

PROJETO DE TOPOLOGIA VIRTUAL – ABORDAGEM PARA ASPECTOS DE PROTEÇÃO

Kelly C. Cruz

UFABC- Universidade Federal do ABC
Santo André, SP, Brasil
kelly.cruz@ufabc.edu.br

Karcius D. R. Assis

UFBA – Universidade Federal da Bahia
Salvador, BA, Brasil
karcius.assis@ufba.br

Helio Waldman

UFABC- Universidade Federal do ABC
Santo André, Brasil
helio.waldman@ufabc.edu.br

RESUMO

Neste trabalho é realizada a proposta de uma heurística para sobrevivência da rede ótica utilizando o problema do Projeto da Topologia Virtual. A heurística baseia-se na formulação de planejamento e aproveitamento de capacidade disponível. São simuladas falhas em cada um dos enlaces virtuais da rede e realizado novo roteamento com mesmo objetivo inicial do projeto. Analisa-se como o tráfego é roteado para os enlaces virtuais onde não ocorreu a falha, após cada situação de falha simples nos demais. Os experimentos computacionais mostram que dependendo da capacidade máxima de canal disponível, o número de enlaces virtuais que necessitam de proteção na camada virtual pode ser diminuído, o que beneficia a relação custo-benefício no planejamento de redes óticas.

PALAVRAS CHAVE. Planejamento de Redes Óticas. Projeto de Topologia Virtual. Proteção e Restauração em Redes Óticas. Outras Aplicações ou Outras Metodologias.

ABSTRACT

In this work, we propose a heuristic for survival of the optical network using the problem of Virtual Topology Design. The heuristic is based on formulation of planning and utilization of available capacity. Faults are simulated in each of the virtual links of the network and rerouting performed with the same initial goal of the project. We analyze how traffic is routed to the virtual links where no failure occurred after each simple fault situation in others. Computational experiments show that depending on the available channel capacity, the number of virtual links that need protection in the virtual layer can be decreased, which benefits the cost-effectiveness in the planning of optical networks.

KEYWORDS. Optical Networks Planning. Virtual Topology Design. Protection and Restoration in Optical Networks. Other applications or other methodologies.

1. Introdução

Cada vez mais se torna importante prover mais capacidade para as redes óticas. Isto se faz devido ao exponencial crescimento de sua demanda frente ao número de usuários da Internet e também, por novas aplicações que necessitam trafegar um maior volume de informações. 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 ótica 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 óticas, possibilitando a transmissão de diversos comprimentos de onda, de forma simultânea, em uma mesma fibra ótica. Desta maneira, com o uso da tecnologia WDM, é possível atender a uma maior demanda de tráfego.

Para o estabelecimento de uma conexão, entre dois nós de uma rede ótica WDM transparente (i.e., sem conversão eletro-ótica em nós intermediários), faz-se necessário configurar os caminhos óticos ou enlaces virtuais 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 (enlaces virtuais) 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 a capacidade aberta ou recursos para demandas futuras, imprevistas, ou para necessidade de reconfigurações, em caso de falha na rede [Gerstel e Ramaswami (2000)]. A determinação dos enlaces virtuais, 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 enlaces virtuais 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)], [Dutta e Rouskas (2000)], [Chlamtac, Ganz, et. al (1992)].

Diante deste crescente volume no tráfego de informações, qualquer interrupção da rede pode prover perda de informações na ordem de Gb/s. Desta forma, para garantir a estabilidade no tráfego das informações, a rede deve prover recursos para sobrevivência após a ocorrência de falhas, deve manter-se operante mesmo após algum desativamento inesperado. Prevenir falhas é um critério importante para planejar de forma eficiente redes WDM transparentes.

Em [Ramamurthy e Mukherjee (1999)] são apresentados aspectos de prevenção de falhas em redes óticas e em [Ramamurthy e Mukherjee (1999')] aspectos de restauração, ou seja, restaurar os serviços da rede após o surgimento de falhas. O primeiro estudo baseia-se em uma formulação de Programação Linear Inteira para definir a capacidade da rede (em termos de comprimentos de onda e enlaces físicos) necessária para proteção de um tráfego estático. O segundo estudo é baseado em tempo de comutação e diferentes protocolos para restauração da rede. Outras abordagens, como a de [Vinh Trong, Jiang, et al (2006)], estudam aspectos de proteção para tráfego dinâmico.

