

Projeto de Topologia Virtual em Redes Ópticas: Uma Abordagem para Evitar a Interferência entre Canais

K. D.R. Assis¹, M. S. Savasini², A.F. Santos³, W. F. Giozza⁴

¹Universidade Federal da Bahia (UFBA)
CEP: 44210-630 – Salvador – BA – Brasil.

²Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)
CEP: 13083-970 – Campinas – SP – Brasil.

³Universidade de São Paulo (USP)
CEP: 13566-590 – São Carlos – SP, Brasil.

⁴Universidade de Brasília (UnB)
CEP: 70910-900 – Brasília – DF, Brasil.

karcus.assis@ufba.br, savasini@decom.fee.unicamp.br, afsantos@usp.br e
giozza@ene.unb.br

Abstract. *In this paper we propose an strategy to limit the adjacent channels interference in the design of virtual topology of optical networks. The proposed formulation is linear and can provide optimal solutions. In traditional planning strategies of the virtual topology, there is no a priori knowledge of channel usage, and since the solution is implemented, the interference can not be avoided. Taking into account the effects of adjacent channels interference, we extend the traditional formulation with a set of analytical formulas and additional constraints that will limit the interference. A heuristic is also proposed to solve problems with many instances.*

Resumo. *Neste artigo propomos uma estratégia para limitar a interferência de canais adjacentes no projeto de topologia virtual de redes ópticas. A formulação proposta é linear e capaz de fornecer soluções ótimas. Nas estratégias tradicionais de planejamento da topologia virtual, não há nenhum conhecimento a priori do uso do canal, e uma vez que a solução é implementada, a interferência não pode ser evitada. Levando em consideração os efeitos da interferência de canais adjacentes, estendemos a formulação tradicional com um conjunto de fórmulas analíticas como restrições adicionais que permitem limitar a interferência. Uma heurística também é proposta para solucionar problemas com muitas instâncias.*

1. Introdução

Atualmente o número de usuários da Internet vem crescendo exponencialmente. Isto é devido, em parte, ao surgimento de novas aplicações, assim como vídeo sob demanda, teleconferências, imagens médicas de alta resolução etc. Desta forma, tem sido estimulada a pesquisa e o desenvolvimento de novas gerações de redes de transporte, capazes de suportar esses novos tipos de fluxos de informação. Neste contexto, surge um modelo baseado em uma infra-estrutura óptica inteligente, que utiliza a tecnologia

de Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda (WDM – *Wavelength Division Multiplexing*) [Ramaswami, 2006].

A tecnologia WDM proporciona um melhor aproveitamento da capacidade de transmissão das fibras ópticas, possibilitando a transmissão de diversos comprimentos de onda, de forma simultânea, em uma mesma fibra óptica. Desta maneira, com o uso da tecnologia WDM, é possível atender uma maior demanda de tráfego.

Para o estabelecimento de uma conexão, entre dois nós de uma rede óptica WDM transparente (i.e., sem conversão eletro-óptica em nós intermediários), faz-se necessário configurar os caminhos ópticos por onde o tráfego será encaminhado, alocando os recursos indispensáveis para o estabelecimento desta conexão.

Ao se projetar uma rede WDM transparente, deve-se pensar em soluções (caminhos ópticos) que atendam toda a demanda de tráfego da rede, minimizando o custo ou a utilização de seus recursos (quantidade de comprimentos de onda, portas etc) para preservar capacidade aberta ou recursos para demandas futuras, imprevistas, ou para necessidade de reconfigurações, em caso de falha na rede [Banerjee *et al*, 1996], [Assis *et al*, 2009]. A determinação dos caminhos ópticos, baseada na demanda de tráfego é conhecida como Projeto da Topologia Virtual (VTD – *Virtual Topology Design*) e o roteamento na topologia física e alocação de comprimentos de onda para os caminhos ópticos estabelecidos previamente é conhecido como Projeto da Topologia Física (PTD – *Physical Topology Design*) ou Roteamento e Alocação de Comprimentos de Onda (RWA – *Routing and Wavelength Assignment*) [Ramaswami e Sivarajan, 1996], [Assis *et al*, 2005].

Diversos trabalhos apresentados na literatura já abordaram o VTD em redes ópticas, isoladamente ou em conjunto com o RWA. Várias formulações matemáticas e métodos heurísticos sob diferentes hipóteses e padrões de tráfego foram propostos. Veja os estudos realizados por [Dutta e Rouskas, 2000] e [Zang *et al*, 2000] como exemplos de tutoriais que trataram do tema até o ano 2000 e [Pavon-Marino *et al*, 2009], [Jaumard, B. *et al*, 2009] como exemplos de trabalhos mais recentes. Os objetivos de projeto mais freqüentemente estudados são: no caso do VTD, a minimização do congestionamento e a minimização do processamento eletrônico; em relação ao RWA, a minimização do número de comprimentos de onda (chamado de min-RWA) e a maximização do número de conexões que podem ser estabelecidas (chamado de max-RWA).

No entanto, nas redes WDM transparentes, a qualidade do sinal pode ser degradada devido a restrições na camada física. Por exemplo, a interferência entre canais (*crosstalk*) depende da utilização ou não de canais adjacentes ao longo do caminho óptico [Deng *et al*, 2004]. Além disso, os efeitos de outras degradações, como a Modulação Cruzada de Fase (XPM- *Cross Phase Modulation*) e a Mistura de Quatro Ondas (FWM- *Four Wave Mixing*) são altamente dependentes do uso de canais adjacentes ou próximos aos adjacentes, [Azodolmolky, 2009]. Portanto, evitar as interferências entre canais adjacentes é um critério importante para planejar de forma eficiente redes WDM transparentes.

