



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**PLANEJAMENTO DE REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS VIA
CONSTRUÇÃO DE GRUPOS DE RISCO: GERENCIANDO
FALHAS**

JOÃO MARCOS RAMOS DE ABREU

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Salvador
14 de agosto de 2020

PPGE-Msc-2020

JOÃO MARCOS RAMOS DE ABREU

**PLANEJAMENTO DE REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS VIA
CONSTRUÇÃO DE GRUPOS DE RISCO: GERENCIANDO
FALHAS**

Esta Dissertação de Mestrado foi apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Dr. Karcius Day Rosário de Assis

Salvador
14 de agosto de 2020

A162 Abreu, João Marcos Ramos de.

Planejamento de redes ópticas elásticas via construção de grupos de risco: gerenciando falhas/ João Marcos Ramos de Abreu. – Salvador, 2020.

52 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Karcus Day Rosário de Assis.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, 2020.

1. Rede óptica elástica. 2. Algoritmos. 3. Roteadores (Redes de computadores). 4. Análise de redes (Planejamento). 5. Comunicações ópticas. I. Assis, Karcus Day Rosário de. II. Universidade Federal da Bahia. III. Título.

CDD.: 621.382

João Marcos Ramos de Abreu

"Planejamento de Redes Ópticas Elásticas via Construção de Grupos de Risco: Gerenciando Falhas".

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Bahia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em: 14 de Agosto de 2020.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Karcius Day Rosário Assis
Orientador/UFBA



Prof. Dr. Antônio César de Castro Lima
UFBA



Prof. Dr. José Valentim dos Santos Filho
UFRB

Se podemos sonhar, também podemos tornar nossos sonhos realidade.

—WALT DISNEY

RESUMO

Em Redes Ópticas Elásticas (*Elastic Optical Networks* - EON), a largura de banda de um caminho óptico é variável e a sobreposição da topologia virtual em uma topologia física deve ser projetada para otimizar a utilização do espectro. As EONs, sob o tráfego estático, são tipicamente projetadas através de uma Programação Linear Inteira Mista (*Mixed Integer Linear Programming* - MILP) com o objetivo de minimizar a utilização do espectro.

Nesta dissertação, é proposta uma formulação para proteção em EONs que, baseado no conceito de espremer e arrumar a largura de banda, incluindo grupos de risco compartilhado, retorna com a minimização do máximo número de *slots* usados em qualquer enlace físico da rede. A rota para cada demanda na topologia física é determinada por equações de equilíbrio junto com restrições da camada física na formulação, de modo que não são necessárias rotas pré-calculadas e o formato de modulação de cada percurso óptico estabelecido pode ser escolhido com qualidade de transmissão necessária. Os primeiros resultados avaliam a eficácia da formulação do MILP para uma rede pequena quando as conexões estão sob diferentes requisitos do Acordo de Nível de Serviço (*Service Level Agreement* - SLA) e são provisionadas por uma estratégia de proteção apropriado e diferentes formatos de modulação. Posteriormente, são realizadas simulações em redes reais um pouco maiores, como a Rede Via Network e Rede Nacional de Ensino e Pesquisa (RNP). São realizados estudos de caso para analisar as propriedades básicas da formulação proposta. A variação do fator de compressão (β^{sd}), diferentes tipos de formatos de modulação e grupos de risco são considerados nas simulações.

Palavras-chave: Comunicações Ópticas, Redes Ópticas Elásticas, Roteamento e Alocação de Espectro, Planejamento de Redes, Programação Linear Inteira Mista

ABSTRACT

In Elastic Optical Networks (EON), the bandwidth of an optical path is variable and the overlap of the virtual topology in a physical topology must be designed to optimize the use of the spectrum. EONs, under static traffic, are typically designed using Mixed Integer Linear Programming (MILP) in order to minimize spectrum usage.

In this dissertation, a formulation for protection in EONs is proposed, which, based on the concept of squeezing and fixing the bandwidth, including shared risk groups, returns with the minimization of the maximum number of slots used in any physical link in the network. The route for each demand in the physical topology is determined by equilibrium equations together with restrictions of the physical layer in the formulation, so that pre-calculated routes are not necessary and the modulation format of each established optical path can be chosen with transmission quality needed. The first results evaluate the effectiveness of the MILP formulation for a small network when the connections are under different requirements of the Service Level Agreement (SLA) and are provided by an appropriate protection scheme and different modulation formats. Subsequently, simulations are carried out on slightly larger real networks, such as the Via Network and the National Education and Research Network (RNP). Case studies are carried out to analyze the basic properties of the proposed formulation. The variation of the compression factor (β^{sd}), different types of modulation formats and risk groups are considered in the simulations.

Keywords: Optical Communication, Elastic Optical Networks, Routing and Spectrum Assignment, Network Planning, Mixed-Integer Linear Programming

SUMÁRIO

Capítulo 1—Introdução	3
1.1 Introdução	3
1.2 Trabalhos Relacionados	5
1.3 Contribuições desta Obra	6
1.3.1 Artigos Publicados pelos Autores Durante a Pesquisa	7
Capítulo 2—Redes Ópticas WDM e SLICE	9
2.1 Formatos de Modulação	12
Capítulo 3—Proteção de Redes Ópticas	15
3.1 Proteção SRLG e SRNG	17
3.2 Proteção Comprimida	18
Capítulo 4—Metodologia e Formulação Matemática para Proteção em Redes Ópticas Elásticas	25
4.1 Formulação MILP	25
4.1.1 Notação	25
4.1.2 Parâmetros de Entrada	26
4.1.3 Variáveis	26
4.1.4 Formulação Matemática	27
Capítulo 5—Resultados e Análise de Desempenho	33
5.1 Redes Pequenas	33
5.2 Redes Conhecidas	37
Capítulo 6—Conclusões	47
6.1 Conclusões Finais	47
6.2 Trabalhos Futuros	47

LISTA DE FIGURAS

1.1	Acessos em serviço por tecnologia no Brasil. (Adaptada de (ANATEL, 2019))	4
2.1	Espectro de rede WDM tradicional.	10
2.2	Espectro de rede SLICE tradicional.	11
2.3	Ilustração da restrição de continuidade e contiguidade dos <i>slots</i> de frequência de uma rede.	11
2.4	Alocação de espectro em uma rede SLICE (adaptado de (WANG; CAO; PAN, 2011)).	12
2.5	Diagrama de constelação para 16QAM. Os pontos azuis representam cada um dos 16 símbolos e acima de cada ponto, se encontra a sequência de 4 <i>bits</i> equivalente.	13
3.1	Topologia física com representação de SRLGs.	17
3.2	Exemplo de roteamento do caminho principal e caminho de proteção em uma Topologia de 5 nós sem a utilização de SRNG (a) e com SRNG (b).	19
3.3	A restauração de largura de banda comprimida (Adaptado de (SONE et al., 2011)).	20
3.4	Exemplos de mecanismos de proteção de transmissão de tráfego: (a) Condições normais de transmissão, (b) DPP, (c) Mecanismo de proteção DPP+S com $\beta^{sd} = 0, 5$	22
3.5	Exemplos de mecanismos de proteção de transmissão de tráfego: (a) Mecanismo de proteção PDPP, (b) Mecanismo de proteção PDPP+S com $\alpha^{sd} = 0, 2$ e $\beta^{sd} = 0, 2$	23
5.1	Rede pequena didática com seis nós e onze enlaces.	33
5.2	Roteamento para a demanda 5-2 na rede de 6 nós e 11 enlaces com SRLG1 (a) e sem o SRLG1 (b).	35
5.3	Comparação entre as utilizações da proteção SRLG na rede de 6 nós, sem SRNG.	36
5.4	Comparação entre as utilizações da proteção SRLG e SRNG na rede didática de 6 nós.	37
5.5	Rede Via Network com representação do grupo de risco adotado.	37
5.6	Rede RNP com representação do grupo de risco adotado.	38
5.7	Comparativo das simulações na rede Via Network.	39
5.8	Comparativo das simulações na rede RNP.	40
5.9	Comparativo das simulações na rede Via Network com SRLG 2.	41

5.10	Comparativo do número máximo de <i>slots</i> do espectro utilizado entre a DPP e DPP+S com matrizes de SLAs randômicos na rede Via Network.	44
5.11	Comparativo do número máximo de <i>slots</i> do espectro utilizado entre a DPP e DPP+S com matrizes de SLAs randômicos na RNP.	45

LISTA DE TABELAS

2.1	Formatos de Modulação.	14
5.1	Matriz de tráfego para a rede da Figura 5.1 contendo 6 nós.	34
5.2	Número de <i>slots</i> (C) considerando a variação de NF, SRLG, SRNG e β^{sd} na rede didática de 6 nós.	35
5.3	Número de <i>slots</i> (C) considerando a variação de FM, SRLG e β^{sd} na rede Via Network.	38
5.4	Número de <i>slots</i> (C) considerando a variação de FM, SRLG e β^{sd} na rede RNP.	39
5.5	Largura de banda compactada, β^{sd} , para cada par s-d da rede Via Network e RNP.	42
5.6	Número de <i>slots</i> (C) considerando a variação de FM, SRLG e três β^{sd} aleatórios na rede Via Network.	43
5.7	Número de <i>slots</i> (C) considerando a variação de FM, SRLG e três β^{sd} aleatórios na RNP.	43

LISTA DE ACRÔNIMOS

AMPL	<i>A Mathematical Programming Language</i>
BPSK	<i>Binary Phase-Shift Keying</i>
BSR	<i>Bandwidth Squeezed Restoration</i>
DPP	<i>Dedicated Protection Path</i>
DPP+S	<i>Dedicated Protection Path + Squeezed</i>
EON	<i>Elastic Optical Networks</i>
FGB	<i>Banda de Guarda</i>
MILP	<i>Mixed-Integer Linear Programming</i>
NSFNET	<i>National Science Foundation Network</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing</i>
PDPP	<i>Partition Dedicated Protection Path</i>
PDPP+S	<i>Partition Dedicated Protection Path + Squeezed</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
RMSA	<i>Routing, Modulation and Spectrum Assignment</i>
RNP	<i>Rede Nacional de Ensino e Pesquisa</i>
ROADM	<i>Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer</i>
RSA	<i>Routing and Spectrum Assignment</i>
RWA	<i>Routing and Wavelength Assignment</i>
SLA	<i>Service Level Agreement</i>
SLICE	<i>Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Network</i>
SF	<i>Slot de Frequência</i>
SRG	<i>Shared Risk Group</i>
SRLG	<i>Shared Risk Link Group</i>
SRNG	<i>Shared Risk Node Group</i>
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>
xDSL	<i>Digital Subscriber Line</i>

INTRODUÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

Um sistema de comunicações tem como objetivo transmitir informação de um lugar a outro, não importando de estarem separados por alguns quilômetros ou por oceanos. As redes de fibra óptica se apresentam como umas das soluções mais viáveis para a crescente demanda de largura de banda e altas taxas de transmissão, no Brasil e no mundo (SALEH; SIMMONS, 2011).

No Brasil, a utilização de fibra óptica como tecnologia para acessos de comunicações multimídia está em crescimento. Segundo os dados da ANATEL (ANATEL, 2019), a quantidade de acessos por fibra óptica elevou de 4.551.161 acessos em julho de 2018 para 7.788.733 acessos em julho de 2019. O gráfico exibido na Figura 1.1 expõe os dados ao longo do último ano, fazendo um comparativo com as duas tecnologias mais utilizadas até o momento: *cable modem* e xDSL.

A fibra óptica oferece largura de banda muito maior do que os fios de cobre, sendo menos suscetível a vários tipos de interferências eletromagnéticas e outros efeitos indesejáveis. Isso a torna o meio de transmissão de dados escolhido para qualquer taxa maior que algumas dezenas de megabits por segundo por qualquer distância maior que um quilômetro. É também o meio preferido para pequenas (alguns metros até centenas de metros) interconexões de alta velocidade (Gb/s e além) dentro de sistemas maiores (RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2009).

Os serviços de tecnologia (tais como realidade virtual, rede móvel 5G, serviços de vídeo de alta definição, etc.) têm estimulado o desenvolvimento e a transformação das tecnologias de comunicações ópticas (WU; NING; GUO, 2017), como a baseada na Multiplexação por Divisão de Frequências Ortogonais (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing* - OFDM), conhecida como SLICE (*Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Networks*) (JINNO et al., 2009; WANG; CAO; PAN, 2011) ou EON. A proposta da arquitetura EON é realizar o planejamento da rede para suportar caminhos ópticos de tamanho variável e estudos recentes se redirecionaram para este novo paradigma (MESQUITA; ASSIS, 2019; SANTOS et al., 2019; OLIVEIRA; FONSECA, 2019).

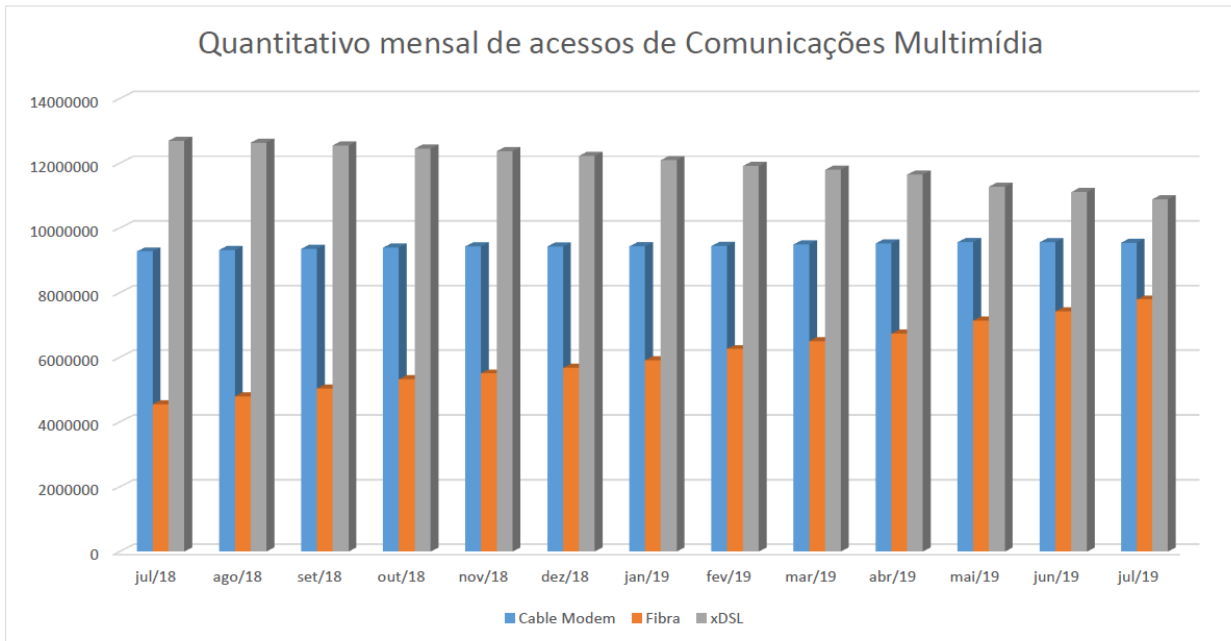


Figura 1.1: Acessos em serviço por tecnologia no Brasil. (Adaptada de (ANATEL, 2019))

Em uma rede de fibra óptica, a capacidade de continuar operando na eventualidade de ocorrência de falhas é conhecida como sobrevivência. A pesquisa realizada nesta dissertação tem como objetivo contribuir com a área de sobrevivência em redes SLICE. Nela é proposta a aplicação de Grupos de Enlaces de Risco Compartilhado (*Shared Risk Link Group* - SRLG) em redes SLICE, que é uma arquitetura de rede mais atual e com muitas vantagens em relação à Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda (*Wavelength Division Multiplexing* - WDM), que são discutidas na Seção 2. Juntamente com a aplicação de grupos de enlace de risco compartilhado, a utilização da proteção comprimida incrementa a pesquisa exibida na Seção 3.2, incluindo os Grupos de Nós de Risco Compartilhado (*Shared Risk Node Group* - SRNG).

Publicações recentes (ZHANG; HUA; ZHANG, 2016; ASSIS et al., 2019; GIRÃO-SILVA et al., 2020) focaram na proteção através de grupos de risco em redes ópticas WDM e proteção comprimida em EONs, mas nenhuma formulação de programação linear completa que aplique a proteção de grupo de risco de enlaces e nós compartilhados na rede SLICE foi proposta na literatura científica. Incrementar a proteção de grupos de risco com proteção comprimida nas EONs também não foi proposto na literatura. Para sanar este problema de proteção, no Capítulo 4 são apresentadas as principais formulações utilizadas bem como breves descrições das restrições contidas. O objetivo é fazer simulações com a formulação em uma rede pequena de 6 nós e duas redes reais de tamanho moderado para minimizar o número máximo de *slots* necessários para rotear o caminho principal e o caminho de proteção. Os resultados são apresentados e discutidos no Capítulo 5 e as conclusões são apresentadas na Seção 6, juntamente com propostas de trabalhos futuros e complementares.

1.2 TRABALHOS RELACIONADOS

O estudo das modernas redes ópticas, especialmente na comunidade brasileira da área, vem de longa data (ASSIS et al., 2005; FIGUEIREDO; XAVIER; FONSECA, 2009; ASSIS et al., 2010). Com o advento das EONs, novos conceitos de roteamento, gerenciamento, agrupamento de tráfego, restauração, proteção, etc. deverão ser contemplados e analisados. A maioria dos trabalhos recentes considera o uso de algoritmos ou técnicas de Programação Linear Inteira Mista (*Mixed Integer Linear Programming* - MILP) com o objetivo de minimizar a utilização do espectro óptico ou número de *slots*.

