

Roteamento Probabilístico Adaptativo para o *Grooming* de Tráfego em Redes Ópticas WDM

Rodrigo de Castro Teixeira Junior
Coordenadoria de Informática, Ifes - Serra
Espírito Santo - Brasil
rodrigo.c.t.j@gmail.com

Leandro Colombi Resendo
Coordenadoria de Informática, Ifes - Serra
Espírito Santo - Brasil
leandro@ifes.edu.br

Abstract—Este artigo propõem uma heurística baseada em roteamento probabilístico adaptativo (*Adaptive Probabilistic Routing - APR*) para o problema de *Grooming* de Tráfego em uma rede óptica WDM. A tomada de decisão de um roteamento adaptativo se dá através da análise das condições correntes da rede e do histórico de decisões. Para o treinamento do algoritmo é proposta uma Busca Local Probabilística Adaptativa (BLPA), que tenta minimizar o número de comprimentos de onda do enlace mais carregado. A fase de Observação consiste em analisar e selecionar as soluções que obtiveram maior redução do número de comprimentos de onda após a busca local. Escolhidas as melhores soluções, o processo de Adaptação consiste na atualização dos dados probabilísticos, correlacionando os resultados obtidos na fase de processamento com os dados atuais da rede. Adicionalmente, será apresentado um modelo de otimização exato baseado em programação linear inteira para verificar a eficiência do método proposto. Nos resultados numéricos é mostrada a convergência das funções propostas para o algoritmo e a comparação de resultados obtidos com soluções ótimas para redes com 6, 10 e 14 nós.

Palavras chave— Redes Ópticas, Busca Local Probabilística Adaptativa, *Grooming* de Tráfego.

I. INTRODUÇÃO

A popularização de serviços como *Video on Demand* (VoD), *Cloud Services*, *Data Center*, Voz sobre IP (VoIP), etc, fornecidos pelos sistemas de telecomunicações, tem aumentado cada vez mais a necessidade por recursos. Diante disso, as redes ópticas WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) têm se consolidado como tecnologia de transporte físico e multisserviço para as redes de comunicação, devido a sua grande capacidade de transmissão e a possibilidade de multiplexar vários canais de até 100Gbs em uma mesma fibra óptica. Diante da alta taxa de transmissão e a grande necessidade de processamento eletrônico, o problema de acomodar as demandas de tráfego com pequenas taxas sobre esses canais ópticos tornou-se um dos pontos cruciais para otimização do uso dessas redes. O problema de roteamento das demandas em uma rede óptica pode ser dividido em 3 sub-problemas básicos: o Projeto de Topologia Virtual (*Virtual Topology Design - VTD*), o Roteamento e Atribuição de Comprimentos de Onda (*Routing and Wavelength Assignment - RWA*) e o Agrupamentos de Tráfego (*Traffic Grooming Problem - TGP*) [1]. Nesse trabalho será considerado o roteamento, o agrupamento de tráfego e a alocação de

comprimento de onda das demandas sobre uma topologia virtual.

Devido a grande importância da configuração da rede, vários trabalhos são encontrados na literatura, buscando otimizar a utilização de comprimentos de onda em redes ópticas WDM. Os trabalhos tratando da otimização do projeto de redes ópticas podem ser divididos, basicamente, em dois tipos de tratamento: modelos exatos e métodos heurísticos. Propondo modelo exatos podemos citar os trabalhos apresentados, em [2][3] que propõem modelos de programação linear inteira (*Integer Linear Programming - ILP*) para o RWA considerando o agrupamento de tráfego na rede (TGP). Para a implementação de métodos heurísticos existem vários métodos conhecidos na literatura, onde os mais famosos, aplicados ao problema de roteamento em redes ópticas são: o algoritmo genético em [4], propondo um algoritmo evolutivo para determinar o caminho mínimo entre roteadores; o GRASP em [5], foi proposto com o objetivo de encontrar soluções para o VTD minimizando o número de caminhos ópticos.

