

Planejamento de Redes Óticas WDM

Flavia Alves Martins de Azevedo

Orientador: Gustavo Campos Menezes

Banca Examinadora: Eduardo Macedo Bhering, Reinaldo Silva Fortes

Faculdade de Ciência da Computação e Comunicação Social (FACICS)– Universidade
Presidente Antônio Carlos (UNIPAC) – Barbacena – MG – Brasil

flaviamartinsalves@hotmail.com, gustavo.msc@gmail.com,
bhering@unipac.br, reifortes@yahoo.com.br

***Resumo.** Devido aos grandes avanços tecnológicos, principalmente em relação as fibras óticas, a sua utilização torna-se cada vez mais atraente juntamente com técnicas de multiplexação por comprimento de onda (WDM). A combinação destes avanços faz surgir a necessidade de um melhor planejamento da rede virtual. O objetivo principal do artigo é apresentar uma solução utilizando um modelo de programação matemática, o qual é utilizado para tomar decisões quanto ao uso dos containers virtuais.*

1 Introdução

A rapidez do progresso tecnológico, tanto na área de comunicação e computação, e a popularização da Internet, influenciaram a indústria de computadores tornando-se como meta a conexão de computadores e o objetivo de permitir a comunicação de dados. O aumento de usuários de redes tendo a necessidade de banda maior, também faz com que seja necessário mecanismo de alta capacidade e escalabilidade.

As transmissões por fibras óticas vêm crescendo cada vez mais. Sua capacidade, qualidade na transmissão e os custos x benefício razoavelmente bons, tornam-se interessante o seu uso em redes de computadores, tornando-se uma solução para demanda cada vez maior de transmissão de grandes volumes de dados e com segurança.

Através da técnica de multiplexação por comprimento de onda (WDM -Wavelength Division Multiplexing) é possível aumentar a capacidade de tráfego do sistema óptico de acordo com a necessidade, trazendo a possibilidade de explorar a largura de banda, ou seja, explorar melhor o potencial da fibra ótica.

O objetivo principal desse artigo é abordar um estudo sobre a tecnologia Wavelength Division Multiplexing (WDM) em uma rede ótica com topologia em anel, associado ao problema de definição de rotas multiplexadas por divisão de comprimento de onda, apresentando um modelo matemático e sua análise.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. A seção 2 apresenta uma revisão da literatura quanto à fibra ótica, as redes óticas e o WDM. Em seguida o planejamento e projeto de redes óticas, na seção 3. A seção 4 descreve o problema de

Traffic Grooming, a tecnologia WDM, TGP em anel. Já a seção 5 apresenta a formulação do problema bem como as anotações e modelo. Finalmente a seção 6, além de apresentar um estudo de caso, apresenta também os resultados obtidos.

2 Sobre Redes óticas e Fibra Ótica

Antes de começar a analisar questões técnicas sobre Planejamento de Redes Óticas WDM, será abordado uma revisão da literatura relacionando alguns detalhes de como funciona rede ótica, e o WDM.

2.1 Fibra ótica

As fibras óticas representam uma evolução no meio de transmissão de informações. Foi utilizada pela primeira vez em 1956 pelo Doutor Narinder Singh Kanpany membro da equipe do Laboratório Bell (USA), que apresentou planos para construção do primeiro LASER, a ser usado em Sistemas de Comunicação. Hoje mais de 80% de todo o tráfego do mundo é realizado por meio de fibra ótica.

A fibra ótica é o meio físico de transmissão, utilizada em redes de telecomunicação, que permiti a transmissão de dados, vozes e imagens, com velocidade próxima a da luz.

Atualmente a largura de banda da fibra ótica pode ultrapassar a casa dos 50.000 Gbps (50 Tbps), mas o limite prático da sinalização atual é de cerca de 1 Gbps, pois não é possível converter os sinais elétricos em óticos em uma velocidade maior [01].

2.2 Redes óticas

A primeira geração de redes óticas era utilizada somente como meio de transmissão, a tecnologia que predominou foi a SDH/SONET (Synchronous Digital Hierarchy)/Synchronous Optical NETwork). Já na segunda geração como o objetivo era aumentar a capacidade de transmissão da fibra ótica, encontramos a utilização de WDM.

Um sistema de transmissão ótico é constituído basicamente por três componentes:

- A origem da luz, transmissor ótico, onde temos os dispositivos de emissão de luz responsável em converter sinais utilizando diodos laser (DL's) e diodos eletroluminescentes (LED's) , o circuito driver responsável pela polarização elétrica e de comando da emissão de potência luminosa pelo dispositivo emissor de luz [05];

- o meio de transmissão;

- o detector; responsável por gerar um pulso elétrico quando entra em contato com a luz. Convencionalmente, um pulso de luz indica um bit, e a ausência de luz representa um bit zero [01].

