



Universidade Federal de Campina Grande  
Centro de Engenharia Elétrica e Informática  
Departamento de Engenharia Elétrica

BRUNO VINÍCIUS DE ARAUJO CORREIA

# **PLANEJAMENTO E OTIMIZAÇÃO DE REDES ÓPTICAS DE GRADE FIXA E FLEXÍVEL**

Campina Grande, Paraíba

Novembro, 2015

BRUNO VINÍCIUS DE ARAUJO CORREIA

# PLANEJAMENTO E OTIMIZAÇÃO DE REDES ÓPTICAS DE GRADE FIXA E FLEXÍVEL

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Comunicações Ópticas

Orientador: José Ewerton P. de Farias

Campina Grande, Paraíba

Novembro, 2015

BRUNO VINÍCIUS DE ARAUJO CORREIA

**PLANEJAMENTO E OTIMIZAÇÃO DE REDES  
ÓPTICAS DE GRADE FIXA E FLEXÍVEL**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica  
da Universidade Federal de Campina Grande  
como parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia  
Elétrica.

---

**José Ewerton P. de Farias**  
Orientador

Campina Grande, Paraíba  
Novembro, 2015

*Dedico este trabalho à minha família, a quem devo esse sonho realizado.*

# Agradecimentos

Se faz necessário agradecer as pessoas importantes que foram essenciais nessa fase da minha vida que termina com esse trabalho.

O primeiro agradecimento vai aos meus pais Wellington e Oneida, que são os pilares da minha formação. Exemplos de esforço, dedicação e afeto que me espelho todos os dias.

Ao meu irmão Pedro Victor, pelo companheirismo mostrado nos momentos de altos e baixos ao longo de minha trajetória.

À minha companheira Renally Leal por todo amor compartilhado ao longo desses anos.

À todos os professores do departamento de engenharia elétrica pelos ensinamentos repassados ao longo do curso, em especial ao professor José Ewerton por transmitir conhecimentos que vão além da sala de aula e que serão levados para o resto da vida.

Aos meus amigos de curso Carlos Ângelo, Ravi Barreto, André Fiuza, Rodrigo Nicodemos, Pablo Silvestre, João Marcelo, Juliano Leal, Luciano Freires, Talles Gonçalves e André Guimarães pelos momentos de alegria e frustração e por todas as noites de estudos em que não seriam possíveis sem o incentivo um do outro. Amizades que serão levadas com carinho para sempre.

*“Toda reforma interior e toda mudança para melhor dependem exclusivamente da aplicação do nosso próprio esforço.”*  
- Immanuel Kant

# Resumo

Este trabalho apresenta uma revisão sobre os problemas de projeto e otimização de redes ópticas utilizando multiplexação por divisão em comprimento de onda com grades espectrais fixas ou flexíveis. São descritos algoritmos para roteamento e alocação de comprimentos onda, que têm como finalidade minimizar a aplicação de recursos de transmissão. Para o problema de roteamento e alocação de espectro, descreve-se um algoritmo heurístico para a determinação das soluções ótimas para as solicitações de serviço.

**Palavras-chaves:** Multiplexação por divisão de comprimento de onda, Roteamento e alocação de espectro, Roteamento e designação de comprimento de onda.

# Abstract

This report presents an overview of planning and optimization problems in optical networks using wavelength division multiplexing or flexible spectral grids. Algorithms are described for routing and wavelength assignment, which are intended to minimize the use of transmission resources. For routing and spectrum allocation problem, an heuristic algorithm is described to determine the optimal solutions for service requests.

**Keywords:** Routing and spectrum allocation, Routing and wavelength assignment, Wavelength division multiplexing.



# Lista de ilustrações

Figura 1 – Transmissão através da técnica WDM. . . . .	14
Figura 2 – Representação geométrica de uma formulação LP. . . . .	19
Figura 3 – Representação geométrica de um problema ILP. . . . .	20
Figura 4 – Exemplo de solicitações de conexões em uma rede WDM. . . . .	25
Figura 5 – WDM de grade fixa e de grade flexível. . . . .	29
Figura 6 – Tela inicial do MatPlanWDM. . . . .	33
Figura 7 – Topologia física da rede óptica utilizada. . . . .	34
Figura 8 – Resultado do algoritmo HPSR2001minTransceivers para $\Lambda_1$ . . . . .	37

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Exemplo de um conjunto de parâmetros de transmissão . . . . .	30
Tabela 2 – Informações dos nós da topologia física da rede. . . . .	34
Tabela 3 – Informações das ligações da topologia física da rede. . . . .	35
Tabela 4 – Número de comprimentos de onda utilizados pela rede - Algoritmo 1 - $\Lambda_1$ . . . . .	38
Tabela 5 – Número de comprimentos de onda utilizados pela rede - Algoritmo 1 - $\Lambda_2$ . . . . .	39
Tabela 6 – Número de comprimentos de onda utilizados pela rede - Algoritmo 2 - $\Lambda_1$ . . . . .	40
Tabela 7 – Número de comprimentos de onda utilizados pela rede - Algoritmo 2 - $\Lambda_2$ . . . . .	41

# Lista de abreviaturas e siglas

ILP	Integer Linear Programming
LP	Linear Programming
NP	Nondeterministic Polynomial Time
RSA	Routing and Spectrum Allocation
RWA	Routing and Wavelength Assignment
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande
WDM	Wavelength Division Multiplexing

# Lista de símbolos

$x$	Variáveis de restrição
$i$	Número de funções de restrição
$\mathbf{A}$	Matriz $m \times n$
$\mathbf{b}$	Vetor $m$ -dimensional
$\mathbf{c}$	Vetor $n$ -dimensional
$V$	Conjunto de nós da rede
$E$	Conjunto de enlaces entre os nós da redes
$C$	Conjunto de comprimentos de onda por enlace
$W$	Número máximo de comprimentos de onda por enlace
$w$	Comprimento de onda utilizado
$l$	Enlace utilizado
$(s, d)$	Par de nós fonte/destino
$\Lambda_{sd}$	Matriz de tráfego
$x_{l,w}^{s,d}$	Variável de decisão
$M$	Número máximo de comprimentos de onda
$C'$	Conjunto de comprimentos de onda reduzido
$W'$	Número máximo de comprimentos de onda reduzido
$F_l$	Função custo de fluxo
$l'$	Alcance óptico
$(c)$	Custo do transceptor
$(r)$	Taxa de transmissão
$(b)$	largura de faixa das janelas espectrais
$(g)$	Banda de guarda

$(p, t)$	Par caminho/configuração do transceptor
$U$	Custos dos transceptores
$S$	Número de janelas espectrais utilizadas

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
1.1	Contextualização do Assunto	14
1.2	Motivação	15
1.3	Objetivos do trabalho	16
1.3.1	Objetivos Gerais	16
1.3.2	Objetivos específicos	16
1.4	Metodologia	16
1.5	Organização do Trabalho	17
<b>2</b>	<b>OTIMIZAÇÃO DE REDES</b>	<b>18</b>
2.1	Problema Geral de Otimização	18
2.2	Programação Linear	18
2.3	Programação Linear de Número Inteiro	19
2.4	Relação entre os problemas ILP e LP	20
2.4.1	Relaxamento LP	20
2.4.2	Envelope Convexo	21
2.5	Algoritmos Heurísticos e Meta-Heurísticos	21
2.6	Objetivo da Otimização, Objetivo Simples ou Múltiplo	22
<b>3</b>	<b>PROBLEMAS RWA</b>	<b>23</b>
3.1	Formulação de Problemas ILP RWA	23
3.2	Algoritmo de Relaxamento LP RWA	25
3.2.1	Formulação RWA Utilizando Função Custo	25
3.2.2	Função Custo de Fluxo	26
3.2.3	Perturbação Aleatória e Iteração de Correção e Arredondamento	27
3.3	Extensão do Problema RWA para Redes Práticas	27
<b>4</b>	<b>PROBLEMAS RSA</b>	<b>29</b>
4.1	Configuração de Transceptores	29
4.2	Geração de Possíveis Soluções	30
4.3	Algoritmo Heurístico RSA - Tráfego de Serviço Sequencial	31
<b>5</b>	<b>SIMULAÇÃO</b>	<b>33</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>43</b>

---

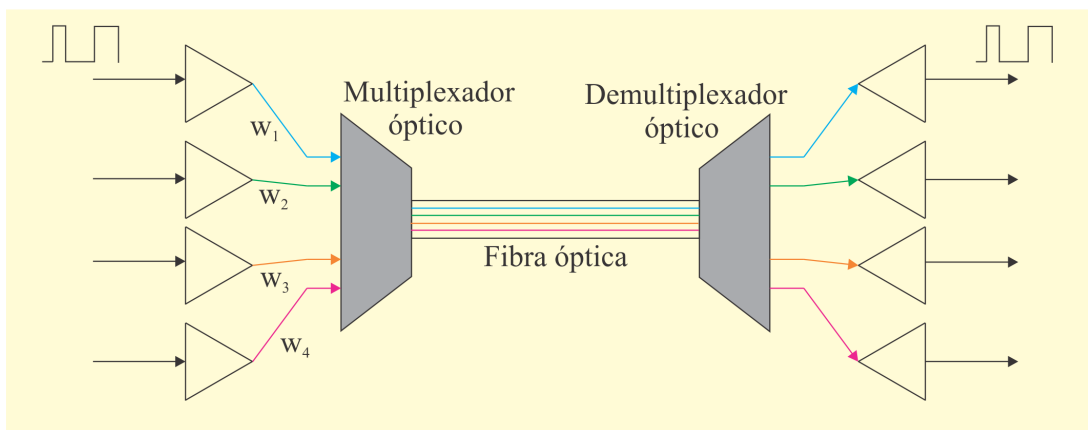
**Referências . . . . . 44**

# 1 Introdução

## 1.1 Contextualização do Assunto

Multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM - *Wavelength Division Multiplexing*) é a tecnologia mais comum utilizada para comunicação em redes ópticas (RAMASWAMI; SIVARAJAN, 2009). Em redes WDM os dados são transferidos através de todos os canais ópticos, chamados de caminhos ópticos, que podem passar por estágios de comutação intermediários e se espalham por múltiplas fibras consecutivas. É ilustrado um exemplo da técnica WDM através da figura 1. Quando os nós da rede não são capazes de realizar mudanças nos comprimentos de onda, o espectro é dividido em canais com larguras de banda específicos. Estabelecer um percurso requer a seleção do caminho e do canal (comprimento de onda). Essa técnica é amplamente utilizada em redes-núcleo mas, devido à baixa granularidade e inflexibilidade em atribuição de recursos, pesquisas estão sendo realizadas para encontrar tecnologias alternativas para a próxima geração das redes (TOMKOS et al., 2014).

