



## Um algoritmo baseado em *Iterated Local Search* para Problema de Alocação de Rota e Espectro

Renê P. Gusmão, Lucídio A. F. Cabral, Iguatemi E. Fonsêca

Centro de Informática - Universidade Federal da Paraíba (UFPB)

Caixa Postal 58.051-900 – João Pessoa – PB - Brazil

renepgusmao@gmail.com, {lucidio, iguatemil}@ci.ufpb.br

### RESUMO

O problema de roteamento e alocação de rota (RSA) em redes ópticas elásticas é um problema similar ao problema de roteamento e alocação de comprimentos de onda, este último sendo característico em redes ópticas roteadas em comprimentos de onda. O problema RSA tem como objetivo atribuir a menor quantidade de recursos de uma rede óptica elástica de tal forma que consiga atender ao máximo número de demandas definidas na matriz de tráfego cliente. Este trabalho apresenta um algoritmo baseado na metaheurística *Iterated Local Search* (ILS), que utiliza um modelo matemático na fase de busca local. Os resultados demonstraram que o algoritmo consegue ser eficiente e competitivo, apresentando soluções de boa qualidade em um tempo computacional aceitável e até menor que os resultados apresentados pelos modelos exatos. **PALAVRAS CHAVE. Problema RSA, Iterated Local Search, Redes Ópticas Elásticas.**

### ABSTRACT

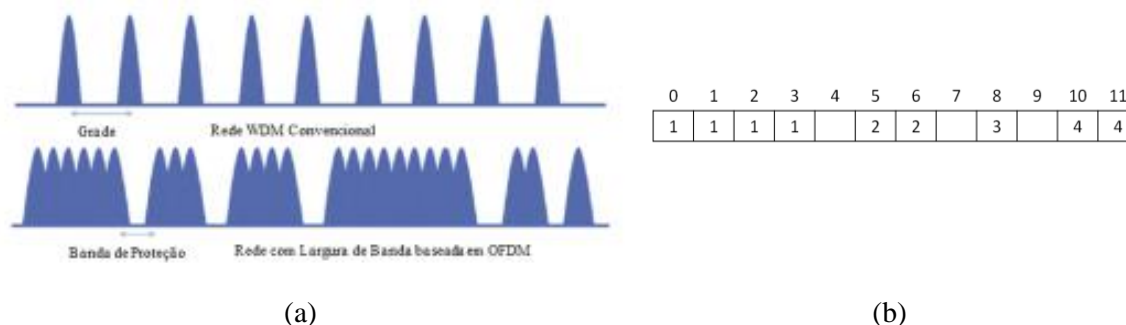
The routing and spectrum allocation (RSA) problem in elastic optical networks is similar to the routing and wavelength assignment problem, this last being characteristic in wavelength-routed optical networks. The RSA problem aims at to allocate the least amount of resources to elastic optical network to meet the maximum number of demands defined in customer traffic matrix. This work proposes an algorithm based on metaheuristic *Iterated Local Search* (ILS), which uses one mathematical model in the local search phase. The results showed that the algorithm is competitive and that, in some scenarios, presenting good quality solutions in an acceptable computational time and even lower than the results presented by exact models.

**KEYWORDS. RSA Problem, Iterated Local Search, Elastic Optical Networks.**

## 1. Introdução

Os sistemas de comunicação ópticos têm várias características de destaque, estão entre elas: a baixa perda de transmissão e alta largura de banda disponível (Norouzi, 2011). As redes ópticas roteadas a comprimento de onda (WRN – *Wavelength-routed Optical Networks*) utilizam a técnica WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) e uma alocação de frequência de tamanho fixo (capacidade) por comprimento de onda. Cada comprimento de onda em uma rede WDM é separado de outro comprimento adjacente por uma banda de guarda, esta serve para garantir a qualidade do sinal e a filtragem necessária nos receptores [Santos et al. 2012].

Uma conexão de uma rede óptica WRN necessita que sejam definidos caminhos pelos quais o tráfego será encaminhado e que os recursos necessários para esta conexão sejam alocados. Esse processo é conhecido como problema de alocação de rota e comprimento de onda (RWA – *Routing and Wavelength Assignment*). A abordagem WRN-WDM apresenta algumas desvantagens relacionadas à granularidade e pouca flexibilidade, atribuindo bandas de tamanho fixo e com alta taxa de transmissão por canal [Santos et al. 2012]. Outra forma de utilizar os recursos ópticos é apresentada pela arquitetura SLICE (*Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Network*) ou elástica que é baseada no sistema de transmissão OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) [Wang 2011a].



**Figura 1. Alocação de espectro em redes ópticas.**

A arquitetura SLICE propõe um método flexível de alocação de espectro para redes ópticas WDM. Esse método demonstra que uma alocação de espectro com espaçamentos diferentes entre os canais é mais eficiente que o método tradicional (Wang, 2011). Em redes SLICE surge o problema RSA (*Routing and Spectrum Allocation*), este sendo similar ao problema RWA. O problema RSA pode ser classificado em duas principais versões: RSA *off-line*, em que a demanda de tráfego é previamente conhecida, e RSA *online*, em que a demanda de tráfego varia em função do tempo e é comumente modelada como uma variável aleatória seguindo uma dada distribuição de probabilidade [Mukherjee, 2006].

A Figura 1a apresenta como a alocação de espectro é feita tanto em redes WRN-WDM quanto em redes ópticas elásticas baseadas em OFDM. A Figura 1b ilustra um enlace representado por um vetor de *slots* de tamanhos constantes de espectro, o qual pode alocar diversas conexões que utilizem aquele enlace nas rotas escolhidas para cada conexão. Bandas de proteção (*guardbands*), cada uma consistindo de  $G$  sub-portadoras, são necessárias para separar diferentes conexões alocadas no espectro. O uso de bandas de proteção permite fazer a distinção entre diferentes conexões no nó de destino e, ainda, possibilita que a rede cliente receba a informação com qualidade de sinal requerida para cada aplicação cliente.