As EONs vem recebendo o foco das pesquisas, mas este campo não é tão bem explorado como o das redes baseadas em WDM, no que diz respeito à proteção SRLG. A base do funcionamento da proteção SRLG é que a rota principal (de operação) e a rota de proteção (que fica disponível para utilização em caso de falha) sejam disjuntas e não compartilhem o mesmo SRLG em qualquer um dos enlaces. Os autores (LUO; WANG, 2005) conseguiram gerar um algoritmo com complexidade polinomial para calcular as rotas ópticas principal e de proteção. Outro algoritmo muito conhecido na literatura, que tem a capacidade de gerar rotas disjuntas, é o algoritmo de Suurballe (SUURBALLE; TARJAN, 1984). Ele é utilizado para encontrar dois caminhos disjuntos em um grafo direcionado ponderado com custos não negativos, de modo que ambos os caminhos conectem o mesmo par de nós origem-destino e tenham custo combinado mínimo.

Aplicações do SRLG em redes WDM foram feitas em (ZHANG; HUA; ZHANG, 2016), que apresenta dois algoritmos baseados em SRLG para a proteção compartilhada, objetivando reduzir a probabilidade de bloqueio e melhorar o desempenho da rede e também em (DHARANIKOTA; JAIN; XUE, 2001), que estende o conceito de SRLG para nós e domínios, introduzindo o conceito de Grupos de Risco Compartilhado (*Shared Risk Group* - SRG) que pode ser usado para obter uma maior diversidade de proteção em redes ópticas e avaliar os riscos associados a um caminho. No artigo de (SHAO et al., 2008) é apresentado um esquema de proteção de caminho parcial em que os caminhos de backup separados por SRLG podem cobrir apenas parte do caminho de trabalho. Neste, um esquema de proteção que efetivamente soluciona os problemas de interceptações e eficiência de capacidade na proteção tradicional com SRLGs, fazendo um balanço entre probabilidade de bloqueio e capacidade de sobrevivência. (Yang; Mi; Zhang, 2012) apresentou o *Low Cost an S-Disjoint* (LCSD), que é um algoritmo que também tenta encontrar rotas com SRLG disjuntos e com menor custo. Ele garante a separação do SRLG entre os caminhos primário e alternativo para garantir um custo mínimo do caminho primário.

Em (RAK; HEEGAARD; HELVIK, 2020) são apresentados alguns esquemas relevantes de otimização e verificação de suas propriedades para problemas de resiliência em redes ópticas. Dentre esses esquemas e focado no problema atual da resiliência a desastres das redes de comunicação, são apresentados alguns artigos no contexto da detecção de regiões em redes de comunicação vulneráveis a desastres, desenvolvimento de arquiteturas de rede resistentes a ataques, roteamento em uma diversidade geográfica e proteção da rede de entrega de conteúdo contra ataques de corte de links. Além de focar também na resiliência das redes a falhas duplas, proteção do tráfego em redes com capacidade de link variável e provisionamento robusto da função de rede virtual sob falhas aleatórias.

Na literatura são encontradas ainda falhas geograficamente correlacionadas por SRLGs. Em (GIRÃO-SILVA et al., 2020) é mostrado que o número de SRLGs que cobrem as possíveis falhas de uma região circular com um raio conhecido é proporcional ao número de nós na rede. Nos casos em que não é possível encontrar caminhos totalmente separados por SRLG, pode-se tentar encontrar caminhos maximamente separados por SRLG. O somatório da minimização do comprimento entre os pares origem e destino é calculado para cada demanda com ou sem restrições do SRLG. Essa comparação permite apreender a relevância dos SRLGs do ponto de vista topológico.

Os autores de (SONE et al., 2011) introduziram o conceito de Restauração com Largura de Banda Espremida (*Bandwidth Squeezed Restoration* - BSR), onde é possível atribuir aos caminhos ópticos atingidos por uma falha, uma "largura de banda" mais estreita do que a sua largura de banda original (ou seja, aquela antes do instante da falha). Consequentemente, mais caminhos ópticos podem ser restaurados ou, equivalentemente, necessita-se de menos espectro para restaurar o tráfego da rede. A largura de banda pós falha para cada caminho óptico é determinada por um Acordo de Nível de Serviço (*Service Level Agreement* - SLA) realizado entre o cliente e a gerência da rede óptica. Note que, os termos restauração espremida e proteção parcial foram originalmente usados, respectivamente, para mecanismos de restauração e proteção. Por tratarmos de mecanismos de proteção nesta dissertação, preferimos usar o termo proteção comprimida.

1.3 CONTRIBUIÇÕES DESTA OBRA

Este trabalho introduz uma estratégia, através de MILP, de proteção para as EONs que, mediante um modelo adequado de roteamento e a possibilidade de espremer o tráfego durante a proteção, permite também que o espectro óptico necessário para o provimento da proteção dos caminhos ópticos seja inferior àquele utilizado pela proteção dedicada. Diferentemente de (ASSIS et al., 2019), a estratégia proposta considera o BSR simultaneamente com grupos de riscos (que podem ser enlaces ou nós) para deixar a proteção mais eficiente.

Para o roteamento eficiente do tráfego na rede, é proposto uma formulação matemática baseada em Programação Linear Inteira Mista de forma que uma fração do tráfego espremido seja garantida no evento de falhas, obedecendo as restrições de grupos de risco e tentando minimizar o espectro utilizado.

A maior parte dos trabalhos apresentados na Seção 1.2 trata apenas de soluções para proteger redes WDM aplicando o SRLG. Os autores de (SONE et al., 2011) e (ASSIS et al., 2019) apresentam soluções para o problema de Roteamento e Alocação de Espectros (*Routing and Spectrum Allocation* - RSA) aplicando a proteção comprimida para uma falha qualquer. Nenhum modelo de MILP para resolver o RSA com proteção comprimida juntamente com a aplicação de SRLG na camada física foi proposto. Para contribuir com a pesquisa neste campo, no Capítulo 4, é proposta uma formulação de MILP para sanar este problema de forma otimizada, sem a necessidade de heurísticas. Além do modelo de MILP para resolução do RSA no aplicativo de simulações AMPL / IBM ILOG CPLEX v.12.2 (ILOG, Inc, 2019), nenhum estudo foi feito considerando a possibilidade de ocorrência de duas falhas simultâneas em determinado roteamento. Esse

estudo é importante, pois existe a possibilidade de ocorrência de falhas simultâneas em qualquer rede óptica. Em resumo, este trabalho visa fornecer métodos para a proteção de redes ópticas elásticas a partir de simulações que fornecem as melhores condições de roteamento, cujo objetivo é sempre reduzir a quantidade de *slots* utilizados.

1.3.1 Artigos Publicados pelos Autores Durante a Pesquisa

Abreu, J. M. R., & Assis, K.D.R. (2020). Planejamento de Redes Ópticas Elásticas via Construção de Grupos de Risco: Gerenciando Falhas. 1-12. WGRS - SBRC.

REDES ÓPTICAS WDM E SLICE

Na história da utilização de redes ópticas, a tecnologia WDM buscou a ampliação da capacidade de transmissão de dados na fibra óptica utilizando do roteamento por multiplexação por comprimento de onda, onde passou-se a ter redes com capacidade de manipulação dos canais. As redes ópticas WDM adotam uma alocação de frequência de tamanho fixo (capacidade) por comprimento de onda. Para estabelecer uma conexão entre dois nós de uma rede óptica WDM, é necessário definir os caminhos ópticos que o tráfego será encaminhado e alocar os recursos necessários, chamado de Roteamento e Alocação de Comprimentos de Onda (*Routing and Wavelength Assignment* - RWA) (RAMAMURTHY; SAHASRABUDDHE; MUKHERJEE, 2003; MUKHERJEE, 2006).

A atribuição de frequências de tamanho fixo em uma rede WDM tem desvantagens, principalmente em relação a pouca flexibilidade. Logo, novas estratégias para o planejamento de redes ópticas estão sendo estudadas. Uma destas propõe um método mais flexível de alocação de espectro para redes ópticas. O método mostra que uma alocação de espectro, com espaçamentos diferentes entre os canais, é mais eficiente que o método tradicional. Esta nova proposta, que é baseada no sistema de transmissão OFDM, é conhecida como SLICE ou EON. A proposta da arquitetura EON é realizar o planejamento da rede para suportar caminhos ópticos de tamanho variável. Logo, os estudos se redirecionaram para este novo paradigma (MESQUITA; ASSIS, 2019; SANTOS et al., 2019; OLIVEIRA; FONSECA, 2019). Similar ao problema de roteamento e alocação de comprimentos de onda em redes WDM, na rede SLICE existe o problema de Roteamento e Alocação de Espectros (*Routing and Spectrum Allocation* - RSA) (WANG; CAO; PAN, 2011; KLINKOWSKI; WALKOWIAK, 2011).

As redes ópticas WDM utilizam uma alocação de frequência de tamanho fixo por comprimento de onda. Essa tecnologia possibilitou que várias informações distintas pudessem ser transmitidas ao longo de uma única fibra óptica, cada uma em um comprimento de onda distinto. Contudo, uma de suas grandes desvantagens é o desperdício de parte da banda quando, por exemplo, a demanda de tráfego é menor do que a capacidade de um comprimento de onda, resultando em alocar um determinado comprimento de onda grande para acomodar uma pequena demanda. Além disso, quando uma demanda

de tráfego requer múltiplos comprimentos de onda, não é possível eliminar a lacuna espectral (ou seja, as frequências de banda de guarda, nomeado de FGB, para facilitar a filtragem) entre dois comprimentos de onda (SANTOS et al., 2012).

A Figura 2.1, por exemplo, mostra alocação de canais WDM, espaçados uniformemente, e com capacidade de até 40 GHz de espectro disponível para cada canal. Supondo que necessitamos alocar 50 GHz, como cada canal suporta 40 GHz temos a seguinte situação: o canal 1 ocupa de 0 a 40 GHz, e o canal 2 ocupa de 65 GHz a 75 GHz. Observe que há 25 GHz de espectro não utilizado entre o canal 1 e o canal 2, o mesmo ocorrendo entre os canais 2 e 3. Isto acontece porque foi alocado apenas 10 GHz no canal 2, restando 30 GHz de espectro não utilizado. Logo, temos 15 GHz de espectro não utilizado mais 10 GHz de banda de guarda (FGB) entre os canais 1 e 2, totalizando 25 GHz, sendo que o mesmo ocorre entre os canais 2 e 3.

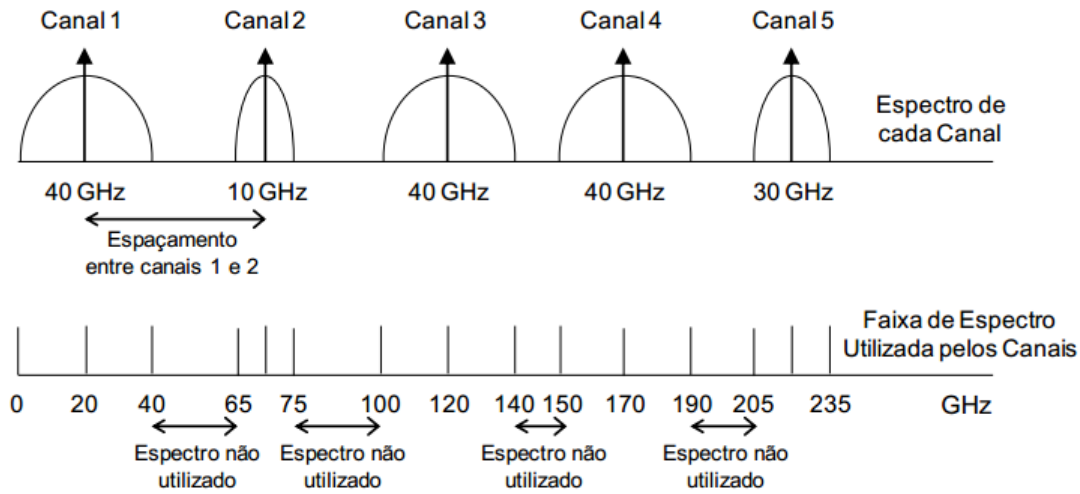


Figura 2.1: Espectro de rede WDM tradicional.

Logo, um planejamento, com capacidade pré-fixada para os canais, pode desperdiçar uma quantidade razoável de espectro. Ou seja, o planejamento tradicional (considerando a situação hipotética acima) é feito para caminhos ópticos de tamanho fixo, no caso 40 GHz.

Conforme explicitado anteriormente, a proposta da arquitetura SLICE é realizar o planejamento da rede para suportar caminhos ópticos de tamanho variável. A Figura 2.2 apresenta a alocação de espectro realizada na Figura 2.1 utilizando SLICE. O FGB também foi considerado como 10 GHz e o espectro total utilizado foi de 190 GHz, contra 235 GHz da Figura 2.1. Isto ocorre porque podemos alocar de forma otimizada o espectro.

Em (WANG; CAO; PAN, 2011), os autores afirmam que o RSA é diferente e desafiador. Isso ocorre porque a subportadora alocada deve respeitar a restrição de continuidade (Figura 2.3), que requer que cada demanda tenha a mesma alocação de *slots* de espectro ao longo de seu caminho, ou seja, tem a mesma localização em cada um dos enlaces usados em seu caminho.

Também deve acatar a restrição da contiguidade (Figura 2.3), ou seja, as sub-portadoras de um mesmo caminho óptico de tamanho variável (conjunto de subportadoras) devem

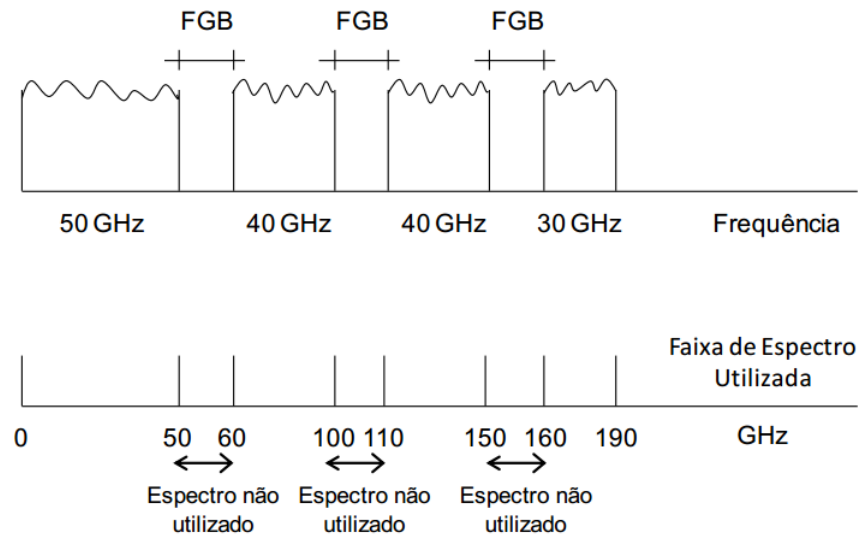


Figura 2.2: Espectro de rede SLICE tradicional.

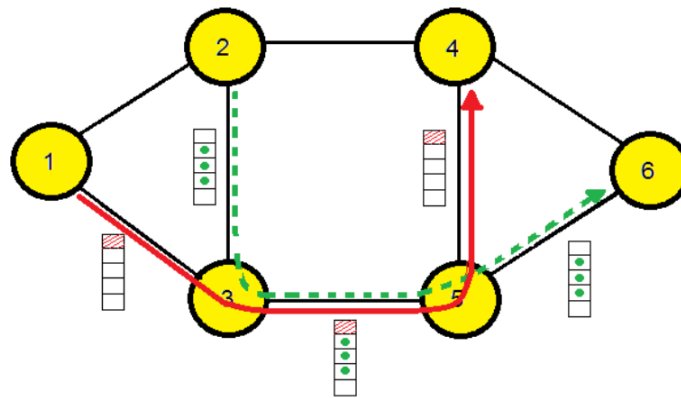


Figura 2.3: Ilustração da restrição de continuidade e contiguidade dos *slots* de frequência de uma rede.

ser consecutivas.

Além disso, respeitar a restrição de espectro não sobreposta requer que para demandas compartilhando um mesmo enlace, um *slot* de espectro só possa ser alocado para uma única demanda a fim de evitar interferência. E por fim, submeter-se a restrição da banda de guarda (Figura 2.4), que exige que para as demandas compartilharem um mesmo enlace, a alocação de espectro dessas demandas tem que ser separada por um número de *slots*.

O problema RSA pode ser classificado em estático (*offline*) ou dinâmico (*online*). No RSA estático, as requisições são conhecidas de imediato, e posteriormente, o problema a ser resolvido resume-se a definir por onde encaminhar as demandas, ou seja, qual a rota deverá ser utilizada para cada requisição. Nesse caso, pode-se ter como objetivo reduzir a quantidade de *slots* necessários para atender as demandas. No segundo, as conexões e o tráfego não são previamente conhecidos e o objetivo é reduzir a probabilidade de bloqueio

das futuras requisições. Nessa dissertação abordamos o roteamento estático, pois temos o intuito de estudar os melhores caminhos e a melhor estratégia para utilizar os espectros apropriados. Depois de estabelecer o roteamento, o tráfego da rede será encaminhado através dele. Esses caminhos ópticos são denominados permanentes, pois não são removidos após a ativação, podendo durar meses ou anos, a depender da necessidade do projeto da rede. Geralmente, alocam-se os espectros, de forma estática, para transmitir informações que requerem caminhos e tráfego de dados dedicados, como aplicações de vídeo e áudio (SANTOS, 2015).

