

Universidade Federal da Paraíba  
Centro de Informática  
Programa de Pós-Graduação em Informática

**O Uso de Metaheurísticas para o Problema de Roteamento e  
Atribuição de Espectro em Redes Ópticas Elásticas**

Renê Pereira de Gusmão

Proposta de Dissertação submetida à Coordenação do  
Curso de Pós-Graduação em Informática da  
Universidade Federal da Paraíba como parte dos  
requisitos necessários para obtenção do grau de  
Mestre em Informática.

Área de Concentração: Sistemas de Computação  
Linha de Pesquisa: Computação Distribuída

Lucídio dos Anjos Formiga Cabral  
(Orientador)

Iguatemi Eduardo da Fonseca  
(Co-Orientador)

João Pessoa, Paraíba, Brasil  
©Renê Pereira de Gusmão, Fevereiro de 2013

## Resumo

O rápido e contínuo crescimento do consumo do tráfego IP juntamente com aplicações emergentes que demandam muita largura de banda, como vídeo sob demanda, TV de alta definição e computação nas nuvens, requerem uma infraestrutura de rede escalável e eficiente em custo. Neste cenário, as redes ópticas elásticas estão atraindo uma grande atenção devido à alta eficiência e flexibilidade espectral em comparação com as redes ópticas rígidas baseadas em WDM. Para analisar e planejar redes elásticas e flexíveis, métodos eficientes são necessários para o problema do roteamento e alocação de espectro (Routing and Spectrum Allocation Problem). Este problema tem como objetivo minimizar a largura de banda rejeitada, ou seja, alocar o número máximo possível de conexões e foi provado que pertence a classe NP-Completo. Para resolver problemas desta classe, utilizam-se métodos exatos e heurísticos, sendo este último bastante usado, pois consegue apresentar soluções de boa qualidade em um tempo computacional aceitável. Esta proposta tem como objetivo utilizar metaheurísticas para resolução do problema do roteamento e alocação de espectro.

**Palavras-chave:** RSA, Redes Ópticas Elásticas, Metaheurísticas.

# Conteúdo

<b>1. Introdução</b>	9
1.1. Motivação	9
1.2. Objetivos	9
1.2.1. Objetivo Geral	11
1.2.2. Objetivos Específicos	11
1.3. Metodologia	11
1.4. Estrutura da Dissertação	12
<b>2. Fundamentação Teórica</b>	13
2.1. Descrição do Problema	13
2.2. Modelagem ILP	13
2.2.1. Modelo SSA	13
2.2.2. Modelo LP-CA	14
2.3. Metaheurísticas	16
2.3.1. Visão Geral	16
2.3.2. <i>Iterated Local Search</i>	17
2.3.3. <i>Greed Randomized Adaptative Search Procedure</i>	18
2.3.4. <i>Simulated Annealing</i>	19
<b>3. Trabalhos Relacionados</b>	21
3.1. <i>Modeling the Routing and Spectrum Allocation Problem for Flexgrid Optical Networks</i>	21
3.2. <i>Elastic Bandwidth Allocation in Flexible OFDM-Based Optical Networks</i>	21
3.3. <i>Energy efficiency analysis for flexible-grid OFDM-based optical networks</i>	21
3.4. <i>Routing and Spectrum Allocation in Spectrum-sliced Elastic Optical Path Network</i>	22

<b>4. Proposta de Dissertação .....</b>	<b>23</b>
<b>5. Cronograma .....</b>	<b>24</b>
Referências Bibliográficas	

# **Lista de Siglas**

RSA – Routing and Spectrum Allocation

OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing

WDM – Wavelength Division Multiplexing

ILP – Integer Linear Programming

RWA – Routing and Wavelength Assignment

ILS – Iterated Local Search

GRASP – Greedy Randomized Adaptative Search Procedure

SA – Simulated Annealing

# Lista de Símbolos

$G$	Grafo representando a rede óptica
$V$	Conjunto de vértices representando os nós ópticos
$E$	Conjunto de <i>links</i> ópticos
$S$	Espectro óptico
$D$	Conjunto de demandas
$P(d)$	Conjunto de caminhos para a demanda $d$
$C(d)$	Conjunto de canais para a demanda $d$
$B$	Banda de proteção
$b_d$	Largura de banda da demanda $d$ em <i>Gbps</i>
$n_d$	Número de <i>slots</i> para transportar a largura de banda da demanda $d$
$f_d$	Número positivo contendo o <i>slot</i> inicial da demanda $d$
$f_{d1d2}$	Binário. Igual a 1 se $f_{d1} < f_{d2}$ , 0 do contrário
$y_p$	Binário. Igual a 1 se o caminho $p$ for escolhido, 0 do contrário
$x_d$	Binário. Igual a 1 se a demanda $d$ for atendida, 0 do contrário
$y_{pc}$	Binário. Igual a 1 se o canal $c$ é atribuído ao caminho $p$ , 0 do contrário
$\delta_{pe}$	Igual a 1 se o caminho $p$ utiliza o <i>link</i> $e$ , 0 do contrário
$\gamma_{cs}$	Igual a 1 se o canal $c$ contém o <i>slot</i> $s$ , 0 do contrário