No RSA, cada demanda de tráfego precisa de uma quantidade de espectro a ser alocada (ou sub-portadoras). O RSA apresenta duas restrições relacionadas à alocação de espectro: continuidade e contiguidade. Primeiro, uma sub-portadora alocada deve possuir continuidade, ou seja, ser a mesma em todos os enlaces da rota selecionada para cada demanda. Segundo, as sub-portadoras de um caminho óptico devem ser consecutivas, ou seja, os *slots* de frequência atribuídos a uma conexão devem ser contíguos no espectro ao longo dos enlaces em sua rota. O

problema RSA foi provado ser NP-Completo e requer métodos eficientes para a resolução do problema [Velasco et al. 2012].

Velasco et al. (2012) apresentam alguns modelos já conhecidos do problema e propõem um novo modelo, este utiliza conjuntos de canais pré-computados. Esta estratégia diminui a complexidade do modelo do problema, pois retira do modelo todas as restrições relacionadas à contiguidade. Além disso, também são propostos modelos que fazem uso de relaxação de restrições. Para analisar os modelos são utilizadas quatro topologias de rede variando o número de caminhos ópticos para cada demanda, o tamanho da matriz de demandas e o tamanho do espectro óptico disponível (número de *slots* por enlace).

Em Christodoulopoulos et al. (2011), é adicionado mais um grau de dificuldade ao problema, pois, além de alocar espectro e definir a rota, também é necessário definir o nível de modulação utilizada pelo transmissor óptico. Além disso, é apresentado um método de decomposição do problema, o qual divide o problema no subproblema de roteamento e nível de modulação e no subproblema de alocação de espectro. Por fim, os autores utilizam duas heurísticas e a metaheurística *Simulated Annealing* para implementar políticas de ordenação das demandas, pois a sequência em que as demandas são servidas tem impacto na eficiência espectral.

Em Vizcaíno et al. (2012), os autores comparam o desempenho de uma rede baseada em OFDM com uma rede de grade rígida baseada em WDM. A partir dos valores de consumo de energia dos elementos da rede, algoritmos heurísticos informados da energia são propostos para alocação de recursos nos cenários estático e dinâmico.

Em Wang et al. (2011a), o problema é modelado utilizando um conjunto de formulações ILP a fim de atingir diferentes objetivos de otimização. Também são propostas novas abordagens para analisar os limites inferiores e superiores para o número de sub-portadoras em uma rede *SLICE*. Duas heurísticas são utilizadas para tratar redes *SLICE* de maior dimensão, são elas: Menor Caminho com Máximo Reuso (*Shortest Path with Maximum Reuse*) e Alocação de Espectro com Carga Balanceada (*Balanced Load Spectrum Allocation*).

Em Santos et al. (2012), os autores propõem uma formulação em que o objetivo é minimizar o número de sub-portadoras nos enlaces físicos. Além disso, são propostas as heurísticas BSR (*Best Among the Shortest Routes*) e a ILR (*Iterative Load Routing*) para serem aplicadas em redes de grande dimensão. Por fim, fazem uma comparação das heurísticas propostas com as heurísticas SPSR (*Shortest Path with Maximum Reuse*) e BLSA (*Balanced Load Spectrum Allocation*).

Em Wang (2013), os autores propõem um algoritmo baseado na metaheurística Otimização por Colônia de Formiga (*Ant Colony Optimization - ACO*) para resolver a versão dinâmica do problema de alocação de rota e espectro em redes ópticas elásticas. Os experimentos deste trabalho comparam a probabilidade de bloqueio de cinco algoritmos. Os resultados demonstraram que esta abordagem utilizando a metaheurística ACO alcançou baixas taxas de probabilidade de bloqueio, pouca complexidade e alta adaptação a esta abordagem dinâmica, em que a matriz de tráfego varia com o tempo.

Em Horota (2014), os autores desenvolveram um novo algoritmo RSA, este tendo foco na fragmentação de espectro existente nas soluções de outros algoritmos. Os resultados demonstraram que o algoritmo proposto conseguiu obter bons resultados em termos de probabilidade de bloqueio. O algoritmo proposto apresentou desempenho inferior aos algoritmos comparados para cargas de rede mais baixas, mas obteve melhor desempenho quando submetido à cargas mais elevadas (a partir de 500 *Erlangs* para a topologia NSFNET e 600 *Erlangs* na topologia *Ring*).

Este estudo é uma continuação de Gusmão et. al (2013) e nele o algoritmo ILS foi utilizado para tentar solucionar o RSA. O artigo está organizado da seguinte forma, a saber, a Seção 2 apresenta alguns conceitos sobre redes elásticas, a Seção 3 apresenta os modelos utilizados na fase de busca local, a seção 4 apresenta a proposta deste trabalho, a seção 5

apresenta o cenário de testes juntamente com os resultados obtidos. As conclusões sobre o estudo estão na Seção 6.

## 2. Redes Ópticas Elásticas

Em uma rede óptica elástica, a alocação de banda com tamanho variável é possível devido à técnica de modulação OFDM. No domínio da frequência, uma sub-portadora normalmente corresponde a vários GHz e a capacidade de uma sub-portadora é da ordem de Gbps (Wang, 2012b). Quando um nó precisa alocar sua demanda de tráfego e esta é menor do que a capacidade do comprimento de onda disponível, utiliza-se OFDM para quebrar o comprimento de onda em diversas sub-portadoras e alocar a menor quantidade de sub-portadoras para a demanda, e as sub-portadoras restantes podem ser alocadas para outra conexão. Dessa forma, é possível evitar o desperdício de espectro óptico, ou seja, desperdício de capacidade de transmissão da rede óptica [Jinno et al., 2009].

Para conseguir uma qualidade aceitável do sinal óptico e facilitar a filtragem do sinal, dois caminhos ópticos que compartilham um ou mais enlaces devem ser separados no domínio da frequência por uma frequência de banda de proteção, ou simplesmente  $B$ . O tamanho da banda de proteção pode ser da ordem de apenas uma ou diversas sub-portadoras.