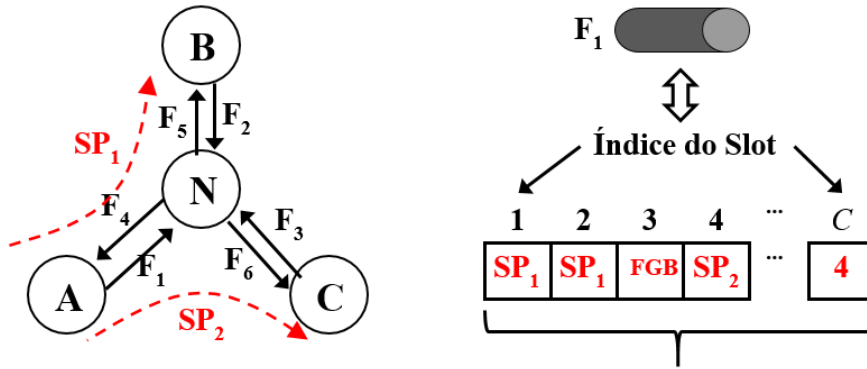


Figura 2.4: Alocação de espectro em uma rede SLICE (adaptado de (WANG; CAO; PAN, 2011)).

2.1 FORMATOS DE MODULAÇÃO

As redes SLICE empregam transmissores flexíveis com suporte para diferentes níveis de modulação (ZHAO et al., 2014), onde o número de *bits* por símbolo pode ser determinado por formatos de modulação como *Binary Phase-Shift Keying* (BPSK), *Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK) ou *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM).

Esquemas de modulação como BPSK, QPSK e QAM representam uma sequência de *m bits* como um símbolo codificado em forma de um segmento senoidal. Esses símbolos são diferenciados pela amplitude e/ou fase. A Figura 2.5 mostra uma constelação 16QAM. O formato de modulação QAM usa 16 símbolos, ilustrados na constelação por 16 pontos (Q, I). Cada ponto define um fasor que é usado para representar a sequência de $\log_2 16 = 4$ *bits* que é transmitida como um segmento de senoide com mesmo ângulo e amplitude do fasor.

16QAM usa 16 símbolos. Já o 8QAM usa 8 símbolos. O número de *bits* transmitidos por símbolo é igual a $\log_2 M$, onde M é o número de símbolos, geralmente indicado no prefixo da nomenclatura do formato de modulação. QAM diferencia seus símbolos usando fasores com diferentes ângulos e amplitudes. QPSK é análogo, mas a amplitude é sempre constante e os símbolos são diferenciados apenas pelo ângulo. Já o BPSK usa apenas dois fasores possíveis para representar os seus símbolos.

Redes ópticas baseadas em OFDM, tais como as redes SLICE, possuem uma divisão mais granular de seu espectro de frequência, implicando em um maior número de sub-

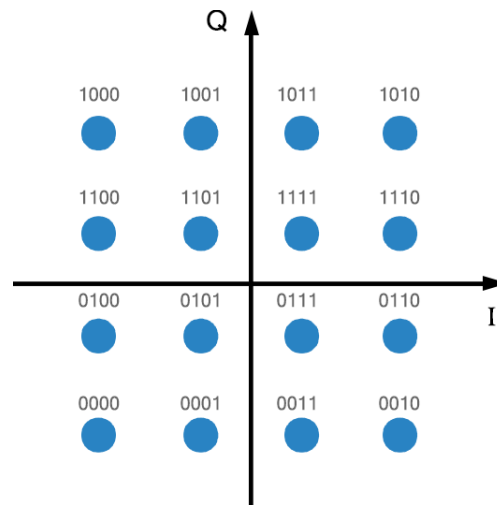


Figura 2.5: Diagrama de constelação para 16QAM. Os pontos azuis representam cada um dos 16 símbolos e acima de cada ponto, se encontra a sequência de 4 *bits* equivalente.

portadoras de frequência, comumente chamados de *slots* de frequência (SF). A banda selecionada para cada subportadora pode ser tão pequena quanto 12.5 GHz (CHRISTODOULOPOULOS; TOMKOS; VARVARIGOS, 2011), em comparação com redes baseadas em WDM, cuja banda fixa de frequência por portadora costuma ser 50 GHz nos padrões mais recentes como o da ITU-T (JONCIC; HAUPT; FISCHER, 2012). Essa é uma grande vantagem para lidar com diferentes demandas de tráfego pois reduz os desperdícios com banda não utilizada na faixa da subportadora, aumentando a eficiência espectral da rede (DJORDJEVIC; VASIC, 2006).

A possibilidade de usar transmissores / receptores adaptáveis que permitem usar múltiplos formatos de modulação, espectros de largura de banda e taxas de transmissão, dá às redes SLICEs uma maior eficiência espectral (JINNO et al., 2010; ZHAO et al., 2014), tornando-as a melhor opção, no momento, para atender a crescente demanda por transmissão de dados. Se mais de um nível de modulação pode ser usado, então também terá que ser decidido qual a melhor opção, considerando a banda consumida e o alcance de transferência de cada formato de modulação. Essas considerações tornam o processamento mais complexo e caracterizam o problema conhecido como Roteamento, Modulação e Alocação de Espectro (Routing Modulation and Spectrum Assignment - RMSA).

Existem outras regras que devem ser obedecidas, para evitar sobreposição de espectros referentes a diferentes conexões, manter a conservação de fluxo de dados, respeitar os limites de capacidade da fibra, entre outros, que estão implícitos no problema e que devem ser considerados nos algoritmos de resolução do RMSA.

Simulações considerando formatos de modulações com os ROADMs disponíveis no mercado, assim como os *transceivers* adaptáveis, permitem a escolha do número de bits por símbolo para processamento no *transponder* (CHRISTODOULOPOULOS; TOMKOS; VARVARIGOS, 2011) e isso é considerado durante o RMSA. A escolha de formatos de modulação torna a tarefa mais complexa já que os formatos de modulação

mais eficientes possuem menor alcance de transmissão. A Tabela 2.1 mostra os formatos de modulação que foram julgados realistas e os valores da tabela estão de acordo com publicações recentes (OLIVEIRA; FONSECA, 2017; JAYA; GOPINATHAN; RAJENDRAN, 2016). O valor de banda espectral por subportadora é de 12,5 GHz, que é o valor adotado pelos ROADMs com tecnologia *flexible-grid* (ROSÁRIO, 2014) seguindo convenções já estabelecidas (REIXATS, 2014).

Tabela 2.1: Formatos de Modulação.

Formato de Modulação	Taxa de Símbolo	Taxa de Distância Máxima(km)	Eficiência Espectral (bit/s/Hz)	Banda por Sub-portadora (GHz)
16QAM	1/4	500	4	12,5
8QAM	1/3	1000	3	12,5
QPSK	1/2	2000	2	12,5
PSK	1	4000	1	12,5

PROTEÇÃO DE REDES ÓPTICAS

As redes ópticas elásticas permitem transportar um alto volume de informação. Em muitas aplicações, essas redes são utilizadas 24 horas por dia, demandando de uma alta disponibilidade. A ocorrência de uma falha pode provocar perda de inúmeras informações e a parada de serviços críticos, deixando de promover a ininterrupta disponibilidade cada vez mais procurada nos dias atuais.

Segundo (GERSTEL; RAMASWAMI, 2000), em média, a ruptura de cabos ópticas ocorre entre 4 e 7 vezes ao ano por cada 1600 Km de extensão e o tempo médio de recuperação destas falhas é de 12 horas. E conforme mencionado em (BHATTACHARYYA et al., 2003), 20% de todas as falhas de nós e links de redes são devidas às atividades de manutenção decorrentes das tarefas agendadas, bem como implícitas por falhas de projeto e erros de configuração. As outras 80% das falhas ocorrem pelos motivos nos quais cerca de 70% denotam falhas não intencionais de links únicos que ocorrem em locais aleatórios (por exemplo, devido a desentendimentos de terceiros) e 30% dos casos afetam mais de um link e, portanto, também se referem a falhas maciças induzidas por desastres, ou seja, falhas simultâneas de vários elementos de uma só vez devido a eventos de desastre (Kini et al., 2010). Conforme apresentado em (Rak et al., 2016), falhas maciças induzidas por desastres podem ser desencadeadas por:

- Catástrofes naturais: terremotos, inundações, incêndios, furacões, tornados ou erupções vulcânicas;
- Perturbações climáticas causadas por fortes chuvas ou neve que afetam, por exemplo, comunicações sem fio (rádio/ópticas) de alta frequência;
- Catástrofes relacionadas com a tecnologia resultantes de, por exemplo, falhas de software / hardware ou falhas nos sistemas de fornecimento de energia;
- Atividades humanas maliciosas (ataques) que afetam o desempenho da rede diretamente (ataque de pulso eletromagnético - EMP) ou indiretamente (falhas nos nós da rede devido à sua localização em área de uso de armas).

O planejamento e operação de redes ópticas enfrentam diversos desafios, e um deles é oferecer uma rede que seja tolerante a falhas nos equipamentos e nos enlaces de fibra óptica. Por esta razão, as soluções que aumentam a resiliência da rede são importantes e as principais estratégias para promover isso são os mecanismos de restauração e proteção (RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2009). A resiliência é definida em (STERBENZ et al., 2010) como a capacidade de uma rede de fornecer e manter um nível aceitável de serviço em face de várias falhas e desafios à operação normal. Quando ocorre uma falha na rede, um mecanismo de restauração em redes ópticas é ativado. Neste momento, o algoritmo de restauração tenta encontrar um novo caminho óptico para restaurar a conexão relacionada com a falha.

Em termos de melhor utilização dos recursos, a restauração é mais eficiente, porém existe a chance de que não seja possível encontrar um caminho óptico para reestabelecer uma operação normal para a rede e o tempo de restabelecimento da conexão pode não atender os requisitos estabelecidos em contrato.

Independente da tecnologia de roteamento utilizada, as redes ópticas são passíveis de falhas e interrupções. Uma simples falha em qualquer elemento da rede, seja em um equipamento da rede ou na própria fibra óptica, pode ocasionar grandes perdas de informação e falhas na comunicação entre os usuários (RAMAMURTHY; SAHASRABUDDHE; MUKHERJEE, 2003). Logo, é necessário projetar redes que possam sobreviver a falhas e que minimizem as perdas. Segundo (OKI, 2012), o roteamento via caminho disjuntos aumenta a capacidade de sobrevivência de uma rede, o que significa rotear sem compartilhar os mesmos links ou nós, entre a origem e destino do tráfego ou informação. Diversos autores vem desenvolvendo e testando técnicas de sobrevivência em redes ópticas (ZHANG; HUA; ZHANG, 2016; SHEN; GUO; BOSE, 2016; ASSIS et al., 2019). Estas técnicas de sobrevivência são tradicionalmente classificadas em: proteção ou restauração.

Segundo (JR et al., 2017), a proteção é uma técnica proativa, que consiste na computação e reserva prévia de recursos redundantes antes da ocorrência de falhas. Tais recursos redundantes somente são efetivamente utilizados para recuperar uma eventual falha. Na proteção dedicada, ao se alocar a rota primária, também é alocada uma rota de proteção de igual capacidade. Diferentemente, na proteção compartilhada, a rota de proteção é compartilhada entre outras requisições disjuntas entre si, o que diminui o desperdício no uso dos recursos da rede. Já restauração é uma técnica reativa, que trata a falha apenas após o acontecimento da mesma. E apesar de ter uma economia de recursos em relação a proteção, não consegue garantir que haverá recursos livres no momento da falha. Devido a maior garantia de sobrevivência, este trabalho aborda técnicas de proteção. Uma delas, os grupos de enlaces de risco compartilhado - SRLG (*Shared Risk Link Group*) funcionam da forma que, ao ocorrer uma falha em determinado grupo de risco, exista um outro caminho, o de proteção, que não pertença à esse grupo para transmitir a informação.

Outra técnica de proteção abordada é a restauração de largura de banda comprimida que é um sistema de proteção em que a largura de banda do caminho de proteção é reduzida à quantidade mínima exigida, conhecida como “compactação de largura de banda”, considerando o requisito do cliente quando um caminho de trabalho é alternado para um caminho de proteção.

3.1 PROTEÇÃO SRLG E SRNG

Um dos desafios no tratamento de demandas protegidas é considerar grupos de enlaces físicos com risco compartilhado. Quando dois ou mais enlaces compartilham um mesmo recurso físico, como um duto de cabos de fibra óptica ou algum equipamento, é dito que eles estão no mesmo SRLG (Xiaowen Chu; Jiangchuan Liu; Zhensheng Zhang, 2004). A falha de um SRLG é equivalente à falha de todos os enlaces que utilizam o recurso físico compartilhado. Logo, para realizar a proteção dessas demandas, é necessário que exista um caminho de proteção disjunto do caminho principal. Por exemplo, todos os links de fibra que passam por um conduíte comum no solo pertencem ao mesmo grupo SRLG porque o conduíte é um componente de risco compartilhado cuja falha, como um corte, fará com que todas as fibras no conduíte se quebre. Está claro nessa definição que o SRLG é uma relação definida dentro de um grupo de links com base em um fator de risco específico. Observe que o fator de risco pode ser definido com base em várias razões técnicas ou administrativas, como “compartilhamento de um conduíte”, “dentro de 16 km da proximidade da distância” e etc. A atribuição de determinado grupo de risco poderia ser feita também a partir da probabilidade de falha de determinado enlace ou nó, no qual precisaria ser codificado estaticamente ou com base no histórico das falhas da rede, esses valores poderiam ser reavaliados dinamicamente.

O conceito SRLG pode ser usado para definir a diversidade de caminhos disjuntos por link. Dois caminhos de dados são desarticulados se nenhum dos dois links pertencer ao mesmo SRLG em consideração. Um algoritmo eficiente conhecido na literatura como Algoritmo de Suurballe criado por (SUURBALLE; TARJAN, 1984) tem a capacidade de geração destes caminhos disjuntos. É um algoritmo para encontrar dois caminhos disjuntos em um grafo direcionado ponderado com custos não negativos, de modo que ambos os caminhos conectem o mesmo par de nós origem-destino e tenham custo combinado mínimo.

A Figura 3.1 mostra uma topologia física de uma rede hipotética de 4 nós em que existe uma representação de dois grupos de risco. Percebe-se que o grupo de risco nomeado SRLG1 é compartilhado pelos enlaces 1-3 e 1-4. Isto significa que se houver um acidente nessa região, como um rompimento ou esmagamento das fibras que passam nessa área, as comunicações pelos enlaces 1-3 e 1-4 ficarão comprometidas. Logo, o roteamento do caminho principal e do caminho de proteção não podem passar pelo SRLG com rótulo 1, sendo um dos caminhos obrigado a passar pelos nós 1 e 2, que é uma rota disjunta ao SRLG1.

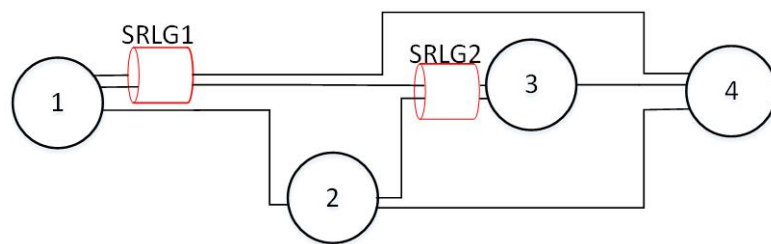


Figura 3.1: Topologia física com representação de SRLGs.

Como visto anteriormente, SRLG são grupos de enlaces de risco compartilhado. Os grupos de enlaces são mais comumente abordados na literatura atual, contudo existem outros. Conforme exposto em (ITU-T-G.7715/Y.1706, 2002), podemos estender o nó comum e vincular a diversidade ao grupo geral de riscos compartilhados, o que pode afetar nós, enlaces ou ambos. Especificamente, nos referimos à diversidade de Grupo de Risco Compartilhado em oposição à diversidade de nós / enlaces; sendo este último um caso especial do primeiro.

Definimos um SRG como um grupo de elementos que compartilham um risco comum. Uma falha em qualquer um dos elementos pode causar a falha de todos os elementos do grupo. Esse grupo pode basear-se em motivos topológicos, tecnológicos ou administrativos. De acordo com (DHARANIKOTA; JAIN; XUE, 2001), alguns riscos estão associados a áreas geográficas maiores, como metrô, regiões, etc. Precisamos ter uma granularidade mais grosseira da estrutura de rede, muito além de nós e links para evitar outros problemas. Exemplos incluem áreas de terremotos ou áreas propensas a enchentes e áreas com um certo raio, como no caso de usinas nucleares.

O conceito SRLG pode ser usado para definir a diversidade de caminhos disjuntos por link. Dois caminhos de dados são desarticulados se nenhum dos dois links pertencer ao mesmo SRLG em consideração. Da mesma forma, o conceito de grupo de nós de risco compartilhado - SRNG pode ser usado para definir a diversidade de caminhos separados por nós. Um SRNG é definido como um grupo de nós que compartilham um componente de risco comum cuja falha pode causar a falha de todos os nós no grupo. Por exemplo, todos os roteadores em um prédio podem ser considerados como um grupo SRNG porque a falha pode causar a falha de todos os roteadores.