# Lista de Figuras

Figura 1 – Alocação de Recursos em Redes Ópticas

Figura 2 – Ilustração do slot inicial das demandas

Figura 3 – Ilustração do uso de Canais

Figura 4 – Representação de uma perturbação do ILS

Figura 5 – Algoritmo do ILS

Figura 6 – Algoritmo do GRASP

Figura 7 – Algoritmo do SA

# Lista de Tabelas

Tabela 1 - Cronograma



# Capítulo 1

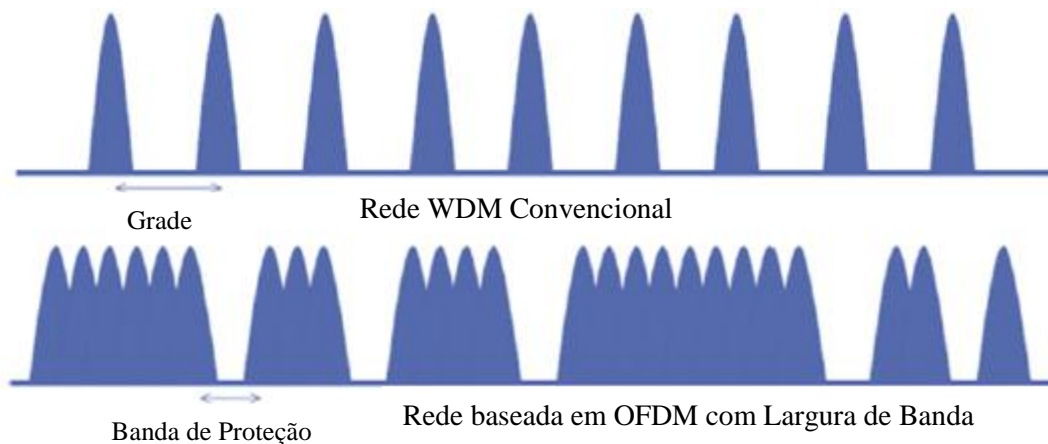
## Introdução

### 1.1 Motivação

A fibra óptica é um meio de transmissão notável quando comparado a outros como cobre ou vácuo. 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 et.al, 2011].

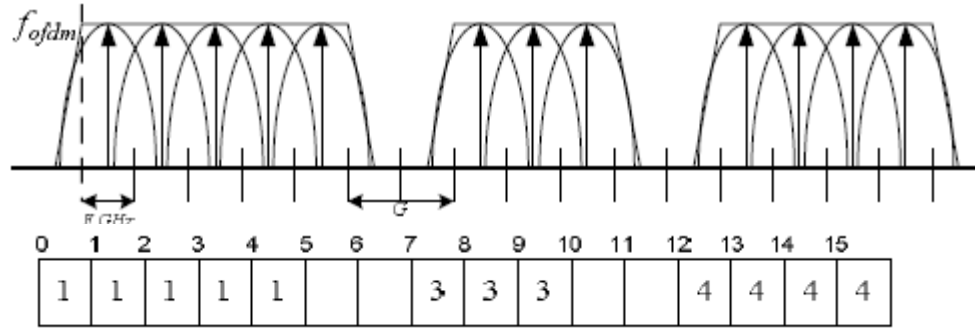
Particularmente, as redes ópticas WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) utilizam uma alocação de frequência de tamanho fixo (capacidade) por comprimento de onda. Cada comprimento de onda em uma rede WDM é separado de outro comprimento adjacente por uma banda de guarda, a qual serve para garantir a qualidade do sinal e a filtragem necessária nos receptores [SANTOS et.al, 2012].

Uma conexão entre dois nós de uma rede óptica WDM requer que sejam definidos caminhos pelos quais o tráfego será encaminhado e que os recursos necessários para esta conexão sejam alocados. Este processo é conhecido como problema de roteamento e atribuição de comprimentos de onda (RWA – *Routing and Wavelength Assignment*). A abordagem WDM apresenta desvantagens em relação à granularidade e pouca flexibilidade, pois atribui bandas de tamanho fixo e com alta taxa de transmissão por canal [SANTOS et.al, 2012]. Neste contexto, surge a arquitetura SLICE (*Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Network*) que é baseada no sistema de transmissão OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) [WANG et.al, 2012].

