

# Sobrevivência em Redes Ópticas

Helder M. N. da S. Oliveira<sup>1</sup>, Nelson L. S. da Fonseca (orientador)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Computação – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)  
Campinas, SP, Brasil

helder@lrc.ic.unicamp.br, nfonseca@ic.unicamp.br

**Resumo.** Neste artigo, apresentam-se os dois estudos realizados na dissertação de mestrado “Sobrevivência em Redes Ópticas”. O primeiro investiga em qual camada da rede multicamada IP/MPLS sobre OTN sobre WDM, deve-se prover sobrevivência. Resultados indicam que a proteção implementada na camada OTN é mais vantajosa do que a implementada na IP/MPLS ou na camada WDM. O segundo estudo aborda sobrevivência em redes ópticas elásticas. São propostos algoritmos de sobrevivência baseados em *p*-cycles FIPP para uma única falha bem como para duas falhas na rede. Estes algoritmos fornecem 100% de proteção, para redes com alta conectividade.

**Abstract.** In this article, we present two problems investigated in the dissertation “Survivability in Optical Networks”. The first answers the question on which layer of an IP/MPLS over OTN over WDM multilayer network should survivability be provided. Results indicate that protection on the OTN layer is more advantageous than either on the IP / MPLS or WDM layer. The second problem focus on survival in elastic optical networks. Algorithms based on FIPP *p*-cycles for single and two network failures were proposed. These algorithms can provide 100 % protection for networks with high connectivity.

## 1. Introdução

A tecnologia *wavelength-division multiplexing* (WDM) propicia grande capacidade de transmissão para a camada de enlace da Internet, através da multiplexação de vários comprimentos de onda, em uma única fibra. Redes WDM empregam alocação de faixas do espectro fixa por comprimento de onda e faixas menores chamadas banda de guarda para separar dois comprimentos de onda. Dada a enorme capacidade de uma fibra óptica, qualquer interrupção devido à falhas de equipamento ou ruptura de enlace implica em uma enorme perda de dados. Essa vulnerabilidade tem motivado o desenvolvimento de diferentes esquemas de restauração e proteção a falhas em redes ópticas.

Para que possa haver uma maior integração entre a camada IP e a rede óptica subjacente, propôs-se a camada Optical Transport Network (OTN). OTN oferece multiplexação e comutação eficiente de sinais de alta velocidade (cerca de 100 Gbps), bem como define uma camada de invólucro digital, que é vantajoso em relação as redes legadas SONET [G.872 2005]. No entanto, a introdução da camada OTN nas atuais redes IP sobre WDM demanda a superação de uma série de desafios em gerenciamento de redes, especialmente em sobrevivência multicamadas.

Em redes WDM, a capacidade de um comprimento de onda pode acomodar demandas de banda passante de diferentes magnitudes através da técnica de agregação de tráfego, porém estas não evitam à subutilização do espectro uma vez que a demanda total

raramente coincidem com a capacidade exata de um comprimento de onda. Tal rigidez, recentemente, motivou o surgimento das redes ópticas elásticas (ou flexgrid), sendo a Multiplexação por divisão de frequências ortogonais (OFDM) a modulação mais popular nestas redes. OFDM é uma tecnologia de transmissão de multi-portadora que divide canais de alta taxa de dados em um conjunto de canais, chamados subportadoras ortogonais com baixas taxas de transmissão [Shao et al. 2012]. Apesar da existência de inúmeros métodos de proteção em redes WDM, estes não podem ser aplicados para se prover proteção em redes elásticas devido a diferença da granularidade de alocação de spectrum nessas duas redes.

A dissertação [Oliveira 2014] estudou a provisão de proteção nas atuais tecnologias de redes ópticas, introduziu dois esquemas de sobrevivência: um para arquitetura de três camadas, IP/ MPLS sobre OTN sobre WDM e outro para redes ópticas elásticas baseado em *p-Cycle*. O primeiro esquema investiga em qual camada da rede óptica multicamada mecanismo de proteção devem ser implementado. O segundo esquema utiliza *p-cycle* que é uma técnica de proteção utilizada em WDM, porém, cujo o uso para fornecer proteção em redes ópticas elásticas constitui um estudo original sem precedentes. Este artigo apresenta uma amostragem dos resultados numéricos disponíveis em [Oliveira 2014].