Em [Deng *et al*, 2004] é apresentado um algoritmo de limitação de interferência para o RWA dinâmico e em [Manousakis *et al*, 2008] outro algoritmo de limitação de interferência é apresentado para o RWA estático. O primeiro algoritmo baseia-se na enumeração de interferências introduzidas pela fonte ao longo de um caminho óptico,

considerando que a topologia virtual (caminhos ópticos estabelecidos) é conhecida. O segundo algoritmo está baseado numa formulação através de programação linear sujeita a uma demanda de tráfego estático. Outras abordagens, como a de [He, *et al* 2007], tentam evitar a mistura de quatro ondas e a modulação cruzada de fase.

Diante disso, a solução do RWA tem uma influência importante no surgimento desses efeitos, pois selecionar um caminho óptico, entre um par origem-destino, e alocar um ou vários comprimentos de onda disponíveis nesse caminho pode diminuir ou aumentar as degradações dos efeitos da camada física. Então, o planejamento de redes ópticas transparentes deve ser capaz de considerar em suas decisões os efeitos e propriedades da camada física [Ramamurthy *et al*, 1999]. Nesse caso, as formulações matemáticas e algoritmos são conhecidos como IRWA ou ICBR (*Impairment Constraint Based Routing*) [Bastos Filho *et al*, 2009]. Neste trabalho, propomos uma nova formulação matemática para evitar a interferência entre canais WDM, considerando os enlaces de fibra óptica.

A primeira formulação linear de uma solução parcial do problema RWA, evitando o uso de canais adjacentes, foi proposta em [Manousakis *et al* 2008], onde as restrições são criadas usando uma *path-formulation* [Jaumard *et al*, 2007], em que apenas K rotas, das possíveis, são disponíveis para o RWA. Neste trabalho, nossas principais contribuições são:

- 1) Uma *link-formulation* [Jaumard *et al*, 2007], que é uma extensão do trabalho proposto em [Manousakis *et al* 2008]. Enquanto em [Manousakis *et al* 2008] se conhece previamente o conjunto de K rotas alternativas para qual uma conexão pode ser estabelecida; neste trabalho, não conhecemos com antecedência as rotas. Então todas são possíveis. Logo, a formulação linear que propomos pode encontrar resultados eficientes para evitar a interferência entre canais, já que qualquer rota pode ser escolhida e não apenas as pré-estabelecidas.
- 2) Nossa formulação é um projeto completo de rede, ou seja, a topologia virtual e física são tratadas simultaneamente e comparadas com os resultados de [Krishnaswamy and Sivarajan, 2001], [Ramaswami and Sivarajan, 1996] que não levam em conta os efeitos da interferência entre canais. Dessa forma, observamos o efeito das restrições da camada física em um nível mais alto, ou seja, na configuração da topologia virtual.

Apesar de existirem diversos outros efeitos físicos que afetam o planejamento de redes ópticas transparentes, eles não foram considerados no escopo deste trabalho.

Este artigo está organizado da seguinte forma. Na seção 2 definimos mais detalhadamente topologia virtual e topologia física. Na seção 3 apresentamos a formulação matemática tradicional para solucionar o projeto completo de uma rede óptica (VTD e RWA). Na seção 4 introduzimos detalhadamente o conceito de interferência entre canais adjacentes e acrescentamos as restrições da camada física na formulação da seção 3. Na seção 5 mostramos resultados numéricos para uma topologia de rede com 6 nós, abordamos sobre complexidade computacional e propomos uma heurística para redes de maiores dimensões. Aplicamos a heurística para uma topologia de rede com 14 nós (e.g., NSFNET) e comparamos com os resultados de [Ramaswami e Sivarajan, 1996]. Finalmente, concluímos nosso artigo na seção 6.

2. Topologia Física e Topologia Virtual

Ao projetar uma rede óptica WDM é necessário estabelecer os caminhos ópticos por onde o tráfego (geralmente medido em Gbps) será encaminhado. Essa definição é feita

através do VTD. Posteriormente, o RWA deve ser resolvido, ou seja, os caminhos ópticos, previamente escolhidos, devem ser roteados por uma topologia física e comprimentos de onda devem ser alocados de forma adequada nesses caminhos ópticos. Esse segundo processo deve obedecer às seguintes regras:

- dois caminhos ópticos podem compartilhar um mesmo enlace, porém, não podem ser associados ao mesmo comprimento de onda em um mesmo enlace físico.
- se conversões de comprimento de onda não forem permitidas, o caminho óptico deve ser associado ao mesmo comprimento de onda em todos os enlaces da rota.

Essas duas regras se aplicam a este trabalho. A Figura 1 ilustra uma arquitetura de uma rede óptica simples, formando uma topologia física, com os nós numerados de 1 a 6 e interconectados através de enlaces físicos (fibras ópticas) bidirecionais.

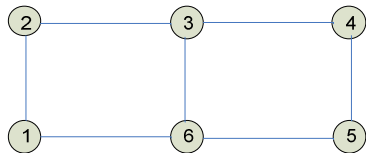


Figura 1. Topologia física

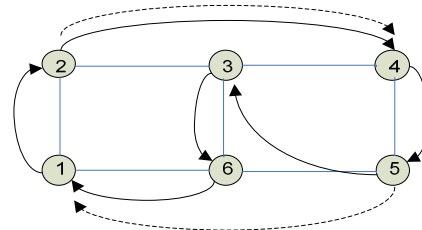


Figura 2. Topologia virtual

O projeto de topologia virtual envolve a definição dos caminhos virtuais para o encaminhamento dos dados entre um par de nós (fonte e destino). Todos os nós da rede se comunicam através dos caminhos virtuais. Se na topologia virtual um nó não estiver conectado diretamente (conectado virtualmente) com o nó destino, então os dados serão conduzidos por várias rotas virtuais até chegarem ao seu destino. Pode-se visualizar isto na Figura 2, onde, o nó 3 não tem uma conexão direta (caminho virtual) para o nó 1. Então o tráfego originado em 3 terá que passar por dois caminhos virtuais: de 3 para 6 e de 6 para 1 para chegar ao seu destino, o nó 1. A quantidade de caminhos ópticos utilizados, também é chamada de saltos virtuais (*virtual hops*). No exemplo anterior, houve a utilização de dois caminhos ópticos, então se diz que ocorreram dois saltos virtuais. Coincidentemente, também ocorreu a passagem por dois enlaces físicos. Neste exemplo, limitamos para 2 o número de enlaces físicos que um caminho óptico pode percorrer. O número máximo de enlaces físicos que um caminho óptico pode percorrer é denotado por H e o número de comprimentos de onda disponíveis para planejar a rede é denotado por W .