Na Figura 3.2 pode ser observado um exemplo de roteamento do caminho principal e caminho de proteção em uma topologia de 5 nós, do nó fonte 1 para o nó destino 4. Em determinadas situações podem ocorrer o roteamento do caminho principal e de proteção passando por um mesmo nó (neste exemplo, o nó 5), mesmo que aplicado a restrição do SRLG, como visto na Figura 3.2(a). Caso ocorra uma falha nesse nó, tanto o caminho principal quanto o caminho de proteção não poderão ser utilizados, ocasionando a perda completa da transmissão. A Figura 3.2(b) exhibe um possível roteamento realizado com a utilização da restrição SRNG (Equação 4.30), descrita na Seção 4. Neste caso, se o nó 5 falhar, a transmissão continuará pelo caminho de proteção 1-3-4.

3.2 PROTEÇÃO COMPRIMIDA

A Restauração de Largura de Banda Comprimida (*Bandwidth Squeezed Restoration* - BSR) foi proposta como um mecanismo de restauração econômico em termos de utilização de recursos espectrais em (SONE et al., 2011). Observe que os termos restauração comprimida e proteção parcial foram originalmente usados, respectivamente, para mecanismos de restauração e proteção. Embora nesta dissertação tratemos de mecanismos de proteção, preferimos usar o termo proteção comprimida. Conforme proposto inicialmente, a largura de banda do caminho de proteção pode ser reduzida, ou seja, comprimida, para um valor mínimo necessário, baseado no valor acordado com o cliente, o que permite um número maior de caminhos ser recuperado quando houver recursos de proteção in-

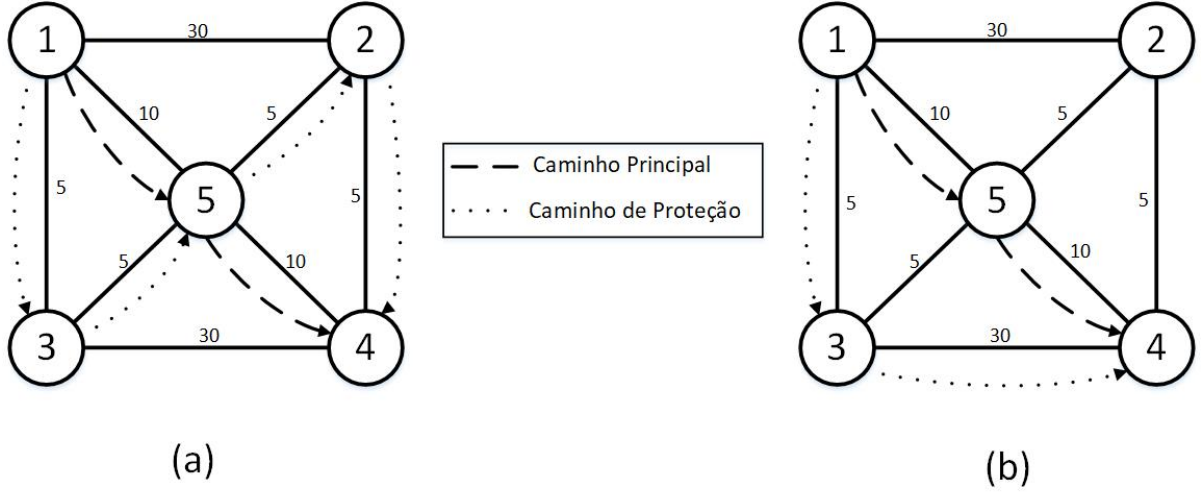


Figura 3.2: Exemplo de roteamento do caminho principal e caminho de proteção em uma Topologia de 5 nós sem a utilização de SRNG (a) e com SRNG (b).

suficientes. Esse mecanismo permite a restauração altamente permeável, o que aumenta o número de caminhos sobreviventes para os dados principais quando há recursos de proteção insuficientes em uma situação de falha desastrosa. O esquema BSR pode ser aplicado como um novo tipo de classe de serviço de recuperação, além das classes de serviço de recuperação convencionais, como proteção dedicada.

A Figura 3.3 mostra um exemplo do esquema BSR no qual existem dois caminhos ópticos na rede. Uma é do nó A ao nó D e tem uma largura de banda de 320 Gbps. O outro é do Nó B para o Nó C e tem uma largura de banda de 280 Gbps. Assumimos que cada fibra tem uma capacidade de largura de banda de 400 Gbps e que o link entre o Nó B e o Nó C tem 120 Gbps de largura de banda disponível. Nesta configuração, se ocorrer uma falha no enlace entre o Nó A e o Nó E, o caminho ótico poderá ser comutado para a rota A-B-C-D. A largura de banda do caminho é reduzida alterando a taxa de bits de um *transponder* de largura de banda variável de 320 Gbps para menos de 120 Gbps. A rota de recuperação pode ser configurada antecipadamente ou após uma falha.

Diferente do modo convencional de proteção dedicada, assumimos, nesta parte do trabalho, que os caminhos de recuperação sejam configurados antecipadamente. Em vez de reservar largura de banda para ambos tráfegos de trabalho e proteção, estes são mesclados e alocados em conjunto na rede para economizar largura de banda. A ideia central do BSR é garantir que, sob uma falha de link, a demanda de tráfego entre quaisquer pares origem-destino seja mantida acima ou igual a um valor mínimo definido por um SLA e ao mesmo tempo, a rede não precisa reservar tanta largura de banda como na proteção dedicada convencional.

Considere inicialmente que o valor do tráfego entre nós fonte-destino não podem ser comprimidos abaixo de P^{sd} . Seja α^{sd} a relação entre a largura de banda extra necessária para proteção ($\alpha^{sd} P^{sd}$) e a demanda de tráfego (P^{sd}). No caso da proteção dedicada convencional, α^{sd} é igual a 1, mesma quantidade total de tráfego reservada para fins

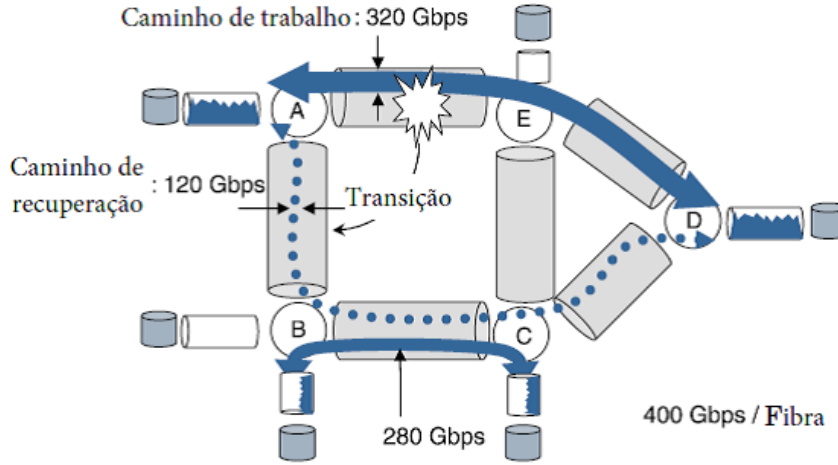


Figura 3.3: A restauração de largura de banda comprimida (Adaptado de (SONE et al., 2011)).

de proteção que é roteado através de um percurso óptico alternativo ao caminho de trabalho. No entanto, suponha que seja permitido $0 < \alpha^{sd} < 1$, para que o tráfego de trabalho e proteção sejam mesclados e a quantidade total de largura de banda reservada seja $(1 + \alpha^{sd})P^{sd}$. Se direcionarmos esse tráfego considerando que no máximo $\alpha^{sd}P^{sd}$ pode passar por qualquer link da rede é possível garantir que, no caso de uma falha de um link, a largura de banda ativa será de pelo menos $(1 + \alpha^{sd})P^{sd} - \alpha^{sd}P^{sd} = P^{sd}$. Observe que, em termos de uso de largura de banda, seria interessante manter o valor o menor possível para que a quantidade mínima de largura de banda extra fosse reservada para garantir o valor do tráfego comprometido. No entanto, isso nem sempre é possível, já que o roteamento proposto implicaria em um grau mínimo de nós de $(1 + \alpha^{sd})/\alpha^{sd}$, o que pode ser impraticável para algumas redes, especialmente quando α^{sd} é muito pequeno. Por exemplo, se quiséssemos manter um valor baixo igual a 0,2, seria necessário um grau de nó mínimo igual a 6. Por outro lado, $\alpha^{sd} = 0,5$ reduz o requisito de grau de nó para apenas 3 e $\alpha^{sd} = 1$ (como na proteção dedicada convencional) requer um grau de nó de 2, como facilmente verificado.

Em vez de aumentar α^{sd} e abordar o grande requisito de utilização de largura de banda da proteção convencional, suponhamos que, no caso de uma falha de link, seja permitido pelo cliente que o tráfego possa ser comprimido para, no máximo, uma fração acordada de, digamos $(1 - \beta^{sd})P^{sd}$, onde $0 < \beta^{sd} < 1$, que simboliza esse fator de compressão.

Para garantir tal restrição, cada link agora é necessário transportar na maior parte $(\alpha^{sd} + \beta^{sd})P^{sd}$ do tráfego total de origem-destino $(1 + \alpha^{sd})P^{sd}$. Isso pode ser entendido pelo fato de que, uma falha em qualquer link da rede fará com que o tráfego total de origem-destino seja descartado de $(1 + \alpha^{sd})P^{sd}$ para no máximo $(1 + \alpha^{sd})P^{sd} - (\alpha^{sd} + \beta^{sd})P^{sd} = (1 - \beta^{sd})P^{sd}$ conforme acordado no SLA. Sob essa condição, o grau de nó mínimo necessário será $(\alpha^{sd} + 1)/(\alpha^{sd} + \beta^{sd})$, o que não é tão rigoroso quanto antes. Por exemplo, se manter $\alpha^{sd} = 0,2$ e assumir que apenas 10% da largura de banda de trabalho comprometida pode ser comprimida (isto é $\beta^{sd} = 0,1$), o grau de nó mínimo requerido é

reduzido de 6 para 4. Obviamente, um menor grau de nó pode ser alcançado aumentando α^{sd} e/ou β^{sd} , se necessário. Dependendo do valor de β^{sd} e do grau dos nós da rede, pode ser possível selecionar α^{sd} consideravelmente maior do que 1 (exigido no mecanismo de proteção convencional) e ainda manter a intensidade de tráfego próxima de P^{sd} , no caso de uma falha de link. Na pior situação em que o tráfego não pode ser comprimido (ou seja $\beta^{sd} = 0$) e o grau do nó é justamente 2, podemos definir $\alpha^{sd} = 1$ e usar proteção dedicada convencional. Essa proteção dedicada é comparada com mecanismos de proteção baseados no esquema BSR no artigo de (ASSIS et al., 2019). Entre as simulações, é realizado um estudo entre o Caminho de Proteção Dedicado (*Dedicated Protection Path* - DPP), Caminho de Proteção Dedicado + Compressão (*Dedicated Protection Path + Squeezed* - DPP+S), Caminho de Proteção Dedicado Particionado (*Partitioning Dedicated Path Protection* - PDPP) e Caminho de Proteção Dedicado Particionado + Compressão (*Partitioning Dedicated Path Protection + Squeezed* - PDPP+S).

Para ilustrar esses diferentes esquemas de proteção que podem ser aplicados ao conjunto de conexões para torná-los resilientes a uma falha de link único no contexto das EONs, a Figura 3.4 mostra uma topologia de rede simples em que um caminho óptico é configurado entre nós 1 e 3. Vamos supor que o caminho da luz esteja transportando 100 Gbps de tráfego. Para proteger esse caminho óptico contra uma falha no link, é possível encontrar outro caminho óptico, incluindo rota e espectro disponível, para os mesmos 100 Gbps de capacidade (Figura 3.4(b)). No caso de uma falha, o caminho óptico interrompido é obviamente restaurado usando o caminho de backup. Este é o esquema de proteção normal tradicionalmente usado em redes ópticas e conhecido como DPP. Com proteção parcial, o tráfego de caminhos ópticos interrompidos no momento da falha podem ser reduzidos em comparação com o tráfego de trabalho em execução anteriormente, chamado de DPP+S e ilustrado na Figura 3.4(c). Observe que, se em uma falha no link, os 100 Gbps de tráfego originais podem ser comprimidos para 50% da taxa de bits de operação normal, apenas 50 Gbps extras devem ser reservados para fins de proteção, exigindo da rede 150 Gbps, ou seja, muito menos capacidade do que com o DPP.

Outra possibilidade de reservar a capacidade do link de maneira eficiente e ainda restaurar a taxa de bits original do caminho de luz interrompido foi proposta em (PA-OLUCCI et al., 2014). A ideia é usar alguns caminhos ópticos separados, cada um dos quais transmite parte da taxa de bits total, com o tráfego agregado menor que o dobro do necessário. A objetivo é economizar largura de banda quando comparado ao DPP e garantir a taxa de bits total comprometida em uma falha. Isso é mostrado na Figura 3.5 (a), onde uma capacidade total equivalente a 150 Gbps, particionada em três caminhos ópticos separados em 50 Gbps cada, é reservada para transmitir os 100 Gbps necessários. Observe que, como os caminhos ópticos são disjuntos, uma falha em qualquer um de seus caminhos manterá os 100 Gbps de tráfego comprometidos. Este esquema foi denominado PDPP.

Observe que o PDPP tem algumas vantagens sobre DPP e DPP+S, pois economiza espectro quando comparado ao DPP ao mesmo tempo em que é capaz, com a mesma largura de banda total reservada (no exemplo, 150 Gbps), para manter a taxa de bits confirmada no caso de uma falha, ao contrário do DPP+S. Finalmente, é interessante notar que a compressão da largura de banda ainda pode ser usada com o PDPP para

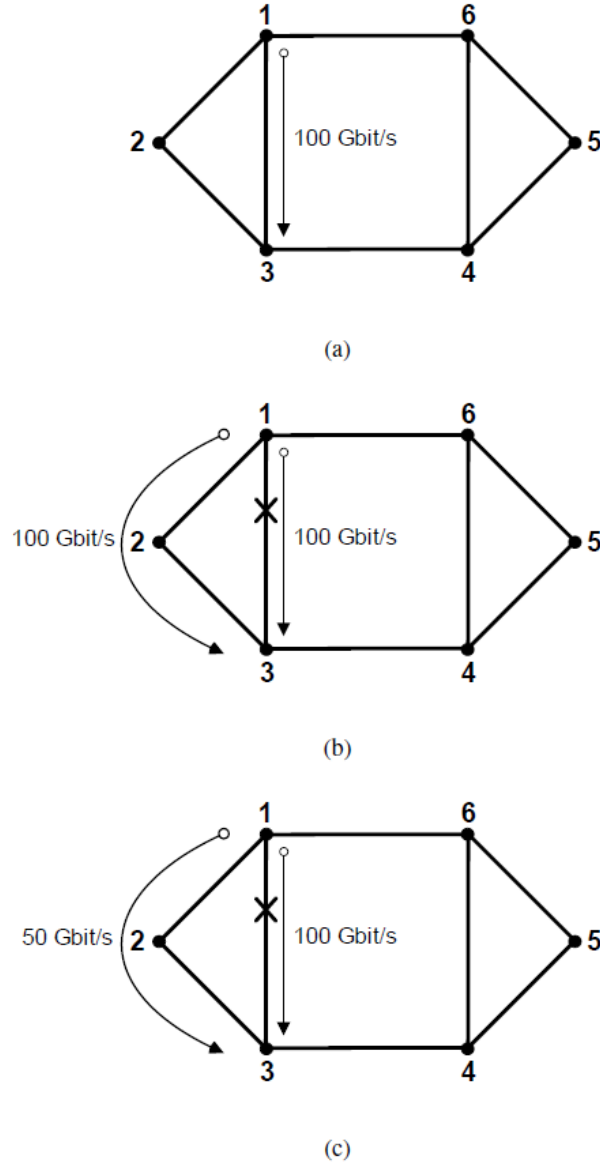
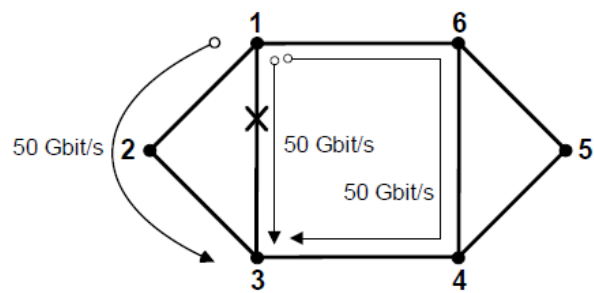
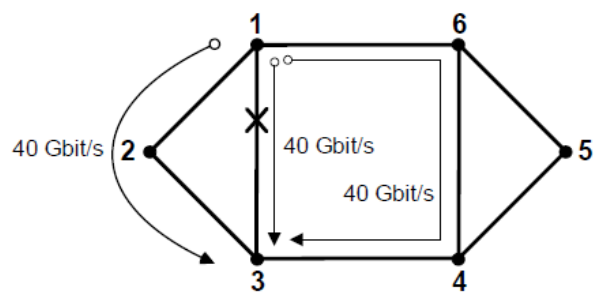


Figura 3.4: Exemplos de mecanismos de proteção de transmissão de tráfego: (a) Condições normais de transmissão, (b) DPP, (c) Mecanismo de proteção DPP+S com $\beta^{sd} = 0, 5$.

forma PDPP+S. Isso alivia ainda mais a quantidade de largura de banda extra exigida pelo PDPP. Por exemplo, suponha que assumimos uma largura de banda de apenas 20%. Nesse caso, três caminhos ópticos separados com 40 Gbps cada exigiriam apenas 120 Gbps e garantiriam 80 Gbps após uma falha. Este exemplo ilustra a grande vantagem em usar PDPP e PDPP+S quando comparado com o DPP e DPP+S. Alguns operadores de rede preferem não usar caminhos múltiplos para fornecer a transmissão de dados porque necessitam de uma quantidade maior de caminhos ópticos paralelos. É claro que o PDPP e o PDPP+S podem ser explorados para melhorar a capacidade de proteção, mas os caminhos ópticos disjuntos são uma grande limitação na atualidade.