Em [Ergin et al (2009)], algoritmos heurísticos são usados para planejar a topologia virtual com aspectos de proteção em um tempo computacional razoável. Já em [Assi, Huo, et al. (2006)], aspectos de proteção são considerados levando em conta o *grooming* do tráfego.

Diante disso, a solução do VTD deve levar em consideração as características de proteção e reconfiguração para que, por exemplo, a solução do RWA possa aplicar critérios do VTD para definição do tipo de proteção e reconfiguração.

Este artigo está organizado da seguinte forma. Na seção II definimos mais detalhadamente conceitos de topologia virtual e de topologia física em redes óticas. Na seção III apresentamos a heurística proposta. Na seção IV realizamos simulações para uma rede de pequena dimensão (6 nós) e depois para três redes de tamanho moderado (NSFnet, Abilene e Hipotética Brasileira). Finalmente, as considerações finais, na seção V.

2. Topologia Física e Topologia Virtual

Ao projetar uma rede ótica WDM é necessário estabelecer os enlaces virtuais ou caminhos óticos 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 enlaces virtuais, previamente escolhidos, devem ser roteados por uma topologia física e comprimentos de onda devem ser alocados de forma adequada nesses enlaces virtuais. Esse segundo processo deve obedecer às seguintes regras:

- a) dois enlaces virtuais podem compartilhar um mesmo enlace físico, porém, não podem ser associados ao mesmo comprimento de onda;
- b) se conversões de comprimento de onda não forem permitidas, o enlace virtual deve ser associado ao mesmo comprimento de onda em todos os enlaces físicos da rota.

A Fig. 1 ilustra uma arquitetura de uma rede ótica simples, formando uma topologia física com os nós numerados de 1 a 6, interconectados através de enlaces físicos (fibras óticas) bidirecionais e também uma possível topologia virtual.

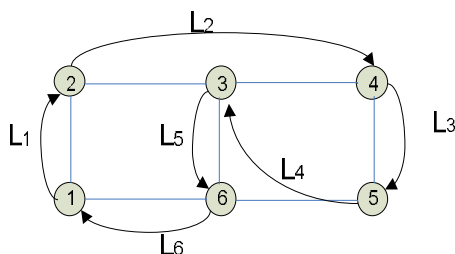


Fig 1. Topologia física e virtual 1

O projeto de topologia virtual envolve a definição dos enlaces virtuais para o encaminhamento dos dados entre um par de nós (fonte e destino), sendo que todos os nós da rede se comunicam através dos enlaces 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 Fig. 1, onde, o nó 3 não tem uma conexão direta (enlace virtual) para o nó 1, então o tráfego originado em 3 terá que passar por dois enlaces virtuais: de 3 para 6 e de 6 para 1 para chegar ao seu destino, o nó 1. Um enlace virtual específico pode ser definido por L_i , onde o índice “i” especifica qual enlace virtual estamos nos referindo.

O grau virtual da rede denota a quantidade de transceptores em cada nó, ou seja, quantos enlaces virtuais são originários ou destino do determinado nó. Para o caso estudado da Fig. 1, o grau virtual é um. Por exemplo, no nó 1 apenas L_1 é originado e L_6 terminado no nó analisado.

Seja $T = (\lambda_{sd})$ 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 . Com base nestes dados, 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 e Sivarajan (1996)]):

$$\text{Min } \lambda_{max}$$

sujeito a:

- cada enlace virtual em G_v corresponde a um caminho ótico e dois caminhos óticos 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.

A solução da formulação acima definirá os elementos de G_v e o tráfego roteado em cada um desses elementos. O número de comprimentos de onda W e, conseqüentemente, o RWA dos elementos de G_v está fora do escopo deste trabalho, pois nosso projeto é apenas da topologia virtual. No entanto, nossa solução pode servir de entrada para o RWA, que pode ser resolvido com uma das estratégias de [Zang, Jue, et. al (2000)].