## 2. Trabalhos Relacionados

Trabalhos recentes abordam aspectos de introdução da nova tecnologia de camada de transmissão OTN [Ferrant et al. 2010, Wang and Ying 2012]. O trabalho seminal em [Katib and Medhi 2011b] considera a camada OTN em uma arquitetura de três camadas. Os autores introduziram também um modelo de otimização para proteção em rede com as três camadas IP/MPLS sobre OTN sobre WDM [Katib and Medhi 2011a], bem como uma heurística para reduzir a complexidade do problema. Apresentaram, também, um estudo com base na variação de parâmetros de rede para entender o impacto desses na capacidade de proteção e no custo total da rede. No entanto, a questão de em qual nível deve-se implementar o mecanismo de proteção permaneceu em aberto.

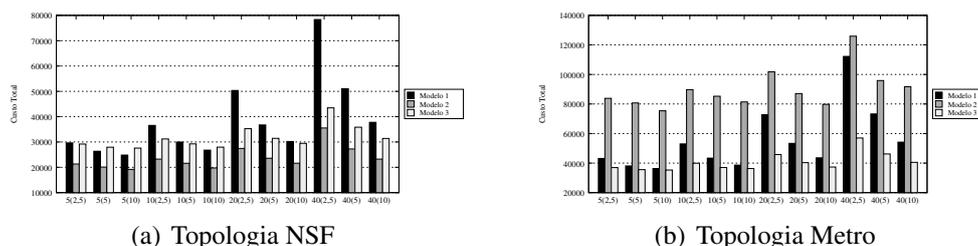
Apesar de terem sido propostos diversos algoritmos de roteamento e alocação de espectro (routing and spectrum allocation - RSA) para redes elásticas, pouca atenção tem sido dada a questão de proteção. Foi proposto em [Pages et al. 2012] um mecanismo que atua nos transponders ociosos no nó de origem de uma requisição de enlace de alta taxa de transmissão para fragmentá-lo em vários de baixa taxa de transmissão, mais facilmente alocáveis na rede. Os autores de [Shao et al. 2012] propuseram políticas conservadoras de proteção em redes ópticas elásticas e os autores em [Patel et al. 2011] propuseram técnica de sobrevivência “transparente”. Em Liu *et al.* [Mukherjee 2006], foi proposto uma nova técnica para a proteção que proporciona aos caminhos ópticos primários compartilhar o espectro de caminhos de *backup* se os caminhos primários forem disjuntos. Nenhum destes trabalhos, no entanto, utilizaram a eficiente técnica de proteção via *p-cycle*.

## 3. Proteção em Redes Ópticas WDM Multicamada

A dissertação [Oliveira 2014] apresenta um esquema para sobrevivência de redes em três camadas, IP/ MPLS sobre OTN sobre WDM, que protege 100% os fluxos em cada camada contra uma falha de enlace. Nesta arquitetura, os equipamentos de alta velocidade na camada IP/MPLS, conhecidos como LSRs (*Label Switching Routers*), estão fisicamente conectados a comutadores ópticos (OXCs). Elaborou-se, na dissertação, um modelo de

capacidade de rede (normal e de proteção) que considera o custo da rede e o grau de proteção em função da inserção dos mecanismos de proteção em diferentes camadas.

Na avaliação da adequação das diferentes camadas para hospedar os mecanismos de proteção, utilizaram-se duas topologias de rede: a topologia NSF com 14 nós e a topologia Metro com 23 nós. O desempenho da rede foi avaliado em função da capacidade normal e de proteção. Para tal, utilizou-se um modelo de programação linear inteira, implementado no software de otimização CPLEX 12.6.