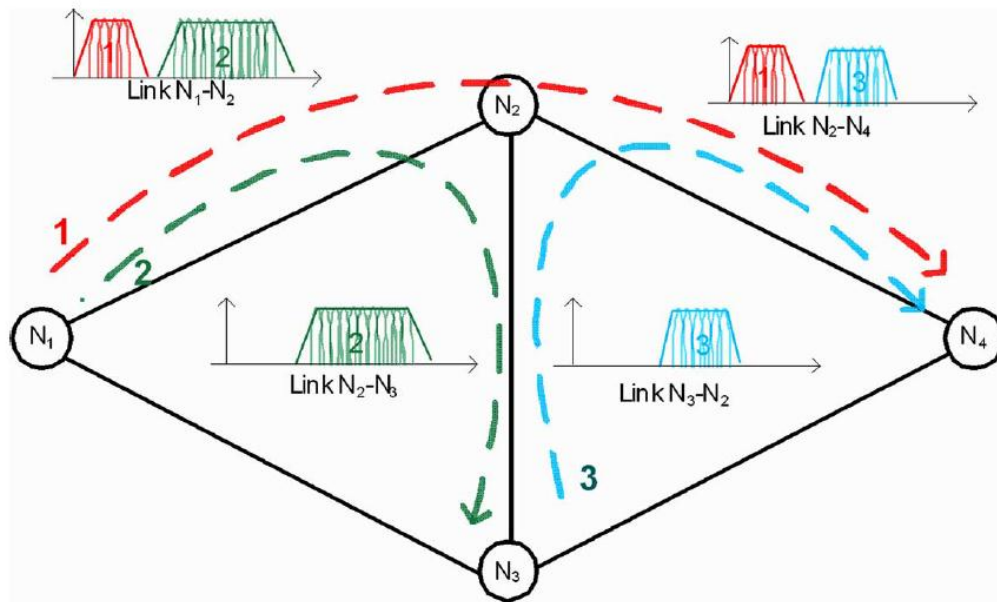


**Figura 1** – Alocação de recursos em redes ópticas.

**Fonte:** Adaptado de [VIZCAÍNO, 2012]



**Figura 2** – Alocação de espectro ilustrada como um vetor de *slots* constantes.  
**Fonte:** Adaptado de [CHRISTODOULOPOULOS et.al,2012]



**Figura 3** – Exemplo de utilização de um *link* em redes ópticas flexíveis.  
**Fonte:** Adaptado de [CHRISTODOULOPOULOS et.al, 2012]

A Figura 1 apresenta uma comparação da alocação de espectro feita em redes WDM e em redes baseadas em OFDM. Por outro lado, a Figura 2 representa a alocação em um vetor de *slots* constantes de espectro para as conexões usando um *link*. Bandas de proteção (*guardbands*), cada uma consistindo de  $G$  sub-portadoras, separam as demandas alocadas para que elas possam ser roteadas e recebidas com qualidade de sinal aceitável. Por último, a Figura 3 exemplifica a utilização de um *link* em redes ópticas flexíveis.

Nas redes SLICE, a alocação da banda se torna mais flexível devido à modulação OFDM. No domínio da frequência uma sub-portadora representa vários GHz, e a sua capacidade é da ordem de Gbps. 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 dividir o comprimento de

onda em várias sub-portadoras e alocar apenas a quantidade necessária de sub-portadoras para a demanda, e as demais podem ser alocadas para outra conexão. Dessa forma, evita-se desperdício de espectro óptico [JINNO et.al, 2009].

A arquitetura SLICE propõe um método mais flexível de alocação de espectro para redes ópticas WDM. Este método mostra que uma alocação de espectro com espaçamentos diferentes entre os canais é mais eficiente que o método tradicional [WANG et.al, 2011]. Similarmente ao problema RWA em redes WDM, em redes SLICE surge o problema RSA (*Routing and Spectrum Allocation*). O problema RSA possui duas versões: *off-line* (que será abordada neste trabalho) e dinâmica. Na versão *off-line*, a matriz de tráfego é previamente conhecida e, por isso, é um dado de entrada. Por outro lado, na versão dinâmica a matriz de tráfego varia de acordo com o tempo.

No RSA, cada demanda de tráfego precisa de quantidade de espectro a ser alocado (ou sub-portadoras). O RSA ainda apresenta duas restrições adicionais em relação ao RWA: continuidade e contiguidade. Primeiro, uma sub-portadora alocada deve possuir continuidade, ou seja, ser a mesma em todos os enlaces da rota. 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 *links* em sua rota. O problema RSA foi provado ser NP-Completo e, consequentemente, requer métodos eficientes para a resolução do problema [VELASCO et.al, 2012].

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

O objetivo deste trabalho é estudar o problema RSA independentemente da topologia de rede. Para isso será utilizada a abordagem heurística, visando soluções viáveis de boa qualidade em um tempo computacional aceitável.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Estudar e modelar matematicamente o problema RSA;
- Construir as heurísticas para aplicação ao problema RSA;
- Implementar e testar os modelos matemáticos e as heurísticas propostas, e comparar com outros modelos da literatura;

## **1.3 Metodologia**

Para alcançar os objetivos específicos e, consequentemente o objetivo geral deste trabalho, serão descritas abaixo as atividades que irão compor a metodologia a ser utilizada.

1. A primeira atividade está relacionada com o levantamento e avaliação dos modelos matemáticos já conhecidos do problema RSA.
2. A segunda atividade está relacionada com a construção do modelo a ser utilizado neste trabalho.
3. A terceira atividade está relacionada com a construção de heurísticas para resolver o problema.
4. A quarta e última atividade está relacionada com a análise e coleta das soluções encontradas pelas heurísticas.

## **1.4 Estrutura da Proposta**

Esta proposta está dividida da seguinte forma:

- Capítulo 2: Apresenta a fundamentação teórica, abordando assuntos necessários para o desenvolvimento do trabalho.
- Capítulo 3: Apresenta alguns trabalhos de pesquisas que estão sendo realizadas com o tema desta proposta.
- Capítulo 4: Apresenta a proposta de dissertação.
- Capítulo 5: Cronograma de atividades para atingir os objetivos.

