

1

**Fabio de Oliveira Lima**

2

***UM MODELO EFICIENTE PARA O PROJETO  
COMPLETO DE REDES ÓPTICAS***

3

4

Vitória – ES

5

14 de março de 2010

1 Copyright 2009 Fabio de Oliveira Lima.

2 Este documento é distribuído nos termos da licença **GNU** *General Public License* v2.

1

**Fabio de Oliveira Lima**

2

***UM MODELO EFICIENTE PARA O PROJETO  
COMPLETO DE REDES ÓPTICAS***

3

4

Dissertação a ser apresentada à Coordenação do  
Mestrado em Engenharia Elétrica da Universi-  
dade Federal do Espírito Santo para a obtenção  
do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

5

Orientador:

6

Prof. Dr. Elias Silva de Oliveira

7

Co-orientador:

8

Prof. Dr. Renato Tannure Rotta Almeida

9

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

10

CENTRO DE TECNOLOGIA

11

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

12

Vitória – ES

13

14 de março de 2010

1       Dissertação de Mestrado sob o título “*UM MODELO EFICIENTE PARA O PROJETO*  
2       *COMPLETO DE REDES ÓPTICAS*”, a ser defendida por Fabio de Oliveira Lima e aprovada em  
3       março de 2010, em Vitória, Espírito Santo, pela banca examinadora constituída pelos doutores:

4

---

Prof. Dr. Elias Silva de Oliveira  
Departamento de Sistemas de Informação - UFES  
Orientador

5

---

Prof. Dr. Renato Tannure Rotta Almeida  
Instituto Federal de Educação C&T do Espírito Santo - Ifes  
Coorientador

6

---

Prof. Dr. Marcelo Eduardo Vieira Segatto  
Departamento de Engenharia Elétrica - UFES  
Examinador Interno

7

---

Prof. Dr. Nome Sobrenome  
Departamento de - UF  
Examinador Externo



# *Agradecimentos*

1

2 Primeiramente gostaria de agradecer a ...

3

1  
2

*“Texto.”*  
*Autor*

## Resumo

Este trabalho apresenta um novo modelo de programação linear inteira-mista para o projeto de redes ópticas de comunicação. Trata-se de uma modelagem ampla, que engloba o projeto da topologia lógica da rede, o roteamento das demandas de tráfego, além do roteamento e alocação de comprimento de onda aos caminhos ópticos. A formulação suporta múltiplas ligações entre cada par de nós da rede, seja na topologia física ou virtual. Em sua versão básica, o modelo minimiza os custos de instalação da rede física e o custo de operação da rede projetada. No entanto, sua formulação permite que sejam exploradas diversas métricas, como o congestionamento da rede, que foi utilizado para comparação com resultados da literatura. Neste trabalho são apresentados resultados de experimentos com o objetivo de validar a eficiência desta formulação com relação à qualidade das soluções e desempenho computacional de trabalhos anteriores sobre o mesmo assunto. Também é apresentada uma nova forma de se obter *lower bounds* para o congestionamento, com custo computacional desprezível, cuja eficiência contrasta com as opções encontradas na literatura.



# *Abstract*

1

2      This dissertation describes ...

# *Sumário*

1		
2	<b>Publicações</b>	<b>1</b>
3	<b>Lista de Figuras</b>	<b>3</b>
4	<b>Lista de Tabelas</b>	<b>4</b>
5	<b>1 Introdução</b>	<b>5</b>
6	1.1 Roteamento de Tráfego por Comprimentos de Onda . . . . .	6
7	1.1.1 Equipamentos Ópticos . . . . .	7
8	1.1.2 Redes Ópticas Semitransparentes . . . . .	9
9	1.2 Etapas do projeto de uma WRON . . . . .	12
10	1.2.1 Projeto da Topologia Lógica . . . . .	12
11	1.2.2 Roteamento e Alocação de Comprimentos de Onda . . . . .	15
12	1.3 Trabalhos Anteriores . . . . .	16
13	1.4 Projeto Completo de uma WRON Semitransparente . . . . .	19
14	1.4.1 Nova Modelagem para Projeto Completo de uma WRON . . . . .	20
15	1.4.2 Novo Limite Inferior para o Congestionamento . . . . .	22
16	<b>2 TWA - Modelo para o Projeto Completo de uma WRON</b>	<b>23</b>
17	2.1 Notação e Dados de Entrada . . . . .	23
18	2.2 Componentes Topológicos . . . . .	24
19	2.3 Topologia Física e Fração de Fluxo . . . . .	26
20	2.4 Custo de instalação e Operação . . . . .	27

1	2.5	O Modelo TWA . . . . .	28
2	2.6	Continuidade de Comprimentos de Onda e Capacidade . . . . .	29
3	2.7	Topologia Física e Consevação de Fluxo . . . . .	32
4	<b>3</b>	<b>Adaptações do Modelo Básico</b>	<b>35</b>
5	3.1	Topologia Física como Dado de Entrada . . . . .	35
6	3.2	Grau Lógico e Multiplicidade de Ligações Lógicas . . . . .	36
7	3.3	Congestionamento . . . . .	36
8	3.4	Ligações Lógicas em cada Fibra . . . . .	38
9	3.5	Número de Saltos Físicos . . . . .	38
10	3.6	Comprimentos de Onda . . . . .	39
11	3.7	Conversão de Comprimentos de Onda . . . . .	41
12	<b>4</b>	<b>Lower Bounds</b>	<b>43</b>
13	4.1	MTB - Minimum Traffic Bound . . . . .	44
14	<b>5</b>	<b>Experimentos Computacionais com o TWA</b>	<b>46</b>
15	5.1	O Modelo VTD-RWA . . . . .	47
16	5.2	Comparação com o modelo VTD-RWA . . . . .	49
17	5.3	O Modelo KS . . . . .	54
18	5.4	Comparação com o modelo KS . . . . .	55
19		<b>Conclusões</b>	<b>60</b>
20		<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>63</b>
21			<b>65</b>

# Publicações

Relação da produção científica do autor desta dissertação.

## • Artigos completos publicados em periódicos

1. LIMA, M. de O.; LIMA, F. de O.; OLIVEIRA, E. S.; SEGATTO, M. E. V. Um Algoritmo Híbrido para o Planejamento de Redes Ópticas. *REIC: Revista Eletrônica de Iniciação Científica*, v. 4, p. 4, 2006.

## • Trabalhos completos publicados em anais de congressos

1. LIMA, F. de O.; LIMA, M. de O.; SEGATTO, M. E. V.; ALMEIDA, R. T. R.; OLIVEIRA, E. S.. Um modelo eficiente para o projeto completo de redes ópticas. *In: Anais do XLI SBPO - Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, 2009.
2. LIMA, F. de O.; LIMA, M. de O.; OLIVEIRA, E. S.; SEGATTO, M. E. V. Reformulando o Problema de Projeto de Anéis em Redes Ópticas. *In: Proceedings of 4th ITS, International Information and Telecommunication Technologies Symposium*, 2005.
3. SEGATTO, M. E. V.; OLIVEIRA, E. S.; LIMA, M. de O.; LIMA, F. de O.; ALMEIDA, R. T. R. Hybrid approaches for the design of mesh and hierarchical ring optical networks. *In: Proceedings of SPIE06 - Photonics Europe*, v. 1., 2006.
4. CIARELLI, P. M.; LIMA, F. de O.; OLIVEIRA, E. S. The Automation of the Classification of Economic Activities from Free Text Descriptions using an Array Architecture of Probabilistic Neural Network. *In: Anais do VIII SBAI - Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, 2007.
5. LUCHI, D.; ALMEIDA, R. T. R.; ROSA, G. G.; SIMOES, S. N.; LIMA, F. de O. Projetos de topologias lógicas e roteamento de tráfego em redes ópticas. *In: Anais da II Jornada de Produção Científica em Educação Profissional e Tecnológica*, 2007, São Luís.

- 1           6. FERNANDES, G. C.; ALMEIDA, R. T. R.; ROSA, G. G.; LIMA, F. de O. Análise  
2           de Aplicabilidade de uma Formulação de Programação Linear Mista para Otimização da Transparência de Redes Ópticas. *In: Anais da II Jornada de Produção Científica em Educação Profissional e Tecnológica*, 2007, São Luís.

5           • **Resumos publicados em anais de congressos**

- 6           1. LIMA, F. de O.; OLIVEIRA, E. S.; SEGATTO, M. E. V.; ALMEIDA, R. T. R. Um  
7           Estudo Empírico da Eficiência de Heurísticas na Otimização do Congestionamento em Redes Ópticas. *In: Anais do XXXIX SBPO - Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, 2007.
- 10          2. CIARELLI, P. M.; LIMA, F. de O.; OLIVEIRA, E. S. Using a Genetic Algorithm for Configuring a Set of Probabilistic Neural NetworksH. *In: Anais do XXXIX SBPO - Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, 2007.
- 13          3. LIMA, F. de O.; LIMA, M. de O.; OLIVEIRA, E. S.; SEGATTO, M. E. V. O Problema de Projeto de Anéis em Redes Ópticas via Algoritmos para TSP. *In: Anais do XXXVIII SBPO - Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, 2006.

# *Lista de Figuras*

1			
2	1.1	Exemplo de uma topologia física para uma rede de 6 nós . . . . .	6
3	1.2	Exemplo de uma topologia lógica para uma rede de 6 nós. . . . .	7
4	1.3	Modelo da arquitetura de um OADM. . . . .	8
5	1.4	Modelo da arquitetura de um OXC. . . . .	9
6	1.5	Rotas físicas e alocação de comprimentos de onda para as ligações lógicas. . .	11
7	1.6	Demanda de Tráfego $P_{16}$ distribuída na Topologia Lógica . . . . .	12
8	1.7	Quatro sub-problemas se fundem em VTD e RWA . . . . .	13
9	1.8	Dois sub-problemas se fundem no TWA . . . . .	21
10	2.1	Representação gráfica da notação associada aos nós da rede. . . . .	24
11	2.2	Representação gráfica de um componente topológico. . . . .	25
12	2.3	Exemplo da interpretação dos componentes topológicos. . . . .	26
13	2.4	Conservação dos Percursos Lógicos e possibilidades de interpretação dos com-	
14		ponentes. . . . .	31
15	2.5	Esquema da separação da topologia lógica por comprimento de onda. . . . .	32
16	2.6	Interpretação dos componentes topológicos na variável $D_{mn}$ . . . . .	33
17	3.1	Em $b$ ) vemos duas possíveis de interpretações dos componentes topológicos em	
18		$a$ ). . . . .	40
19	5.1	Rede de 6 nós (ASSIS; WALDMAN, 2004). . . . .	51
20	5.2	Matriz de demandas para a rede de 6 nós. . . . .	51
21	5.3	Rede de 12 nós (ASSIS; WALDMAN, 2004) . . . . .	53
22	5.4	Matriz de demandas para a rede de 12 nós. . . . .	53
23	5.5	Rede de 14 nós NSFNET (KRISHNASWAMY; SIVARAJAN, 2001). . . . .	56

## *Lista de Tabelas*

1		
2	5.1	Legendas para as Tabelas 5.2 e 5.3. . . . . 51
3	5.2	Resultados para a rede de 6 nós. *: Solução Ótima. . . . . 52
4	5.3	Resultados para a rede de 12 nós. *: Solução Ótima. . . . . 52
5	5.4	Matriz de demandas <i>P1</i> (RAMASWAMI; SIVARAJAN, 1996). . . . . 56
6	5.5	Matriz de demandas <i>P2</i> (RAMASWAMI; SIVARAJAN, 1996). . . . . 57
7	5.6	Matriz de distâncias para a NSFNET, em centenas de milhas. . . . . 57
8	5.7	Legendas para as Tabelas 5.8 e 5.9. . . . . 57
9	5.8	Resultados para a matriz <i>P1</i> . *: Ótimo alcançado. . . . . 58
10	5.9	Resultados para a matriz <i>P2</i> . *: Ótimo alcançado. . . . . 58

# 1 *Introdução*

A expansão do uso de redes de fibras ópticas, devido à sua extrema eficiência no transporte de dados em altas taxas de transmissão, motiva o estudo de projetos de operação das mesmas. Uma rede de comunicação é dita óptica quando o meio físico, usado para a transmissão das informações entre os nós da rede, é composto por cabos de fibra óptica.

Cada par de nós pode ser interconectado por mais de um cabo, possivelmente em trajetos distintos. E cada cabo pode conter várias fibras ópticas, tipicamente em pares. Cada fibra pode ser utilizada em ambas as direções, mas normalmente os equipamentos empregados na implementação das redes suportam tráfego em um sentido apenas (MUKHERJEE, 1997). Deste modo, a unidade elementar da estrutura física é modelada como uma fibra óptica orientada em um determinado sentido, denominada de ligação física. O conjunto das ligações físicas da rede é chamado de topologia física.

O projeto e planejamento de redes é realizado através de métodos distintos de acordo com o tipo de tráfego considerado, especificamente com relação à natureza; se é estática ou dinâmica. No caso de tráfego estático, nosso foco de estudo, é assumido *a priori* uma determinada matriz de demanda de tráfego, representando a quantidade média de tráfego que deve ser transferido entre os pares de nós da rede. Considera-se essas demandas como sendo fixas para fins de planejamento, podendo basear-se em levantamentos históricos ou mesmo estudos estimativos (MUKHERJEE et al., 1996).

A Figura 1.1 apresenta um exemplo para uma topologia física, onde os nós da rede estão conectados por pares de ligações físicas em sentidos contrários. Todavia, dependendo da matriz de demandas, nem todas as ligações físicas disponíveis precisarão ser usadas.

Neste contexto, o desenvolvimento da tecnologia WDM (*Wavelength Division Multiplexing*), permitiu que vários canais independentes compartilhem a mesma fibra óptica, proporcionando um melhor aproveitamento da banda de transmissão disponível nas fibras. Multiplicando a capacidade das ligações físicas das redes, esses canais são transmitidos em diferentes comprimentos de onda (MUKHERJEE, 1997). A quantidade de comprimentos de onda que podem ser



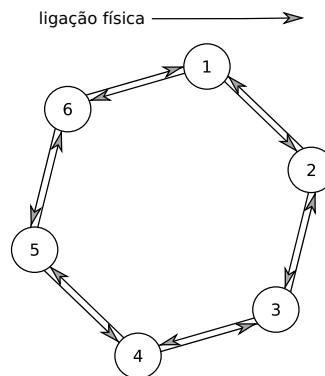


Figura 1.1: Exemplo de uma topologia física para uma rede de 6 nós

- 1 multiplexados em uma ligação física depende do tipo de cabo de fibra óptica empregado (XIN;
- 2 ROUSKAS; PERROS, 2003).

## 3 1.1 Roteamento de Tráfego por Comprimentos de Onda

4 A tecnologia de multiplexação por comprimento de onda, além de possibilitar a transmis-  
5 são de vários sinais pelo mesmo meio, permite a implementação de redes com roteamento de  
6 tráfego por comprimentos de onda (WRON - *Wavelength Routed Optical Networks*) (BANER-  
7 JEE; MUKHERJEE, 1997). As vantagens desse tipo de rede decorrem de sua infra-estrutura  
8 flexível, com elevada capacidade e confiabilidade na transmissão de dados.

9 Esta arquitetura se utiliza de dispositivos ópticos que permitem o roteamento transparente  
10 de tráfego, onde a informação pode ser roteada pelo meio óptico, sem passar para o domínio  
11 eletrônico, nos pontos intermediários entre a origem e o destino de uma demanda de tráfego.  
12 Temos assim uma camada acima da configuração física da rede, pois um caminho óptico trans-  
13 parente pode ser definido de várias formas sobre a rede. Esta é uma camada servidora, que  
14 proverá acesso à rede às camadas clientes que, por sua vez, enxergarão apenas essas ligações  
15 transparentes. Portanto há duas camadas: uma eletrônica, formada por roteadores eletrônicos de  
16 pacotes de dados interconectados por canais ópticos transparentes, e uma camada óptica, onde o  
17 roteamento do tráfego pela rede física é realizado por dispositivos ópticos WDM (BANERJEE;  
18 MUKHERJEE, 1997).

19 Os canais ópticos transparentes, por onde trafegam as demandas de tráfego, são chamados  
20 de ligações lógicas. A topologia lógica da rede é assim formada pelo conjunto das ligações  
21 lógicas que, bem como a topologia física, é um grafo direcionado (CORMEN, 2002). Ela  
22 abstrai a estrutura física da rede, pois pode ter uma estrutura totalmente diferente, e faz a ligação  
23 entre a camada eletrônica e a óptica. Na Figura 1.2 temos o exemplo de uma topologia lógica

1 para a rede óptica de 6 nós, ilustrada na Figura 1.1. As ligações lógicas definidas devem ser  
 2 configuradas nos dispositivos ópticos WDM, criando os canais ópticos transparentes.

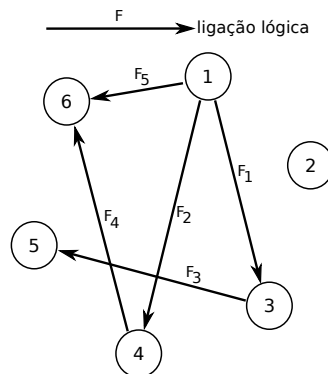


Figura 1.2: Exemplo de uma topologia lógica para uma rede de 6 nós.

3 O que caracterizou as WRON como uma nova geração de redes ópticas foi a possibilidade  
 4 de se implementar uma topologia lógica totalmente reconfigurável sobre a estrutura física da  
 5 rede. A topologia lógica é configurada nos dispositivos ópticos de comutação de comprimentos  
 6 de onda, e pode ser modificada em função da sazonalidade das demandas de tráfego, bem como  
 7 da necessidade de restauração em caso de falhas.

### 8 1.1.1 Equipamentos Ópticos

9 O roteamento de tráfego em uma WRON é realizado de duas formas: na camada óptica da  
 10 rede, que se denomina roteamento transparente, e na camada eletrônica, após sua conversão de  
 11 sinal óptico para elétrico para processamento em roteadores de pacotes de dados. No roteamento  
 12 transparente, os comprimentos de onda podem ser redirecionados nos dispositivos de comuta-  
 13 ção óptica, com a vantagem da ausência do atraso em filas originado pelo congestionamento  
 14 em roteadores eletrônicos. Este congestionamento está diretamente associado à limitações na  
 15 qualidade de serviço em redes de comunicações, pois origina atraso e eventuais descartes de  
 16 pacotes que, sobretudo para as emergentes aplicações em tempo real, devem ser minimizados  
 17 (BANERJEE; MUKHERJEE, 2000).

18 Em uma WRON, para permitir conexões transparentes, os nós da rede precisarão ser equi-  
 19 pados com dispositivos ópticos WDM capazes de realizar roteamento de tráfego por compri-  
 20 mentos de onda. Dois tipos mais comuns de equipamentos utilizados são o OADM (*Optical*  
 21 *Add-Drop Multiplexer*) e o OXC (*Optical Cross-Connect*). O OADM é um equipamento mais  
 22 simples e de menor custo em comparação com o OXC (XIN; ROUSKAS; PERROS, 2003). Os  
 23 múltiplos comprimentos de onda são combinados em um único sinal óptico por um multiplexa-  
 24 dor WDM (*Mux*) na saída dos dispositivos ópticos WDM, e da mesma forma são separados na

1 entrada por um demultiplexador WDM (*Demux*).

2 Na Figura 1.3 temos um modelo para a arquitetura de um OADM. Nele, uma ligação física  
3 de entrada é direcionada à uma ligação física de saída, sem conversão eletrônica, podendo ter  
4 um ou mais comprimentos de onda desviados para o roteador eletrônico (*Drop*). Neste ponto  
5 há conversão eletrônica. O tráfego que não se destina ao nó atual, mais o tráfego que nele se  
6 origina, são convertidos para o meio óptico e reencaminhados para uma ligação física de saída  
7 (*Add*) em um dos comprimentos de onda que foram desviados (XIN; ROUSKAS; PERROS,  
8 2003).

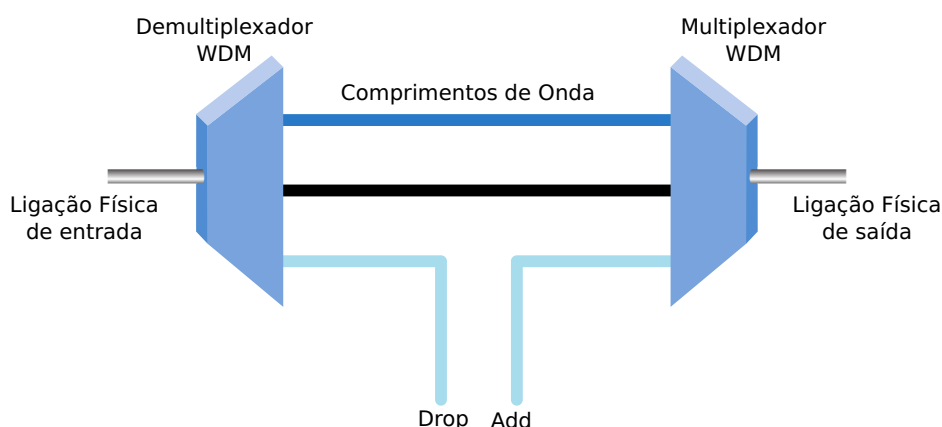


Figura 1.3: Modelo da arquitetura de um OADM.

9 A limitação deste equipamento é que todos os comprimentos de onda, em uma ligação  
10 física de entrada que são destinados transparentemente, são direcionados a uma mesma ligação  
11 física de saída. Essa limitação é superada com um OXC, capaz de rotear os comprimentos de  
12 onda livremente. Na Figura 1.4 temos um modelo para a arquitetura de um OXC. Neste, para  
13 cada comprimento de onda, temos uma matriz de comutação de óptica que recebe determinado  
14 comprimento de onda de todas as ligações físicas de entrada. Que por sua vez, podem ser  
15 encaminhados para qualquer uma das ligações físicas de saída. Em um OXC as operações  
16 de desvio de tráfego para o roteador eletrônico, ou o caminho inverso, (*Drop/Add*) são feitas  
17 diretamente nas matrizes de comutação óptica (PALMIERI, 2008).

18 O dimensionamento dos equipamentos dos nós depende do número de ligações lógicas  
19 entrando e saindo, do número de rotas transparentes passando pelo nó, do número de ligações  
20 físicas de entrada e saída e do número de comprimentos de onda que podem ser multiplexados  
21 em cada ligação física. Cada equipamento é capaz de suportar uma certa quantidade desses  
22 recursos, e essa capacidade não aumenta de forma linear. Dobrar a capacidade de um nó para  
23 certo recurso pode demandar um investimento várias vezes maior (XIN; ROUSKAS; PERROS,  
24 2003).