**Figura 1. Custo total dos três modelos para UK-cr3**

A Figura 1(a) mostra uma comparação do custo para os três modelos de proteção investigados para a topologia NSF. O custo total do Modelo 1 (Proteção IP/MPLS) é influenciado tanto pelo IP-custo (custo por Gbps da camada IP) quanto pelo valor de  $M$  (granularidade da camada IP/MPLS). O custo total aumenta aproximadamente 30%, quando o IP-custo dobra e aumenta entre 13% a 50%, quando o valor de  $M$  dobra. O custo total do Modelo 2 (proteção na camada OTN) é menor do que o do Modelo 1, uma vez que o custo do Modelo 2 é pouco influenciado pelos valores de IP-custo e  $M$ . O custo total do Modelo 2 aumenta 18%, quando IP-custo dobra e de 7 a 30 %, quando o valor de  $M$  dobra. O custo total do Modelo 3 (Proteção na camada WDM) é influenciado tanto pelo IP-custo quanto pelo valor de  $M$ . O custo total do Modelo 3 aumenta, em média, 12%, quando se dobra o IP-custo e entre 0,3 e 17% quando os valores de  $M$  dobram. Para um IP-custo fixo, o custo total incrementa em função do valor de  $M$  uma vez que um número mais elevado de maiores demandas podem ser satisfeitas. A Figura 1(b) mostra os resultados para a topologia Metro.

Para ambas as topologias, o Modelo 1 e o Modelo 3 tiveram comportamentos semelhantes. Em geral, observa-se, também, que o custo total é maior. Para ambas as topologias, a capacidade de proteção é aproximadamente o dobro da capacidade normal. O custo de fornecer proteção para as camadas OTN é altamente influenciada pela conectividade da rede. Para redes com baixa conectividade, como a rede NSF, proporcionar proteção da camada OTN é viável. No entanto, para redes com grande conectividade, o custo desse tipo de proteção é muito alto. O custo de proteção da camada OTN é mais vantajoso do que o custo de proteção nas camadas IP/MPLS e WDM.

#### 4. Proteção em Redes Ópticas Elásticas

O problema de roteamento e alocação de espectro (RSA) em redes ópticas elásticas engloba a restrição de continuidade de espectro presente nos problemas de roteamento e alocação de comprimentos de onda (RWA) nas redes WDM. Esta restrição impõe a utilização do mesmo espectro nas fibras ao longo da rota de um caminho óptico, além disso no problema RSA deve-se observar a restrição de contiguidade do espectro que determina que *slots* devem ser alocados de forma contínua no espectro.

O problema de roteamento e alocação de espectro é um problema NP-difícil [Wang et al. 2011] e heurísticas são necessárias para resolver esse problema. Os algoritmos propostos nesta dissertação modelam a disponibilidade de espectro na rede como um multigrafo rotulado. Um multigrafo é um grafo que pode ter várias arestas (também chamadas de “arestas paralelas”), conectando o mesmo par de nós.

O  $p$ -cycle é um esquema de proteção no qual a capacidade reservada é pré-conectada e que forma estruturas em anel para proteção de redes em malha [Asthana et al. 2010]. A diferença fundamental entre  $p$ -cycle e proteção em anel é a proteção de enlaces transzonais, que são enlaces que não estão no anel (ciclo) porém, cujos dois nós finais estão. Um caso especial de  $p$ -cycle para proteção de caminho é o chamado  $p$ -cycle de Proteção de Caminho com Independência de Falha (FIPP).  $p$ -Cycles FIPP fornecem proteção de caminhos para caminhos com nós finais sobre o  $p$ -cycle.