Um exemplo extraído de Wang et al. (2011b) do funcionamento do algoritmo RSA é ilustrado na Figura 2. Na Figura 2a, tem-se uma rede com topologia estrela e enlaces bidirecionais, banda de proteção igual a 1 *slot*, um caminho de óptico (*lightpath*)  $SP_1$  com 2 sub-portadoras de A para B e um outro caminho de óptico  $SP_2$  com 1 sub-portadora de A para C. A Figura 2b ilustra a alocação de espectro na Fibra  $F_1$  para  $SP_1$  e  $SP_2$ . Como ilustrado na Figura 2b, cada sub-portadora na fibra tem um índice. As sub-portadoras com índices 1 e 2 são alocadas para o  $SP_1$  que requer 2 sub-portadoras consecutivas. A sub-portadora com índice 4 é alocada para o  $SP_2$ . A sub-portadora com índice 3 é alocada como banda de proteção ( $B$ ) entre o  $SP_1$  e  $SP_2$  na Fibra 1. As sub-portadoras dentro do  $SP_1$  são consecutivas devido a restrição de contiguidade e, por isso, não é necessária uma banda de guarda entre elas. No entanto, para separar o sinal do  $SP_1$  do  $SP_2$  na Fibra  $F_1$  é necessário utilizar uma banda de proteção  $B$ . Assim, não podemos utilizar a sub-portadora 3 para o  $SP_2$ . Como resultado, para alocar o  $SP_1$  e  $SP_2$  são necessárias 4 sub-portadoras [Wang et al. 2011b].

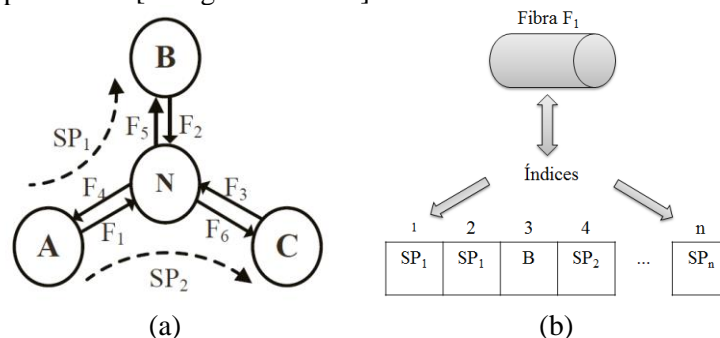


Figura 2. Exemplo de alocação e roteamento em uma rede óptica elástica.

### 2.1 Descrição do RSA *Off-line*

Segundo Velasco et al. (2012), a versão *off-line* do RSA tem como dados de entrada os seguintes parâmetros:

- Uma rede óptica representada por um grafo  $G(V, E)$ ,  $V$  sendo o conjunto de nós ópticos e  $E$  o conjunto de enlaces de fibra conectando dois nós em  $V$ ;
- Um conjunto ordenado  $S$  de *slots* de frequência em cada enlace em  $E$ ;  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_{|S|}\}$ . Uma banda de proteção  $B$  (número de slots) é necessária entre duas alocações de espectro contíguas;

- Um conjunto  $D$  de demandas a serem transportadas. Cada demanda  $d$  é representada por uma tupla  $(s_d, t_d, b_d, n_d)$ , em que  $s_d$  e  $t_d$  são os nós de origem e destino, respectivamente,  $b_d$  é a banda requerida, e  $n_d$  é o número de *slots* requeridos.

O problema tem como objetivo minimizar a quantidade de banda rejeitada alocando a menor quantidade recursos ópticos para o maior número conexões e definindo a rota de cada conexão. A solução do problema é representada pela rota através da rede e a alocação de espectro para cada demanda transportada.

## 2.2 Modelo ILP

Na literatura já existem alguns modelos formulados com Programação Linear Inteira (*Integer Linear Programming* - ILP) para modelar o problema RSA. Neste trabalho, foi utilizado o modelo SSA (*Starting Slot Assignment*) na fase de busca local da metaheurística proposta. O modelo SSA é uma adaptação do modelo proposto em Christodoulopoulos et al. (2011) e esta adaptação foi feita por Velasco et al. (2012).

## 3. Formulação Matemática

### 3.1. Modelo SSA

A formulação SSA (*Starting Slot Assignment*) consiste em definir o *slot* inicial de cada demanda a ser transportada, evitando a superposição de *slots* para duas demandas cujos caminhos compartilham pelo menos um *enlace*. *Slots* intermediários não são definidos nesta formulação (Velasco, 2012).

Sejam:

- $S$  : corresponde ao conjunto de *slots* ópticos;
- $D$  : corresponde ao conjunto de demandas;
- $P(d)$  : representa o conjunto de possíveis caminhos para a demanda  $d$ ;
- $B$  : banda de proteção em número de *slots*;
- $b_d$  : corresponde a largura de banda da demanda  $d$  em *Gbps*;
- $n_d$  : número de *slots* para transportar a largura de banda da demanda  $d$ ;
- $f_d$  : corresponde a um número positivo contendo o *slot* inicial da demanda  $d$ ;
- $f_{d_1 d_2}$  : variável binária. Igual a 1 se  $f_{d_1} < f_{d_2}$ , 0 do contrário;
- $y_p$  : variável de decisão binária. Igual a 1 se o caminho  $p$  for escolhido, 0 do contrário;
- $x_d$  : variável de decisão binária. Igual a 0 se a demanda  $d$  for atendida, 1 do contrário.