Apesar de existir uma grande quantidade de trabalhos acadêmicos tratando da otimização de roteamento, devido à facilidade de implementação, nos dispositivos comerciais são comumente encontrados algoritmos de roteamento usando simplesmente a rota de custo mínimo [6]. Porém, para várias tecnologias de rede, como em redes ópticas WDM com possibilidade de *grooming* de tráfego, o caminho mínimo não necessariamente é uma boa solução. Diante disso, neste trabalho é proposta uma heurística baseada no roteamento probabilístico adaptativo (*Adaptive Probabilistic Routing-APR*), para a minimização do número de comprimentos de onda e balanceamento do tráfego em uma rede óptica. O *APR* é caracterizado por apresentar três etapas: Observação, que consiste em analisar o estado atual da rede; Processamento, que tem o objetivo de melhorar o estado da rede considerando as decisões já tomadas; e Adaptação que consiste na atualização dos dados probabilísticos, correlacionando os resultados obtidos na fase de processamento com os dados atuais da rede[7].

O roteamento probabilístico tem sido largamente usado em redes com o processo de roteamento tipicamente dinâmico. Como por exemplo, em processos para redução do atraso, *jitter*, ou em redes com conexões intermitentes, etc. Como exemplo do uso dessa estratégia de roteamento para redes dinâmicas, em [8] é apresentado um protocolo de roteamento para redes com tolerância a atraso. O objetivo da proposta foi desenvolver um protocolo com altas taxas de entrega de

mensagem com baixa replicação de mensagens, quando comparado com os métodos existentes. Em [9], temos uma proposta dessa estratégia para o roteamento de redes Wireless através de múltiplos caminhos.

Diferente dos trabalhos encontrados na literatura, o método aqui proposto utiliza técnicas de busca probabilística para o roteamento de demandas em um projeto de redes ópticas. Considerando uma rede WDM e uma matriz de tráfego estática, o objetivo do algoritmo aqui apresentado é encontrar uma configuração de rede que possa atender todas as requisições e minimize o número de comprimentos de onda. Para isso a estratégia de roteamento probabilístico adaptativo proposta trata essa tarefa dividindo o problema em três fases: geração de soluções, melhoria e adaptação. A primeira fase consiste na geração de soluções, sendo cada solução uma configuração da rede para o RWA. O roteamento é feito através da escolha probabilística baseada em dados do estado da rede e a alocação é realizada pela análise dos recursos da rede e da restrição de continuidade do comprimento de onda, usando o *First-Fit* como estratégia alocação do comprimento de onda. Diferente do que tem sido apresentado na literatura, a fase de melhoria das soluções é feita através de um processo de Busca Local Probabilística e Adaptativa (BLPA), a qual busca encontrar rotas que reduzam o número de canais utilizados. E por fim, a terceira fase consiste em analisar as soluções obtidas e utilizá-las para adaptar os dados probabilísticos. Adicionalmente, para análise da eficiência e comparação do método proposto é utilizado um modelo ILP, que validará a qualidade das soluções obtidas.

O restante do artigo é disposto da seguinte forma: na próxima seção são apresentadas as características do cenário de rede considerada no trabalho. Na Seção III é apresentado um modelo ILP para otimização do problema, sendo esse usado para a comprovação da eficiência do método proposto. Na Seção IV é descrito o método de roteamento proposto, *APR*. Na Seção V são apresentados os resultados numéricos obtidos pelo modelo proposto, além de comparações com o modelo exato. Na Seção VI são apresentadas as conclusões e propostas de trabalhos futuros.

II. DESCRIÇÃO DO CENÁRIO UTILIZADO

O cenário de rede investigado será uma rede óptica WDM, com canais de capacidade de até 100Gbs. O modelo proposto trabalha com configuração das rotas e a alocação de comprimento de ondas, onde as demandas são taxa de transmissão de 10, 40 ou 100 Gbs, representando as demandas da rede Carrier Ethernet sobre uma rede óptica. Nesse trabalho é considerado uma rede opaca, permitindo assim o agrupamento de tráfego através do processamento eletrônico. Por exemplo, duas demanda de 40Gbs e uma de 10Gbs podem ser agrupadas e transmitidas em um mesmo canal de 100Gbs. Porém, não será considerado o particionamento de demandas. Nesse cenário, uma matriz de demandas é acomodada sobre uma topologia física buscando minimizar o número de comprimentos de onda usados no enlace mais carregado. A minimização dessa métrica busca reduzir o consumo dos recursos, como comprimento de onda e transceptores, bem como equilibrar a distribuição de tráfego.

