

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**METODOLOGIA PARA EVOLUÇÃO TOPOLÓGICA DE REDES
ÓPTICAS DE TRANSMISSÃO - IMPLANTAÇÃO DA TECNOLOGIA
ASON**

ALEXANDRE PIQUEIRA

ORIENTADOR: HUMBERTO ABDALLA JUNIOR
CO-ORIENTADOR: ORLANDO TADEU RUSCHEL

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PUBLICAÇÃO: PPGENE.DM - 059/2008

BRASÍLIA/DF: OUTUBRO – 2008

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**METODOLOGIA PARA EVOLUÇÃO TOPOLOGICA DE REDES
ÓPTICAS DE TRANSMISSÃO
IMPLANTAÇÃO DA TECNOLOGIA ASON
ALEXANDRE PIQUEIRA**

**TRABALHO SUBMETIDO AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA ELÉTRICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
ENGENHARIA ELÉTRICA.**

APROVADA POR:

**Prof. Dr. Humberto Abdalla Junior, ENE/UNB
(Orientador)**

**Prof. Dr. Luis Fernando Ramos Molinaro, ENE/UNB
(Examinador Interno)**

**Prof. Dr. Leonardo Guerra de Rezende Guedes, UFG
(Examinador Externo)**

BRASÍLIA/DF, 30 DE OUTUBRO DE 2008

FICHA CATALOGRÁFICA

PIQUEIRA, ALEXANDRE

METODOLOGIA PARA EVOLUÇÃO TOPOLÓGICA DE REDES ÓPTICAS DE TRANSMISSÃO - IMPLANTAÇÃO DA TECNOLOGIA ASON. [Distrito Federal] 2008.

xii, 83p., 210 x 297 mm

(ENE/FT/UnB, Mestre, Engenharia Elétrica, Comunicação 2008).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Redes Ópticas de Transmissão

2. Otimização de redes

3. Topologia

4. Projeto de redes

I. ENE/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

PIQUEIRA, A. (2008). Metodologia para evolução topológica de redes ópticas de transmissão – implantação da tecnologia ASON

Publicação PPGENE.DM -059/08, Departamento Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, DF, 83p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: ALEXANDRE PIQUEIRA.

TÍTULO: METODOLOGIA PARA EVOLUÇÃO TOPOLÓGICA DE REDES ÓPTICAS DE TRANSMISSÃO - IMPLANTAÇÃO DA TECNOLOGIA ASON.

GRAU: Mestre

ANO: 2008

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Alexandre Piqueira

Av. Parque Águas Claras, 2735, Bloco A, Apt. 1003

Brasília - DF

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação à minha esposa,
aos meus pais e irmãos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a DEUS, pela força e capacidade a mim conferidas para desenvolver este trabalho.

Agradeço aos amigos Emerson Pereira de Olinda, Ricardo Martins Lemos, Mauro Teixeira, Laone Poletto, Emerson Torres, Esdras Simões, Adriano Luis Nishiyama e Carlos Cesar Santana, por me incentivar a continuar.

Agradeço a minha Mãe, Ana Maria, por não acreditar em mim quando disse que talvez não terminaria esta Dissertação. Ao meu Pai, Antônio Piqueira, por me ensinar a persistir e acreditar que com muito suor a recompensa sempre vem.

Agradeço ao meu diretor, Dirval Antonio Peres, que tornou possível a realização deste trabalho, ao me incentivar e ofertar a divisão das minhas tarefas com outros colegas, reduzindo a sobrecarga de trabalho.

Agradeço a minha esposa Daniela, por apoiar minhas decisões, por assumir todas as responsabilidades do dia-a-dia para que eu pudesse me dedicar exclusivamente a esta dissertação, por me alimentar enquanto estudava, por tolerar minha impaciência e por não reclamar (ainda!) dos 6 quilos a mais, conquistados por ter parado com as atividades físicas. Sua participação foi fundamental e aparece em cada palavra deste trabalho. Obrigado pelo diário incentivo amoroso e incondicional.

RESUMO

Redes de transmissão ópticas, de última geração, como a ASON – Automatic Switched Optical Network, proporcionam facilidades de operação, robustez às redes e novos desafios para os projetistas.

Projetar redes ópticas de transmissão de dados, capazes de suportar múltiplas falhas com o menor custo possível e utilizando métodos de proteção aplicados em uma topologia em malha, é uma tarefa complexa que requer auxílio computacional.

Esta complexidade resulta da análise obrigatória de cada uma das centenas, ou até milhares, de rotas possíveis para se levar demandas de tráfego de cada par “origem-destino”, visando encontrar a melhor distribuição, reduzindo a quantidade de banda a ser provisionada para fins de recuperação de falhas.

O modelo de distribuição de tráfego proposto foi baseado em um híbrido entre proteção de caminho, 1:1 ou 1+1, e recuperação de falha através de reroteamento. Conhecido como PRC – Proteção e Restauração Combinadas, quando há uma combinação de falhas que interrompa o tráfego, a restauração de Caminho é acionada para aprovisionar automaticamente uma nova rota entre os nós de origem e de destino.

Os resultados das simulações indicam que, para se alcançar valores máximos de recuperação contra duplas falhas, a conectividade entre os nós da rede é o mais importante. Em redes de topologias aleatórias com grau de conectividade médio pouco abaixo de 3, a proteção de caminho apresentou baixa imunidade à dupla falha de enlaces, em torno de 68% a 72%, e baixa reserva de banda, enquanto que a Proteção e Restauração Combinadas apresentam 90-97% de imunidade e reserva de banda cerca de 47% maior que o encontrado anteriormente. Para reduzir a quantidade de banda reservada para recuperação após dupla falha de enlaces, criamos o modelo PRC-RE, Proteção e Restauração Combinadas – Reuso de Enlace, e alcançamos a mesma imunidade do PRC, porém, com reserva de banda entre 16% e 25% maior que a alcançada pela proteção de caminho.

Palavras-chave: SDH, ASON, Proteção e Restauração Combinadas, Múltiplas falhas, Reuso de Enlaces, MILP, Distribuição de Tráfego, Rede em Malha, Proteção 1:1 e 1+1.

ABSTRACT

The latest generation optical transmission networks, such as ASON - Automatic Switched Optical Network, provide facilities for operation, robustness to networks and new challenges for designers.

Designing optical networks for data transmission, capable of supporting multiple failures with minimal cost using methods of protection applied in a mesh topology, is a complex task that requires computer aid.

This complexity result from mandatory review of each hundreds or even thousands, of possible routes to take traffic demands of each pair "origin-destination", aimed at finding the best distribution, reducing the amount of bandwidth to be provisioned for failures recover.

The traffic distribution model proposed was based on a hybrid between path protection, 1:1 and 1 +1, and failure recovery through rerouting. In PRC - Protection and Restoration Combined, when there is a combination of failures that disrupts traffic, the path restoration process is automatically triggered to supply a new route between the nodes of origin and destination.

Simulations results indicate that to achieve maximum recovery from double failures, the connectivity between the nodes of the network is the most important. In Random networks topologies with a degree of connectivity average just under 3, the path protection had low immunity to the double failures of links, around 68% to 72%, and low bandwidth allocation, while the Protection and Restoration Combined have 90-97% of immunity and bandwidth allocation about 47% higher than the previously found. To reduce the amount of bandwidth reserved for recovery after links double failures, created the model PRC-RE, Proteção e Restauração Combinadas – Reuso de Enlace, and achieve the same immunity of the PRC, however, with reservation of bandwidth between 16% and 25 % higher than that achieved by path protection.

Key words: SDH, ASON, Proteção e Restauração Combinadas, Múltiplas falhas, Reuso de Enlaces, MILP, Distribuição de Tráfego, Rede em Malha, Proteção 1:1 e 1+1.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	O PROBLEMA	7
1.2	RESULTADOS ESPERADOS	7
1.3	SEQUÊNCIA DO TRABALHO	8
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	8
2	PROTEÇÃO DE TRÁFEGO E MULTIPLAS FALHAS EM REDES ASON.....	10
2.1	ASON.....	10
2.1.1	<i>Arquitetura de uma rede óptica comutável automaticamente</i>	<i>11</i>
2.1.2	<i>Mecanismos de Recuperação da Rede ASON.....</i>	<i>13</i>
2.2	TOPOLOGIA	18
2.3	TEORIA DE GRAFOS.....	18
2.4	ESTRUTURAS MATRICIAIS	22
2.5	PROGRAMAÇÃO LINEAR	25
2.5.1	<i>Modelagem de Problemas</i>	<i>27</i>
2.5.2	<i>Software para solução de Programação Linear – LPSOLVE IDE.....</i>	<i>29</i>
3	PROPOSTA PARA DISTRIBUIÇÃO DE TRÁFEGO E IMUNIZAÇÃO CONTRA DUPLAS FALHAS EM REDES ASON.....	31
3.1	IMUNIZAÇÃO EFICIENTE CONTRA DUPLA FALHA	32
3.2	MODELO PRC-SRE E PRC-RE.....	34
3.3	EXEMPLO DE ESCRITA DO MODELO	37
3.4	AUTOMAÇÃO DO PROCESSO DE ESCRITA DO MODELO	42
3.4.1	<i>Macro para transformação da matriz de tráfego em conjunto D.....</i>	<i>49</i>
3.4.2	<i>Macro para descoberta de caminhos.....</i>	<i>49</i>
3.4.3	<i>Macro para listagem de caminhos por enlace.....</i>	<i>52</i>
3.4.4	<i>Macro para escrita do modelo</i>	<i>53</i>
3.4.5	<i>Macro para Interpretação do resultado LP_Solve.....</i>	<i>57</i>
3.5	HEURÍSTICO DUPLA FASE.....	58
3.6	METODOLOGIA PROPOSTA	59
4	VALIDAÇÃO DOS MODELOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	64
4.1	VALIDAÇÃO DOS MODELOS	64
4.1.1	<i>Critério da Consistência.....</i>	<i>66</i>
4.1.2	<i>Critério da Confiabilidade</i>	<i>68</i>
4.1.3	<i>Critério da Eficiência</i>	<i>70</i>
4.1.4	<i>Critério da Equivalência</i>	<i>72</i>
4.1.5	<i>Critério da Precisão</i>	<i>73</i>
4.2	ANÁLISE DOS RESULTADOS	75

5	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	79
5.1	CONCLUSÃO	79
5.2	TRABALHOS FUTUROS	80

INDICE DE TABELAS

Tabela 2-1 - Exemplo de lista de incidência.....	21
Tabela 2-2 - Matriz de adjacência com rótulos de enlaces.....	22
Tabela 2-3 - Matriz de incidência para o grafo da Figura 2.7	23
Tabela 2-4 - Matriz laplaciana para grafo da Figura 2.7	24
Tabela 4-1 – Demanda de Tráfego	65
Tabela 4-2 – Informações adicionais para validação.....	66
Tabela 4-3 – Resultado do modelo PRC-SRE.....	66
Tabela 4-4 – Resultado do modelo PRC-RE.....	67
Tabela 4-5 – Resultado do modelo Proteção de Caminho (PC).....	71
Tabela 4-6 – Imunidade a dupla falha por modelo.....	71
Tabela 4-7 – Acréscimo de Banda por Modelo.....	71
Tabela 4-8 – Imunidade contra dupla falha por modelo.....	72
Tabela 4-9 – Matriz de tráfego	73
Tabela 4-10 – Comparação do uso da Heurística Dupla Fase.....	75
Tabela 4-11 – Demandas de Tráfego.....	76
Tabela 4-12 – Necessidade de banda x aumento do indicador de imunidade	77
Tabela 4-13 – Banda livre por enlace para garantir a Imunidade projetada.....	77
Tabela 4-14 – Demandas interrompidas x duplas falhas na rede	78