A atribuição de um possível caminho ou bloqueio da demanda é representada da seguinte forma

$$\sum_{p \in P(d)} y_p + x_d = 1 \quad \forall d \in D.$$

Se a demanda for atendida, então o índice do *slot* inicial de cada demanda somado ao número de *slots* que a demanda necessita tem que ser menor ou igual à quantidade de *slots* ópticos. Isso é expresso da seguinte forma

$$f_d + n_d \cdot (1 - x_d) \leq |S| \quad \forall d \in D.$$

Para todos os pares de demandas tal que exista pelo menos um caminho para cada uma e que esses caminhos compartilhem pelo menos um enlace, a ordenação entre as alocações para estas demandas é expressa da seguinte forma

$$f_{d_1 d_2} + f_{d_2 d_1} = 1 \quad \forall d_1, d_2 \in D : \exists p_1 \in P(d_1) \cap \exists p_2 \in P(d_2) \cap (p_1 \cap p_2 \neq \emptyset).$$

Para todo par de demandas tal que exista pelo menos um caminho para cada uma e que esses caminhos compartilhem pelo menos um enlace, se o índice do *slot* inicial de uma demanda  $d_2$  é maior do que o índice do *slot* inicial de uma demanda  $d_1$ , então a diferença dos mesmos tem que ser menor do que a quantidade de *slots* ópticos e isso é expresso da seguinte forma

$$f_{d_2} - f_{d_1} < |S|. f_{d_1 d_2} \quad \forall d_1, d_2 \in D : \exists p_1 \in P(d_1) \cap \exists p_2 \in P(d_2) \cap (p_1 \cap p_2 \neq \emptyset),$$

$$f_{d_1} - f_{d_2} < |S|. f_{d_2 d_1} \quad \forall d_1, d_2 \in D : \exists p_1 \in P(d_1) \cap \exists p_2 \in P(d_2) \cap (p_1 \cap p_2 \neq \emptyset).$$

Para todo par de demandas tal que todos os caminhos das duas demandas compartilhem pelo menos um enlace, a não super-posição de *slots* e a continuidade de espectro são expressos da seguinte forma

$$f_{d_1} + n_{d_1} \cdot y_{p_1} + B - f_{d_2} \leq (|S| + B) \cdot (1 - f_{d_1 d_2} + 2 - y_{p_1} - y_{p_2}) \quad \forall d_1, d_2 \in D \cap \forall p_1 \in P(d_1) \cap \forall p_2 \in P(d_2) : (p_1 \cap p_2 \neq \emptyset),$$

$$f_{d_2} + n_{d_2} \cdot y_{p_2} + B - f_{d_1} \leq (|S| + B) \cdot (1 - f_{d_2 d_1} + 2 - y_{p_1} - y_{p_2}) \quad \forall d_1, d_2 \in D \cap \forall p_1 \in P(d_1) \cap \forall p_2 \in P(d_2) : (p_1 \cap p_2 \neq \emptyset).$$

O total de banda rejeitada pelo bloqueio das demandas será expresso por:

$$\varphi = \sum_{d \in D} x_d \cdot b_d.$$

O objetivo do problema de alocação de rota e espectro é determinar quais demandas serão servidas e determinar por qual rota o tráfego irá ser transportado tal que satisfaça todas as restrições e minimize, ao mesmo tempo, o valor de  $\varphi$ .

Logo, o modelo SSA do problema é:

$$\varphi = \sum_{d \in D} x_d \cdot b_d \quad (1)$$

(SSA) min  $\varphi$

sujeito a

$$\sum_{p \in P(d)} y_p + x_d = 1 \quad \forall d \in D \quad (2),$$

$$f_d + n_d \cdot (1 - x_d) \leq |S| \quad \forall d \in D \quad (3),$$

$$f_{d_1 d_2} + f_{d_1 d_2} = 1 \quad \forall d_1, d_2 \in D : \exists p_1 \in P(d_1) \cap \exists p_2 \in P(d_2) \cap (p_1 \cap p_2 \neq \emptyset) \quad (4),$$

$$f_{d_2} - f_{d_1} < |S|. f_{d_1 d_2} \quad \forall d_1, d_2 \in D : \exists p_1 \in P(d_1) \cap \exists p_2 \in P(d_2) \cap (p_1 \cap p_2 \neq \emptyset) \quad (5),$$

$$f_{d_1} - f_{d_2} < |S|. f_{d_2 d_1} \quad \forall d_1, d_2 \in D : \exists p_1 \in P(d_1) \cap \exists p_2 \in P(d_2) \cap (p_1 \cap p_2 \neq \emptyset) \quad (6),$$

$$f_{d_1} + n_{d_1} \cdot y_{p_1} + B - f_{d_2} \leq (|S| + B) \cdot (1 - f_{d_1 d_2} + 2 - y_{p_1} - y_{p_2}) \quad \forall d_1, d_2 \in D \cap p_1 \in P(d_1) \cap p_2 \in P(d_2) : (p_1 \cap p_2 \neq \emptyset) \quad (7),$$

$$f_{d_2} + n_{d_2} \cdot y_{p_2} + B - f_{d_1} \leq (|S| + B) \cdot (1 - f_{d_2 d_1} + 2 - y_{p_1} - y_{p_2}) \quad \forall d_1, d_2 \in D \cap p_1 \in P(d_1) \cap p_2 \in P(d_2) : (p_1 \cap p_2 \neq \emptyset) \quad (8).$$

#### 4. Metodologia Proposta



Nesta seção é apresentada a metodologia utilizada para resolver o RSA.

#### 4.1. ILS aplicado ao RSA

As metaheurísticas estão sendo constantemente investigadas na resolução de problemas difíceis, onde a escolha de métodos exatos para resolver o problema não é uma viável para grandes instâncias dos problemas. As metaheurísticas são capazes de fornecer soluções de qualidade boa em um tempo computacionalmente viável. Tendo esta ideia como base, este trabalho apresenta uma nova abordagem para resolver o problema RSA utilizando a metaheurística ILS.

O *Iterated Local Search* (ILS) é uma metaheurística de busca local e, portanto, baseia-se na ideia de que um procedimento de busca local pode ser melhorado de forma iterativa a partir de perturbações na solução ótima local. A perturbação é um movimento que altera a solução corrente com o objetivo de mandá-la para outra região do espaço de busca, mas próxima, evitando um reinício aleatório Lourenço et. al (2010).