#### Algorithm 1 FIPP-Flex

```

1:  $(W(P_n), P_n) = RSA - Flex(G, s, d, b)$ 
2: if  $W_{s,d} = \infty$  then
3:   block  $r(s, d, b)$ 
4: else
5:   if  $C_{u,v,i} \neq \emptyset \forall i \geq b$  then
6:     establish  $r(s, d, b)$  as  $P_n$ 
7:   else
8:      $(W(P_1), P_1) = RSA - Flex(G, r(s, d, b))$ 
9:      $(W(P_2), P_2) = RSA - Flex(G, r(s, d, b))$ 
10:    if  $W(P_1) = \infty$  or  $W(P_2) = \infty$  then
11:      block  $r(s, d, b)$ 
12:    else
13:      establish  $r(s, d, b)$  as  $P_n$ 
14:      establish  $P_1$  and  $P_2$ 
15:       $\tilde{C}_{u,v,b} = P_1 \oplus P_2$ 
16:    end if
17:  end if
18: end if

```

(a) Algoritmo

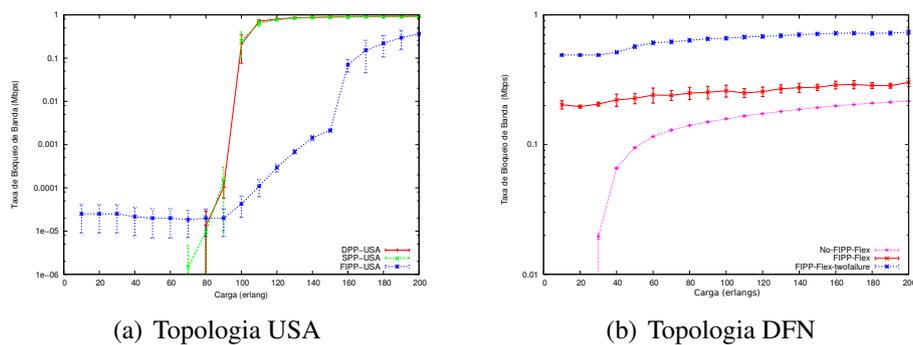
Notação:	Significado:
$s$	o nó fonte
$d$	o nó destino
$b$	a demanda de largura de banda nos {slots}, $b = 1 \dots B$
$r(s, d, b)$	requisição do nó $s$ para o nó $d$ com demanda de largura de banda $b$ em {slots}
$N$	número de {slots} entre dois nós
$G = (V, E, W)$	multigrafo marcado composto por um conjunto de nós $V$ , um conjunto de arestas $E$ e um conjunto de pesos das arestas $W$ , $ E  = N \cdot  V $
$E = \{e_{u,v,n}\}$	conjunto de $n$ arestas
$e_{u,v,n}$	a $n$ -ésima arestas conectando os nós $u$ e $v$
$w(e_{u,v,n})$	o peso das arestas $e_{u,v,n}$
$c(e_{u,v,n}) = 1$	se o $n$ -ésimo {slot} no enlace conectando os nós $u$ e $v$ estão livres e $w(e_{u,v,n}) = \infty$ se o {slot} está alocado
$W = \{w(e_{u,v,n})\}$	conjunto de pesos das arestas
$G_{n,b} = (V, E, C)$	O $n$ -ésimo grafo marcado tal que $E$ é o conjunto de arestas conectando $\{u, v\} \in V$ e $C$ é o conjunto de custos associados a $E$ . As arestas em
$V = V$	conjunto de nós
$\tilde{e}_{u,v} \in E$	arestas conectando $\tilde{u}$ e $\tilde{v}$ ; $\tilde{e}_{u,v} = \{e_{u,v,n}\} \in E$ é uma sequência tal que $e_{u,v,n}$ é a menor aresta ordenada, $e_{u,v,n+b}$ é a maior aresta ordenada e $ \tilde{e}_{u,v}  = b$
$\tilde{w}_n(\tilde{e}_{u,v})$	peso da aresta $\tilde{e}_{u,v}$
$\tilde{W}_n = \{\tilde{c}_n(\tilde{e}_{u,v})\}$	conjunto de pesos de arestas
$P_n$	seqüência de arestas $G_n$ tal que o nó fonte $s$ é
$W(P_n) = \sum_{\tilde{e}_{u,v} \in \tilde{P}_n} \tilde{w}_n(\tilde{e}_{u,v})$	o peso do caminho $P_n$ é a soma dos pesos de todas as arestas na cadeia
$W_{s,d}$	peso do menor caminho entre $s$ e $d$
$C_{u,v,b}$	{ $p$ -cycle} que contém os vértices $u$ e $v$ e arestas correspondentes ao mapeamento de $b$ arestas do
$\tilde{C}_{u,v,b} = \tilde{C}_{u,v,b}$	conjunto de todos os { $p$ -cycles} que contém os vértices $u$ e $v$ e arestas correspondentes ao mapeamento de $b$ arestas do
$\tilde{C}$	conjunto de todos os { $p$ -cycles} estabelecidos
$P_1 \oplus P_2$	concatenação de dois caminhos $P_1$ e $P_2$