# Capítulo 2

## Fundamentação Teórica

### 2.1 Descrição do Problema

Segundo (VELASCO et.al, 2012), o problema RSA *off-line* pode ser formulado da seguinte forma, dados:

- Uma rede óptica representada por um grafo  $G(V, E)$ ,  $V$  sendo o conjunto de nós ópticos e  $E$  o conjunto de links de fibra conectando dois nós em  $V$ .
- Um conjunto ordenado  $S$  de *slots* de frequência em cada *link* em  $E$ ;  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_{|S|}\}$ . Uma banda de guarda  $B$  (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 e tem como saída a rota através da rede e a alocação de espectro para cada demanda transportada.

### 2.2 Modelagem ILP do RSA

Na literatura já existem alguns modelos formulados com Programação Linear Inteira (*Integer Linear Programming* - ILP) para representar o problema RSA. Neste trabalho, serão utilizados dois modelos a fim de análise e comparação dos resultados.

#### 2.2.1 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 *link*. *Slots* intermediários não são explicitamente definidos nesta formulação [VELASCO et.al, 2012].

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

$$(SSA) \min \varphi \tag{1.1}$$

s.a:

$$\sum_{p \in P(d)} y_p + x_d = 1 \quad \forall d \in D \quad (1.2)$$

$$f_d + n_d \cdot (1 - x_d) \leq |S| \quad \forall d \in D \quad (1.3)$$

$$f_{d_1 d_2} + f_{d_2 d_1} = 1 \quad \forall d_1, d_2 \in D : \exists p_1 \in P(d_1) \cap \exists p_2 \in P(d_2) \cap (p_1 \cap p_2 \neq \emptyset) \quad (1.4)$$

$$f_{d_2} - f_{d_1} < |S| \cdot f_{d_1 d_2} \quad \forall d_1, d_2 \in D : \exists p_1 \in P(d_1) \cap \exists p_2 \in P(d_2) \cap (p_1 \cap p_2 \neq \emptyset) \quad (1.5)$$

$$f_{d_1} - f_{d_2} < |S| \cdot f_{d_2 d_1} \quad \forall d_1, d_2 \in D : \exists p_1 \in P(d_1) \cap \exists p_2 \in P(d_2) \cap (p_1 \cap p_2 \neq \emptyset) \quad (1.6)$$

$$f_{d_1} + n_{d_1} \cdot y_{p_1} + B - f_{d_2} \leq (|S| + B) \cdot (1 - f_{d_1 d_2} + 2 - y_{p_1} - y_{p_2}) \quad \forall d_1, d_2 \in D \cap p_1 \in P(d_1) \cap p_2 \in P(d_2) : (p_1 \cap p_2 \neq \emptyset) \quad (1.7)$$

$$f_{d_2} + n_{d_2} \cdot y_{p_2} + B - f_{d_1} \leq (|S| + B) \cdot (1 - f_{d_2 d_1} + 2 - y_{p_1} - y_{p_2}) \quad \forall d_1, d_2 \in D \cap p_1 \in P(d_1) \cap p_2 \in P(d_2) : (p_1 \cap p_2 \neq \emptyset) \quad (1.8)$$

Em que:

- $|S|$ : corresponde a quantidade de *slots* ópticos;
- $D$ : corresponde ao conjunto de demandas;
- $P(d)$ : representa o conjunto de 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*;
- $n_d$ : representa o 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 1 se a demanda  $d$  for atendida, 0 do contrário.

A função objetivo (1.1) busca minimizar a quantidade de banda rejeitada. A restrição (1.2) define um possível caminho ou bloqueia a demanda. A restrição (1.3) garante que o *slot* inicial de cada demanda deixe espaço suficiente para a quantidade de *slots* que a demanda requer. As restrições (1.4) – (1.6) gerenciam a ordenação dos *slots* iniciais de todas as demandas, em que quaisquer caminhos compartilham pelo menos um *link*. As restrições (1.7) e (1.8) garantem a continuidade de espectro e que não existe super-posição na alocação de espectro.

## 2.2.2 Modelo LP – CA

Diferentemente do SSA, a formulação LP-CA (*Link-Path Channel Assignment*) faz uso do conceito de canais contíguos pré-computados, retirando do modelo matemático a complexidade associada à restrição de contiguidade [VELASCO et.al, 2012].

O modelo de programação linear inteira relativo ao problema de roteamento e alocação de espectro (RSA) é apresentado pelas Equações (2.1)-(2.3).

$$(LP - CA) \min \sum_{d \in D} x_d \cdot b_d \quad (2.1)$$

s.a:

