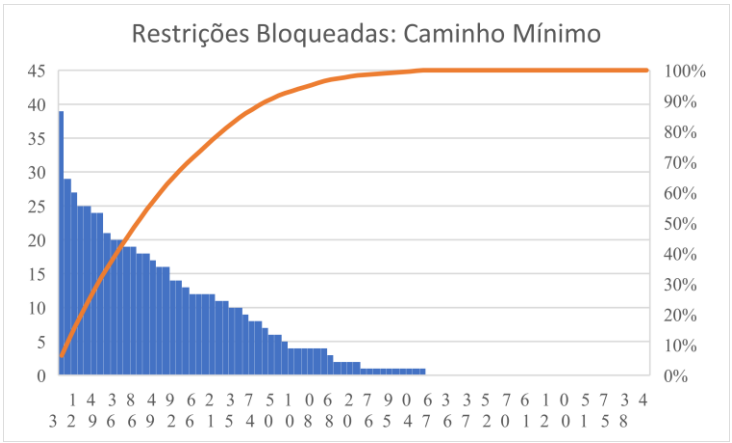
o roteamento do caminho mais curto precisa de mais slots para alocar a matriz de demandas na rede.



(a)



(b)



(c)

Figura 4. Histograma de Pareto das requisições bloqueadas.

6. Conclusões

Esse trabalho se propõe a investigar a influência de estratégias de roteamento de tráfego na probabilidade de bloqueio, em redes elásticas. As configurações de roteamento foram geradas usando três métodos de projeto de rede: abordagem de rota ideal, heurística e única. Para métodos

ótimos e heurísticos foram propostos um modelo ILP (ILP-RSA) e Algoritmo Genético (GA-RSA), e para o método de rota única foi utilizado o algoritmo do caminho mais curto. Além disso, a configuração da rede obtida por esses três métodos foi avaliada no *framework* de simulação denominado ElasticO++.

No experimento proposto, inicialmente o ElasticO ++ é utilizado para gerar a matriz de tráfego dos métodos de projeto de rede. Foram gerados 10.000 pedidos de tráfego com demanda de 40 Gb s (exigindo 4 slots), 100 Gb/s (exigindo 8 slots) ou 400 Gb/s (exigindo 16 slots). Em seguida, a matriz de tráfego é preenchida com a média de solicitações entre cada nó fonte e destino. Assim, a tabela de roteamento é calculada, pelas duas abordagens propostas, minimizando o enlace mais carregado, para ILP-RSA e GA-RSA, e o algoritmo do caminho mais curto. Finalmente, cada configuração de rede é simulada no ElasticO ++ e a probabilidade de bloqueio é analisada.
Nos resultados numéricos, três topologias de rede foram investigadas, com 6, 8 e 10 nós. Antes da comparação dos métodos de otimização, foi apresentado o ajuste dos parâmetros do GA-RSA, como número de gerações, tamanho da população e taxa de mutação. A função objetivo utilizada para ILP-RSA e GA-RSA foi a minimização do link mais carregado. Essa métrica reduz o número de slots usados na rede, enquanto mantém os links balanceados. O GA-RSA encontrou resultados próximos ao ILP-RSA, com apenas 3 slots a mais para a rede de 10 nós, o que representa um acréscimo de 3,7%. Por outro lado, o algoritmo do caminho mais curto encontrou 30,12% mais slots do que o GA-RSA, para rede de 10 nós.

Após a geração das tabelas de roteamento para essas três abordagens, cada configuração de rede foi simulada no ElasticO ++, avaliando-se a probabilidade de bloqueio. Como resultado, as soluções de caminho mais curto alcançaram os melhores resultados de probabilidade de bloqueio. No entanto, isso pode ser explicado pelo fato de que o roteamento pelo caminho mais curto costumava congestionar um link mantendo o resto da rede subutilizado. Então, essa configuração bloqueará o mesmo conjunto de demandas.

Para trabalhos futuros, propomos investigar a mudança nos métodos de projeto de rede, incluindo a restrição de *fairness*. O objetivo principal é gerar uma solução de compromisso capaz de minimizar o uso de slots mantendo uma pequena probabilidade de bloqueio, em uma distribuição uniforme.