(b) Notação

Figura 2. Algoritmo FIPP e Notação

Os algoritmos introduzidos na dissertação chamados FIPP-Flex e FIPP-Flex-twofailure, resolvem o problema de estabelecimento de caminhos ópticos em redes protegidas por  $p$ -cycles FIPP tolerantes respectivamente, a uma e a duas falhas. Nesses algoritmos, caminhos ópticos são estabelecidos se e somente se puderem ser protegidos por um  $p$ -cycle FIPP, que protege somente caminhos primários disjuntos. Requisições para estabelecimento de caminhos ópticos chegam dinamicamente e para cada requisição tenta-se associar um  $p$ -cycle existente para proteger o caminho óptico requisitado. Caso não haja  $p$ -cycle que possa proteger o caminho óptico, então, cria-se um novo  $p$ -cycle para a requisição. Se nenhum caminho for encontrado para proteger o caminho solicitado, então este não é estabelecido. O algoritmo FIPP-Flex garante um caminho de proteção para cada caminho óptico estabelecido e a proteção é garantida para falhas únicas. A Figura 2 descreve o algoritmo. O algoritmo FIPP-Flex-twofailure diferentemente do algoritmo FIPP-Flex garante um caminho de proteção totalmente disjunto do caminho primário, e garante assim proteção para duas falhas simultâneas.

A Figura 3(a) mostra a razão entre banda bloqueada e solicitada (Bandwidth Blocking Ratio, BBR) em função da carga para a topologia USA. As curvas SPP [Patel et al. 2011] e DPP [Shao et al. 2012] mostram resultados de algoritmos de proteção



**Figura 3. Bloqueio de banda em função da carga da rede**

existentes na literatura e a curva FIPP representa o algoritmo FIPP-Flex. As curvas SPP e DPP produzem valores similares de BBR. Observa-se que quando a rede satura a BBR atinge seu valor máximo. O algoritmo FIPP capitaliza na alta conectividade a topologia USA e o BBR aumenta suavemente em função do aumento da carga. Os valores de BBR produzidos pelo FIPP-Flex são menores do que os produzidos pelos algoritmos SPP e DPP após a saturação rede.

A Figura 3(b) apresenta a BBR em função da carga para redes sem proteção (No-FIPP-Flex), com proteção contra uma falha (FIPP-Flex) e com proteção contra duas falhas (FIPP-Flex-twofailure), para a topologia DFN. O valor da BBR para proteção contra duas falhas está em torno de 0,5 devido a exigência de se ter três caminhos disjuncto o que faz com que alguns nós da rede sejam sobrecarregados mais rapidamente enquanto que o valor da BBR gerada para se proteger uma única falha está em torno de 0,3. Observa-se que a partir da carga de 50 *erlangs*, o impacto no BBR para se proteger contra uma única falha é de aproximadamente 0,2, ou seja, bloqueia-se apenas 20 % a mais da banda requisitada do que em uma rede que não provê qualquer proteção de caminho.

## 5. Trabalhos publicados

Os resultados da dissertação [Oliveira 2014] foram relatados nos artigos [Oliveira and da Fonseca 2014b][Oliveira and da Fonseca 2014a], publicados no SBRC 2014 (Qualis B2) e IEEE GLOBECOM 2014 (Qualis A1). Além disso, submeteu-se artigo para a conferencia IEEE GLOBECOM 2015 e encontram-se em elaboração artigos para submissão a periódicos.