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – (a) Rede fisicamente em malha e logicamente protegida por anéis, (b) Rede física e logicamente protegida em malha	4
Figura 1.2 – Diferença entre PRC-SRE e PRC-RE	6
Figura 2.1 - Arquitetura de uma Rede Óptica Comutada Automaticamente.....	13
Figura 2.2 – Restauração Distribuída – reparo Global	17
Figura 2.3 – Restauração Distribuída – reparo local	17
Figura 2.4 – Restauração Distribuída – Pré-planejada	17
Figura 2.5 - (a) Representação de um espaço, (b) espaço topológico e (c) espaço métrico.	18
Figura 2.6 - Representação de um grafo.....	20
Figura 2.7- (a) Um grafo G não-orientado com 5 nós e 7 enlaces. (b) Representação de G por lista de adjacência. (c) Representação de G por matriz de adjacência. Adaptado de Cormen (2001).....	21
Figura 2.8- processo de formulação e validação de um modelo matemático.....	28
Figura 2.9 – Interface gráfica do LP_Solve IDE	30
Figura 3.1- Rede exemplo	37
Figura 3.2- Matriz de tráfego.....	38
Figura 3.3- Planilha Demanda_x_Estações	43
Figura 3.4- Planilha Estações-DE_PARA	44
Figura 3.5- Planilha Projeto.....	44
Figura 3.6- Planilha Rede	44
Figura 3.7- Planilha Rotas	45
Figura 3.8- Planilha Demandas	45
Figura 3.9- Planilha Script.....	46
Figura 3.10- Planilha Resultado_LP-Solve	46
Figura 3.11- Planilha Resultado	48

Figura 3.12- Matriz incidência	50
Figura 3.13- Dados de entrada e projetos possíveis	61
Figura 4.1- Rede escolhida para validação dos modelos.....	65
Figura 4.2- Análise do critério da Confiabilidade para o modelo PRC-SRE.....	69
Figura 4.3- Análise do critério da Confiabilidade para o modelo PRC-RE	70
Figura 4.4- Rede 6n9e13d – 6 nós, 9 enlaces e 13 demandas	74
Figura 4.5- Rede 6n10e13d – 6 nós, 10 enlaces e 13 demandas	74
Figura 4.6- Rede de transmissão óptica de uma grande Operadora	76

1 INTRODUÇÃO

Evoluir as redes de transmissão ópticas, para suportar novos requisitos de serviços, tais como disponibilidade e tempo de recuperação, e prover processos automáticos de provisionamento, visando reduzir o prazo da entrega do serviço ao cliente é uma necessidade crescente das grandes operadoras, dado o mercado cada vez mais competitivo.

A proteção do tráfego através da rede de transporte óptico traz vantagens incontestáveis, que vão desde o tempo de comutação, inferior a 50 milissegundos, até a independência quanto aos protocolos utilizados nas camadas superiores.

Estas são as principais razões para a constante evolução das tecnologias de transmissão, e que levaram à padronização, pelo ITU-T, da Rede Óptica Automaticamente Comutada – ASON.

A promessa de alocação dinâmica de banda via gerenciamento centralizado e/ou através de requisições advindas de equipamentos das camadas superiores, de mecanismos de proteção extremamente rápidos, de mecanismos de restauração através de caminhos pré ou pós-determinados, de interfaces padronizadas que permitirão um ambiente multi-fornecedor com gerenciamento centralizado, é tentadora, mas demanda cuidados quanto aos impactos sobre a rede existente e aos processos atuais de projeto da rede para atender às demandas atuais e futuras.

A base desta dissertação está na topologia que dará suporte à nova tecnologia e nos mecanismos de proteção disponibilizados, que nos permite distribuir o tráfego de clientes de forma a maximizar a imunidade à dupla falha com a menor alocação de banda possível e, conseqüentemente com menor custo.

Ao observar a topologia de qualquer empresa de telecomunicações identifica-se uma malha, porém, a grande maioria é composta por anéis sobrepostos e interconectados, predominantemente utilizando a tecnologia de transmissão SDH – Hierarquia Digital Síncrona, com ou sem WDM – Multiplexação por Comprimento de Onda. Desta forma, podemos dizer que fisicamente a rede é uma Malha e logicamente ela é composta por “n” anéis, vide Figura 1.1.

A ASON utiliza-se da topologia em Malha, tanto física como lógica, para prover conectividade e proteção ao tráfego da rede. Novos esquemas de proteção, SBPP, Shared Backup Path Protection, e SBLP, Shared Backup Link Protection permitem reduzir entre 30% a 50% a banda alocada na rede, comparadas a proteção em anel do SDH (Synchronous Digital Hierarchy), e são amplamente utilizados pelos fabricantes para promover esta nova tecnologia.

Configuração de serviços com menos recursos (banda de transmissão) de rede e redução de custos operacionais através de ferramentas automáticas de provisionamento, estimulam as Empresas de Telecomunicações a adquirir a nova tecnologia, porém, há um ponto a se considerar: os ganhos obtidos com estes métodos de compartilhamento de banda para proteção tornam a conectividade entre os nós de origem e de destino mais vulnerável a múltiplas falhas, sendo agravado à medida que a distância entre os nós origem e destino aumenta.

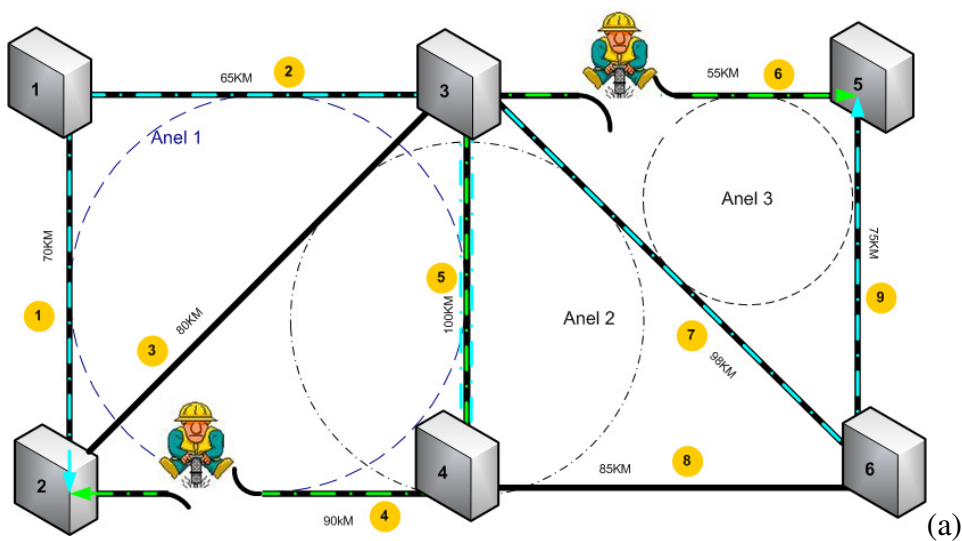
Demandas de tráfego entre localidades muito distantes passam a ser um problema para a ASON quando os requisitos do serviço referentes à disponibilidade e tempo de comutação são muito alta (99,999%) e muito rápido (menos de 50 milisegundos), respectivamente. Comutar do caminho principal para o secundário em menos de 50 milisegundos é tarefa para mecanismos que alocam sempre dois caminhos distintos (não compartilham nenhum enlace e/ou nó da rede) entre origem e destino, seja enviando ou não uma cópia do sinal no caminho secundário (Proteção 1+1 ou 1:1, respectivamente). Para o receptor, cabe a tarefa de selecionar o melhor sinal, caso esteja recebendo-o tanto pelo caminho principal como pelo secundário, ou enviar uma mensagem para o transmissor comutar para o caminho secundário ao detectar perda ou degradação do sinal no caminho principal.

O tipo de proteção descrito acima está disponível na ASON e, com isso, garante o tempo de comutação inferior a 50milisegundos, mas não garante imunidade a múltiplas falhas na rede, sendo mais vulnerável que o cenário anterior, onde as redes são fisicamente em malha e logicamente protegidas por anéis.

Voltando às redes atuais, que são fisicamente em malha e logicamente em anel, para que um serviço seja provisionado entre um nó de origem e um de destino que estejam muito distantes, o tráfego do cliente precisará atravessar vários anéis na maioria das vezes, colaborando para alcançarmos bons índices de imunidade contra múltiplas falhas de enlaces, uma vez que cada anel consegue evitar a interrupção do serviço caso um enlace,

que o compõe, venha a falhar. Apenas se múltiplas falhas de enlaces ocorrerem num mesmo anel é que haverá interrupção do serviço. A Figura 1.1 (a) mostra um exemplo onde o tráfego entre o nó 2 e o nó 5 passa pelos anéis 2 e 3, que são compostos pelos nós 2, 3, 4 e 6 e 3, 5 e 6, respectivamente. Ao detectar uma falha no enlace 4, o anel 2 comuta o tráfego no sentido oposto à falha fazendo com que ele passe pelos nós 1, 3, 4 e 3, onde é entregue ao anel 3. O mesmo ocorre para o anel 3 ao perceber a falha no enlace 6, enviando o tráfego até o destino (nó 5) através do nó 6.

Aplicando a situação acima a uma rede ASON e utilizando a proteção de caminho, 1+1 ou 1:1, levaremos o mesmo serviço do nó origem ao nó destino seleccionando dois caminhos distintos onde não há nenhum enlace em comum entre eles. Ocorre que, como não há anéis para proteger nenhum enlace de cada caminho, as múltiplas falhas de enlaces que antes não interrompiam o tráfego passam a interrompê-lo. O problema se agrava à medida que a distância entre origem e destino aumenta, pois também aumentam as chances de uma dupla falha atingir tanto o caminho principal quanto o secundário. A Figura 1.1 (b) traz um exemplo onde o tráfego entre os nós 2 e 5 utiliza um par de caminhos distintos compostos pelos enlaces 3 e 6 e 4, 8 e 9, denominados principal e reserva, respectivamente. Supondo que o caminho principal seja afetado pela falha no enlace 6, o mecanismo de proteção automaticamente comuta para o caminho reserva. Quando o caminho reserva é afetado pela falha no enlace 8, sendo que o enlace 6 continua em falha, o tráfego é interrompido, mesmo havendo outros caminhos para levar o tráfego do nó 2 ao nó 5, com por exemplo utilizando os enlaces 1, 2, 7 e 9.