(a)



(b)

Figura 3.5: Exemplos de mecanismos de proteção de transmissão de tráfego: (a) Mecanismo de proteção PDPP, (b) Mecanismo de proteção PDPP+S com $\alpha^{sd} = 0,2$ e $\beta^{sd} = 0,2$.

METODOLOGIA E FORMULAÇÃO MATEMÁTICA PARA PROTEÇÃO EM REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS

Esta Seção apresenta uma estratégia através de uma MILP para resolução do problema da proteção em EONs considerando grupos de risco e proteção comprimida de forma conjunta. Após definir a nomenclatura na Subseção 4.1.1, os parâmetros de entrada na Subseção 4.1.2 e variáveis usadas na formulação, na Subseção 4.1.3, o modelo completo de MILP é apresentado na Subseção 4.1.4.

4.1 FORMULAÇÃO MILP

Algumas formulações de MILP encontradas na literatura foram propostas para resolver o SRLG em redes WDM, mas nenhuma foi proposta para implementar em EONs. Os autores introduzem a formulação de MILP para gerar soluções otimizadas para redes EON, implementando ainda um determinado grupo de risco escolhido de forma aleatória. Além disso, realizou-se comparações variando o formato de modulação e o fator de compressão β^{sd} , incluindo valores gerados aleatoriamente, como forma de simular o SLAs.

4.1.1 Notação

- s, d denotam pares ordenados origem-destino da demanda de tráfego.
- i, j denotam os nós de origem e destino de um caminho óptico virtual.
- m e n denotam nós terminais de um enlace físico da rede.
- z denota o formato de modulação do conjunto FM com todos os formatos de modulação disponíveis.

4.1.2 Parâmetros de Entrada

- NO : Quantidade de nós da rede.
- FGB : Banda de guarda de filtragem, que representa o espaçamento mínimo de espectro entre as bandas de frequência.
- P^{sd} : demanda de tráfego, em Gbit/s.
- SS^{mn} : participação dos enlaces mn no grupo de risco de enlaces.
- $SSNO^m$: participação dos nós m no grupo de risco de nós.
- Ω : Comprimento do *slot* em GHz .
- $dist_{mn}$: Distância entre os nós m e n na topologia física.
- ef_z : Eficiência espectral do formato de modulação z , em que $z \in FM$.
- d_z : Alcance máximo da conexão usando formato de modulação z , em que $z \in FM$.
- M : Um número muito grande para auxiliar na transformação de variáveis inteiras para binário.
- α^{sd} : Fator de proteção, no par sd ;
- β^{sd} : Razão máxima da largura de banda compactada, em que $[1-\beta^{sd}]$ é a fração mínima permitida da largura de banda após uma falha no link, conforme acordado no SLA no par sd .
- NF^{sd} : Número de falhas simultâneas.
- tv_{ij} : Topologia virtual determinada.

4.1.3 Variáveis

- F_{ij}^{sd} : Quantidade de fluxo de tráfego entre os nós sd a ser roteado no caminho óptico do nó i para o nó j .
- V_{ij} : Quantidade de largura de banda de uma largura de banda elástica roteado no caminho óptico do nó i para o nó j .
- B_{ij}^{sd} : Variável binária que indica se o tráfego do nó s para o nó d é roteado pelos caminhos ópticos do nó i para o nó j . $B_{ij}^{sd} = 1$ se $F_{ij}^{sd} > 0$; $B_{ij}^{sd} = 0$ se $F_{ij}^{sd} = 0$
- Z_{ij}^{sdmn} : Variável binária que indica o SRLG.
- p_{ij} : Um valor inteiro que quantifica o número de SFs (*Slots* de Frequência) ocupados, por uma conexão do nó i para o nó j , na topologia física.
- A_{mn}^{ij} : Variável binária igual a 1 se $WL_{mn}^{ij} > 0$. E igual 0 se $WL_{mn}^{ij} = 0$.

- e_{ij}^z : Variável binária que indica se um caminho óptico elástico do nó i para o nó j emprega o formato de modulação z .
- S_{ij} : Uma variável inteira que denota o índice do primeiro SF da conexão i - j .
- W_{ij}^{ku} : Variável binária, igual a 1 se o índice do SF inicial da conexão i - j é menor que o índice do SF inicial da conexão k - u . E 0, caso contrário.
- C : Índice máximo dos *slots* usados pelas conexões.
- WL_{mn}^{ij} : Variável que indica a quantidade de largura de banda que a demanda i - j utiliza ao passar pelo caminho físico m - n .

4.1.4 Formulação Matemática

-Função Objetivo:

$$\text{Minimizar : } C, \quad (4.1)$$

-Restrições SLA:

$$\sum_j F_{ij}^{sd} - \sum_j F_{ji}^{sd} = \begin{cases} P^{sd} * (1 + a^{sd}) & i = s \\ -P^{sd} * (1 + a^{sd}) & i = d \\ 0 & i \neq s, d \end{cases} \quad (4.2)$$

$$F_{ij}^{sd} \leq \frac{(\alpha^{sd} + \beta^{sd}) * P^{sd}}{N F^{sd}} \quad \forall s, d, i, j \quad (4.3)$$

$$\frac{F_{ij}^{sd}}{M} \leq B_{ij}^{sd} \quad \forall s, d, i, j \quad (4.4)$$

$$F_{ij}^{sd} \leq P^{sd} \cdot tv_{ij} \quad \forall s, d, i, j \quad (4.5)$$

$$\sum_{sd} F_{ij}^{sd} = V^{ij} \quad \forall i, j \quad (4.6)$$

$$\sum_{ij} B_{ij}^{sd} \cdot A_{mn}^{ij} \leq 1 \quad \forall s, d, m, n \quad (4.7)$$

-Restrições de Formato de Modulação:

$$p_{ij} \geq \left(\frac{V_{ij}}{\Omega \cdot ef_z} \right) - (1 - e_{ij}^z) \cdot M \quad (4.8)$$

$$p_{ij} \geq \left(\frac{V_{ij}}{\Omega \cdot ef_z} \right) + 1 + ((1 - e_{ij}^z) \cdot M) \quad (4.9)$$

$$p_{ij} \leq M \cdot \sum_z e_{ij}^z \quad (4.10)$$

$$\sum_z e_{ij}^z \geq \frac{V_{ij}}{M} \quad (4.11)$$

$$\sum_z e_{ij}^z \leq 1 \quad (4.12)$$

$$M \cdot V_{ij} \geq \sum_z e_{ij}^z \quad (4.13)$$

$$\sum_{mn} A_{mn}^{ij} \cdot dist_{mn} \leq \sum_z d_z \cdot e_{ij}^z \quad (4.14)$$

-Restrições de roteamento na camada física:

$$A_{mn}^{ij} \geq \frac{WL_{mn}^{ij}}{M} \quad \forall i, j, m, n \quad (4.15)$$

$$A_{mn}^{ij} + A_{mk}^{ij} \leq 1 \quad \forall i, j, m; \quad n \neq k \quad (4.16)$$

$$\sum_n WL_{mn}^{ij} - \sum_n WL_{nm}^{ij} = \begin{cases} p^{ij} & m = i, \\ -p^{ij} & m = j, \\ 0 & m \neq i, j, \end{cases} \quad \forall i, j, m \quad (4.17)$$

-Restrições de continuidade e contiguidade:

$$S_{ij} \geq 0, \quad p_{ij} \geq 0 \quad \forall (i, j) \quad (4.18)$$

$$C \geq S_{ij} + p_{ij} \quad \forall (i, j) \quad (4.19)$$

$$W_{ij,ku} + W_{ku,ij} \leq 1 \quad \forall ij, ku : ij \neq ku \quad (4.20)$$

$$S_{ij} + p_{ij} + FGB \leq S_{ku} + M \cdot [1 - W_{ij,ku}] \quad \forall ij, ku : ij \neq ku \quad (4.21)$$

$$S_{ku} + p_{ku} + FGB \leq S_{ij} + M \cdot [1 - W_{ku,ij}] \quad \forall ij, ku : ij \neq ku \quad (4.22)$$

$$W_{ij,ku} + W_{ku,ij} \geq [(A_{mn}^{ij} + A_{mn}^{ku}) - 1] \quad \forall ij, ku : ij \neq ku \quad (4.23)$$

-Outras restrições:

$$Z_{sdmn}^{ij} \leq A_{mn}^{ij} \quad \forall s, d, m, n, i, j \quad (4.24)$$

$$Z_{sdmn}^{ij} \leq B_{ij}^{sd} \quad \forall s, d, m, n, i, j \quad (4.25)$$

$$Z_{sdmn}^{ij} \geq A_{mn}^{ij} + B_{ij}^{sd} - 1 \quad \forall s, d, m, n, i, j \quad (4.26)$$

$$\sum_{ij} Z_{sdmn}^{ij} \leq 1; \quad \forall s, d, m, n \quad (4.27)$$

$$Z_{sdmn}^{ij} \geq 0 \quad \forall s, d, m, n, i, j \quad (4.28)$$

$$\sum_{ijmn} Z_{sdmn}^{ij} * SS^{mn} \leq 1, \quad (4.29)$$

$$\sum_{ijsd} B_{ij}^{sd} * SSNO^j \leq 1, \quad (4.30)$$

A Função Objetivo 4.1 é proposta para minimizar o máximo de *slots* ocupados para rotear a demanda fornecida. O resultado mostra o menor número de *slots* necessários dentre todos os enlaces utilizados para realizar o roteamento. A Restrição 4.2 é uma restrição de conservação de fluxos na topologia virtual (camada de preparação). No lado esquerdo da equação, temos a soma de todos os tráfegos saindo do nó i (F_{ij}^{sd}) menos a soma de todos os tráfegos entrando no nó i (F_{ji}^{sd}). Caso i seja o nó remetente da conexão $s - d$, então $i = s$ e o fluxo de saída é positivo e igual a $P^{sd} * (1 + a^{sd})$, em Gbps. Caso o nó i seja o destinatário, então o fluxo de saída é negativo e igual a $-P^{sd} * (1 + a^{sd})$, em Gbps. Caso o nó i não seja nem remetente nem destinatário ($i \neq s, d$), então este nó é intermediário e todo tráfego que chega deve sair, totalizando um fluxo nulo.

A Restrição 4.3 se refere ao particionamento e compressão de largura de banda, de acordo ao SLA. A Restrição 4.4 é usada para indicar os saltos virtuais usados pelo tráfego do nó de origem-destino. A Restrição 4.5 garante que a topologia virtual seja igual a topologia física. A Restrição 4.6 indica que os fluxos de tráfego de baixa velocidade são tratados em caminhos ópticos com largura de banda variável.

A Restrição 4.7 denota que múltiplos caminhos ópticos usados para rotear o tráfego de um par de nós de destino-fonte devem usar diferentes enlaces físicos para habilitar o mecanismo de particionamento de tráfego proposto. Contudo é uma equação não linear, formada pela multiplicação de duas variáveis binárias, que pode ser substituída pelas Restrições 4.24 a 4.28, convertendo a formulação de MILP em um problema linear.

A Restrição 4.8 define o tráfego, em número de SFs, p^{ij} , para cada conexão (i, j) . A partir de V^{ij} , em Gbps, e da eficiência espectral: ef_z . Se o formato de modulação z for escolhido para a conexão (i, j) , e_z^j será igual a 1 e a Restrição 4.8 definirá cada p^{ij} usando os formatos de modulação dados na simulação. A Restrição 4.9 fornece o número de *slots* para o caminho óptico, considerando um formato de modulação atribuído.

As restrições seguintes são postas para assegurar o gerenciamento correto dos formatos de modulação. Restrição 4.10 impede p^{ij} de assumir qualquer valor positivo quando o lado direito da inequação é igual a 0, o que significa que nenhum formato de modulação

pode ser selecionado para a demanda (i, j) . Isso pode ocorrer quando nenhum formato de modulação da simulação não pôde suportar a distância do caminho da origem para o destino. Para uma demanda (i, j) , a Restrição 4.11 irá forçar pelo menos um dos e_z^{ij} a ser 1. Caso a demanda não exista, isso é: $V^{ij} = 0$, esta restrição não fará efeito. A Restrição 4.12 assegura que só existirá um formato de modulação sendo usado para uma demanda (i, j) . A Restrição 4.13 irá garantir que se não existe demanda e $V^{ij} = 0$, então nenhum formato de modulação será usado, pois o lado direito da inequação será forçado a ser 0 também. Caso $V^{ij} > 0$, esta inequação não terá efeito. Para gerenciar as restrições de alcance dos formatos de modulação, a Restrição 4.14 é definida para que a distância total percorrida pela demanda (i, j) , calculada com o lado esquerdo da inequação, seja menor ou igual à distância máxima suportada pelo formato de modulação z , calculada com o lado direito da inequação.

A Restrição 4.15 define o indicador binário A_{mn}^{ij} de WL_{mn}^{ij} . Se $WL_{mn}^{ij} = 0$, então $A_{mn}^{ij} = 0$ e se $WL_{mn}^{ij} > 0$, $A_{mn}^{ij} = 1$, pois o quociente é um número maior que 0 e A_{mn}^{ij} deve ser binário. Restrição (4.16) se assegura que toda demanda (i, j) só pode sair de um nó m através de um enlace. As opções de enlace de saída (m, n) e (m, k) são mutuamente exclusivos, já que sua soma deve ser menor ou igual a 1. Essa restrição garante que o tráfego não seja dividido por dois enlaces, até que chegue ao seu destino.

Restrições de balanceamento de fluxo são definidas também na camada física, como a Restrição 4.17, que define o fluxo de saída para o todos os nós. No lado esquerdo da equação, temos a soma de todos os tráfegos saindo do nó m (WL_{mn}^{ij}) menos a soma de todo os tráfegos entrando no nó m (WL_{nm}^{ij}). Caso m seja o nó remetente da conexão $i - j$, então $m = i$ e o fluxo de saída é positivo e igual a p^{ij} , em número de *slots*. Caso o nó m seja o destinatário, então o fluxo de saída é negativo e igual a $-p^{ij}$, em número de *slots*. Caso o nó m não seja nem remetente nem destinatário ($m \neq i, j$), então este nó é intermediário e todo tráfego que chega deve sair, totalizando um fluxo nulo.

A Restrição 4.18 é trivial, já que o início de conexão e seu número de *slots* devem ser ambos positivos. A Restrição 4.19 juntamente com a Função Objetivo 4.1 e a Restrição 4.17 são usadas para minimizar o número máximo de *slots* de espectro entre todas as demandas.

Para manter o roteamento de tráfego apropriado na topologia da rede, restrições de balanceamento de fluxo são definidas, como a Restrição (4.20), que define o fluxo de saída para o todos os nós. No lado esquerdo da equação, temos a soma de todos os tráfegos saindo do nó m (P_{mn}^{ijt}) menos a soma de todo os tráfegos entrando no nó m (P_{nm}^{ijt}). Caso m seja o nó remetente da conexão $i - j$, então $m = i$ e o fluxo de saída é positivo e igual a p^{ijt} , em número de *slots*. Caso o nó m seja o destinatário, então o fluxo de saída é negativo e igual a $-p^{ijt}$, em número de *slots*. Caso o nó m não seja nem remetente nem destinatário ($m \neq i, j$), então este nó é intermediário e todo tráfego que chega deve sair, totalizando um fluxo nulo.

Restrições 4.21 e 4.22 existem para assegurar que não haverá sobreposição de espectro entre todas as demandas roteadas nos enlaces da rede. Para duas demandas diferentes (i, j) , se elas estão no mesmo enlace, ou W_{ku}^{ij} ou W_{ij}^{ku} estará ativado. Se W_{ku}^{ij} for o ativo, a Restrição 4.21 se certificará que o *slot* inicial da demanda (i, j) mais os *slots* alocados p^{ij} mais a banda de guarda, *FGB* será numericamente menor que o *slot* inicial da demanda

(k, u) . Neste caso, $W_{ij}^{ku} = 0$ e a Restrição (4.22) não terá efeito. Caso, (k, u) inicie antes de (i, j) , as funções da Restrição (4.21) e da Restrição (4.22) são invertidas. Considere a situação em que nenhum enlace é compartilhado, W_{ku}^{ij} e W_{ij}^{ku} serão 0 e ambas as restrições serão triviais.

Restrição 4.23 garante que, entre duas demandas de tráfego, uma delas será alocada antes da outra, de acordo com a definição da variável W_{ku}^{ij} . Se as duas demandas de tráfego atravessam um enlace em comum, o lado direito da Restrição 4.23 será igual a 1, forçando a condição $W_{ku}^{ij} + W_{ij}^{ku} = 1$, significando que uma demanda vai iniciar antes da outra. Se as demandas não passam pelo mesmo enlace, o lado direito da inequação será igual a 0 e $W_{ku}^{ij} + W_{ij}^{ku}$ pode ser igual a 0 ou a 1, não importando se uma se inicia antes do outro ou não.