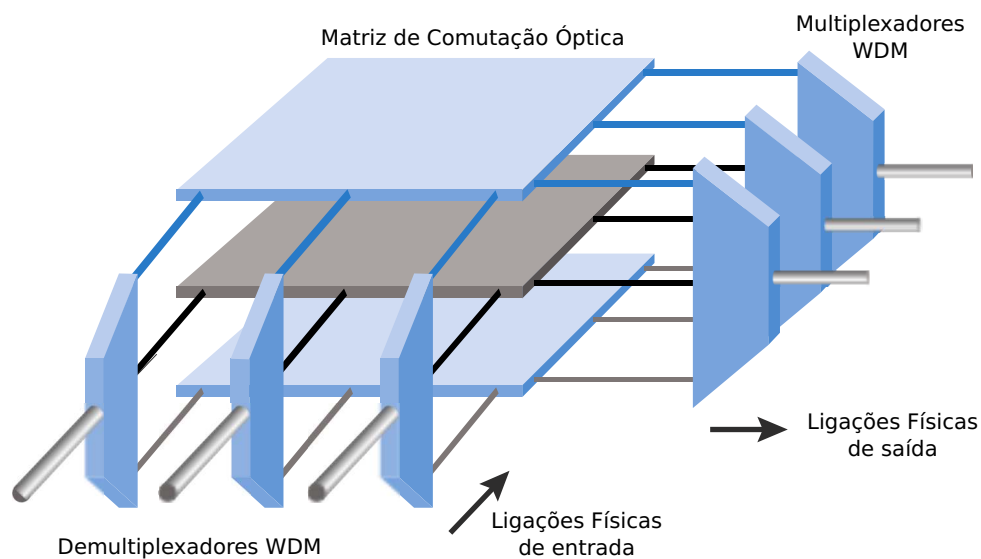


Figura 1.4: Modelo da arquitetura de um OXC.

### 1.1.2 Redes Ópticas Semitransparentes

Uma rede que possui rotas transparentes apenas entre nós diretamente conectados por enlaces de fibra óptica, é chamada de rede opaca, onde as ligações lógicas coincidem com as ligações físicas da rede (MUKHERJEE, 1997). Deste modo, dispositivos ópticos WRON para roteamento de comprimentos de onda não são utilizados. Todavia, esta configuração pode não ser a ideal para todos os perfis de demanda de tráfego da rede, pois uma demanda pode ter que percorrer várias ligações lógicas até seu destino, sofrendo conversão eletrônica em cada uma. A menos que todos os nós da rede estejam conectados diretamente entre si por ligações físicas em ambos os sentidos.

Se existe uma ligação transparente entre cada par de nós da rede, a rede é dita transparente. Neste caso, qualquer demanda de tráfego poderia ser transportada em um único salto pela topologia lógica, sendo processada eletronicamente somente no nó destino (RAMASWAMI; SIVARAJAN, 2002). Mas, para configurar uma topologia de rede totalmente transparente, um grande investimento em equipamentos ópticos WDM se faz necessário. Além disso, há restrições severas relacionadas com degradações acumuladas e continuidade de comprimento de onda, entre outras (BALA, 2000). Já é praticamente um consenso que uma rede totalmente transparente de longa distância não seria factível atualmente devido a uma série de dificuldades em compensar degradações na transmissão (RAMAMURTHY; FENG; DATTA, 1999) (MAHER, 2001).

Atualmente, é amplamente aceito que uma rede óptica mais eficiente é uma combinação entre a rede opaca e a transparente. Este modelo de rede híbrida é comumente chamada de rede semitransparente (RAMASWAMI; SIVARAJAN, 2002). Algumas estratégias para o projeto de

redes semitransparentes de longa distância foram propostas em artigos e livros como (MAHER, 2001) e (RAMASWAMI; SIVARAJAN, 2002). Esta é uma solução intermediária que define ligações lógicas apenas entre pares de nós convenientes, resultando em uma topologia lógica parcialmente transparente. Usando redes ópticas semitransparentes, é possível alcançar uma performance muito próxima aos das redes opacas em termos de bloqueio de novas requisições, porém com grande economia nos custos, e menos complexidade do que uma rede completamente óptica. Em suma, redes semitransparentes oferecem o melhor dos domínios ópticos e eletrônicos sem comprometer as principais características de cada uma dessas tecnologias (BALA, 2000).

A cada ligação lógica deverá ser atribuído um caminho na topologia física; seu o canal óptico transparente, comumente chamado de rota física (ZANG; JUE; MUKHERJEE, 2000). Por sua vez, em cada ligação física deste caminho deverá ser alocado um comprimento de onda para esta ligação lógica. Se os nós da rede possuírem capacidade de conversão entre comprimentos onda, às ligações físicas ao longo da rota física poderão ser atribuídos comprimentos de onda distintos (RAMASWAMI; SASAKI, 1998). Se esta hipótese não é considerada, todas as ligações físicas deverão utilizar o mesmo comprimento de onda ao longo da rota física. Esta limitação é conhecida como restrição de continuidade de comprimento de onda (ZANG; JUE; MUKHERJEE, 2000), e será a hipótese considerada neste trabalho.

No item *a* da Figura 1.5 está um exemplo de rotas físicas e comprimentos de onda atribuídos às ligações lógicas do item *b*. Esse é o roteamento das ligação lógicas sobre a topologia física, requisitadas pelo projeto da topologia lógica, e a alocação de comprimentos de onda a cada rota (ZANG; JUE; MUKHERJEE, 2000).

Na Figura 1.5, no item *c*, estão representadas as ligações físicas que foram utilizadas para estabelecer a topologia lógica para a rede óptica de 6 nós, ilustrada na Figura 1.1. Observe que em alguns casos dois comprimento de onda compartilham a mesma ligação física. Isso ocorre graças a tecnologia WDM. Mas, como estamos considerando que cada fibra óptica pode ser utilizada em um sentido apenas, duas ou mais ligações lógicas só podem compartilhar uma mesma ligação física no mesmo sentido e utilizando comprimentos de onda diferentes (ZANG; JUE; MUKHERJEE, 2000).

Em redes semitransparentes, como não há ligações lógicas entre todos os pares de nós da rede, as demandas de tráfego podem precisar compor caminhos sobre a topologia lógica, utilizando mais de uma ligação lógica. Neste caso, haverá ainda conversão eletrônica nos nós intermediários, e o projeto da topologia lógica é quem deve cuidar de evitar que muito tráfego deve ser destinado para esses casos. Em geral, as demandas de tráfego podem ainda ser

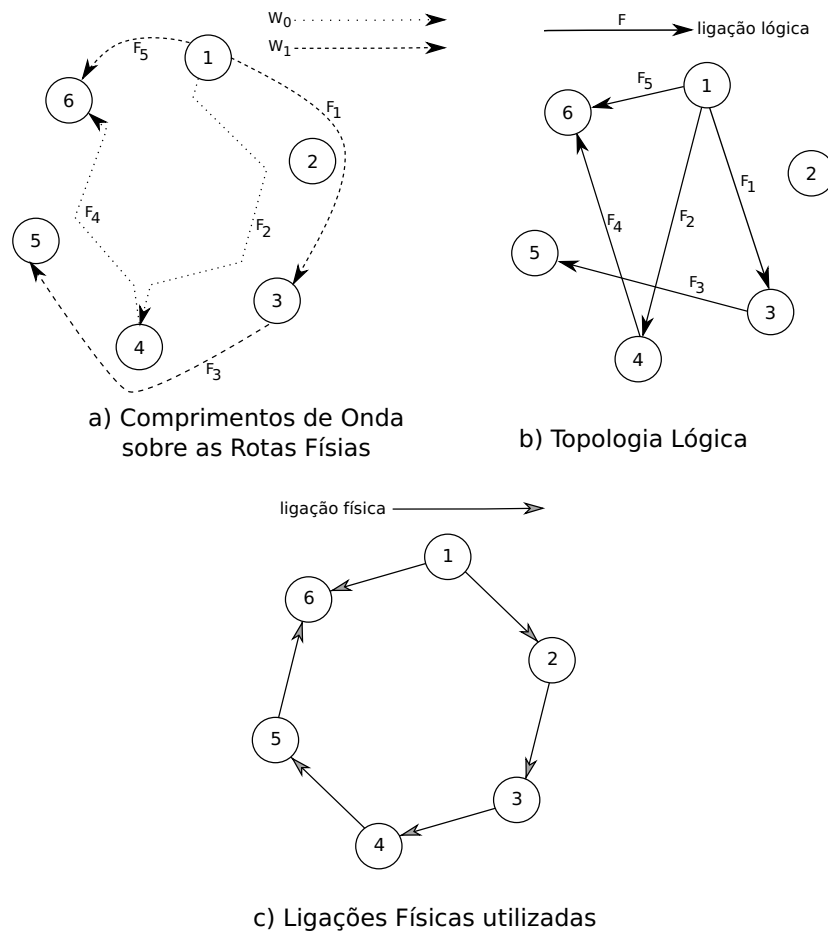


Figura 1.5: Rotas físicas e alocação de comprimentos de onda para as ligações lógicas.

1 subdivididas e transportadas paralelamente por mais de uma caminho sobre a topologia lógica  
 2 (RAMASWAMI; SIVARAJAN, 1996).

3 No item *a* da Figura 1.6 está representada a distribuição da demanda de tráfego  $P_{16}$ , com  
 4 origem no nó 1 e destinada ao nó 6, sobre a topologia lógica apresentada na Figura 1.2. Utili-  
 5 zando dois caminhos sobre a topologia lógica, a demanda de tráfego foi dividida em duas partes,  
 6 uma contendo  $2/3$  do tráfego original e outra com o  $1/3$  restante. A primeira parte foi desig-  
 7 nada à ligação lógica  $F_5$ , atingindo diretamente o destino, e a segunda parte foi roteada pela  
 8 caminho formado pelas ligações lógicas  $F_2$  e  $F_4$ . Pelo primeiro caminho o tráfego foi entregue  
 9 transparentemente, e no segundo houve processamento eletrônico no nó intermediário 4.

10 No item *b* da Figura 1.6 estão representadas as rotas físicas e os comprimentos de onda  
 11 utilizados na distribuição de tráfego da demanda  $P_{16}$ , de acordo com o esquema apresentado  
 12 no item *a* da Figura 1.5. Note que o tráfego passou também pelos nós 2, 3, e 5, mas de forma  
 13 transparente, sem conversão eletrônica.

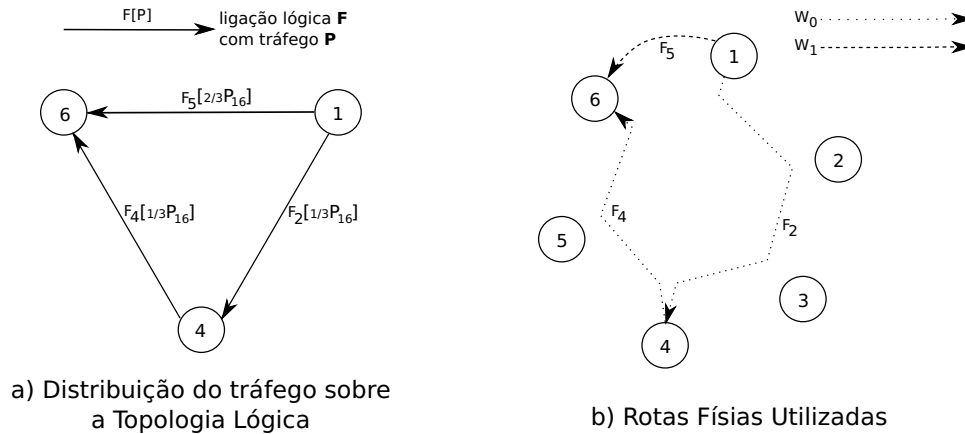


Figura 1.6: Demanda de Tráfego  $P_{16}$  distribuída na Topologia Lógica

## 1.2 Etapas do projeto de uma WRON

O projeto de WRON deve levar em conta seus custos de implementação e operação, que podem ser colocados, resumidamente, em função dos recursos de transmissão requeridos na camada óptica e a capacidade de processamento e armazenamento dos roteadores eletrônicos (BANERJEE; MUKHERJEE, 2000). Para tanto, técnicas de otimização são largamente empregadas e as soluções propostas fazem uso de métodos exatos e heurísticas, separadamente ou em conjunto. Na literatura, o projeto completo de WRON é dividido em quatro sub-problemas, que serão denominados: roteamento de tráfego (TR - *Traffic Routing*), projeto da topologia lógica (LTD - *Logical Topology Design*), roteamento de comprimentos de onda (WR - *Wavelength Routing*) e alocação de comprimentos de onda (WA - *Wavelength Assignment*) (RAMASWAMI; SIVARAJAN, 2002; BALA, 2000, 2000).

Tradicionalmente, os sub-problemas LTD e TR são associados, bem como o WR e o WA, compondo respectivamente os conhecidos problemas de VTD (*Virtual Topology Design*) (RAMASWAMI; SIVARAJAN, 2002) e RWA (*Routing and Wavelength Assignment*) (ZANG; JUE; MUKHERJEE, 2000). Isto está ilustrado na figura 1.7. Mais recentemente, os sub-problemas de TR e WR vem também sendo associados nos trabalhos que abordam o problema de *grooming* de tráfego (RESENDO; RIBEIRO; CALMON, 2007), mas esta última abordagem está fora do foco de estudo neste trabalho.

### 1.2.1 Projeto da Topologia Lógica

O projeto da topologia lógica, VTD, que inclui a distribuição do tráfego e escolha da topologia lógica, é modelado na literatura como um problema de programação inteira mista (MILP - *Mixed Integer Linear Problem*) (RAMASWAMI; SIVARAJAN, 1996; BALA, 2000, 2000). No

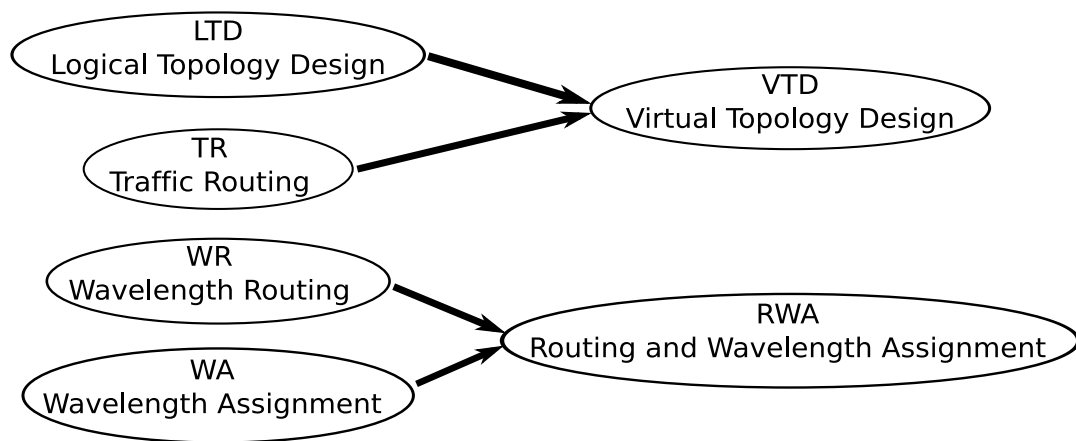


Figura 1.7: Quatro sub-problemas se fundem em VTD e RWA

entanto esses modelos se mostraram intratáveis mesmo para instâncias pequenas, com menos de 20 nós. Assim, heurísticas foram propostas para sua resolução (RAMASWAMI; SIVARAJAN, 1996; OLIVEIRA, 2005; LIMA et al., 2005).

Vale citar a clássica heurística HLDA (RAMASWAMI; SIVARAJAN, 1996), usada em muitos trabalhos na literatura, como (ASSIS; WALDMAN, 2004; SKORIN-KAPOV; KOS, 2005). Ela consiste de um algoritmo que cria ligações lógicas visando transportar as maiores demandas de tráfego em um único salto sobre a topologia lógica, evitando que grande parte de tráfego precise ser retransmitido por caminhos mais longos. Ela permite inclusive que múltiplas ligações lógicas sejam criadas entre um mesmo par de nós.

Essa abordagem visa distribuir o tráfego mais uniformemente sobre a topologia lógica e ao mesmo tempo evita retransmissão excessiva das demandas de tráfego. Ambos são fatores importantes no projeto da topologia lógica. A seguir, serão detalhados esses e outros aspectos dessa fase do projeto de uma WRON.

#### Escolha da Topologia Lógica

Quando se trata os sub-problemas separadamente, o primeiro passo é a escolha da topologia lógica, o LTD, todavia as principais métricas de interesse normalmente se encontram nas outras etapas. No LTD o objetivo mais comuns é obter uma topologia lógica que facilite a construção de melhores soluções nas etapas subsequentes, normalmente atendendo a uma estrutura topológica pré-definida (RAMASWAMI; SIVARAJAN, 1996). Quanto à estrutura topológica, ela pode ter uma forma determinada, como estrela, anel ou árvore (BOAVENTURA, 2001), ou uma forma mais geral, chamada malha (RAMASWAMI; SIVARAJAN, 1996). Há ainda a possibilidade de se formar uma estrutura hierárquica, com um *backbone* centralizador e *clusters*



1 periféricos (LIU et al., 2007). Mas o foco neste trabalho será o caso mais geral, que são as  
2 topologias em malha.

3 Um fator importante no dimensionamento da rede é o número de ligações lógicas. Pois  
4 cada uma possui em seu início um transmissor óptico que converte o fluxo eletrônico em sinal  
5 óptico. Paralelamente, na finalização de uma ligação lógica há um receptor óptico que faz a  
6 conversão inversa. Como esses equipamentos existem aos pares, é comum referir-se apenas ao  
7 número de transceptores, que significa tanto receptores quanto transmissores (MUKHERJEE,  
8 1997). Além dos transceptores, o número de ligações lógicas influencia fortemente no dimen-  
9 sionamento dos equipamentos ópticos WDM e nos roteadores eletrônicos (XIN; ROUSKAS;  
10 PERROS, 2003). De modo que, geralmente, é o número de ligações lógicas que define as ins-  
11 tâncias do problema pois, sendo um fator decisivo no dimensionamento, ele é definido *a priori*  
12 e as técnicas de otimização são aplicadas à outras métricas (KRISHNASWAMY; SIVARAJAN,  
13 2001; RAMASWAMI; SIVARAJAN, 1996).

14 O número de ligações lógicas partindo de um nó é chamado de grau lógico de saída, en-  
15 quanto o número de ligações lógicas chegando em um nó é chamado de grau lógico de entrada  
16 (RAMASWAMI; SIVARAJAN, 1996). Quando é exigido que haja simetria entre esses valo-  
17 res, há apenas o que é chamado de grau lógico do nó. Se todos os nós da rede tem de ter o  
18 mesmo grau lógico, então este valor é chamado de grau lógico da rede. Este é o valor nor-  
19 malmente usado para se definir o número de ligações numa topologia lógica a ser projetada  
20 (RAMASWAMI; SIVARAJAN, 1996).

21 Uma abordagem complementar é garantir que a topologia lógica ofereça redundância de  
22 caminhos, como forma de manter os nós conectados quando um nó ou uma ligação física sofre  
23 interrupção nos serviço (LIMA et al., 2005). Todavia maior segurança é obtida garantindo  
24 redundância nas rotas físicas, pois é possível que um determinado caminho na topologia lógica  
25 e seu respectivo redundante compartilhem uma ligação física ou um nó intermediário em suas  
26 rotas físicas.

## 27 **Distribuição das Demandas de Tráfego**

28 Escolhida uma topologia lógica, a próxima etapa é distribuir sobre seus caminhos o trá-  
29 fego da matriz de demandas, o sub-problema TR. Isoladamente, este pode ser modelado como  
30 um problema de programação linear (RAMASWAMI; SIVARAJAN, 1996), que pode ser re-  
31 solvido em tempo polinomial (CORMEN, 2002). Ele pode ser modelado como um problema  
32 distribuição de fluxo em rede clássico ou de forma agregada, onde as demandas de tráfego são  
33 agregadas em relação à origem ou ao destino, reduzindo a ordem de grandeza das variáveis do

1 modelo linear, tornando-o mais eficiente (RAMASWAMI; SIVARAJAN, 1996).

2 Na distribuição de tráfego aparecem métricas importantes como o congestionamento. Ele é  
3 a quantidade de tráfego designado ao caminho óptico mais carregado da rede. Ao minimizar o  
4 congestionamento a tendência é distribuir igualmente o tráfego entre todos os caminhos ópticos.  
5 Este critério garante que não haja subutilização ou sobrecarga nas ligações lógicas. A sobre-  
6 carga causa aumento do atraso em filas e consequente diminuição da vazão (RAMASWAMI;  
7 SIVARAJAN, 2002).

8 Outra métrica importante é o processamento eletrônico, que está diretamente associado a  
9 quantidade de tráfego que é retransmitido por mais de uma ligação lógica, antes de chegar ao  
10 seu destino. Esse tráfego tem de ser processado nos roteadores eletrônicos de tráfego nos nós  
11 intermediários, o que influencia no dimensionamento dos mesmos, além de atraso em filas (AL-  
12 MEIDA et al., 2006). A distribuição do tráfego deve tentar enviar a maior parte do tráfego por  
13 caminhos compostos apenas por uma ligação lógica, de modo a evitar excessivo processamento  
14 eletrônico.

## 15 1.2.2 Roteamento e Alocação de Comprimentos de Onda

16 O sub-problema WR consiste em determinar as rotas físicas para as ligações lógicas, tam-  
17 bém chamadas neste contexto de requisições de conexão (ZANG; JUE; MUKHERJEE, 2000).  
18 Há três principais métricas de interesse nesta etapa, uma é que as rotas físicas não devem ser  
19 muito longas para evitar perdas de pacote por degradação do sinal (BALA, 2000). Outro fa-  
20 tor importante é o número de rotas físicas compartilhando uma mesma ligação física, pois isso  
21 influencia diretamente na quantidade de comprimentos de onda que serão necessários na reso-  
22 lução do sub-problema WA (ZANG; JUE; MUKHERJEE, 2000). Além disso, sua minimização  
23 forçaria uma distribuição mais uniforme das rotas nas ligações físicas.

24 A terceira métrica de interesse é uma sofisticação da primeira, que considera a quantidade  
25 de tráfego alocada à rota física, além da distância percorrida. O objetivo neste caso é minimizar  
26 o produto entre o tráfego alocado e a distância percorrida, conhecido como fator BL (*Bandwidth*  
27 *Length*) (AGRAWAL, 1997). Com a distribuição de tráfego já definida, minimizar BL tem efeito  
28 apenas sobre a distância, que neste caso é ponderada em função da quantidade de tráfego.