III. APRESENTAÇÃO DO MODELO ILP

O modelo ILP apresentado a seguir é inspirado em [2], acrescentando a este a restrição de não particionamento das demandas. Apenar de ser já ser comprovado que tal formulação gera um processo NP-Completo [3], apresentando dificuldades de escalabilidade das soluções, tal modelo será usado para comprovar a eficiência da heurística proposta nesse trabalho. A seguinte notação é usada no modelo matemático proposto:

Notação: i e j : são nós da rede ligados pelos enlaces ij e ji ; s e d : são, respectivamente, nós de origem e destino de uma demanda; e w : é o índice de um comprimento de ondas existente em um enlace;

Parâmetros: $E[i][j]$: é a matriz de adjacências, contendo as ligações da rede; N : é o número de nós da rede; W_{max} : é a quantidade máxima de comprimentos de onda suportada por um enlace da rede; $traf[s][d]$: é a matriz de demandas do problema; Cap : é a capacidade máxima de tráfego suportada por um comprimento de onda; e $\delta_{ij,w}^{sd}$: indicador dos enlaces usados em cada rota. É um parâmetro binário que assume 1 se o enlace ij está sendo usado pela rota r para atender a demanda sd , 0 caso contrário. Esse parâmetro pode ser obtido através do Algoritmo de Yen.

Variáveis: $C_{r,w}^{sd}$: representa a quantidade de tráfego da demanda sd usando, ao longo da rota r , o comprimento de onda w ; $CB_{r,w}^{sd}$: variável binária que assume 1 se a demanda sd está sendo roteada usando a rota r e comprimento de onda w ; $X_{ij,w}$: representa a quantidades de tráfego passando no comprimento de onda w do enlace ij ; e $XB_{ij,w}$: variável binária que assume 1 se o comprimento de onda w é usado no enlace ij , e 0 caso contrário; NW : representa o número máximo de comprimento de onda em um enlace.

Função Objetivo: Realizar a minimização o número de comprimentos de onda usados no enlace mais carregado.

$$Min: NW \quad (1)$$

Restrições:

$$\sum_w \sum_r C_{r,w}^{sd} = traf[s][d], \forall_{s,d} \quad (2)$$

$$\sum_s \sum_d \sum_r \delta_{ij,r}^{sd} \times C_{r,w}^{sd} = X_{ij,w}, \forall_{i,j,w} \quad (3)$$

$$Cap \times XB_{ij,w} \geq X_{ij,w}, \forall_{i,j,w} \quad (4)$$

$$Cap \times CB_{r,w}^{sd} \geq C_{r,w}^{sd}, \forall_{s,d,i,j,w} \quad (5)$$

$$\sum_w \sum_r CB_{r,w}^{sd} = 1, \forall_{s,d} \quad (6)$$

$$\sum_w XB_{ij,w} \leq NW, \forall_{i,j,w} \quad (7)$$

Descrição das restrições:

A Expressão (2) assegura que todo tráfego entre cada par sd será atendido. A restrição permite que uma demanda possa escolher entre todas as rotas e canais disponíveis.

A Expressão (3) atribui ao canal óptico o tráfego passando por ele, através da somatória das quantidades de tráfego de cada demanda e rota associada à este canal.

A Expressão (4) é usada para criar uma relação entre as variáveis $X_{ij,w}$ e $XB_{ij,w}$, e para garantir que a quantidade de tráfego em um comprimento de onda não exceda a capacidade do mesmo.

Análogo à Restrição (4) temos que a Expressão (5) é usada para relacionar as variáveis $C_{r,w}^{sd}$ e $CB_{r,w}^{sd}$.