Após o estabelecimento dos caminhos virtuais o RWA deve ser resolvido, obedecendo as regras “a” e “b” estabelecidas anteriormente. Para a topologia virtual da Figura 2, o RWA é mostrado na Tabela 1 abaixo para três diferentes alocações de comprimento de onda. Nota-se que na Solução #1 foi necessário o uso de 2 comprimentos de onda para resolver o RWA. Nessa solução, o segundo comprimento de onda foi necessário no segundo caminho óptico 2-4 e também no caminho óptico direto 5-1 (setas tracejadas na Figura 2). As soluções #2 e #3 serão explanadas na seção 4.

Tabela 1. Possível RWA para a topologia virtual da Figura 2, $W=3$, $H=2$

CAMINHO VIRTUAL	ROTA FÍSICA	SOLUÇÃO #1 COMPRIM. DE ONDA	SOLUÇÃO #2 COMPRIM. DE ONDA	SOLUÇÃO #3 COMPRIM. DE ONDA
1-2	1-2	1	1	1
(2-4) ¹	2-3-4	1	1	1
(2-4) ²	2-3-4	2	2	3
3-6	3-6-1	1	1	1
4-5	4-5	1	1	1
5-3	5-6-3	1	1	1
5-1	5-6-1	2	3	3
6-1	6-1	1	1	1

Note que configuramos 8 caminhos ópticos no exemplo acima. Para uma rede com N nós, o ideal seria configurar caminhos ópticos para todos os $N(N-1)$ pares. Entretanto, isso não é usualmente possível por duas razões: Primeiro, o número de comprimentos de onda disponíveis impõe um limite na quantidade de caminhos ópticos que podem ser configurados (isto é também uma função da distribuição de tráfego). Segundo, cada nó pode ser fonte e destino de um número limitado de caminhos ópticos. Isto é determinado pela quantidade de hardware óptico que pode ser provido (transmissores e receptores) e pela quantidade total de informações que um nó pode processar. Daí a importância do VTD, pois o mesmo tenta projetar a rede de forma eficiente para um número limitado de caminhos virtuais, definido por um parâmetro chamado grau virtual.

Então, sendo $T = (\lambda^{sd})$ uma matriz de tráfego, i.e., λ^{sd} é a taxa de pacotes (ou Gbps) de um nó s que são enviados para o nó d . Nós tentamos criar uma topologia virtual G_v e rotear o tráfego nesta G_v minimizando $\lambda_{\max} = \max_{ij} \lambda_{ij}$ onde λ_{ij} é a carga oferecida ao enlace (i,j) da topologia virtual. A variável λ_{\max} é a máxima carga que atravessa um enlace virtual e é definida como *congestionamento*. Sendo G_p a topologia física da rede, Δ o grau da topologia virtual (grau virtual) e W o número de comprimentos de ondas disponíveis. Uma descrição informal do problema de projeto integrado das topologias virtual, conhecido como VTD, e física, conhecido como PTD, é dada a seguir (uma formulação precisa usando Programação Linear Inteira Mista – MILP – pode ser encontrada em [Ramaswami, R. and Sivarajan, K.N., 1996]).

$$\text{Min } \lambda_{\max} \quad (1)$$

sujeito a:

- cada enlace virtual em G_v corresponde a um caminho óptico e dois caminhos ópticos que compartilham um arco na topologia física devem ter comprimentos de ondas diferentes;
- o número total de comprimentos de onda usados é no máximo W ;
- todos os nós em G_v têm Δ arcos de entrada e Δ arcos de saída;
- o fluxo de tráfego de cada par fonte-destino é conservado nos nós intermediários.

3. Formulação Matemática:

Na formulação apresentada em [Ramaswami, R. e Sivarajan, K.N., 1996], para o VTD, nós adicionamos as restrições do PTD, criando uma formulação matemática mais robusta, fazendo dessa forma a integração dos subproblemas VTD e PTD.

A) Notação:

- i e j são os nós de origem e término, respectivamente, de um caminho óptico.
- m e n denotam enlaces físicos de m para n , nos quais podem passar um ou mais caminhos ópticos.

B) Dado:

- Número de nós na rede: N .
- Número de comprimentos de onda disponíveis: W
- Topologia física (P_{mn}): denota o número de fibras interconectando os nós m e n . $P_{mn} = 0$ para um nó m que não é fisicamente adjacente a um nó n . $P_{mn} = P_{nm}$ indica que deve haver igual número de fibras do nó m para n e de n para m . Pode haver mais do que um enlace de fibra conectando nós adjacentes na rede. Entretanto, neste trabalho, por simplicidade, consideramos $P_{mn}=P_{nm} = 1$.

C) Variáveis:

- Topologia Virtual: a variável inteira $b_{ij} \in \{0,1\}$ denota se existe um caminho óptico de um nó i para um nó j na topologia virtual. Note que nesta formulação os caminhos ópticos não são necessariamente bidirecionais, isto é, $b_{ij} = 0$ não implica em $b_{ji} = 0$.
- Carga em um enlace físico: L , sendo $L \leq W$. A carga denota o número máximo de caminhos ópticos que devem atravessar um enlace físico da rede.
- Roteamento na topologia física: A variável p_{mn}^{ij} denota o caminho óptico entre os nós i e j que está sendo roteado pelo enlace de fibra $m-n$.
- Alocação de comprimento de onda: A variável $p_{mn\zeta}^{ij}$ especifica o comprimento de onda ζ que é alocado ao caminho óptico entre os nós m e n da topologia física. Como não há conversão de comprimento de onda, esse mesmo valor será alocado para todos os enlaces físicos onde o caminho óptico $i-j$ passa.