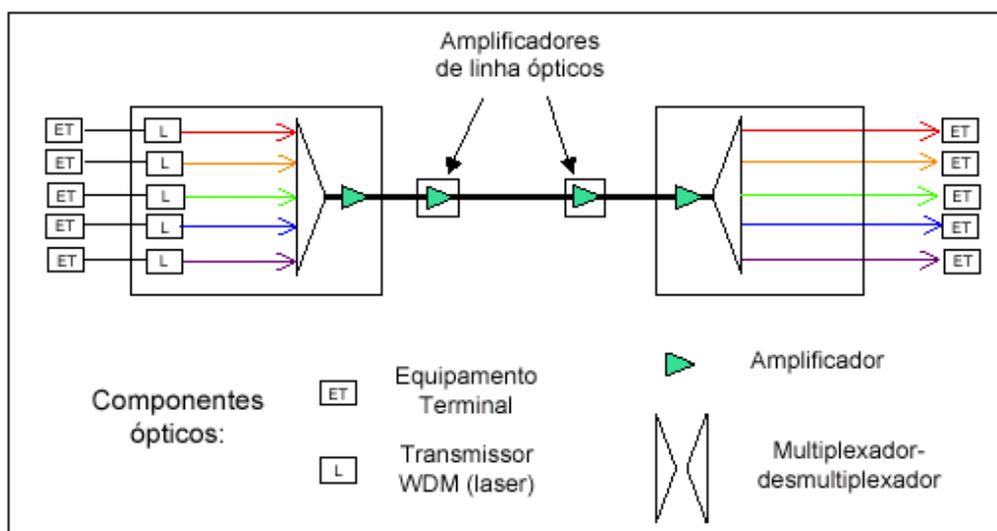
As redes óticas possuem enumeras vantagens em relação a outros tipos de redes. Dentre elas podemos citar: largura de faixa muito grande (multigigahertz x quilômetros) com baixa atenuação e pequena dispersão dos pulsos emitidos, elevadas taxas de transmissão chegando a milhares de megabits/segundo, perdas de transmissão baixas, imunidade a interferência eletromagnéticas e a pulsos eletromagnéticos, sua matéria prima sílica (SiO₂) representa um dos materiais mais abundantes da Terra, apresenta

resistência elétrica, segurança da informação e do sistema, necessidade de quantidades menores de repetidores, pequeno volume e peso o que resulta em maior flexibilidade mecânica, flexibilidade na expansão dos sistemas, menor espaço em instalação, menor custo de transporte e armazenamento.

2.3 Multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM)

A tecnologia WDM foi desenvolvida no início da década de 80, sua utilização era por meio de dois pares de fibras, um para transmissão e o outro para recepção. Já a segunda geração no início da década de 90 utilizava vários canais distintos. As variações de WDM o DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) e o CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) surgiram na metade da década de 90. A diferença entre o WDM e suas variações (DWDM e CWDM) é a densidade de canais, ou seja, o espaçamento entre os comprimentos de onda que são transmitidos juntos.

A idéia básica de multiplexação é que diferentes tipos de sinais podem ser transportados por um sistema de transmissão ótico, ou seja, é um meio em que é possível transmitir dois ou mais canais de informação simultaneamente [03]. Onde a largura de banda de uma única fibra pode ser dividida em múltiplos canais com frequência ou comprimento de onda não sobrepostos, de modo que cada uma delas funciona como um canal separado de comunicação, onde cada canal WDM pode ser operado, pelo menos a princípio, a “qualquer velocidade”. Por consequência permite a expansão da capacidade dos sistemas óticos sem a necessidade de instalação de novas



fibras.

Figura 2.1 - Princípio do WDM

A tecnologia das redes WDM permite ainda implementar mecanismos óticos de proteção nos equipamentos ou diretamente nas redes da camada de aplicação, oferecendo serviços com alta disponibilidade e efetiva segurança no transporte de informações [04].