A Figura 3 demonstra o movimento de perturbação, este mecanismo é utilizado para escapar de ótimos locais. Para desenvolver um algoritmo baseado no ILS, quatro componentes tem que ser especificados:

1. Procedimento para gerar uma solução inicial para o problema. Neste trabalho, a heurística *First Fit* foi utilizada para gerar uma solução inicial. Essa heurística aloca as demandas de acordo com sua posição de ordenação na matriz de tráfego. Por exemplo, de um conjunto contendo 60 demandas, uma possível solução inicial seria uma em que as 50 primeiras demandas da matriz seriam inicialmente servidas;
2. Procedimento de busca local. O modelo SSA apresentado na seção 3 foi utilizado na fase de busca local, onde uma nova restrição foi adicionada ao modelo. De acordo com a taxa de perturbação  $\alpha$  (parâmetro do ILS) escolhida, um subconjunto de demandas  $R$  será previamente rejeitado. Desta forma, passamos a resolver apenas um subproblema e com isso é possível obter uma redução da complexidade do problema. Esta restrição é expressa da seguinte forma

$$x_d = 1 \forall d \in R;$$

3. Procedimentos de Perturbação. Neste trabalho, quatro mecanismos de perturbação foram desenvolvidos. O primeiro deles baseia-se em rejeitar as demandas com rotas longas. Para decidir se uma rota é longa ou curta, utilizou-se o comprimento de interferência para uma rede de  $N$  nós, o qual é dado pelo número de nós  $N$  da rede dividido por 4 [Barry and Humblet 1996]. Longas rotas utilizam mais recursos da rede e, por isso, a rejeição de demandas que utilizam essas rotas pode permitir que outras demandas com rotas menores sejam alocadas. Essa perturbação adiciona  $\alpha\%$  das demandas com caminho mais longo ao subconjunto  $R$ . O segundo mecanismo baseia-se nas demandas com rotas mais curtas (também utilizando o comprimento de interferência para decidir quais rotas são curtas) e adiciona  $\alpha\%$  dessas demandas ao subconjunto  $R$ . O terceiro mecanismo de perturbação adiciona  $\alpha\%$  demandas aleatórias ao subconjunto  $R$ . O último mecanismo de perturbação baseia-se em rejeitar as  $\alpha\%$  demandas que estão com rotas alocadas nos enlaces mais congestionados da rede;
4. Procedimento para o critério de aceitação. A cada iteração do ILS, a solução corrente é avaliada por meio deste procedimento para determinar qual será a solução no próximo procedimento de perturbação.

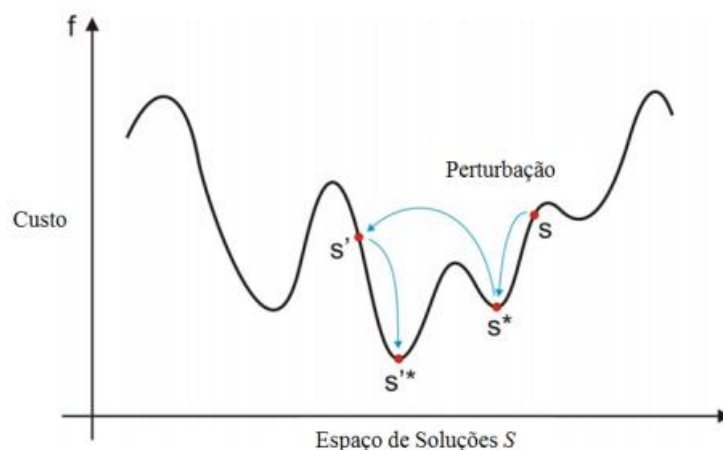


Figura 3. Mecanismo de perturbação do ILS.

## 5. Resultados

O desempenho do ILS foi avaliado para duas topologias de rede óptica: ARPANET e ABILENE (mostradas na Figura 4). A ABILENE possui 10 nós e 12 enlaces, a ARPANET possui 20 nós e 32 enlaces. Dois cenários foram testados: o primeiro cenário para a topologia ABILENE consistindo de três matrizes contendo 36 demandas geradas aleatoriamente foi testado utilizando um conjunto de *slots* igual a 30 e o segundo cenário para a topologia ARPANET consistindo de três matrizes contendo 50 demandas também geradas de forma aleatória e um conjunto de *slots* igual a 30. As larguras de banda das demandas foram distribuídas uniformemente variando entre 10, 40 e 100 Gbps (1, 2 e 4 *slots*). A taxa de perturbação do ILS utilizada foi de 3% e o número de iterações usado no algoritmo foi de 10 iterações.

Os  $k$  caminhos de cada demanda foram determinados utilizando o algoritmo de Yen (1971), este algoritmo determina os  $k$  caminhos mínimos sem ciclos entre um par de nós em uma rede. A formulação matemática SSA e a metaheurística ILS foram implementados no ambiente de programação IBM ILOG CPLEX *Optimization Studio* versão 12.5, utilizando a linguagem de otimização OPL e resolvidas pelo CPLEX em uma máquina com CPU *Core i5 2.50GHz*, 6GB de memória RAM e utilizando o sistema operacional Windows 8.

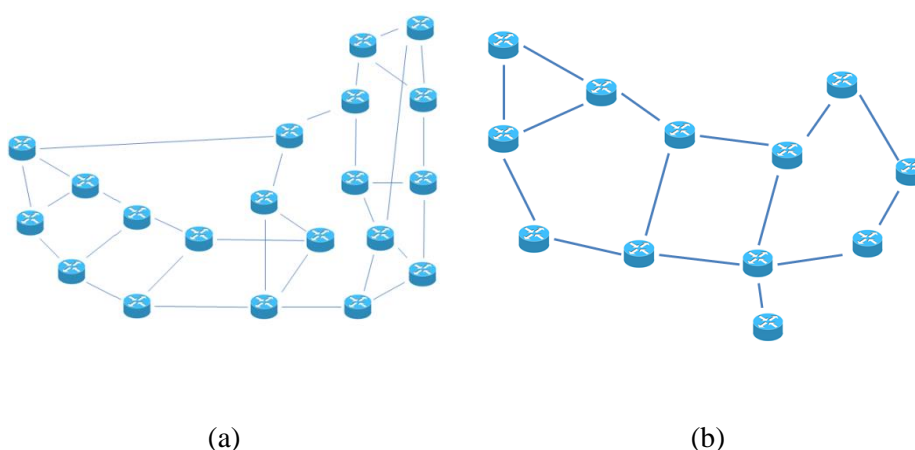


Figura 4. (a) Rede ARPANET (b) Rede ABILENE.