Logo, a formulação matemática através de Programação Linear Inteira Mista (MILP) para os problemas VTD e PTD, de forma integrada, utilizando como função objetivo a equação (1) é dada como a seguir.

- Adicionamos as seguintes restrições PTD ao VTD de [Ramaswami, R. and Sivarajan, K.N., 1996]:

D) PTD- Physical Topology Design

- Roteamento na topologia física p_{mn}^{ij} :

$$\sum_m p_{mk}^{ij} = \sum_n p_{kn}^{ij}, \dots \text{se} \dots k \neq i, j \quad (2)$$

$$\sum_n p_{in}^{ij} = b_{ij} \quad (3)$$

$$\sum_m p_{mj}^{ij} = b_{ij} \quad (4)$$

$$\sum_{ij} p_{mn}^{ij} \leq L.P_{mn} \quad (5)$$

As equações (2)-(4) garantem o roteamento dos caminhos ópticos (b_{ij}) na topologia física através de equações de fluxo *multicommodity*. Note que o *commodity* agora é um caminho óptico e não dados como no VTD de [Ramaswami, R. e Sivarajan, K.N., 1996]. A equação (5) limita o número máximo de caminhos ópticos que atravessam um enlace físico através da variável carga L . Neste trabalho assumimos que a carga é limitada pelo número de comprimentos de ondas disponíveis W .

- Alocação de comprimento de onda e restrições de continuidade de comprimento de onda (sem conversão em nenhum nó)

$$\sum_m p_{ml\zeta}^{ij} = \sum_n p_{nl\zeta}^{ij} \quad \text{se } l \neq i, j \quad (6)$$

$$\sum_n p_{nl\zeta}^{ij} = b_{ij\zeta} \quad (7)$$

$$\sum_m p_{mj\zeta}^{ij} = b_{ij\zeta} \quad (8)$$

$$\sum_\zeta b_{ij\zeta} = b_{ij} \quad (9)$$

$$\sum_{ij} p_{mn\zeta}^{ij} \leq P_{mn} \quad (10)$$

$$\sum_\zeta p_{mn\zeta}^{ij} = p_{mn}^{ij} \quad (11)$$

As equações (6)-(11) permitem a alocação adequada de comprimentos de onda para os caminhos ópticos roteados na topologia física. Note que as restrições não permitem conversão de comprimento de onda nos nós intermediários da rede.

- Condição de não-negatividade e número inteiros

$$\text{int } p_{mn}^{ij}, p_{mn\zeta}^{ij} \text{ e } p_{mn}^{ij} \geq 0, p_{mn\zeta}^{ij} \geq 0$$

4. Interferência entre Canais no RWA

Como mencionado anteriormente, nas redes WDM transparentes, a qualidade do sinal é degradada devido às restrições da camada física. Essas restrições dependem das características físicas das fibras usadas, mas algumas dessas restrições também variam de acordo com a utilização da rede. Por exemplo, a interferência entre canais, a modulação cruzada de fase (XPM) e a mistura de quatro ondas (FWM) não dependem unicamente das características da fibra, mas também da utilização de outros comprimentos de onda no mesmo enlace. Portanto, neste caso, temos que levar em consideração como a alocação de comprimentos de onda irá interferir na solução do RWA. Uma proposta é apresentada na próxima subseção.

4.1 Adyacência entre Canais

Nesta subseção, iremos melhorar a formulação apresentada na seção 3 para levar em consideração a interferência entre canais adjacentes na mesma fibra. Para tanto, definiremos interferência entre canais e descreveremos o efeito da interferência do canal adjacente com uma fórmula analítica, aplicada aos enlaces que compõem o caminho. Posteriormente, restringiremos a interferência total de canais adjacentes sobre um enlace, de modo a ser inferior a um limite pré-definido. As definições a seguir, juntamente com a Figura 3, são necessárias para uma melhor compreensão deste trabalho.

A) Definições:

- Distância entre dois comprimentos de onda:

-a distância entre dois comprimentos de onda, a e b, é dada por:

$$d(\zeta_a, \zeta_b) = |\zeta_a - \zeta_b|$$

- Comprimentos de onda adjacentes:

-dois comprimentos de onda são chamados adjacentes se a distância entre eles é:

$$d(\zeta_a, \zeta_b) = 1$$

- Interferência de dois comprimentos de onda no mesmo enlace:

-dois comprimentos de onda interferem entre si quando são adjacentes. Isto acontece se a distância entre eles é 1.

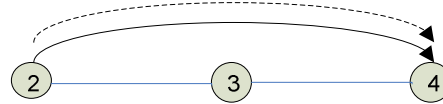


Figura 3. Configuração parcial da rede da Figura 1. Exemplo de interferência, se $\zeta_a=1$ e $\zeta_b=2$ $d(\zeta_a, \zeta_b) = |1 - 2| = 1$

Retornando à solução #1 da seção 2 observamos que os caminhos ópticos 2-4 interferem um com o outro (nos enlaces 2-3 e 3-4), pois possuem alocações de comprimentos de onda adjacentes $d(1,2) = |1 - 2| = 1$. O mesmo ocorre com os caminhos ópticos 6-1 e 5-1, pois também possuem alocações de comprimentos de onda adjacentes, ocorrendo a interferência no enlace físico 6-1. Logo, há 3 interferências na solução 1. Note que estamos calculando a interferência por enlace físico.

