

Formalismo matemático para a restrição fundamental do esquema de proteção compartilhada

Rodrigo C. de Freitas, Etzel C. O. Santos, Daniel A. R. Chaves, Helder A. Pereira, Carmelo J. A. Bastos-Filho e Joaquim F. Martins-Filho

Resumo— Neste artigo é proposto um formalismo matemático para a restrição fundamental do esquema de proteção compartilhada utilizado em redes ópticas. Esta regra determina que se duas rotas de trabalho compartilham pelo menos um enlace, então seus caminhos ópticos de proteção não podem ser compartilhados. O formalismo proposto é baseado na teoria dos conjuntos e poderá auxiliar no desenvolvimento de novos algoritmos que utilizem o referido esquema de sobrevivência. De modo simplificado é possível identificar as relações que violam e as que não violam a regra de restrição, envolvendo os conjuntos de rotas de trabalho e os conjuntos de caminhos ópticos de proteção.

Palavras-Chave— Redes Ópticas, Restrição Fundamental, Proteção Compartilhada, Teoria dos Conjuntos.

Abstract— This paper proposes a mathematical formalism for the fundamental restriction of shared protection scheme used in optical networks. This rule states that if two working routes share at least one link, then their backup lightpaths can not be shared. The proposed formalism is based on the set theory and can assist in the development of new algorithms that use the shared protection scheme. In a simplified manner, it is possible to identify the relationships that do not violate the restriction rule, involving sets of working routes and sets of backup lightpaths.

Keywords— Optical Networks, Fundamental Restriction, Shared Protection, Set Theory.

I. INTRODUÇÃO

Garantir resiliência contra falhas é uma exigência indispensável para as atuais infraestruturas de redes ópticas de alta capacidade. Na ocorrência de uma interrupção, a quantidade de dados convergentes (imagem, áudio e vídeo) perdidos é muito significativa. Uma falha simples pode inviabilizar a comunicação entre muitos usuários e gerar perdas econômicas consideráveis a usuários e provedores de serviços [1], [2].

Um dos principais esquemas que provêm resiliência a uma rede óptica é conhecido na literatura como proteção. Os esquemas de proteção podem ser classificados em: proteção dedicada e proteção compartilhada. No primeiro esquema, os recursos de reserva são usados por somente uma chamada a cada vez, isto é, esses recursos não são compartilhados por qualquer outra chamada. Por outro lado, no segundo esquema

Rodrigo C. de Freitas pertence à Escola Superior de Tecnologia, Universidade do Estado do Amazonas (UEA), Manaus, Amazonas, Brasil, 69050-020, E-mail: rcfreitas@uea.edu.br.

Etzel C. O. Santos, Daniel A. R. Chaves, Helder A. Pereira e Carmelo J. A. Bastos-Filho pertencem à Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco (UPE), Recife, Pernambuco, Brasil, 50720-001, E-mail: es.ppges@ecom.poli.br, {daniel.chaves, helder.pereira, carmelofilho}@poli.br.

Joaquim F. Martins-Filho pertence ao Departamento de Eletrônica e Sistemas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil, 50740-530, E-mails: jfmf@ufpe.br.

de proteção, os recursos de reserva podem proteger diversas chamadas simultaneamente [2].

A proteção compartilhada é considerada uma estratégia eficiente para assegurar a sobrevivência de caminhos ópticos na rede [2]. Esta estratégia possui uma restrição fundamental que determina que se duas rotas de trabalho não são disjuntas entre si, então seus respectivos caminhos ópticos de proteção devem ser disjuntos, obrigatoriamente [3], [4], [5], [6], [7]. Esta restrição garante que qualquer chamada possa ser apropriadamente restaurada na ocorrência de uma falha simples [4]. É importante salientar que neste artigo, o termo **rota** indica somente a combinação de enlaces físicos entre o nó origem e o nó destino da chamada. Já o termo **caminho óptico** indica a combinação de enlaces físicos entre o nó origem e o nó destino da chamada mais a alocação de um comprimento de onda.