**Figura 1** – Transmissão através da técnica WDM.



Uma abordagem que vem recebendo grande atenção é a de redes ópticas flexíveis, abordada em (XIA; FEVRIER; WANG., 2015). Com ela, o espectro é dividido em espaços que podem ser combinados para criar canais com largura de faixa desejada. Esse tipo de rede faz uso de transceptores de larguras de faixa variáveis e são capazes de ajustar dinamicamente vários parâmetros de transmissão tais como formato de modulação, taxa de transmissão, eficiência espectral, alcance da transmissão, margem de potência e técnica de correção progressiva de erros (FEC) empregada.



## 1.2 Motivação

Tanto para redes WDM de grade fixa quanto para redes flexíveis, é necessária a solução do problema de alocação de recursos para estabelecer conexões. Em redes WDM tradicionais, esses problemas de alocação correspondem ao roteamento e designação de comprimentos de onda, conhecidos como problemas de roteamento e atribuição de comprimento de onda (RWA - *Routing and Wavelength Assignment*) (VARVARIGOS; CHRISTODOULOPOULOS, 2014). Suas soluções resultam em seccionamento de caminhos e comprimentos de onda para criação do caminho óptico. Em redes ópticas flexíveis, existem problemas de roteamento e de alocação de espectro (RSA - *Routing and Spectrum Allocation*) (CHRISTODOULOPOULOS; VARVARIGOS, 2012b). Sem considerar a diferença de alocação de espectro, a escolha dos parâmetros da transmissão dos transceptores ajustáveis, presentes em redes flexíveis, afetam direta ou indiretamente a decisão de alocação. Isto se deve ao fato das configurações de transmissão dos transceptores se relacionarem com o alcance da transmissão, a taxa de transmissão e outros parâmetros, devendo todos eles serem incluídos no problema RSA (VARVARIGOS; CHRISTODOULOPOULOS, 2014). Devido aos graus de liberdade em redes ópticas flexíveis e sua interdependência, estabelecer conexões em redes flexíveis é mais complicado do que em redes WDM tradicionais (VARVARIGOS; CHRISTODOULOPOULOS, 2014).

A análise de alocação de recursos é feita através de duas alternativas de modelo de tráfego (CHRISTODOULOPOULOS; VARVARIGOS, 2012b). A primeira é feita na fase de planejamento, na ausência de tráfego. Nessa fase, as conexões não estão estabelecidas e são conhecidas. Essa análise é conhecida como problema de alocação de recursos estática (*offline*). A segunda análise é feita na fase operacional, em que novas requisições de conexões chegam dinamicamente e têm que ser estabelecidas levando-se em conta a utilização atual da rede, ou seja, suas conexões estabelecidas. Essa análise é conhecida como dinâmica (*online*). Problemas *offline* e *online* são da categoria de otimização da rede, conhecidos como problemas completos NP (*nondeterministic polynomial time*) (VELASCO, 2014).

A maneira comum de avaliar um algoritmo é baseada na análise do pior caso do número de operações aritméticas exigido durante a execução do algoritmo (KRISHNASWAMY; SIRVARAJAN, 2001). De acordo com essa análise, o algoritmo é considerado eficiente se ele puder encontrar uma solução em tempo polinomial para qualquer entrada, e um problema é considerado difícil se ele pertence à classe dos problemas completos NP, onde nenhum algoritmo de tempo polinomial é conhecido. Um algoritmo é executado em tempo polinomial se o número de operações elementares for usado em qualquer momento da entrada e o espaço usado é limitado por um polinômio do lado da entrada (CHRISTENSEN, 2007). Essa análise considera todas as possibilidades de entrada e mantém a complexidade daquela de pior caso, que pode ou não ser encontrada na realidade. Já a

análise do caso médio enfatiza a avaliação de desempenho do algoritmo para entradas reais médias, mas sofre da dificuldade de definir o caso médio.

## 1.3 Objetivos do trabalho

### 1.3.1 Objetivos Gerais

- (a) Revisão bibliográfica sobre aspectos das redes ópticas de transporte usando a tecnologia WDM na camada física;
- (b) Revisão bibliográfica sobre o paradigma conhecido como *Flexgrid Networks*, ou seja, redes ópticas com grades espectrais flexíveis.

### 1.3.2 Objetivos específicos

- (a) Estudo dos algoritmos clássicos aplicáveis à resolução de problemas de otimização de redes ópticas de transporte;
- (b) Análise do problema de roteamento e atribuição de comprimento de onda *offline* para redes WDM de grade fixa;
- (c) Estudo de abordagens úteis na solução do problema RWA;
- (d) Análise do problema de roteamento e alocação de espectro *offline*;
- (e) Estudo de heurísticas que solucionam o problema de alocação espectral;
- (f) Estudo de caso: uso de ferramenta computacional com código-fonte aberto para projeto e otimização de redes WDM ópticas de transporte com grades espectrais fixas.

## 1.4 Metodologia

A construção desse trabalho se deu através de uma ampla revisão da literatura sobre os temas abordados, através de livros e principalmente, de artigos atualizados sobre as novas tecnologias e tendências das redes ópticas, pertencendo a renomados pesquisadores da área. Quanto a questão de redes WDM de grade fixa, procurou-se aplicar os problemas e soluções apresentados no trabalho através de um ambiente computacional. Essa aplicação não abordou o tema de redes ópticas flexíveis devido à inviabilidade de obtenção de uma plataforma que fosse compatível com essa tecnologia.

## 1.5 Organização do Trabalho

O trabalho apresentará na seção (2) as formulações e seus detalhes para problemas de otimização em geral. Na seção (3) serão abordados os problemas de redes WDM de grade fixa com aplicação de dois algoritmos capazes de solucionar o problema e na seção (4) serão descritos os problemas provenientes de redes ópticas de grade flexível e um algoritmo heurístico para resolução de problemas de alocação de espectro. A seção (5) mostrará a simulação efetuada como os resultados obtidos a partir dela. Por último, na seção (6), será feita uma ponderação sobre os estudos efetuados e sobre os resultados obtidos ao longo do trabalho.

## 2 Otimização de Redes

### 2.1 Problema Geral de Otimização

As equações (2.1) e (2.2) apresentam a definição geral do problema de otimização:

$$\text{Minimizar: } f_0(x), \quad (2.1)$$

$$\text{sujeito a: } f_i(x) \leq b_i, i = 1, \dots, m, \quad (2.2)$$

em que  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in R^n$  são as variáveis de otimização,  $f_0: R^n \rightarrow R$  é a função de otimização, e  $f_i: R^n \rightarrow R, i = 1, 2, \dots, m$  são as funções de restrição (VARVARIGOS; CHRISTODOULOPOULOS, 2014). Pode-se ainda notar que problemas de minimização podem ser transformados em problemas de maximização com a função  $f_0$  negativa.

Existem certas classes de problemas para os quais já existem algoritmos eficientes para suas resoluções, como por exemplo problemas de otimização linear. Para problemas complexos existem algoritmos sofisticados que fornecem soluções exatas para problemas de pequena e média complexidade e soluções quase exatas para problemas mais complexos (CHRISTODOULOPOULOS; MANOUSAKIS; VARVARIGOS, 2009).

### 2.2 Programação Linear

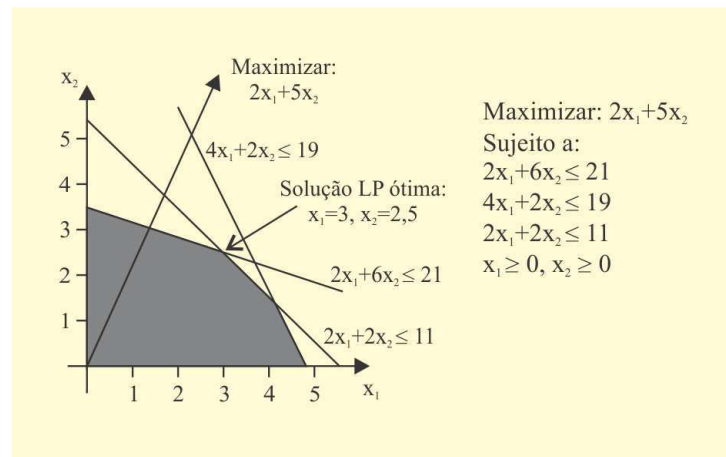
O problema geral de otimização utilizando programação linear (LP - *Linear Programming*) é definido através das equações (2.3) e (2.4):

$$\text{Minimizar: } \mathbf{c}^T \cdot \mathbf{x}, \quad (2.3)$$

$$\text{sujeito a: } \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} \leq \mathbf{b}, \mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in R^n, \quad (2.4)$$

em que  $\mathbf{A}$  é uma matriz  $m \times n$ ,  $\mathbf{c}$  é uma vetor  $n$ -dimensional e  $\mathbf{b}$  é um vetor  $m$ -dimensional. Para melhor entendimento do problema, é ilustrado um exemplo de programação linear com duas variáveis e sua representação geométrica, apresentado na figura 2.