Se ao invés de escolhermos o comprimento de onda 2, escolhermos o comprimento de onda 3 para o caminho óptico 5-1, isto é, a solução #2. Não haverá mais interferência no enlace físico 6-1, pois $d(1,3) = |1 - 3| = 2$, restando apenas a interferência dos caminhos virtuais de 2 para 4 nos enlaces físicos 2-3 e 3-4. Entretanto, se mudarmos também um dos caminhos virtuais de 2-4 para o comprimento de onda 3, teremos uma configuração sem nenhuma interferência entre canais (solução #3).

B) Adicionando restrições

- Para saber se ζ é ativo no enlace m-n, criamos a variável binária $I_{mn\zeta}$ e a adicionamos na formulação da seção 3 (problema RWA), então:

$$I_{mn\zeta} = \begin{cases} 1 & \text{se } \sum_{ij} p_{mn\zeta}^{ij} \geq 1 \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (12)$$

Após isso, acrescentamos também a restrição de interferência de canal adjacente ao RWA, que deve ser menor que um limite pré-definido, o qual será associado à Relação Sinal-Ruído Óptica (OSNR), que é uma relação entre as potências de sinal e de ruído recebidas, sendo um parâmetro que também está associado à interferência entre canais. Para este propósito, implementamos as seguintes restrições para cada fibra:

$$I_{mn(\zeta+1)} + I_{mn(\zeta-1)} + \alpha * I_{mn\zeta} \leq D_{mn} + \alpha \quad (13)$$

Onde:

- α = constante (utilizando valores altos, e.g. $\alpha = 100$).
- D_{mn} = interferência máxima aceitável de canais adjacentes que pode ser tolerada em cada enlace de fibra
- $I_{mn(\zeta+1)} + I_{mn(\zeta-1)}$: soma de comprimentos de onda que afetam o comprimento de onda ζ . Somente os comprimentos de onda adjacentes contribuem para a interferência, daí a necessidade de (13), então:

$$\alpha * I_{mn\zeta} = \begin{cases} \alpha & \text{se } \zeta = 1 \text{ (ativo)} \\ 0 & \text{senão} \end{cases}$$

Note, que a restrição (13) limita a interferência em uma fibra, se quisermos limitar a interferência total de um caminho óptico podemos definir este limite como $D_{OSNR} \leq D_{mn} \cdot H$, onde lembramos que H é o número total de enlaces físicos que um caminho óptico pode percorrer. Por exemplo, se um caminho óptico tem $H=3$ e a interferência máxima permitida em cada enlace de fibra é 1, temos $D_{OSNR} \leq D_{mn} \cdot H = 1 \cdot 3 = 3$, sendo este um limite superior para a interferência total permitida em cada caminho óptico.

Se analisarmos os casos acima, temos:

1. No caso de ocorrer $I_{mn\zeta} = 1$ a restrição (13) se torna $I_{mn(\zeta+1)} + I_{mn(\zeta-1)} \leq D_{mn}$ e o número de comprimentos de onda que afetam o sinal está restrito a ser inferior ao limite pré-definido no enlace físico D_{mn} . Para uma tentativa de limitar o OSNR, Devemos observar que D_{OSNR} dependerá do número de enlaces físicos percorridos.
2. No caso de ocorrer $I_{mn\zeta} = 0$, um comprimento de onda adjacente não foi selecionado e a restrição para canais adjacentes não afeta o RWA, desde que α seja suficientemente grande.
3. Casos extremos: se $\zeta = 1$, $I_{mn(1-1)} = 0$; e se $\zeta = W$, $I_{mn(W+1)} = 0$.

5. Simulação e Resultados Numéricos

Para validar a formulação proposta consideramos duas redes pequenas (Figura 4). Uma rede em forma de anel, com seis nós (para mostrar uma simulação simples) e uma rede em malha de seis nós (para comparar com [Ramaswami e Sivarajan 1996] e [Krishnaswamy e Sivarajan 2007]). Também contemplamos uma rede maior: a rede de 14 nós da *National Science Foundation Network-NSFNET* (também de [Ramaswami e Sivarajan 1996] e [Krishnaswamy e Sivarajan 2007]), que devido à complexidade é planejada por meio de uma heurística.

A) Redes pequenas

Para as redes pequenas (Figura 4), resolvemos a MILP da seção 3 com as restrições adicionais da seção 4. Utilizamos o CPLEX 10.0, de [IBM/ILOG, 2009] em um Pentium IV, 2 Ghz. As soluções exatas são dadas nas Tabelas 3 e 4.

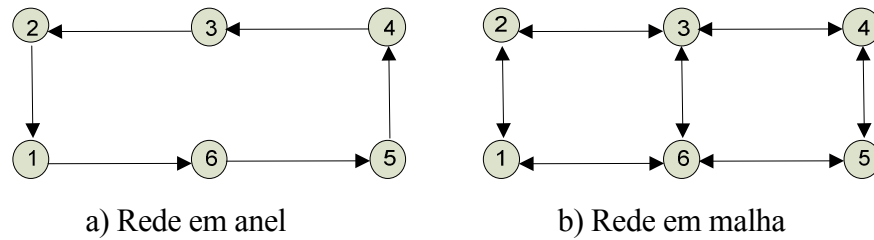


Figura 4. Redes Pequenas

Tabela 2: Matriz de tráfego $T=(\lambda^{sd})$ para a rede de 6 nós, [Ramaswami e Sivarajan 1996]

-	0.537	0.524	0.710	0.803	0.974
0.391	-	0.203	0.234	0.141	0.831
0.060	0.453	-	0.645	0.204	0.106
0.508	0.660	0.494	-	0.426	0.682
0.480	0.174	0.522	0.879	-	0.241
0.950	0.406	0.175	0.656	0.193	-