Enquanto uma única fibra possui algumas dezenas de terabits por segundo de largura de banda e um canal de comprimento de onda tem mais de um gigabit por segundo de velocidade de transmissão, as redes precisam transportar tráfego a taxas

muito mais baixas que tais capacidades, podendo variar desde de um STS-1 (51.84 Mbps ou menos) até toda a capacidade de um comprimento de onda. Sendo assim, de modo a se reduzir o custo da rede e melhorar seu desempenho, é muito importante que o operador da rede seja capaz de combinar múltiplos tráfegos de baixa velocidade em canais de alta capacidade. Grooming é o termo utilizado para descrever a otimização da utilização da capacidade em sistemas de transporte. [02]

Uma vez que, através do uso da WDM, múltiplos canais de comunicações podem coexistir e operar em uma única fibra, novos desafios (e linhas de investigação) se colocam a nossa frente, tais como definição de novos protocolos e algoritmos de roteamento, bem como aqueles relacionados ao planejamento e projeto de arquiteturas de rede adequadas a essa nova realidade, principalmente em face dos recentes avanços tecnológicos e, até mesmo, daqueles não disponíveis plenamente, mas já previstos para um futuro não muito distante, como a utilização de elementos de rede (roteadores e comutadores) totalmente óticos nas chamadas redes puramente óticas (All-Optical Networks ou Transparent Networks) ou mesmo na presença de apenas alguns elementos com capacidades limitadas de processamento eletro-eletrônico nas redes híbridas (Translucent Networks) [02].

3 Planejamento e projeto de redes óticas

O problema de planejamento e projeto de redes óticas é apresentado em [02] como uma variação do problema em uma rede multifluxo em que cada fluxo de produto passa a ser representar uma conexão para fluxo de dados.

O problema de planejamento de redes óticas é dividido em outros dois subproblemas: o projeto da rede física a ser implementada e o projeto de uma topologia virtual. Porém o subproblema que será detalhado em especial é o projeto de uma rede virtual. Que por sua vez é dividido em quatro subproblemas distintos: determinação da topologia lógica (ou virtual), roteamento de canais lógicos de comunicação (lightpaths), atribuição de comprimentos de onda e, finalmente, roteamento do tráfego.

Os subproblemas do projeto virtual são detalha por [02] como: O subproblema de determinação da topologia lógica (ou virtual) procura estabelecer qual topologia deverá ser imposta sobre a rede física de certa forma independente da topologia desta última, de modo a estabelecer quais serão os canais lógicos de comunicação (lightpaths) em termos dos pontos de oferta e demanda da rede. Já o subproblema de roteamento de canais lógicos de comunicação (lightpaths) busca determinar quais ligações físicas (fibras) serão utilizadas por cada um dos canais lógicos estabelecidos anteriormente, ou melhor, qual a rota seguida por cada canal através da rede física. O subproblema de atribuição de comprimentos de onda, por sua vez, determina qual comprimento de onda é utilizado por cada canal lógico (lightpath) da topologia virtual levando-se em consideração as restrições capacidade e conversões existentes nas ligações físicas (fibras da rede física). Finalmente, o subproblema de roteamento do tráfego cuida da efetiva transmissão dos produtos (dados) entre os pontos de oferta e demanda através da topologia virtual obtida (isto é, definição dos fluxos através das rotas já previamente estabelecidas).

Para solução desses problemas conforme [02] tem sido desenvolvido heurísticas.

4 Problema Traffic Grooming - TGP

A área de Traffic Grooming é formada por um conjunto de problemas por exemplo: planejamento de redes, projeto de topologias (ambos baseados em tráfego estático) e provisionamento dinâmico de circuitos (baseado em tráfego dinâmico). O TGP baseado em tráfego estático é essencialmente um problema de otimização [02].

4.1 TGP nas redes em anel

Uma rede em anel com o padrão de multiplexagem/versão de transporte SONET/SDH, a WDM é utilizada como uma tecnologia de transmissão ponto-a-ponto. Cada comprimento de onda em tal rede SONET+WDM é operado a uma taxa de transmissão de alta capacidade [02].

Em uma rede SONET (ver figura 4.1 (a)) é necessário um ADM (Add-Drop Multiplexers) para cada comprimento de onda em todo elemento da rede para que se realize a inserção/retirada de tráfego naquele comprimento de onda [02]. Mas empregando-se o WDM uma única fibra é possível ter mais de uma centena de comprimento de onda, o que torna custoso instalar a mesma quantidade de ADMs .

Através do uso de componentes óticos (ver figura 4.1 (b)) como multiplexadores óticos de inserção-retirada (Optical Add-Drop Multiplexers - OADM), é possível que um elemento da rede insira e/ou retire apenas aqueles comprimentos de onda que transportam tráfego originado e/ou destinado a ele, fazendo com que a maior parte dos comprimentos de onda siga seu caminho sem interferência [02].