29 A criação das rotas físicas é o momento mais oportuno para se obter soluções tolerantes  
30 à falhas, construindo soluções com redundância de rotas físicas. Pois falhas mais críticas são  
31 as que envolvem cabos de fibra ou os equipamentos WDM dos nós (RAMASWAMI; SASAKI,  
32 1998). É neste momento em que se determina as ligações físicas e os nós por onde será roteado o

1 tráfego. Se para cada rota física existir uma segunda rota, sua cópia de segurança, com o mesmo  
2 destino e origem mas sem compartilhar nós intermediários ou ligações físicas ao longo de seus  
3 percursos, as falhas mencionadas não irão interromper a comunicação. Mas estas abordagens  
4 de proteção estão fora do escopo deste texto.

5 Por sua vez, o sub-problema WA consiste em atribuir comprimentos de onda às rotas físi-  
6 cas determinadas no sub-problema WR. Duas rotas físicas passando por uma mesma ligação  
7 física devem ter comprimentos de onda diferentes. Além disso, estamos assumindo a restrição  
8 de continuidade de comprimentos de onda (ZANG; JUE; MUKHERJEE, 2000), ou seja, um  
9 mesmo comprimento de onda deve ser usado do início ao fim de uma rota física. O objetivo  
10 mais comum nesta etapa é minimizar o número de comprimentos de onda necessários, pois isso  
11 influencia no dimensionamento dos equipamentos WDM dos nós e nos cabos de fibra óptica  
12 (XIN; ROUSKAS; PERROS, 2003).

13 O roteamento e alocação de comprimentos de onda, são tratados na literatura tanto separa-  
14 damente quanto na forma do problema RWA (ZANG; JUE; MUKHERJEE, 2000; JAUMARD;  
15 MEYER; THIONGANE, 2004). Existem diversas modelagens para o RWA; um estudo abran-  
16 gente delas pode ser visto em (JAUMARD; MEYER; THIONGANE, 2004). Cada uma dessas  
17 modelagens tem objetivos diferentes e sua análise está além do escopo deste texto.

18 O roteamento pode ser modelado como um problema de programação inteira (Integer Li-  
19 near Problem - ILP) (ZANG; JUE; MUKHERJEE, 2000). Mas comumente é tratado por al-  
20 goritmos mais simples, como o do caminho mais curto (CORMEN, 2002), de modo a dedicar  
21 mais esforço computacional à outras fases do projeto (ZANG; JUE; MUKHERJEE, 2000; RA-  
22 MASWAMI; SIVARAJAN, 1996). O sub-problema WA pode ser visto como uma problema de  
23 coloração de grafos, que é um problema NP-Completo (CORMEN, 2002) e também pode ser  
24 modelado como um ILP (ZANG; JUE; MUKHERJEE, 2000).

## 25 1.3 Trabalhos Anteriores

26 O problema de projetar uma rede óptica, a partir de uma topologia física conhecida, pode  
27 ser formulado como um MILP, sendo definida uma métrica de interesse a ser otimizada. Esse  
28 problema já foi amplamente estudado, tendo sido propostas heurísticas para resolvê-lo, sendo  
29 conhecidamente um problema de alto custo computacional (KRISHNASWAMY; SIVARAJAN,  
30 2001; XIN; ROUSKAS; PERROS, 2003). As diferentes abordagens partem de considerações  
31 específicas sobre as demandas de tráfego, a métrica a ser otimizada, entre outras. O objetivo  
32 normalmente é a minimização de algum recurso da rede, tendo como exemplos: número de

1 comprimentos de onda utilizados, número de transceptores, congestionamento e processamento  
2 eletrônico.

3 Uma das formulações para o projeto de uma topologia virtual foi apresentado como um  
4 problema de otimização em (MUKHERJEE et al., 1996). Os autores formularam o problema  
5 de projeto de topologia lógica como um problema de otimização não linear. A função objetivo  
6 considerava a minimização do atraso na transmissão e do congestionamento da rede. Os autores  
7 subdividem o problema em quatro subproblemas, da forma como foi mostrada na Seção 1.2.  
8 Nos experimentos apresentados, os autores consideram apenas o VTD, subproblemas LTD e  
9 TR. A meta-heurística *Simulated annealing* foi utilizada na resolução do subproblema LTD  
10 e *flow deviation* para o subproblema TR. Entretanto, a meta-heurística *Simulated Annealing*  
11 implementada torna-se muito cara computacionalmente para redes de grande porte.

12 Em (BANERJEE; MUKHERJEE, 2000) é apresentada uma formação MILP para o projeto  
13 completo de uma WRON com conversão de comprimentos de onda. Vale ressaltar que, em  
14 redes equipadas com conversores de comprimentos de onda, o problema torna-se menos com-  
15 plexo pois a restrição de continuidade dos comprimentos de onda não é aplicada (ZANG; JUE;  
16 MUKHERJEE, 2000). O objetivo neste trabalho era minimizar a distância média das rotas físi-  
17 cas. A formulação MILP apresentada, inclui a definição das ligações lógicas, suas rotas físicas,  
18 e a distribuição de tráfego sobre as mesmas. Com o objetivo de tornar o problema tratável, a  
19 restrição de continuidade de comprimentos de onda foi relaxada, considerando que todos os nó  
20 possuem capacidade de conversão de comprimentos de onda. Devido à dificuldade de obter  
21 soluções ótimas com o modelo MILP o processo de otimização foi interrompido após algumas  
22 iterações.

23 Em (RAMASWAMI; SIVARAJAN, 1996) os autores formularam uma modelagem MILP  
24 para o VTD com o objetivo principal de minimizar congestionamento. Não existe restrição  
25 quanto ao número de comprimentos de onda utilizados. A desvantagem desta abordagem é que  
26 a topologia física torna-se irrelevante para o projeto, pois ela é considerada apenas para limitar  
27 o atraso de propagação. A estrutura física influencia muito pouco dessa forma. Além disso,  
28 o atraso é calculado supondo que as rotas físicas são estabelecidas pelo algoritmo da menor  
29 distância (ZANG; JUE; MUKHERJEE, 2000).

30 Em (KRISHNASWAMY; SIVARAJAN, 2001) é proposta uma modelagem MILP que mi-  
31 nimiza congestionamento em redes sem conversores de comprimentos de onda. Segundo os  
32 autores, esta formulação não é computacionalmente tratável, sendo métodos heurísticos propos-  
33 tos. O Modelo MILP é relaxado e executado iterativamente por 25 vezes usando um plano de  
34 corte. As variáveis que representam a topologia virtual e os percursos físicos são arredondadas,

1 enquanto uma heurística de alocação de comprimentos de onda é aplicada para atribuir-los indi-  
2 vidualmente às rotas físicas. Uma das desvantagens desse método é que, supondo que existam  
3  $W$  comprimentos de onda disponíveis em cada fibra, o algoritmo de alocação de comprimentos  
4 de onda pode não garantir sucesso. Em caso de falha, ele será reiniciado incrementando  $W$ .  
5 Como resultado, o método não retorna necessariamente soluções viáveis em todas as tentativas.

6 Em (BANERJEE; MUKHERJEE, 1997), os autores formularam o problema de projeto  
7 de topologia lógica como um problema linear que considera os nós da rede equipados com  
8 conversores de comprimento de onda. A função objetivo da formulação é a minimização do  
9 comprimento das rotas físicas, com a possibilidade de redução do número de conversores de  
10 comprimentos de onda utilizados e, dessa forma, esta formulação poderia ser aproximada para  
11 uma formulação sem conversão. As deficiências desta formulação são: ela produz resultados ra-  
12 zoáveis somente se a matriz de tráfego for equilibrada, sendo esta uma consequência da função  
13 objetivo não incluir variáveis de tráfego; ele é eficiente somente se a topologia física for densa  
14 em termos do número de arestas. Se a topologia física for esparsa então o número de converso-  
15 res de comprimento de onda utilizados aumentará, pois haveriam poucas rotas alternativas. A  
16 restrição de continuidade dos comprimentos de onda não foi utilizada nesta formulação.

17 O artigo (TORNATORE; MAIER; PATTAVINA, 2007) apresenta um modelo MILP para  
18 o projeto de WRONs, capaz de projetar também a rede física, suportando múltiplos cabos de  
19 fibra óptica entre cada par nós. No modelo proposto é usada agregação de variáveis em relação  
20 à origem para a criação das rotas físicas, o que permite uma redução relevante no número de  
21 variáveis e restrições (JAUMARD; MEYER; THIONGANE, 2004). Com relação a conversão  
22 de comprimentos de onda, dois casos extremos são tratados: 1) quando todos os nós possuem  
23 capacidade de converter os comprimentos de onda, e 2) quando nenhum nó possui capacidade de  
24 conversão de comprimento de onda, sendo exigida a restrição de continuidade de comprimentos  
25 de onda. O trabalho propõe a otimização da topologia lógica de uma rede física com múltiplos  
26 cabos de fibras entre os pares de nós, com o objetivo de minimização de custo: o número de  
27 ligações físicas entre cada par de nós é a variável a ser minimizada, tendo como um dos dados  
28 de entrada o número de comprimentos de onda por ligação física.

29 Algumas heurísticas para o projeto completo de redes ópticas foram apresentadas no artigo  
30 (SKORIN-KAPOV; KOS, 2005), aplicando o modelo proposto em (KRISHNASWAMY; SIVA-  
31 RAJAN, 2001). Este trabalho envolve o projeto de WRONs sem utilização de conversores de  
32 comprimento de onda. Neste trabalho é introduzida uma função objetivo chamada, o número  
33 médio de saltos lógicos (*average virtual hop distance*), onde o número de saltos lógicos é a  
34 quantidade de ligações lógicas que por onde uma demanda de tráfego passa antes de chegar

ao destino. As heurísticas apresentadas são adaptações das apresentadas em (RAMASWAMI; SIVARAJAN, 1996). Os resultados apresentados foram gerados a partir de experimentos com redes de tamanhos variados e para características de tráfego uniforme e não uniforme.

Uma referência clássica para o RWA é o artigo (ZANG; JUE; MUKHERJEE, 2000). Este estudo detalha o problema de roteamento e alocação de comprimentos de onda (RWA) em redes ópticas WDM, especialmente para redes que operam com a restrição de continuidade de comprimentos de onda, ou seja, não utilizam conversores. É apresentada uma revisão de várias abordagens e métodos apresentadas na literatura, abrangendo modelagens MILP e heurísticas.

Um modelo MILP para o projeto completo foi apresentado em (ASSIS; WALDMAN, 2004), baseado nas formulações clássicas do VTD e do RWA. Este trabalho propõe um algoritmo heurístico iterativo, que faz uso de programação linear, para resolver os problemas VTD e RWA de forma integrada. A topologia lógica é escolhida com a clássica heurística HLDA (RAMASWAMI; SIVARAJAN, 1996), e esse resultado é fixado no modelo proposto. A seguir o modelo é resolvido para encontrar solução para as demais variáveis. Por se tratar de um modelo MILP de alto custo computacional, a resolução é interrompida depois de um tempo pré determinado. A função objetivo adotada foi o número total de saltos nas rotas físicas, com o objetivo de evitar a formação de ciclos nas rotas físicas. A estratégia foi passar ao modelo limitações para as métricas importantes, de modo que as soluções viáveis encontradas fossem satisfatórias. Essa abordagem foi possível dada a grande abrangência do modelo proposto, onde métricas dos quatro sub-problemas do projeto de uma WRON podem ser controladas. Todavia o alto custo computacional do modelo proposto inviabiliza sua aplicação para redes de grande porte. As redes testadas tinham 6 e 12 nós.

## 1.4 Projeto Completo de uma WRON Semitransparente

O foco deste trabalho é modelar o projeto de uma WRON semitransparente, visando auxiliar nas fases de planejamento e dimensionamento de redes. Neste contexto, comumente toma-se por base uma topologia física pré estabelecida. Esta normalmente é definida por fatores históricos, geográficos e econômicos. Um dos objetivos aqui é levar para o projeto da rede física considerações que só surgiriam depois, no tratamento dos sub-problemas VTD e RWA. Nesse sentido, o projeto completo de uma WRON incluiria o projeto da rede física, além dos sub-problemas VTD e RWA.

No projeto da rede física, será considerado apenas o custo de instalação dos cabos de fibra óptica. Não será considerado nenhum contexto geográfico ou histórico em particular, deste modo,

o custo de instalação será modelado simplesmente em função da distância entre os nós.

Na literatura, o projeto com essa abrangência foi pouco explorado (XIN; ROUSKAS; PERROS, 2003), em parte pela complexidade e elevado custo computacional das modelagens que combinam VTD e RWA (KRISHNASWAMY; SIVARAJAN, 2001; ASSIS; WALDMAN, 2004).

Na Seção 1.4.1 introduziremos uma nova modelagem eficiente para o projeto completo uma WRON que combina o projeto da topologia física com os problemas VTD e RWA.

Uma preocupação em modelagens abrangentes é o controle de várias métricas ao mesmo tempo. Isso é facilitado quando sabe-se como calcular eficientes limites inferiores para alguma delas. No projeto de uma WRON, uma métrica importante é o congestionamento e o cálculo de limites inferiores para ele envolve grande custo computacional (RAMASWAMI; SIVARAJAN, 1996). Por isso, para auxiliar no objetivo principal deste texto, que é o projeto abrangente de uma WRON, introduzimos na Seção 1.4.2 um novo e eficiente limite inferior para o congestionamento.

### 1.4.1 Nova Modelagem para Projeto Completo de uma WRON

A principal contribuição deste trabalho é a proposição de um modelo para o projeto de WRONs, denominado TWA (*Traffic over Wavelength Assignment*). Ele é capaz de tratar desde a escolha da topologia física da rede até a definição da topologia lógica, incluindo a distribuição de tráfego, a definição das rotas físicas e a alocação de comprimentos de onda.

Conforme será mostrado no Capítulo 2, este modelo possui um reduzido número de variáveis e restrições, se comparado a modelos que resolvem apenas o RWA, como os que são tratados em (JAUMARD; MEYER; THIONGANE, 2004). Na literatura, o projeto completo, incluindo topologias física e lógica, foi modelado em (XIN; ROUSKAS; PERROS, 2003), possuindo uma complexidade elevada, que torna o uso de heurísticas uma exigência. O problema modelado em (XIN; ROUSKAS; PERROS, 2003) possui premissas diferentes do modelo TWA, pois não trata dos sub-problemas VTD e RWA da mesma maneira, devido à utilização de tecnologias distintas. Com isso uma comparação direta não é possível. Outros modelos encontrados na literatura são menos abrangentes, alguns não tratam da topologia física (KRISHNASWAMY; SIVARAJAN, 2001; ASSIS; WALDMAN, 2004), ou assumem uma topologia lógica e não consideram uma matriz de demandas (TORNATORE; MAIER; PATTAVINA, 2007; PUECH; KURI; GAGNAIRE, 2002). Portanto, como estratégia de teste do modelo TWA, optamos por considerar a topologia física como conhecida.

O TWA guarda semelhanças com alguns modelos conhecidos (RAMASWAMI; SIVARAJAN, 2002; TORNATORE; MAIER; PATTAVINA, 2007), por utilizar variáveis agregadas para a distribuição do tráfego e criação das rotas físicas. Mas a modelagem que aqui será apresentada introduz outras vantagens que a tornam mais abrangente e ao mesmo tempo mais enxuta, considerando o número de variáveis e restrições.

Uma das vantagens é que o modelo naturalmente admite múltiplas ligações lógicas entre cada par de nós da rede, sem a necessidade de diferenciar cada ligação por uma variável de decisão diferente, como na abordagem utilizada anteriormente em (RAMASWAMI; SIVARAJAN, 2002).

Outra vantagem é que não são utilizadas variáveis diferentes para a topologia física, topologia lógica, rotas físicas e alocação de comprimentos de onda, como é feito em (ASSIS; WALDMAN, 2004). No TWA há uma variável chamada componente topológica que consegue acumular todas essas funções. De fato, definida uma rota física com um dado comprimento de onda, implicitamente estão definidas as ligações físicas utilizadas e a ligação lógica correspondente.

Ao invés de fazer a distribuição do tráfego em função da topologia lógica (RAMASWAMI; SIVARAJAN, 2002), o TWA possui restrições para a distribuição do tráfego escritas diretamente em função das componentes topológicas, daí seu nome (*Traffic over Wavelength Assignment*). Na prática, isso elimina as restrições de distribuição de requisições de tráfego do RWA (ZANG; JUE; MUKHERJEE, 2000). Isto está ilustrado na figura 1.8.

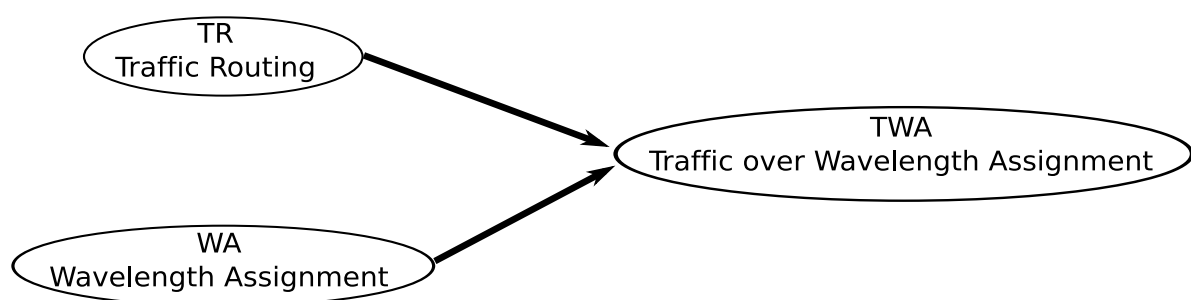


Figura 1.8: Dois sub-problemas se fundem no TWA

Essas características reduzem a complexidade do modelo, deixando de determinar explicitamente informações que não são necessárias nessa fase do projeto. Assim sendo, as variáveis e restrições do TWA consistem em um modelo completo para o projeto de redes ópticas, considerando todos os seus subproblemas de maneira integrada.

No Capítulo 2 apresentamos a modelagem básica para o TWA, onde são colocadas as restrições fundamentais da formulação proposta. No Capítulo 3 ilustramos outros casos de uso da



1 modelagem TWA, que estendem as capacidades do modelo básico. No Capítulo 5 são apre-  
2 sentados resultados computacionais, obtidos utilizando o modelo proposto neste trabalho, e  
3 comparações dos mesmos com outros resultados encontrados na literatura.

4 Por simplicidade, é assumido que todas as ligações lógicas possuem a mesma capacidade  
5 de tráfego. Além disso, não serão consideradas aqui a possibilidade de bloqueio de pacotes e  
6 nem outros tipos de perdas na transmissão. Portanto, é assumido que todo o tráfego da rede  
7 será devidamente enviado e recebido. Assumimos também a restrição de continuidade de com-  
8 primentos de onda, ou seja, os nós não são capazes de fazer conversão entre comprimentos de  
9 onda.

10 Não é suposto a existência de nenhum recurso, como quantidade de OXCs, OADMs ou  
11 fibras ópticas. Tentamos encontrar soluções que demandem o mínimo possível de recursos da  
12 rede. O objetivo dessa abordagem é servir de suporte para o dimensionamento e planejamento  
13 da rede; nesta fase é que serão definidos os equipamentos específicos que serão necessários para  
14 a implantação do projeto.

## 15 **1.4.2 Novo Limite Inferior para o Congestionamento**

16 Também é apresentada neste trabalho a demonstração formal de um novo limite inferior  
17 (*lower bound* - LB) para o congestionamento, denominado *Minimum Traffic Bound* (MTB).  
18 Nos resultados que serão apresentados na Seção 5.4, o MTB apresentou alta qualidade pois  
19 coincidiu com o ótimo ou ficou muito próximo dele. Além disso, seu custo computacional é  
20 desprezível, pois ele é calculado diretamente das demandas de tráfego, através de uma fórmula  
21 matemática. Isso contrasta com as técnicas para obtenção de LBs para o congestionamento  
22 que encontramos na literatura (RAMASWAMI; SIVARAJAN, 2002). Até então, obter LBs  
23 de boa qualidade para congestionamento tinha custo computacional bem mais elevado do que  
24 encontrar boas soluções viáveis (KRISHNASWAMY; SIVARAJAN, 2001; SKORIN-KAPOV;  
25 KOS, 2005). O MTB será apresentado no Capítulo 4.

## 2 *TWA - Modelo para o Projeto Completo de uma WRON*

Neste capítulo será apresentada a forma básica do modelo TWA (*Traffic over Wavelength Assignment*), começando pela notação designada aos nós e as constantes que definem uma instância de problema para o modelo. Em seguida serão definidas as variáveis utilizadas para compor as restrições e a função objetivo do modelo, passando-se então à sua descrição. A função objetivo adotada na formulação básica é a minimização dos custos de instalação e operação da rede, valendo-se da capacidade do modelo escolher também a topologia física da rede. Além disso, foi considerada a restrição de conservação dos comprimentos de onda ao longo do caminho óptico (ZANG; JUE; MUKHERJEE, 2000), ou seja, não se admite a conversão de comprimentos de onda na camada óptica da rede nesta formulação básica. Outros casos de uso e extensões ao modelo básico serão apresentados no Capítulo 3.

### 2.1 Notação e Dados de Entrada

**Notação 1.** Para uma rede de  $N$  nós, os pares ordenados  $(m, n)$ ,  $(s, d)$  e  $(i, j)$  indicam respectivamente ligações físicas, demandas de tráfego e ligações lógicas, com  $m \neq n$ ,  $s \neq d$  e  $i \neq j$ , onde  $m, n, s, d, i, j \in \{1, \dots, N\}$ . O índice  $w \in \{1, \dots, W\}$  representa comprimentos de onda, onde  $W$  é a quantidade limite de comprimentos de onda que podem ser usados. O índice  $v \in \{1, \dots, N\}$  representa os nós da rede.

A Figura 2.1 ilustra os diferentes escopos dos índices associados aos nós da rede, com relação às ligações físicas  $(m, n)$ , ligações lógicas  $(i, j)$  e demandas de tráfego  $(s, d)$ . Esta notação segue a convenção comumente utilizada em trabalhos anteriores (MUKHERJEE, 1997; RAMASWAMI; SIVARAJAN, 2002). É importante dizer que esta modelagem suporta múltiplas ligações físicas e lógicas entre cada par de nós, portanto, os pares  $(m, n)$  e  $(i, j)$  representam conjuntos de possíveis ligações físicas e lógicas, respectivamente. Esses conjuntos não serão explicitamente controlados, sendo esse um dos motivos da simplicidade do modelo.