Agradecimento

O presente trabalho foi realizado com apoio da FAPES e CAPES (PROCESSO: 2021-2S6CD, nº FAPES 132/2021) por meio do PDPG (Programa de Desenvolvimento da Pós-Graduação - Parcerias Estratégicas nos Estados).

Referências

Bandiri, S.Y.M., Pimenta, T.C., Durand, F.R. e Spadoti, D.H. (2020). Adaptive modulation allocation algorithm in elastic optical networks. *Int. J. Commun Syst*. 2020; 33:e4581. https://doi.org/10.1002/dac.4581

Chatterjee, B. C., Sarma, N. e Oki, E. (2015). Routing and Spectrum Allocation in Elastic Optical Networks: A Tutorial, *in IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 3, pp. 1776-1800, doi: 10.1109/COMST.2015.2431731.

Datta, C. P., Reddy, P.V., Chatterjee, B., Oki, E. e De, T. (2020). Performance of routing and spectrum allocation approaches for multicast traffic in elastic optical networks. *Optical Fiber Technology*. Vol 58. 102247. 10.1016/j.yofte.2020.102247.

Goldberg's, D. (1989). Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, Addison-Wesley, 1989.

Capucho, J. H. L. e Resendo, L. C. (2013). ILP model and effective genetic algorithm for routing and spectrum allocation in elastic optical networks, *International Microwave & Optoelectronics Conference* (IMOC), Rio de Janeiro, pp. 1-5, doi: 10.1109/IMOC.2013.6646487.

Jinno, M., et. al. (2010). Distance-Adaptive Spectrum Resource Allocation in Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Network, *IEEE Communication. Magazine*, Vo1.48, No.8, pp. 138-145.

Jinno, M., et. al. (2009). Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: Architecture, benefits, and enabling technologies, *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, pp. 66–73.

Yen, J. (1971). Finding the k shortest loopless path in a network, Management Science, vol. 17, pp.712-716.

Christodoulopoulos, K., Tomkos, I. e Varvarigos, E. A. (2010). Routing and Spectrum Allocation in OFDM-Based Optical Networks with Elastic Bandwidth Allocation, *IEEE Global Telecommunications Conference - GLOBECOM*, Miami, FL, pp. 1-6.

Klinkowski, M. e Walkowiak K. (2011). Routing and spectrum assignment in spectrum sliced elastic optical path network, *IEEE Comm. Lett*., vol. 15, pp. 884-886.

Resendo, E. A. (2015). Optimal approach for electronic grooming, routing and spectrum allocation in elastic optical networks, *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, Porto de Galinhas, pp. 1-5, doi: 10.1109/IMOC.2015.7369170.

Abkenar, F. S. e Rahbar, A. (2016). 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. 10.1016/j.osn.2016.08.003

S. S. Cercós, L. C. Resendo, M. R. N. Ribeiro, A. M. Fagertun E I. T. Monroy. (2015). Power-aware rationale for using coarse-grained transponders in IP-over-WDM networks, *in IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 7, no. 9, pp. 825-836, Sept. 2015.

Tessinari, R., Puype, B., Colle, D. E Garcia, A. (2016). ElasticO++: An Elastic Optical Network Simulation Framework for OMNeT++. *Optical Switching and Networking*. 22. 10.1016/j.osn.2016.07.001.

Velasco, L., Klinkowski, M., Ruiz, M. et al. (2012) Modeling the routing and spectrum allocation problem for flexgrid optical networks. *Photon Netw Commun* 24, 177–186.

Xavier, A. V. S. et al. (2017). Spectrum Continuity and Contiguity based Dedicated Protection for Flexible Optical Networks. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, 16(2), 481-493. https://doi.org/10.1590/2179-10742017v16i2857

Yousefi, F., Rahbar, A. e Yaghubi-Namaad, M. (2019). Fragmentation-Aware Algorithms for Multipath Routing and Spectrum Assignment in Elastic Optical Networks. Optical Fiber Technology. 53. 10.1016/j.yofte.2019.102019.

Wang, Y., Cao, X. e Pan, Y. (2011) A study of the routing and spectrum allocation in spectrum-sliced elastic optical path networks, *in Proc. of IEEE INFOCOM*.