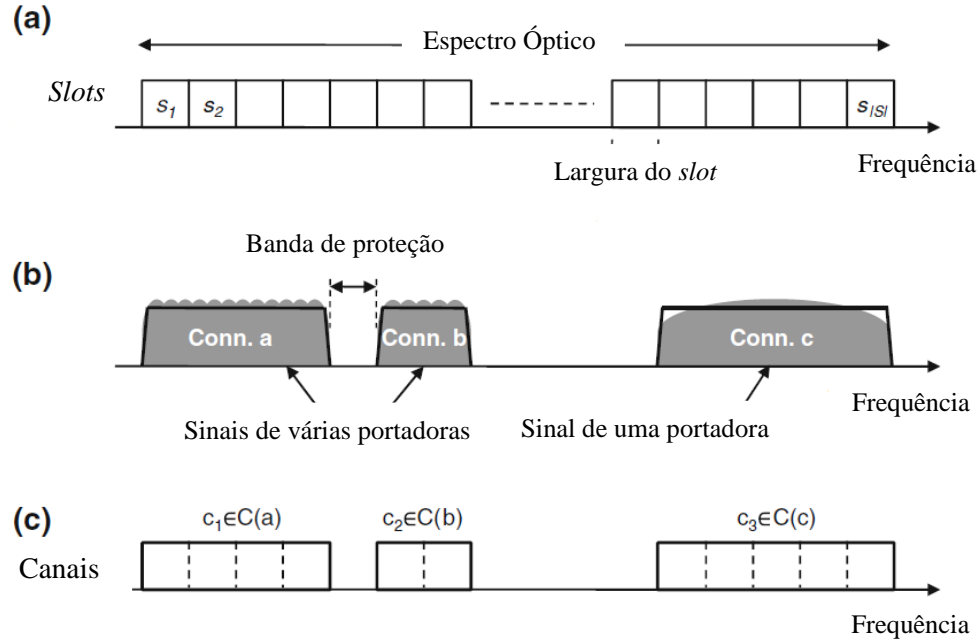
$$\sum_{p \in P(d)} \sum_{c \in C(d)} y_{pc} + x_d = 1 \quad \forall d \in D \quad (2.2)$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{p \in P(d)} \sum_{c \in C(d)} \gamma_{cs} \cdot \delta_{pe} \cdot y_{pc} \leq 1 \quad \forall e \in E, s \in S \quad (2.3)$$

Em que:

- $|S|$ : corresponde a quantidade de *slots* ópticos;
- $D$ : corresponde ao conjunto de demandas;
- $P(d)$ : representa o conjunto de caminhos para a demanda  $d$ ;
- $E$ : representa o conjunto de *links* ópticos;
- $C(d)$ : representa o conjunto de canais para a demanda  $d$ ;
- $b_d$ : corresponde a largura de banda da demanda  $d$  em *Gbps*;
- $x_d$ : variável de decisão binária. Igual a 1 se a demanda  $d$  for atendida, 0 do contrário.
- $n_d$ : representa o número de *slots* para transportar a largura de banda da demanda  $d$ ;
- $y_{pc}$ : variável de decisão binária. Igual a 1 se o canal  $c$  é atribuído ao caminho  $p$ , 0 do contrário;
- $\delta_{pe}$ : variável binária. Igual a 1 se o caminho  $p$  utiliza o *link*  $e$ , 0 do contrário;
- $\gamma_{cs}$ : variável binária. Igual a 1 se o canal  $c$  contém o *slot*  $s$ , 0 do contrário.

A restrição (2.2) é similar a constante (1.2), ambas atribuem um possível caminho e canal ou bloqueiam a demanda. Além disso, a restrição (2.3) garante que cada *slot* em um *link* é atribuído, no máximo, a uma demanda.



**Figura 4** – Atribuição de canais para as demandas.

**Fonte:** Adaptado de [VELASCO et.al, 2012]

A Figura 4 apresenta uma representação do espectro óptico, bem como um exemplo da utilização de canais a serem atribuídos às demandas, onde cada demanda possui um conjunto de canais pré-computados.

## 2.3 Metaheurísticas

### 2.3.1 Visão Geral

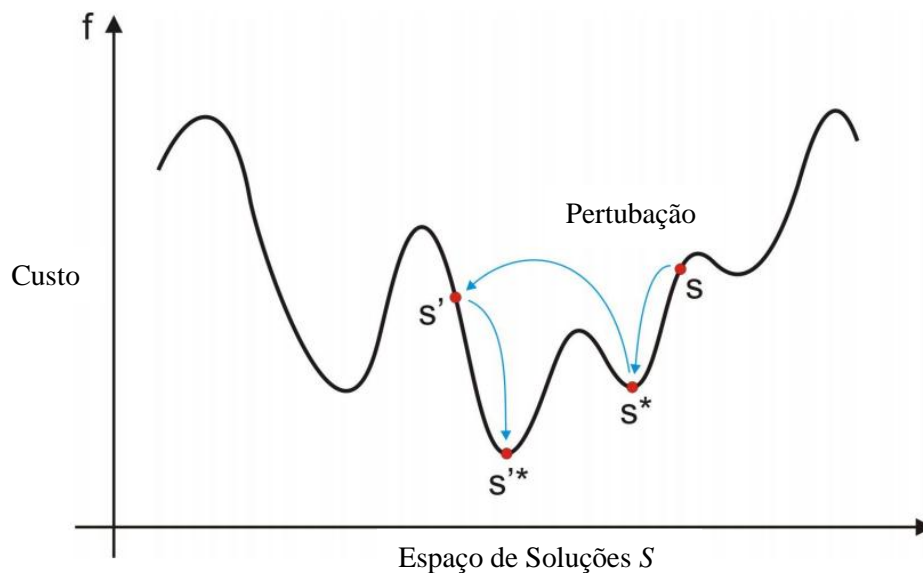
Devido à complexidade dos problemas pertencentes às classes NP-Completo e NP-Difícil, existem duas abordagens para resolução dos mesmos: exata e heurística. A estratégia exata fornece a solução ótima do problema, contudo, na prática, só é utilizada para pequenas instâncias dos problemas. A estratégia heurística ou aproximativa vem sendo bastante utilizada, pois consegue fornecer soluções de boa qualidade em um tempo computacional aceitável.