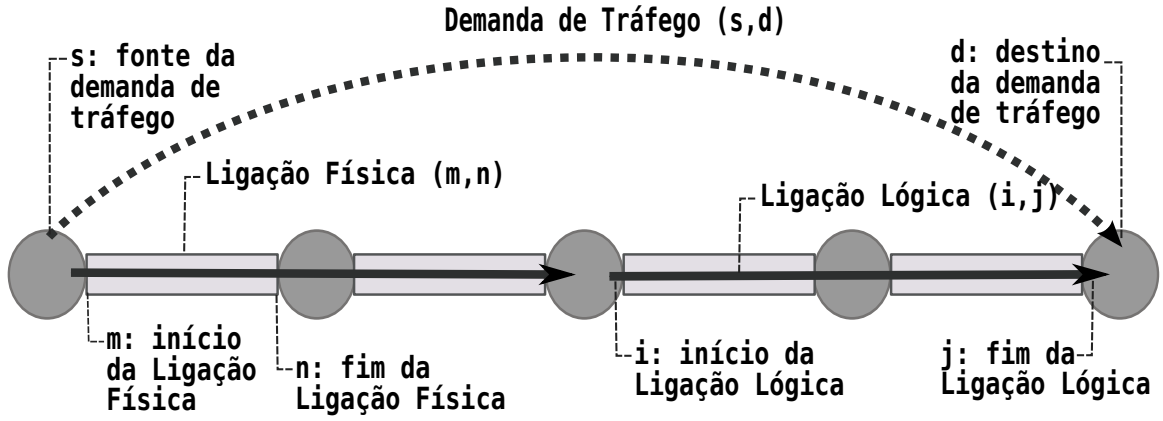


Figura 2.1: Representação gráfica da notação associada aos nós da rede.

1 **Dados 1.** Uma instância para o modelo TWA é definida por:

2 1.  $N$  = Número de nós da rede.

3 2.  $W$  = Máximo de comprimentos de onda em ligação física.

4 3.  $K$  = Máxima multiplicidade de ligações físicas entre cada par  $(m,n)$ .

5 4.  $Cap$  = Capacidade de tráfego de cada ligação lógica.

6 5.  $C_{mn}$  = Custo de uma ligação física entre o par  $(m,n)$ .

7 6.  $T$  = Custo por unidade de fluxo.

8 7.  $P_{sd}$  = Demanda de tráfego, com origem  $s$  e destino  $d$ .

9 8.  $A_s = \sum_d P_{sd}$  = Tráfego agregado pela origem  $s$ .

10 9.  $Q_{sd} = P_{sd}/A_s$  = Fração de  $A_s$  correspondente à Demanda de tráfego  $P_{sd}$ .

## 11 2.2 Componentes Topológicos

12 A variável central do modelo, a partir da qual todas as demais serão definidas, chamada de  
 13 componente topológica, é representada graficamente na Figura 2.2 e formalmente definida na  
 14 Variável 2.2.1. Ela sozinha representa as topologias lógica e física, as rotas físicas das ligações  
 15 lógicas e os comprimentos de onda utilizados.

16 **Variável 2.2.1.** Seja  $B_{iw}^{mn} = k \in \{0, \dots, K\}$ , com  $i \neq n$ , um componente do conjunto das ligações  
 17 lógicas com origem  $i$  e comprimento de onda  $w$ , que utilizam  $k$  ligações físicas entre os nós  $m$   
 18 e  $n$ .

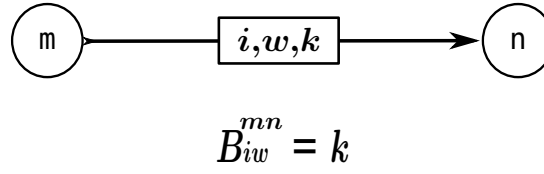


Figura 2.2: Representação gráfica de um componente topológico.

Em um componente topológico  $B_{iw}^{mn} = k$ , o índice  $i$  representa o nó de origem das  $k$  ligações lógicas que, passando pelas ligações físicas iniciadas em  $m$  e incidentes em  $n$ , usa o comprimento de onda  $w$ . Conforme a terminologia utilizada neste trabalho daqui por diante, *um componente topológico  $B_{iw}^{mn} = k$  é iniciado em  $m$ , incidente em  $n$ , com origem  $i$ , comprimento de onda  $w$  e valor  $k$ .*

Considerando que  $B_{iw}^{mn} = k$  para algum  $k \in \{0, \dots, K\}$ , existem  $k$  ligações lógicas originadas em  $i$  no comprimento de onda  $w$ , passando por  $k$  ligações físicas distintas entre o par de nós  $(m, n)$ . Neste caso, se  $k > 1$  então há multiplicidade de ligações físicas entre o par de nós  $(m, n)$ , pois haveria interferência se houvessem duas ligações lógicas se propagando na mesma ligação física, com o mesmo comprimento de onda. Note que  $K$  limita apenas a multiplicidade das ligações físicas, pois se  $K = 1$ ,  $B_{iw}^{mn}$  se torna uma variável binária, ainda podem haver múltiplas ligações lógicas entre um par  $(i, j)$ , utilizando rotas físicas distintas, ou ainda, comprimentos de onda diferentes em uma mesma rota física. Se  $B_{iw}^{mn} = 0$ , para um dada par  $(m, n)$  e ,  $\forall (i, w)$ , então nenhuma ligação física entre o par de nós  $(m, n)$  é utilizada.

Na Figura 2.3, temos um exemplo de interpretação dos componentes topológicos, todos com origem no nó  $i$  e com o mesmo comprimento de onda  $w_1$ . No item  $d$ ) desta figura, o valor 2 do componente que liga os nós  $(i, m)$  é interpretado como duas ligações físicas entre esses nós, representadas no item  $a$ ). No item  $b$ ), vemos uma ligação lógica dupla entre os nós  $(i, n)$ , onde uma delas passa de forma transparente pelo nó  $m$ , como indicado no item  $c$ ). Note ainda que, no item  $d$ ), há dois caminhos lógicos incidentes em  $m$  mas apenas um iniciando. Isso indica que uma ligação lógica termina em  $m$ , enquanto a outra segue adiante.

A indexação atribuída às variáveis  $B_{iw}^{mn}$  especificam apenas o nó  $i$ , que é onde se iniciam as ligações lógicas representadas, sem deixar claro aonde elas terminam. Isto significa que estas variáveis agregam todas as ligações lógicas originadas em  $i$  que utilizam as ligações físicas entre o par  $(m, n)$  e o comprimento de onda  $w$ , independente do nó  $j$  em que terminam estas ligações lógicas. Esta técnica consiste em uma abordagem bastante conhecida para a representação de variáveis em problemas de distribuição de fluxo em redes. Em (TORNATORE; MAIER; PAT-TAVINA, 2007), este conceito de agregação de tráfego é aplicado como meio de simplificação do modelo, reduzindo substancialmente o número de variáveis dos problemas resultantes. No

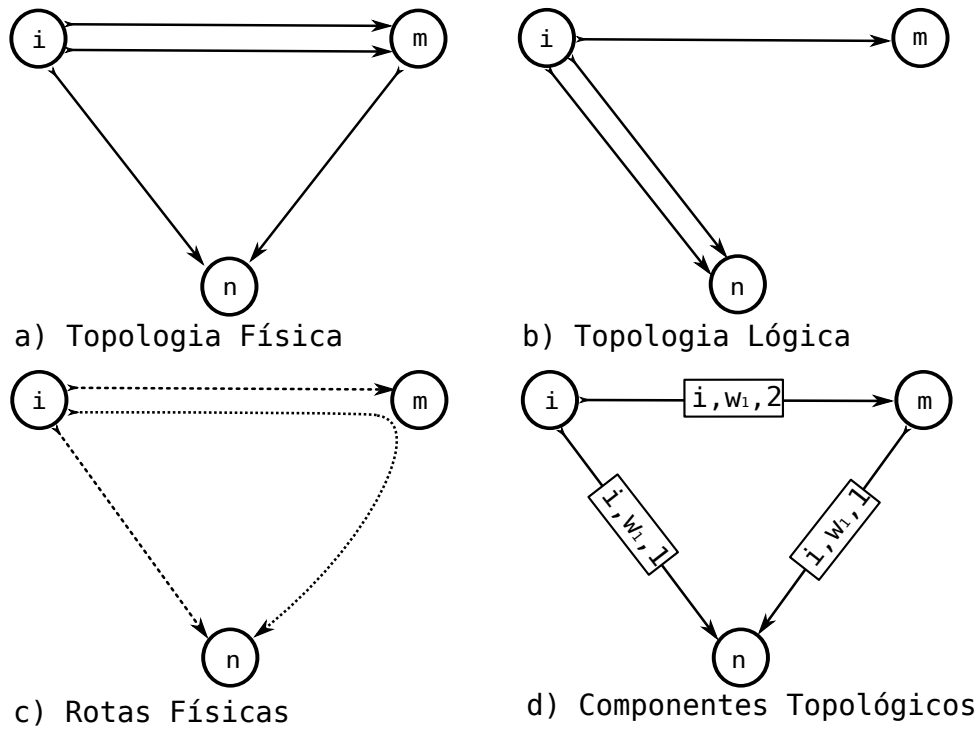


Figura 2.3: Exemplo da interpretação dos componentes topológicos.

- 1 TWA, esta agregação cumpre o mesmo papel de simplificação, cabendo às restrições do modelo
- 2 garantir implicitamente a terminação correta destas ligações lógicas agregadas nas variáveis
- 3  $B_{iw}^{mn}$ .

## 4 2.3 Topologia Física e Fração de Fluxo

5 Apesar da topologia física ser determinada pelos componentes topológicos, para fins de  
 6 controle do custo de instalação da rede física, são necessárias novas incógnitas. Para este fim,  
 7 é definida a Variável 2.7.1, que registrará em  $D_{mn}$  a multiplicidade física determinada pelos  
 8 componentes topológicos. Se  $D_{mn} = 0$ , não há ligações físicas entre o par  $(m, n)$ , mas se  $D_{mn} =$   
 9  $k$ , para algum  $k \in \{0, \dots, K\}$ , existem  $k$  ligações físicas entre o par  $(m, n)$ .

10 Para resolver o sub-problema de roteamento de tráfego, são definidas as variáveis de fra-  
 11 ção de fluxo agregado (Variável 2.3.1). Elas são semelhantes às variáveis de fluxo agregado  
 12 utilizadas em (RAMASWAMI; SIVARAJAN, 1996), todavia há duas diferenças. Uma delas é  
 13 que aqui essas variáveis são normalizadas em função do tráfego agregado no origem  $A_s$ , e são  
 14 portanto uma fração deste. Essa modificação não é requerida pela modelagem, tendo apenas a  
 15 função de facilitar a compreeção das restrições do modelo, que ficam independentes do dados  
 16 de entrada.

A outra diferença é que o fluxo é separado por comprimento de onda, como se fossem  $W$  redes sem multiplexação sobrepostas. Isso facilita a interpretação das restrições do modelo, e também ajuda a mantê-lo mais simples. De fato, o controle da distribuição de fluxo deve ser feito em cada ligação lógica (RAMASWAMI; SIVARAJAN, 2002), mas a restrição de continuidade de comprimentos de onda exige uma equação para cada  $w$  separadamente (ZANG; JUE; MUKHERJEE, 2000). Soma-se a isso o fato de que nesta modelagem múltiplas ligações lógicas são agregadas em cada par  $(i, j)$ , para todos os valores  $w$  utilizados. Assim, separando o tráfego por comprimento de onda, foi possível combinar o controle da distribuição de tráfego com a restrição de continuidade de comprimentos de onda. Isso será tratado com mais detalhes na Seção 2.6.

**Variável 2.3.1.** *Seja  $q_{sw}^{ij} \in [0, 1]$  a fração de fluxo originado em  $s$ , passando pelas ligações lógicas entre o par  $(i, j)$ , no comprimento de onda  $w$ , com  $s \neq j$ .*

## 2.4 Custo de instalação e Operação

Duas métricas importantes no projeto da redes ópticas são os custos de instalação e operação (MUKHERJEE, 1997). O custo de instalação  $C_{mn}$  é o custo associado a uma ligação física entre o par de nós  $(m, n)$ . O custo total de instalação é dado na equação 2.4.1. O custo de operação  $T$ , definido como o custo por unidade de fluxo, é calculado na equação 2.4.2, e influencia também no dimensionamento dos nós da rede.

$$CI = \sum_{mn} C_{mn} \cdot D_{mn} \quad (2.4.1)$$

$$T = \sum_{sijw} T \cdot q_{sw}^{ij} \cdot A_s \quad (2.4.2)$$

O custo de operação pode ser dividido em duas partes: uma constante, formada pelas demandas de tráfego (equação 2.4.3), que necessariamente deverão ser roteadas; e outra variável, composta pelo tráfego adicional que é gerado, ou seja, o tráfego retransmitido (equação 2.4.4). A parte constante do custo de operação não influenciaria na função objetivo, por isso não será incluída em seu cálculo, dado na equação 2.4.5.

$$Tc = \sum_{sd} T \cdot P_{sd} \quad (2.4.3)$$

$$T_v = \sum_{sijw} T \cdot q_{sw}^{ij} \cdot A_s, \quad i \neq s \quad (2.4.4)$$

$$FO = CI + Tc \quad (2.4.5)$$

1        Outro ponto positivo dessas métricas é que minimizar o custo por unidade de fluxo é equi-  
 2        valente a minimizar o tráfego retransmitido na rede, o que por sua vez, equivale a minimizar  
 3        o processamento eletrônico de tráfego dos nós da rede (ALMEIDA et al., 2006). Além disso,  
 4        será necessária nesta modelagem uma restrição de limitação da capacidade das ligações lógicas  
 5        (*Cap*), que equivale à limitar o congestionamento na rede. Assim, limitando a capacidade e  
 6        minimizando o custo de operação, temos uma abordagem eficiente, quanto ao custo computa-  
 7        cional, para controlar também o congestionamento e o processamento, importantes métricas no  
 8        projeto da topologia virtual (ALMEIDA et al., 2006; RAMASWAMI; SIVARAJAN, 2002).

9        Se não for necessário ponderar o custo por unidade de fluxo, basta fazer  $T = 1$ , e se não  
 10        for necessário considerar o custo total de instalação (*CI*), basta fazer  $C_{mn} = 0$  para todo  $(m, n)$ .  
 11        Deste modo seria simplesmente um modelo de minimização do processamento, com limitação  
 12        do congestionamento (ALMEIDA et al., 2006).

## 13    2.5    O Modelo TWA

14        Nesta seção é apresentada a forma básica do modelo TWA. Suas restrição são apresentadas  
 15        a seguir, após a função objetivo apresentada na seção anterior.

### 16        Função Objetivo

- 17        • Minimizar o Custo de Instalação e Operação:

$$\sum_{mn} C_{mn} \cdot D_{mn} + \sum_{sijw} T \cdot q_{sw}^{ij} \cdot A_s, \quad i \neq s \quad (2.5.1)$$

### 18        Restrições

- 19        • Restrição de Continuidade de Comprimentos de Onda e Limitação de Capacidade:

$$\sum_s q_{sw}^{iv} \cdot A_s \leq Cap \cdot \left( \sum_m B_{iw}^{mv} - \sum_n B_{iw}^{vn} \right), \quad \forall (v, i, w) \quad (2.5.2)$$

- 1 • Topologia Física:

$$\sum_i B_{iw}^{mn} \leq D_{mn}, \quad \forall (m, n, w) \quad (2.5.3)$$

- 2 • Conservação de Fluxo:

$$\sum_{jw} q_{vw}^{vj} = 1, \quad \forall v \quad (2.5.4)$$

$$\sum_{iw} q_{sw}^{iv} - \sum_{jw} q_{sw}^{vj} = Q_{sv}, \quad \forall (v, s) \quad (2.5.5)$$

3 Nas próximas seções deste capítulo, as restrições da versão básica do modelo TWA serão  
4 analisadas detalhadamente. Outros casos de uso e extensões ao modelo básico serão apresenta-  
5 dos no capítulo seguinte.

## 6 2.6 Continuidade de Comprimentos de Onda e Capacidade

7 A Restrição 2.5.2 acumula múltiplas funções, além de atuar como restrição de continuidade  
8 de comprimentos de onda e limitação de capacidade, ele também garante a continuidade das  
9 rotas físicas. Para cada uma destas, os componentes topológicos devem formar um caminho  
10 sobre a topologia física, conservando o mesmo comprimento de onda. Esses percursos não são  
11 controlados explicitamente; eles são garantidos pela conservação dos componentes topológicos  
12 nos nós intermediários, como uma restrição de conservação de fluxo. A soma dos componentes  
13 das ligações lógicas iniciadas em um nó  $i$ , partindo de um nó intermediário  $v$ , deve ser menor  
14 ou igual à quantidade recebida. Isso é garantido se a equação 2.6.1 for satisfeita.

$$\sum_n B_{iw}^{vn} \leq \sum_m B_{iw}^{mv}, \quad \forall (v, i, w) \quad (2.6.1)$$

15 A equação 2.6.1 pode ser reescrita na forma da equação 2.6.2, que define  $Diff_{i,w}^v$ , a dife-  
16 rença entre a soma dos componentes chegando e saindo de  $v$ , originados em  $i$  com comprimento  
17 de onda  $w$ . Por sua vez, a equação 2.6.2 é equivalente à equação 2.6.3. Esta última é garantida  
18 pela Restrição 2.5.2, como fica demonstrado pela equação 2.6.4. O valor  $Diff_{i,w}^v$  representa a  
19 quantidade de ligações lógicas que não têm continuidade ao passar por  $v$ , ou seja, são as ligações  
20 lógicas incidentes em  $v$  com origem em  $i$ .



$$Diff_{i,w}^v = \sum_m B_{iw}^{mv} - \sum_n B_{iw}^{vn} \geq 0, \quad \forall (v, i, w) \quad (2.6.2)$$

$$0 \leq Cap \cdot Diff_{i,w}^v, \quad \forall (v, i, w) \quad (2.6.3)$$

$$\sum_s q_{sw}^{iv} \cdot A_s \leq Cap \cdot Diff_{i,w}^v, \quad \forall (v, i, w) \quad (2.6.4)$$

Na figura 2.4 é ilustrada a forma como a conservação dos percursos lógicos é feita. No item *a* vê-se dois componentes chegando no nó intermediário *v*, ambos compoem ligações lógicas iniciadas em *i*, que não está representado na figura, com o mesmo comprimento de onda. Igualmente ao componente que deixa *v*. A soma dos componentes que chegam é 3 e a dos que saem é 2, portanto a conservação está mantida. Neste exemplo, como há diferença de 1 entre a quantidade de componentes chegando e saindo de *v*, então, necessariamente há 1 ligação lógica terminando em *v*; para a qual ele deixa de ser visto como um nó intermediário, se tornando o destino dessa ligação lógica. A conservação não seria mantida caso houvessem componentes partindo de *v* em maior quantidade do que chegando, pois aí não haveria rastreabilidade do percurso até sua origem *i*.

Ainda na Figura 2.4, são mostradas duas possibilidades de interpretação dos componentes topológicos. Necessariamente duas ligações lógicas passam transparentemente por *v*, enquanto uma nele termina. Mas as informações presentes não permitem determinar por qual componente chega a ligação lógica incidente em *v*. Isso poderia ser decidido analisando todo o conjunto de componentes das ligações lógicas originadas em *i* no comprimento de onda *w*. Mas pode não haver um único arranjo possível, ou seja, o TWA não modela o exato percurso físico das ligações lógicas. Todavia, isso não interfere na modelagem do restante do problema e não precisa ser resolvido nesta fase do projeto. De posse da solução provida pelo TWA, as rotas que possuírem alternativas de configuração podem ser decididas levando-se em consideração outras métricas não abordadas aqui, como por exemplo o fator BL, que pondera tráfego com a distância percorrida sobre a topologia física (AGRAWAL, 1997). Este comportamento contribui para que o TWA seja um modelo enxuto, ao mesmo tempo que representa uma limitação.

Como os componentes topológicos e as frações de fluxo são indexadas pelo comprimento de onda, a distribuição tráfego é feita em partes disjuntas da topologia lógica, também separadas por comprimento de onda. Na Figura 2.5 é representada a separação da topologia lógica por comprimentos de onda. Essas porções disjuntas da topologia lógica são vistas na figura como planos paralelos que, quando sobrepostos, formam a topologia. Esses planos serão aqui

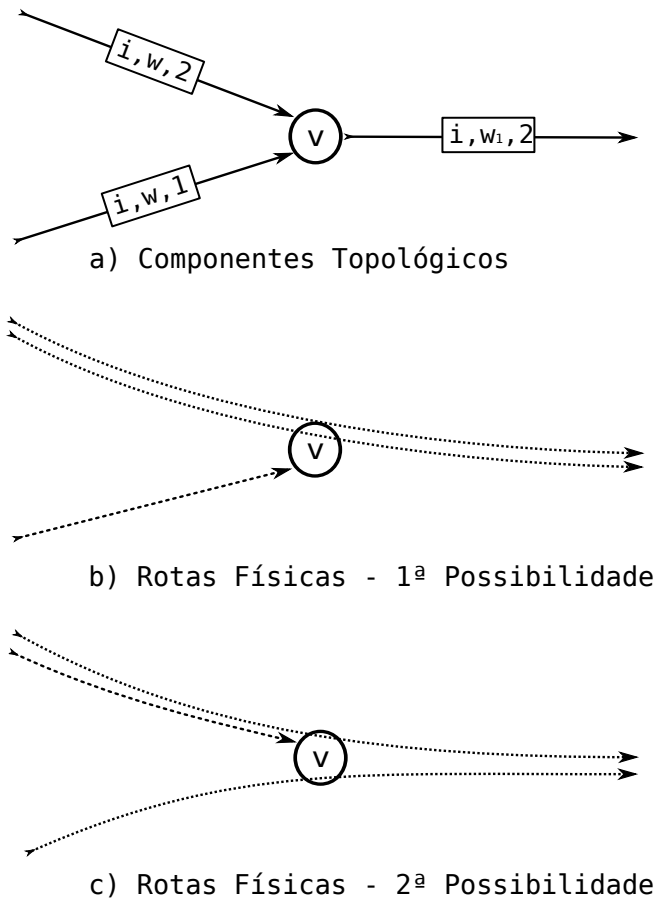


Figura 2.4: Conservação dos Percursos Lógicos e possibilidades de interpretação dos componentes.

1 chamados de planos lógicos, cada um associado a um comprimento de onda  $w$ , onde um par  
 2  $(i, j)$  pode ainda representar múltiplas ligações lógicas.