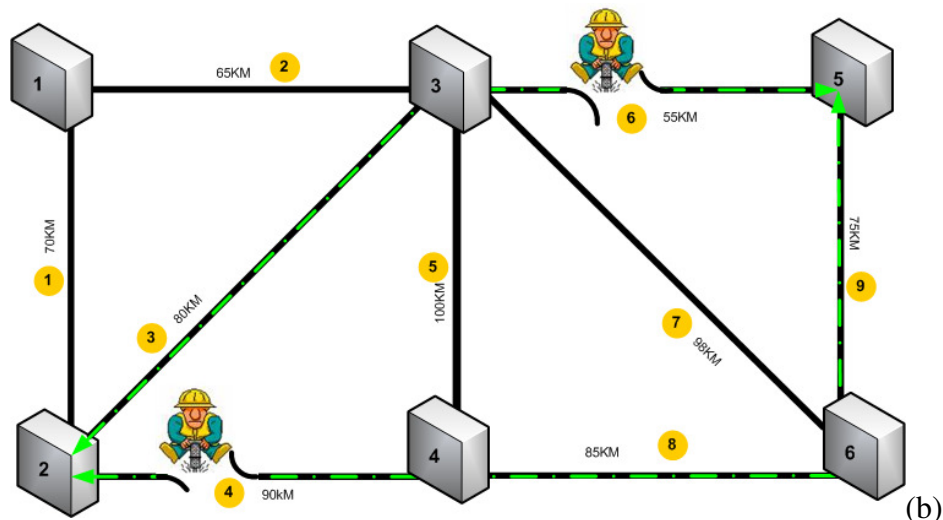


Figura 1.1 – (a) Rede fisicamente em malha e logicamente protegida por anéis, (b) Rede física e logicamente protegida em malha

Em Dominic A. Schupke (2005), o autor mostra que em grandes redes, denominadas Ultra-Long Hall Backbones, o advento de dupla falha representa cerca de 6 horas por ano considerando apenas o MTBF, tempo médio entre falhas, da fibra óptica (300 anos/Km) e MTTR, tempo médio do reparo, de 8 horas, para uma rede de 25 enlaces de comprimento médio de 500KM. Assim, se considerarmos as falhas de equipamento, interrupção por corte de fibra (geralmente causados por obras civis), vandalismo e todas as demais opções que levam a interrupção de um enlace de transmissão, o projetista de redes será obrigado a considerar cenários de múltiplas falhas em seus dimensionamentos, sob pena de criar redes com baixa disponibilidade de serviços.

Alguns fabricantes contornaram este problema utilizando um híbrido de proteção de caminho com restauração, denominado PRC (Protection and Restoration Combined). Inicialmente, dois caminhos distintos são escolhidos entre origem e destino, na presença de uma falha que interrompe um dos caminhos e, caso a falha tenha ocorrido no caminho principal, o tráfego é comutado para o caminho secundário. O tempo de restauração para este cenário é menor que 50milisegundos. Caso uma segunda falha ocorra, afetando a rota que está em uso, o mecanismo de restauração é acionado para buscar um novo caminho na tentativa de restabelecer o tráfego.

Para que o mecanismo de proteção PRC funcione corretamente, promovendo alta disponibilidade e baixíssimos tempos de comutação, deve-se manter banda disponível em determinados enlaces e relacionar cada opção de caminho para cada combinação de falhas, ou seja, manter recursos disponíveis e o “como usá-los” em caso de falhas. Definir a

quantidade e em qual enlace dispor banda para recuperação de falhas, definindo quando utilizar e como utilizá-la, alcançando o menor custo possível, são os novos desafios para os projetistas de redes. Também será um desafio operacional gerenciar esta banda dedicada a restauração em eventos de múltiplas falhas, evitando que sejam alocadas para atender novas solicitações de serviços.

Analisar todas as combinações de caminhos distintos entre cada origem e destino de acordo com uma matriz de tráfego, selecionar enlaces que favorecem o compartilhamento de banda para recuperação em eventos de dupla falha, selecionar o caminho principal e secundário, de cada demanda, obtendo um reuso de enlaces eficiente, alcançando o menor custo, é uma tarefa quase impossível sem uma metodologia e ferramentas adequadas.

Motivados pelos desafios acima, desenvolvemos dois modelos em programação linear inteira, ILP, denominados PRC-RE e PRC-SRE, capazes de encontrar a distribuição ótima de todas as demandas de tráfego, protegidas por PRC e imunizando-as contra dupla falha através da distribuição eficiente de banda para restauração. Outra informação fornecida pelos modelos é a lista de caminhos pré-estabelecidos para cada combinação de dupla falha, indicando qual a forma ótima de uso da banda disponível para restauração, contribuindo para reduzir, inclusive, o tempo de restabelecimento do serviço.

Os modelos se distinguem por utilizar ou não o Reuso de Enlaces (RE), que permite ao modelo PRC considerar como banda disponível para o processo de restauração, toda banda pertencente a enlaces íntegros que compõem caminhos que falharam, ou seja, dado um caminho composto por “n” enlaces, caso um venha a falhar, os demais poderão ser utilizados pelo algoritmo de cálculo de caminhos para restauração.

A diferença entre o resultado dos dois modelos resume-se à quantidade de banda para restauração aprovionada na rede, podendo chegar ao dobro no PRC-SRE (Proteção e Restauração Combinadas – Sem Reuso de Enlace) em comparação ao PRC-RE. A consequência operacional do uso do modelo PRC-SRE é que haverá mais banda disponível para gerenciar, pois deve-se evitar seu uso no aprovisionamento de novos serviços sob pena de perda da imunidade contra dupla falha projetada. O modelo PRC-RE (Proteção e Restauração – Reuso de Enlace) reduz a quantidade de banda aprovionada na rede, reduz a quantidade de banda disponível a ser gerenciada. Tanto para o PRC-RE quanto para o PRC-SRE, basta que haja mais de dois enlaces incidentes em cada nó da rede, e banda de transmissão suficiente, para que seja alcançado 100% de imunidade à dupla falha. A Figura 1.2 ilustra a diferença entre os dois modelos. No caso do PRC sem reuso de enlace (SRE), percebendo a interrupção do tráfego, o caminho formado pelos enlaces 3, 7 e 9 só será utilizado se todos possuírem banda suficiente entre os nós 2 e 5, enquanto que para o PRC com reuso de enlaces (RE), basta que o enlace 7 possua banda suficiente. Isso porque o PRC-RE irá reutilizar a banda que ficou ociosa nos enlaces 3 e 9 por haver falha nos caminhos formados pelos enlaces 3 e 6 e 4, 8 e 9, respectivamente.

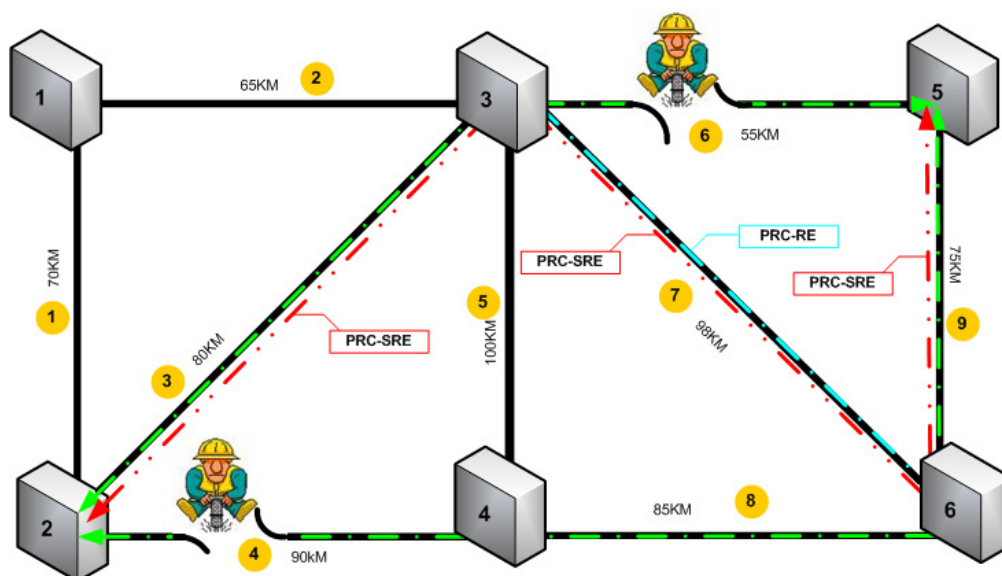


Figura 1.2 – Diferença entre PRC-SRE e PRC-RE

Como problemas descritos em programação linear são muito extensos e, conseqüentemente, demandam muito tempo até sua solução, criamos uma heurística chamada Dupla Fase, que consiste na divisão do problema principal em duas partes, resolvendo primeiro a distribuição de tráfego por caminhos distintos (não há nenhum enlace em comum entre o par de caminhos selecionados) e, com o resultado deste,

resolvemos o problema como um todo. Desta forma, um novo modelo, denominado PC (Proteção de Caminho), foi criado resolver a primeira parte do heurístico e para fornecer o índice de imunidade à dupla falha e a quantidade de banda por enlace para a proteção de caminho, que é dos mecanismos de proteção da ASON. Os resultados da simulação da Proteção de Caminho servirá de comparativo e de cálculo do incremento de banda para se obter o máximo de imunidade à dupla falha possível na rede.

Para resolver os modelos foi utilizado o software LP_SOLVE, desenvolvido por Michel Berkellar, estudante da Universidade de Tecnologia de Eindhoven, distribuído gratuitamente e que não possui limitação de variáveis.

1.1 O PROBLEMA

Neste trabalho, será abordado o problema de se projetar redes de transmissão ópticas, utilizando ASON ou qualquer outra tecnologia que utiliza topologia em malha, sob o ponto de vista da proteção do tráfego na presença de dupla falha. Fornecemos ao projetista duas opções para alcançar o mais alto índice de imunidade à dupla falha dada uma topologia arbitrária (malha) e uma matriz de tráfego.

Do lado operacional da rede de transmissão, há o problema de gestão de recursos para se manter a imunidade projetada. As duas opções de distribuição de tráfego trazem informações sobre a quantidade mínima de banda por enlace para se garantir a imunidade à dupla falha e, durante o advento de dupla falha, fornece os caminhos pré-definidos para cada demanda de tráfego. Estas informações serão úteis à operação da rede até que os sistemas de gerenciamento passem a controlar estes dados automaticamente.

1.2 RESULTADOS ESPERADOS

Demonstrar a importância em se considerar cenários de múltiplas falhas nos projetos de redes de transmissão que utilizam a topologia em malha para distribuição de tráfego.

Criação de uma metodologia para distribuição e proteção de tráfego, com imunidade contra dupla falha, a ser utilizada em projetos de redes baseadas em tecnologias que usam redes de topologia arbitrária, tais como a ASON.

Fornecer informações relevantes para a operação da rede, tais como banda mínima por enlace e caminhos pré-definidos para recuperação imediata de demandas afetadas por dupla falha.

Implementação de um indicador de imunidade contra dupla falha para a rede, que, em conjunto com as demais informações, orienta o projetista quanto a necessidade de inclusão de novos enlaces e/ou acréscimo de banda de transmissão.

1.3 SEQUÊNCIA DO TRABALHO

- Obter a topologia de rede e a matriz de tráfego de uma operadora de telecomunicações, verificando a possibilidade de utilização aplicando os modelos desenvolvidos.
- Criar uma metodologia de projeto de rede para distribuição de tráfego e proteção à dupla falha com o menor custo.
- Definir e analisar estruturas de dados que permitam representar a rede adequadamente e que sejam de fácil entendimento e utilização pelo projetista.
- Implementar uma ferramenta para transformar a topologia e a matriz de tráfego em linguagem aceita pelo software LP_SOLVE.
- Implementar uma ferramenta para transformar o resultado do modelo, dado pelo software LP_SOLVE, em uma representação de fácil entendimento pelo projetista.
- Validar os resultados apresentados pela ferramenta por meio de comparação entre os dois modelos desenvolvidos e o modelo PC (Proteção de Caminho).
- Implementar um heurístico que permita avaliar a distribuição de tráfego e a imunidade contra dupla falha em uma rede de transmissão óptica de uma grande operadora.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho propõe uma metodologia para distribuição de tráfego em redes de topologia arbitrária utilizando o mecanismo de proteção conhecido como Proteção e Restauração Combinadas (PRC). A distribuição eficiente de banda de transmissão garante a máxima imunização contra duplas falhas de enlaces na rede.

Os componentes desta dissertação compreendem:

- Três modelos para distribuição de tráfego baseados nos mecanismos de proteção: Proteção e Restauração Combinadas e Proteção de Caminho;

- Uma ferramenta de escrita dos modelos e interpretação dos resultados;
- Uma heurística para viabilizar a aplicação desta metodologia em redes de grande porte.