A importância de algoritmos de alto desempenho para lidar com problemas de otimização difíceis é enorme e, em muitos casos, os métodos mais eficazes são as metaheurísticas. As metaheurísticas são métodos de solução que coordenam a interação entre procedimentos de melhoria local e estratégias capazes de escapar de pontos de ótimos locais e desempenhar buscas robustas no espaço de soluções [GENDREAU and POTVIN, 2010].



### 2.3.2 Iterated Local Search

O *Iterated Local Search* (ILS) é uma metaheurística de busca local e, por isso, baseia-se no conceito de vizinhança. O processo de explorar o espaço de soluções é feito através de movimentos, os quais são alterações feitas na solução atual, guiando para soluções vizinhas. O princípio básico do ILS é que um procedimento de busca local pode ser melhorado iterativamente 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 [STÜTZLE, 2006].



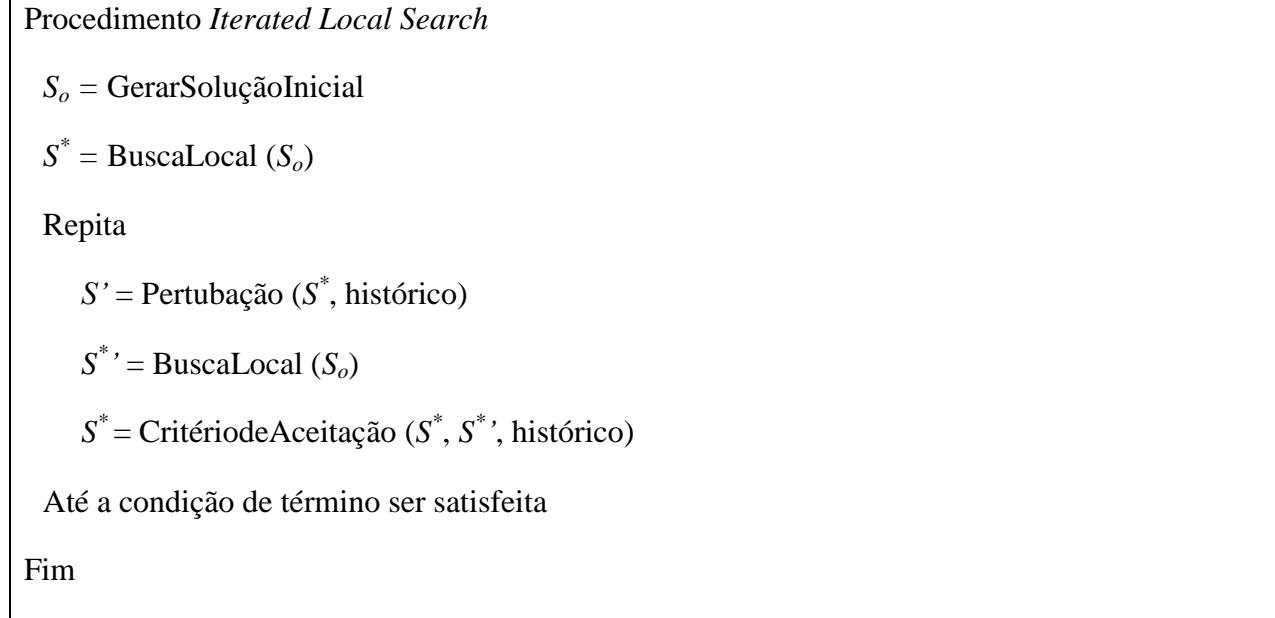
**Figura 5** – Representação do ILS.

**Fonte:** Adaptado de [STÜTZLE, 2006]

A Figura 4 demonstra o movimento de perturbação, este mecanismo é utilizado para escapar de ótimos locais. Começando de um mínimo local  $s^*$ , uma perturbação é aplicada levando a uma solução  $s'$ . Depois de aplicar uma busca local, um novo mínimo  $s'^*$  é encontrado podendo ser melhor que  $s^*$ . Para desenvolver um algoritmo ILS, quatro componentes tem que ser especificados:

- Procedimento para gerar uma solução inicial para o problema;
- Procedimento de busca local;
- Procedimento de Perturbação;
- Procedimento para o critério de aceitação, que decide se a solução perturbada é aceita como nova solução corrente.

A Figura 5 apresenta o algoritmo básico do ILS.



**Figura 6** – Algoritmo básico do ILS.

### 2.3.3 Greedy Randomized Adaptative Search Procedures (GRASP)

A metaheurística GRASP é um processo iterativo, em que cada iteração do GRASP consiste em duas fases, uma fase de construção, em que uma possível solução é construída, e em uma fase de busca local, em que um mínimo local da vizinhança da solução construída é encontrado. A melhor solução de todas é mantida e apresentada como solução final do problema [FEO and RESENDE, 1995]. O algoritmo básico do GRASP é apresentado na Figura 6.

Na fase de construção primeira fase do algoritmo, uma solução é construída de forma iterativa e, elemento por elemento. A cada iteração, uma função adaptativa e gulosa calcula o benefício da seleção de cada elemento que pode ser adicionado à solução. Após isso, uma lista com os melhores elementos encontrados é construída, denominada Lista de Candidatos Restrita (LCR) [FEO and RESENDE, 1995]. O tamanho da LCR é determinado pelo parâmetro  $\alpha=[0,1]$ . Finalmente, um elemento pertencente à LCR é escolhido de forma aleatória e adicionado à solução.