3 A Restrição 2.5.2 é um conjunto de equações, onde cada uma trata de um par  $(i, j)$  em  
 4 um plano lógico  $w$ . Portanto, a capacidade das ligações lógicas associadas ao par  $(i, j)$  é  $Cap \cdot$   
 5  $Diff_{i,w}^j$ , pois  $Diff_{i,w}^j$  (equação 2.6.2) representa o número de ligações lógicas entre  $(i, j)$  no  
 6 plano lógico  $w$ . Todo o tráfego passando pelas ligações lógicas  $(i, j)$  nesse plano deve ser  
 7 limitado por  $Cap \cdot Diff_{i,w}^j$ , o que de fato é feito pela Restrição 2.5.2.

8 Como o TWA não modela explicitamente as ligações lógicas entre o par  $(i, j)$ , também  
 9 não fica definida a divisão de tráfego alocado nelas. Embora sempre haja banda suficiente  
 10 para atender ao tráfego alocado ao conjunto dessas ligações lógicas, respeitando à capacidade  
 11 individual. A exata divisão do tráfego também pode ser definida em outra fase do projeto e não  
 12 precisa ser modelada aqui, o que também contribui para a simplicidade do modelo.

13 Como não é modelado o exato tráfego em cada ligação lógica, não é possível minimizar  
 14 diretamente o congestionamento (RAMASWAMI; SIVARAJAN, 2002). Mas, a capacidade das

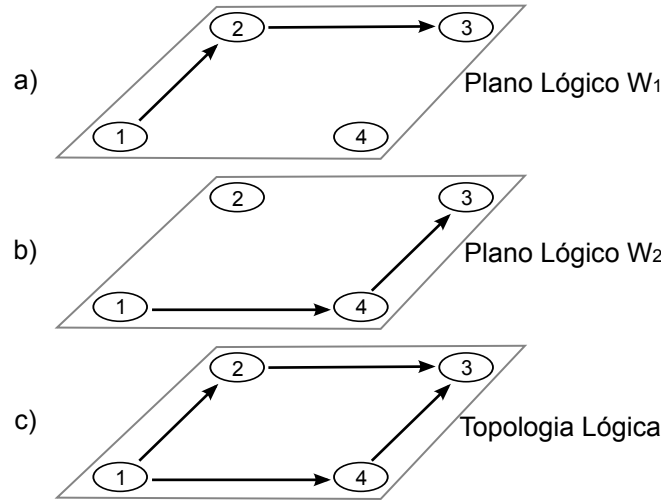


Figura 2.5: Esquema da separação da topologia lógica por comprimento de onda.

ligações lógicas pode exercer o papel de limitante superior (*upper bound*) para o congestionamento. Conjuntamente com a minimização do tráfego na função objetivo, como foi comentado na Seção 2.4, temos uma boa abordagem para tratar do congestionamento, como foi demonstrado em (ALMEIDA et al., 2006).

A Restrição 2.5.2 ainda acumula uma função que, por ser intuitiva, pode passar despercebida. Mas é fundamental para a consistência do modelo. Ela anula as frações de fluxo agregado entre os nós não conectados diretamente por ligações lógicas. Quando  $Diff_{i,w}^j = 0$ , ou seja, não há ligações lógicas entre o par  $(i, j)$  no plano  $w$ , as frações de fluxo  $q_{sw}^{ij}$  serão anuladas pela Restrição 2.5.2, para todas as origens  $s$ .

Como o número de componentes topológicos é  $N^3 \cdot W \cdot K$  e o número de restrições é  $\Theta(N^2 \cdot W)$ , o número de variáveis na forma básica do modelo é da ordem de  $\Theta(N^3 \cdot W \cdot K)$ . Portanto, em número de variáveis e restrições, o TWA é similar a modelos eficientes, mas que resolvem apenas o sub-problema RWA, como os que foram estudados em (JAUMARD; MEYER; THIONGANE, 2004).

## 2.7 Topologia Física e Consevação de Fluxo

A Restrição 2.5.3 acumula nas variáveis  $D_{mn}$  a multiplicidade determinada pelos componentes topológicos

Pela forma como  $D_{mn}$  é calculada na Restrição 2.5.3, a rigor, seu valor poderia ser maior do que é determinado pelos componentes topológicos. Mas isso não ocorre quando o número de ligações físicas for minimizado na função objetivo.

1 não é controlada a existência de  $D_{i,j} \neq 0$ , com  $B_{s,i,j,w} = 0, \forall (s,w)$ . Dependendo do caso  
 2 de uso, isso ou não influencia no resultado, ou pode ser controlado indiretamente pela função  
 3 objetivo, por exemplo, por meio do custo de instalação. Opcionalmente poderia-se usar para  
 4 este fim uma restrição da forma  $\sum_{s,w} B_{s,i,j,w} \geq D_{i,j}$ , para todo  $(i,j)$ , mas essa hipótese é por hora  
 5 desconsiderada.

6 Na Figura 2.6 está um exemplo de interpretação dos componentes topológicos na variável  
 7  $D_{mn}$ . No item *a* estão os componentes topológicos que definem as ligações físicas indicadas no  
 8 item *b*. Nos itens *c* e *d* estão as ligações lógicas e as rotas físicas correspondentes.

9 **Variável 2.7.1.** Seja  $D_{mn} \in \{0, \dots, K\}$  o número de ligações físicas entre o par de nós  $(m,n)$ .

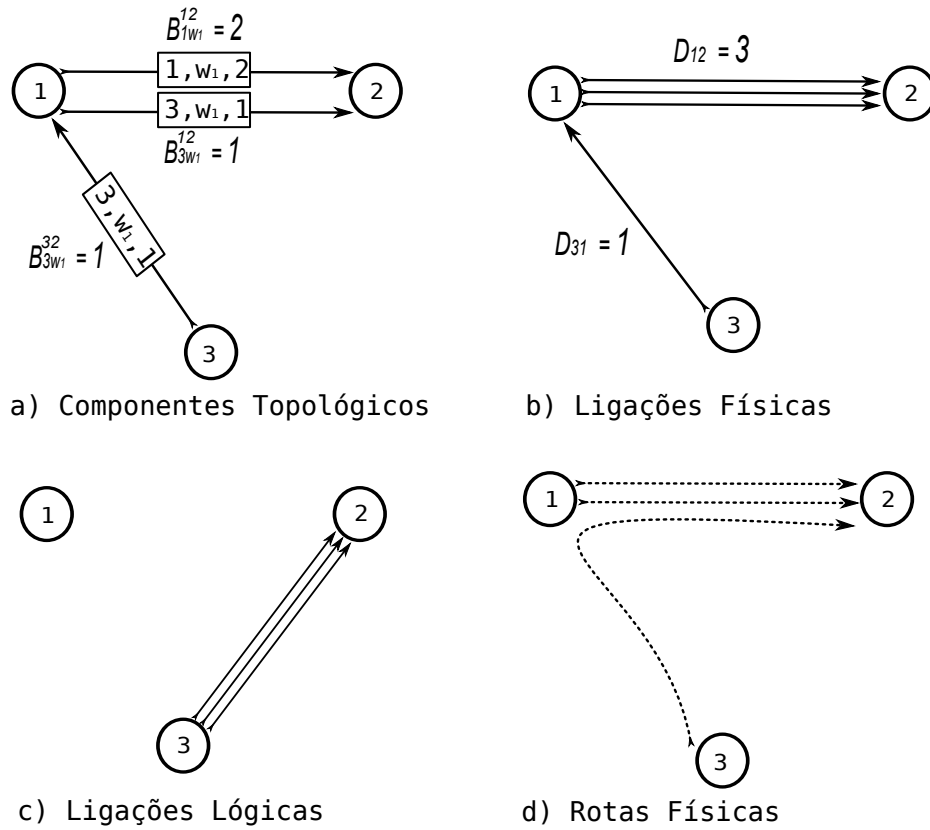


Figura 2.6: Interpretação dos componentes topológicos na variável  $D_{mn}$ .

10 A conservação de fluxo é assegurada pela Restrição 2.5.5, que também garante o envio e  
 11 a entrega das demandas de tráfego. As equações da Restrição 2.5.5 são semelhantes às encon-  
 12 tradas na modelagem agregada para o VTD (RAMASWAMI; SIVARAJAN, 2002). Todavia,  
 13 sua interpretação é sutilmente diferente, pois aqui uma determinada fração de fluxo de tráfego  
 14 pode ser subdividida e transportada simultaneamente por mais de uma ligação lógica entre o par  
 15  $(i,j)$ . Por exemplo, em comprimentos de onda diferentes em um mesmo enlace físico  $(m,n)$   
 16 que interliga diretamente  $(i,j)$ , ou por rotas físicas disjuntas entre os nós  $(i,j)$ , neste último

- 1 caso, independente do comprimento de onda.

## 3 *Adaptações do Modelo Básico*

Neste capítulo são apresentados outros casos de uso da modelagem TWA. Dada a abrangência do modelo básico, diversas métricas poderiam ser controladas ou diretamente minimizadas, conforme a aplicação. Apresentamos agora como podem ser incluídos parâmetros de controle bem conhecidos, alguns deles serão utilizados nos experimentos computacionais das Seções 5.2 e 5.4.

Veremos, por exemplo, como incluir as restrições de controle do grau lógico dos nós e como usar o congestionamento como função objetivo, duas considerações comuns das modelagens de VTD (RAMASWAMI; SIVARAJAN, 2002). Serão mostradas também formas de controlar ou otimizar o número de comprimentos de onda, entre outras métricas normalmente vistas em modelos de RWA (ZANG; JUE; MUKHERJEE, 2000).

### 3.1 Topologia Física como Dado de Entrada

Se  $D_{mn}$  for dado de entrada do problema, a Restrição 2.5.3 limita a multiplicidade física dos componentes topológicos  $B_{im}^{nw}$ . Neste caso, se  $D_{mn} = 0$  para um certo par  $(m, n)$ , devem ser retiradas da instância do problema as variáveis  $B_{im}^{nw}$  correspondentes. Isto deve ser considerado em todo o modelo.

Quando a topologia física é um dado de entrada, sendo  $H$  o número total de ligações físicas da rede, então o número de componentes topológicos será  $N \cdot H \cdot W$ . Supondo uma topologia física conexa, temos  $H > N$ , pois a topologia física conexa com o menor número de ligações físicas possível é um anel, que possui exatamente  $N$  nós (CORMEN, 2002). Entretanto, é razoável supor que  $H < N^2$ , pois  $N^2 - N$  é o número de ligações em um grafo completo, e as redes na prática não chegam nem perto disso. Assim, o número de variáveis do modelo TWA para topologia fixada, será  $O(N^3 \cdot W)$ .

## 3.2 Grau Lógico e Multiplicidade de Ligações Lógicas

No modelo básico do TWA o número de ligações lógicas não é limitado, mas é controlado indiretamente pelos custos de instalação e pelo número de comprimentos de onda por fibra, ou ainda, caso a topologia física seja um dado de entrada, pelo número de ligações físicas existentes.

Caso se queira fazer esse controle diretamente, serão considerados os dados de entrada  $GLin_m$  e  $GLout_m$ , respectivamente, os graus lógicos de entrada e saída do nó  $m$ .

Para controlar o grau lógico, são necessárias duas restrições que devem ser adicionadas ao modelo básico: a Restrição 3.2.2 que controla o grau lógico de saída; e a Restrição 3.2.1 que controla o grau lógico de entrada.

A Restrição 3.2.3 acrescenta a limitação da multiplicidade das ligações lógicas ( $MI$ ) ao modelo TWA, que é indiretamente limitada pelo grau lógico. Para não usar multiplicidade nas ligações lógicas, basta fazer  $MI = 1$ .

**Dados 2. Constantes adicionais:**

1. Grau Lógico de entrada do nó  $m = GLin_m, \quad \forall m.$

2. Grau Lógico de saída do nó  $m = GLout_m, \quad \forall m.$

3.  $MI =$  Multiplicidade das Ligações Lógicas.

$$\sum_{wn} B_{mw}^{mn} \leq GLin_m, \quad \forall m, i \neq m \quad (3.2.1)$$

$$\sum_{inw} B_{iw}^{nm} - \sum_{inw} B_{iw}^{mn} \leq GLout_m, \quad \forall m, i \neq m \quad (3.2.2)$$

$$\sum_{nw} B_{iw}^{nm} - \sum_{nw} B_{iw}^{mn} \leq MI, \quad \forall (i, m), i \neq m \quad (3.2.3)$$

## 3.3 Congestionamento

Como foi comentado na Seção 2, a multiplicidade das ligações lógicas fica implícita para as variáveis de distribuição de tráfego. Deste modo, não é possível minimizar diretamente o tráfego

em cada canal. Portanto, para minimizar o congestionamento mantendo esta multiplicidade, são necessárias novas variáveis para contabilizar o tráfego em cada canal.

A fração de tráfego  $f_{i,r,j}$  (Variável 3.3.1) é semelhante a Variável 2.3.1 (fração de fluxo), com a diferença de que a Variável 3.3.1 separa o fluxo por canal, e a anterior considerava todos os canais. Por sua vez, a ligação lógica  $F_{i,r,j}$  (Variável 3.3.2) mapeia cada canal óptico em uma ligação lógica independente.

Mas para isso, precisamos que sejam definidos os graus lógicos para os nós da rede. E também serão necessárias as Restrições 3.2.1 e 3.2.2, para controle de grau lógico.

**Notação 2.** O índice  $r \in \{1, \dots, CapLog_{mn}\}$  enumera os possíveis múltiplos canais lógicos entre par  $(m,n)$ , onde  $CapLog_{m,n}$  é o mínimo entre  $GLout_m$  e  $GLin_n$ .

**Variável 3.3.1.** Fração de Tráfego  $= f_{irj} \in [0, 1]$ : variável contínua.

**Variável 3.3.2.** Ligação Lógica  $= F_{irj} \in \{0, 1\}$ : variável binária.

**Variável 3.3.3.**  $F_{max}$  = Fração de tráfego do canal mais carregado da rede (congestionamento).

$$\sum_{nw} B_{iw}^{nm} - \sum_{nw} B_{iw}^{mn} = \sum_r F_{irm}, \quad \forall (i,m), \text{ com } i \neq m. \quad (3.3.1)$$

$$F_{irj} \geq f_{irj}, \quad \forall (i,r,j). \quad (3.3.2)$$

$$\sum_{sw} q_{sw}^{ij} \cdot A_s = Cap \cdot (\sum_r f_{irj}), \quad \forall (i,j). \quad (3.3.3)$$

$$F_{max} \geq f_{irj}, \quad \forall (i,r,j). \quad (3.3.4)$$

$$\text{Minimize: } F_{max}. \quad (3.3.5)$$

A Restrição 3.3.1 determina as ligações lógicas  $F_{irj}$  em termos dos componentes topológicos. Em seguida, a Restrição 3.3.2 define a fração do tráfego em cada canal, limitado pela existência do canal. Para as variáveis definidas nesta seção, é necessária uma restrição de limitação da capacidade 3.3.3 adicional. Por fim, definimos o congestionamento ( $F_{max}$ ) na Variável 3.3.3 e a Restrição 3.3.4 determina  $F_{max}$  em termos das frações de tráfego em cada canal. Deste modo, a Função Objetivo 3.3.5 agora consiste em minimizar  $F_{max}$ . Apesar das novas variáveis



1 introduzidas nesta seção, a ordem de grandeza no número de variáveis continua sendo coman-  
2 dada pelos componentes topológicos.

3 O caso de uso apresentado nesta seção, mostra que é possível minimizar diretamente o con-  
4 gestionamento nesta modelagem, pois esta é uma bem conhecida métrica para o VTD. Todavia,  
5 uma abordagem mais eficiente é a simples limitação do congestionamento, minimizando outra  
6 métrica, de modo a deixar o modelo mais tratável (ALMEIDA et al., 2006), como foi usado na  
7 forma básica do modelo TWA.

8 Uma forma alternativa, e bem mais simples, para se minimizar diretamente o congestio-  
9 namento é adotando a Restrição 3.2.3, com  $MI = 1$ . Todavia, perdendo assim a capacidade  
10 de se obter soluções com ligações lógicas múltiplas. Deste modo, pode-se minimizar o con-  
11 gestionamento adotando apenas a Restrição 3.3.6, além da Variável 3.3.3 e a Função Objetivo  
12 3.3.5.

$$F_{max} \geq \sum_{sw} q_{sw}^{ij} \cdot A_s, \quad \forall (i, j), MI = 1 \quad (3.3.6)$$

### 13 3.4 Ligações Lógicas em cada Fibra

14 Um controle muito usado nas modelagens de RWA (ZANG; JUE; MUKHERJEE, 2000;  
15 JAUMARD; MEYER; THIONGANE, 2004), é o número máximo  $L$  de ligações lógicas por  
16 fibra, Variável 3.4.1. Ela limita a densidade da multiplexação de comprimentos de onda por en-  
17 lace físico, um importante aspecto de Redes Ópticas WDM. Caso seja fixada, ela pode ser usada  
18 para limitar cada ligação física, como é feito pela Restrição 3.4.1, ou minimizado diretamente  
19 como função objetivo. Caso a Restrição 3.4.1 seja adotada, ela também limitará a capacidade  
20 física dos nós realizarem ligações lógicas.

21 **Variável 3.4.1.**  $L =$  Número máximo de ligações lógicas em cada fibra.

$$\sum_{iw} B_{iw}^{mn} \leq L, \quad \forall (m, n). \quad (3.4.1)$$

### 22 3.5 Número de Saltos Físicos

23 Uma métrica importante para o projeto de redes ópticas é o número de saltos físicos da  
24 topologia (ZANG; JUE; MUKHERJEE, 2000). Este valor é minimizado na Função Objetivo

3.5.1, através da soma de todos os componentes topológicos, pois cada componente topológico representa um salto físico. Uma propriedade importante desta abordagem é que ela evita o aparecimento de ciclos na topologia. O ideal seria minimizar a distância percorrida por cada enlace lógico, o que controlaria a degradação do sinal óptico. Minimizar o número total de saltos pode ser adotado por uma questão de compatibilidade com outros modelos, como os resultados encontrados em (ASSIS; WALDMAN, 2004), que serão usados na comparação dos experimentos computacionais do Capítulo 5.2.

$$\text{Minimize: } \sum_{imnw} B_{iw}^{mn}. \quad (3.5.1)$$

As variáveis de fração de fluxo agregado, definidas no modelo básico, são suficientes para modelar a distribuição do tráfego, embora na implementação real de múltiplas rotas físicas entre um mesmo par de nós  $(i, j)$ , alguns detalhes ainda carecem ser decididos, pois podem haver mais de uma maneira de configura-los. Um exemplo disso é dado na Figura 3.1, onde o conjunto de componentes topológicos dado permite duas possibilidades de configuração dos percursos lógicos. É garantida implicitamente a alocação de recursos suficientes, mas este sub-problema fica sem ser resolvido pelo modelo. Por essa razão, não é possível controlar a real distância percorrida pelas demandas de tráfego, sendo este um prejuízo da modelagem TWA.

Essas situações podem ser tratadas considerando outros fatores, como a distância entre os nós. Mas são questões de menor complexidade, se a topologia já estiver decidida, e podem ser resolvidas na fase de configuração da rede. Isso não influencia na modelagem dos recursos da rede e portanto não será tratado aqui.

## 3.6 Comprimentos de Onda

Um objetivo comum nas modelagens do RWA é controlar o número de comprimentos de onda utilizados na rede (ZANG; JUE; MUKHERJEE, 2000; JAUMARD; MEYER; THION-GANE, 2004). Para determinar se um comprimento de onda foi usada na rede, temos a Restrição 3.6.1, que limita a soma de todos os componentes topológicos no comprimento de onda  $w$ , pela existência de  $Q_w$  (Variável 3.6.1). O fator  $M \cdot (N^2 - N)$  representa o número máximo de componentes topológicos que podem usar o comprimento de onda  $w$  ao mesmo tempo. Ela deve ser adicionada àquelas do modelo TWA, mas somente no caso da topologia física ser livre.

Pois o número de caminhos que um comprimento de onda pode ter entre um mesmo par  $(i, j)$  é a multiplicidade física da rede, onde  $(N^2 - N)$  é o número de pares  $(i, j)$  possíveis, e  $M$

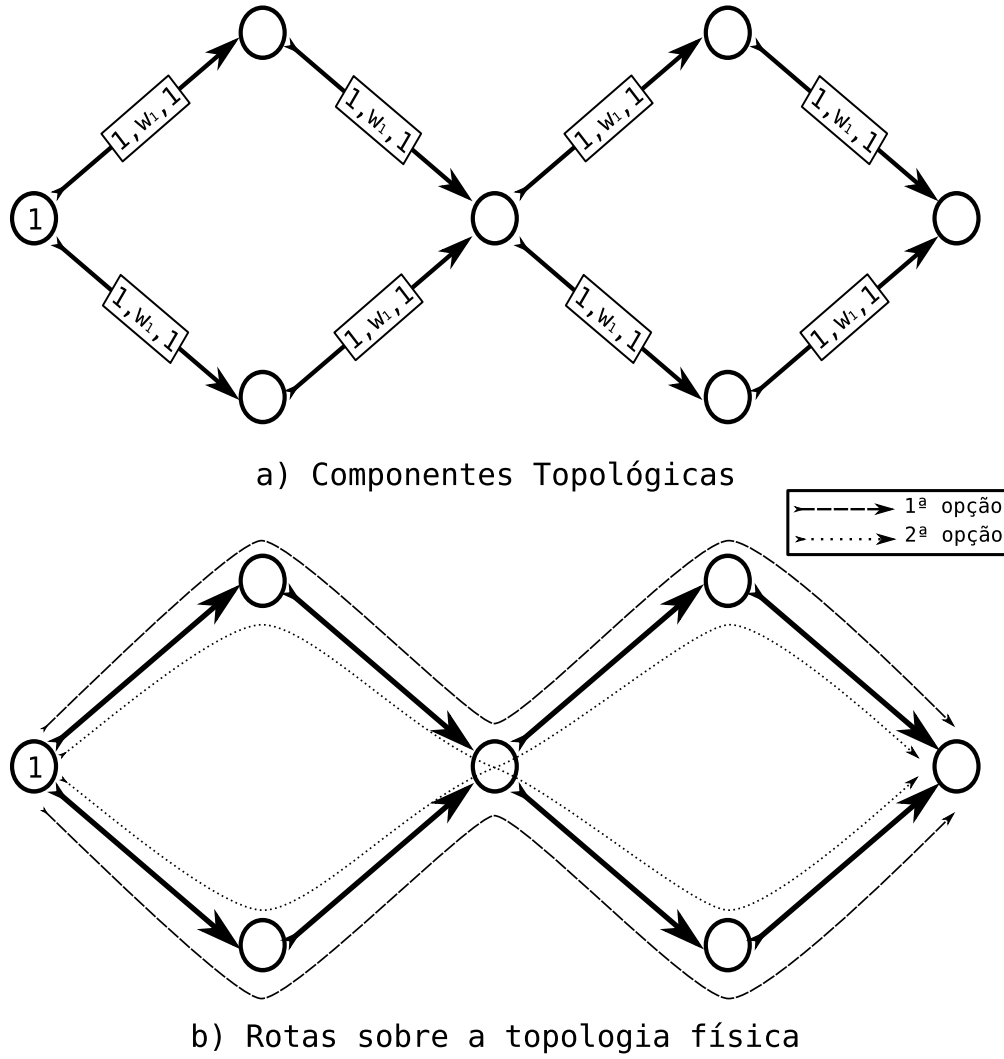


Figura 3.1: Em b) vemos duas possíveis de interpretações dos componentes topológicos em a).