A Expressão (6) assegura que não haverá partição da demanda de uma conexão. Isto é, soma de todas as variáveis representando a alocações de uma demanda a uma rota e comprimento de onda deve ser 1.

A Inequação (7) mostra que o número de comprimentos de onda de qualquer enlace não deve exceder a variável NW . Como NW é a variável de minimização da formulação, temos que essa expressão permite a minimização do número de comprimento de ondas do enlace mais carregado.

IV. APRESENTAÇÃO DO MODELO PROPOSTO

O APR é um processo iterativo que, dada uma rede e um conjunto de demanda, a cada iteração é utilizado o estado atual das probabilidades de roteamento e uma função de busca local para atualizar as escolhas da próxima iteração. O algoritmo utiliza 3 matrizes de probabilidades (MP) para a escolha das rotas, MP_{10} , MP_{40} e MP_{100} , contendo a probabilidade da escolha em rotas para demanda de 10Gbs, 40Gbs e 100Gbs, respectivamente. A MP é de ordem $n \times m$, onde n é o diâmetro da rede e m o número de rotas disponíveis para a escolha. Sendo assim, a linha n da matriz MP indica o número de saltos mínimo para atender a demanda, ao passo que a coluna m indica a probabilidade de escolher a rota de índice m para essa demanda.

Para exemplificar, tome a matriz MP_{10} representando as probabilidades de um demanda de 10Gbs escolher uma determinada rota. Considere uma demanda de 10Gbs onde o caminho mínimo para atendê-la possua 3 saltos. Assim, devemos olhar para a 3ª linha da MP_{10} . Considere ainda que as rotas estejam indexadas em ordem crescente. Por exemplo, o número na posição $MP_{10}[3][1]$ indica a probabilidade de esta demanda escolher a primeira rota do conjunto, sendo assim o número na posição $MP_{10}[3][2]$ indica a probabilidade desta demanda escolher a segunda rota do conjunto, assim sucessivamente.

No estado inicial do algoritmo todas as rotas são equiprováveis. Porém, ao longo das iterações, com os processos de melhoria por busca local e atualização das matrizes, é esperado que as rotas de menor índice aumentem a probabilidade de ser escolhidas enquanto as de maior índices tenham suas probabilidades reduzidas.

Na Fig. 1 é mostrado um diagrama com o funcionamento básico do algoritmo proposto. Inicialmente os dados da rede, topologia e matriz de tráfego, são carregadas e as matrizes de probabilidade, equiprováveis, são criadas. No início da fase de Processamento são geradas α soluções, roteando e alocado as demandas da rede. Por se tratar de um algoritmo não determinístico, tem-se que para cada demanda o roteamento é feito aleatoriamente respeitando as probabilidades da MP para a escolha da rota. Após a etapa de geração de soluções, são selecionadas 100 soluções (configurações da rede) que obtiveram menor ocupação para o processo de BLPA, a qual é responsável por um processo de melhoramento, onde para cada demanda de uma solução busca-se uma nova rota, caso essa rota reduza o número de comprimentos de onda ela se torna a rota escolhida, caso não, a rota anterior é mantida. Assim, serão escolhidas as soluções que obtiveram menor número de comprimentos de onda. Após β execuções da BLPA, a fase de Observação analisa as 50 soluções que obtiveram melhor minimização do número de comprimentos de onda e as seleciona para a fase de Adaptação. Essa última fase é responsável pelo processo de realimentação do algoritmo, em que a matriz de probabilidade é atualizada usando os dados obtidos pela BLPA.