As Figuras 5, 6 e 7 apresentam os resultados do ILS utilizando o modelo SSA como busca local para a topologia ABILENE e  $k$  variando de 1 a 3. O algoritmo foi executado três vezes para cada uma das três matrizes de tráfego. Quanto à utilização dos mecanismos de perturbação, os mecanismos de perturbação de demandas aleatória e demandas com caminhos mais curtos ganharam 20% das iterações cada um, cada um dos outros dois mecanismos recebeu



30% das iterações. Cada uma das figuras a seguir é composta por dois gráficos: o primeiro mostrando o número de demandas servidas e o segundo mostrando o tempo gasto para o término da execução para cada matriz usada. Esse número de demandas servidas equivale ao número da melhor solução encontrada pelo algoritmo em cada execução. A unidade de tempo apresentada pelos gráficos é em segundos.

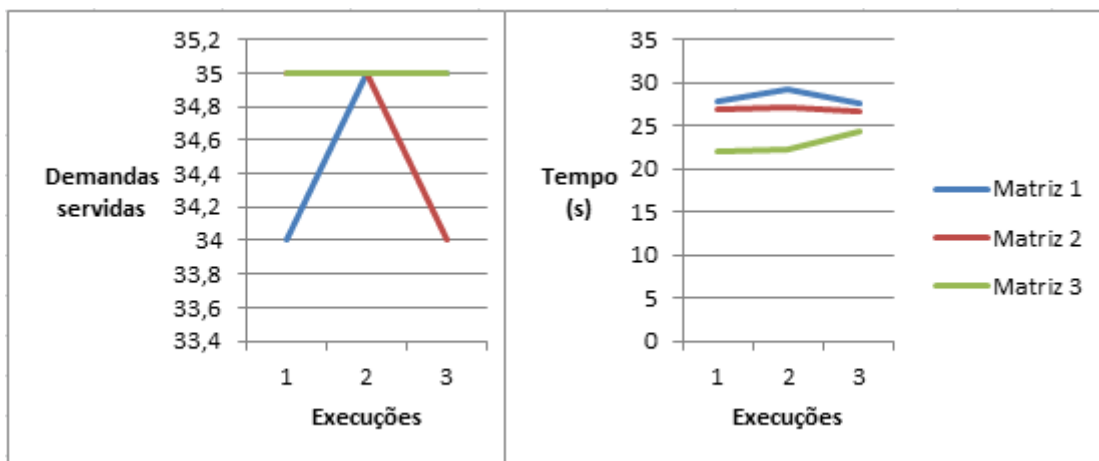


Figura 5. Resultados para ABILENE e  $k=1$

Através das figuras, é possível observar que as demandas são servidas variando de uma taxa de 94,4% até 97,22% para o número de caminhos igual a 1. Além disso, para a topologia ABILENE, os tempos do ILS para  $k$  igual a 1 e 2 mostraram-se superiores aos tempos apresentados nos experimentos de Velasco et. al (2012), em que os autores utilizam vários modelos para resolver o problema tendo o cenário de simulação (número de demandas, número de slots por enlace, etc) igual ao utilizado para esta topologia de rede.

As Figuras 6 e 7 apresentam os resultados para  $k$  igual a 2 e 3 caminhos por demanda da rede ABILENE. Para  $k = 2$ , as execuções do algoritmo encontraram soluções com 35 demandas servidas de um total de 36, obtendo-se assim uma taxa de demandas servidas igual a 97,22% em todas as execuções. Para  $k = 3$ , a variação na taxa foi de 94,4% até 97,22%. Os resultados também mostraram que o tempo obtido pelo ILS para  $k$  igual a 3 foi inferior ao tempo apresentado por Velasco et. al (2012), em que neste último o modelo SSA alcançou 2,798.58 segundos.