3. Proteção na Topologia Virtual (PTV)

Devido ao alto volume de informações que podem trafegar pela rede ótica, é importante que a rede tenha características de sobrevivência a falhas, que possa manter-se operante atendendo à mesma demanda, mesmo após alguma interrupção. Existem muitas formas abordadas na literatura para proteção envolvendo a camada física, onde são necessárias alterações estruturais na rede para prover caminhos alternativos para os caminhos de trabalho. Neste trabalho, busca-se uma solução para garantir uma alternativa para sobrevivência da rede, mas sem interferir nos caminhos físicos e virtuais já existentes. Proporcionar proteção apenas com aumento da capacidade dos canais da rede foi a solução apontada. Assim, foi simulada situação de falha em cada um dos enlaces virtuais da rede e realizado novo roteamento do tráfego, utilizando a mesma função objetivo do projeto da Topologia Virtual, sendo neste caso, a formulação tradicional para a minimização do congestionamento. Cada enlace foi analisado frente à falha em todos os demais para que fosse possível verificar quanto de tráfego foi roteado para ele em todos os demais casos de falha. A designação da necessidade ou não de proteção, ocorreu após a análise do maior valor de tráfego designado para o enlace virtual, comparando-o com a capacidade de canal disponível. Assim, caso o enlace virtual tenha capacidade disponível para atender a todo o tráfego roteado para ele para qualquer falha em qualquer um dos demais enlaces virtuais, então podemos dizer que este enlace virtual tem capacidade de sobrevivência para falha simples. A mesma heurística poderia ser aprimorada para o atendimento de falhas múltiplas na rede que não incorressem em uma topologia virtual desconectada, mas o foco neste estudo é para análise exclusiva de falhas simples.

Nesta proposta, o objetivo é o de garantir a rede operante, na ocorrência de falha simples, com investimentos em maior capacidade de canal. A este estudo deu-se o nome de “Local” visto que o foco é a análise para proteção de um enlace frente à falha dos demais.

A heurística é descrita a seguir.

Algumas informações importantes:

- N representa o número de nós da rede;
- C , a capacidade disponível do canal;
- L_i , a matriz dos enlaces virtuais;
- $T[i]$, a matriz de tráfego;
- $M = N \cdot \Delta$ é a quantidade de enlaces virtuais.

Heurística PTV Local

- Passo 1:** Encontrar o valor da função objetivo (Min λ_{\max}), com a formulação MILP, para a matriz de tráfego $T = (\lambda^{sd})$. Criar um vetor G_v dos enlaces virtuais, $G_v = [L_i]$, com i variando de 1 a M ; para os M (onde $M = N \cdot \Delta$ e Δ representa o grau virtual da rede) enlaces virtuais encontrados com a MILP. Inicialmente todos os valores de L_i possuem o valor 1.
- Passo 2:** Criar um vetor C com os valores de capacidade a serem testadas, $C = [C_j]$, para j variando de 1 a K , $C_1 = \lambda_{\max}$ e $C_j < C_{j+1}$.
- Passo 3:** Criar um vetor L variando em i para representar os enlaces virtuais da rede ótica. Sendo que i varia de 1 a $N \cdot \Delta$ (onde Δ representa o grau virtual da rede). Inicialmente todos os valores de L_i possuem o valor 1.
- Passo 4:** Iniciar a análise, com $i=1$.
- Passo 5:** Simular a falha do enlace virtual atribuindo o valor 0 para o enlace virtual posicionado, sendo então, $L_i=0$.
- Passo 6:** Realizar a proposta de [Ramaswami (2006)] com a função objetivo de (Min λ_{\max}), para a formulação MILP e matriz de tráfego $T = (\lambda^{sd})$. Analisar os valores de tráfego distribuídos para os enlaces onde não ocorreu falha. Sugerir uma variável de controle para variação dos enlaces virtuais, w .
Criar uma matriz F_{iw} e armazenar o valor de tráfego para cada um dos enlaces virtuais de 1 a w no caso da falha em i .
- Passo 7:** Re-adicione L_i .
- Passo 8:** Incremente i e retorne para o passo 3 até $i = N \cdot \Delta$. Continue.
- Passo 9:** Atribuir $w=1$.
- Passo 10:** Analisar a matriz F_{iw} . Fixar o valor de w e variar os valores de i de 1 a M . Verificar o maior valor retornado, atribuir a Q e comparar com a capacidade C disponível. Para todo $C_j < Q$ o enlace virtual precisa de proteção, mostre **Sim** na saída. E para todo $C_j \geq Q$ o enlace não precisa de proteção, mostre **Não** na saída. Continue.
- Passo 11:** Incremente w e retorne para o passo 10 até $w = M$. Continue.
- Passo 12:** Fim