A dinâmica da regra de restrição é ilustrada na Figura 1. Dois caminhos ópticos de trabalho são estabelecidos: C_1 na rota de trabalho 1 – 2 e C_2 na rota de trabalho 5 – 6. Observando o estabelecimento das chamadas C_1 e C_2 e seguindo o que define a regra de restrição, tem-se que as referidas chamadas não compartilham as mesmas rotas de trabalho. Deste modo, seus respectivos caminhos ópticos de proteção podem ser os mesmos ou podem compartilhar alguns segmentos. Os caminhos ópticos de proteção de C_1 e C_2 podem ser estabelecidos, respectivamente, nas rotas de proteção 1 – 3 – 4 – 2 e 5 – 3 – 4 – 6 e comprimento de onda de proteção λ_1 . Vale destacar que o segmento de caminho óptico de proteção 3 – 4 é compartilhado por ambas as chamadas, entretanto isso não configura conflito, pois as rotas de trabalho são disjuntas, garantindo 100% de sucesso no restabelecimento da conexão, na ocorrência de uma falha simples.

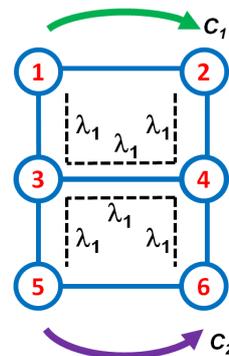


Fig. 1. Regra de restrição em proteção compartilhada.

Por outro lado, na Figura 2 é ilustrado o cenário que, em

função da regra de restrição e para não violá-la, a chamada C_2 fica sem caminho óptico de proteção, levando a uma diminuição da capacidade de sobrevivência da rede óptica. Uma alternativa para resolver este problema é avaliar, previamente, se a chamada C_2 pode ser estabelecida em uma outra rota de trabalho, como ocorre na situação da Figura 1. Para isso, é necessário relacionar todas as possibilidades de conflito entre rotas de trabalho e caminhos ópticos de proteção.

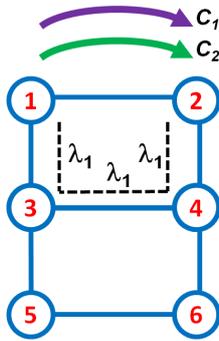


Fig. 2. Devido ao regra de restrição, a chamada C_2 fica sem caminho óptico de proteção.

Neste artigo é proposto pela primeira vez, pelo nosso conhecimento, um formalismo baseado na teoria dos conjuntos que permite identificar todas as relações entre rotas de trabalho e caminhos ópticos de proteção que violam e não violam a regra de restrição do esquema de proteção compartilhada.

O restante do artigo é organizado da seguinte maneira: na Seção II é apresentada uma revisão da literatura acerca de propostas em sobrevivência que utilizam a proteção compartilhada, bem como a restrição fundamental. Na Seção III é descrito e definido o formalismo matemático proposto neste artigo, apresentando suas premissas e relações. Na Seção IV, são relatadas as conclusões sobre a formalização introduzida.

II. REVISÃO DA LITERATURA

Existem alguns trabalhos que tratam do problema de sobrevivência em redes ópticas por meio do esquema de proteção compartilhada. Fumagalli *et al.* [5] introduziram o conceito de diferenciação de confiabilidade ao esquema de proteção compartilhada por caminho. O algoritmo proposto incorpora à restrição fundamental a possibilidade de dois caminhos ópticos de trabalho, que compartilham um mesmo enlace, utilizarem o mesmo caminho óptico de proteção. Neste mesmo artigo, os autores propõem uma definição formal para minimizar o uso de recursos de rede necessários para garantir a sobrevivência de uma conexão.

Guo *et al.* [3] conceberam um algoritmo de sobrevivência contra falhas múltiplas em redes ópticas WDM, baseado no esquema de proteção compartilhada. Uma das características principais dessa solução é o compartilhamento de um mesmo recurso de proteção por chamadas estabelecidas em rotas de trabalho disjuntas, isto é, atender ao critério de restrição fundamental.