1 é a multiplicidade física da rede. Qualquer número maior do que este também manteria a inte-  
 2 gridade da restrição, todavia, restrições mais precisas podem ajudar os algoritmos de resolução  
 3 de modelos MILP.

4 Caso a topologia física seja fixada, há a Restrição 3.6.2 que é mais conveniente, pois dei-  
 5 xaria o modelo mais enxuto. Caso a topologia física da rede seja um dos dados de entrada,  
 6 há uma forma alternativa para se definir  $Q_w$ , que reaproveita uma das restrições do modelo  
 7 TWA. Deixando assim de acrescentar uma nova restrição ao modelo. Com  $D_{mn}$  fixo, podemos  
 8 multiplicá-lo por  $Q_w$  na Restrição 2.5.3, sem prejudicar a função original da equação, e obter o  
 9 mesmo efeito da Restrição 3.6.1. Deste modo, a Restrição 3.6.2 deve substituir a equação 2.5.3  
 10 do modelo original. Para minimizar diretamente o número de comprimentos de onda utilizados  
 11 na rede, basta usar a soma de todas as variáveis  $Q_w$  (Variável 3.6.1) como função objetivo.

12 **Variável 3.6.1.** Seja  $Q_w \in \{0, 1\}$ , com  $w \in \{1, \dots, W\}$ .  $Q_w = 1$  se o comprimento de onda  $w$  é

1 utilizada na rede e  $Q_w = 0$ , caso contrário.

$$\sum_{imn} B_{iw}^{mn} \leq M \cdot (N^2 - N) \cdot Q_w, \quad \forall w. \quad (3.6.1)$$

$$\sum_i B_{iw}^{mn} \leq Q_w \cdot D_{mn}, \quad \forall (m, n, w). \quad (3.6.2)$$

$$\text{Minimize: } \sum_w Q_w. \quad (3.6.3)$$

## 2 3.7 Conversão de Comprimentos de Onda

3 Outro cenário comum nas modelagem para o RWA é a possibilidade de conversão do com-  
 4 primento de onda ao longo de um caminho óptico. Há duas formas mais comuns de se tratar  
 5 essa abordagem. Ou um nó possui capacidade total de conversão (ZANG; JUE; MUKHER-  
 6 JEE, 2000; JAUMARD; MEYER; THIONGANE, 2004; TORNATORE; MAIER; PATTI-  
 7 VINA, 2007) e todas as ligações lógicas passando por ele podem mudar de comprimento de  
 8 onda nessa passagem, ou há uma quantidade máxima de conversões (RAMASWAMI; SASAKI,  
 9 1998; ASSIS; WALDMAN, 2004). Como o primeiro método é apenas um caso particular do  
 10 segundo, trataremos do caso mais geral.

11 Não será fixado quais nós terão a capacidade de conversão, mas sim controlaremos o nú-  
 12 mero de conversões na rede, pela Variável 3.7.1. Caso a topologia física seja variável, é neces-  
 13 sário definir um limite para o número de ligações físicas originadas em cada nó da rede.

14 **Dados 3.**  $GFout_m$  = Número máximo de ligações físicas originadas no nó  $m$ .

15 **Variável 3.7.1.** O número de conversões em um nó  $m$ , de um comprimento de onda  $w$ , re-  
 16 alizadas nas ligações lógicas originadas em  $i$ , é mapeado pela variável  $x_{imw}$ . Onde  $x_{imw} \in$   
 17  $\{0, \dots, GFout_m\}$ , se a topologia física é livre, ou  $x_{imw} \in \{0, \dots, \sum_n D_{mn}\}$ , caso  $D_{mn}$  seja um  
 18 parâmetro.

19 Se a topologia física é fixa, então  $x_{imw}$  já está bem definida, caso contrário, será necessária  
 20 a restrição adicional 3.7.1.

$$x_{imw} \leq \sum_n D_{mn}, \quad \forall (i, m, w). \quad (3.7.1)$$

1 Ao se habilitar um nó a realizar conversões de comprimento de onda, torna-se necessário  
 2 utilizar uma restrição mais geral, que garante a conservação fixada a origem, mas independente  
 3 do comprimento de onda. A Restrição 3.7.2 cumpre esse papel. Ela sozinha já habilita o nó com  
 4 capacidade de conversão total, onde todo comprimento de onda que chega pode ser convertido  
 5 livremente. Já o número de conversões é mapeado pela Restrição 3.7.3, que substitui a Restrição  
 6 2.5.2.

$$\sum_{nw} B_{iw}^{nm} \geq \sum_{nw} B_{iw}^{mn}, \quad \forall (i, m), \text{ com } i \neq m. \quad (3.7.2)$$

$$\sum_s q_{sw}^{ij} \cdot A_s \leq Cap \cdot \left( \sum_m B_{iw}^{mj} - \sum_n B_{iw}^{jn} - x_{ijw} \right), \quad \forall (i, j, w) \quad (3.7.3)$$

7 Note na definição da Variável 3.7.1, que o comprimento de onda de saída do conversor não  
 8 é registrada. A Restrição 3.7.3 assegura que haverá componentes topológicos no comprimento  
 9 de onda  $w$ , com origem  $i$ , chegando em  $m$  em número suficiente para realizar as conversões.  
 10 Para cada uma destas, a Restrição 3.7.2 garante que haverá algum componente partindo de  $m$ ,  
 11 com origem  $i$ , mas em um comprimento de onda diferente de  $w$ . Aqui também podem ocorrer  
 12 situações como a que foi ilustrada na Figura 3.1, nas quais algo fica indefinido na interpretação  
 13 dos componentes. Mas esses casos também não influenciam na modelagem e por isso também  
 14 não serão aqui considerados.

15 Pode ser conveniente limitar o número de conversões em cada nó, ou seja, limitar a soma  
 16  $\sum_{iw} x_{imw}$ , ou o número total de conversões. Ou ainda, usar este último como função objetivo, o  
 17 que é feito pela Restrição 3.7.4.

$$\text{Minimize: } \sum_{imw} x_{imw}. \quad (3.7.4)$$

## 1 **4 Lower Bounds**

2

3 Nos trabalhos encontrados na literatura, no que diz respeito ao congestionamento, encontrar  
 4 boas soluções é uma tarefa fácil para heurísticas (KRISHNASWAMY; SIVARAJAN, 2001;  
 5 SKORIN-KAPOV; KOS, 2005). Todavia, o cálculo de *lower bounds* (LB) que garantam essa  
 6 qualidade tem elevado custo computacional, sendo esta a parte mais difícil dessa abordagem.  
 7 Apresentamos aqui uma nova técnica para a obtenção de *lower bounds* para o congestionamento  
 8 que joga por terra essa dificuldade. Ela é uma formula de cálculo direto, que denominamos  
 9 *Minimum Traffic Bound* (MTB), fornecendo um LB de alta qualidade para o congestionamento,  
 10 com custo computacional desprezível.

11 Para determinar um LB para o congestionamento, precisamos enxergar qual é o mínimo  
 12 de tráfego que pode ser encontrado em cada ligação lógica da rede. Não há uma resposta  
 13 direta, mas podemos fazer uma estimativa olhando cada nó independentemente. Na melhor das  
 14 hipóteses, todo o tráfego que passa pelas ligações lógicas originadas em um nó  $m$  é composto  
 15 exclusivamente pelas demandas de tráfego desse nó. Analogamente, o tráfego nas ligações  
 16 lógicas incidentes em  $m$  seria composto pelas demandas destinadas a ele. Esses são os menores  
 17 valores possíveis, considerando que todo o tráfego da rede será devidamente enviado e recebido.

18 Assim, intuitivamente, dividindo todo o tráfego originado (incidente) em  $m$  pelo máximo de  
 19 ligações lógicas originadas (incidentes) em  $m$ , temos o menor tráfego possível nessas ligações  
 20 lógicas. Extrapolando isso para toda a rede, o maior dentre esses valores seria um bom candidato  
 21 a *lower bound* para o congestionamento. Pois não é possível que um nó envie menos tráfego  
 22 do que a soma das demandas originadas nele. Analogamente, não é possível que um nó receba  
 23 menos tráfego do que o destinado a ele. O MTB é assim definido como o mínimo dos valores  
 24 calculados nas equações do conjunto de Dados 4, na seção seguinte.

## 4.1 MTB - Minimum Traffic Bound

Para estabelecer o MTB, consideraremos apenas o número de ligações lógicas iniciando ou terminando em cada nó da rede. Nas modelagens para o VTD, essa é toda a informação que sobre a topologia da rede. Mas em modelagens mais abrangentes como o TWA, isso pode não ser um dado de entrada.

**Dados 4.** Sejam  $\alpha_i$  o número de ligações lógicas iniciadas em um nó  $i$  e  $\beta_j$  o número de ligações lógicas finalizadas em um nó  $j$ . Deste modo:

$$1. \quad \Theta_i = \sum_n D_{in} / \alpha_i \quad \text{and} \quad \Gamma_j = \sum_m D_{mj} / \beta_j$$

$$2. \quad \Omega_{ij} = \max_{ij}(\Theta_i, \Gamma_j) \quad \text{and} \quad MTB = \max_{ij}(\Omega_{ij})$$

**Teorema 1** (Minimum Traffic Bound – MTB). Se o número de ligações lógicas iniciadas e finalizadas em cada nó da rede é um parâmetro de entrada, então o MTB, definido no conjunto de Dados 4, é um lower bound para o congestionamento.

*Demonstração.* Seja  $\lambda_{max}^*$  o valor ótimo do congestionamento. Devemos demonstrar que  $MTB \leq \lambda_{max}^*$ , o que equivale a mostrar que  $\Omega_{ij} \leq \lambda_{max}^*$ ,  $\forall (i, j)$ . Para isso é suficiente que sejam verdadeiras as inequações a seguir:

$$(i) \quad \Theta_i \leq \lambda_{max}^*, \quad \forall i \quad \text{and} \quad (ii) \quad \Gamma_j \leq \lambda_{max}^*, \quad \forall j$$

Suponha por absurdo que a inequação (i) é falsa, ou seja,  $\exists i$  tal que  $\Theta_i > \lambda_{max}^*$ . O mínimo tráfego que  $i$  pode originar, considerando todas as ligações lógicas iniciadas nele, é composto pelas demandas de tráfego com origem em  $i$ , ou seja,  $\sum_n D_{in}$ . Seja  $\Psi_i$  a soma de todo o tráfego nas ligações lógicas iniciadas em  $i$ , em uma solução viável qualquer. Deste modo,  $\Psi_i \geq \sum_n D_{in}$ , considerando que algum tráfego possa ser retransmitido através de  $i$ . Seja  $\bar{\Psi}_i$  o tráfego médio entre as ligações lógicas iniciadas em  $i$ . Segue que:

$$\bar{\Psi}_i = \frac{\Psi_i}{\alpha_i} \geq \frac{\sum_n D_{in}}{\alpha_i} = \Theta_i$$

Ou seja,  $\bar{\Psi}_i \geq \Theta_i$ . Portanto,  $\exists j$  tal que  $\Phi_{ij} \geq \Theta_i$ , onde  $\Phi_{ij}$  é o tráfego na ligação lógica  $(i, j)$ . Como  $\Theta_i > \lambda_{max}^*$ , segue que,  $\Phi_{ij} > \lambda_{max}^*$  para qualquer solução viável. O que é absurdo para as soluções ótimas, pois contraria a definição de  $\lambda_{max}^*$ , como o tráfego da ligação lógica mais carregada. Isso prova que a inequação (i) é verdadeira, e de modo análogo pode-se verificar a validade da inequação (ii).  $\square$

1 Note que não foi feita restrição quanto à multiplicidade de ligações lógicas. Estamos con-  
2 siderando portanto o caso mais geral do VTD.

3 Dizemos que o MTB é um LB para para o VTD, pois a única restrição feita é quanto ao co-  
4 nhecimento do número de ligações lógicas iniciando e terminando em cada nó. Em modelagens  
5 mais abrangentes, como o TWA, a introdução de mais restrições e variáveis pode fazer com que  
6 o ótimo do VTD se torne inviável. Ainda assim, o MTB será um LB para o congestionamento,  
7 todavia, outras técnicas de obtenção de LB poderiam ser empregadas para explorar o espaço  
8 do conjunto de soluções que se tornou inviável. Uma alternativa é a conhecida técnica iterativa  
9 apresentada em (RAMASWAMI; SIVARAJAN, 2002).

10 O MTB foi aqui estabelecido em sua forma mais geral, considerando que cada nó pode  
11 possuir quantidades diferentes de ligações lógicas originadas ou incidentes, entretanto, na lite-  
12 ratura é comum considerar que os nós da rede possuem grau lógico uniforme (RAMASWAMI;  
13 SIVARAJAN, 2002).

14 Além disso, a definição dada para o MTB no Conjunto de Dados 4 foi colocada de forma  
15 mais intuitiva. Mas, pode-se notar que o MTB consiste apenas do máximo do conjunto das  
16 somas das demandas originadas ou recebidas em cada nó, dividido pelo grau lógico da rede.  
17 Portanto convém apresenarmos uma fomulação mais adequada para implementações. Isso é  
18 feito no Lema 1.

**Lema 1.** *Supondo que toda a rede possui grau lógico uniforme  $GL$ , o MTB pode ser definido da seguinte forma:*

$$MTB = \frac{1}{GL} \cdot \max_m \left( \sum_n D_{mn}, \sum_n D_{nm} \right)$$

19 Em última análise, o MTB explora a possibilidade da ligação lógica mais carregada da  
20 rede transportar predominantemente tráfego que não foi ou não será retransmitido. Apesar de  
21 aparentemente ingênua, essa é uma suposição muito acertada, posto que na maioria dos testes  
22 feitos o MTB equivale ao ótimo, como será visto no Capítulo 5.



## 5 Experimentos Computacionais com o TWA

Para avaliar a pertinência desta nova abordagem, testes computacionais foram realizados. Toda a modelagem do TWA foi descrita em AMPL® (*A Modeling Language for Mathematical Programming* - [www.ampl.com](http://www.ampl.com)), de modo que facilmente possa ser adaptada para várias finalidades. Utilizamos o *solver* SCIP (*Solving Constraint Integer Programs* - [scip.zib.de](http://scip.zib.de)) para resolver o modelo MILP do TWA. Para interpretar o código AMPL, gerando a entrada de dados para o SCIP, foi usado o GLPK (*GNU Linear Programming Kit* - [www.gnu.org/software/glpk/](http://www.gnu.org/software/glpk/)). Vale observar que o SCIP e o GLPK são *softwares* livres, de código fonte aberto e de distribuição gratuita.

Os resultados dos experimentos computacionais realizados com o TWA são comparados, neste capítulo, com os publicados em (ASSIS; WALDMAN, 2004) e (KRISHNASWAMY; SIVARAJAN, 2001), aonde foram propostos modelos para a resolução integrada do VTD e RWA. Todavia, ambos os modelos não incluem a topologia física como uma variável, diferente do TWA. Por esse motivo, para podermos produzir resultados passíveis de comparação, nos testes que veremos mais adiante neste capítulo, além de outras considerações, a topologia física da rede é um dado de entrada.

A modelagem encontrada em (ASSIS; WALDMAN, 2004) é baseada nas modelagens clássicas desses problemas (RAMASWAMI; SIVARAJAN, 2002; ZANG; JUE; MUKHERJEE, 2000), o qual denominaremos **VTD-RWA**. Este trabalho propõe um algoritmo iterativo, que faz uso de programação linear, para resolver os problemas VTD e RWA de forma integrada. A solução do VTD gera requisições para um conjunto de caminhos, representados pela topologia virtual, que devem ser roteados pela topologia física. Os caminhos são alocados de maneira a minimizar critérios de otimização. A estratégia foi testada para redes com características distintas, mas não sendo considerado conversão de comprimentos de onda.

Para os resultados publicados em (KRISHNASWAMY; SIVARAJAN, 2001), é feita uma modelagem MILP que minimiza congestionamento em redes sem conversores de comprimentos

de onda, o qual denominaremos **KS**. Segundo os autores, esta formulação não é computacionalmente tratável, sendo métodos heurísticos propostos. O Modelo MILP é relaxado e executado iterativamente por 25 vezes usando um plano de corte. As variáveis que representam a topologia virtual e os percursos físicos são arredondadas, enquanto uma heurística de alocação de comprimentos de onda é aplicada para atribuir comprimentos de onda individualmente aos caminhos ópticos. O tráfego é roteado pela topologia virtual utilizando uma formulação linear (LP) consistindo somente das restrições de tráfego do MILP relaxado. Uma das desvantagens desse método é que supondo que existam  $W$  comprimentos de onda disponíveis em cada fibra, o MILP relaxado obtém uma solução que satisfaz esta restrição. No entanto, sendo que o algoritmo de alocação de comprimentos de onda, que é aplicado subsequentemente, obtém soluções sub-ótimas, não há garantia de uma alocação de comprimentos de onda com sucesso, respeitando o limite de  $W$  comprimentos de onda. Como resultado, o método não retorna necessariamente soluções viáveis para todos os casos.

## 5.1 O Modelo VTD-RWA

Reproduzimos nesta seção a formulação matemática encontrada em (ASSIS; WALDMAN, 2004), a qual denominamos VTD-RWA. Este é um modelo de programação linear inteira mista, que combina variáveis reais e variáveis discretas. Ela modela os quatro subproblemas do projeto de uma WRON. Mas topologia física é considerada conhecida, sendo passado como parâmetro para o modelo.

Supondo grau lógico uniforme para toda a rede ( $G$ ), o número de variáveis binárias deste modelo é da ordem de  $\Theta(N^4 \cdot W \cdot G)$ .

**Variável 5.1.1.**  $b_{ij} \in \mathbb{N}$ , a Topologia Virtual, representa o número de ligações lógicas entre o par  $(i, j)$ .

**Variável 5.1.2.**  $b_{ijw} \in \mathbb{N}$ , representa o número de ligações lógicas entre o par  $(i, j)$  utilizando o comprimento de onda  $w$ .

**Variável 5.1.3.**  $\lambda_{ij}^{sd} \in \mathbb{R}^+$ , Componente de Tráfego, representa a quantidade de tráfego fluindo de uma fonte  $s$  para um destino  $d$ , e passando pelas ligações lógicas entre o par  $(i, j)$ .

**Variável 5.1.4.**  $\lambda_{ij} = \sum_{sd} \lambda_{ij}^{sd}$ , Tráfego total nas ligações lógicas entre o par  $(i, j)$ .

**Variável 5.1.5.**  $\lambda_{max} \in \mathbb{R}^+$ , Congestionamento da rede.

**Variável 5.1.6.**  $L \in \mathbb{N}$ , número de ligações lógicas no enlace físico mais carregado, com  $L \leq W$ .

1 **Variável 5.1.7.**  $p_{mn}^{ij} \in \mathbb{N}$ , número de ligações lógicas entre o par  $(i, j)$  passando pelo enlace  
2 físico  $(m, n)$ .

3 **Variável 5.1.8.**  $p_{mnw}^{ij} \in \mathbb{N}$ , comprimento de onda utilizado nas ligações lógicas entre o par  $(i, j)$   
4 passando pelo enlace físico  $(m, n)$ .

$$\text{Minimize: } \lambda_{max} \quad (5.1.1)$$

$$\forall (i, s, d), \quad \sum_j \lambda_{ij}^{sd} - \sum_j \lambda_{ji}^{sd} = \begin{cases} P_{sd}, & s = i \\ -P_{sd}, & d = i \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (5.1.2)$$

$$\lambda_{ij} = \sum_{sd} \lambda_{ij}^{sd}, \quad \forall (i, j) \quad (5.1.3)$$

$$\lambda_{ij} \leq \lambda_{max}, \quad \forall (i, j) \quad (5.1.4)$$

$$\lambda_{ij}^{sd} \leq b_{ij} \cdot P_{sd}, \quad \forall (i, j, s, d) \quad (5.1.5)$$

$$\sum_j b_{ij} \leq GL_{out_i}, \quad \forall i \quad (5.1.6)$$

$$\sum_i b_{ij} \leq GL_{in_j}, \quad \forall j \quad (5.1.7)$$

$$\sum_n p_{mn}^{ij} = \sum_n p_{nm}^{ij}, \quad \forall (i, j, m), \text{ com } m \neq i \text{ e } m \neq j. \quad (5.1.8)$$

$$\sum_n p_{in}^{ij} = b_{ij}, \quad \forall (i, j) \quad (5.1.9)$$

$$\sum_m p_{mj}^{ij} = b_{ij}, \quad \forall (i, j) \quad (5.1.10)$$

$$\sum_{ij} p_{mn}^{ij} \leq L \cdot D_{mn}, \quad \forall (m, n) \quad (5.1.11)$$

$$\sum_n p_{mnw}^{ij} = \sum_n p_{nmw}^{ij}, \quad \forall (i, j, m, w), \text{ com } m \neq i \text{ e } m \neq j. \quad (5.1.12)$$

$$\sum_n p_{inw}^{ij} = b_{ijw}, \quad \forall (i, j, w) \quad (5.1.13)$$

$$\sum_m p_{mjw}^{ij} = b_{ijw}, \quad \forall (i, j, w) \quad (5.1.14)$$

$$\sum_w b_{ijw} = b_{ij}, \quad \forall (i, j) \quad (5.1.15)$$

$$\sum_{ij} p_{mnw}^{ij} \leq D_{mn}, \quad \forall (m, n, w) \quad (5.1.16)$$

$$\sum_w p_{mnw}^{ij} = p_{nm}^{ij}, \quad \forall (i, j, m, n) \quad (5.1.17)$$

## 5.2 Comparação com o modelo VTD-RWA

Nos resultados que iremos confrontar, são considerados: o grau lógico da rede ( $GI$ ), o número de ligações lógicas em cada fibra ( $L$ ), o número de comprimentos de onda disponíveis em cada ligação física ( $W$ ) e o número de saltos físicos na topologia ( $S$ ). Esses parâmetros são comumente tratados nas investigações a cerca do RWA (ZANG; JUE; MUKHERJEE, 2000).