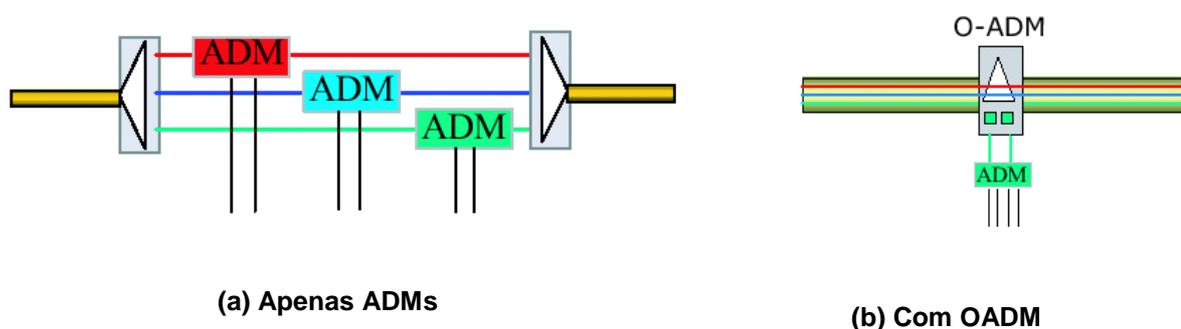


Figura 4.1: Arquitetura de Elementos de Anel SONET+WDM

O custo dos ADMs constitui uma parcela predominante no custo total de uma rede SONET+WDM. Portanto ao planejar a rede deve-se tratar os seguintes problemas para um conjunto de requisições de tráfegos de baixa velocidade é necessário [02]:

- Estabelecer quais e de que forma tais tráfegos devem ser combinados durante seu transporte através da rede;
- Determinar o comprimento de onda deve ser utilizados durante esse transporte, bem como quais comprimentos de onda devem ser inseridos/retirados em cada um dos elementos da rede;
- Determinar quantos ADMs são necessários em cada um dos elementos.

Em uma rede SONET+WDM encontramos problemas de Traffic Grooming: Single-Hop e Multi-Hop são detalhados a seguir.

TGP Single-Hop: para representação do tráfego usa-se uma única matriz estática, que deve satisfazer todas as requisições e minimizar o número total de ADMs. Em sua rede as conexões devem ser combinadas, ou seja, as conexões de baixa velocidade devem ser combinadas com as de alta capacidade. Deve ser considerando também, que o comprimento de onda não pode ser comutado para outros comprimentos de onda. Apresenta taxa de grooming pequena, utilizando quantidades menores de ADMs.

TGP Multi-Hop: sua rede o tráfego pode ser comutado entre diferentes comprimentos de onda, mas o tráfego precisa ser convertido do domínio óptico para eletrônico. Apresenta taxa de grooming alta, quando o número de ADMs é menor.