No capítulo 2, são apresentados os elementos teóricos necessários para o desenvolvimento da metodologia e dos modelos apresentados. Inicialmente conceitua-se a tecnologia ASON e os pontos importantes para este trabalho são discutidos. Topologia e a formulação do problema do planejamento topológico. São apresentados conceitos da teoria de grafos, mostrando as relações entre os nós e os enlaces de uma rede, bem como as formas de representação através de listas e matrizes. Conceitua-se programação linear mostrando suas principais características, vantagens e apresentando a ferramenta LP_SOLVE utilizada para solução dos modelos aqui apresentados.

O capítulo 3 apresenta a metodologia proposta para distribuição de tráfego e imunização contra duplas falhas em redes ASON, utilizando o mecanismo de proteção PRC (Proteção e Restauração Combinadas). São apresentados os modelos PRC com e sem reuso de enlace, exemplos de escrita em programação linear inteira dos modelos para uma rede hipotética. É apresentada também a automação do processo de escrita dos modelos considerando ou não a heurística Dupla Fase.

O capítulo 4 apresenta os critérios de validação dos modelos e a análise dos resultados obtidos quando a metodologia é aplicada a uma rede de uma grande operadora de Telecomunicações.

O capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas a partir dos trabalhos realizados e sugestões de possíveis trabalhos futuros.

2 PROTEÇÃO DE TRÁFEGO E MULTIPLAS FALHAS EM REDES ASON

Neste capítulo serão descritos os elementos teóricos utilizados para abordar o problema em estudo, discutindo como estes se integram dentro da proposta de trabalho desta dissertação. As subseções apresentam os conceitos da tecnologia ASON, teoria de grafos, topologia e programação linear inteira, utilizados para criarmos modelos de distribuição de tráfego, em cenários de múltiplas falhas, para redes ASON.

2.1 ASON

A ultra-alta capacidade de transmissão, em Terabits por segundo, os diversos serviços de alta velocidade de acesso, metropolitano e longa distância como – por exemplo, a Rede Privativa Virtual (VPN – Virtual Private Network) – adicionados à confiabilidade, aos vários níveis de QoS disponíveis e à proteção/restauração das conexões entre os clientes elegem as Redes Ópticas como o Centro das Redes de Telecomunicações.

Com o passar dos anos, as Redes Ópticas têm sido capilarizadas em todos os segmentos das Telecomunicações desde as Redes de Acesso até as Redes de Longa-Distância demonstrando, portanto, sua expansão de forma similar às Redes de Pacotes.

No entanto, apenas a alta capacidade provida pelas técnicas DWDM empregadas nas Redes Ópticas não garantem o sucesso delas. É necessário um Sistema de Controle e Gerenciamento sofisticado que possa assegurar os demais benefícios das Redes Ópticas, tais como: confiabilidade, proteção/restauração e QoS. Neste sentido, este sistema precisa ser “inteligente” para prever possíveis falhas na rede e corrigi-las rapidamente de modo que se mantenha o QoS acordado entre as operadoras de telecomunicações e os seus clientes. Uma Rede Óptica DWDM que seja capaz de prover os benefícios citados anteriormente, incluindo um Sistema de Controle e Gerência Inteligente, é conhecida como Rede Óptica Inteligente.

Se os elementos de rede como, por exemplo: OTE (Optical Terminal Equipment), OLRE (Optical Line Repeater Equipment), OADM (Optical Add Drop Multiplexer) e XCE (Cross Connect Equipment), são baseados na tecnologia de conversão óptico-eletrônico-óptico (o-e-o) aplicados aos sinais de entrada e saída destes equipamentos, então esta Rede Óptica será denominada Rede Óptica Opaca. Caso estes elementos de rede sejam puramente

ópticos, baseados na conversão óptico-óptico (o-o) dos sinais de entrada e saída, então esta Rede Óptica será chamada de Rede Óptica Transparente.

Assim, podemos caracterizar uma Rede Óptica Inteligente e Transparente (ITON) aquela que satisfaz todos os requisitos descritos acima. Atualmente, um forte candidato a ser uma Rede Óptica Inteligente e Transparente é conhecido como Redes Ópticas Comutáveis Automaticamente (ASON), cujas discussões se iniciaram em 1999 pelo Comitê International Telecommunications Union - Telecommunications (ITU-T) e foi aprovada a primeira versão da Recomendação ITU-T G.8080 em 2001. Nesta Recomendação, evidencia-se a aplicação do ASON às Redes Puramente Ópticas e às Redes SDH/SONET.

Antes da Recomendação G.8080 ser aprovada, havia uma discussão no ITU-T em reservar as Redes SDH/SONET para as Redes de Transporte Comutáveis Automaticamente (ASTN – Automatic Switched Transport Network), visando torná-la uma espécie de Rede Óptica Genérica, denominada Rede de Transporte Óptica (OTN – Optical Transport Network), que essencialmente englobaria as Redes Puramente Ópticas e as Redes SDH/SONET, restando ao ASON a aplicação restrita às Redes Puramente Ópticas. No entanto, foi definido na ITU-T G.807 que o ASTN herdaria alguma das características da antiga Rede de Transporte com a intenção de harmonizar as Redes ATM, SDH e PDH, e adicionaria um conjunto de funções de controle para a configuração das conexões e o encerramento destas. Em paralelo, definiu-se na ITU-T G.8080 que a ASON incorporaria as características das Redes de Transporte Ópticas (OTN) e das Redes SDH/SONET bem como o protocolo de transporte Digital Wrapper definido na ITU-T G.709.

Neste capítulo, serão apresentados os princípios de funcionamento de uma Rede Óptica Inteligente e Transparente (ITON) – no caso, Redes Ópticas Comutáveis Automaticamente (ASON) –, os Planos de Transporte, Controle e Gerenciamento da ASON; e os Procedimentos de Estabelecimento e Liberação das Conexões Permitidas pela ASON; os Mecanismos de Recuperação de uma Conexão Interrompida por causa de Falha na Rede; e os Protocolos de Roteamento e Atribuição de Comprimentos de Onda mais utilizados na ASON.

2.1.1 Arquitetura de uma rede óptica comutável automaticamente

A ASON é uma arquitetura projetada para configurar as conexões fim-a-fim entre os elementos de rede ópticos através de um Sistema de Controle e Gerenciamento Inteligente,

satisfazendo os requisitos de Proteção e Restauração, Engenharia de Tráfego, Controle de Admissão das Conexões (CAC – Connection Admission Control) e gerenciamento das Conexões a fim de prover QoS, confiabilidade e segurança às conexões. O ASON também apresenta algumas outras vantagens, tais como: provisão de largura de banda sob demanda, mecanismo de controle distribuído, suporte à configuração dinâmica de diversos tipos de conexões ópticas (por exemplo: permanente, levemente-permanente e comutável), interconexão entre as camadas de pacote e ópticas podendo ser feita através do protocolo GMPLS (Generalized Multi-Protocol Label Switching), e aplicação às principais topologias de rede, especialmente, em malha.

Uma arquitetura genérica da ASON e de todos os seus elementos são apresentados na Figura 3.4. Um dos objetivos do ASON é habilitar a comutação de conexões geradas na Rede Óptica de Transporte através de um Sistema de Controle e Gerência Inteligentes. A Figura 3.4 ilustra também a interconexão da Rede Óptica à Rede de Pacote por meio dos Sistemas de Controle e Gerência do ASON. Há três planos que compõem o ASON:

- Plano de Transporte (ASON Transport Plane - ATP): provê a transferência unidirecional ou bidirecional das informações dos usuários finais de um ELEMENTO DE REDE a outro e detecta as informações do estado da conexão (por exemplo: falha e qualidade do sinal óptico).
- Plano de Controle (ASON Control Plane - ACP): desempenha as funções de controle das conexões, Engenharia de Tráfego e CAC. Através da sinalização, o ACP estabelece, configura e encerra as conexões da rede, as quais podem ter diversas origens, dentre elas: (1) por meio de um pedido de conexão da rede cliente (estas são chamadas: conexões comutáveis); (2) por meio de um pedido de conexão do Sistema de Gerência ASON (estas são chamadas: conexões levementepermanentes); e (3) por meio de um pedido de conexão previamente configurado pelo sistema de gerência ou intervenção manual (estas são chamadas: conexões permanentes). Outra função do ACP é a restauração das conexões através do restabelecimento das informações de estado dos enlaces ópticos.
- Plano de Gerenciamento (ASON Management Plane - AMP): desempenha as funções de gerenciamento, tais como: falhas na rede, verificação de desempenho da rede, configuração dos NEs e segurança do ACP e ATP.

Com base nestes três planos que compõem o ASON é possível habilitar sua inteligência através da interconexão entre a camada de pacote e camada óptica de modo a escolher um caminho mais curto com custo mínimo por comprimento de onda roteado. O ASON habilita a configuração de cada OXC escolhido e define um caminho óptico para transportar um tráfego baseado no protocolo orientado à conexão fim-a-fim[62]. Este protocolo é capaz de ativar a restauração e proteção óptica distribuída no ATP. Quando ocorre uma falha no OXC ou mesmo num enlace óptico, um conjunto de sinalização é trocado entre os planos ATP, AMP e ACP a fim de reconfigurar um novo caminho óptico e manter o QoS exigido pelos usuários finais.

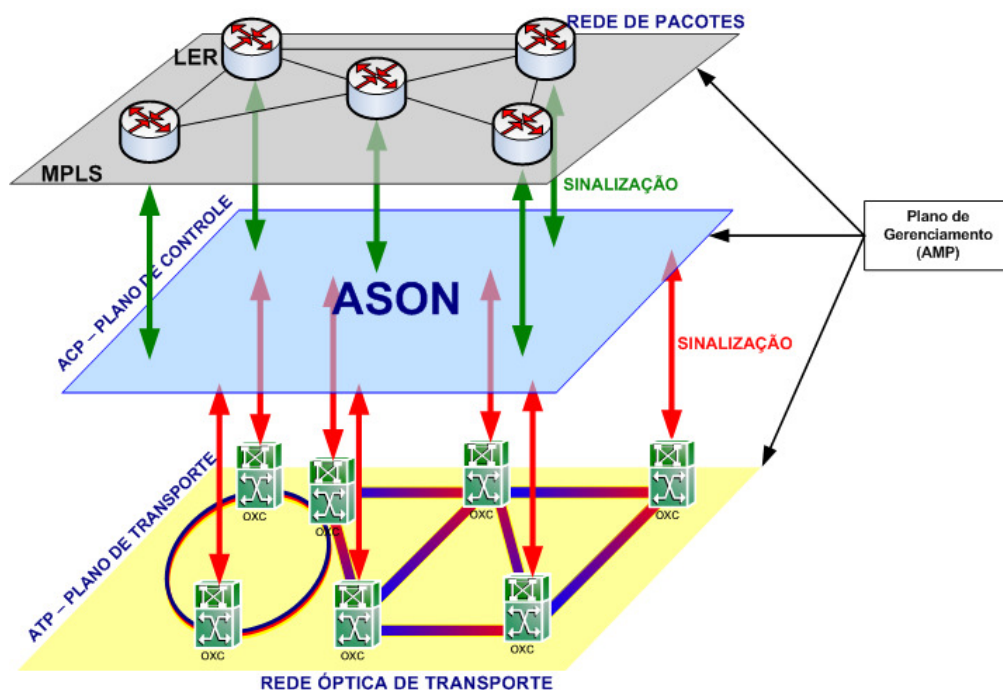


Figura 2.1 - Arquitetura de uma Rede Óptica Comutada Automaticamente

2.1.2 Mecanismos de Recuperação da Rede ASON

Qualquer que seja sua natureza da rede de transporte: pacotes, determinística, óptica, etc. – terá prestígio se apresentar mecanismos eficientes que assegurem ao usuário final a recuperação de sua conexão no menor tempo possível para qualquer falha da rede (por exemplo: rompimento de uma fibra óptica ou problemas nos elementos de rede como congestionamento ou problema de uma placa vital que o impede de funcionar corretamente). De acordo com a Recomendação ITU-T G.805[61], estes Mecanismos de Recuperação podem ser classificados como: (1) Proteção; ou (2) Restauração, cujas descrições são feitas, a seguir.