4. Resultados Numéricos

Para encontrar os valores de λ_{\max} e aplicar a heurística, utilizamos a formulação linear da seção 3 com o software de otimização CPLEX 10.0 em uma CPU Core 2 Duo de 2.93Ghz. Consideramos uma iteração como a simulação que elimina um enlace virtual da topologia virtual original, $L_i=0$, para algum i , enquanto que todos os outros elementos de G_v permanecem com o valor 1. Evidentemente, a simulação de falha ou desativação de um enlace virtual deve ser feita em pares de nós com grau virtual maior do que 1, ou seja $\Delta \geq 2$, para não provocar desconexão da topologia virtual no caso de ocorrência de falha. Por exemplo, a desativação do enlace virtual 3-6 da Fig. 1 (que tem $\Delta=1$) tornaria a topologia virtual desconectada, pois no nó 3 não sobraria nenhum emissor de dados e no nó 2 não sobraria nenhum receptor de dados. Em todas as simulações deste trabalho consideramos $\Delta=2$.

A. Rede Pequena (6 nós)

Nesta seção aplicamos a heurística PTV Local na rede de 6 nós de [Ramaswami e Sivarajan (1996)], com matriz de tráfego dada pela tabela 2.

Tabela 2: Matriz de Tráfego $T=\lambda^{sd}$ para a rede de 6 nós de [Ramaswami e Sivarajan (1996)]. Assumimos um valor médio em Gbps, [Ramaswami e Sivarajan (1996)].

-	0,537	0,524	0,710	0,803	0,974
0,391	-	0,203	0,234	0,141	0,831
0,06	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	-

Os resultados podem ser vistos na tabela 3, sendo organizados da seguinte forma:

- Na primeira coluna são exibidos os enlaces estudados;
- Nas demais colunas são exibidos os resultados obtidos para as capacidades apresentadas. É analisado se com este valor não é necessária proteção (pois a capacidade sobressalente já figurará este papel) e caso sim, é necessária proteção (a capacidade disponível é menor do que o novo valor do congestionamento).

Tabela 3: Estudo para proteção Local - rede de 6 nós (Rede Pequena)

		Capacidade do canal C_i (Gb/s)				
Iteração	Enlace para proteção	$C_1=2,04$	$C_2=2,42$	$C_3=2,79$	$C_4=3,17$	$C_5=3,55$
		Proteção?	Proteção?	Proteção?	Proteção?	Proteção?
1 ^a	1-3	Não	Não	Não	Não	Não
2 ^a	1-5	Sim	Sim	Sim	Sim	Não
3 ^a	2-1	Não	Não	Não	Não	Não
4 ^a	2-6	Não	Não	Não	Não	Não
5 ^a	3-2	Não	Não	Não	Não	Não
6 ^a	3-4	Não	Não	Não	Não	Não
7 ^a	4-2	Sim	Sim	Não	Não	Não
8 ^a	4-5	Sim	Sim	Não	Não	Não
9 ^a	5-3	Sim	Sim	Sim	Sim	Não
10 ^a	5-6	Sim	Sim	Sim	Sim	Não
11 ^a	6-1	Não	Não	Não	Não	Não
12 ^a	6-4	Sim	Sim	Sim	Sim	Não

Para a rede em perfeito funcionamento, aplicando a formulação MILP, a rede tem um congestionamento de $\lambda_{max} = 2,04$ (que foi o valor inicial selecionado para estudo da capacidade). Portanto, os valores sugeridos para capacidade do canal foram obtidos da seguinte forma: o menor valor é o congestionamento para a rede em perfeito funcionamento (C_1); os valores intermediários são incrementos de capacidade a partir de C_1 . Esses incrementos podem ser por um fator constante ou por um fator variável, dependendo do projetista da rede.