As equações lineares de restrição são representadas pelas retas no plano bidimensional e o conjunto de restrições é definido pela região, mostrado em cinza, entre as curvas. A solução ótima é o ponto (3; 2,5) que corresponde ao vértice da região delimitada. Como a função exemplificada é linear, todos os resultados ótimos locais são ótimos globais. Através da formulação LP, a solução ótima se encontra nos vértices do poliedro, gerando grande

**Figura 2** – Representação geométrica de uma formulação LP.

número de algoritmos que solucionarão o problema (KRISHNASWAMY; SIRVARAJAN, 2001).

O algoritmo mais simples para resolver problemas através da formulação LP enumeram todos os vértices do poliedro, escolhendo o vértice de valor ótimo (VARVARIGOS; CHRISTODOULOPOULOS, 2014). Existem também maneiras mais eficientes de solucionar esses problemas. Um exemplo é o algoritmo clássico, chamado Simplex (CORNEJOS; TRICK, 1998), que se move de um vértice da região a outro quando tem valor igual ao maior que o anterior (maior para maximização e menor para minimização).

## 2.3 Programação Linear de Número Inteiro

O problema geral de otimização utilizando programação linear de números inteiros (ILP), é definido através das equações (2.5) e (2.6):

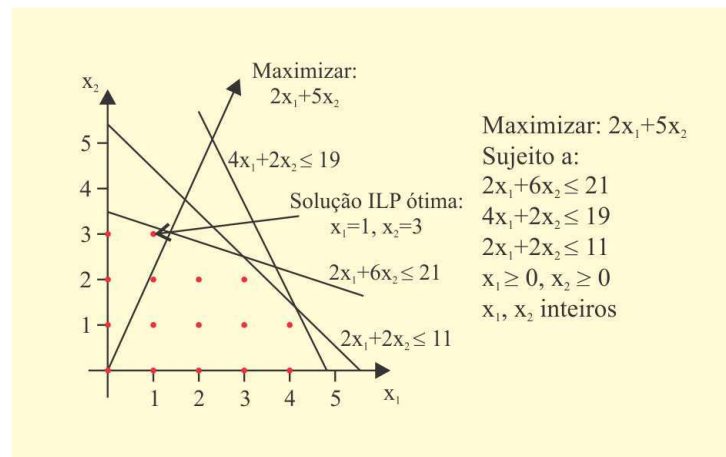
$$\text{Minimizar: } \mathbf{c}^T \cdot \mathbf{x}, \quad (2.5)$$

$$\text{sujeito a: } \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} \leq \mathbf{b}, \mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathbb{Z}^n. \quad (2.6)$$

A diferença entre esse problema e o anterior é que a variável  $x$  pertence ao conjunto dos inteiros. A figura 3 ilustra o mesmo problema, apresentado na figura 2, usando a formulação ILP.

Para esse tipo de problema, não existe garantia de que a solução ótima se encontrará no vértice do poliedro e, portanto, algoritmos como o Simplex não podem fornecer essa solução (OZDAGLAR; BERTSEKAS, 2003).

É possível utilizar um algoritmo simples para enumerar as soluções delimitadas e entre elas, através da função, escolher a de valor ótimo. Técnicas como *branch-and-bound* e *cutting plane* podem melhorar o tempo de execução médio e podem gerar soluções ótimas

**Figura 3** – Representação geométrica de um problema ILP.

para problemas de tamanho pequeno e médio. A primeira técnica utiliza a exploração do espaço da solução como uma estrutura de árvore e para essa exploração em um certo ramo quando se chega ao limite ou quando não são encontradas soluções melhores que as já fornecidas. A segunda técnica adiciona limites reduzindo o espaço da solução não descartando o valor ótimo e para a redução quando esse valor se encontra no vértice do poliedro (NEMHAUSER; SIGISMONDI, 1992).

Problemas RWA e RSA são considerados de formulação ILP pois, quando se necessita determinar a utilização de recursos como comprimento de onda e caminho, eles possuem valores inteiros. Na seção (??) serão abordadas ferramentas teóricas que podem ajudar na solução de problemas práticos.

## 2.4 Relação entre os problemas ILP e LP

### 2.4.1 Relaxamento LP

Com essa ferramenta é possível resolver um problema ILP reduzindo-o a um problema LP e utilizar uma das técnicas já mencionadas, a exemplo do Simplex.

Resolver o problema de relaxamento LP traz benefícios. O primeiro de todos é no caso da solução já se encontrar em valores inteiros (vértices do poliedro estarem em pontos inteiros). São casos raros mas é possível aumentar sua probabilidade de acontecer através do uso de diferentes técnicas. Ainda existe a opção de utilizar a solução com valores que não sejam inteiros para, usando métodos de arredondamento, obter soluções aproximadas para o problema ILP (KRISHNASWAMY; SIRVARAJAN, 2001).

### 2.4.2 Envelope Convexo

Dado um problema ILP, o mesmo conjunto de soluções inteiras reais pode ser obtido por diferentes conjuntos de restrições. O envelope convexo é o menor conjunto de restrições que envolvem todas as soluções inteiras do problema, sendo um poliedro  $n$ -dimensional com seus vértices inteiros (GRAHAM; YAO, 1983). Conhecido esse envelope, pode-se resolver esse problema através de técnicas para casos LP. No entanto, encontrar as restrições para formar um poliedro com vértices inteiros é difícil (VARVARIGOS; CHRISTODOULOPOULOS, 2014).

## 2.5 Algoritmos Heurísticos e Meta-Heurísticos

Já foram mencionadas várias formas de abordar problemas complexos, que consistem em definir boas formulações e usar técnicas como *branch-and-cut* (cresça e descarte) ou relaxamento LP. A próxima forma de abordagem é um método não exato, possibilitando a solução ótima do problema ser encontrada em um espaço de tempo finito (geralmente muito grande), o método heurístico (TOMKOS et al., 2014).

No algoritmo heurístico não há garantia que será encontrada a solução ótima do problema em tempo aceitável, mas pode produzir soluções muito próximas do ideal, trocando a melhoria do resultado por velocidade. Esse algoritmo está associado a um tipo específico de problema. Uma classe desses algoritmos, conhecido como heurístico *greedy*, é muito utilizada em problemas de otimização de redes. Essa classe realiza, a cada passo, a criação de uma solução ótima local com o intuito de encontrar uma solução ótima global (VARVARIGOS; CHRISTODOULOPOULOS, 2014).

Meta-heurístico é um método utilizado para resolver problema de otimização em geral (KOKASH, 2005). É um processo iterativo sofisticado que modifica, quando necessário, o heurístico para produzir diferentes soluções além das já fornecidas pelo heurístico. Métodos meta-heurísticos populares utilizam algoritmos genéticos (ou evolucionais), busca tabu, redes neurais entre outros.

Problemas estáticos de alocação de recursos, como RWA e RSA *offline* que envolvem estabelecer múltiplas conexões simultaneamente, podem ser solucionados usando algoritmos heurísticos ou meta-heurísticos. Dependendo do problema, a alocação de recursos ótima pode ser encontrada se as conexões estiverem sendo apresentadas na ordem certa, mas o número de ordens cresce exponencialmente e não podem ser todos verificados. Algoritmos meta-heurísticos podem ser usados para busca em ordens diferentes.

## 2.6 Objetivo da Otimização, Objetivo Simples ou Múltiplo

Uma importante questão quando se formula problemas de alocação de recursos em redes ópticas é a escolha do objetivo de otimização. No entanto, em muitos casos é necessário considerar mais de um objetivo, como o número de transceptores e o número de comprimentos de onda utilizado. Para esses casos, nenhuma solução singular encontrada pode satisfazer à solução geral do problema. Nesse caso temos o que se denomina frente de soluções de Pareto (ou não dominados), significando que o conjunto de soluções não pode ser melhorado em um objetivo sem detrimento do(s) outro(s) (CARAMIA; DELL'OLMO, 2008).

Algoritmos de otimização multi-objetivos existem porém são pouco eficientes (VARVARIGOS; CHRISTODOULOPOULOS, 2014). No entanto, a forma mais habitual de trabalhar com esse tipo de problema é definindo um único objetivo como uma combinação ponderada de múltiplos objetivos e usar um método para solução de objetivo singular. Como exemplo, supondo  $w$  como coeficiente de ponderação, é possível formular o problema de minimização do número de transceptores  $N_t$  e de comprimentos de onda  $N_w$ , como mostrado na equação (2.7).

$$\text{Minimizar: } (w \cdot N_t) + [(1 - w) \cdot N_w]. \quad (2.7)$$

Adotando um intervalo entre 0 e 1 para  $w$  e usando um algoritmo de otimização para objetivo singular, é possível solucionar o problema e obter uma frente de soluções de Pareto.



## 3 Problemas RWA

Nessa seção será abordada a aplicação das técnicas apresentadas nas seções (2.3), (2.4) e (2.5) para resolução de problemas RWA para redes WDM com grade fixa. O principal parâmetro em uma rede WDM com grade fixa é a rota estabelecida entre os nós intermediários para que o sinal permaneça no domínio óptico da fonte até o destino. É possível planejar uma rede WDM através de uma função com dois parâmetros, um sendo o conjunto de nós presentes na rede e outro sendo o conjunto de enlaces, de fibra única, entre esses nós, com comprimentos de onda distintos. Também é assumido que para esse tipo de planejamento, o tráfego da rede é conhecido e é apresentado em forma matricial (OZDAGLAR; BERTSEKAS, 2003). O principal objetivo dos algoritmos é encontrar uma solução para o tráfego que utilize o menor número de comprimentos de onda. Como limitações do problema, os caminhos ópticos que compartilham a mesma ligação (*link*) não podem ter o mesmo comprimento de onda e devem permanecer com o mesmo comprimento de onda entre a fonte e o destino, pois admite-se que os nós da rede não possuem capacidade de conversão de comprimento de onda.