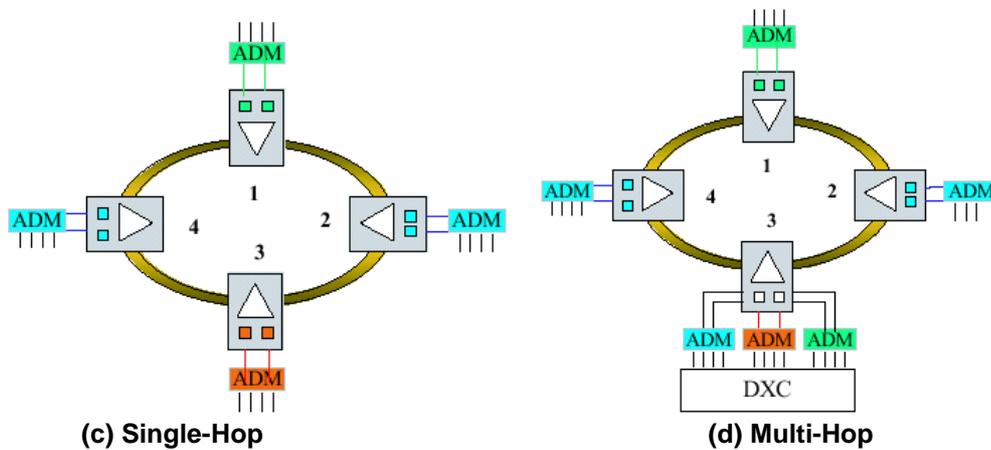


Figura 4.2: Arquitetura Single-Hop x Multi-Hop

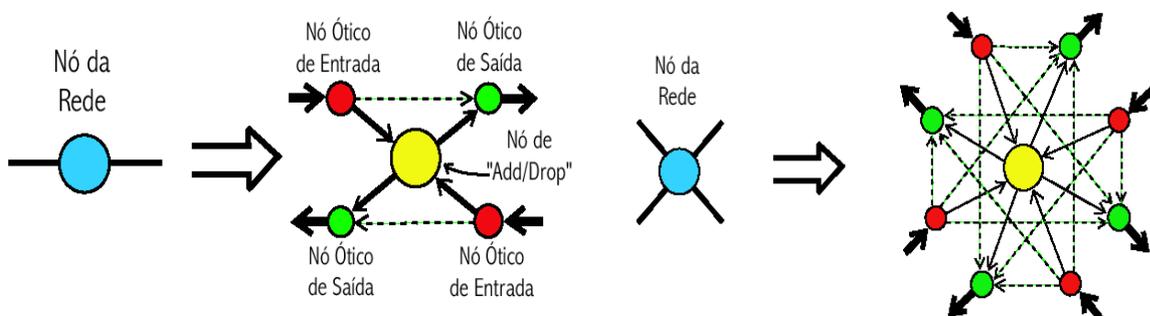
5 Formulação do problema

Para representar a formulação matemática do TGP, será apresentado primeiramente uma representação matemática desenvolvido por Patrocínio em [02]. Esta formulação se baseia em um grafo direcionado. Em seguida serão abordadas anotações que foram utilizadas e a formulação do modelo de programação matemático.

As representações, notações e o modelo de programação matemática e interpretações, foram extraídas de [02]

5.1 Representação Estendida

A disposição dos seus componentes óticos e suas interconexões, podem ser representados por uma grafo não direcionado, $H(V,E)$, $v = |V|$, e $e = |E|$ descrevendo as

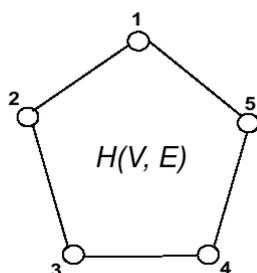


informações básicas, não permitindo representar componentes internos como multiplexadores e comutadores. Então para tal representação, teremos que cada nó da rede será dividido em vários outros, sendo representado por um conjunto de nós e arcos (Ver Figura 5.1(a)).

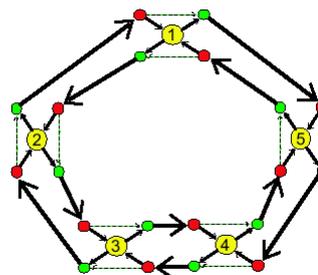
(a) Nó de grau 2

(b) Nó de grau 4

Figura 5.1: Subdivisão de um nó



(a) Topologia



(b) Representação estendida

Figura 5.2: Exemplo de representação estendida

Para cada nó sempre haverá um nó denominado *add/drop* para representar o *add/drop* de cada elemento da rede.

Também existirá para cada porta de E/S de um nó da rede original, um par de nós (um representando a porta de saída e o outro a porta de entrada). Estes nós são denominados nós óticos. Estas conexões são usadas para representar os multiplexadores de *add/drop*, que estão representados na figura 5.1(b) através das linhas cheias saindo ou entrando no nó *add/drop*.

E por último temos os nós óticos de entradas que pertencem ao mesmo elemento da rede e são conectados a todos os nós óticos de saídas na Figura 5.1(b) representados através das linhas pontilhadas.

5.2 Notação matemática

Notação utilizada na formulação matemática:

- N representa o conjunto de nós, particionados em dois subconjuntos disjuntos, $N = N^e \cup N^o$, em que N^e representa o conjunto de nós *add-drop* e N^o representa os números de nós óticos;
- A representa o conjunto de arcos, particionados em dois subconjuntos disjuntos, $A = A^e \cup A^o$, em que A^e representa o conjunto de arcos entre nós *add-drop* e os nós óticos e A^o representa o conjunto de arcos entre os nós óticos.
- C representa o conjunto de *containers virtuais* (ou comprimento de onda), tal que $C = \{1, 2, \dots, W\}$, em W representa o número total de *containers virtuais* (ou comprimentos de ondas) disponíveis;

P representa o conjunto de produtos a serem transportados, tal que $P = \{t_p = (s_p, d_p, f_p, m_p) \mid s_p \in N^e, d_p \in N^e, f_p \in Z_+, m_p \in Z_+, 1 \leq p \leq n_p\}$, em que n_p é o número total de produtos;

s_p representa o nó de origem do produto $t_p \in P$;

d_p representa o nó de destino do produto $t_p \in P$;

f_p representa a quantidade (em número de pacotes) do produto $t_p \in P$ que deve ser transportada de s_p a d_p ;

m_p representa a quantidade máxima (em número de pacotes) do produto $t_p \in P$ que pode ser transportada em um container virtual¹ (ou comprimento de onda);

c_{ijk} representa o custo de utilização do container virtual (ou comprimento de onda) $k \in C$ no arco $(i, j) \in A$.