Rosa *et al.* [4] exploraram o problema de sobrevivência em redes ópticas WDM propondo dois algoritmos baseados no esquema de proteção compartilhada e que consideram

algumas penalidades da camada física. Estas duas propostas adotam o conceito de melhor esforço, permitindo com que duas chamadas que compartilham o mesmo enlace em suas rotas de trabalho, possam compartilhar o mesmo caminho óptico de proteção.

Shao *et al.* [7] propuseram uma heurística de melhor esforço para encontrar um caminho óptico de proteção dentro de um grupo de risco de enlace compartilhado (shared risk link group - SRLG). Neste mesmo artigo, os autores salientam que é muito complexo ou impossível prover 100% de garantia de proteção considerando a restrição fundamental inerente ao esquema de proteção compartilhada.

Freitas *et al.* [8] propuseram um novo algoritmo de proteção compartilhada para redes ópticas transparentes. Nesta abordagem, são considerados aspectos da camada física e a capacidade de sobrevivência da rede é garantida por um mecanismo de controle da quantidade de vezes que um comprimento de onda é utilizado como recurso de proteção. Esta abordagem também adota a estratégia do melhor esforço.

Existem muitas outras propostas que utilizam o esquema de proteção compartilhada e que, necessariamente, devem definir estratégias para considerar a restrição fundamental, sem que esta impacte na capacidade de sobrevivência da rede. Com o formalismo matemático apresentado neste artigo, tem-se a intenção de apresentar uma metodologia para melhor conduzir este problema e de modo sistemático. Será possível por exemplo, avaliar por meio da teoria dos conjuntos quais rotas de trabalho poderão ser associadas a caminhos ópticos de proteção e vice-versa, evitando possíveis conflitos por recursos extras numa eventual falha da rede óptica.

III. FORMALIZAÇÃO DA REGRA FUNDAMENTAL DO ESQUEMA DE PROTEÇÃO COMPARTILHADA

Como mencionado anteriormente, proteção compartilhada é um esquema eficiente no uso de recursos de uma rede óptica. Entretanto, a restrição fundamental pode levar a uma diminuição da capacidade de sobrevivência da infraestrutura. Portanto, conhecer antecipadamente as possibilidades de conflito entre rotas de trabalho e caminhos ópticos de proteção, pode minimizar essa perda de capacidade.

O formalismo matemático apresentado neste artigo é construído por meio da teoria dos conjuntos e elenca três relações que garantem a não violação da restrição fundamental.

A. Definição dos conjuntos e elementos

Inicialmente, são definidos os conjuntos que representam as rotas de trabalho e os caminhos ópticos de proteção, bem como seus respectivos elementos:

1) Identificação dos conjuntos:

- 1.1 RP_D : coleção de rotas de trabalho disjuntas entre si;
- 1.2 RP_{ND} : coleção de rotas de trabalho não-disjuntas entre si;
- 1.3 RA_D : coleção dos caminhos ópticos de proteção disjuntos entre si;
- 1.4 RA_{ND} : coleção dos caminhos ópticos de proteção não-disjuntos entre si.

2) Identificação dos elementos:

- 2.1 rp_d : elemento pertencente ao conjunto RP_D e representa uma rota de trabalho;
- 2.2 rp_{nd} : elemento pertencente ao conjunto RP_{ND} e representa uma rota de trabalho;
- 2.3 ra_d : elemento pertencente ao conjunto RA_D e representa um caminho óptico de proteção;
- 2.4 ra_{nd} : elemento pertencente ao conjunto RA_{ND} e representa um caminho óptico de proteção.