### 3.1 Formulação de Problemas ILP RWA

A formulação de um problema ILP RWA é apresentada nesta seção. O problema envolve as seguintes variáveis:

- $V$ : conjunto de nós da rede;
- $E$ : conjunto de enlaces entre os nós da rede;
- $C$ : conjunto de comprimentos de onda livres em cada enlace;
- $W$ : número máximo de comprimentos de onda por enlace;
- $w$ : comprimento de onda utilizado;
- $l$ : enlace utilizado;
- $(s, d)$ : par de nós fonte/destino;
- $\Lambda_{sd}$ : matriz de tráfego composta de números inteiros;
- $x_{l,w}^{s,d}$ : variável de decisão que recebe valor 1 se existe um caminho óptico disponível para o comprimento de onda especificado entre os nós fonte/destino e 0 caso contrário;

- $M$ : número de comprimentos de onda utilizados pela rede. Esse valor deve estar entre 0 e  $W$  e deve ter o menor valor possível.

A minimização da variável  $M$  possui as seguintes restrições:

- Atribuição de comprimentos de onda distintos:

$$\sum_{s,d} x_{l,w}^{s,d} \leq 1, \text{ para todo } l \in E \text{ e } w \in C. \quad (3.1)$$

- Restrições de fluxo de entrada:

$$\sum_{l \in s^+} \sum_w x_{l,w}^{s,d} = \Lambda_{sd}, \text{ para todo } (s, d) \in V^2. \quad (3.2)$$

- Restrições de fluxo de saída:

$$\sum_{l \in d^-} \sum_w x_{l,w}^{s,d} = \Lambda_{sd}, \text{ para todo } (s, d) \in V^2. \quad (3.3)$$

- Restrições de continuidade de comprimento de onda:

$$\sum_{l \in n^+} x_{l,w}^{s,d} = \sum_{l \in n^-} x_{l,w}^{s,d}, \text{ para todo } (s, d) \in V^2, n \in V \neq s, d, \text{ e } w \in C. \quad (3.4)$$

- Utilização máxima de comprimento de onda por enlace:

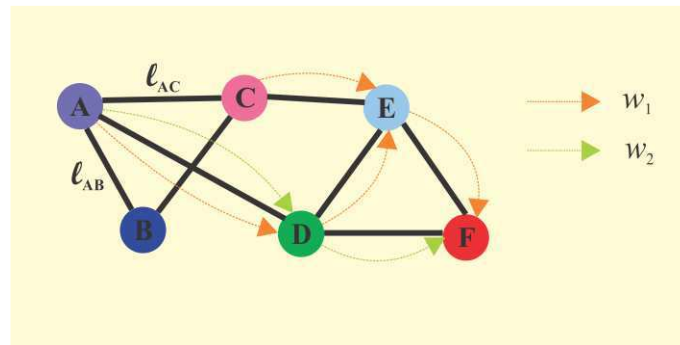
$$M \geq w \cdot \sum_{s,d} x_{l,w}^{s,d}, \text{ para todo } l \in E, \text{ e } w \in C. \quad (3.5)$$

- Restrições de números inteiros:

$$x_{l,w}^{s,d} \in \{0, 1\}, M \in \{1, 2, \dots, W\}. \quad (3.6)$$

A figura 4 apresenta um exemplo que ilustra requisições de transmissão e as restrições formuladas nas equações (3.1) a (3.6) para uma rede WDM qualquer. Nela são mostradas três requisições de transmissão através dos pares de nós (A,E), (A,F) e (C,F). Percebe-se que o enlace  $l_{AD}$  possui dois comprimentos sendo utilizados respeitando a restrição da equação (3.1). Nota-se também que para todas as requisições, a restrição de continuidade de comprimento de onda da equação (3.4) é atendida e que, para esse caso, a utilização máxima de comprimento de onda por enlace da equação (3.5) possui valor  $M = 2$ , pertencente ao enlace  $l_{AD}$ .

Ferramentas que utilizam e solucionam a formulação ILP possuem bom desempenho para redes de tamanho médio (OZDAGLAR; BERTSEKAS, 2003). Quando é adicionado problemas como agregação do tráfego (*grooming*) por exemplo, o bom desempenho dessas ferramentas é reduzido para problemas de pequena complexidade (ZANG; JUE; MUKHERJEE, 2000).

**Figura 4** – Exemplo de solicitações de conexões em uma rede WDM.

## 3.2 Algoritmo de Relaxamento LP RWA

Esse tipo de algoritmo é composto de quatro passos (CHRISTODOULOPOULOS; MANOUSAKIS; VARVARIGOS, 2009). No primeiro passo é computado um conjunto de caminhos para rotear a conexão solicitada. Esse passo de pré-processamento utiliza tempo polinomial para ser efetuado. O segundo passo consiste na utilização da programação linear sem restrições de números inteiros. Nessa fase é utilizado um conjunto menor de comprimentos de onda, com número máximo  $W'$ . Para obter esse valor utiliza-se o mesmo método da seção (3.1), sendo que o número de comprimentos de onda para esse caso será igual ou menor ao encontrado anteriormente. A formulação LP, com esse novo parâmetro, é solucionada utilizando o algoritmo Simplex. Se a solução encontrada não pertencer ao conjunto dos números inteiros, o algoritmo passa para o terceiro passo, onde usa iterações de correção e arredondamento para produzir uma resposta inteira. Se no terceiro passo não for encontrada uma resposta satisfatória, faz-se um incremento de  $W'$  no quarto passo e retoma-se o processo de solução dos segundo e terceiro passos (KRISHNASWAMY; SIRVARAJAN, 2001),(VELASCO, 2014).

### 3.2.1 Formulação RWA Utilizando Função Custo

No segundo passo desse algoritmo, a formulação tem como objetivo minimizar o número máximo de comprimentos de onda utilizados, através da minimização das funções custo de fluxo. As variáveis utilizadas são:

- $V$ : conjunto de nós da rede;
- $E$ : conjunto de ligações entre os nós da rede;
- $C'$ : conjunto reduzido de comprimentos de onda disponíveis nas ligações;
- $W'$ : número reduzido máximo de comprimentos de onda por ligação;
- $w_l$ : comprimento de onda utilizado na ligação  $l$ ;

- $(s, d)$ : par de nós fonte/destino;
- $\Lambda_{sd}$ : matriz de tráfego composta de números inteiros;
- $x_{p,w}$ : variável de decisão que é igual a 1 se o caminho  $p$  pode ocupar o comprimento de onda  $w$  e 0 para caso contrário;
- $F_l$ : função custo de fluxo e deve ter o menor valor possível;

A minimização da função  $F_l$  possui as seguintes restrições:

- Atribuição de comprimentos de onda distintos:

$$\sum_{\{p|l \subset p\}} x_{p,w} \leq 1, \text{ para todo } l \in E \text{ e } w \in C'. \quad (3.7)$$

- Restrições de tráfego de entrada:

$$\sum_{p \in P_{sd}} \sum_w x_{p,w} = \Lambda_{sd}, \text{ para todo } (s, d) \in V^2. \quad (3.8)$$

- Restrições da função custo de fluxo:

$$F_l \geq f(w_l) = f \left( \sum_{\{p|l \subset p\}} \sum_w x_{p,w} \right) \text{ para todo } l \in E. \quad (3.9)$$

- As restrições de números inteiros são relaxadas para:

$$0 \leq x_{p,w} \leq 1 \text{ para todo } p \in P \text{ e } w \in C'. \quad (3.10)$$

### 3.2.2 Função Custo de Fluxo

A função custo de fluxo escolhida para esse caso é apresentada na equação (3.11) (VARVARIGOS; CHRISTODOULOPOULOS, 2014):

$$F_l = f(w_l) = \frac{w_l}{W' + 1 - w_l}, \quad 0 \leq w_l \leq W' \quad (3.11)$$

Essa função tem como característica sua atenuação à medida que a ligação se torna congestionada. Essa particularidade força a utilização de várias ligações de pequeno congestionamento ao invés da utilização de poucas ligações perto do nível de saturação (VARVARIGOS; CHRISTODOULOPOULOS, 2014).

Para utilização de uma ferramenta que solucione o problema, aproxima-se essa função não linear por uma linear seccional. Essa aproximação tem os mesmos valores inteiros da função não linear, podendo ainda ser resolvida pelo método Simplex para a maior parte dos casos, isso porque os vértices da função não linear geralmente tendem a ser os vértices da função linear e esses tendem a ser números inteiros.

### 3.2.3 Perturbação Aleatória e Iteração de Correção e Arredondamento

Nessa seção são apresentadas três técnicas que são utilizadas pelo algoritmo mostrado na seção (3.2) e apresentados em (CHRISTODOULOPOULOS; MANOUSAKIS; VARVARIGOS, 2009). A primeira que será abordada é a perturbação aleatória. No caso do algoritmo de relaxamento LP RWA, se utiliza uma função custo de fluxo. Essa função tem como restrição o somatório dos custos da ligação que compõe o caminho óptico. A partir dessa informação, é possível afirmar que uma requisição efetuada por mais de um guia de luz tem a soma das primeiras derivadas iguais às ligação nesse guia de luz. Dessa forma, para evitar que isso ocorra, é necessário diminuir essa probabilidade multiplicando por um número próximo de 1 a inclinação da função em cada enlace, formando inclinações particulares para cada caminho óptico.