Além disso, as seguintes variáveis serão utilizadas na formulação do TGP [02]:

f_{ijk}^p representa a quantidade (em canais) do produto $t_p \in P$ que trafega através do arco $(i, j) \in A$ utilizando o container virtual $k \in C$;

w_{ijk} indica o uso do container virtual $k \in C$ no arco $(i, j) \in A$ no transporte de algum produto.

Por fim, a capacidade de um *container virtual* (ou comprimento de onda) será dada por:

$$\Delta = \text{mmc}^2 \{ m_p \mid \forall t_p = (s_p, d_p, f_p, m_p) \in P \}.$$

Ao passo que a contribuição (ou melhor, a ocupação) correspondente a uma unidade de fluxo de um produto transportado em um *container virtual* é representado por:

$$\delta_p = \Delta / m_p, \quad \forall t_p \in P. \quad (5.3)$$

5.3 Formulação do modelo de programação matemática

A formulação de programação matemática, TGP, associada ao problema é dado por:

$$(TGP) \quad \min \sum_{k \in C} \sum_{(i,j) \in A} c_{ijk} w_{ijk} \quad (5.4a)$$

sujeito a:

$$\sum_{k \in C} \sum_{(i,j) \in A} f_{ijk}^p - \sum_{k \in C} \sum_{(j,i) \in A} f_{jik}^p = \begin{cases} f_p, i = s_p \\ -f_p, i = d_p, \forall t_p \in P, \forall i \in N^e \\ 0, i \neq s_p \neq d_p \end{cases} \quad (5.4b)$$

¹ Comprimento de onda, utilizado para transporte de pacotes fim-a-fim na rede.

² Mínimo múltiplo comum.

$$\sum_{(i,j) \in A} f_{ijk}^p - \sum_{(j,i) \in A} f_{jik}^p = 0, \quad \forall t_p \in P, \forall i \in N^o, \forall k \in C \quad (5.4c)$$

$$\sum_{t_p \in P} \delta_p f_{ijk}^p \leq \Delta w_{ijk}, \quad \forall (i,j) \in A, \forall k \in C \quad (5.4d)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} w_{ijk} - \sum_{(j,i) \in A} w_{jik} = 0, \quad \forall i \in N^o, \forall k \in C \quad (5.4e)$$

$$f_{ijk}^p \geq 0, \quad \forall t_p \in P, \forall (i,j) \in A, \forall k \in C \quad (5.4f)$$

$$w_{ijk} \in \{0,1\}, \quad \forall (i,j) \in A, \forall k \in C \quad (5.4g)$$

$$f_{ijk}^p \text{ inteiro}, \quad \forall t_p \in P, \forall (i,j) \in A, \forall k \in C \quad (5.4h)$$

A função objetiva dada por (5.4a) procura minimizar o custo total de utilização/alocação dos “containers virtuais”. As restrições (5.4b) e (5.4c) garantem a conservação de fluxo dos produtos para os nós de *add-drop* e para os nós óticos. Vale ressaltar que nas restrições (5.4b) todo o fluxo que entra ou sai de um nó de *add-drop* (independente do comprimento de onda utilizado para transportá-lo) é considerado nos somatórios, permitindo assim que o fluxo de uma produto, que entre em um nó *add-drop* utilizando um dado comprimento de onda, venha a deixar o mesmo nó através de um outro comprimento de onda. Já o mesmo não se aplica aos nós óticos, uma vez que as restrições (5.4c) são descritas separadamente para cada comprimento de onda $k \in C$.

As restrições (5.4d) impõem um limite sobre o volume total de produtos transportados através de um container virtual no arco $(i,j) \in A$, isto é, um limite sobre a capacidade dos containers virtuais, além de estabelecer uma ligação entre as variáveis de fluxo (f_{ijk}^p) e de decisão (w_{ijk}). Já as restrições (5.4e) garantem a continuidade de comprimento de onda dos lightpaths. Finalmente, as restrições (5.4f), (5.4g) e (5.4h) definem as variáveis de fluxo (f_{ijk}^p) como variáveis inteiras e não negativas, enquanto que as variáveis de decisão são (w_{ijk}) definidas como binárias.

6 O estudo de caso

Esta secção apresentará um estudo de caso, com exemplos de aplicação do modelo de programação matemática, cujo objetivo é destacar a função objetiva de minimizar o custo total de utilização/alocação do *container virtual*, bem como as restrições existentes para o mesmo.