- 1) Proteção: um caminho reserva é pré-estabelecido para ser usado tão logo seja detectada uma falha na rede. Vantagem: o tempo de comutação do caminho principal, onde ocorreu a falha, para o caminho reserva está na ordem de dezenas de milissegundos. Desvantagem: uma quantidade enorme de recursos da rede será alocada como sobressalente para garantir o pré-estabelecimento dos caminhos reserva.
- 2) Restauração: um novo caminho é estabelecido tão logo seja detectada uma falha na rede. Vantagem: requer menos recursos da rede como sobressalentes. Desvantagem: o tempo de estabelecimento de um novo caminho encontra-se na faixa de centenas de milissegundos e, dependendo do número de elementos de rede, até poucos segundos.

O Plano de Controle da ASON (ACP) disponibiliza para o operador de rede a capacidade de oferecer conexões com classe seletiva de serviços (CoS) para os usuários e estas são apoiadas pelo RES. A seleção do RES (proteção, restauração ou nenhuma delas) para uma conexão em particular deve se basear em três principais pontos: (1) estratégia de policiamento do operador de rede; (2) topologia da rede; e (3) capacidade de invocar imediatamente equipamentos para realizar a recuperação da conexão. Se uma conexão transitar por mais de um domínio de rede, então cada operador que supervisiona seu respectivo domínio deverá ser responsável pela recuperação das conexões em trânsito.

Pedidos de conexão na UNI ou E-NNI deverão conter apenas o CoS exigido, mas não o tipo de proteção ou restauração explicitamente.

A proteção ou restauração de uma conexão poderá ser invocada ou desabilitada temporariamente por meio de comandos do Plano de Gerenciamento do ASON (AMP). Estes comandos poderão ser usados para habilitar as atividades de manutenção agendadas ou tomar o controle sobre as operações automáticas sob condições excepcionais de falha da rede.

Os mecanismos de proteção e restauração deverão ser independentes e suportar qualquer tipo de cliente (por exemplo: IP, ATM, SDH/SONET, Ethernet), prover escalabilidade para atender às falhas catastróficas na camada servidora, tais como: o rompimento do cabo de fibra óptica que impacta diretamente na necessidade de recuperação rápida e simultânea de um grande número de conexões provenientes da camada cliente, utilizar um mecanismo robusto e eficiente de sinalização que opere mesmo sob condições de falhas na rede de transporte;

A ASON pode suportar os mecanismos de proteção e restauração para qualquer tipo de conexão da camada cliente. No entanto, devido ao seu sofisticado mecanismo de restauração, que permite recuperar rapidamente as conexões interrompidas por uma possível falha da rede, muitos fabricantes e operadoras de telecomunicações têm dado preferência à restauração para aplicação na maioria das conexões e reservando a proteção para conexões específicas que exigem recuperação ultra-rápida (dezenas de milissegundos). O mecanismo de restauração no ASON pode ser aplicado de forma distribuída, ou seja, o cálculo de novas rotas é distribuído para outros os elementos de rede quando houver falhas na rede. A restauração distribuída pode ser subdividida em três categorias:

- **Reparo Global:** o reparo é feito pelo elemento de rede que iniciou o caminho óptico. Na Figura 2.2, o cliente A estava se comunicando com o cliente B através do caminho óptico principal ABCG estabelecido pelo elemento de rede terminal A quando houve uma falha no enlace BC. Neste momento, o ELEMENTO DE REDE B envia um Sinal de Indicação de Falha (FIS – Failure Indication Signal) para o ELEMENTO DE REDE terminal A que restaura a conexão através do estabelecimento de um novo caminho óptico ACFG. O atraso na propagação do sinal FIS é desprezível. Vantagem: há uma utilização otimizada dos recursos da rede, pois o ELEMENTO DE REDE terminal A tem o conhecimento da topologia da rede e utiliza os protocolos de sinalização e roteamento para obter um novo caminho óptico de menor custo;
- **Reparo Local:** o reparo é feito pelo ELEMENTO DE REDE transmissor de dados que está conectado ao enlace danificado. Na Figura 2.3, o próprio ELEMENTO DE REDE B procura estabelecer um novo caminho óptico (ABDG) para restauração da conexão fim-a-fim entre os clientes A e B. A obtenção desta nova rota é dada pelo

Sistema de Gerência Distribuído entre os NEs adjacentes que trocam suas tabelas de roteamento. Vantagem: o tempo para restaurar uma conexão é menor do que o método “Reparo Global”. Desvantagem: não é utilizado de forma otimizada os recursos da rede;

- Pré-Planejamento: nesta categoria, permite-se planejar antecipadamente os recursos de reserva que serão utilizados sem alocá-los efetivamente como é feito no mecanismo de proteção. O objetivo deste pré-planejamento é identificar os NEs e os recursos de rede que serão utilizados na restauração de uma conexão. Estes recursos de rede poderão ser compartilhados com outros caminhos pré-planejados. A configuração do caminho principal e o cálculo do caminho pré-planejado serão obtidos durante o tempo de provisionamento do serviço. Na Figura 2.4(a), ocorreu uma falha no enlace BC e o caminho principal ABCG foi interrompido. Neste momento, o ELEMENTO DE REDE terminal A inicia o cálculo dos recursos de rede do caminho pré-planejado AEFG, ativando os NEs que compõem esta rota. Uma vez configurada, a restauração da conexão é realizada e um novo caminho pré-planejado (ABDG) é obtido conforme ilustra a Figura 2.4(b). Vantagem: (1) é possível planejar a rede de tal modo que ela possa suportar a restauração de determinadas conexões prioritárias; (2) integração com vários mecanismos de proteção; (3) flexibilidade na escolha dos caminhos alternativos de restauração. Desvantagem: (1) o tempo de restauração é levemente superior ao método “Reparo Global” haja visto que o ELEMENTO DE REDE precisa também calcular um novo caminho pré-planejado; (2) haverá problema quando ocorrer uma falha múltipla e os caminhos pré-planejados forem compartilhados. Como consequência, poderá surgir um grupo de risco compartilhado se todos utilizarem o mesmo cabo ou duto de fibra óptica, cujo rompimento deste será catastrófico. Por isso, esta restauração deve ser aplicada com cuidado e para fins específicos como, por exemplo, em conexões prioritárias, cuja flexibilidade inerente a este tipo de restauração é provida ao operador de rede;

De modo geral, os métodos de Reparo Global e Pré-Planejamento são os mais apropriados para implementação do mecanismo de restauração no ASON.

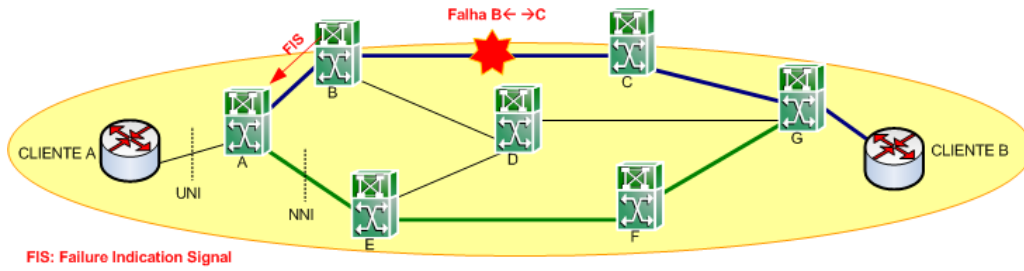


Figura 2.2 – Restauração Distribuída – reparo Global

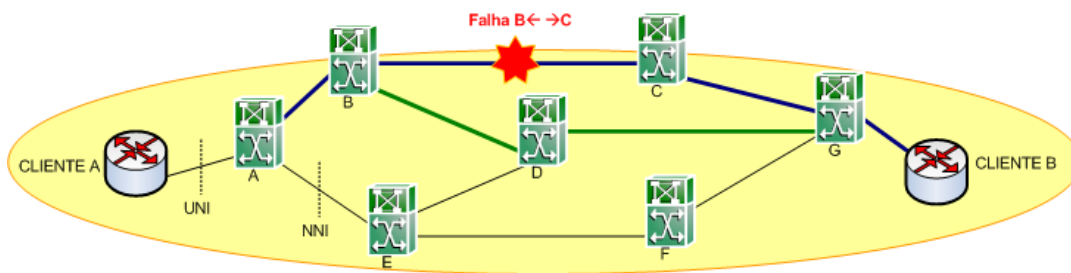
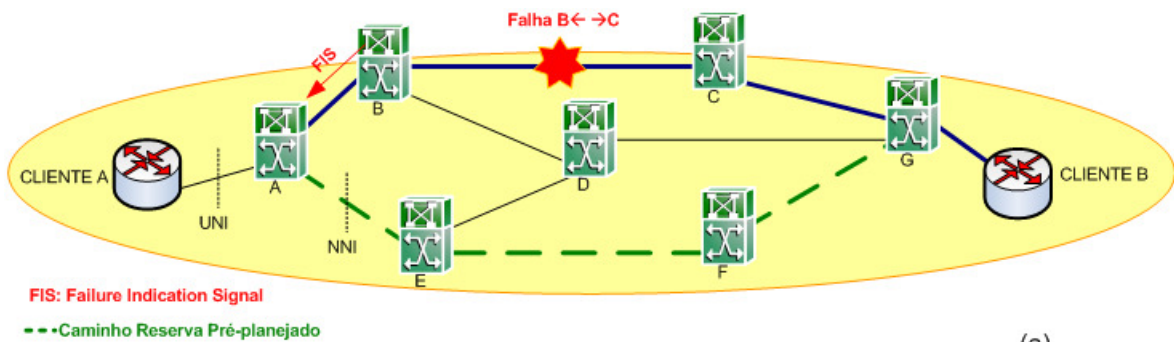
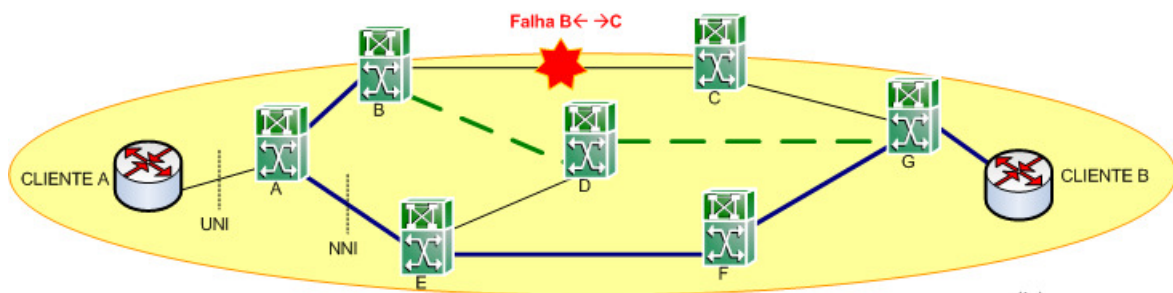


Figura 2.3 – Restauração Distribuída – reparo local



(a)



(b)

Figura 2.4 – Restauração Distribuída – Pré-planejada

As opções de proteção e restauração de tráfego da ASON possibilitam atender às necessidades dos clientes e das operadoras de telecomunicações por flexibilizar e otimizar

o uso de recursos de transmissão. Nesta seção apresentamos uma breve descrição das principais características da tecnologia ASON, na próxima seção veremos uma introdução à Programação Linear que é a ferramenta escolhida para desenvolver os modelos utilizados nesta dissertação.