A Restrição 4.29 garante que a proteção SRLG funcione de forma adequada. O roteamento do caminho principal e do caminho de proteção não podem passar pelos enlaces do mesmo grupo de risco, dado por SS^{mng} . A Restrição 4.30 garante a proteção SRNG. O roteamento do caminho principal e do caminho de proteção não podem passar pelos nós do mesmo grupo de risco, dado por $SSNO^m$.

RESULTADOS E ANÁLISE DE DESEMPENHO

Apresentados os métodos de resolução do problema, este Capítulo faz uma comparação dos resultados das simulações centralizado na proteção SRLG. É avaliada a minimização da quantidade de *slots*, considerando uma ou duas falhas simultâneas, SRNG e diferentes fatores de compressão para uma pequena rede didática, visto na Seção 5.1.

Outras duas simulações foram realizadas em redes conhecidas: Rede Nacional de Ensino e Pesquisa (RNP) e Via Network. Nestas, foi implementado ainda a variação dos formatos de modulação, conforme é apresentada na Seção 5.2. Usamos o AMPL / IBM ILOG CPLEX v.12.2 (ILOG, Inc, 2019) em um computador Intel i7 2.6GHz 16GB RAM para solucionar o MILP.

5.1 REDES PEQUENAS

Para testar a funcionalidade da formulação de MILP apresentada na Seção 4.1, simulações foram realizadas para uma rede óptica didática de pequena dimensão, contendo 6 nós e 11 enlaces físicos conectados, ilustradas na Figura 5.1. Escolhemos essa rede porque ela tem mais links físicos e, portanto, mais possibilidades de particionamento de tráfego.

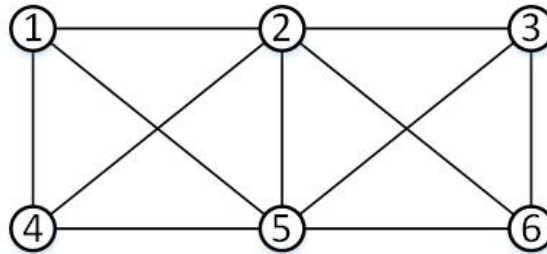


Figura 5.1: Rede pequena didática com seis nós e onze enlaces.

A matriz de tráfego é definida na Tabela 5.1 onde cada nó exige 100 Gbit/s de transmissão para cada outro nó, isto é $P^{sd} = 100 \text{ Gbit/s } \forall (s, d)$. A banda por *slot*, Ω , foi

Tabela 5.1: Matriz de tráfego para a rede da Figura 5.1 contendo 6 nós.

-	100	100	100	100	100
100	-	100	100	100	100
100	100	-	100	100	100
100	100	100	-	100	100
100	100	100	100	-	100
100	100	100	100	100	-

configurada como 12,5 GHz e a banda de guarda de filtro, entre as conexões foi configurada como um *slot*.

Nas simulações, $\alpha^{sd} = 1$, o que exige proteção completa, variando apenas o β^{sd} , que é a fração máxima do tráfego comprometido que o usuário está disposto a perder durante uma falha na rede, ou seja, um fator de compressão. Quando $\beta^{sd}=0.6$ por exemplo, significa que foi permitido comprimir 60% da banda de trabalho comprometida. Tanto o parâmetro α^{sd} quanto o β^{sd} podem ser configurados com valores diferentes para cada par de nós sd , de acordo ao SLA. Essa possibilidade de configuração faz com que a estratégia apresentada seja muito mais completa no quesito de entrada de dados, tornando possível a implantação real dos dados, uma vez que, podem haver diferentes níveis de proteção e fatores de compressão, de acordo a demanda de cada cliente.

Para avaliar a funcionalidade da aplicação do grupo de risco, foi definido aleatoriamente um grupo no qual os enlaces físicos 5-1, e 5-2 fazem parte deste grupo ($SS_{51} = 1$ e $SS_{52} = 1$).

As simulações para o problema RSA com SRLG foram baseadas na formulação da Seção 4.1, com o objetivo de minimizar número de *slots* máximo em qualquer enlace da rede. Os resultados da simulação na rede didática exibida na Figura 5.1, estão informados na Tabela 5.2 para uma ou duas falhas simultâneas, diferentes fatores de compressão, SRNG e SRLG.

Ao analisar individualmente os resultados exibidos na Tabela 5.2, considerando apenas uma falha, os resultados da minimização dos *slots* (C), para todos os valores de β^{sd} simulados sem considerar a proteção SRLG, foram iguais a 19. Ao adicionar o grupo SRLG1, exibido na Figura 5.2, o resultado encontrado foi 20. Quanto maior a quantidade de SRLGs, isto é, maior o nível de proteção, maior será a quantidade de *slots* utilizados para realizar o roteamento, devido a necessidade de desenvolver novos caminhos disjuntos ao caminho principal.

A fim de comprovar a eficácia da simulação em relação a proteção SRLG, foi exibido na Figura 5.2, um dos resultados do roteamento das demandas, o do nó de origem 5 para o nó destino 2, de 100 Gbit/s. Percebe-se que ao adicionar o SRLG1 (Figura 5.2-a), o roteamento que inicialmente era realizado pelos caminhos 5-2, 5-1-2 e 5-3-2 (Figura 5.2-b), foi alterado para 5-2 e 5-4-2. Isso ocorreu devido ao agrupamento realizado entre os links 5-1 e 5-2, proibindo que o roteamento do caminho principal e do caminho de proteção passem por eles simultaneamente.

Tabela 5.2: Número de *slots* (C) considerando a variação de NF, SRLG, SRNG e β^{sd} na rede didática de 6 nós.

NF	SRLG	SRNG	$\beta^{sd}=0$	$\beta^{sd}=0,2$	$\beta^{sd}=0,4$	$\beta^{sd}=0,6$	$\beta^{sd}=0,8$
1	NÃO	NÃO	19	19	19	19	19
2	NÃO	NÃO	-	-	22	20	20
1	SIM	NÃO	20	20	20	20	20
2	SIM	NÃO	-	-	24	22	21
1	NÃO	SIM	19	19	19	19	19
2	NÃO	SIM	-	-	23*	20*	20*
1	SIM	SIM	20	20	20	20	20
2	SIM	SIM	-	-	26*	22*	21*

*SRNG apenas no nó 5.

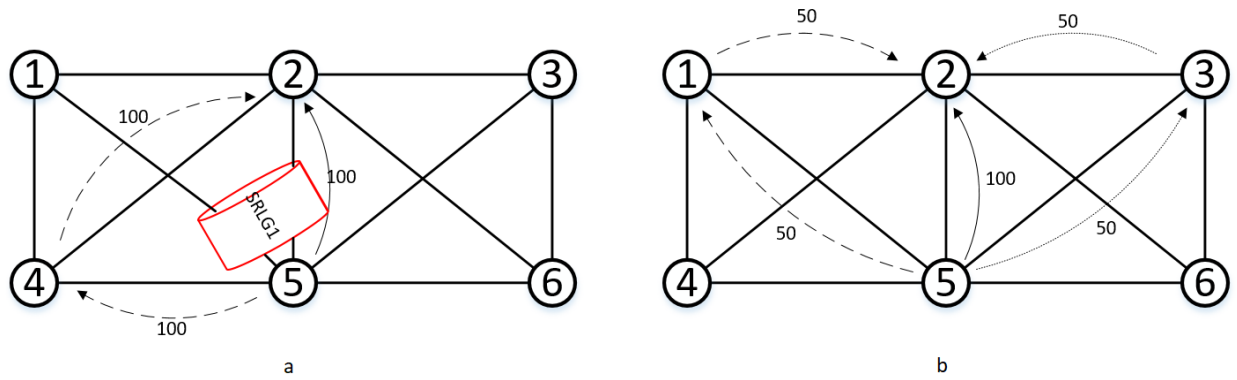


Figura 5.2: Roteamento para a demanda 5-2 na rede de 6 nós e 11 enlaces com SRLG1 (a) e sem o SRLG1 (b).

A partir dos resultados da Tabela 5.2, considerando duas falhas simultâneas ($NF=2$) foi gerado o gráfico da Figura 5.3, que representa uma comparação dos resultados obtidos considerando o grupo de risco (Proteção SRLG) e variando o fator de compressão β^{sd} . Quanto maior o número de falhas simultâneas, mais processamento é necessário e a depender de quão conectado é a rede, maior o número de *slots* necessários para rotear toda a demanda. Para duas falhas simultâneas ($NF = 2$) e $\beta^{sd} = 0,2$ e $\beta^{sd} = 0,4$ não foram encontradas soluções.

Para ser possível a aplicação da proteção contra falhas simultâneas, a rede precisa ser bem interconectada entre seus nós para que, mesmo na ocorrência dessas duas falhas, ainda exista possibilidade de caminhos para rotear os dados. Pode ser observado que, sem a proteção SRLG, os valores do número de *slots* são menores, o que já era esperado. Contudo, o aumento é pouco significativo, comparado a vantagem de se ter uma proteção física de um determinado grupo de risco. Ao elevar o valor de β^{sd} , são encontrados melhores valores para o objetivo, uma vez que estamos permitindo que uma maior largura

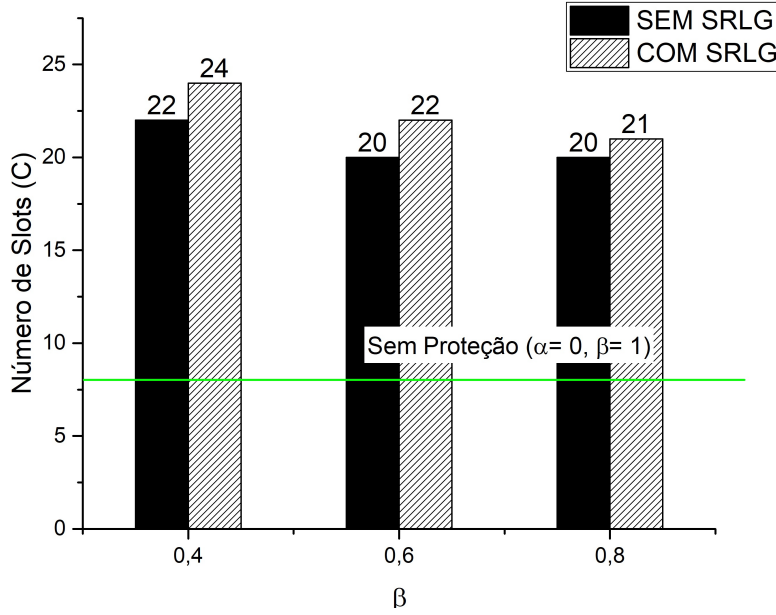


Figura 5.3: Comparação entre as utilizações da proteção SRLG na rede de 6 nós, sem SRNG.

de banda de trabalho comprometida possa ser comprimida. Foi inserido ainda o resultado da simulação nessa rede sem considerar proteção alguma, ou seja, $\alpha^{sd} = 0$, simbolizado pela linha verde exibida na Figura 5.3.

Ainda em relação aos resultados exibidos na Tabela 5.2, podem ser realizadas algumas considerações. Ao aplicar a proteção SRNG, proibindo que o roteamento do caminho principal e caminho de proteção passem por um mesmo nó, ocorreram pequenas alterações em relação ao resultado final, que é a minimização do número de *slots*. Isso é muito bom porque garantimos que em caso de falha em algum nó, não haverá interrupção do tráfego de dados sem aumento considerável de recursos.

Pode ser observado também que a aplicação da proteção SRNG conjuntamente com o caso de ocorrência de duas falhas simultâneas tiveram bons resultados e só foi possível quando o SRNG foi aplicado apenas em um nó. Nesta simulação, foi escolhido o Nó 5 por ter um grau maior, ou seja, possuir muitas conexões. Tanto o quesito de simular duas falhas simultâneas, quanto aplicar SRNG em todos os nós da rede exigem uma alta conectividade da rede. Essa rede didática de 6 nós tem grau mínimo 3, ou seja, o nó com o número menor de conexões é igual a 3.

O gráfico da Figura 5.4 exibe uma comparação dos resultados obtidos considerando a proteção em dois grupos de riscos: SRLG e SRNG, variando o fator de compressão β^{sd} . A proteção SRNG individualmente tem um aumento pouco significativo do número de *slots*, ocorrendo apenas quando $\beta^{sd} = 0,4$; nos demais casos, os valores são os mesmos. Já quando utilizado as proteções SRLG e SRNG conjuntamente, os valores são próximos ou idênticos aos valores do SRLG isolado. Quando $\beta^{sd} = 0,4$, o aumento de *slots* foi de apenas 2, comparando com SRLG, o que indica que é uma forma de proteção adicional com excelente custo-benefício.

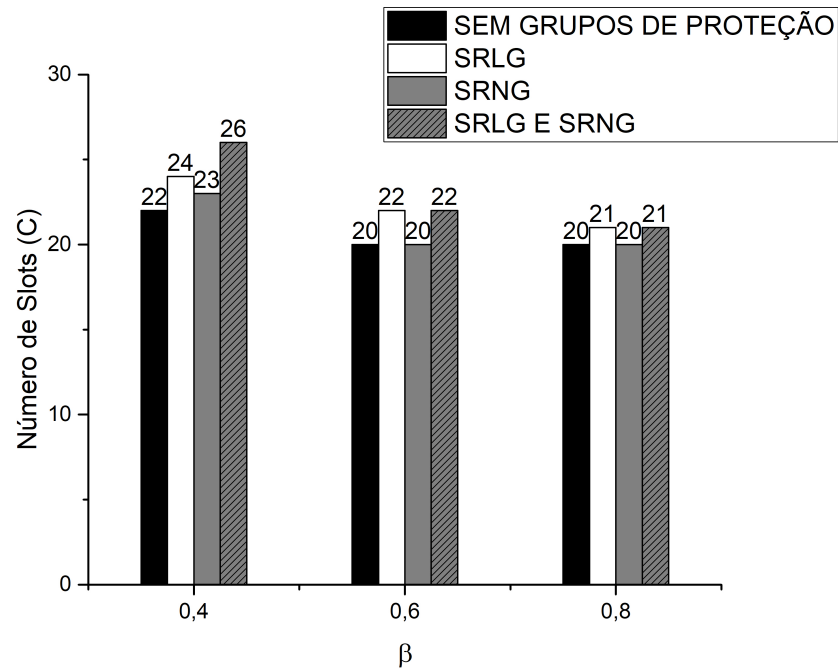


Figura 5.4: Comparação entre as utilizações da proteção SRLG e SRNG na rede didática de 6 nós.

5.2 REDES CONHECIDAS

Foram realizadas simulações nas redes reais: Via Network (Figura 5.5) e Rede Nacional de Ensino e Pesquisa (RNP) (Figura 5.6). Os resultados estão exibidos nas Tabelas 5.3 e 5.4. Nessas redes, além da comparação da inclusão do grupo de risco e o fator de compressão β^{sd} , foi considerado a variação dos formatos de modulação.

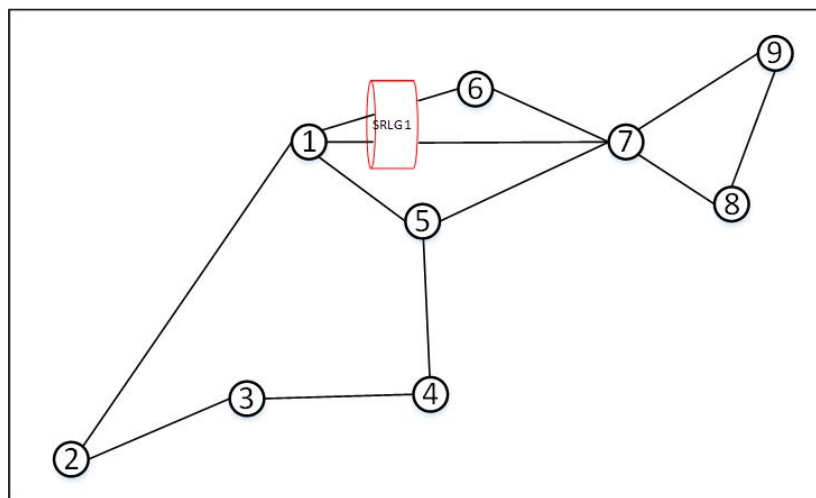


Figura 5.5: Rede Via Network com representação do grupo de risco adotado.

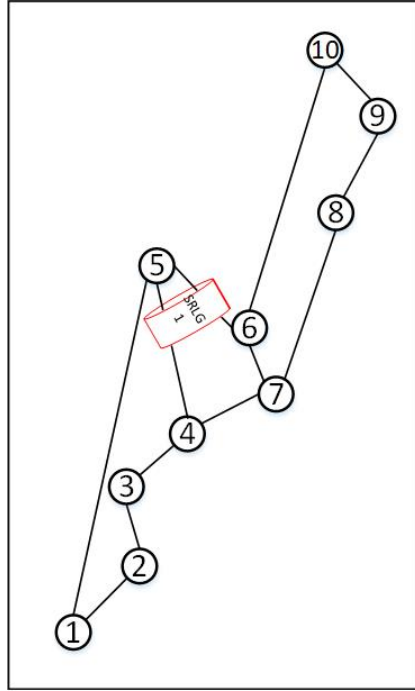


Figura 5.6: Rede RNP com representação do grupo de risco adotado.