Analisando o enlace “1-3”, é possível notar que todo o tráfego direcionado para ele quando há falha nos demais enlaces, ainda é menor do que o valor de capacidade inicial de 2,04. Desta forma, pode-se dizer que este enlace, com essa capacidade, conseguirá atender à nova demanda e não terá problemas diretos com a falha da rede. O valor “Não” representa que o enlace virtual não precisará de proteção e “Sim”, que precisará.

B. Redes Grandes

Para analisar a proteção na topologia virtual em redes de complexidade moderada; aplicamos a heurística PTV Local para as três redes seguintes:

- NSFnet, (Fig. 2): Rede de 14 nós com matriz de tráfego gerada aleatoriamente e distribuída uniformemente entre 0 e 100.

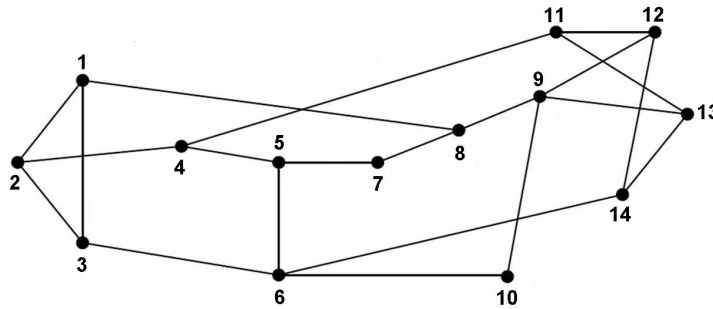


Fig 2. Rede NSFnet

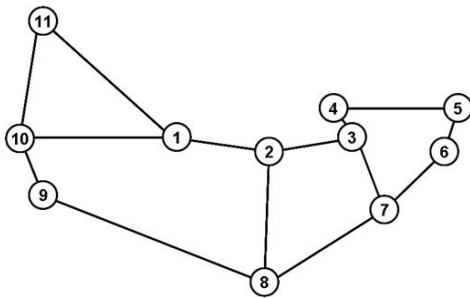


Fig 3. Rede Abilene

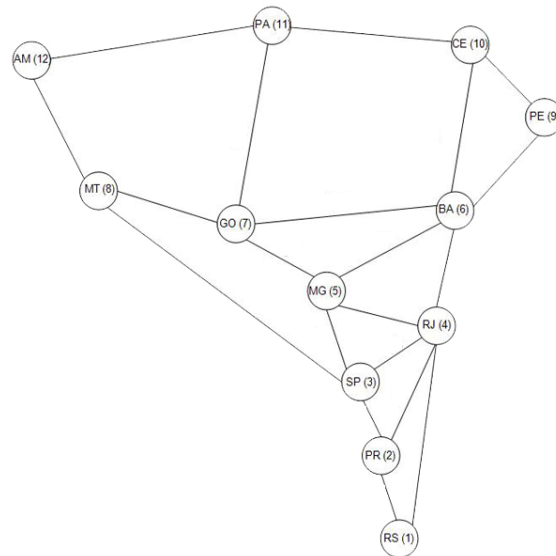


Fig 4. Rede Brasileira

- Abilene, (Fig. 3): Rede de 11 nós com matriz de tráfego gerada aleatoriamente e distribuída uniformemente entre 0 e 100.
- Rede Hipotética Brasileira, (Fig. 4) : Rede de 12 nós com matriz de tráfego simétrica [Assis, Calmon (2001)], baseada na população brasileira.

O problema VTD descrito na seção II é complexo e conhecido como *NP-Complete* [Ramaswami e Sivarajan (1996)], ou seja, o tempo de execução do problema cresce de maneira exponencial quando o número de variáveis aumenta. Logo, a solução através do MILP para encontrar o vetor G_v , não é apropriada para redes grandes. Então, para redes maiores, o problema foi dividido em dois, primeiro G_v foi encontrado com a heurística HLDA - (*Heuristic Logical Design Algorithm*) [Ramaswami e Sivarajan (1996)], por ser tradicional na literatura. Para o caso de redes com topologias virtuais já implantadas, o passo seria apenas de obter o valor de G_v para a estrutura estudada. E o segundo trata do roteamento do tráfego em cada enlace virtual, sendo este realizado através de Programação Linear, pois com os caminhos virtuais já pré-estabelecidos pelo HLDA, a solução apenas de roteamento, é computacionalmente tratável.