2.2 TOPOLOGIA

Topologia é o conhecimento da conectividade dos pontos de um determinado espaço (Zomorodian, 2005). Na Figura 2.5, é apresentada a representação de espaço (conjunto de pontos), espaço topológico (em que as vizinhanças são conhecidas) e espaço métrico, onde os pontos possuem métricas associadas tal que é possível medir as distâncias entre eles.

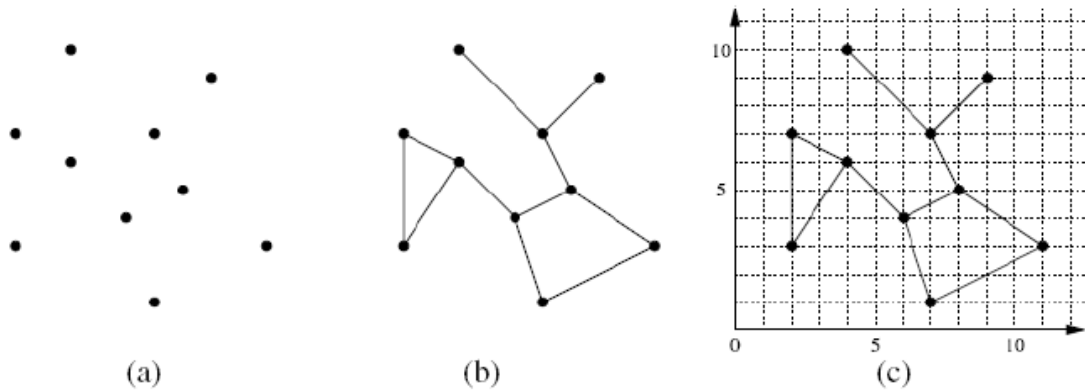


Figura 2.5 - (a) Representação de um espaço, (b) espaço topológico e (c) espaço métrico.

Uma rede de telecomunicações pode ser definida como um espaço métrico e ser representada por um conjunto de pontos (nós) e pela topologia (conjunto de enlaces) que interliga estes nós.

2.3 TEORIA DE GRAFOS

Grafos são estruturas utilizadas para estudar as relações dos pares de elementos em um determinado conjunto. Um grafo é formado por um conjunto de nós ou vértices conectados por arestas ou arcos e são assim definidos:

- Vértices são representados por pontos ou por nós.
- A ordem de um grafo é o número de seus vértices.
- Um arco é desenhado como uma linha conectando dois vértices, chamados extremidades.

- O tamanho de um grafo é o número de seus arcos.
- Um laço é um arco cujas extremidades estão conectadas a um único vértice.
- Um enlace apresenta extremidades conectadas a vértices distintos.
- Um arco é múltiplo, se existe mais de um arco cujas extremidades estão conectadas aos mesmos vértices. Caso contrário, o arco é simples.
- Um grafo é simples, se não apresenta arcos múltiplos ou laços.
- Um grafo é não-orientado, quando não há distinção entre os dois vértices conectados por uma aresta, e orientado quando as arestas são definidas como tendo sentido de um vértice para o outro.

Neste trabalho são utilizados grafos simples e não-orientados, pois os enlaces utilizados nas redes de transmissão são, em sua quase totalidade, simétricos. Cabe ressaltar que o grafo não deve ser confundido com a estrutura física que representa, pois é apenas uma abstração, levando em consideração apenas as características desejadas para o estudo de um sistema.

Em um grafo simples e não-orientado $G=(V,E)$ com V vértices, que neste caso representam os nós da rede, o número máximo possível de arestas E (*edges*) ou enlaces da rede, é definido pela equação 2.1.

$$E_{m\acute{a}x} = \frac{V(V-1)}{2} \tag{2.1}$$

Conforme descrito em Cormen (2001) existem duas formas, normalmente utilizadas, para representação de um grafo:

- Como uma coleção de listas de adjacência;
- Como uma matriz de adjacência.

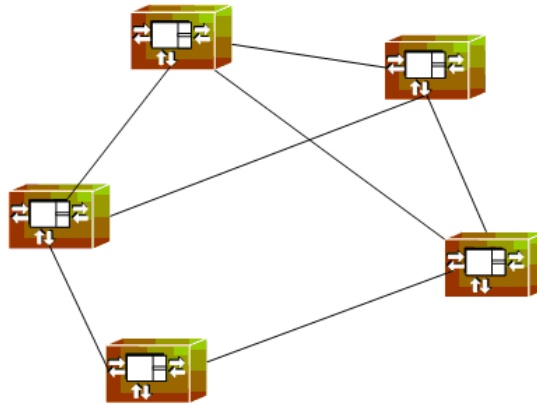
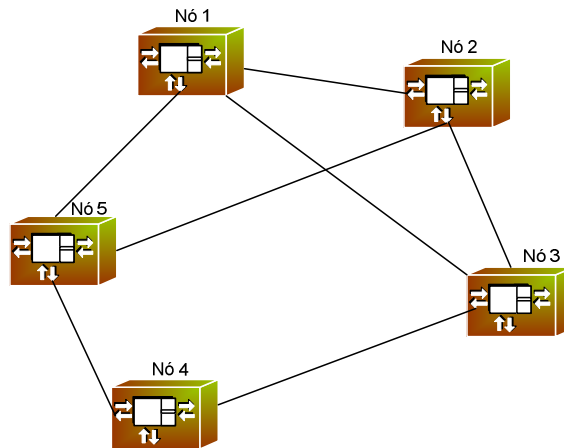


Figura 2.6 - Representação de um grafo.

Na Figura 2.7 é apresentada a representação de um grafo por lista de adjacência e por matriz de adjacência. Na lista de adjacência cada linha está associada a um nó da rede e informa os nós aos quais está diretamente conectado. Na Figura 2.7 (b), a linha 2 apresenta a informação de que o nó 1 está diretamente conectado aos nós 2, 3 e 5. O caractere “/” é utilizado para demarcar o último elemento da linha. A matriz de adjacência mostrada na Figura 2.7 (c) apresenta a mesma informação, representando os nós diretamente conectados por 1 e os demais por 0.

Estruturas de listas são geralmente preferidas ao lidar com grafos representados por matrizes esparsas, por requererem menos memória. Uma matriz é chamada de esparsa quando apresenta uma quantidade relativamente pequena de elementos não-nulos. Por outro lado, normalmente, as estruturas em matriz apresentam tempos de acesso menores e são mais utilizadas com grafos densos.



(a)

Nó	Adjacências				
1	2	3	5	/	
2	1	3	5	/	
3	1	2	4	/	
4	3	5	/		
5	1	2	4	/	

(b)

	1	2	3	4	5
1	0	1	1	0	1
2	1	0	1	0	1
3	1	1	0	1	0
4	0	0	1	0	1
5	1	1	0	1	0

(c)

Figura 2.7- (a) Um grafo G não-orientado com 5 nós e 7 enlaces. (b) Representação de G por lista de adjacência. (c) Representação de G por matriz de adjacência. Adaptado de Cormen (2001).

Uma variação das listas de adjacência são as listas de incidência, que se diferenciam das primeiras por utilizarem número fixo de colunas com possibilidade de transportar diferentes tipos de informações, conforme apresentado na Tabela 2-1.

Tabela 2-1 - Exemplo de lista de incidência

Arco	Vértice A	Vértice B	Distância	Velocidade Tx
1	1	2	40	2,5Gbps
2	1	5	90	10 Gbps
3	1	3	110	2,5Gbps
4	2	3	45	40 Gbps
5	2	5	78	10 Gbps
6	3	4	205	2,5 Gbps
7	4	5	65	10 Gbps

A primeira coluna (Arco) da Tabela 2-1 apresenta o número do enlace representado. A segunda e terceira colunas (Vértice) informam os nós interligados por cada enlace. A

quarta coluna (Distância) representa a distância entre os nós interligados por cada enlace e a última coluna (Velocidade Tx) apresenta a taxa de transmissão de cada enlace.

2.4 Estruturas matriciais

Neste trabalho, serão utilizadas estruturas matriciais para realização dos cálculos. Sendo E , o conjunto dos enlaces do grafo $G=(V,E)$ e V , o conjunto dos nós (Vértices) deste grafo, a matriz de adjacência é representada pela equação 2.2 e mostrada na Figura 2.7- (a) Um grafo G não-orientado com 5 nós e 7 enlaces. (b) Representação de G por lista de adjacência. (c) Representação de G por matriz de adjacência. Adaptado de Cormen (2001).(c).

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se } (i, j) \in E \\ 0 & \text{se } (i, j) \notin E \end{cases} \quad 2.2$$

Uma variante desta matriz inclui o rótulo dos enlaces e é definida pela equação 2.3, em que Rótulo é um número inteiro positivo que identifica cada enlace.

$$a_{ij} = \begin{cases} \text{Rótulo} & \text{se } (i, j) \in E \\ 0 & \text{se } (i, j) \notin E \end{cases} \quad 2.3$$

A Tabela 2-1 apresenta a matriz de adjacência com rótulos de enlace para o grafo da Figura 3.3 (a). Neste caso, sendo o grafo não-orientado, o rótulo do enlace que conecta o nó 1 ao nó 2 é o mesmo do enlace que conecta o nó 2 ao nó 1. Se o grafo fosse orientado esses rótulos poderiam ser diferentes.

Tabela 2-2 - Matriz de adjacência com rótulos de enlaces.

Nós	1	2	3	4	5
1	0	1	3	0	2
2	1	0	4	0	5
3	3	4	0	6	0
4	0	0	6	0	7
5	2	5	0	7	0

Para grafos não-orientados, a matriz de incidência é a matriz $Q=b_{ij}$ com dimensões $|V| \times |E|$, definida pela equação 2.4.

$$b_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se o nó } i \text{ se conecta ao enlace } j \\ 0 & \text{se o nó } i \text{ não se conecta ao enlace } j \end{cases} \quad 2.4$$

A Tabela 2-2 apresenta a matriz de incidência para o grafo apresentado na Figura 2.7. Nesta tabela, cada coluna representa um enlace do grafo e cada linha representa um nó. Na primeira coluna, pode-se verificar que o enlace 1 conecta os nós 1 e 2, o enlace 2 conecta os nós 1 e 5 e assim por diante.

Tabela 2-3 - Matriz de incidência para o grafo da Figura 2.7

	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	0	0	0	0
2	1	0	0	1	1	0	0
3	0	0	1	1	0	1	0
4	0	0	0	0	0	1	1
5	0	1	0	0	1	0	1

Conforme mostrado em Jamakovic e Uhlig (2007), o cálculo da conectividade de um grafo, pode ser realizado utilizando-se a matriz de admitância (ou Matriz laplaciana ou Matriz de Kirchhoff) $L(G)$, que pode ser obtida através da equação 2.5 onde Q^T é a transposta da matriz de incidência Q , definida pela equação 2.4.

$$L(G) = QQ^T \tag{2.5}$$

Outra forma de descrever a matriz laplaciana $L(G)$ é através da equação 2.6, em que d_u é o grau de conectividade do nó u .

$$(Q)_{ue} (Q^T)_{ev} = \begin{cases} 1 & \text{se } u \neq v; u, v \text{ são vértices de } e \\ d_u & \text{se } u = v; \\ 0 & \text{nos demais casos} \end{cases} \tag{2.6}$$

Conforme Jamakovic e Uhlig (2007) pode-se utilizar a matriz laplaciana $L(G)$ para determinar se o grafo é conectado, por meio do cálculo dos autovalores desta matriz. O conjunto de autovalores da matriz laplaciana é chamado de espectro laplaciano e está contido no intervalo $[0, \min\{N, 2D_{max}\}]$, em que N é o número de nós da rede e D_{max} é o grau de conectividade máximo do grafo. O segundo menor valor do espectro laplaciano é chamado de conectividade algébrica. Este valor é muito importante para a teoria clássica de conectividade (Jamakovic e Uhlig, 2007), por ser uma medida da robustez de um grafo, pois:

- A conectividade algébrica somente será igual a zero se o grafo G for desconectado.