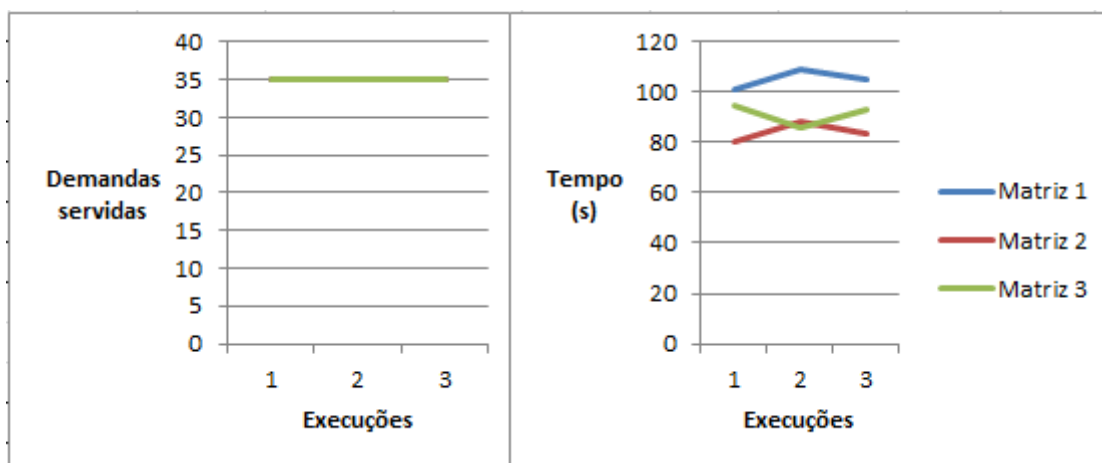


Figura 6. Resultados para ABILENE e  $k=2$

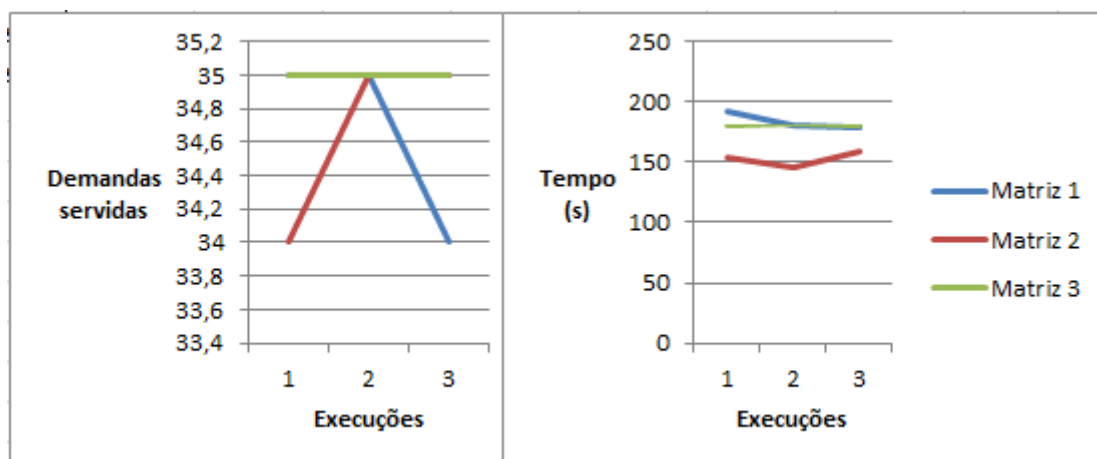


Figura 7. Resultados para ABILENE e k=3

As Figuras 8, 9 e 10 apresentam os resultados do ILS utilizando o modelo SSA como busca local para a topologia ARPANET. No caso desta topologia, o número de *slots* em cada enlace foi escolhido com base no tempo gasto pelo modelo para resolução do problema. Neste caso, o modelo SSA levou mais de 1 hora sem encontrar a solução exata tendo  $|S| = 30$ . Na Figura 8, é possível observar que as demandas são servidas variando de uma taxa de 90% até 96% para o número de caminhos igual a 1. Além disso, os tempos computacionais obtidos pelo ILS variaram de 46,24 a 56,2 segundos.

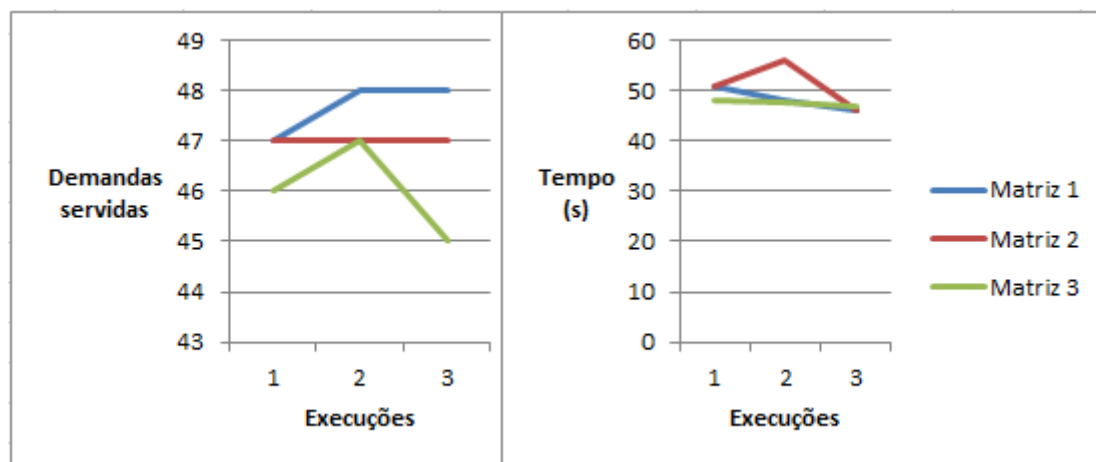


Figura 8. Resultados para ARPANET e k=1

As Figuras 9 e 10 apresentam os resultados para  $k$  igual a 2 e 3 caminhos da rede ARPANET. Para  $k = 2$ , as execuções do algoritmo encontraram soluções com 44 demandas servidas até 48 servidas de um total de 50, obtendo-se assim uma variação de 88% até 96% em todas as execuções. Ainda para  $k = 2$ , os tempos encontrados variaram de 173,89 até 184,2 segundos. Para  $k = 3$ , a variação foi de 82% até 96% e os tempos variaram de 395 até 463 segundos.