São assumidos que três formatos de modulação estão disponíveis ($|FM| = 3$) e seus valores foram baseados na atual literatura. A eficiência espectral de cada formato de modulação, efz , foi dado como $ef1 = 2$, $ef2 = 4$ e $ef3 = 8$ bit/s/Hz. O alcance máximo de cada conexão sob cada formato de modulação z é $dm1 = 4$ saltos, $d_2 = 2$ saltos e $d_3 = 1$ salto. As simulações foram feitas utilizando a formulação de MILP apresentada na Seção 4.1.

Tabela 5.3: Número de *slots* (C) considerando a variação de FM, SRLG e β^{sd} na rede Via Network.

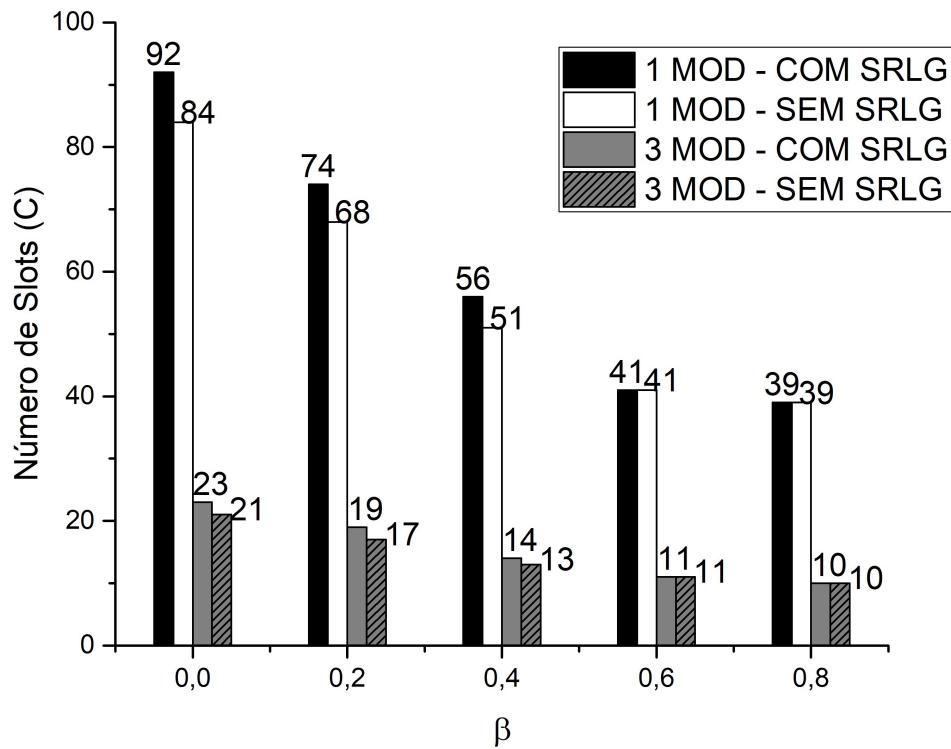
FM	SRLG	$\beta^{sd}=0$	$\beta^{sd}=0,2$	$\beta^{sd}=0,4$	$\beta^{sd}=0,6$	$\beta^{sd}=0,8$
1	SIM	92	74	56	41	39
1	NÃO	84	68	51	41	39
3	SIM	23	19	14	11	10
3	NÃO	21	17	13	11	10

Com os resultados obtidos das simulações e exibidos nas Tabelas 5.3 e 5.4 foram gerados os gráficos das Figuras 5.7 e 5.8. Pode ser notado que, utilizando o método de simulação baseado em três formatos de modulação, onde o programa computa qual o melhor formato a ser utilizado, a quantidade de *slots* necessária é consideravelmente menor. A inclusão do grupo de risco da rede Via Network foi definida entre os nós 5-6 e 5-4 e da rede RNP entre 1-6 e 1-7, conforme representado nas Figuras 5.5 e 5.6. Essas

Tabela 5.4: Número de *slots* (C) considerando a variação de FM, SRLG e β^{sd} na rede RNP.

FM	SRLG	$\beta^{sd}=0$	$\beta^{sd}=0,2$	$\beta^{sd}=0,4$	$\beta^{sd}=0,6$	$\beta^{sd}=0,8$
1	SIM	140	112	84	65	54
1	NÃO	100	80	60	50	50
3	SIM	35	28	21	17	14
3	NÃO	25	20	15	13	13

definições do grupo de risco foram feitas de forma aleatória. Note que os grupos de risco não podem ser inseridos em qualquer enlace. A rede precisa ter conectividade suficiente para rotear o caminho principal e o caminho de proteção considerando o SRLG. Em relação aos resultados, está claro que quanto maior o valor de β^{sd} , menor o número de *slots* utilizados, uma vez que está sendo permitido comprimir essa parte de tráfego de proteção.

**Figura 5.7:** Comparativo das simulações na rede Via Network.

Para uma comparação mais abrangente, é interessante investigar o desempenho da rede quando os três formatos de modulação assumidos ($z1$, $z2$ e $z3$) são comparados a quando apenas um formato de modulação ($z1$) é usado. Isto é mostrado nas Figuras 5.7 e 5.8, usando os dados das Tabelas 5.3 e 5.4. A vantagem de usar múltiplos formatos de modulação é evidente, uma vez que todos os pedidos podem ser estabelecidos com um

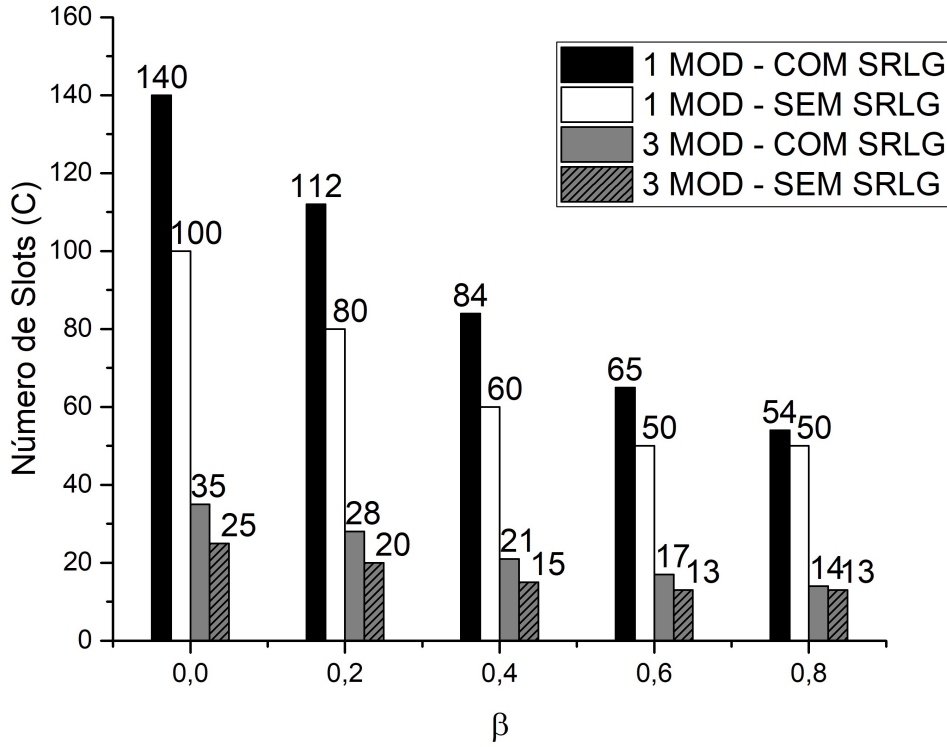


Figura 5.8: Comparativo das simulações na rede RNP.

número consideravelmente menor de número máximo de *slots* na rede, quando comparado com o uso de um único formato de modulação.

Seguindo o mesma lógica da simulação na pequena rede didática de 6 nós, quanto maior o valor de β^{sd} , menor o número de *slots* utilizados, uma vez que permite-se comprimir uma determinada parte da banda de trabalho comprometida. As simulações com os três formatos de modulação incluindo SRLG na rede Via Network deram resultados muito bons, cerca de 10% maiores quando comparados sem o grupo de risco. Já na RNP os resultados tiveram uma diferença um pouco maior, um aumento de cerca de 30%, em média, quando comparada a proteção com e sem a aplicação do SRLG. Isso ocorre devido às características da rede, quanto a conectividade entre os nós. Algumas simulações realizadas na rede didática de 6 nós não puderam ser realizadas nestas duas redes devido ao grau da rede, como é o caso de falhas simultâneas.

Cada escolha de grupo de risco pode resultar em valores diferentes, uma vez que o roteamento do caminho principal e caminho de proteção é condicionado também pelo grupo de risco. Uma segunda simulação na rede Via Network foi realizada considerando o grupo de risco entre os enlaces 6-7 e 5-7. A Figura 5.9 exibe o gráfico do comparativo entre os resultados das simulações realizadas. Os valores foram semelhantes aos encontrados com o primeiro grupo de risco adotado, com alguns valores diferentes, quando $\beta^{sd} = 0,6$ e $\beta^{sd} = 0,8$. Os resultados foram semelhantes pelo fato do segundo grupo adotado ter uma posicionamento próximo ao primeiro. Para realizar a escolha do grupo de risco, os nós desses enlaces devem ter a conectividade mínima suficiente para rotar o caminho

principal e o caminho de proteção de forma disjunta, ou seja, por caminhos diferentes. Portanto, nem todos os enlaces de uma rede pode participar de determinado grupo de risco.

Foram realizadas simulações considerando o SRNG nas duas redes reais naqueles nós que permitem tal restrição, ou seja, permitem o roteamento de duas rotas disjuntas em nós. Por exemplo, na rede Via Network, apenas o nó 7 não pode ser inserido no grupo de risco, uma vez que, para rotear demandas para os nós destinos 8 e 9, com origem no nó 1, por exemplo, é necessário passar pelo nó 7. Os resultados foram os mesmos sem a restrição de SRNG. Isso ocorreu, uma vez que essas redes simuladas são limitadas em questão de possibilidades para roteamento, não havendo casos em que o roteamento do caminho principal e de proteção passasse por um mesmo nó. De toda forma, a aplicação do SRNG garante que os caminhos principais e de proteção não sejam roteados por um mesmo nó em comum.

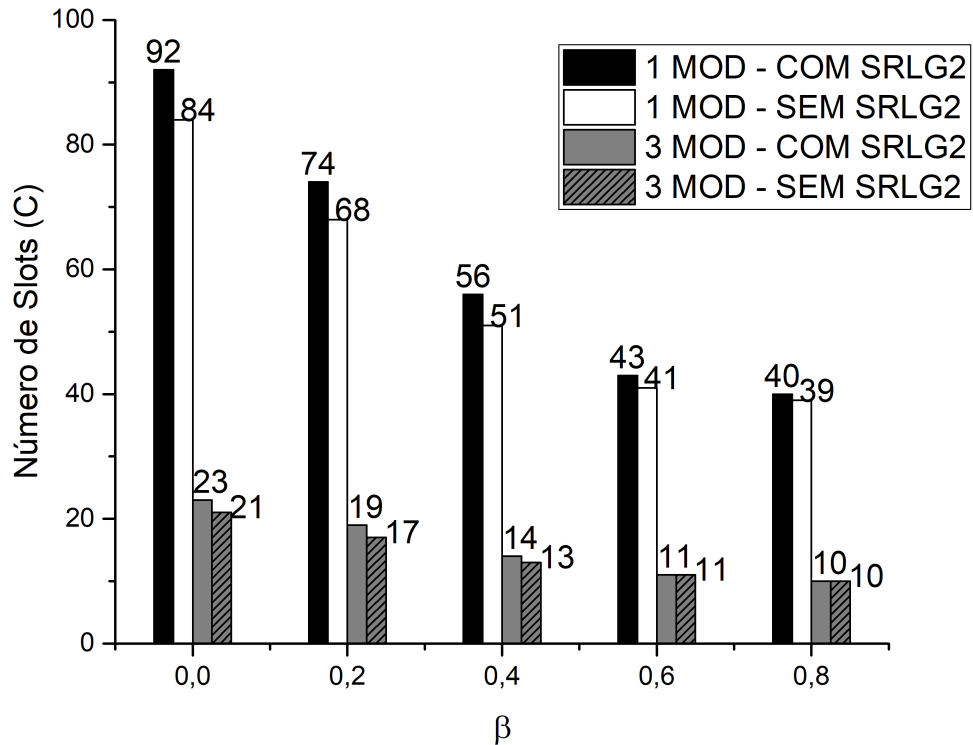


Figura 5.9: Comparativo das simulações na rede Via Network com SRLG 2.

Tabela 5.5: Largura de banda compactada, β^{sd} , para cada par s-d da rede Via Network e RNP.

Caso I (MTS 1)

.	0.6	0.6	0.7	0.7	0.5	0.6	0.1	0.6	0.3
0.6	.	0.6	0.8	0.8	0.7	0.3	0.8	0.9	0.1
0.3	0.2	.	0.3	0.4	0.4	0.5	0.7	0.5	0.8
0.6	0.1	0.5	.	0.3	1.0	0.2	0.1	0.4	0.7
0.5	0.5	0.8	0.2	.	0.4	0.3	0.5	0.0	0.7
0.2	0.5	0.3	0.3	0.2	.	0.1	0.5	0.2	0.3
0.8	0.4	0.5	0.7	0.5	0.9	.	0.5	0.5	0.2
0.3	0.7	0.2	0.5	0.8	0.2	0.9	.	0.9	0.1
0.2	0.2	0.9	0.0	0.3	0.8	0.9	0.1	.	0.4
0.1	0.6	0.1	0.7	0.9	0.5	0.1	0.3	0.0	.

Caso II (MTS 2)

.	0.3	0.8	0.9	0.6	0.9	0.5	0.5	0.0	0.7
0.2	.	0.2	0.1	0.9	0.8	0.1	0.6	0.6	0.2
0.6	0.5	.	0.5	0.2	0.2	0.1	0.1	0.3	0.8
0.1	0.6	0.1	.	0.7	0.9	0.5	0.1	0.3	0.0
0.2	0.6	0.4	0.5	.	0.9	0.9	0.3	0.0	0.3
0.4	0.2	0.7	0.6	0.3	.	0.6	0.5	0.1	0.6
0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.5	.	0.5	0.8	0.9
0.3	0.2	0.6	0.8	0.8	0.7	0.3	.	0.7	0.5
0.6	0.1	0.4	0.3	0.4	0.4	0.5	0.4	.	0.4
0.5	0.5	0.8	0.2	0.3	1.0	0.2	0.1	0.1	.

Caso III (MTS 3)

.	0.5	0.5	0.0	0.7	0.8	0.9	0.9	0.4	0.1
0.9	.	0.6	0.6	0.2	0.4	0.4	0.8	0.9	0.6
0.8	0.1	.	0.3	0.8	0.8	0.9	0.6	0.9	0.3
0.2	0.1	0.1	.	0.0	0.8	0.9	0.3	0.0	0.2
0.9	0.5	0.1	0.3	.	0.0	0.4	0.2	0.1	0.1
0.9	0.9	0.3	0.0	0.3	.	0.8	0.5	0.2	0.8
0.5	0.6	0.5	0.1	0.6	0.7	.	0.6	0.4	0.1
0.7	0.3	0.5	0.8	0.9	0.2	0.6	.	0.4	0.7
0.4	0.5	0.4	0.7	0.5	0.9	0.8	0.7	.	0.4
0.6	0.1	0.5	0.3	1.0	0.2	0.1	0.4	0.7	.

Simulações considerando o valor de β^{sd} gerado de forma randômica também foram realizadas, a fim de tornar a simulação mais próxima da realidade. Os valores utilizados estão exibidos na Tabela 5.5, usando os valores da matriz 9x9 para a rede Via Network que possui 9 nós e os valores da matriz 10x10 na rede RNP que possui 10 nós. As matrizes

de valores foram nomeadas de MTS (*Mixed Traffic Squeezing*).

Os resultados das simulações nas redes RNP e Via Network estão exibidos nas Tabelas 5.6 e 5.7. A estratégia DPP+S (100% de proteção com $\alpha^{sd} = 1$ e com compressão para o par sd, dado por $\beta^{sd} = MTS$) e proteção DPP (100% de proteção com $\alpha^{sd} = 1$ e sem compressão para o par sd dado por $\beta^{sd} = 0$) são comparados.

Tabela 5.6: Número de *slots* (C) considerando a variação de FM, SRLG e três β^{sd} aleatórios na rede Via Network.

FM	SRLG	DPP	DPP+S(MTS1)	DPP+S(MTS2)	DPP+S(MTS3)
1	SIM	92	52	58	55
1	NÃO	84	51	58	55
3	SIM	23	13	15	14
3	NÃO	21	13	15	14

Tabela 5.7: Número de *slots* (C) considerando a variação de FM, SRLG e três β^{sd} aleatórios na RNP.