A segunda técnica utilizada foi a iteração de correção. É possível utilizá-la em soluções que não são completamente pertencentes aos números inteiros. Em posse da solução, se fixa as variáveis que já são inteiras, tratando-as como finais, e o problema é solucionado reduzindo para as variáveis restantes. Como essa técnica não aumenta o custo da função de fluxo, ao se encontrar uma solução completamente inteira, pode-se afirmar que essa é a solução ótima. Porém somente o uso dessa técnica não garante que essa solução seja encontrada.

A terceira técnica é utilizada após a iteração de correção não conseguir gerar melhores soluções. Nela se arredonda o valor mais próximo de 1 para 1 e continua-se a resolver o problema. Com esse arredondamento, o valor de um objeto é aumentado e nesse processo, pode-se aumentar a função custo, não mais garantindo a solução ótima.

## 3.3 Extensão do Problema RWA para Redes Práticas

Nas seções anteriores foram abordados casos básicos para demonstrar algoritmos usados para solucionar problemas RWA. Agora será feita uma análise utilizando problemas mais práticos de redes WDM com grade fixa.

Ferramentas que utilizam uma etapa de pré-cálculo dimensionam melhor que técnicas sem esse passo. Ela tem como desvantagem a possibilidade de não se encontrar a solução ótima pois essa solução depende do conjunto de enlaces que a satisfazem se encontrarem na etapa de pré-cálculo.

Como caminhos maiores acarretam em maior uso de números de comprimento de onda e devido à restrição de conversão de comprimento de onda, geralmente a solução ótima se encontra nos menores percursos. Portanto algoritmos de menor caminho, quando não obtêm uma solução ótima, geralmente produzem soluções próximas do ideal. Com o incremento de problemas adicionais que serão mencionados à frente, algoritmos

heurísticos tem um melhor desempenho comparado com algoritmos ILP (VARVARIGOS; CHRISTODOULOPOULOS, 2014).

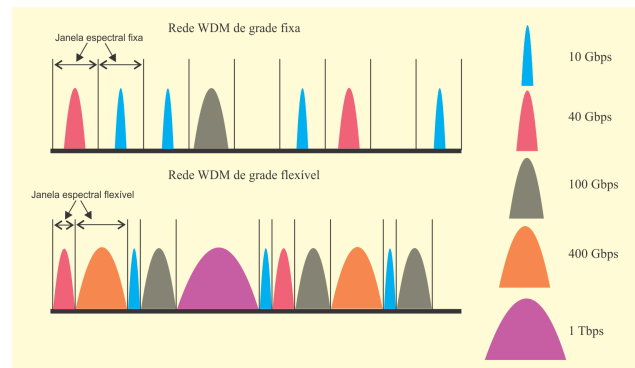
Para uma abordagem mais prática podem ser adicionadas imperfeições da camada física (PLI - *Physical Layer Impairment*) na rede WDM, como dispersão, interferência inter-canais (*crosstalk*), entre outros. A inclusão desse parâmetros afeta a qualidade da transmissão (QoT - *Quality of Transmission*) resultando em um problema mais complexo, conhecido como IA-RWA (*Impairment-aware-RWA*). Existem diversos algoritmos para solucionar esse problema, sendo os principais aqueles que consideram o pior caso do cenário PLI e aqueles que calculam os efeitos dos PLI's para utilização em uma determinada rede. O primeiro caso divide o problema, solucionando a parte IA e RWA em separado. Para esse caso, é possível solucionar a parte RWA através de algum algoritmo comum. No segundo caso, o algoritmo evita interferência e utiliza caminhos ópticos que seriam descartados através da primeira abordagem. Como existe uma dependência entre esses parâmetros, a complexidade dessa forma de solução é muito maior, porém gera resultados mais satisfatórios (IYER; SINGH, 2012).

Para satisfazer ao aumento da demanda de tráfego atual, tecnologias em redes WDM vem sendo incorporadas. Técnicas como modulação avançada e detecção coerente aumentam consideravelmente a taxa de transmissão. Com essas ferramentas, adicionamos mais complexidade ao problema, pois agora se trabalha com diferentes taxas de transmissão e tipos de modulação. Esse caso é conhecido como sistemas WDM MLR (WDM *Mixed-line-rate*). A complexidade adicionada nesse caso deve-se a necessidade usar-se diferentes tipos de transceptores (CHRISTODOULOPOULOS; MANOUSAKIS; VARVARIGOS, 2011). Por outro lado, com o uso de detecção coerente que utilizam transceptores de altas taxas, o problema IA é em geral resolvido com o uso intenso de processadores digitais de sinais.

## 4 Problemas RSA

Nesta secção serão abordadas redes ópticas de grade flexível e os problemas relacionados a roteamento e alocação de espectro (RSA - Routing and Spectrum Allocation). O conceito de grade flexível consiste em canais com larguras de faixas dependentes das taxas de transmissão, conforme ilustrado na figura 5 (TOMKOS et al., 2014). Devido a essa característica, faz-se necessário o uso de transceptores flexíveis, que levam em conta alguns parâmetros como taxa de símbolos, tipo de modulação, entre outros. Portanto para estabelecer uma conexão nesse tipo de rede, é necessário a configuração dos transceptores e dos *switches* para uma correta separação das janelas espectrais, como apresentado em (CHRISTODOULOPOULOS; VARVARIGOS, 2012a).

**Figura 5** – WDM de grade fixa e de grade flexível.



Devido as diversas variáveis presentes em problemas RSA (configurações dos transceptores, seleção dos caminhos, necessidade de regeneradores), trabalhar com essas variáveis relacionadas, através por exemplo de uma formulação ILP mencionada anteriormente, diminui muito sua eficiência. Portanto o objetivo é simplificar a dependência dessa variáveis através do desacoplamento, sem perda da solução ótima.

### 4.1 Configuração de Transceptores

Para modelar redes ópticas de grade flexível, é necessário introduzir o conceito de alcance óptico, que é a distância máxima de transmissão para um valor de QoT aceitável (KLONIDIS et al., 2015). Esse alcance está relacionado com todos os parâmetros, portanto o número de combinações possíveis é grande. Novamente, a redução desse número é a melhor maneira para se encontrar uma solução ótima em tempo aceitável.

A principal maneira de simplificação é através do cálculo do alcance da transmissão  $l'$  através de uma função que relaciona o custo do transceptor flexível ( $c$ ), a taxa de transmissão ( $r$ ), número de janelas com largura de faixa ( $b$ ), banda de guarda entre

janelas ( $g$ ),  $l' = f_c(r, b, g)$ . Essa banda de guarda reduz o crosstalk e aumenta o alcance da transmissão.

Através do uso dessa função, pode-se determinar o conjunto de parâmetros da transmissão. É possível utilizá-lo para apresentar dados de redes de grade flexível e de redes de grade fixa. Ele consiste em apresentar os parâmetros para cada configuração de transceptor especificado (CHRISTODOULOPOULOS; VARVARIGOS, 2012b). No exemplo mostrado na tabela 1 três conjuntos de parâmetros para uma rede MLR WDM com transceptores de 10/40/100 Gbps são mostrados.

**Tabela 1** – Exemplo de um conjunto de parâmetros de transmissão

Config. do transceptor	Alcance da transmissão	Taxa de transmissão	Largura de faixa	Banda de guarda	Custo do transceptor
10 Gbps	1750 km	10 Gbps	50 GHz	0 GHz	1
40 Gbps	1800 km	40 Gbps	50 GHz	0 GHz	3
100 Gbps	900 km	100 Gbps	50 GHz	0 GHz	6

## 4.2 Geração de Possíveis Soluções

Primeiramente, se utiliza o algoritmo de menor caminho para encontrar um número  $k$  de ligações entre a fonte e o destino ( $s, d$ ). Através da distância entre os nós da rede, é possível definir quais configurações de transmissão podem ser utilizados naquele caminho. Para um conjunto de parâmetros ser aceito como possível solução, o seu alcance  $l_t$  deve ser maior que a maior distância entre os nós utilizados na transmissão. Os regeneradores são colocados nos nós antes de atingirem o alcance máximo (VARVARIGOS; CHRISTODOULOPOULOS, 2014).

Através de cada alternativa de rota e configuração utilizada ( $p, t$ ), calculam-se os custos dos transceptores e a quantidade de espectro utilizada nessa transmissão. Com uma comparação entre esses dois fatores, reduz-se o número de combinações de possíveis soluções sem excluir a solução ótima. A equação (4.1) mostra essa comparação.

$$(p, t) > (p, t') \text{ se } U_{p,t} \leq U_{p,t'} \text{ e } S_{p,t} \leq S_{p,t'} \quad (4.1)$$

Com um número reduzido de configurações para cada possível caminho, passa-se para a próxima fase do processo que será detalhada.



### 4.3 Algoritmo Heurístico RSA - Tráfego de Serviço Sequencial

Dado um conjunto de configurações de transmissão para cada caminho, o algoritmo deve selecionar um desses caminhos para alocação de espectro que suprirá a demanda exigida. Tomando  $U$  os custos dos transceptores e  $S$  o número máximo de janelas espectrais usadas, o objetivo é minimizar a função (4.2) otimizando ambos os parâmetros.

$$\text{Minimizar: } f(w) = w \cdot S + (1 - w) \cdot U \quad (4.2)$$

É possível formular esse problema como ILP multi-objetivos (CHRISTODOULOPOULOS; VARVARIGOS, 2012b). São utilizadas variáveis de decisão  $x_{p,t}$  para a escolha do caminho para cada requisição e variáveis de frequência  $f_{p,t}$  para alocação do espectro. A formulação ILP gera bons resultados para pequenos problemas e necessita da abordagem heurística para problemas mais complexos.

Em relação a utilização do espectro de frequência, ele é representado através de três vetores de estado, com dimensão máxima de tamanho  $F$ , que é o número máximo de janelas espectrais no sistema. Existem três classificações para uma janela espectral, sendo elas:

- Janela livre ( $u_f$ );
- Janela em utilização para transmissão de dados ( $u_d$ );
- Janela em utilização como banda de guarda ( $u_g$ ).