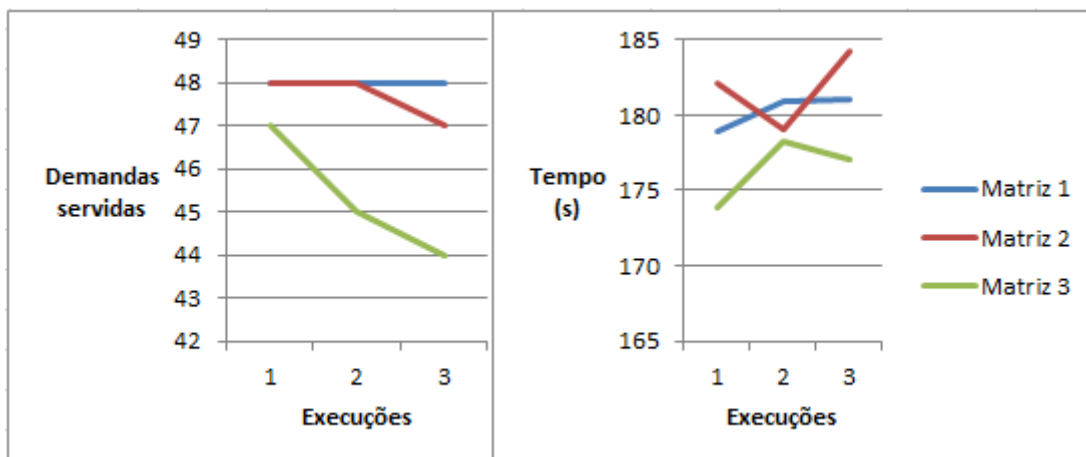


Figura 9. Resultados para ARPANET e k=2

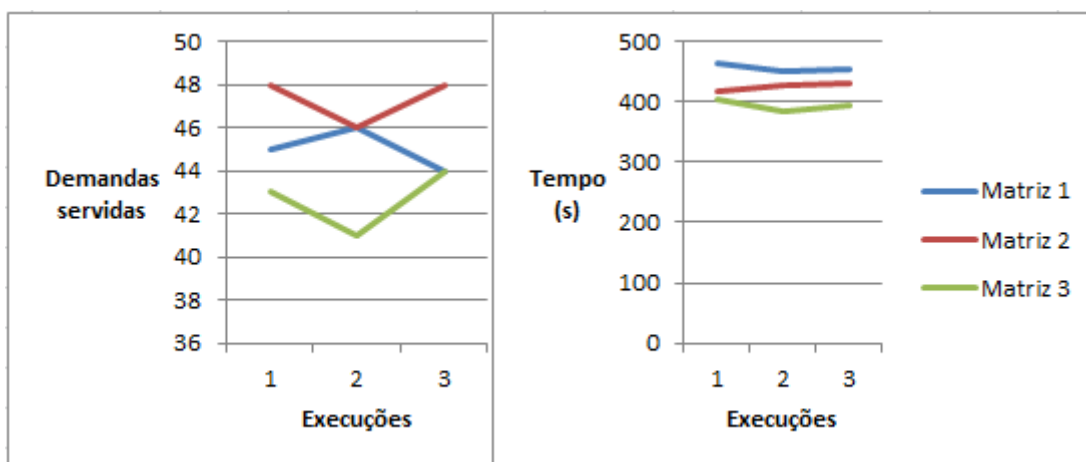


Figura 10. Resultados para ARPANET e k=3

## 6. Conclusão

Este artigo apresentou um estudo sobre o uso da metaheurística ILS para solucionar a versão *off-line* do problema RSA, que é NP-Completo. As soluções iniciais foram geradas usando a heurística *First Fit*, a fase de busca local do ILS foi desenvolvida utilizando o modelo SSA apresentado com uma nova restrição para reduzir o espaço de busca e quatro mecanismos de perturbação foram implementados. O desempenho do ILS foi avaliado em duas redes ópticas para várias matrizes de tráfego de tamanhos  $|D| = \{36, 50\}$  e tendo  $|S| = 30$  como número de *slots* por enlace. O algoritmo foi avaliado para resolver o problema utilizando de 1 até 3 rotas por requisição da matriz cliente.

Os resultados demonstraram que as metaheurísticas são uma alternativa viável para resolução de problemas desta natureza. A contribuição principal deste trabalho é a utilização de uma metaheurística, até então não utilizada ou pelo menos não foi encontrado nenhum trabalho que a utilizasse, para resolver o problema. Os resultados deste estudo são iniciais, contudo demonstraram o potencial do ILS para resolução do problema. Como trabalhos futuros, planeja-se testar a eficiência do ILS para instâncias maiores do problema e desenvolver novas metaheurísticas para solucionar o problema.

## Referências

Barry, R. A. e Humblet, P. A. (1995) "Models of Blocking Probability in All-Optical Networks with and without Wavelength Changers", In: *Proceedings of INFOCOM*, vol. 2, pp. 20.

- Christodoulopoulos, K., Tomkos, I., Varvarigos, E. A.** (2011) “Elastic bandwidth allocation in flexible OFDM based optical networks”, IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, vol. 29, no. 9, pp. 1354–1366.
- Gusmão, R. P., Fonseca, I. E., Cabral, L. A. F.** (2013) “Problema de Alocação de Rota e Espectro em Redes Ópticas Elásticas: Um Estudo de Caso”. In: XLV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Natal – RN, SBPO 2013.
- Horota, A. K., Figueiredo, G. B., Fonseca, N. L. S.** (2014) “Algoritmo de Roteamento e Atribuição de Espectro com Minimização de Fragmentação em Redes Ópticas Elásticas”, In: 32º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, Florianópolis – SC, SBRC 2014.
- Jinno, M., Takara, H., Kozichi, B., Tsukishima, Y., Sone, Y.** (2009) “Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: Architecture, benefits, and enabling technologies”, IEEE Communications Magazine, vol. 47, pp. 66–73.
- Lourenço, H. R., Martin, O. C. e Stutzle, T.** (2010) “Iterated Local Search: Framework and Applications”. *Handbook of Metaheuristics, 2nd. Edition*. Kluwer Academic Publishers, International Series in Operations Research & Management Science **146**: 363–397.
- Mukherjee, B.** (2006). Optical WDM Networks. California, USA: Springer.
- Norouzi, A., Zaim, A. H., Ustundag, B. B.** (2011) “An integrated survey in Optical Networks: Concepts, Components and Problems”, IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, Vol. 11, no.1, January.
- Santos, A. F., Santos, C. C., Durães, G. M., Assis, K. D. R.** (2012). Roteamento e Alocação de Espectro em Redes Ópticas: O Conceito SLICE. In: XXX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBrT’12), Brasília – DF, SBrT 2012.
- Wang, Y., Cao, X., Hu, Q.** (2011a) “Routing and Spectrum Allocation in Spectrum-sliced Elastic Optical Networks”, In: Proceedings of IEEE INFOCOM.
- Wang, Y., Cao, X., Pan, Y.** (2011b) “A Study of the Routing and Spectrum Allocation in Spectrum-sliced Elastic Optical Networks”, In: Proceedings of IEEE INFOCOM.
- Wang, Y., Zhang, J., Zhao, Y., Wang, J., Gu, W.** (2013) “ACO-based routing and spectrum allocation in flexible bandwidth networks”, Springer Photonic Network Communication, vol 25, p. 135-143.
- Velasco, L., Klinkowski, M., Ruiz, M., Comellas, J.** (2012) “Modeling the routing and spectrum allocation problem for flexgrid optical networks”, Springer Photonic Network Communication, vol. 24, p. 177-186.
- Vizcaíno, J. L., Ye, Y., Monroy, I. T.** (2012) “Energy efficiency analysis for flexible-grid OFDM-based optical networks”, Elsevier Journal of Computer Networks, vol. 56, no 10, p. 2400-2419.
- Yen, J.** (1971). “Finding the k shortest loopless paths in a network”, Management Science, vol. 17, no. 11, pp. 712–16.