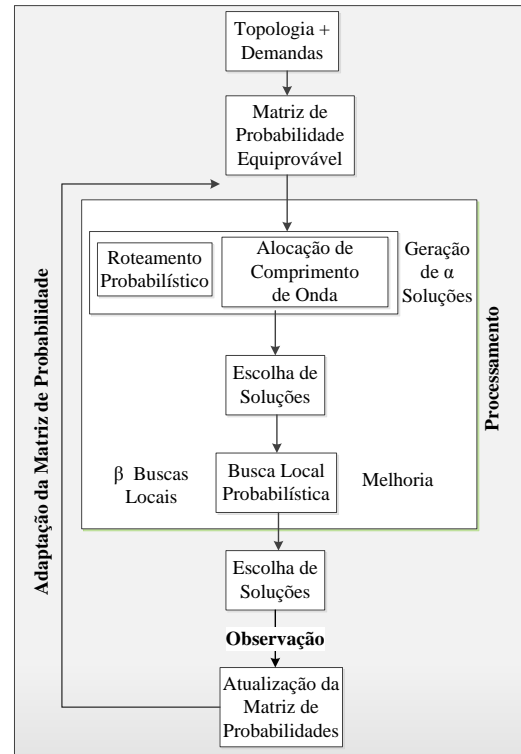


Fig. 1. Diagrama do APR

A. Alocação de Comprimento de Onda

O processo de atribuir comprimento de onda de uma demanda leva em consideração a rota escolhida probabilisticamente e a disponibilidade dos comprimentos de onda ao longo da rota. Assim, a escolha da rota segue o processo probabilístico, enquanto a alocação de comprimento de onda usa a estratégia *First-Fit*.

Na Fig. 2 é ilustrado a arquitetura da rede considerada e o processo de alocação de comprimento de onda. Nessa figura é mostrado o estado de dois enlaces de uma rede, onde cada enlace tem três comprimentos de onda com capacidade máxima de 100Gbs. Note que são ilustradas algumas inserções e retiradas de demandas no nó j , como por exemplo, a retirada de uma demanda de 100Gbs no canal W0 e a inserção de duas demandas de 40Gbs no mesmo canal. Para o entendimento do algoritmo de alocação de comprimento de onda usado, considere a solicitação de uma nova demanda de 40Gbs do nó i para l , passando pela rota $i-j-l$. O algoritmo buscará o primeiro comprimento de onda disponível ao longo de toda rota. No primeiro enlace, (i,j) , o comprimento de onda (W0) está totalmente ocupado, impossibilitando alocação desta nova demanda. O comprimento de onda (W1) ainda suportaria essa demanda, porém o segundo enlace, (j,l) , está com ocupação de 90Gbs, não permitindo a inserção de uma demanda de 40Gbs. O canal W2 está disponível tanto no primeiro enlace (i,j) quanto no segundo (j,l) . Sendo assim, a demanda será alocada no comprimento de onda (W2).

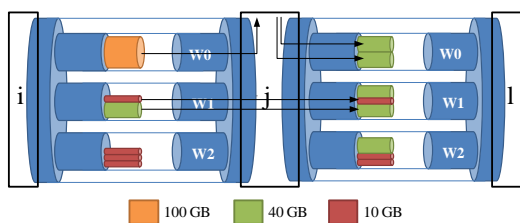


Fig. 2. Estado dos Enlaces

B. Busca Local Probabilística Adaptativa (BLPA)

Após a alocação de todas as demandas requisitadas pela matriz de tráfego o processo BLPA buscará novas rotas que minimizem o número de comprimentos de onda. O processo da BLPA consiste em percorrer todas as demandas tentando realocando-as, de forma que a nova rota é escolhida probabilisticamente através das matrizes MP_{10} , MP_{40} ou MP_{100} . Essa nova configuração é comparada com a antiga, e aquela que tiver o melhor resultado será considerada como a configuração atual da rede. A vantagem de se utilizar um algoritmo probabilístico de busca é que ele reduz as possibilidades das soluções ficarem presas em mínimos locais, visto que sua vizinhança é estocástica em vez de determinística.

C. Atualização da Matriz de Probabilidade

A fase de adaptação do algoritmo proposto consiste basicamente na atualização sistemática das matrizes de probabilidades, MP_{10} , MP_{40} e MP_{100} . Após a melhoria das configurações das demandas utilizando o BLPA inicia-se um processo de atualização das matrizes de probabilidades. Para essa etapa do desenvolvimento, novas matrizes são criadas extraindo as probabilidades de roteamento dos melhores cenários de rede obtidos pela BLPA. Após isso, as matrizes antigas são atualizadas recebendo a média aritmética entre seus elementos e os das novas matrizes. Esse processo foi pensado de modo a ser realizado até a convergência do método ou até atingir um número fixo de iterações. Porém,

com os testes realizados foi observado que com 10 iterações o algoritmo já alcança a solução ótima, como apresentado na Seção V – B.