As regras para uso dessas janelas consistem em restrições. O cálculo através das operações vetoriais associativas é mostrado através das equações (4.3) e (4.4).

- Janelas espectrais em utilização para transmissão de dados não podem ser requisitadas por um novo caminho óptico flexível;
- Janelas espectrais livres podem ser requisitados por um novo caminho óptico flexível;
- Janelas espectrais livres e de banda de guarda podem ser requisitadas para banda de guarda por um novo caminho óptico flexível.

$$u_f \oplus u_d = u_d, u_f \oplus u_g = u_g, u_f \oplus u_f = u_f, \quad (4.3)$$

$$u_g \oplus u_g = u_g, u_d \oplus u_d = u_d, u_d \oplus u_g = u_d \quad (4.4)$$

O algoritmo heurístico sequencial inicia com uma rede vazia e com todos os vetores de utilização de enlace inicializados com janelas espectrais livres. O parâmetro de custo do transceptor  $U$  e número máximo de janelas  $S$  inicializam com 0. Atende-se uma solicitação de conexão por vez, escolhendo um percurso dentro de todos os candidatos possíveis e atualizando os valores de custo e número de janelas espectrais. Com esses parâmetros atualizados, passa-se para a próxima solicitação. Em seguida, os vetores de utilização são calculados para a solicitação  $(s, d)$ , para o par caminho-parâmetros de transmissão  $(p, t)$  e para cada subcaminho  $m$ , através das equações (4.3) e (4.4). No passo seguinte, o vetor de utilização do subcaminho é examinado com a finalidade de encontrar o caminho óptico. Uma vez encontradas as janelas espectrais para todos os subcaminhos, faz-se o cálculo do custo de tempo. Uma vez encontrados todos os candidatos de caminho/parâmetros de transmissão, escolhe-se a alternativa que minimiza os parâmetros de otimização.

O algoritmo termina quando são computadas todas as solicitações, retornados: todos os objetivos finais, roteamento e alocação de espectro, para cada par fonte-destino. Além da solução do problema RSA, o algoritmo também escolhe a configuração do transceptor selecionando as configurações de transmissão que serão utilizadas em cada um.

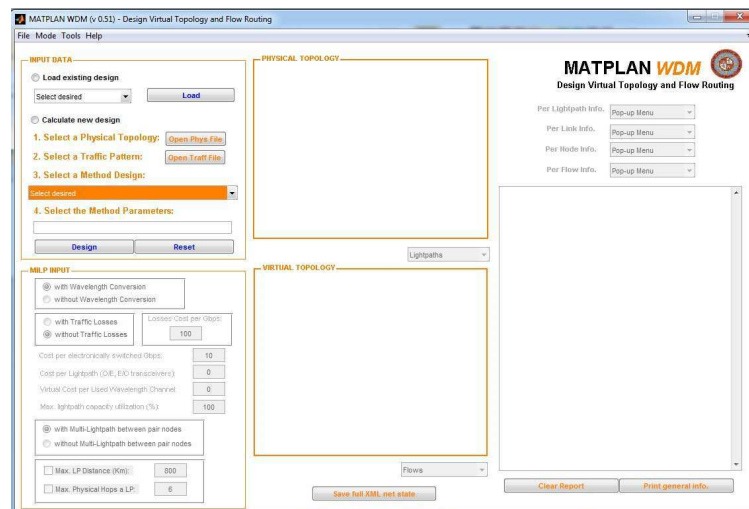
Ferramentas computacionais que auxiliam o planejamento e a otimização de redes ópticas são atualmente disponíveis. Por exemplo, com o ambiente computacional Mantis (KRETSIS, 2013), o usuário pode definir a topologia da rede, a matriz de tráfego, os parâmetros de investimento inicial/custo operacional (CAPEX/OPEX), escolher parâmetros de configuração básicos e usar uma biblioteca de algoritmos para planejar, operar, ou avaliar uma rede óptica.

## 5 Simulação

Os algoritmos estudados neste trabalho podem ser avaliados por meio de simulação computacional. Ambientes computacionais tais como Mantis (KRETSIS, 2013) e Cisco Transport Planner (CISCO..., 2011) são ferramentas profissionais úteis para o planejamento, otimização e operação de redes ópticas. Esses ambientes não são disponibilizados em versões acadêmicas. Neste capítulo são apresentados resultados de simulações com redes ópticas usando a plataforma MatPlanWDM (PAVON-MARINO et al., 2007), (PAVON-MARINO et al., 2008). Essa plataforma foi desenvolvida na Universidade Técnica de Cartagena. Trata-se de uma ferramenta para planejamento de redes multicamada WDM baseado em MATLAB e é publicamente disponível, sendo voltada para uso em pesquisa e como material educacional. Essa ferramenta trabalha apenas com redes WDM de grade fixa.

Esse programa tem como parâmetros de entrada a topologia física da rede, a matriz de tráfego e o algoritmo utilizado para o planejamento e otimização da rede. Seus parâmetros de saída são divididos em quatro categorias. A primeira gera as informações sobre os caminhos ópticos criados, como distância e tráfego transportado. A segunda categoria gera informações sobre as ligações, sendo elas: utilização de comprimentos de onda e tráfego roteado. A terceira gera informações sobre os nós da rede e a quarta sobre seu fluxo. Na figura 6 é possível visualizar no canto esquerdo os parâmetros de entrada e no canto direito os parâmetros de saída.

**Figura 6** – Tela inicial do MatPlanWDM.

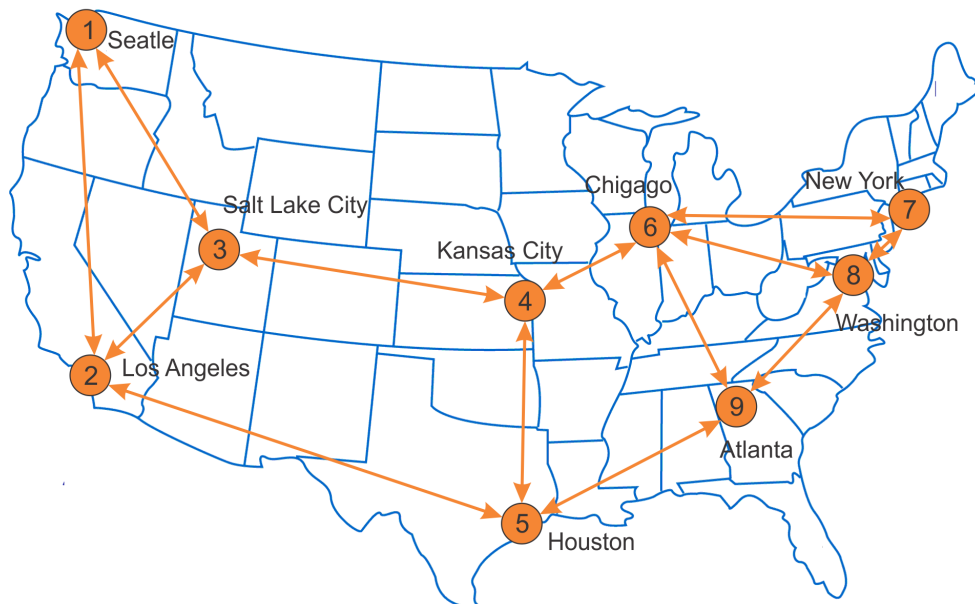


Esse programa não possui uma grande variedade de algoritmos, sendo apresentados apenas dois. Nenhum desses algoritmos utilizam a totalidade das abordagens expostas nesse trabalho, apenas uma parte delas. Portanto, os resultados gerados nessas simulações

são de caráter complementar para um melhor entendimento do assunto. Ainda pode-se frisar que existe a possibilidade de criação de algoritmos específicos que podem ser incorporados ao programa.

Como primeiro parâmetro de entrada, seleciona-se a topologia física da rede. O arquivo INTERNET2net foi utilizado em todas as simulações. Ele possui um arranjo de nós, correspondendo a uma rede real norte americana envolvendo nove cidades. A topologia pode ser observada na figura 7 e as informações contidas nesse arquivo são listadas nas tabelas 2 e 3. Ainda em relação a topologia, foi utilizada uma taxa de transferência de 10 Gbps por caminho óptico.