Para a Figura 4a, com $W=4$, $\Delta=2$ e T dada na Tabela 2, sem permitir qualquer interferência de enlace, $D_{mn} = 0$, a Tabela 3a mostra um possível VTD e RWA. O congestionamento é 3.67 e alguns possíveis enlaces virtuais não puderam ser estabelecidos; dos 12 possíveis, $(\Delta.N)$, apenas 10 puderam ser configurados. Isso se deve ao fato de que, para o grau virtual 2, precisamos de mais comprimentos de ondas, ou deveremos permitir alguma interferência para configurar todos os possíveis caminhos ópticos. Para a mesma rede, com os mesmos parâmetros anteriores, mas permitindo interferência ilimitada, o congestionamento é de 2.45 (Tabela 3b). Nesse caso, todos os caminhos ópticos foram configurados. Logo, deve haver um compromisso entre números de comprimentos de ondas disponíveis, congestionamento máximo permitido ou capacidade do canal e limitação da interferência, baseada na disponibilidade de recursos e maximização de atendimento.

Tabela 3. Soluções para rede pequena em anel

a) Solução sem interferência				b) Solução com interferência ilimitada			
$W=4, \Delta=2, D_{mn}=0$				$W=4, \Delta=2, D_{mn}=ilimitada$			
b_{ij}	Rota	ζ_i	λ_{max}	b_{ij}	Rota	ζ_i	λ_{max}
1-5	1-6-5	3	3.67	1-5	1-6-5	2	2.45
1-6	1-6	1		1-6	1-6	1	
2-1	2-1	3		2-1	2-1	1	
3-1	3-2-1	1		2-6	2-1-6	4	
3-2	3-2	4		3-1	3-2-1	2	
5-3	5-4-3	3		3-2	3-2	1	
4-3	4-3	1		4-2	4-3-2	4	
5-3	5-4-3	3		4-3	4-3	2	
5-4	5-4	1		5-3	5-4-3	1	
6-5	6-5	1		5-4	5-4	2	
				6-4	6-5-4	1	
				6-5	6-5	4	

Para a Figura 4b, a matriz de tráfego T da Tabela 2 também foi usada. Consideramos quatro parâmetros: D_{mn} , H , W e Δ . Os resultados estão na Tabela 4 e “*” indica que não há restrição para aquele parâmetro particular naquela coluna. Com esses parâmetros, muitas combinações são possíveis. Nós apresentamos resultados para algumas

combinações e comparamos com os resultados de [Krishnaswamy e Sivarajan 2007]. Para $\Delta=2$, $W=2$, $H=2$ e $D_{mn}=0$ o congestionamento é 2.21. Ou seja, o mesmo obtido com permissão total de interferência, que é o caso considerado em [Krishnaswamy e Sivarajan 2007]. Se não impusermos qualquer restrição a W e H , mas não permitirmos interferência, também obtemos o mesmo resultado de [Krishnaswamy e Sivarajan 2007]. Para o grau 3 e $W=2$, na formulação tradicional, o congestionamento é 1.183. Porém, com $D_{mn}=0$ (sem interferência) o congestionamento sobe para 2.21. No entanto, se houver disponibilidade de mais um comprimento de onda, $W=3$, o congestionamento é similar nas duas formulações. A análise dos resultados para os graus 4 e 5 têm explicações similares às dos graus menores.

Tabela 4. Comparação com [Krishnaswamy e Sivarajan 2007]

Parâmetros			Nova Formulação		[Krishnaswamy e Sivarajan 2007]	
Δ	W	H	D_{mn}	λ_{max}	D_{mn}	λ_{max}
2	2	2	0	2.21	*	2.21
2	*	*	0	2.04	*	2.04
3	2	*	0	2.21	*	1.18
3	*	*	0	1.18	*	1.18
4	3	*	0	1.10	*	0.89
4	*	*	0	0.89	*	0.89
5	4	*	0	1.11	*	0.71
5	*	*	0	0.71	*	0.71

“*” significa que não há restrições quanto a disponibilidade de recursos ou que D_{mn} é ilimitada

B) Redes Grandes - Estratégia Heurística

Os problemas VTD e PTD descritos anteriormente são complexos e cada um deles é conhecido como *NP-Hard* [Ramaswami *et al*, 1996], ou seja, o tempo de execução do problema cresce de maneira exponencial quando o número de variáveis aumenta. Logo, se cada um dos problemas é NP, a solução dos dois conjuntamente é ainda mais complexa. Então, a divisão em VTD e PTD é aceitável porque diminui esta complexidade. Entretanto, para uma maior eficiência do uso dos recursos da rede sob uma perspectiva de integração dos planos de controle da camada óptica (PTD) e da camada cliente (VTD), o interessante é encontrar uma maneira para resolver estes problemas de forma integrada e num tempo computacional aceitável. Para isto, buscamos uma estratégia heurística para tornar o problema com muitas restrições aceitável, mas que evidentemente não fornecerá a solução ótima.

Heurística VTD/PTD

Passo 1: Dada a matriz de tráfego estático $T=(\lambda^{sd})$ e o grau virtual Δ encontrar a configuração dos enlaces virtuais (b_{ij}) com uma heurística tradicional para resolver o VTD. (Neste trabalho, utilizamos a Busca Tabu. [Santos *et al*, 2007]. Formando assim a topologia virtual G_v).

Passo 2: Com a formulação VTD da Seção 3, rotear o tráfego $T=(\lambda^{sd})$ nos b_{ij} 's da topologia virtual estabelecida no Passo anterior, encontrando o $\min \lambda_{max}$.

Passo 3: Dado a topologia virtual G_v encontrada no Passo anterior, a topologia física G_f e o número de comprimentos de onda disponíveis W . Se não desejar interferência vá para o Passo 4 e chame-o de Heur I (interferência limitada). Caso contrário, vá para o Passo 5 e chame-o de Heur II (com interferência).