V.RESULTADOS NUMÉRICOS

A análise dos resultados numéricos foi feita em duas etapas. Primeiramente é apresentado um ajuste da escolha dos parâmetros envolvidos. E para demonstrar a eficiência da heurística os resultados da heurística são comparados com resultados obtidos pelo modelo ILP, para redes de 6, 10 e 14 nós.

Para o ajuste dos parâmetros α e β foi utilizada uma rede de 10 nós com uma matriz de tráfego cheia, isto é, com demanda entre todos os pares de nós.

A. Avaliação dos Parâmetros

Nessa seção serão analisados os parâmetros da heurística tomando como objetivo obter soluções com o menor número de comprimentos de onda utilizado. A Fig. 3 apresenta os resultados das Melhores Soluções Encontradas obtidas pelo processo de formação das soluções iniciais de acordo com a variação do número de soluções α sem busca local.

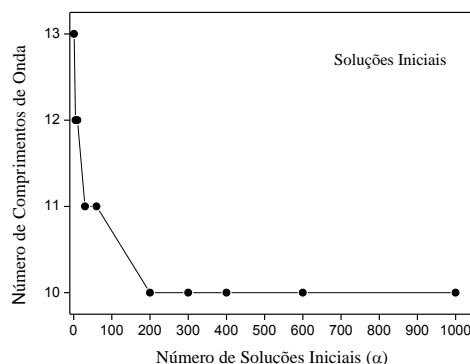


Fig. 3. Análise do número de Soluções Iniciais

Como já esperado, a qualidade das soluções aumenta à medida que o número α de soluções cresce. Isso ocorre ao fato de que quanto maior o número de soluções, maior também a possibilidade de haver soluções de melhor qualidade. Contudo, é observado que a partir de 200 soluções iniciais a qualidade das soluções tende a estabilizar. Assim, para os testes de eficiência o parâmetro α foi configurado para gerar 300 soluções iniciais.

Os dados apresentados na Fig.4 explicitam a escolha do parâmetro β . Para isso é investigado a qualidade de uma única solução conforme a variação do número de execuções da BLPA (β). Na Fig. 4 é observado que a qualidade da solução aumenta à medida que o número de buscas locais também aumenta. Isso se dá ao fato de que com um maior número de buscas locais, a procura por rotas que reduzam o número de canais é maior, acarretando na substituição de alocações de baixa qualidade por de melhor qualidade. Entretanto, a qualidade da solução tende a estabilizar a partir da 17ª

execução da BLPA, sendo assim para a comparação da eficiência da heurística β foi configurada como 30.

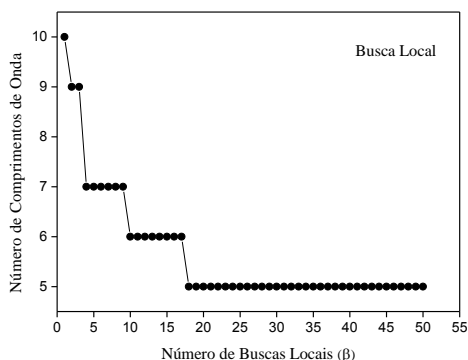


Fig. 4. Análise da execução das Buscas Locais.

B. Comparação para Análise de Eficiência

Como mencionado os resultados obtidos pelo APR foram comparados com os obtidos e pelo modelo ILP, utilizando como função objetivo a minimização do número de comprimentos de onda no enlace mais carregado. Foi possível observar que o método proposto obteve a solução ótima em todos os casos estudados (redes com 6, 10 e 14 nós). Adicionalmente, para a NSF-Net (14 nós) o algoritmo proposto obteve o resultado ótimo em um tempo de execução de 13 segundos, enquanto o modelo ILP obteve o mesmo resultado em 195 segundos.