6.1 Cenário encontrado

Para analisar a função foi considerado o seguinte ambiente de análise:

- rede em anel;
- com 4 elementos da figura 6.1(a) uma representação de um anel ótico;
- com continuidade do comprimento de onda;

- e os custo de utilização do *container virtual* dado por $c_{ijk} = 1 \quad \forall (i, j) \in A, \forall k \in C$;

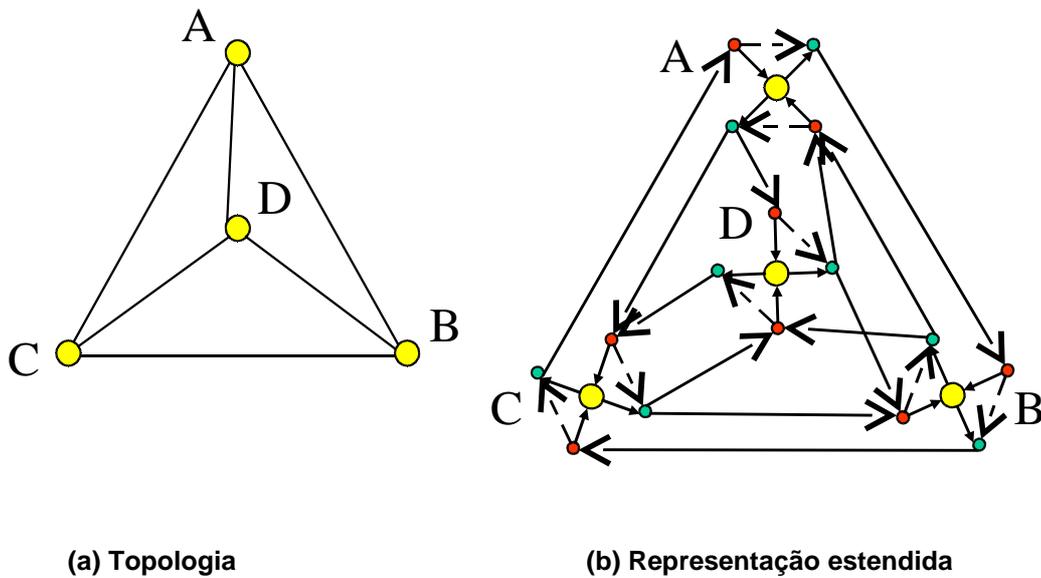


Figura 6.1: Representação de estudo de caso

Considerando que o *container virtual* a ser enviado $cv1$ encontra-se no nó A, e o objetivo é encaminhá-lo para o nó C. Supondo que o f_p (número de pacotes) = 1, e $w_{AC}^{cv1} = 0$. Temos as seguintes situações:

Aplicando a restrição (5.4b) para verificar onde o *container* se encontra:

a) *Container virtual* quando está no nó A:

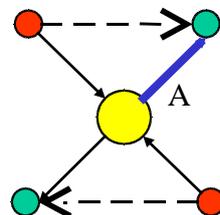


Figura 6.2: Representação $cv1$ em A

O número de pacotes inicial do *container virtual* $cv1$ continua com a mesma quantidade. O fluxo do produto não ocorreu, porque $f_p, i = s_p$

b) *Container virtual* quando está no nó B :

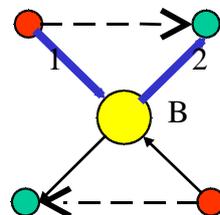


Figura 6.3: Representação $cv1$ em B

O número de pacotes do *container virtual* $cv1$ que caminhou do arco 1 foi o mesmo no arco 2. Resultando em um fluxo do produto igual a zero, pois $i \neq s_p \neq d_p$

c) *Container virtual* quando está no nó C:

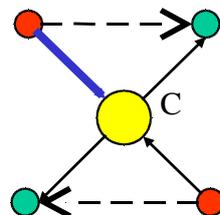


Figura 6.4: Representação cv1 em C

O número de pacotes do *container virtual* cv1 é negativo visto que os pacotes chegaram ao seu destino e foram redistribuídos na rede interna ao nó *add-drop*, não saíram para outro nó. Portanto o fluxo do produto ocorreu em seu destino.