## 6. Conclusões

Neste artigo, foram apresentados as contribuições da dissertação [Oliveira 2014]. Investigou-se o esquema de proteção em redes ópticas WDM e proteção em redes ópticas elásticas. Introduziu-se um modelo de projeto de proteção de rede para uma rede de três camadas IP/MPLS sobre OTN sobre WDM. Nesta arquitetura, o projeto de sobrevivência oferece proteção apenas para a capacidade normal de cada camada a fim de minimizar os recursos de proteção. Estudou-se a influência de proteção em cada camada, variando-se diferentes parâmetros. Concluiu-se que é vantajoso proteger a camada intermediária OTN pois minimiza o custo e a capacidade requerida.

Algoritmos para a criação de caminhos ópticos em redes elásticas protegidos por *p-cycles* FIPP para uma falha bem como para falhas duplas foram, também, introduzidos

na dissertação. O algoritmo FIPP-Flex fornece 100 % de proteção para falhas individuais enquanto o algoritmo FIPP-Flex-twofailure provê 100 % de proteção contra duas falhas. As contribuições da dissertação são originais e avançam o estado da arte em sobrevivência de redes ópticas modernas.

## Referências

- Asthana, R., Singh, Y., and Grover, W. (2010). p-cycles: An overview. *IEEE, Communications Surveys Tutorials*, 12(1):97–111.
- Ferrant, J.-L., Garner, G., Mayer, M., Rahn, J., Rodrigues, S., and Ruffini, S. (2010). Otn timing aspects. *Communications Magazine, IEEE*, 48(9):62–69.
- G.872, I.-T. R. (November 2001 (Amendment 1 December 2003, Corrigendum 1 January 2005).). Architecture of optical transport networks.
- Katib, I. and Medhi, D. (2011a). A network protection design model and a study of three-layer networks with ip/mpls, otn, and dwdm. In *Design of Reliable Communication Networks (DRCN), 2011 8th International Workshop on the*, pages 17–24.
- Katib, I. and Medhi, D. (2011b). A study on layer correlation effects through a multilayer network optimization problem. In *Teletraffic Congress (ITC), 2011 23rd International*, pages 31–38.
- Mukherjee, B. (2006). Optical wdm networks. *New York: Springer*.
- Oliveira, H. and da Fonseca, N. (2014a). Algorithm for fipp p-cycle path protection in flexgrid networks. In *Global Communications Conference (GLOBECOM), 2014 IEEE*, pages 1278–1283.
- Oliveira, H. and da Fonseca, N. (2014b). Protection in elastic optical networks against up to two failures based fipp p-cycle. In *Computer Networks and Distributed Systems (SBRC), 2014 Brazilian Symposium on*, pages 369–375.
- Oliveira, H. M. N. S. (2014). Sobrevivencia em redes opticas. Master's thesis, Universidade Estadual de Campinas.
- Pages, A., Perello, J., and Spadaro, S. (2012). Lightpath fragmentation for efficient spectrum utilization in dynamic elastic optical networks. In *Optical Network Design and Modeling (ONDM), 2012 16th International Conference on*, pages 1–6.
- Patel, A., Ji, P., Jue, J., and Wang, T. (2011). Survivable transparent flexible optical wdm (fwdm) networks. In *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC), 2011 and the National Fiber Optic Engineers Conference*, pages 1–3.
- Shao, X., Yeo, Y.-K., Xu, Z., Cheng, X., and Zhou, L. (2012). Shared-path protection in ofdm-based optical networks with elastic bandwidth allocation. In *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC), 2012 and the National Fiber Optic Engineers Conference*, pages 1–3.
- Wang, Q. and Ying, G. (2012). Otn for the future transmission network. In *Photonics and Optoelectronics (SOPO), 2012 Symposium on*, pages 1–4.
- Wang, Y., Cao, X., and Pan, Y. (2011). A study of the routing and spectrum allocation in spectrum-sliced elastic optical path networks. In *Proc of IEEE, INFOCOM 2011*, pages 1503–1511.