VI. CONCLUSÕES

Nesse trabalho foi proposta uma heurística baseada nas idéias de roteamento probabilístico adaptativo (APR) para o problema da acomodação das demandas de 10, 40 e 100Gbs, provenientes de clientes Carrier Ethernet, sobre uma rede óptica WDM com capacidade de 100Gbs por canal, onde buscou-se minimizar o número de comprimentos de onda no enlace mais carregado. Duas características são destacadas como diferencial no método proposto: uma Busca Local Probabilística Adaptativa (BLPA) e a atualização (aprendizado) das matrizes de probabilidade de escolha de rotas. Assim, dado a habilidade do algoritmo reconhecer o estado atual da rede e utilizar informações de decisões anteriores, o mesmo pode ser classificado com roteamento adaptativo.

Os experimentos foram feitos para 3 topologias de rede, com 6, 10 e 14 nós, e divididos em duas etapas. Primeiramente, foi realizada uma análise de todos os parâmetros envolvidos no processo, e após esse ajuste é

apresentado uma comparação com um método para encontrar soluções ótimas, modelo ILP. Apesar do algoritmo aqui proposto não garantir a otimalidade das soluções, os resultados obtidos foram satisfatórios, pois em todos os cenários de teste foi possível obter o resultado ótimo. Destacamos ainda que o tempo de execução do algoritmo proposto foi aproximadamente 15 vezes menor que o tempo gasto pelo modelo ILP. Sendo capaz de tratar instâncias maiores, enquanto o modelo ILP possui limitações de escalabilidade. Para trabalhos futuros, pretende-se aproveitar a característica adaptativa no método proposto e sua rápida curva de convergência para experimento em cenários com redes dinâmicas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro dado pelo Núcleo Incubador Serra para participação no congresso – 1st Countries Congress (BRICS-CCI) and 11th Brazilian Congress (CBIC) on Computational Intelligence.

REFERÊNCIAS

- [1] R. Dutta, G. Rouskas, *Traffic grooming in WDM networks: past and future*, IEEE Network, [S.l.], p.46–56, Nov/Dec, 2002.
- [2] L.C. Resendo, L. C. Calmon e M.R.N., *Simple ILP Approaches to Grooming, Routing, and Wavelength Assignment in WDM Mesh Networks*. In: IMOC, 2005, Brasilia. Microwave and Optoelectronics, SBMO/IEEE MTT-S International Conference, 2005. p. 616-619.
- [3] P. Wan, G. Calinescu e O. Frieder, *Grooming of Arbitrary Traffic in SONET/SDH BLSRs*. Selected Areas in Communications, [S.l.], v.18, n.10,p.1995–2003, Oct, 2000.
- [4] S.A. Araújo, A. F. Librantz, W. A. Alves, *Uso de Algoritmo Genético em problemas de roteamento em redes de computadores*. In: Exacta, São Paulo, v. 5,n. 2, p. 321-327,jul/dez. 2007.
- [5] M. Brunato e R. Battiti, *A multistart randomized greedy algorithm for traffic grooming on mesh logical topologies*, Conference on Optical Network Design and Modelling, pp. 417- 430. 2002.
- [6] N. Han; D. Grace e L. Yiming. *Cognitive Routing for Wireless AdHoc Networks*. Department of Electronics, University of York. October 2007.
- [7] R.W. Thomas, L.A. Dasilva e A.B. Mackenzie, *Cognitive Network*. In: Baltimore, MD, USA. New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks , p. 352-360, 8-11 Nov. 2005.
- [8] R. Jathar, e A. Gupta, *Probabilistic routing using contact sequencing in delay tolerant networks*, Second International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS), p.1-10, Jan. 2010.
- [9] Y. Cui, et. al., *Probabilistic Routing for Multiple Flows in Wireless Multi-hop Networks*, IEEE 34th Conference on Local Computer Networks (LCN 2009), Zürich, Switzerland; 20-23 October 2009.