B. Premissas básicas da restrição fundamental

Do diagrama de Venn, expresso na Figura 3 é possível deduzir três premissas básicas que garantem a não violação da restrição fundamental da proteção compartilhada:

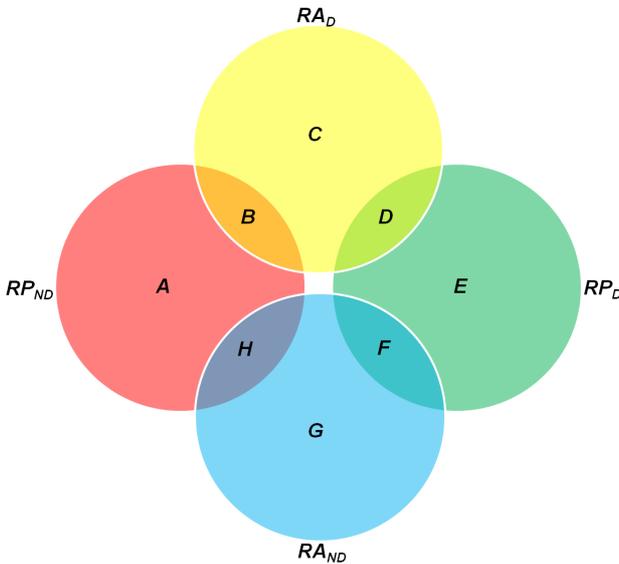


Fig. 3. Diagrama de Venn. Conjunto de possibilidades para satisfação da restrição fundamental do esquema de proteção compartilhada.

- i. Os caminhos ópticos de proteção ra_d pertencentes ao conjunto RA_D podem ser vinculados a rotas de trabalho rp_{nd} pertencentes ao conjunto RP_{ND} , desde que não haja elementos em comum entre esses dois conjuntos. Portanto, $B = RP_{ND} \cap RA_D = \emptyset$;
- ii. Os caminhos ópticos de proteção ra_d pertencentes ao conjunto RA_D podem ser vinculados a rotas de trabalho rp_d pertencentes ao conjunto RP_D , desde que não haja elementos em comum entre esses dois conjuntos. Portanto, $D = RP_D \cap RA_D = \emptyset$;
- iii. Os caminhos ópticos de proteção ra_{nd} pertencentes ao conjunto RA_{ND} podem ser vinculados a rotas de trabalho rp_d pertencentes ao conjunto RP_D , desde que não haja elementos em comum entre esses dois conjuntos. Portanto, $F = RP_D \cap RA_{ND} = \emptyset$.

C. Relações que garantem a não violação da restrição fundamental

A partir das três premissas básicas, são obtidas as três relações que garantem a obediência à restrição fundamental da proteção compartilhada:

- i. Relação $RP_D \times RA_{ND}$: são considerados todos os elementos pertencentes aos conjuntos RP_D e RA_{ND} , à exceção dos elementos pertencentes aos subconjuntos D , F e H . Portanto, os elementos que podem ser relacionados, de modo a não violar a restrição, estão contidos nos subconjuntos E e G . Desta forma, a primeira relação é expressa por: $R_1 = \{RP_D - \{D \cup F\}\} \cup \{RA_{ND} - \{H \cup F\}\} = E \cup G$;
- ii. Relação $RP_D \times RA_D$: são considerados todos os elementos pertencentes aos conjuntos RP_D e RA_D , à exceção dos elementos pertencentes aos subconjuntos B , D e F . Portanto, os elementos que podem ser relacionados, de modo a não violar a restrição, estão contidos nos subconjuntos C e E . Desta forma, a segunda relação é expressa por: $R_2 = \{RP_D - \{F \cup D\}\} \cup \{RA_D - \{B \cup D\}\} = E \cup C$;
- iii. Relação $RP_{ND} \times RA_D$: são considerados todos os elementos pertencentes aos conjuntos RP_{ND} e RA_D , à exceção dos elementos pertencentes aos subconjuntos B , D e H . Portanto, os elementos que podem ser relacionados, de modo a não violar a restrição, estão contidos nos subconjuntos A e C . Desta forma, a terceira relação é expressa por: $R_3 = \{RP_{ND} - \{H \cup B\}\} \cup \{RA_D - \{D \cup B\}\} = A \cup C$;