- A multiplicidade de zeros no espectro Laplaciano é igual ao número de nós desconectados no grafo G .

Na Tabela 2-4, é apresentada a matriz laplaciana para o grafo da Figura 3.3. Ao calcular os autovalores desta matriz, tem-se [5,7785 0,5107 2 2,7108 3 2] e, como o segundo menor valor é diferente de 0, conclui-se que o grafo é conectado.

Tabela 2-4 - Matriz laplaciana para grafo da Figura 2.7

	1	2	3	4	5	6
1	3	1	1	0	1	0
2	1	3	1	0	1	0
3	1	1	3	1	0	0
4	0	0	1	2	1	1
5	1	1	0	1	3	1
6	0	0	0	0	0	2

Após determinar se uma topologia é conectada ou não, será analisada a capacidade de escoar o tráfego desejado dentro dos requisitos definidos. Para isto é necessário conhecer a matriz de tráfego da rede em estudo. Na próxima seção, será discutida a Tecnologia ASON (Automatic Switched Optical Network), para depois abordar a Programação Linear e finalmente, apresentar a forma de planejar a modificação topológica de uma rede de transmissão.

2.5 PROGRAMAÇÃO LINEAR

Programação Linear é um subitem da programação matemática e é utilizada em pesquisa operacional para desenvolver modelos de otimização que permitam alocar recursos escassos ou limitados a atividades concorrentes, visando maximizar, ou minimizar, um determinado objetivo (lucro, custo, produtividade, etc).

Os modelos de Programação Linear são implementados por meio da elaboração de sistemas lineares constituídos de um conjunto de equações e inequações que descrevem as restrições do sistema real em estudo e uma equação para descrever a função objetivo que expressa o parâmetro a ser maximizado ou minimizado.

Segundo Goldbarg e Luna (2000), para que um determinado sistema possa ser representado por meio de um modelo de programação linear, ele deve possuir as seguintes características:

Proporcionalidade: a quantidade de recurso consumido por uma dada atividade deve ser proporcional ao nível dessa atividade na solução final do problema. Além disso, o custo de cada atividade é proporcional ao nível de operação da atividade;

Não negatividade: deve ser sempre possível desenvolver dada atividade em qualquer nível não negativo e qualquer proporção de um dado recurso deve sempre poder ser utilizado;

Aditividade: o custo total é a soma das parcelas associadas a cada atividade;

Separabilidade: pode-se identificar de forma separada o custo específico das operações de cada atividade.

Quando a função objetivo e as restrições do problema em questão são lineares, dizemos que o problema é de Programação Linear, que em geral assume a forma:

$$\begin{aligned} & \text{Max } c^T x \\ & \text{sujeito a : } Ax \geq b \\ & x \in \mathbb{R}_+^n \end{aligned} \tag{2.7}$$

Os problemas de otimização são problemas de maximização ou minimização de funções de variáveis num determinado domínio normalmente definido por um conjunto de restrições nas variáveis.

A Otimização é a área da Matemática Aplicada que se preocupa em calcular e computar valores ótimos para variáveis de decisão que induzem a desempenho ótimo, ao mesmo tempo que satisfazem restrições de um modelo matemático. O conjunto de pontos do espaço de solução que satisfazem as restrições é denominado de região factível do problema, e qualquer ponto dentro da região factível é denominado solução factível.

Existe um conjunto particular de problemas nos quais é decisivo a aplicação de um procedimento de otimização. Muitos processos podem se beneficiar de uma alocação otimizada de recursos. Esses recursos, que podem incluir capital, equipamentos, tarefas, tempo, ou até mesmo largura de banda, devem ser cuidadosamente alocados nas quantidades corretas, nos tempos corretos, e na seqüência correta para a obtenção do melhor resultado possível.

São problemas complexos, muitas vezes de difícil solução e que envolvem significativas reduções de custos, melhorias de tempos de processos ou uma melhor alocação de recursos em atividades.

As técnicas de otimização devem ser utilizadas quando não existe uma solução simples e diretamente calculável para o problema. Isso geralmente ocorre quando a estrutura do problema é complexa, ou existe uma infinidade de possíveis soluções. Nesses casos, é possível que não exista nenhum procedimento direto de solução, de forma que as técnicas de otimização podem ser utilizadas na busca pela melhor solução para o problema.

A otimização global encontra a melhor solução do conjunto de todas as soluções possíveis. A otimização local encontra a melhor solução dentre um conjunto limitado de soluções que são próximas uma das outras. Na otimização local, a solução encontrada depende do ponto de início do processo de busca de otimização.

A otimização global sempre encontrará a melhor solução possível, independentemente das condições de início do processo de busca, porém, geralmente, requisita um maior poder de computação. Pode ser praticamente impossível de se encontrar uma solução ótima global em algumas aplicações, entretanto, uma solução ótima local pode ser bastante eficiente.

Em muitos casos, encontrar o ótimo global não é necessário. Encontrar rapidamente uma boa solução (ótimo local) pode ser mais desejável do que encontrar demoradamente a melhor solução possível. Quando nenhuma solução pode ser encontrada, o problema é relaxado (técnica que permite descartar algumas alternativas e restrições) e a otimização pode ser utilizada para encontrar a solução ótima.

O tipo de otimização empregada depende da estrutura do problema e do grau de confiabilidade dos parâmetros utilizados. A solução de um problema de otimização normalmente possui duas fases: a primeira consiste em transformar o problema em um modelo e, posteriormente, implementar um algoritmo capaz de encontrar uma solução adequada para este modelo.

A Programação Linear Inteira, utilizada para criar os modelos propostos nesta dissertação, é uma variante da Programação Linear cujas variáveis de decisão assumem valores discretos. Sua formulação geral é:

$$\begin{aligned} & \text{Max } c^T x \\ & \text{sujeito a: } Ax \geq b \\ & x \in \mathbb{Z}_+^n \end{aligned} \tag{2.8}$$

2.5.1 Modelagem de Problemas

A representação da realidade é uma necessidade da sociedade moderna, seja pela impossibilidade de lidar diretamente com a realidade, seja por aspectos econômicos, seja pela complexidade. Assim, buscamos a representação da realidade por meio de modelos que sejam bem estruturados e representativos desta realidade.

A modelagem de um problema não é uma tarefa trivial, dependendo de fatores subjetivos como intuição, experiência, criatividade e capacidade de síntese. A formulação de um modelo em linguagem matemática consiste em traduzir o modelo para uma linguagem formal, compreendendo variáveis, equações, desigualdades e fórmulas. Os processos de formulação e validação são iterativos, pois envolvem múltiplas etapas de tentativa e erro, e interativos à medida que se faz necessária a intervenção contínua do modelador no processo de refinamento do modelo. Na Figura 2.8 apresentamos o processo de formulação e validação de um modelo matemático.

A definição do problema é uma das fases mais importantes do processo e compreende a clara percepção do desafio colocado. A linguagem utilizada para expressar os problemas de maneira declarativa é conhecida como Programação Matemática. Os elementos de um modelo em Programação Matemática são:

Variáveis de decisão: variáveis cujos valores definem uma solução para o problema, por exemplo, quantidades produzidas ou recursos utilizados.

Função objetivo: uma função das variáveis de decisão que deve ser maximizada ou minimizada; por exemplo: minimizar custos, reduzir o número de homens/hora e maximizar o lucro.

Restrições: um conjunto de funções que define o espaço de soluções factíveis, por exemplo, limites para recursos, restrições operacionais de um processo de produção e limitações físicas e tecnológicas.

Um problema geral de otimização pode ser escrito em Programação Matemática como:

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimize } f(x) \\
 & \text{Sujeito a: } g(x) \geq 0 \\
 & \quad \quad \quad h(x) = 0 \\
 & \quad \quad \quad x \in \mathbb{R}_+^n
 \end{aligned}
 \tag{2.9}$$

onde $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ é a função objetivo, $g : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^p$ e $h : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^q$ são restrições que limitam o espaço de soluções factíveis, e x é o vetor das variáveis de decisão. Existem exceções a esta formulação geral, são os problemas sem função objetivo (quando deseja-se apenas encontrar um conjunto de decisões que sejam viáveis), problemas com múltiplos objetivos, entre outros.

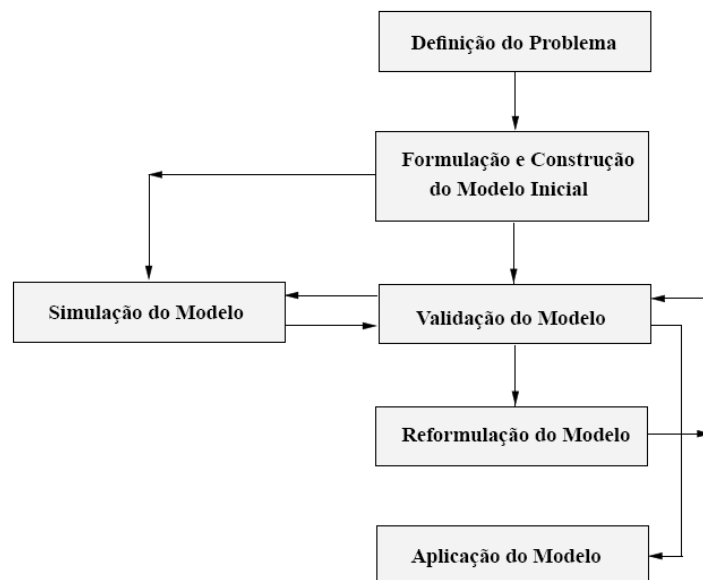


Figura 2.8- processo de formulação e validação de um modelo matemático

Para a formulação, construção, simulação e validação dos modelos desenvolvidos neste trabalho contamos com o software LP_SOLVE apresentado a seguir.

2.5.2 Software para solução de Programação Linear – LPSOLVE IDE

LP_Solve foi desenvolvido por Michel Berkellar, estudante da Universidade de Tecnologia de Eindhoven, é totalmente gratuito e sem limite de variáveis e restrições. Este software está em constante desenvolvimento e seu código fonte está disponível em diversas linguagens de programação, o que permite integrá-lo a qualquer aplicativo em desenvolvimento ou através de APIs.

Algumas características do LP_Solve IDE são relacionadas a seguir:

- Qualquer interação é gráfica e controlada pelo mouse;
- Converte formatos suportados;
- Verificação de sintaxe;
- Exporta modelo para HTML, RTF e LaTeX;
- Exporta a matriz do modelo para CSV, HTML ou RTF;
- Exporta o resultado para CSV, HTML ou RTF;
- Basicamente, não há limite quanto ao tamanho do modelo;
- Suporta variáveis inteiras, semi-contínuas e conjuntos especiais ordenados;
- Compatível com modelos gerados à partir de softwares tais como: CPLEX e AMPL.