Também é controlado o congestionamento, que é uma conhecida métrica para o VTD. Isso é feito através da clássica heurística HLDA (RAMASWAMI; SIVARAJAN, 2002; LIMA et al., 2004), gerando uma solução para o VTD que alimenta as etapas seguintes do procedimento, conforme apresentado em (ASSIS; WALDMAN, 2004). Para cada grau lógico, o HLDA produz de forma determinística uma topologia lógica, baseado na matriz de demandas. A solução para o VTD é completada distribuindo o tráfego sobre esta topologia, através de um modelo de programação linear (RAMASWAMI; SIVARAJAN, 2002).

Para produzir resultados passíveis de comparação, são acrescentadas à modelagem básica do TWA, mostrada na Seção 2, as restrições de controle do grau lógico (Restrição 3.2) e a de limitação do número de ligações lógicas em cada fibra (Restrição 3.4.1). Esta formulação específica é denominada de TWA- $a$ . Para controlar a qualidade das soluções quanto ao congestionamento, foram obtidas topologias virtuais com uma implementação da heurística HLDA. Para

1 cada uma destas topologias, foi distribuído o tráfego e calculado o congestionamento através  
2 do *solver* do *software* GLPK (*GNU Linear Programming Kit* - [www.gnu.org/software/glpk/](http://www.gnu.org/software/glpk/)),  
3 utilizando uma versão do modelo clássico para o VTD (RAMASWAMI; SIVARAJAN, 2002).  
4 O valor de congestionamento obtido, arredondado para cima, foi usado como a capacidade dos  
5 canais lógicos, na Restrição 2.5.2. Para cada instância, esse procedimento levou menos de um  
6 segundo, portanto não será considerado na contagem de tempo de processamento dos nossos  
7 resultados.

8 A estratégia adotada foi, partindo do menor grau lógico ( $Gl = 1$ ), fixar nos valores mínimos  
9 o número de comprimentos de onda e a limitação de ligações das fibras ( $W = 1$  e  $L = 1$ ),  
10 minimizando o número de saltos ( $S$ ). Um *solver* para problemas MILP é instanciado com essa  
11 configuração. Enquanto o *solver* retornar que o problema é insolúvel (MUKHERJEE, 1997),  $L$   
12 será incrementado até o seu limite, que é o valor atual de  $W$ . Quando  $L$  não puder ser aumentado  
13 ( $L = W$ ), então  $W$  o será, e assim por diante. Se uma solução viável é encontrada, o *solver* é  
14 interrompido, a solução é registrada e o grau lógico é incrementado, dando continuidade ao  
15 processo.

16 Nas situações em que o problema era insolúvel, o *solver* determinou isso em menos de  
17 um segundo, dificultando a separação dos tempos de leitura e de execução. Portanto estes  
18 tempos não foram computados. Essas situações em que o modelo precisou ser calibrado, que  
19 chamaremos de *Instância Insolúvel* ( $I$ ), fazem parte do método e são registradas conjuntamente  
20 com os resultados.

21 Como, nesta modelagem,  $W$  está diretamente relacionado a quantidade de variáveis, é mais  
22 conveniente começar com  $W = 1$ . Disso decorre a escolha de também começarmos com  $Gl = 1$   
23 e  $L = 1$ . A maior prioridade para a incrementação é dada ao  $Gl$ , pois variando este temos instân-  
24 cias diferentes. A menor precedência ficou para  $W$ , pois quanto menor ele for menores precisa-  
25 rão ser os custos de instalação da rede. Na posição intermediária fica  $L$ , pois, minimizando-o,  
26 maximizamos a disponibilidade da rede.

27 Utilizamos o *solver* SCIP (*Solving Constraint Integer Programs* - [scip.zib.de](http://scip.zib.de)) para encon-  
28 trar as soluções viáveis. Além de calcular a capacidade dos canais ópticos ( $Cap$ ), como foi  
29 descrito acima, o GLPK também foi usado para interpretar o modelo AMPL, gerando a entrada  
30 de dados para o SCIP. Vale observar que o SCIP e o GLPK são *softwares* livres, de código fonte  
31 aberto e de distribuição gratuita. Os resultados que serão confrontados com os nossos foram  
32 produzidos com o ILOG CPLEX® ([www.ilog.com/products/cplex](http://www.ilog.com/products/cplex)), uma ferramenta comer-  
33 cial.

34 Foram executados dois testes computacionais, com uma rede de 6 nós e com uma rede de 12

1 nós (ASSIS; WALDMAN, 2004). Os resultados foram compilados nas Tabelas 5.2 e 5.3, cujas  
 2 legendas estão resumidas na Tabela 5.1. Todos os testes foram executados em um *notebook*  
 3 *PC (Linux Ubuntu 8.04, 32bits)*, equipado com processador *Sempron Mobile 3500+* (1.8GHz,  
 4 512KB) e 2GB DDR2 (533MHz).

$GL$	=	Grau Lógico
$L$	=	Limitação de Ligações lógicas das Fibras
$W$	=	Número de comprimentos de onda disponíveis
$S$	=	Número de Saltos Físicos
$t$	=	Tempo em segundos para encontrar a primeira solução viável
$Cap$	=	Capacidade de Tráfego de Cada Canal Óptico
$I$	=	Instância Insolúvel

Tabela 5.1: Legendas para as Tabelas 5.2 e 5.3.

5 Os resultados para a rede de 6 nós foram compilados na Tabela 5.2. Na Figura 5.1 está  
 6 representada a topologia física da rede de 6 nós, e na Figura 5.2 sua matriz de demandas de  
 7 tráfego (ASSIS; WALDMAN, 2004). A primeira coluna registra o grau lógico de cada instância  
 8 ( $GL$ ), que neste caso foram 5. Da segunda até a quarta coluna ( $L$ ,  $W$  e  $S$ ) estão os resultados de  
 9 (ASSIS; WALDMAN, 2004) e da quinta à sétima estão os resultados obtidos com a metodologia  
 10 descrita acima.. Note que em todas as instâncias foram obtidos resultados melhores.

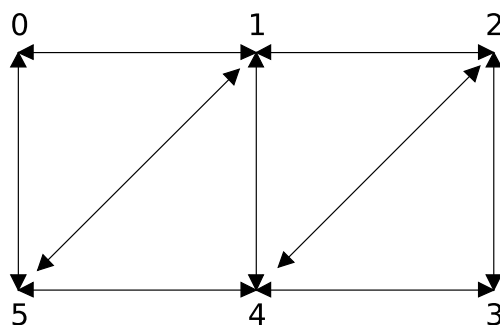


Figura 5.1: Rede de 6 nós (ASSIS; WALDMAN, 2004).

$\lambda_{sd}$	0	1	2	3	4	5
0	-	0,90	0,62	0,51	0,28	0,52
1	0,5	-	0,39	0,92	0,26	0,15
2	0,4	0,31	-	0,34	0,21	0,14
3	0,2	0,48	0,34	-	0,99	0,36
4	0,1	0,44	0,14	0,84	-	0,99
5	0,4	0,19	0,99	0,75	0,18	-

Figura 5.2: Matriz de demandas para a rede de 6 nós.

	VTD-RWA			TWA- <i>a</i>					
<i>Gl</i>	<i>L</i>	<i>W</i>	<i>S</i>	<i>L</i>	<i>W</i>	<i>S</i>	<i>t</i>	<i>Cap</i>	<i>I</i>
1	1	1	09	1	1	06*	00	08	0
2	2	2	18	1	1	11*	03	03	0
3	2	2	32	1	1	14*	00	02	0
4	3	3	41	2	2	25*	10	01	2
5	4	5	50	3	3	46*	00	01	2

Tabela 5.2: Resultados para a rede de 6 nós. \*: Solução Ótima.

A oitava coluna da Tabela 5.2 traz o tempo , em segundos, que o *solver* levou para encontrar a primeira solução viável (*t*). Um fato importante é que em todas as instâncias desta bateria de testes, este tempo foi suficiente para determinar a otimalidade da solução viável encontrada. Essa possibilidade, além do interesse teórico, corrobora para a eficiência do método aqui aplicado. Em (ASSIS; WALDMAN, 2004) não são encontradas soluções ótimas e não foi informado o tempo gasto nesta etapa.

Ainda na Tabela 5.2, na nona coluna temos a capacidade do canal óptico (*Cap*) e por fim, na última coluna temos o histórico das tentativas de calibração do modelo, do tipo Instância Insolúvel (*I*). Nesta coluna, um *zero* significa que os resultados registrados nesta mesma linha foram conseguidos na primeira execução do *solver*. Analogamente, um número diferente de zero significa a quantidade de vezes em que foram encontradas instâncias insolúveis, antes da execução que proveu o resultado expresso nesta linha.

	VTD-RWA			TWA- <i>a</i>					
<i>Gl</i>	<i>L</i>	<i>W</i>	<i>S</i>	<i>L</i>	<i>W</i>	<i>S</i>	<i>t</i>	<i>Cap</i>	<i>I</i>
1	1	1	032	1	1	013*	016	35	0
2	2	2	052	1	1	027	031	10	0
3	3	3	078	2	2	066	176	04	2
4	4	4	104	2	2	074	070	03	0
5	4	4	130	3	3	108	133	02	2
6	5	5	147	3	3	091	003	02	0

Tabela 5.3: Resultados para a rede de 12 nós. \*: Solução Ótima.

Com o mesmo arranjo de colunas descrito acima, a Tabela 5.3 trás os resultados para a rede de 12 nós. Na Figura 5.1 está representada a topologia física da rede de 6 nós, e na Figura 5.2 sua matriz de demandas de tráfego (ASSIS; WALDMAN, 2004). Desta vez temos 6 instâncias, do grau lógico 1 até o 6. Aqui também foram obtidos melhores resultados para o trio *L*, *W* e *S*. Nesta etapa, os resultados de (ASSIS; WALDMAN, 2004) foram obtidos com 6 horas de execução, enquanto os resultados com o modelo TWA levaram 7.2 minutos para serem

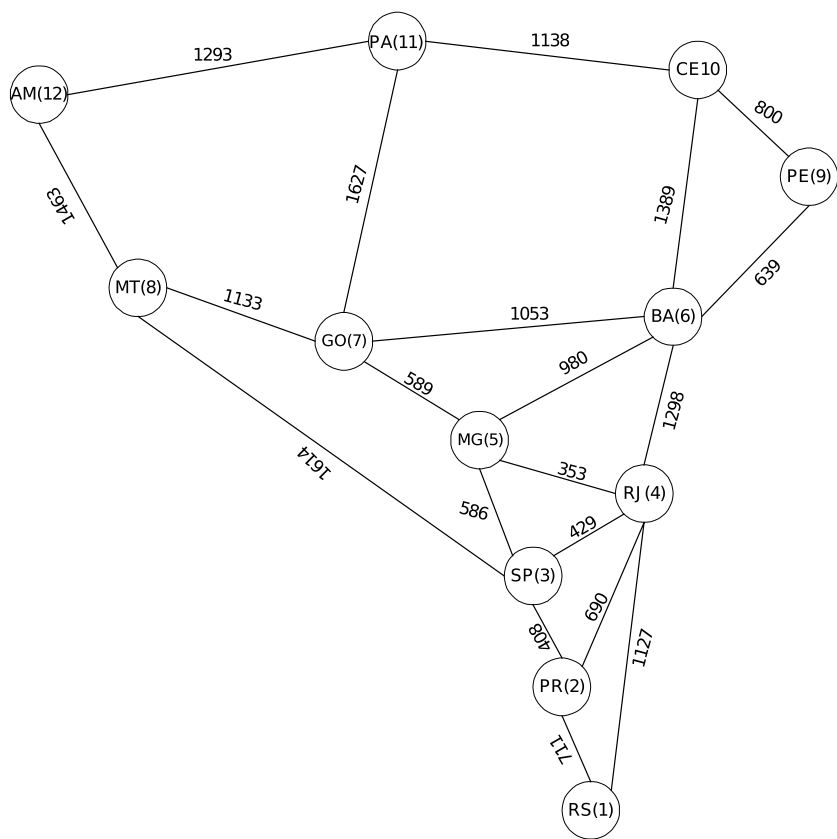


Figura 5.3: Rede de 12 nós (ASSIS; WALDMAN, 2004)

1 produzidos.

2 Mesmo quando não foi encontrado o valor ótimo para  $S$ , através do método utilizado, a

3 otimalidade está garantida para os parâmetros  $L$  e  $W$ . Em particular, note que apenas a variação

4 de  $W$  influenciou nos resultados, pois  $L$  sempre teve de ser fixado no seu valor máximo ( $L = W$ ).

5 Um detalhe importante é que, para a primeira instância da rede de 12 nós ( $Gl = 1$ ), o *solver*

6 também foi capaz de provar a otimalidade para a primeira solução viável. Isto demonstra que

7 o modelo TWA mantém desempenho aceitável mesmo com uma rede de maior porte. Com

8 esses resultados mostramos a viabilidade da técnica aqui proposta, técnica esta que é totalmente

	0,92		0,84	0,3	0,49	0,83	0,17	0,28	0,52	0,41	0,32
0,23		0,2	0,52	0,29	0,89	0,56	0,97	0,46	0,64	0,3	0,96
0,6	0,17		0,2	0,19	0,82	0,37	0,27	0,06	0,2	0,87	0,72
0,48	0,4	0,6		0,68	0,64	0,7	0,25	0,98	0,37	0,01	0,41
0,89	0,93	0,27	0,83		0,81	0,54	0,87	0,58	0,78	0,76	0,74
0,76	0,91	0,19	0,01	0,54		0,44	0,73	0,42	0,68	0,97	0,26
0,45	0,41	0,01	0,68	0,15	0,34		0,13	0,51	0,46	0,99	0,43
0,01	0,89	0,74	0,37	0,69	0,28	0,62		0,33	0,56	0,78	0,93
0,82	0,05	0,44	0,83	0,37	0,34	0,79	0,89		0,79	0,43	0,68
0,44	0,35	0,93	0,5	0,86	0,53	0,95	0,19	0,22		0,49	0,21
0,61	0,81	0,46	0,7	0,85	0,72	0,52	0,29	0,57	0,6		0,83
0,79	0,01	0,41	0,42	0,59	0,3	0,88	0,66	0,76	0,05	0,64	

Figura 5.4: Matriz de demandas para a rede de 12 nós.



1 baseada no modelo apresentado neste trabalho.

## 2 5.3 O Modelo KS

3 Reproduzimos nesta seção a formulação matemática encontrada em (KRISHNASWAMY;  
4 SIVARAJAN, 2001), a qual denominamos KS. Este é um modelo de programação linear inteira  
5 mista, que combina variáveis reais e variáveis discretas. Ela modela os quatro subproblemas  
6 do projeto de uma WRON. Mas topologia física é considerada conhecida, sendo passado como  
7 parâmetro para o modelo. Adotaremos aqui o índice  $r$  tal como foi definido na Notação 2.

8 Supondo grau lógico uniforme para toda a rede ( $G$ ), o número de variáveis binárias deste  
9 modelo é da ordem de  $\Theta(N^4 \cdot W \cdot G)$ .

10 **Variável 5.3.1.** *Ligação lógica,  $b_{ijr} = 1$  se existe a ligação lógica de índice  $r$  entre o par  $(i, j)$ ,  
11 ou  $b_{ijr} = 0$  caso contrário.*

12 **Variável 5.3.2.** *Alocação de comprimento de onda,  $C_{ij}^{wr} = 1$  se a ligação lógica de índice  $r$   
13 entre o par  $(i, j)$  usa o comprimento de onda  $w$ , ou  $C_{ij}^{wr} = 0$  caso contrário.*

14 **Variável 5.3.3.** *Rota física,  $C_{mnij}^{wr} = 1$  se a ligação lógica de índice  $r$  entre o par  $(i, j)$  usa o  
15 comprimento de onda  $w$ , passando pelo enlace físico  $(m, n)$ , ou  $C_{mnij}^{wr} = 0$  caso contrário.*

16 **Variável 5.3.4.**  $\lambda_{ijr}^{sd} \in \mathbb{R}^+$ , *Componente de Tráfego, representa a quantidade de tráfego fluindo  
17 de uma fonte  $s$  para um destino  $d$ , e passando pela ligação lógica entre o par  $(i, j)$  de índice  $r$ .*

18 **Variável 5.3.5.**  $\lambda_{ijr}$ , *Tráfego total na ligação lógica entre o par  $(i, j)$  de índice  $r$ .*

19 **Variável 5.3.6.**  $\lambda_{max} \in \mathbb{R}^+$ , *Congestionamento da rede.*

$$\text{Minimize: } \lambda_{max} \quad (5.3.1)$$

$$\sum_{jr} b_{ijr} \leq GL_{out_i}, \quad \forall i \quad (5.3.2)$$

$$\sum_{ir} b_{ijr} \leq GL_{in_j}, \quad \forall j \quad (5.3.3)$$

$$\sum_w C_{ij}^{wr} = b_{ijr}, \quad \forall (i, j, r) \quad (5.3.4)$$

$$C_{mni}^{wr} \leq C_{ij}^{wr}, \quad \forall (i, j, w, r, m, n) \quad (5.3.5)$$

$$\sum_{ijr} C_{mni}^{wr} \leq 1, \quad \forall (w, m, n) \quad (5.3.6)$$

$$\forall (i, j, r, n), \quad \sum_{mw} C_{mni}^{wr} \cdot D_{mn} - \sum_{mw} C_{nmj}^{wr} \cdot D_{nm} = \begin{cases} b_{ijr}, & n = j \\ -b_{ijr}, & n = i \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (5.3.7)$$

$$\lambda_{ijr}^{sd} \leq b_{ijr} \cdot P_{sd}, \quad \forall (i, j, r, s, d) \quad (5.3.8)$$

$$\lambda_{ijr} = \sum_{sd} \lambda_{ijr}^{sd}, \quad \forall (i, j, r) \quad (5.3.9)$$

$$\lambda_{ijr} \leq \lambda_{max}, \quad \forall (i, j, r) \quad (5.3.10)$$

$$\forall (i, s, d), \quad \sum_{jr} \lambda_{ijr}^{sd} - \sum_{jr} \lambda_{jir}^{sd} = \begin{cases} P_{sd}, & s = i \\ -P_{sd}, & d = i \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (5.3.11)$$

## 5.4 Comparação com o modelo KS

Nos resultados que iremos confrontar, é considerado o grau lógico da rede ( $Gl$ ), não há multiplicidade de ligações lógicas e a função objetivo é o congestionamento. Para produzir resultados passíveis de comparação, são acrescentadas à modelagem básica do TWA, mostrada na Seção 2: as Restrições 3.2 de controle do grau lógico; a Restrição 3.2.3 de controle de multiplicidade de ligações lógicas, com  $M = 1$ ; e a Restrição 3.3.6 que determina o congestionamento como função objetivo. Esta formulação específica é denominada de  $TWAc_1$ .

Na Figura 5.5 está representada a topologia física da rede NSFNET, na qual são baseados os testes em (KRISHNASWAMY; SIVARAJAN, 2001). Nas Tabelas 5.4 e 5.5, respectivamente, estão as matrizes de demandas  $P1$  e  $P2$  da NSFNET (RAMASWAMI; SIVARAJAN, 2002).

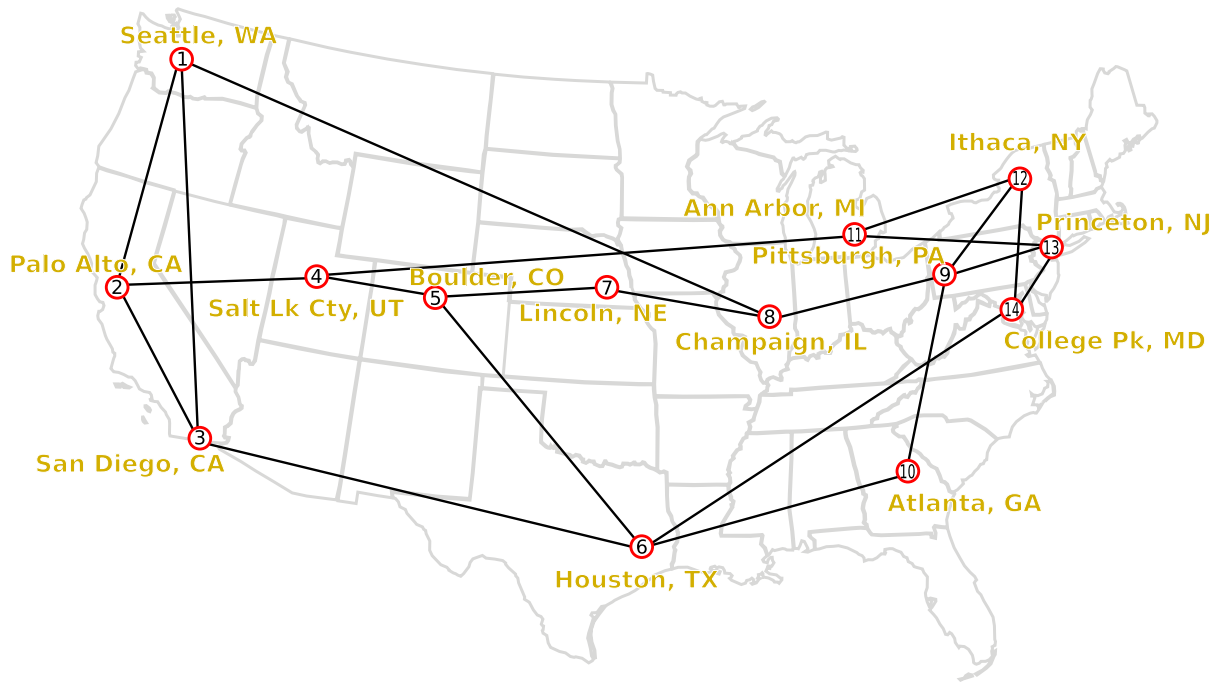


Figura 5.5: Rede de 14 nós NSFNET (KRISHNASWAMY; SIVARAJAN, 2001).

Tabela 5.4: Matriz de demandas  $P1$  (RAMASWAMI; SIVARAJAN, 1996).