Os resultados estão apresentados graficamente, para o aumento da capacidade de canal sugerida, qual é a porcentagem de enlaces que não precisarão necessariamente, de outra forma de proteção?

Na Fig. 5 estão apresentados os resultados para a rede NSFNet, nota-se que a proteção somente é caracterizada com investimentos a partir de aproximadamente 40% em capacidade. Esta foi a rede com valores menos distribuídos em razão do aumento de capacidade proposto.

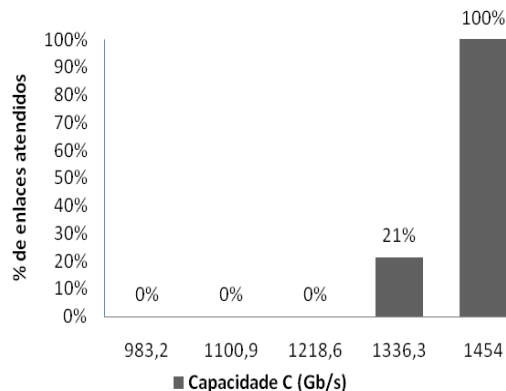


Fig 5. Proteção x Capacidade (NSFnet)

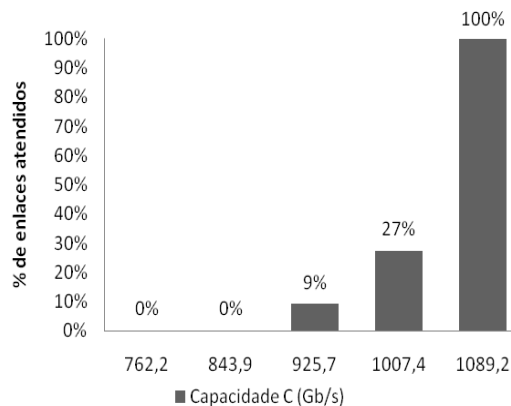


Fig 6. Proteção x Capacidade (Abilene)

Na rede Abilene, apresentada na Fig. 6, para atendimento total de todos os enlaces, o aumento de capacidade é de aproximadamente 45% frente aos 75% da topologia de 6 nós.

Na rede brasileira, Fig. 7, com aumento de aproximadamente 75% na capacidade, chegou-se a um atendimento de 58% dos enlaces virtuais, sendo os 100% alcançados com perto de 140% em aumento de capacidade.

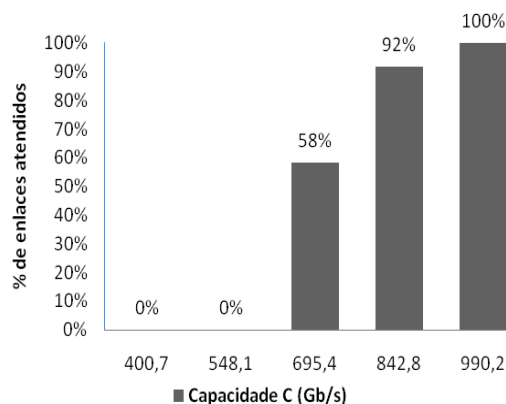


Fig 7. Proteção x Capacidade (Brasileira)

Esta abordagem pode ser utilizada para redes que possuem enlaces altamente críticos que não podem ter problemas de acesso em caso de falhas, pode abordar questões de qualidade de serviço, visto que o objeto de análise é o enlace, buscado mantê-lo com a mesma eficiência de atendimento mesmo no caso de falhas.

Analisando as topologias estudadas, pode-se notar que as características do tráfego irão influenciar no percentual de capacidade que devemos aumentar para garantir a restauração de tráfego em casos de falha simples.