Passo 4 (interferência limitada -Heur I): Resolva o RWA com a nova formulação, apenas PTD, acrescentando as restrições de interferência, definindo limites para D_{mn} e consequentemente D_{OSNR} ; use o roteamento por caminhos mais curto como função objetivo do PTD. Ir para o Passo 6.

Passo 5 (com interferência- Heur II): Resolva o RWA com a formulação tradicional, PTD sem restrições de interferência, use o roteamento por caminhos mais curto como função objetivo do PTD. Evidentemente, podemos usar neste Passo as restrições de interferência, mas fazendo D_{mn} ilimitada. Ir para o Passo 6.

Passo 6: Se o RWA é viável, mostre o valor de λ_{max} e finalize. Caso contrário, o problema completo é inviável (mostre “X”) e finalize.

Nota: – as soluções b_{ij} para Heur I e Heur II são as mesmas. Por isso, esperamos resultados semelhantes para o congestionamento nas soluções viáveis; – a inviabilidade é caracterizada pela insuficiência de comprimentos de onda para atender a condição de planejamento escolhida.

Nós aplicamos a heurística acima para a rede NSFNET, apresentada em [Ramaswami e Sivarajan, 1996] que tem 14 nós e 21 arcos. O par de arcos direcionais representa um par de fibras, uma em cada direção. A Tabela 5 apresenta os resultados heurísticos para a matriz P1 de tráfego, também de [Ramaswami e Sivarajan, 1996].

Na Tabela 5, há duas colunas vizinhas, a saber: grau virtual Δ e número de comprimentos de onda disponíveis W , que são parâmetros para Heur I e Heur II. Relembrando que o símbolo “*” significa que não há restrições quanto a disponibilidade de um dado parâmetro. A coluna do congestionamento, para Heur I e Heur II, mostrará o resultado se a solução for viável. Para comparar com estratégias que não levam em conta a interferência (interferência ilimitada) consideramos nossa formulação com $D_{mn}=0$ para Heur I e consequentemente $D_{OSNR}=0$; e D_{mn} ilimitada para Heur 2, e consequentemente D_{OSNR} ilimitada. Para o grau virtual 2, na primeira linha, com $W=2$ a solução de Heur I é inviável. Contudo, se aumentarmos o número de comprimentos de onda disponíveis para 3, encontramos uma solução viável, com congestionamento 553.76. Podemos observar também que para esse conjunto de parâmetros, 3 é um limite inferior no número de comprimentos de onda necessários. Então, para encontrarmos soluções sem qualquer interferência, precisamos utilizar $W \geq 3$. Para os mesmos parâmetros a Tabela 5 também mostra os resultados de Heur II, sem considerar qualquer limite na interferência, e verifica-se que uma solução viável pode ser encontrada. A questão que se deve observar é a seguinte: utilizar mais recursos (comprimentos de onda) em prol da eliminação da interferência ou minimizar o uso de recursos, permitindo interferências que podem degradar o sinal? Esta é uma questão que depende de disponibilidade de recursos do planejador e nível de degradação permissível para o sinal. Para outros graus, a discussão é semelhante.

A Figura 6 mostra o número de comprimentos de onda necessários para tornar viáveis as soluções para vários graus. Nesta figura, para a Heur I, mais uma vez $D_{mn}=0$. Por exemplo, para o grau 5 precisamos de 7 comprimentos de onda para realizar uma solução viável com a Heur I. Com a Heur II, para o mesmo grau, necessitamos apenas de 5 comprimentos de onda, mas com interferência ilimitada. Também obtemos resultados da heurística que resolve o VTD/PTD de uma rede óptica, a HLDA (*Heuristic Logical Topology Design Algorithm*) de [Ramaswami e Sivarajan 1996], que computa o número de comprimentos de onda com interferências ilimitadas, para comparação com as heurísticas apresentadas neste trabalho. As melhores soluções obtidas pela Heur I podem ser vistas na Figura 6, pois esta utiliza menos comprimentos de onda e não permite qualquer interferência, quando comparada com a HLDA.

**Tabela 5. Solução para rede maior.
(NSFNET com 14 nós)**

Δ	W	Heur I	Heur II
		$D_{mn}=0$ λ_{max}	$D_{mn}=Ilimitada$ λ_{max}
2	2	X	553.76
2	3	553.76	553.76
2	*	553.76	553.76
5	5	X	63.25
5	6	X	63.25
5	7	63.25	63.25
5	*	63.25	63.25
7	7	X	43.77
7	8	X	43.77
7	9	X	43.77
7	10	X	43.77
7	11	43.77	43.77
7	*	43.77	43.77
10	11	X	28.35
10	12	X	28.35
10	13	X	28.35
10	14	X	28.35
10	15	X	28.35
10	16	X	28.35
10	17	X	28.35
10	18	X	28.35
10	19	28.35	28.35
10	*	28.35	28.35

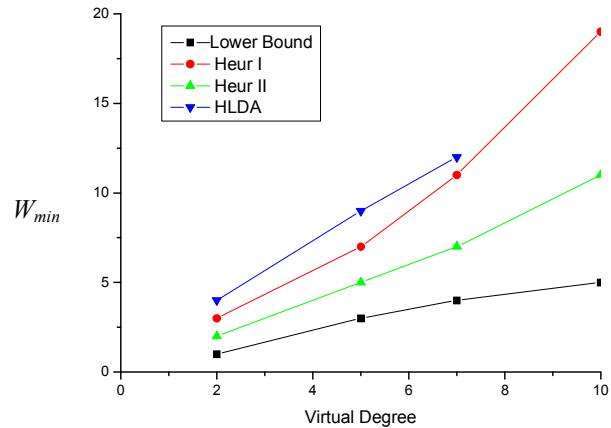


Figura 6. Número de comprimentos de onda necessários (W_{min}), em função do grau virtual. O Lower Bound foi obtido de [Ramaswami and Sivarajan 1996]