0.000	33.029	32.103	26.008	0.525	0.383	82.633	31.992	37.147	0.568	0.358	0.544	0.651	0.160
0.546	0.000	0.984	0.902	0.866	0.840	0.013	62.464	0.475	0.001	0.342	0.925	0.656	0.501
35.377	0.459	0.000	0.732	0.272	0.413	28.242	0.648	0.909	0.991	56.150	23.617	1.584	0.935
0.739	0.225	0.296	0.000	0.896	0.344	0.012	84.644	0.293	0.208	0.755	0.106	0.902	0.715
0.482	96.806	0.672	51.204	0.000	0.451	0.979	0.814	0.225	0.694	0.504	0.704	0.431	0.333
0.456	0.707	0.626	0.152	0.109	0.000	0.804	0.476	0.429	0.853	0.280	0.322	90.503	0.212
0.042	0.067	0.683	0.862	0.197	0.831	0.000	0.585	67.649	56.138	0.896	0.858	73.721	0.582
0.616	0.640	0.096	97.431	0.308	0.441	0.299	0.000	0.161	0.490	0.321	0.638	82.231	0.376
0.786	0.323	0.676	0.359	0.019	50.127	12.129	0.650	0.000	0.483	45.223	58.164	0.894	0.613
0.037	0.318	0.367	2.981	0.976	0.629	0.525	0.293	0.641	0.000	33.922	0.228	0.995	71.905
12.609	0.479	0.146	0.174	0.181	0.072	23.080	0.671	0.634	0.759	0.000	0.725	0.592	0.445
0.887	0.004	1.614	0.471	0.120	0.263	0.585	0.086	0.157	95.633	42.828	0.000	0.527	0.021
9.019	0.569	0.936	0.975	81.779	0.573	0.738	0.410	0.490	0.948	0.154	0.145	0.000	0.436
20.442	0.515	0.719	0.089	39.269	49.984	0.720	0.863	0.858	0.490	0.106	0.765	0.059	0.000

1 Já na Tabela 5.6 estão as distâncias entre os nós da topologia física da NSFNET adotada, em  
2 centenas de milhas.

3 Nas Tabelas 5.8 e 5.9 são confrontados os resultados obtidos com o  $TWAc_1$  e os encontra-  
4 dos em (KRISHNASWAMY; SIVARAJAN, 2001), com o modelo KS. Para cada grau lógico,  
5 são exibidos: na coluna MILP, o valor de congestionamento obtido executando o modelo MILP  
6 do  $TWAc_1$  com o SCIP; na coluna  $T$ , o tempo gasto pelo SCIP para chegar a essa solução; na  
7 coluna  $W$ , o número de comprimentos de onda utilizados pelo  $TWAc_1$ ; e na coluna MTB, o  
8 *Minimum Traffic Bound* para cada instância. Também são exibidos, para o modelo KS, na co-  
9 luna  $UB$ , as melhores soluções para o congestionamento encontradas em (KRISHNASWAMY;  
10 SIVARAJAN, 2001), e nas colunas  $LB$  e  $W$ , os respectivos *lower bounds* e número de compri-  
11 mentos de onda utilizados pelo KS. Quando o valor de congestionamento corresponde ao ótimo  
12 da instância, ele é marcado com um asterisco.

13 Nos resultados para a modelagem KS, para cada instância, o cálculo do LB levou em mé-

Tabela 5.5: Matriz de demandas  $P2$  (RAMASWAMI; SIVARAJAN, 1996).

0.000	1.090	2.060	0.140	0.450	0.040	0.430	1.450	0.510	0.100	0.070	0.080	0.000	0.330
11.710	0.000	8.560	0.620	11.120	7.770	3.620	15.790	3.660	16.610	2.030	37.810	4.830	13.190
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.310	3.410	13.64	0.000	1.900	0.600	0.700	2.880	2.000	3.260	3.070	6.690	0.080	4.010
0.280	67.510	19.02	3.430	0.000	4.030	10.77	62.22	24.02	17.92	0.450	79.03	9.970	5.290
0.000	5.810	3.420	5.520	3.400	0.000	2.610	2.680	0.870	3.870	0.040	0.840	0.060	2.480
1.750	22.02	102.31	4.470	22.03	7.900	0.000	114.1	19.82	21.95	0.780	71.40	0.330	32.84
2.390	63.84	210.30	8.520	28.210	2.660	97.08	0.000	43.95	33.00	11.37	48.63	5.530	13.85
6.450	18.93	37.35	6.000	24.99	6.810	25.06	61.02	0.000	39.62	14.52	127.5	23.34	0.760
0.050	35.29	10.26	3.730	22.34	9.480	4.980	57.08	6.840	0.000	6.300	17.64	5.910	0.760
0.100	1.020	3.130	1.690	0.240	0.060	0.810	1.450	0.580	7.120	0.000	0.840	0.060	0.500
1.280	26.15	1.000	5.940	24.86	1.320	5.490	40.57	29.53	22.37	10.50	0.000	1.010	0.540
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.730	29.09	13.63	9.890	35.61	12.07	6.440	28.79	4.670	0.000	3.990	0.000	10.750	0.000

Tabela 5.6: Matriz de distâncias para a NSFNET, em centenas de milhas.

0	7	10	7	10	19	13	16	21	21	19	22	24	22
7	0	4	5	9	16	14	18	22	21	20	24	25	21
10	4	0	6	8	12	13	17	21	19	19	23	24	19
7	5	6	0	4	12	8	12	17	16	13	18	19	16
10	9	8	4	0	8	4	9	13	12	11	15	16	12
19	16	12	12	8	0	8	8	11	7	11	14	14	12
13	14	13	8	4	8	0	5	9	8	7	10	11	8
16	18	17	12	9	8	5	0	5	5	3	6	7	5
21	22	21	17	13	11	9	5	0	5	2	2	2	5
21	21	19	16	12	7	8	5	5	0	6	7	7	6
19	20	19	13	11	11	7	3	2	6	0	4	5	6
22	24	23	18	15	14	10	6	2	7	4	0	2	5
24	25	24	19	16	14	11	7	2	7	5	2	0	1
22	21	19	16	12	12	8	5	5	6	6	5	1	0

1 dia 125 minutos utilizando o método iterativo encontrado em (RAMASWAMI; SIVARAJAN,  
2 2002). O *upper bound* (UB) foi obtido por meio de uma heurística, levando menos de um mi-  
3 nuto. Portanto, a otimalidade só pôde ser garantida nesses resultados quando o valor viável  
4 encontrado era igual ao *lower bound* obtido. Esses resultados foram produzidos com a *IBM's*  
5 *Optimization Subroutine Library (OSL)* em um computador IBM 43P/RS6000.

6 Para ambas as matrizes, foram obtidos melhores resultados com o  $TWAc_1$ , em compara-  
7 ção com os resultados para o modelo KS, tanto para o valor de congestionamento quanto para

Tabela 5.7: Legendas para as Tabelas 5.8 e 5.9.

$GL$	=	Grau Lógico
$W$	=	Número de comprimentos de onda disponíveis
$MTB$	=	<i>Minimum Traffic Bound</i>
$MILP$	=	Resultados obtidos pelo SCIP
$T$	=	Tempo em minutos gasto com o SCIP
$KS$	=	Melhores resultados com o modelo KS
$LB$	=	Lower Bound para o congestionamento
$UB$	=	Uper Bound para o congestionamento

Tabela 5.8: Resultados para a matriz  $P1$ . \*: Ótimo alcançado.

$P1$	TWAc <sub>1</sub>				KS		
$Gl$	$W$	$T_{(m)}$	MTB	MILP	$LB$	$UB$	$W$
2	2	451	126.87	143.66	126.74	145.74	4
3	3	221	84.58	*84.58	84.58	*84.58	4
4	3	8	63.44	69.17	63.43	70.02	4
5	4	225	50.75	50.82	50.74	50.94	5
6	4	24	42.29	43.54	42.29	44.39	6
7	5	65	36.25	*36.25	36.25	36.43	6
8	6	102	31.72	*31.72	31.72	31.77	7
9	7	131	28.19	*28.19	28.19	28.37	9
10	8	72	25.37	25.53	25.37	25.64	9
11	9	200	23.07	23.31	23.00	23.08	11
12	11	140	21.14	21.35	21.27	21.39	12
13	13	16	19.52	*20.25	20.24	20.25	13

Tabela 5.9: Resultados para a matriz  $P2$ . \*: Ótimo alcançado.

$P2$	TWAc <sub>1</sub>				KS		
$Gl$	$W$	$T_{(m)}$	MTB	MILP	$LB$	$UB$	$W$
2	1	152	284.66	*292.31	284.26	389.93	2
3	2	4.4	189.78	*189.78	189.76	217.80	4
4	2	2	142.33	*142.33	142.33	152.99	3
5	3	4	113.87	*113.87	113.87	*113.87	4
6	3	3.9	94.89	*94.89	94.89	*94.89	5
7	4	4.3	81.33	*81.33	81.33	*81.33	6
8	4	6.8	71.17	*71.17	71.17	*71.17	6
9	5	20.9	63.26	*63.26	62.15	63.26	9
10	6	20.1	56.93	*56.93	56.93	*56.93	10
11	6	23.2	51.75	*51.75	51.75	*51.75	10
12	7	23.1	47.44	*47.44	47.44	*47.44	13
13	7	14.8	43.79	*43.79	43.79	*43.79	13

1 o número de comprimentos de onda utilizados. Outro fato importante é qualidade alcançada  
2 pelo MTB em todas as instâncias, praticamente igual ao *lower bound* obtido em (KRISH-  
3 NASWAMY; SIVARAJAN, 2001), mas com demanda de tempo desprezível. Esse é um re-  
4 sultado expressivo, frente aos 125 minutos, em média, gastos com o método iterativo (RA-  
5 MASWAMI; SIVARAJAN, 2002). Em 62% das instâncias, o MTB equivale ao ótimo. E mesmo  
6 quando o ótimo diferiu do MTB, no pior caso, o MTB ficou menos de 5% abaixo do ótimo. Por  
7 fim vale ressaltar que foram obtidas soluções ótimas para 70% das instâncias com o  $TWAc_1$ ,  
8 contra 37% dos resultados para o modelo KS.

9 O tempo demandado pelo SCIP para obter os resultados aqui apresentados são altos, se  
10 comparados ao desempenho de heurísticas para o congestionamento no projeto encontradas na  
11 literatura (KRISHNASWAMY; SIVARAJAN, 2001; SKORIN-KAPOV; KOS, 2005). Todavia,  
12 esses resultados corroboram para eficiência do modelo TWA. Pois, seu reduzido número de  
13 variáveis e equações, possibilitou obter tais soluções sem que para isso fosse necessário recorrer  
14 à heurísticas.

## Conclusões

Uma formulação MILP foi apresentada para o projeto de redes ópticas com roteamento por comprimento de onda, englobando as restrições dos problemas VTD e RWA, possibilitando o confronto de métricas de ambas as modelagens. Esta formulação é mais abrangente que as apresentadas na literatura e possui a vantagem de ser mais tratável no que se refere ao número de variáveis e restrições.

Para garantir uma complexidade computacional equivalente a de modelos que englobam apenas os problemas VTD e RWA separadamente, a principal consideração que a formulação faz é a utilização das variáveis topológicas, que sintetizam variáveis distintas das formulações tradicionais, além da forma agregada com que é feita a distribuição do tráfego e o roteamento dos canais ópticos, semelhante a outros modelos da literatura (RAMASWAMI; SIVARAJAN, 2002; TORNATORE; MAIER; PATTAVINA, 2007).

O modelo foi apresentado inicialmente em uma forma básica, contendo as restrições e variáveis consideradas essenciais para a resolução do projeto completo, que engloba a escolha da topologia física, definição da topologia virtual, distribuição de tráfego, definição das rotas físicas e alocação dos comprimentos de onda. Nessa modelagem básica a função objetivo adotada foi a minimização do número de saltos físicos dos caminhos ópticos.

Para validar experimentalmente a formulação, foram realizados testes comparativos com os resultados apresentados em (ASSIS; WALDMAN, 2004) e (KRISHNASWAMY; SIVARAJAN, 2001), aonde as redes consideradas possuem 6, 12 e 14 nós. Os resultados obtidos foram consideravelmente expressivos, com relação à qualidade das soluções e ao desempenho computacional.

Foi possível provar a otimalidade, da primeira solução viável encontrada, para todas as instâncias da rede de 6 nós e em uma das instâncias da rede de 12 nós. Além disso, em todas as instâncias de ambas as redes foram obtidos melhores resultados para os parâmetros controlados, em relação aos resultados confrontados. Para a rede de 6 nós, em média, obtivemos uma redução de 43% no número de comprimentos de onda necessário e 34% no número de saltos físicos. Mesmo não provando a otimalidade para todas as instâncias da rede de 12 nós, alcançamos em média as mesmas porcentagens de melhoria do resultado conseguidas para a rede de 6

1 nós. Resta destacar que os resultados para a rede de 12 nós foram produzidos em 7.2 minutos,  
 2 uma demanda de tempo pequena, se comparada às 6 horas do experimento com o qual foram  
 3 comparados.

4 Para a rede de 14 nós foram feitos testes com duas matrizes de demandas de tráfegos, que  
 5 são instâncias clássicas da literatura (RAMASWAMI; SIVARAJAN, 1996). Para ambas matri-  
 6 zes foram obtidos resultados melhores do que os encontrados na literatura para os parâmetros  
 7 controlados (KRISHNASWAMY; SIVARAJAN, 2001). Além disso, para 70% das instâncias  
 8 foram obtidas soluções ótimas. O tempo demandado para produzir estes últimos resultados foi  
 9 alto, em comparação ao desempenho das heurísticas utilizadas na literatura (SKORIN-KAPOV;  
 10 KOS, 2005), todavia deve-se ressaltar o fato de que não foram utilizadas heurísticas nem ferra-  
 11 mentas comerciais.

12 Os modelos encontrados na literatura, com funcionalidades semelhantes ao TWA, possuem  
 13 uma maior ordem de grandeza do número de variáveis binárias. Sendo este um importante  
 14 fator para se avaliar o quão tratável é um modelo. Tanto o modelo encontrado em (ASSIS;  
 15 WALDMAN, 2004) como o modelo encontrado em (KRISHNASWAMY; SIVARAJAN, 2001)  
 16 têm número de variáveis binárias da ordem de  $\Theta(N^4 \cdot W \cdot G)$ , supondo grau lógico uniforme  
 17 para toda a rede como  $G$ . Ainda assim, estes modelos devem receber a topologia física da rede  
 18 como um parâmetro.

19 Em sua versão mais geral, o TWA é capaz de resolver também a topologia física da rede,  
 20 com número de variáveis binárias  $\Theta(TWA)$  da ordem de  $\Theta(N^3 \cdot W \cdot K)$ , onde  $K$  é a multiplici-  
 21 dade máxima dos enlaces físicos. Todavia, nos resultados que foram alvo de comparação neste  
 22 trabalho, não há multiplicidade de enlaces físicos. Neste caso, se a topologia física fosse ainda  
 23 uma das variáveis do modelo, teríamos que  $\Theta(TWA) = \Theta(N^3 \cdot W)$ .

24 Se a topologia física for um dado de entrada, então  $\Theta(TWA)$  estará entre  $o(N^2 \cdot W)$  e  $O(N^3 \cdot$   
 25  $W)$ , dependendo da quantidade de ligações físicas na rede, que é razoável supor se encontrar  
 26 entre  $N$  e  $N^2$ . Mais precisamente, sendo  $H$  a quantidade de ligações físicas na rede pré-existente,  
 27 segue que  $\Theta(TWA) = \Theta(N \cdot W \cdot H)$ .

28 O novo *lower bound* para o congestionamento introduzido por este trabalho, o MTB, de-  
 29 mostrou ser muito eficiente. Pois, possui demanda de tempo computacional desprezível, frente  
 30 ao alto custo das técnicas conhecidas até então (RAMASWAMI; SIVARAJAN, 1996). Além  
 31 disso, na maioria das instâncias em que conseguimos provar a otimalidade (62%), o MTB coin-  
 32 cidiu com o ótimo. E mesmo quando o MTB diferiu do ótimo, no pior caso, ele ficou menos de  
 33 5% abaixo deste. Apenas este resultado já muda o cenário para o problema VTD, tornando este  
 34 um problema bem mais tratável. Uma vez que, obter bons resultados a partir de heurísticas não



1 é tarefa difícil no VTD, conforme a literatura (RAMASWAMI; SIVARAJAN, 1996).

2 A abrangência da modelagem e o desempenho computacional obtido viabilizam, em tra-  
3 balhos futuros, extensões à modelagem básica. Dada a capacidade do modelo de determinar  
4 a topologia física, uma aplicação imediata seria atribuir custos de instalação e operação às va-  
5 riáveis e utilizar o custo total como função objetivo (MUKHERJEE, 1997). Outras funções  
6 objetivo de trivial implementação seriam: o número máximo de ligações lógicas em cada fibra;  
7 o número total de transceptores na rede, ou em cada fibra (ZANG; JUE; MUKHERJEE, 2000);  
8 o processamento eletrônico total da rede (ALMEIDA et al., 2006); e o congestionamento da  
9 rede (RAMASWAMI; SIVARAJAN, 2002).

## Referências Bibliográficas

- 1
- 2 AGRAWAL, G. P. *Fiber-Optic Communication Systems*. 2. ed. [S.l.]: John Wiley and Sons,
- 3 1997.
- 4 ALMEIDA, R. T. R. et al. Design of Virtual Topologies for Large Optical Networks Through
- 5 an Efficient MILP Formulation. *Optical Switching and Networking*, v. 3, p. 2-10, 2006.
- 6 ASSIS, K. D. R.; WALDMAN, H. Topologia Virtual e Topologia Física de Redes Ópticas:
- 7 Uma Proposta de Projeto Integrado. *Revista da Sociedade Brasileira de Telecomunicações* v.
- 8 19, 2004.
- 9 BALA, K. *Transparent, opaque and hybrid optical networking*. [S.l.]: Optical Networks, vol.
- 10 1, p. 10, 2000.
- 11 BANERJEE, D.; MUKHERJEE, B. Wavelength-routed optical networks: Linear formulation,
- 12 resource budgeting tradeoffs, and a reconfiguration study. In: *INFOCOM '97: Proceedings*
- 13 *of the INFOCOM '97. Sixteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and*
- 14 *Communications Societies. Driving the Information Revolution*. Washington, DC, USA: IEEE
- 15 Computer Society, 1997. p. 269. ISBN 0-8186-7780-5.
- 16 BANERJEE, D.; MUKHERJEE, B. Wavelength-routed optical networks: linear formulation,
- 17 resource budgeting tradeoffs, and a reconfiguration study. *IEEE/ACM Trans. Netw.*, IEEE
- 18 Press, Piscataway, NJ, USA, v. 8, n. 5, p. 598–607, 2000. ISSN 1063-6692.
- 19 BOAVENTURA, P. O. *Grafos: Teoria, Modelos, Algoritmos*. [S.l.]: Editora Edgard Blcher,
- 20 São Paulo, 2 Ed., 2001.
- 21 CORMEN, H. *Algoritmos: teoria e prática*. [S.l.]: Elsevier, 2002.
- 22 JAUMARD, B.; MEYER, C.; THIONGANE, B. Comparison of ILP Formulations for the
- 23 RWA Problem. *Les Cahiers du GERAD - G-2004-66*, 2004.
- 24 KRISHNASWAMY, R.; SIVARAJAN, K. Design of logical topologies: a linear formulation
- 25 for wavelength-routed optical networks with no wavelength changers. *Networking, IEEE/ACM*
- 26 *Transactions on*, v. 9, n. 2, p. 186–198, Apr 2001. ISSN 1063-6692.
- 27 LIMA, F. de O. et al. Reformulando o Problema de Projeto de Anéis em Redes Ópticas. In:
- 28 *Proceedings of 4th ITS - International Information and Telecommunication Technologies*
- 29 *Symposium*. [S.l.: s.n.], 2005.
- 30 LIMA, M. O. et al. Estratégias com Algoritmos Híbridos para Projeto de Redes Ópticas.
- 31 *XXXVI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, 2004.
- 32 LIU, Q. et al. Distributed inter-domain lightpath provisioning in the presence of wavelength
- 33 conversion. *Computer Communications*, 2007.

- 1 MAHER, A. Transmission Efficient Design and Management of Wavelength Routed Optical  
2 Networks. *Kluwer Academic Publishers*, 2001.
- 3 MUKHERJEE, B. *Optical Communication Networks*. [S.l.]: McGraw-Hill, 1997.
- 4 MUKHERJEE, B. et al. Some principles for designing a wide-area wdm optical network.  
5 *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, v. 4, n. 5, p. 684–696, Oct 1996. ISSN 1063-6692.
- 6 OLIVEIRA, E. A combined approach for designing topology and flow congestion minimization  
7 of optical networks. *5th Conference on Telecommunications*, 2005.
- 8 PALMIERI, F. F. Gmpls control plane services in the next-generation optical internet. *The*  
9 *Internet Protocol Journal*, 2008.
- 10 PUECH, N.; KURI, J.; GAGNAIRE, M. Topological Design and Lightpath Routing in WDM  
11 Mesh Networks: A Combined Approach. *Photonic Network Communications*, 4:3/4, 443-456,  
12 2002, 2002.
- 13 RAMAMURTHY, B.; FENG, H.; DATTA. Transparent vs. opaque vs. translucent wavelength  
14 routed optical networks. *Optical Fiber Communication Technical Digest*, 1999.
- 15 RAMASWAMI, R.; SASAKI, G. Multiwavelength Optical Networks with Limited Wavelength  
16 Conversion. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 6, NO. 6, December, 1998.
- 17 RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K. N. Design of Logical Topologies for WavelengthRouted  
18 Optical Networks. *IEEE J. Sel. Areas Commun.* vol. 14 pag. 840 851, 1996.
- 19 RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K. N. *Optical Networks: a practical perspective*. 2<sup>nd</sup>. ed.  
20 [S.l.]: Morgan Kaufmann Pub. Inc., San Francisco, 2002.
- 21 RESENDO, L. C.; RIBEIRO, M. R. N.; CALMON, L. C. Efficient Grooming-Oriented  
22 Heuristic Solutions for Multi-Layer Mesh Networks. *Journal of Microwaves and*  
23 *Optoelectronics*, 2007.
- 24 SKORIN-KAPOV, N.; KOS, M. Heuristic algorithms considering various objectives for  
25 virtual topology design in wdm optical networks. In: *International Conference on on*  
26 *Telecommunication Systems, Modeling and Analysis*, 2005. [S.l.: s.n.], 2005.
- 27 TORNATORE, M.; MAIER, G.; PATTAVINA, A. WDM network design by ILP models based  
28 on flow aggregation. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 15., No. 3, pp. 709-720,  
29 *July*, 2007.
- 30 XIN, Y.; ROUSKAS, G. N.; PERROS, H. G. On the physical and logical topology design of  
31 large-scale optical networks. *J. Lightwave Technol.*, OSA, v. 21, n. 4, p. 904, 2003. Disponível  
32 em: <<http://jlt.osa.org/abstract.cfm?URI=JLT-21-4-904>>.
- 33 ZANG, H.; JUE, J. P.; MUKHERJEE, B. A Review of Routing and Wavelength Assignment  
34 Approaches for Wavelength Routed Optical WDM Networks. *Optical Networks Magazine*  
35 *vol.1*, 2000.