D. Relações ordinárias

Ainda com relação ao diagrama de Venn (Figura 3), é possível identificar outras informações e relações:

- i. Total de chamadas ativas na rede: $R_4 = RP_D \cup RP_{ND}$;
- ii. Relação $RP_{ND} \times RA_{ND}$: nesta relação não há garantia de atendimento ao critério de restrição, visto que é possível a existência de rotas principais rp_{nd} que compartilham enlaces e cujos respectivos caminhos ópticos de proteção ra_{nd} também compartilhem recursos entre si. Desta forma, a relação é expressa por: $\{RP_{ND} - B\} \cup \{RA_{ND} - F\} \cup H = A \cup G \cup H$, em que $H = RP_{ND} \cap RA_{ND} \neq \emptyset$.

IV. CONCLUSÕES

Neste artigo é proposta uma formalização matemática, por meio da teoria dos conjuntos, para a restrição fundamental inerente ao esquema de proteção compartilhada. A obediência irrestrita a esta regra garante que 100% das chamadas que sofram alguma interrupção oriunda de uma falha sejam restabelecidas. Entretanto, esta restrição pode impactar sensivelmente na capacidade de sobrevivência da rede óptica. Deste modo, por exemplo, relaxar esta restrição de maneira controlada, pode representar uma relação de compromisso vantajosa. Assim, o formalismo apresentado tem o objetivo principal de permitir, de maneira sistemática, a identificação de caminhos ópticos de proteção que possam ser relacionados a rotas de trabalho e vice-versa. Essa informação prévia poderá ser utilizada na concepção de novos algoritmos de proteção compartilhada, garantindo a maximização da capacidade de sobrevivência da rede e minimizando a geração de disputa por recursos em uma eventual falha.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro de FACEPE, FAPEAM, CNPq, CAPES, UFPE, UEA e UPE.

REFERÊNCIAS

- [1] R. Ramaswami, K. N. Sivarajan e G. H. Sasaki, *Optical Networks: A Practical Perspective*, Morgan Kaufmann, 3a. ed., 2010.
- [2] C. Ou e B. Mukherjee, *Survivable Optical WDM Networks*, Springer, Optical Networks Series, 1a. ed., 2005.
- [3] L. Guo, X. Wang, J. Cao e X. Zheng, "Recovery escalation with load balancing and backup resources sharing in survivable WDM optical networks," *Photonic Network Communications*, vol. 18, pp. 393–399, 2009.
- [4] S. R. A. S. Rosa, A. C. Drummond e N. L. S. Fonseca, "Path protection WDM networks with impaired-transmission," *Photonic Network Communications*, vol. 19, pp. 212–222, 2010.
- [5] A. Fumagalli, M. Tacca, F. Unghvary e A. Farago, *Shared path protection with differentiated reliability*, IEEE International Conference on Communications, vol. 4, pp. 2157–2161, 2002.
- [6] X. Shao, L. Zhou, X. Cheng, W. Zheng e Y. Wang, *Best effort shared risk link group SRLG failure protection in WDM networks*, IEEE International Conference on Communications, pp. 5150–5154, 2008.
- [7] X. Shao, Y. Bai, X. Cheng, Y. Yeo, L. Zhou e L. H. Ngoh, "Best Effort SRLG Failure Protection for Optical WDM Networks," *Journal of Optical Communications Network*, vol. 3, pp. 739–749, 2011.
- [8] R. C. Freitas, E. C. O. Santos, D. A. R. Chaves, H. A. Pereira, C. J. A. Bastos-Filho, J. F. Martins-Filho, *A Path Protection Algorithm Based on OSNR for All-Optical Networks with Wavelength Sharing Limitation*, IEEE International Conference on Transparent Optical Networks, vol. 1, pp. 1–4, 2012.