O GRASP tem como característica o comportamento guloso, aleatório e adaptativo na fase de construção. O parâmetro  $\alpha$  controla o nível de gulosidade e aleatoriedade do procedimento. Um valor de  $\alpha$  igual a zero, por exemplo, implica na construção de soluções unicamente gulosas, enquanto que um valor de  $\alpha$  igual a um, implica na construção de solução puramente aleatórias.

Portanto, o GRASP tenta combinar os aspectos dos algoritmos puramente gulosos com os aspectos dos algoritmos aleatórios [FEO and RESENDE, 1995].

Ainda assim, as soluções apresentadas pela fase de construção do GRASP não são necessariamente soluções ótimas locais. Portanto, O GRASP utiliza uma fase de busca local para tentar melhorar as soluções encontradas na fase de construção. Na busca local, sempre que uma solução visitada  $s'$  tiver o valor da função objetivo melhor do que a solução corrente, ela substitui a solução corrente. O procedimento termina quando não é possível encontrar uma solução melhor na vizinhança da solução corrente [FEO and RESENDE, 1995].

```
Procedimento GRASP( $GRASPM_{max}$ ,  $\alpha$ )
  LerEntrada();
  Para 1,2,...,  $GRASPM_{max}$  faça
     $S \leftarrow$  Construção( $\alpha$ );
     $S \leftarrow$  BuscaLocal( $S$ );
    AtualizeSolução( $S$ , MelhorSolução);
  Fim para

  Retorne MelhorSolução

Fim GRASP
```

**Figura 6** – Algoritmo básico do GRASP  
**Fonte:** Adaptado [FEO and RESENDE, 1995]

### 2.3.4 Simulated Annealing (SA)

O SA é uma metaheurística de busca local aplicada a problemas otimização discretos e contínuos. A sua característica principal do SA é que consegue prover um mecanismo para escapar dos ótimos locais através de movimentos Hill-Climbing na esperança de encontrar um ótimo global. O SA tem como propriedades a fácil implementação e convergência, além disso [NIKOLAEV and JACOBSON, 2010].

O AS (Recozimento Simulado) é chamado desta forma porque é uma analogia ao processo físico de recozir com sólidos, em que um sólido cristalino é derretido e então permitido resfriar de forma muito lenta até alcançar sua configuração de latência mais regular (estado de energia mínima), e, portanto, estar livre de defeitos no cristal. A cada iteração do algoritmo aplicado a problemas discretos, os valores de duas soluções (a solução corrente e a solução atual) são comparados. A melhora das soluções sempre é aceita, enquanto que apenas uma fração de soluções piores é aceita na tentativa de escapar de ótimos locais e buscar ótimos globais [NIKOLAEV and JACOBSON, 2010].

A Figura 7 apresenta o algoritmo básico SA. Este algoritmo se decompõe em duas grandes buscas sobrepostas. A busca externa controla o término do processo e é baseada na noção de estado resfriado. A busca interna contém o processo de otimização. A variável  $s^*$  representa a melhor solução encontrada durante a execução do algoritmo [NIKOLAEV and JACOBSON, 2010].

Procedimento *Simulated Annealing*

```
Estabelecer uma solução viável  $s_0$ ;  
 $s \leftarrow s_0$ ;  
Escolher uma temperatura inicial  $T > 0$ ;  
Enquanto o sistema não estiver resfriado faça  
  Efetuar  $L$  iterações de:  
    Escolher um vizinho aleatoriamente  $v \in v(s)$   
     $\Delta \leftarrow \text{objetivo}(v) - \text{objetivo}(s)$   
    Se  $\Delta < 0$  então  
       $s \leftarrow v$ ;  
    Senão  
       $s^* \leftarrow e^{-\Delta/T}$   
    Fim da busca interna  
  Reduzir a temperatura  
Fim do Enquanto  
Fim
```

**Figura 7** – Algoritmo básico do Simulated Annealing

**Fonte:** Adaptado de [NIKOLAEV and JACOBSON, 2010]

# Capítulo 3

## Trabalhos Relacionados

Até o presente momento, o problema RSA tem sido resolvido de forma exata. Contudo, devido à complexidade do problema, a resolução do mesmo tem se limitado a fatores como: matriz de tráfego, topologia da rede, quantidade de caminhos para cada demanda, quantidade de espectro disponível para atender as demandas, entre outros. Além disso, só é possível resolver o problema de forma exata para pequenas instâncias do problema, ou seja, para pequenas matrizes de tráfego, poucos caminhos possíveis para cada demanda, etc. Por outro lado, mesmo sob estas condições, ainda é possível levar horas de execução até encontrar a solução ótima.

### ***3.1 Modeling the routing and spectrum allocation problem*** **[VELASCO et.al, 2012]**

Neste trabalho os autores apresentam alguns modelos já conhecidos do problema. A partir disso, é proposto um novo modelo fazendo uso de conjuntos de canais pré-computados, tal estratégia diminui a complexidade do modelo do problema, pois retira do modelo todas as restrições relacionadas à contiguidade e, com isso, o torna mais fácil de ser resolvido. 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 e o tamanho das demandas e dos *slots*.