**Figura 7** – Topologia física da rede óptica utilizada.



**Tabela 2** – Informações dos nós da topologia física da rede.

Número do nó	Nome do nó	Posição do nó	População do nó	Fuso-horário do nó
1	Seattle	(-122.33,47.61)	3309347	-8
2	Los Angeles	(-118.25,34.05)	12875587	-8
3	Salt Lake City	(-111.88,40.75)	1099973	-7
4	Kansas City	(-94.59,39.11)	1985429	-6
5	Houston	(-95.38,29.76)	5628101	-6
6	Chicago	(-87.63,41.88)	9524673	-6
7	New York	(-74.00,40.72)	18815988	-5
8	Washington	(-77.04,38.90)	5306565	-5
9	Atlanta	(-84.39,33.76)	5278904	-5

**Tabela 3** – Informações das ligações da topologia física da rede.

Número da ligação	Nó de origem	Nó de destino	Comprimento da ligação (km)	Número de comprimentos de onda
1	6	7	1400	40
2	7	6	1400	40
3	7	8	278	40
4	8	7	278	40
5	6	8	905	40
6	8	6	905	40
7	8	9	700	40
8	9	8	700	40
9	6	9	1045	40
10	9	6	1045	40
11	4	6	690	40
12	6	4	690	40
13	4	6	689	40
14	6	4	689	40
15	3	4	1330	40
16	4	3	1330	40
17	4	5	818	40
18	5	4	818	40
19	5	9	1385	40
20	9	5	1385	40
21	2	5	1705	40
22	5	2	1705	40
23	1	2	1342	40
24	2	1	1342	40
25	2	3	1303	40
26	3	2	1303	40
27	1	3	913	40
28	3	1	913	40

O próximo parâmetro de entrada exigido é a matriz de tráfego. Foram utilizadas duas matrizes como opções, cada uma aplicada separadamente. As duas matrizes foram geradas manualmente e são descritas através das equações (5.1) e (5.2).

$$\Lambda_1 = \begin{bmatrix} 0.000 & 20.000 & 15.000 & 12.000 & 14.000 & 10.000 & 11.000 & 9.000 & 10.000 \\ 20.000 & 0.000 & 20.000 & 12.000 & 16.000 & 16.000 & 18.000 & 10.000 & 12.000 \\ 15.000 & 20.000 & 0.000 & 13.000 & 15.000 & 13.000 & 9.000 & 9.000 & 10.000 \\ 12.000 & 12.000 & 13.000 & 0.000 & 18.000 & 20.000 & 14.000 & 14.000 & 16.000 \\ 14.000 & 16.000 & 15.000 & 18.000 & 0.000 & 19.000 & 18.000 & 15.000 & 19.000 \\ 10.000 & 16.000 & 13.000 & 20.000 & 19.000 & 0.000 & 20.000 & 20.000 & 23.000 \\ 11.000 & 18.000 & 9.000 & 14.000 & 18.000 & 20.000 & 0.000 & 20.000 & 24.000 \\ 9.000 & 10.000 & 9.000 & 14.000 & 15.000 & 20.000 & 20.000 & 0.000 & 19.000 \\ 10.000 & 12.000 & 10.000 & 16.000 & 19.000 & 23.000 & 24.000 & 19.000 & 0.000 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

$$\Lambda_2 = \begin{bmatrix} 0.000 & 16.000 & 13.000 & 8.000 & 8.000 & 8.000 & 7.000 & 6.000 & 7.000 \\ 16.000 & 0.000 & 16.000 & 10.000 & 14.000 & 14.000 & 16.000 & 8.000 & 10.000 \\ 13.000 & 16.000 & 0.000 & 11.000 & 11.000 & 10.000 & 7.000 & 7.000 & 8.000 \\ 8.000 & 10.000 & 11.000 & 0.000 & 16.000 & 17.000 & 12.000 & 12.000 & 14.000 \\ 8.000 & 14.000 & 11.000 & 16.000 & 0.000 & 16.000 & 16.000 & 12.000 & 16.000 \\ 8.000 & 14.000 & 10.000 & 17.000 & 16.000 & 0.000 & 29.000 & 18.000 & 20.000 \\ 7.000 & 16.000 & 7.000 & 12.000 & 16.000 & 29.000 & 0.000 & 30.000 & 22.000 \\ 6.000 & 8.000 & 7.000 & 12.000 & 12.000 & 18.000 & 30.000 & 0.000 & 17.000 \\ 7.000 & 10.000 & 8.000 & 14.000 & 16.000 & 20.000 & 22.000 & 17.000 & 0.000 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

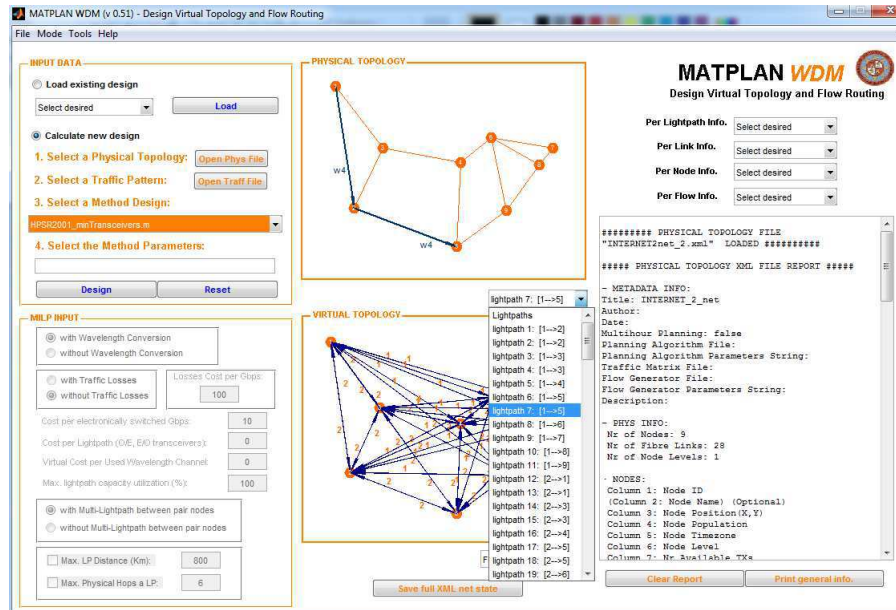
O último parâmetro de entrada é o algoritmo utilizado para rotear a demanda de tráfego requerida. Como já foi dito, o programa possui dois algoritmos que serão brevemente descritos.

O primeiro algoritmo, denominado HPSR2001minTransceivers, tem como objetivo a diminuição do número de transceptores utilizados e é dividido em quatro subproblemas. No primeiro subproblema ocorre a seleção dos candidatos a pares de nós para estabelecer os caminhos ópticos minimizando o número de transceptores utilizados. O segundo e terceiro subproblemas, roteamento e atribuição de comprimento de onda, selecionam a rota  $k$  mais curta e tentam estabelecer um caminho óptico entre eles. O último subproblema diz respeito ao roteamento de tráfego na topologia virtual, implementando uma formulação LP para alcançar a atribuição de fluxo ótima.

O segundo algoritmo, denominado testingAlgorithm1, é dividido em duas partes. Na primeira parte ele tenta realizar o roteamento do tráfego através da topologia virtual. Posteriormente o algoritmo tenta criar um novo caminho óptico começando com o máximo até o menor fluxo de tráfego residual. O algoritmo termina quando não é possível rotear uma maior quantidade de tráfego ou quando caminhos ópticos não podem mais ser criados.

A figura 8 apresenta os resultados obtidos utilizando a matriz de tráfego  $\Lambda_1$  a partir do algoritmo HPSR2001minTransceivers. É possível visualizar todos os caminhos ópticos utilizados pela rede, sendo o caminho óptico entre os nós 1 e 5 selecionado utilizando o comprimento de onda  $w_4$ . Como o objetivo desse trabalho visa a minimização do número de comprimentos de onda utilizados nas ligações, através da tabela 4 podemos os resultados obtidos nessa simulação.

**Figura 8** – Resultado do algoritmo HPSR2001minTransceivers para  $\Lambda_1$ .



**Tabela 4** – Número de comprimentos de onda utilizados pela rede - Algoritmo 1 -  $\Lambda_1$ .

ID da ligação	Nó de Origem	Nó de Destino	Distância(km)	Comprimentos de onda disponíveis	Comprimentos de onda utilizados
1	6	7	1400	40	13
2	7	6	1400	40	13
3	7	8	278	40	2
4	8	7	278	40	2
5	6	8	905	40	5
6	8	6	905	40	4
7	8	9	700	40	6
8	9	8	700	40	5
9	6	9	1045	40	6
10	9	6	1045	40	6
11	4	6	690	40	19
12	6	4	690	40	18
13	4	6	689	40	0
14	6	4	689	40	0
15	3	4	1330	40	14
16	4	3	1330	40	13
17	4	5	818	40	8
18	5	4	818	40	8
19	5	9	1385	40	10
20	9	5	1385	40	11
21	2	5	1705	40	10
22	5	2	1705	40	11
23	1	2	1342	40	5
24	2	1	1342	40	6
25	2	3	1303	40	10
26	3	2	1303	40	10
27	1	3	913	40	6
28	3	1	913	40	5

O algoritmo HPSR2001minTransceivers é novamente utilizado com a matriz de tráfego  $\Lambda_2$  e seus resultados são apresentados na tabela 5. Também são apresentados os resultados do algoritmo testingAlgorithm1 nas tabelas 6 ( $\Lambda_1$ ) e 7 ( $\Lambda_2$ ).



**Tabela 5** – Número de comprimentos de onda utilizados pela rede - Algoritmo 1 -  $\Lambda_2$ .

ID da ligação	Nó de Origem	Nó de Destino	Distância(km)	Comprimentos de onda disponíveis	Comprimentos de onda utilizados
1	6	7	1400	40	12
2	7	6	1400	40	12
3	7	8	278	40	3
4	8	7	278	40	3
5	6	8	905	40	5
6	8	6	905	40	4
7	8	9	700	40	5
8	9	8	700	40	4
9	6	9	1045	40	4
10	9	6	1045	40	4
11	4	6	690	40	17
12	6	4	690	40	16
13	4	6	689	40	0
14	6	4	689	40	0
15	3	4	1330	40	12
16	4	3	1330	40	11
17	4	5	818	40	8
18	5	4	818	40	8
19	5	9	1385	40	8
20	9	5	1385	40	9
21	2	5	1705	40	8
22	5	2	1705	40	9
23	1	2	1342	40	4
24	2	1	1342	40	5
25	2	3	1303	40	8
26	3	2	1303	40	8
27	1	3	913	40	5
28	3	1	913	40	4