FM	SRLG	DPP	DPP+S(MTS1)	DPP+S(MTS2)	DPP+S(MTS3)
1	SIM	140	85	85	87
1	NÃO	100	66	68	65
3	SIM	35	22	22	22
3	NÃO	25	17	17	17

A comparação do número máximo de *slots* do espectro utilizado das diferentes abordagens analisadas é mostrada nas Figuras 5.10 e 5.11. A possibilidade de poder comprimir o tráfego em caso de falha, de acordo a cada cliente gera uma considerável economia em número de *slots*. Isso ocorre porque o DPP não se beneficia da compressão do tráfego, como ocorre com o DPP+S. Fica explícito que a utilização de múltiplos formatos de modulação é vantajosa, uma vez que todos os pedidos de roteamento podem ser estabelecidos com um número consideravelmente menor de número máximo de *slots* na rede. E a aplicação dos grupos de risco, ou seja, a proteção SRLG também é eficiente, uma vez que altera em poucos valores o número máximo de *slots* na rede. Na rede RNP ocorre uma discrepância maior em relação aos resultados da utilização SRLG, da mesma forma que ocorreu nas simulações anteriores, nessa mesma rede, com um aumento, em média de 32%. Isso é atribuído às características físicas da rede, no que diz respeito a interconexão de seus nós, uma vez que para rotear a demanda principal e a demanda de proteção na rede são necessárias rotas disjuntas entre si, e quanto mais possibilidades existir em uma rede para rotear essas rotas, a tendência é que utilize menos *slots*.

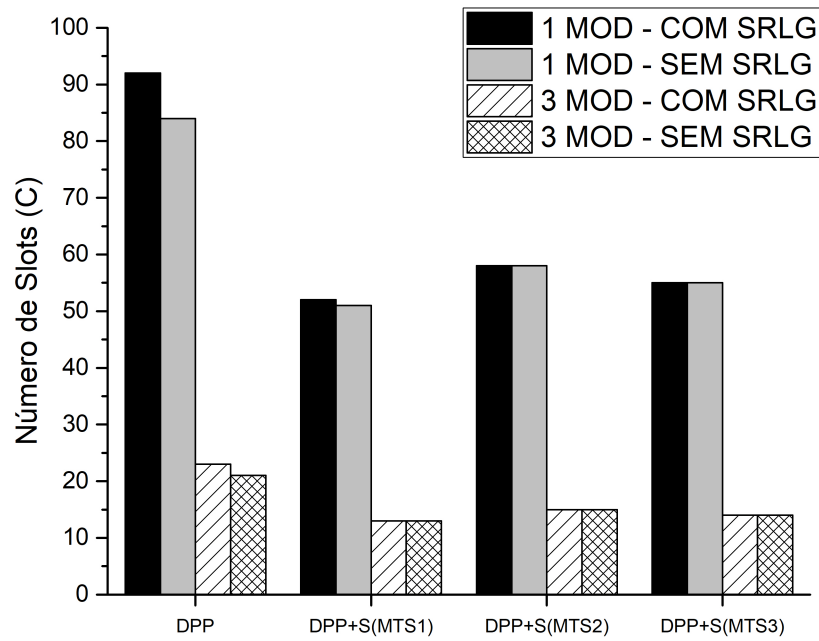


Figura 5.10: Comparativo do número máximo de *slots* do espectro utilizado entre a DPP e DPP+S com matrizes de SLAs randômicos na rede Via Network.

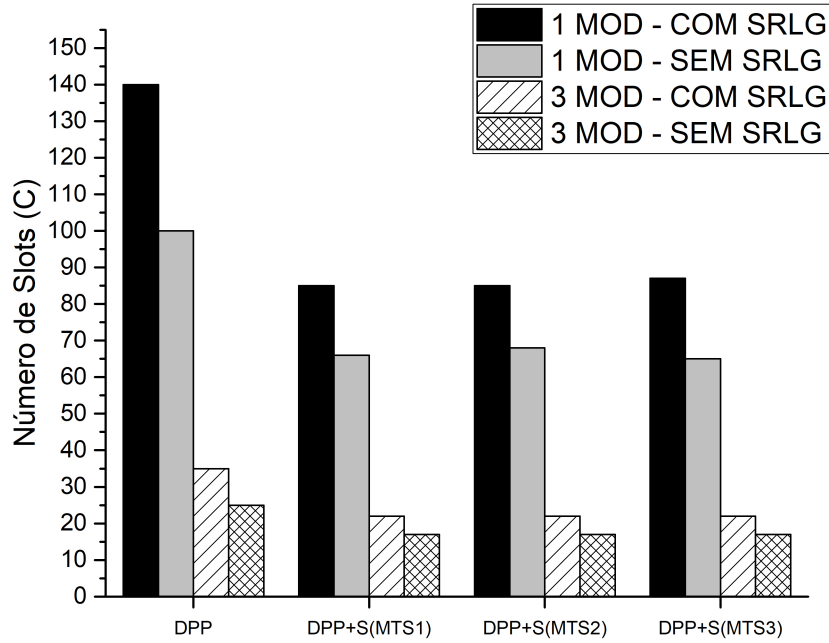


Figura 5.11: Comparativo do número máximo de *slots* do espectro utilizado entre a DPP e DPP+S com matrizes de SLAs randômicos na RNP.

Devido a complexidade do problema para redes grandes, a estratégia apresentada na formulação MILP proposta pode ser muito demorada. Por exemplo, a execução da formulação MILP para a rede mostrada na Figura 5.2 (topologia de 6 nós) em uma máquina Intel i7 2.6 GHz 16 GB levou cerca de 50min para testar cada um dos valores de β^{sd} . Na NSFNET, considerada como uma rede grande, que possui 14 nós e 21 enlaces, foi permitido a simulação por 15 horas e mesmo assim não foi obtido resultados. Logo, o tempo de simulação necessário aumenta consideravelmente, o que enfatiza que um modelo heurístico é necessário para redes moderadas ou grandes.

CONCLUSÕES

6.1 CONCLUSÕES FINAIS

Neste trabalho foi proposta uma estratégia na qual agrupa a proteção SRLG e proteção comprimida em uma mesma EON, além da possibilidade da proteção SRNG. A formulação proposta permite diferentes níveis de sobrevivência para as demandas de tráfego de rede sujeitas a SLAs diferentes, com a variação do fator de compressão β^{sd} . Usando experimentos de simulação no aplicativo AMPL, demonstrou-se a eficácia da formulação completa do MILP. O desempenho obtido em termos de valor objetivo e proteção foi satisfatório, com pequenos aumentos de utilização de *slots*, abrindo oportunidades para novas simulações em redes e grupos de risco diferentes. Simulações em duas redes reais foram realizadas e adicionadas às restrições de formato de modulação, gerando resultados ainda melhores. Para redes de grande dimensão, como a NSFNET o tempo de processamento é maior, mas essa carga de tempo de processamento pode ser aliviada com novas heurísticas que estão sendo estudadas. A compressão da largura de banda do caminho de proteção é uma ótima opção em termos de economia de recursos, como foi visto através das simulações, desde que acordado com o cliente. A proteção SRNG complementa a proteção SRLG, reduzindo as possibilidades de perda de conexão em caso de falhas com um baixo custo, no que diz respeito aos *slots*.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

- A formulação de MILP apresentada nesta dissertação, apesar de útil, pode se tornar inviável de ser usada a depender da rede e do *hardware* disponível. Para resolver este problema, é possível fazer formulações que já comecem com os dados de rotas predeterminadas para as demandas, de forma a considerar menos variáveis no problema e chegar a um resultado de forma mais rápida.
- Simulações cada vez mais reais podem ser realizadas se for possível obter o histórico de falhas de natureza física das redes, tanto dos enlaces, quanto dos nós, para que os grupos de risco possam ser definidos com maior exatidão.

- Simulações também podem ser realizadas utilizando do conceito de correlacionar SRLGs com falhas geográficas utilizando da formulação de MILP desenvolvida.
- A formulação obteve bons resultados para redes pequenas e médias em que foi testada. Contudo, para redes de grande dimensão, a formulação de MILP não é computacionalmente viável, necessitando do desenvolvimento de heurísticas, pois podem resolver o problema em um espaço muito mais curto de tempo. A diferença de tempo de processamento é da ordem de dias e não cabe fazer comparações precisas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANATEL. *Acessos SCM por Tecnologia*. 2019. See <http://www.anatel.gov.br/dadosabertos/PDA/Acessos/SCM/Tecnologia/Tecnologia.zip>.
- ASSIS, K. et al. Sla formulation for squeezed protection in elastic optical networks considering the modulation format. *Journal of Optical Communications and Networking*, v. 11, 04 2019.
- ASSIS, K. et al. Projeto de topologia virtual em redes ópticas: Uma abordagem para evitar a interferência entre canais. In: *WGRS-XV Workshop de Gerência e Operação de Redes e Serviços*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 87–100.
- ASSIS, K. D. et al. Ivtd-iterative virtual topology design to maximize the traffic scaling in wdm networks. In: *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores-SBRC, Fortaleza-CE. SBRC05*. [S.l.: s.n.], 2005. v. 2, p. 843–854.
- BHATTACHARYYA, S. et al. Service availability in ip networks. 10 2003.
- CHRISTODOULOPOULOS, K.; TOMKOS, I.; VARVARIGOS, E. A. Elastic bandwidth allocation in flexible ofdm-based optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 29, n. 9, p. 1354–1366, 2011.
- DHARANIKOTA, S.; JAIN, R.; XUE, Y. Achieving diversity in optical networks using shared risk groups. *Nayna Networks Technical Report*, 10 2001.
- DJORDJEVIC, I. B.; VASIC, B. Orthogonal frequency division multiplexing for high-speed optical transmission. *Optics Express*, Optical Society of America, v. 14, n. 9, p. 3767–3775, 2006.
- FIGUEIREDO, G. B.; XAVIER, E. C.; FONSECA, N. L. da. Um algoritmo ótimo para escalonamento de canais em lote em redes obs. In: *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 45–58.
- GERSTEL, O.; RAMASWAMI, R. Optical layer survivability: a services perspective. *IEEE Communications Magazine*, v. 38, n. 3, p. 104–113, March 2000.
- GIRÃO-SILVA, R. et al. Shared risk link group disjointness and geodiverse routing: A trade-off between benefit and practical effort. *Networks*, v. 75, 02 2020.
- ILOG, Inc. *ILOG CPLEX: High-performance software for mathematical programming and optimization*. 2019. See <https://www.ibm.com/analytics/cplex-optimizer>.

ITU-T-G.7715/Y.1706. Architecture and requirements for routing in the automatically switched optical networks. 2002.

JAYA, T.; GOPINATHAN, E.; RAJENDRAN, V. Comparison of ber performance of various adaptive modulation schemes in ofdm systems. *Indian Journal of Science and Technology*, v. 9, n. 40, p. 1–7, 2016.

JINNO, M. et al. Distance-adaptive spectrum resource allocation in spectrum-sliced elastic optical path network [topics in optical communications]. *IEEE Communications Magazine*, IEEE, v. 48, n. 8, p. 138–145, 2010.

JINNO, M. et al. Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: architecture, benefits, and enabling technologies. *IEEE Communications Magazine*, v. 47, n. 11, p. 66–73, November 2009.

JONCIC, M.; HAUPT, M.; FISCHER, U. Standardization proposal for spectral grid for vis wdm applications over si-pof. In: *Proceedings of POF congress*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 351–355.

JR, J. L. et al. Proteção dedicada para redes Ópticas elásticas considerando efeitos de camada física. In: *Anais do XXXV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*. Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2017. ISSN 2177-9384. Disponível em: <https://sol.sbc.org.br/index.php/sbrc/article/view/2665>.

Kini, S. et al. Fast recovery from dual-link or single-node failures in ip networks using tunneling. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, v. 18, n. 6, p. 1988–1999, 2010.

KLINKOWSKI, M.; WALKOWIAK, K. Routing and spectrum assignment in spectrum sliced elastic optical path network. *IEEE Communications Letters*, v. 15, p. 884–886, 08 2011.

LUO, X.; WANG, B. Diverse routing in wdm optical networks with shared risk link group (srlg) failures. *DRCN 2005*. *Proceedings.5th International Workshop on Design of Reliable Communication Networks, 2005.*, p. 8 pp.–, 2005.

MESQUITA, L.; ASSIS, K. Análise sobre redes Ópticas com heurísticas de roteamento, modulação e alocação de espectro para tráfego incremental. In: *Anais do XXXVII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*. Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2019. p. 473–486. ISSN 2177-9384. Disponível em: <https://sol.sbc.org.br/index.php/sbrc/article/view/7380>.

MUKHERJEE, B. *Optical WDM networks*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2006.

OKI, E. *Linear programming and algorithms for communication networks: a practical guide to network design, control, and management*. [S.l.]: CRC Press, 2012.

- OLIVEIRA, H.; FONSECA, N. Proteção em redes Ópticas elásticas com multiplexação espacial. In: *Anais Estendidos do XXXVII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*. Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2019. p. 161–168. ISSN 2177-9384. Disponível em: https://sol.sbc.org.br/index.php/sbrc/_estendido/article/view/7783.
- OLIVEIRA, H. M.; FONSECA, N. L. da. Routing, spectrum, core and modulation level assignment algorithm for protected sdm optical networks. In: IEEE. *GLOBECOM 2017-2017 IEEE Global Communications Conference*. [S.l.], 2017. p. 1–6.
- PAOLUCCI, F. et al. Multipath restoration and bitrate squeezing in sdn-based elastic optical networks [invited]. *Photonic Network Communications*, v. 28, p. 1–13, 08 2014.
- RAK, J.; HEEGAARD, P.; HELVIK, B. Resilience of communication networks to random failures and disasters: An optimization perspective. *Networks*, v. 75, 03 2020.
- Rak, J. et al. Recodis: Resilient communication services protecting end-user applications from disaster-based failures. In: *2016 18th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–4.
- RAMAMURTHY, S.; SAHASRABUDDHE, L.; MUKHERJEE, B. Survivable wdm mesh networks. *Journal of Lightwave Technology*, v. 21, n. 4, p. 870–883, April 2003.
- RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K.; SASAKI, G. *Optical networks: a practical perspective*. [S.l.]: Morgan Kaufmann, 2009.
- REIXATS, L. N. Design and implementation of low complexity adaptive optical ofdm systems for software-defined transmission in elastic optical networks. Universitat Politècnica de Catalunya, 2014.
- ROSÁRIO, J. P. G. F. Mb-ofdm metropolitan networks with concatenation of optical add-drop multiplexers. 2014.
- SALEH, A.; SIMMONS, J. Technology and architecture to enable the explosive growth of the internet. *IEEE Communications Magazine*, v. 49, p. 126–132, 01 2011.
- SANTOS, A. et al. Roteamento e alocação de espectro em redes Ópticas: O conceito slice. In: . [S.l.: s.n.], 2012.
- SANTOS, A. F. d. Algoritmos para roteamento e alocação de espectro em redes Ópticas elásticas. *Tese de doutorado Universidade Federal da Bahia (UFBA)*, 2015.
- SANTOS, I. G. et al. Um mecanismo para potencialização da agregação de tráfego em redes ópticas elásticas. In: *Anais do XXXVII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*. Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2019. p. 321–334. ISSN 2177-9384. Disponível em: <https://sol.sbc.org.br/index.php/sbrc/article/view/7369>.
- SHAO, X. et al. Shared partial path protection in wdm networks with shared risk link groups. *Photonic Network Communications*, v. 16, p. 221–231, 01 2008.

SHEN, G.; GUO, H.; BOSE, S. K. Survivable elastic optical networks: Survey and perspective (invited). *Photonic Netw. Commun.*, Springer-Verlag New York, Inc., Secaucus, NJ, USA, v. 31, n. 1, p. 71–87, fev. 2016. ISSN 1387-974X. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s11107-015-0532-0>.

SONE, Y. et al. Bandwidth squeezed restoration in spectrum-sliced elastic optical path networks (slice). *J. Opt. Commun. Netw.*, OSA, v. 3, n. 3, p. 223–233, Mar 2011. Disponível em: <http://jocn.osa.org/abstract.cfm?URI=jocn-3-3-223>.

STERBENZ, J. P. G. et al. Resilience and survivability in communication networks: Strategies, principles, and survey of disciplines. *Comput. Netw.*, Elsevier North-Holland, Inc., USA, v. 54, n. 8, p. 1245–1265, jun. 2010. ISSN 1389-1286. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.03.005>.

SUURBALLE, J. W.; TARJAN, R. E. A quick method for finding shortest pairs of disjoint paths. *Networks*, Wiley Online Library, v. 14, n. 2, p. 325–336, 1984.

WANG, Y.; CAO, X.; PAN, Y. A study of the routing and spectrum allocation in spectrum-sliced elastic optical path networks. In: *2011 Proceedings IEEE INFOCOM*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1503–1511.

WU, J.; NING, Z.; GUO, L. Energy-efficient survivable grooming in software-defined elastic optical networks. *IEEE Access*, v. 5, p. 6454–6463, 2017.

Xiaowen Chu; Jiangchuan Liu; Zhensheng Zhang. Analysis of sparse-partial wavelength conversion in wavelength-routed wdm networks. In: *IEEE INFOCOM 2004*. [S.l.: s.n.], 2004. v. 2, p. 1363–1371 vol.2.

Yang, Y.; Mi, H.; Zhang, X. A minimum cost active and backup path algorithm with srlg constraints. In: *2012 Sixth International Conference on Internet Computing for Science and Engineering*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 211–216. ISSN 2330-9857.

ZHANG, P.; HUA, Y.; ZHANG, Y. The study of protection algorithms with shared risk link group (srlg) constraint. In: *2016 IEEE Optoelectronics Global Conference (OGC)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–3.

ZHAO, J. et al. Distance-adaptive routing and spectrum assignment in ofdm-based flexible transparent optical networks. In: *Photonic Network Communications*. [S.l.: Springer, 2014. v. 27, n. 3, p. 119–127.