6. Conclusões

Os experimentos computacionais demonstram claramente que a formulação linear proposta apresenta uma melhora em relação às estratégias tradicionais, quando queremos evitar a interferência entre canais. Essa melhora vem do fato de que as formulações e os algoritmos existentes na literatura selecionam as rotas de modo a otimizar parâmetros da camada da rede, como por exemplo, o número de enlaces percorridos de uma fonte para o destino ou o balanceamento do tráfego na rede. Entretanto, pouca análise é feita com relação a interferência que pode ocorrer em canais adjacentes, o que degrada a qualidade do sinal no receptor. Nos exemplos demonstrados, verifica-se que a formulação bloqueia a alocação de canais adjacentes em custo do aumento do número de comprimentos de ondas utilizados. No entanto, nas redes ópticas operacionais há disponibilidade de muitos comprimentos de ondas para fazer o planejamento. É fato que a não regeneração do sinal óptico em nós intermediários de redes ópticas transparentes faz com que a qualidade do sinal se degrade. Portanto, a alocação de comprimentos de onda levando em conta esse fator pode ajudar os planejadores e operadores de rede a oferecer uma melhor QoS aos clientes. As perdas inerentes aos componentes ópticos (comutadores ópticos, multiplexadores, demultiplexadores etc) também afetam a qualidade do sinal e serão objetos de estudos futuros, assim como o estudo de redes mais complexas, para assim termos uma formulação mais robusta.

Referências

- Assis, K.D.R.; Giozza, W.F. e Waldman, H. (2005) "WDM Optical Networks: A Complete Design". Journal of Communication and Information Systems, Vol. 20, No. 3, pp. 81-95.
- Assis, K.D.R.; Savasini, M.; Waldman, H. (2009) "How Many Lightpaths we need Today and How Many Lightpaths we will need Tomorrow" Journal of Optical Communications. vol. 30, issue 3, 176 – 179.

- Azodolmolky, Siamak., Klinkowski , Miroslaw., Marin, Eva., Careglio , Davide., Pareta , Josep Solé., Tomkos, Ioannis (2009) "A survey on physical layer impairments aware routing and wavelength assignment algorithms in optical networks" *Computer Networks*, vol. 53 pp. 926–944.
- Banerjee, D. and Mukherjee, B., (1996) "A Practical Approach for Routing and Wavelength Assignment in Large Wavelength-Routed Optical Networks", *JSAC*, vol. 14, n.5, pp. 903-908.
- Bastos Filho, C. J. A. ; Chaves, D. A. R. ; Silva, F. S. F. ; Carvalho, R. V. B. ; Pereira, H. A. ; Martins-Filho, J. F. (2009) "Wavelength Assignment Optimization for All-Optical Networks Using Evolutionary Computation" *XXVII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, v.1. pp 31-44, Recife/PE.
- Byrav Ramamurthy, Debasish Datta, Helena Feng, Jonathan P. Heritage, and Biswanath Mukherjee (1999) "Impact of Transmission Impairments on the Teletraffic Performance of Wavelength-Routed Optical Networks" *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 17, Issue 10, pp. 1713-.
- Deng, T., Subramaniam, S. e Xu, J., (2004) "Crosstalk-Aware are Wavelength Assignment in Dynamic Wavelength Routed Optical Networks", *Broadnets 2004*. First International Conference on Broadband Networks.
- Dutta, R. e Rouskas, G., (2000) "A Survey of Virtual Topology Design Algorithms for Wavelength Routed Networks", *Optical Networks (SPIE) Vol 1, No 1*, pp. 73-89, Jan.
- He, J., Brandt-Pearce, M. etal, (2007) "QoT-Aware are Routing in Impairment-Constrained Optical Networks" *IEEE GLOBECOM*, pp. 2269-2274, Nov.
- IBM/ILOG/CPLEX, (2009); <http://www.ilog.com>
- Jaumard, B., Meyer, C., Thiongane, B. (2009)"On column generation formulations for the RWA problem", Elsevier *Discrete Applied Mathematics*. Volume 157 , Issue 6 March.
- Jaumard, B., Meyer, C. and Thiongane, B., (2007) "Comparison of ILP formulations for the RWA problem" . Elsevier *Optical Switching and Networking*. v4 i3-4. 157-172.
- Krishnaswamy, R.M. e Sivarajan, K.N., (2001) " Design of logical topologies: A linear formulation for wavelength routed optical networks with no wavelength changers ", *IEEE Trans. on Networking*, vol. 9, no. 2, pp. 186 186-198.
- Manousakis, K., Christodouloupolos, K. e Varvarigos, E., (2008) "Avoiding Adjacent Channel Interference in Statatic RWA", *CSNDSP08*.
- Pavon-Marino, Pablo., Aparicio-Pardo, Ramon., Garcia-Manrubia, Belen and Skorin-Kapov, Nina., (2009) "Virtual topology design and flow routing in optical networks under multihour traffic demand", *Photonic Network Communications*, August. Springer Netherlands.
- Ramaswami, R. e Sivarajan, K.N., (1996) "Design of Logical Topologies for Wavelength-Routed All Optical Networks". *IEEE/JSAC*, vol. 14, pp. 840-851. Junho.
- Ramaswami, R., (2006) "Optical Networking Technologies: What Worked and What Didn't". *IEEE Communications Magazine*, Sept, pp 132-139.
- Santos, A. F.; Giozza, William; Assis, K.D.R. (2007) "Meta-Heurística Tabu Search para o Planejamento de Redes Ópticas WDM" *V Escola Regional de Redes de Computadores- ERRRC*, Santa Maria-RS.
- Zang, H., Jue, J.P. e Mukherjee, B., (2000) "A Review of Routing and Wavelength Assignment Approaches for Wavelength-Routed optical WDM Networks", *Optical Networks Magazine*, vol.1, pp. 47-60, Janeiro.