A relação entre o custo da implantação da proteção e do aumento de capacidade do canal deve ser considerada também na fase de planejamento. Um aumento de 80% na capacidade do canal pode ser menos dispendioso do que a alocação de proteção para diversos enlaces virtuais. Cabe ao projetista da rede analisar as especificações de qualidade de serviço e os recursos disponíveis para o projeto da rede.

5. Conclusões

Através da heurística apresentada, foi sugerido que apenas com aumento de capacidade dos canais, é possível abordar aspectos de sobrevivência da rede sem necessidade de alteração em sua estrutura, em sua camada física ou mesmo o projeto da topologia virtual (para redes já existentes), o que determina um investimento menos impactante, o que pode acarretar uma relação custo x benefício interessante para o projetista da rede.

Através da análise do comportamento de um determinado enlace frente à falha dos demais, pode-se obter quanto de tráfego é roteado para este determinado enlace e se, o maior valor é compatível com a capacidade disponível para atendimento deste tráfego. Assim, como os recursos são dimensionados, mas não configurados para determinado caso de falhas e há a necessidade de um roteamento após a falha, consideramos então, a proposta, como uma solução para restauração da rede.

O estudo pode ser uma alternativa exclusiva para garantir a sobrevivência da rede ou mesmo ser aplicada em conjunto com outros tipos de proteção, tal como, na camada física. Fica a critério do projetista da rede conhecendo as especificações de qualidade de serviço, qual melhor opção deve ser aplicada.

Para novos trabalhos, novas estratégias de roteamento de tráfego na camada virtual devem ser estudadas, de forma a serem buscados melhores resultados para a distribuição da carga nos enlaces e assim, obter melhores desempenhos para valores menores de capacidade nos canais.

5. Referências

- Ramaswami, R.** "Optical Networking Technologies: What Worked and What Didn't". IEEE Communications Magazine, pp. 132-139, 2000.
- Gerstel, O.; Ramaswami, R.** "Optical layer survivability: a service perspective". IEEE Communications Magazine, vol. 3, n. 38, pp. 104-113, 2000.
- Ramaswami, R.; Sivarajan, K. N.** "Design of Logical Topologies for Wavelength-Routed All Optical Networks". *IEEE/JSAC*, vol. 14, pp. 840-851, 1996.
- Dutta, R.; Rouskas, G. N.** "A Survey of Virtual Topology Design Algorithms for Wavelength Routed Optical Networks." *Optical Networks*, vol. 1, no. 1, pp. 73-89, January 2000.
- Chlamtac, I. ; Ganz, A.; Karmi, G.** "Lightpath communications: An approach to high bandwidth optical WANS". *IEEE Trans. Commun.*, vol. 40, pp. 1171-1182, 1992.
- Zang, H.; Jue, J. P.; Mukherjee, B.** "A review of routing and wavelength approaches for wavelength-routed optical WDM networks". *Optical Networks*, vol. 1, pp. 47-60, January 2000.
- Ramamurthy, S.; Mukherjee, B.** "Survivable WDM Mesh Networks, Part I -- Protection," *IEEE Infocom '99*, pp. 744-751, March 1999.
- Ramamurthy, S.; Mukherjee, B.** "Survivable WDM Mesh Networks, Part II -- Restoration". *IEEE International Conference on Communications (ICC '99)*, Vancouver, Canada, pp. 2023-2030, June 1999.
- Le, V. T.; Jiang, X.; Ngo, S.; Horiguchi, S.; Inoguchi, Y.** "A novel dynamic survivable routing in WDM optical networks with/without sparse wavelength conversion". *Optical Switching and Networking*, vol. 3, pp. 173-190, 2006.
- Ergin, F.C et al.** "Performance Analysis of Nature Inspired Heuristics for Survivable Virtual Topology Mapping", *GLOBECOM*, 2009.
- Assi, C. ; Huo, W.; Shami, A.** " Multiple link failures survivability of optical networks with traffic grooming capability". *Computer Communications*, vol. 29, pp.3900-3912, 2006.
- Assis, K. D. R.; Calmon, L. C.** " Virtual Topology Design for a Hypothetical Optical Networks". *SPIE - International Society for Optical Engineering*, vol. 4289, pp. 65-73, 2001.