### ***3.2 Elastic Bandwidth Allocation in Flexible OFDM-Based Optical Networks*** **[CHRISTODOULOPOULOS et.al, 2011]**

Em [CHRISTODOULOPOULOS et.al, 2011], é adicionado mais um grau de dificuldade ao problema, pois este passa a definir também o nível de modulação utilizada pelo transmissor óptico. Também 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. Além disso, os autores utilizam a metaheurística *Simulated Annealing* para prover melhores ordenações das demandas, pois a sequência em que as demandas são servidas tem impacto na eficiência espectral.

### ***3.3 Energy efficiency analysis for flexible-grid OFDM-based optical Networks*** **[Vizcaíno et.al, 2012]**

Neste trabalho 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.

### ***3.4 Routing and Spectrum Allocation in Spectrum-sliced Elastic Optical Path Networks [WANG et.al, 2011]***

Em [Wang et.al, 2011], 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: Maior Caminho com Máximo Reuso (*Shortest Path with Maximum Reuse*) e Alocação de Espectro com Carga Balanceada (*Balanced Load Spectrum Allocation*).

## Capítulo 4

### Proposta da Dissertação

Conforme descrito na Seção 1.2, o objetivo deste trabalho é resolver o problema RSA utilizando metaheurísticas. Para alcançar este objetivo, os seguintes passos serão seguidos:

- Implementar os modelos do problema utilizando ILP.
- Desenvolver um método de construção para soluções iniciais.
- Definir a representação das soluções a ser utilizada.
- Definir uma ou mais estrutura de vizinhanças para o problema.
- Desenvolver um método de busca local.
- Implementar a metaheurística escolhida.

O ferramental tecnológico a ser utilizado no trabalho está descrito abaixo:

- IBM iLog CPLEX Optimization Studio: Ambiente de programação que será utilizado para implementar os modelos.
- Microsoft Visual C++ 2008 Express Edition: Ambiente de programação que será utilizado para implementar a metaheurística.
- C++: Linguagem de programação que será utilizada para implementar a metaheurística.
- OPL: Linguagem de programação que será utilizada para implementar os modelos do problema.

## Capítulo 5

### Cronograma

O cronograma abaixo contempla todas as atividades descritas nesta proposta a fim de alcançar os objetivos propostos.

Etapas	Meses											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Avaliação de soluções existentes	X	X	X									
Modelagem do Problema	X	X	X									
Desenvolvimento e implementação da metaheurística		X	X	X								
Testes e coleta de resultados				X	X	X	X	X	X			
Escrita de artigos						X	X	X	X	X	X	X
Escrita de Dissertação									X	X	X	
Defesa												X

Tabela 1 – Cronograma.



# Referências Bibliográficas

NIKOLAEV, G. A.; JACOBSON, H. S. **Simulated Annealing**. In: GENDREAU, M., POTVIN, J. (eds), Handbook of Metaheuristics, International Series in Operations Research & Management Science, Springer. Second Edition, 2010.

CHRISTODOULOPOULOS, K.; TOMKOS, I.; VARVARIGOS, E. **Elastic bandwidth allocation in flexible OFDM based optical networks**. IEEE J. Lightwave Technol. **29**, 1354–1366 (2011)

FEO, T. A.; RESENDE, M. G. C. **Greedy randomized adaptive search procedures**. Journal of Global Optimization, v.6, n.2, p. 109-133, 1995.

GENDREAU, M.; POTVIN, J-Y. **Handbook of Metaheuristics**. International Series in Operations Research & Management Science, Springer. Second Edition, 2010.

JINNO, M.; TAKARA, H.; KOZICHI, B.; TSUKISHIMA, Y.; SONE, Y. **Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: Architecture, benefits, and enabling technologies**. IEEE Communications Magazine, vol. 47, pp. 66–73, 2009.

NOROUZI, A.; ZAIM, A. H.; USTUNDAG, B. B. **An integrated survey in Optical Networks: Concepts, Components and Problems**. IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, VOL.11 No.1, January 2011

LOURENÇO, H. R.; MARTIN, O.; STÜTZLE, T. **Iterated Local Search: Framework and Applications**. In: GENDREAU, M., POTVIN, J. (eds), Handbook of Metaheuristics, International Series in Operations Research & Management Science, Springer. Second Edition, 2010.

SANTOS, A. F.; SANTOS, C. C.; DURÃES, G. M.; ASSIS, K. D. R. **Roteamento e Alocação de Espectro em Redes Ópticas: O Conceito SLICE**. XXX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações – SBrT’12. Brasília – DF, Setembro de 2012.

WANG, Y.; CAO, X.; HU, Q. **Routing and Spectrum Allocation in Spectrum-sliced Elastic Optical Networks**. In: Proceedings of IEEE INFOCOM, 2011.

VELASCO, L.; KLINKOWSKI, M.; RUIZ, M.; COMELLAS, J. **Modeling the routing and spectrum allocation problem for flexgrid optical networks**. Photon Netw Commun (2012)

VIZCAÍNO, J. L.; YE, Y.; MONROY, I. T. **Energy efficiency analysis for flexible-grid OFDM-based optical networks**. Journal of Computer Networks, Elsevier, 2012.