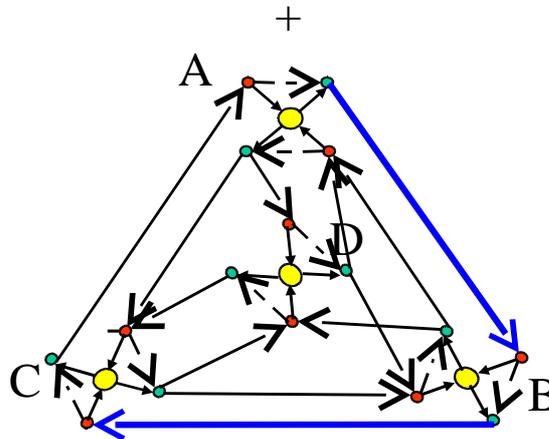


Figura 6.5: Representação cv1 em C

Aplicando a restrição (5.4e) para verificar se o *container virtual* continua no mesmo comprimento de onda dos *lightpaths*:

$$\sum_{(A,B) \in A} w_{ABcv1} - \sum_{(B,C) \in A} w_{CBcv1} = 1 - 1 = 0$$

Aplicando a função para minimizar os custo total de utilização dos *containers virtuais*:

$$\text{Custo total} = (C_{AB cv1} \times W_{AB cv1}) + (C_{BC cv1} \times W_{BC cv1}) = (1 \times 10) + (1 \times 10) = 20$$

Cabe ressaltar que o custo total acima representa uma solução viável. Para obter a solução ótima, ou seja, encontrar o menor número de *containers virtuais* para atender as demandas de tráfego, é necessário solucionar o modelo por completo, lembrando que a solução não é trivial. O modelo é N-difícil conforme [06].

7 Conclusão

Considerando que os avanços tecnológicos estão ocorrendo de maneira cada vez mais rápido, temos que adequar a condições atuais para atender as necessidades conseqüentes a esse progresso. Visto que a tecnologia de redes óticas possui um grande potencial de utilização de sua banda, mas ainda não explorada totalmente. Podemos aplicar juntamente com outros recursos disponível como WDM, que irá permitir melhor aproveitamento da capacidade da banda de uma fibra ótica.

Para o bom planejamento de redes óticas deve-se levar em consideração a minimização dos custos e maximização da utilização da rede ótica. Em relação a esse fato temos problemas que envolvem projeto da rede física e rede virtual, mas com o planejamento é possível contornar esses problemas considerando que a soma dos custos de cada problema deve ser de minimizar.

Para que o planejamento ocorra de forma econômica, é necessário modelos de programação matemática como facilitadores da tomada de decisão. Mas conforme [06] isto não torna a tarefa de planejamento mais fácil uma vez que esse problema de otimização combinatória é NP-difícil e os resultados computacionais têm mostrado que a obtenção de soluções ótimas é computacionalmente cara (e, eventualmente, inviável).

8 Referências Bibliográficas

- [01] TANENBAUM, Andrew S.. **Redes de Computadores**: tradução [3. Ed. Original]. 3 ed. Rio de Janeiro: Campus, 1997.
- [02] PATROCÍNIO, Zenilton Kleber Gonçalves Júnior: **Planejamento de Topologia Virtual com Combinação de Tráfegos em Redes Óticas Multiplexadas por Divisão de Comprimento de Onda**. Belo Horizonte, 2003. Tese (Doutorado, Ciência da Computação) – UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, 2003.
- [03] CAMPOS, André Luiz Gonçalves, Rede Nacional de Ensino e Pesquisa, **Fibras Óticas – uma realidade reconhecida e aprovada**. Disponível em http://www.rnp.br/newsgen/0203/fibras_opticas.html#ng-4-2-3. Acesso em: 15 out. 2005.
- [04] ERRIQUEZ, Paschoal, Coordenador de Soluções Especiais de Acesso da Telemar São Paulo. FREITAS, Carlos Eduardo Almeida, Engenheiro de Soluções de Acesso na Telemar São Paulo. BERNAL, Huber Filho, Gerente de Planejamento de Redes da Pegasus Telecom, Consultor para a Compaq/HP (Sistemas Antifraudes para Celulares) e Coordenador na Atech (Projeto Sivam). **Redes WDM**. Disponível em <<http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialwdm/default.asp>>. Acesso em: 15 out. de 2005.
- [05] GIOZZA, William F., CONFORTI, Evandro, WALDMAN, Hélio. **Fibras Óticas – Tecnologia e Projeto de Sistemas**. Rio de Janeiro: Makron Bokks do Brasil, 1991.
- [06] PATROCÍNIO, Zenilton Kleber Gonçalves Júnior. MATEUS, Geraldo Robson. Capítulo 12: **Planejamento de Redes de Telecomunicação**. PUC - Rio de Janeiro: XI – Escola regional de informática.