**Tabela 6** – Número de comprimentos de onda utilizados pela rede - Algoritmo 2 -  $\Lambda_1$ .

ID da ligação	Nó de Origem	Nó de Destino	Distância(km)	Comprimentos de onda disponíveis	Comprimentos de onda utilizados
1	6	7	1400	40	13
2	7	6	1400	40	12
3	7	8	278	40	2
4	8	7	278	40	2
5	6	8	905	40	6
6	8	6	905	40	5
7	8	9	700	40	6
8	9	8	700	40	5
9	6	9	1045	40	5
10	9	6	1045	40	6
11	4	6	690	40	20
12	6	4	690	40	19
13	4	6	689	40	0
14	6	4	689	40	0
15	3	4	1330	40	14
16	4	3	1330	40	14
17	4	5	818	40	8
18	5	4	818	40	8
19	5	9	1385	40	11
20	9	5	1385	40	12
21	2	5	1705	40	10
22	5	2	1705	40	11
23	1	2	1342	40	4
24	2	1	1342	40	6
25	2	3	1303	40	9
26	3	2	1303	40	11
27	1	3	913	40	7
28	3	1	913	40	5

**Tabela 7** – Número de comprimentos de onda utilizados pela rede - Algoritmo 2 -  $\Lambda_2$ .

ID da ligação	Nó de Origem	Nó de Destino	Distância(km)	Comprimentos de onda disponíveis	Comprimentos de onda utilizados
1	6	7	1400	40	12
2	7	6	1400	40	13
3	7	8	278	40	3
4	8	7	278	40	3
5	6	8	905	40	6
6	8	6	905	40	4
7	8	9	700	40	5
8	9	8	700	40	5
9	6	9	1045	40	4
10	9	6	1045	40	4
11	4	6	690	40	18
12	6	4	690	40	18
13	4	6	689	40	0
14	6	4	689	40	0
15	3	4	1330	40	13
16	4	3	1330	40	12
17	4	5	818	40	7
18	5	4	818	40	8
19	5	9	1385	40	9
20	9	5	1385	40	10
21	2	5	1705	40	8
22	5	2	1705	40	9
23	1	2	1342	40	4
24	2	1	1342	40	5
25	2	3	1303	40	8
26	3	2	1303	40	9
27	1	3	913	40	5
28	3	1	913	40	4

Analisando os dados obtidos na simulação para a matriz de tráfego  $\Lambda_1$ , percebe-se uma pequena vantagem do algoritmo HPSR2001minTransceivers, possuindo um número máximo de comprimentos de onda em uma ligação de 19 comparado com os 20 apresentados pelo outro algoritmo. A média de comprimentos de onda por ligação também é melhor no primeiro algoritmo sendo ela 8,07 comparado com 8,25 do segundo algoritmo. Em relação à matriz de tráfego  $\Lambda_2$ , observa-se novamente uma pequena superioridade do primeiro algoritmo, apresentando um número máximo de comprimentos de onda de 17 enquanto o segundo apresenta um número de 18, com média de 7 e 7,36 respectivamente. Tendo em mente que esses algoritmos não buscam otimizar diretamente o número de comprimentos de onda utilizados, pode-se deduzir que a implementação dos algoritmos apresentados no trabalho poderão gerar resultados melhores que os apresentados.

Conclui-se que o ambiente computacional MatPlanWDM é uma poderosa ferramenta para estudos de redes ópticas devido à interface intuitiva e de fácil entendimento, sendo possível a criação e implementação de novos algoritmos através da linguagem MATLAB. No entanto essa ferramenta não possui capacidade para trabalhar com redes de grade flexível, sendo necessária, para o estudo dos mesmos, uma busca ou criação de ferramentas com essa funcionalidade.

## 6 Conclusão

Este trabalho apresenta um estudo sobre os problemas relacionados ao planejamento e otimização de redes ópticas e apresenta algoritmos capazes de solucionar esses problemas, devendo serem cuidadosamente escolhidos devido à presença de vantagens e desvantagens em cada um, e também as particularidades de cada caso.

No estudo das redes WDM de grade fixa foram abordados a formulação ILP, uma abordagem simples e de fácil entendimento que trabalha com variáveis inteiras e que produzem boas soluções para problemas menos complexos. Também foi visto o algoritmo de relaxamento LP, que trabalha com uma formulação que não é limitada com números inteiros, sendo uma boa forma de encontrar soluções que seriam descartadas através da formulação anterior. Através do uso de iterações de correção e arredondamento, esse algoritmo retorna a solução inteira necessária para o problema.

Também foi abordado problemas característicos de redes práticas com a presença de imperfeições na camada física. Essa abordagem é de grande complexidade, devido aos diversos parâmetros acrescentados ao problema original.

Para o caso de redes WDM de grade flexível, foi apresentado um algoritmo heurístico que trabalha com as diferentes configurações de transceptores e possui uma fase de pré-processamento, capaz de gerar um conjunto de possíveis soluções, dentre as quais será escolhida a de melhor desempenho.

Devido ao atual crescimento na demanda de tráfego decorrente de uma maior e crescente popularização da internet, melhorias estão sendo estudadas para aumentar a capacidade de transmissão e melhorar o aproveitamento da capacidade atual, entre elas a aplicação de uma grade espectral flexível, que já é testada com sucesso em experimentos, porém não possui uma implementação em larga escala nas grandes redes atuais. Essa mudança porém traz algumas complicações, como por exemplo a completa mudança dos dispositivos atualmente instalados, pois eles trabalham com uma grade espectral fixa, sem contar a necessidade de uma virtualização da rede através de SDN (*Software Defined Network*) (KLONIDIS et al., 2015), que se faz necessária para essa aplicação.

Portanto, é possível afirmar que vive-se uma etapa de transição em relação as redes ópticas, sendo atualmente um campo em crescimento e bastante amplo para novas pesquisas.

# Referências

- CARAMIA, M.; DELL'OLMO, P. *Multi-objective Management in Freight Logistics Increasing Capacity, Service Level and Safety with Optimization Algorithms*. [S.l.]: Springer, 2008. 11-36 p.
- CHRISTENSEN, T. V. *Heuristic Algorithms for NP-Complete Problems*. 2007.
- CHRISTODOULOPOULOS, K.; MANOUSAKIS, K.; VARVARIGOS, E. Reach adapting algorithms for mixed line rate wdm transport networks. *Journal of Lightwave Technology*, v. 29, n. 21, 2011.
- CHRISTODOULOPOULOS, K.; MANOUSAKIS, K.; VARVARIGOS, E. M. Offline routing and wavelength assignment in transparent wdm networks. *IEEE/ACM Transactions on Networks*, 2009.
- CHRISTODOULOPOULOS, K.; VARVARIGOS, E. Routing and spectrum allocation polices for time-varying traffic in flexible optical network. In: *International Conference on Optical Networking Design and Modeling (ONDM)*. [S.l.: s.n.], 2012.
- CHRISTODOULOPOULOS, K.; VARVARIGOS, E. Static and dynamic spectrum allocation in flex-grid optical network. In: *International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. [S.l.: s.n.], 2012.
- CISCO Transport Planner: Optical Network Design Tool for Cisco ONS 15454 MSTP. [S.l.], 2011.
- CORNUEJOS, G.; TRICK, M. *Quantitative Methods for the Management Sciences*. [S.l.], 1998. Course Notes.
- GRAHAM, R. L.; YAO, F. F. Finding the convex hull of a simple polygon. *Journal of Algorithms*, v. 4, p. 324–331, 1983.
- IYER, S.; SINGH, S. P. A novel offline pli-rwa, regenerator placement and wavelength converter placement algorithm for translucent optical wdm networks. In: *Signal Processing and Communications (SPCOM)*. [S.l.: s.n.], 2012.
- KLONIDIS, D. et al. Spectrally and spatially flexible optical network planning and operations. *IEEE Communications Magazine*, v. 53, n. 2, p. 69–78, 2015.
- KOKASH, N. An introduction to heuristic algorithms. Research Methodology course. 2005.
- KRETSIS, A. Mantis: Optical network planning and operation tool. *ICTON 2013*, p. 1–4, 2013.
- KRISHNASWAMY, R. M.; SIRVARAJAN, K. N. Algorithms for routing and wavelength assignment based on solutions of lp-relaxations. *IEEE Communications Letters*, v. 5, n. 10, 2001.

- NEMHAUSER, G. L.; SIGISMONDI, G. A strong cutting plane/branch-and-bound algorithm for node packing. *The Journal of the Operational Research Society*, v. 43, n. 5, p. 443–457, 1992.
- OZDAGLAR, A. E.; BERTSEKAS, D. P. Routing and wavelength assignment in optical networks. *IEEE Transactions on Networking*, n. 2, p. 259–272, 2003.
- PAVON-MARINO, P. et al. Matplanwdm: An educational tool for network planning in wavelength-routing networks. In: *Proceedings of the 11th International Conference on Optical Networking Design and Modeling, ONDM*. [S.l.: s.n.], 2007. v. 4534, p. 58–67.
- PAVON-MARINO, P. et al. An educational rwa network planning tool for dynamic flows. In: *Proc. 12th International IFIP Conference on Optical Network Design and Modeling, ONDM*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 235–240.
- RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K. N. *Optical Networks: A Practical Perspective*. [S.l.]: Morgan Kaufmann, 2009.
- TOMKOS, I. et al. A tutorial on the flexible optical networking paradigm: State-of-the-art, trends, and research challenges. *Proceedings of the IEEE*, v. 102, 2014.
- VARVARIGOS, E. A.; CHRISTODOULOPOULOS, K. Algorithmic aspects in planning fixed and flexible optical networks with emphasis on linear optimization and heuristic techniques. *Journal of Lightwave Technology*, v. 32, n. 4, 2014.
- VELASCO, L. Solving routing and spectrum allocation related optimization problems: From off-line to in-operation flexgrid network planning. *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, v. 32, n. 16, p. 2780–2794, 2014.
- XIA, T. J.; FEVRIER, H.; WANG., T. Introduction of spectrally and spatially flexible optical networks. *IEEE Communications Magazine*, v. 53, 2015.
- ZANG, H.; JUE, J. P.; MUKHERJEE, B. A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical wdm networks. *Optical Network Magazine*, p. 47–60, 2000.