Para obter o LP_Solve, basta cadastrar-se no Yahoo Group: http://groups.yahoo.com/group/lp_solve/ e, em seguida, ter acesso a todos os documentos, códigos fonte e aplicativos.

A interface gráfica do LP_Solve IDE disponibiliza todos os comandos do LP_Solve em forma de menus e abas, sendo totalmente independente de qualquer interação via linha de comando. Esta interface foi desenvolvida por Henri Gourvest e disponibilizada, gratuitamente, à comunidade LP_Solve.

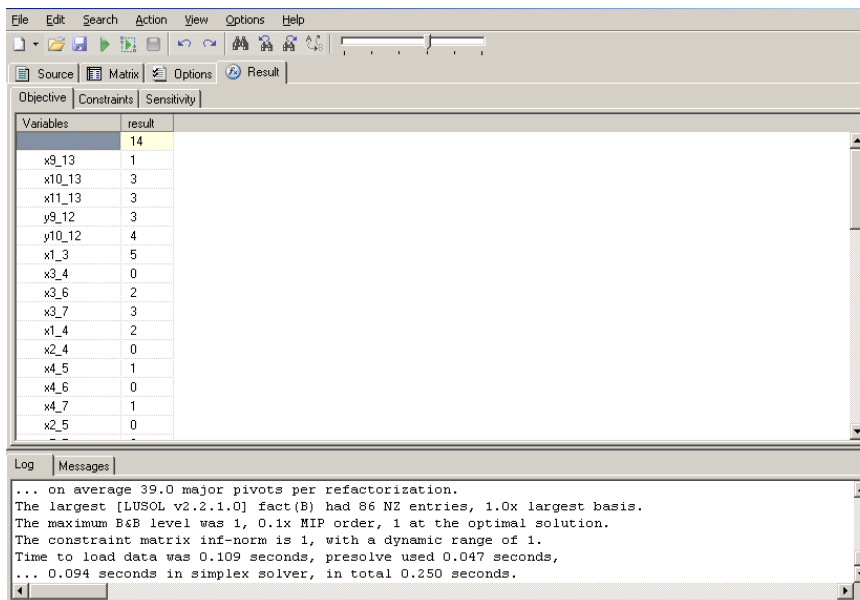
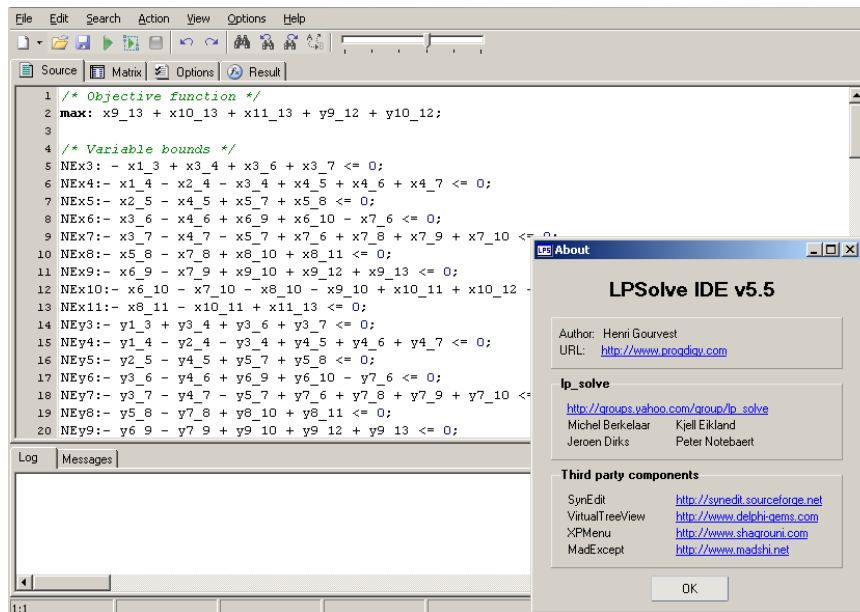


Figura 2.9 – Interface gráfica do LP_Solve IDE

Nesta dissertação utilizaremos o LP_SOLVE IDE, que utiliza a API (Application Programming Interface) do Windows, pois fornece um ambiente amigável para descrição e solução de modelos em programação linear.

3 PROPOSTA PARA DISTRIBUIÇÃO DE TRÁFEGO E IMUNIZAÇÃO CONTRA DUPLAS FALHAS EM REDES ASON

Desafiados a propor uma solução eficiente para o problema, escolhemos a programação linear inteira como ferramenta de suporte a metodologia, por ser voltada a soluções ótimas. Para que um problema possa ser descrito em programação linear deve-se garantir sua linearidade atendendo às hipóteses de:

- Proporcionalidade: o valor da função objetivo é proporcional às variáveis, isto é, alterando-se o valor das variáveis de forma constante, é constante o resultado da função objetivo;
- Aditividade: as variáveis do modelo devem ser totalmente independentes entre si, ou seja, nenhuma variável deve ter o poder de multiplicação ou divisão sobre outra, apenas adição de variáveis é permitida;
- Divisibilidade e não negatividade: valores fracionários positivos são permitidos. Deve-se desconsiderar esta hipótese quando trabalhar com programação linear inteira, como neste trabalho;
- Linearidade da função objetivo: as variáveis utilizadas em cada restrição contribuem para alcançar o objetivo global do modelo, assim, a função objetivo deve ser proporcional às variáveis e a contribuição total é a soma das contribuições de todas as restrições.
- Certeza: todos os parâmetros são constantes conhecidas.

Como serão apresentados a seguir, os modelos propostos seguem as hipóteses que garantem a descrição do problema, e sua solução, na forma de programação linear inteira.

Sendo $G(N, E)$ um grafo representando uma rede composta pelo conjunto de nós “N” e pelo conjunto de enlaces “E”, tendo o conjunto “D”, que representa todas as demandas a serem provisionadas entre os nós origem e destino da rede, apresentaremos modelos, formulados em programação linear inteira, capazes de fornecer:

- O conjunto de capacidades de proteção “CP”, que contém todos os caminhos alternativos na presença de cada combinação das falhas “f” e “g”
 $\{ \forall f \neq g \mid f, g \in E \}$;

- O conjunto de caminhos selecionados “CS”, que contém os caminhos escolhidos para atendimento de cada demanda “d”, pertencente ao conjunto “D”, em condições normais (sem falhas) de operação da rede;
- Imunidade máxima contra dupla falha com o menor custo possível. O custo é um fator secundário nesta proposta, onde a prioridade é evitar a interrupção dos serviços na presença de qualquer combinação das falhas “f” e “g” $\{ \forall f \neq g \mid f, g \in E \}$;
- O conjunto de demandas interrompidas “T”, que contempla todas as demandas “d”, pertencentes a “D”, que serão interrompidas na presença de determinadas combinações das falhas “f” e “g” $\{ \forall f \neq g \mid f, g \in E \}$;

Vale lembrar que a conectividade entre os nós da rede é o fator mais importante, seguido de perto pela quantidade de banda de transmissão, para que seja possível alcançar 100% de imunidade contra qualquer combinação de dupla falha. A rede ideal, que permite a máxima imunidade contra dupla falha, deve possuir nós (equipamentos de rede) de no mínimo grau 3 (significa que devem possuir pelo menos três enlaces incidentes) e banda de transmissão a ser determinada pelos modelos propostos.

3.1 IMUNIZAÇÃO EFICIENTE CONTRA DUPLA FALHA

Duplas falhas de enlaces são consideradas neste trabalho como sendo a interrupção, simultânea ou não, de dois enlaces distintos.

O mecanismo PRC, Proteção e Restauração Combinadas, foi descrito em programação linear inteira considerando todas as combinações possíveis de dupla falha para cada demanda oferecida a uma determinada rede de topologia arbitrária.

Modelos descritos em programação linear utilizam conjuntos, parâmetros, variáveis, um objetivo e restrições. Para o modelo apresentado a seguir, consideramos:

- Sistema de transmissão homogêneo de $\sigma_{o,d}$ demandas de mesma taxa (podendo ser 155Mbps, 622Mbps, 2,5Gbps, 10Gbps, Lambdas de 10Gbps, Lambdas de 40Gbps, etc), $\forall o \neq d : o, d \in D$;
- Enlaces de ϕ quilômetros com média anual de interrupções igual a δ e banda total igual a β ;

- Capacidade de conversão de comprimento de onda, quando for necessário distribuir Lambdas de mesma taxa na rede, e comutação automática em todos os nós da rede;

No modelo PRC utilizamos os conjuntos D , que contempla os pares de nós que possuem demandas de tráfego entre si, e E , conjunto de enlaces da rede. Para cada $d \in D$, um novo conjunto, contendo todos os caminhos possíveis entre cada nó de origem e destino (chamados apenas de o e d , respectivamente), é previamente calculado, onde cada r (de um total de $\pi_{o,d}$ caminhos) é composto por outro conjunto de enlaces denominado $T_r^{o,d}$. A variável $P_r^{o,d}$ relaciona quantas conexões utilizam o caminho r entre a origem o e o destino d , enquanto que a variável $P_{r_1,r_2}^{o,d}$ relaciona quantas conexões utilizam a combinação de caminhos distintos, r_1 e r_2 , entre a origem o e o destino d . $I_{f,g}^{o,d}$ contabiliza as conexões interrompidas entre o e d na presença das falhas f e g , $\forall o \neq d : o,d \in D \wedge f \neq g : f,g \in E$. A variável $CP_{r,o,d}^{f,g}$ conta a quantidade de conexões necessárias entre o e d , através do caminho r , na presença das falhas f e g , $\forall o \neq d : o,d \in D, \forall r \in \{1,2,\dots,\pi_{o,d}\} : f \neq g \wedge f,g \in E$. Contadores de banda de transmissão por enlace foram inseridos como variáveis para mensurar sua utilização para Capacidade de Proteção (Se) ou para comportar o tráfego dos caminhos distintos que atendem a cada demanda $d \in D$, (We). O total de banda de transmissão por enlace é obtido pela soma de Se e We , sendo representado pela variável Le , $\forall e \in E$. Como é comum encontrar restrições para ampliação de determinados enlaces da rede, inserimos a possibilidade de limitar a quantidade de banda de transmissão por enlace Le , porém, deve-se ter muito cuidado com esta variável, pois quantidades muito pequenas de Le , comparado ao total de demandas de tráfego, podem resultar em uma baixa imunidade contra duplas falhas ou até mesmo inviabilizar a solução.

O parâmetro K foi criado e adicionado à função Objetivo para permitir ao projetista escolher entre maior imunidade à dupla falha, fazendo K muito grande, ou uma distribuição de tráfego com a menor distância possível, fazendo $K=1$. Como sugestão de valor para este parâmetro, obviamente buscando a máxima imunidade, considere a equação 3.11.

Acrescentamos o sufixo RE ao modelo acima, originando o PRC-RE, para indicar a Reutilização de Enlaces. Tal técnica permite uma redução de até 26% da banda de

transmissão total em relação ao PRC, mantendo o índice de Imunidade contra dupla falha, e consiste em permitir que os enlaces íntegros e pertencentes a caminhos afetados pelas falhas f e g , sejam utilizados pelo processo de Restauração. Para indicar o uso ou não desta técnica, adicionamos o binário α ao modelo, onde 0 significa ausência da RE e 1 significa RE em uso.

3.2 MODELO PRC-SRE E PRC-RE

Geramos o conjunto $P'_{o,d}$, parâmetro 3.10 abaixo, que contempla todos os pares de caminhos distintos entre cada demanda. Este, por sua vez, demandou a geração do conjunto $P_{o,d}$, parâmetro 3.9 abaixo, que contém todos os possíveis caminhos entre cada par de nós, origem e destino, que possuem demanda de tráfego entre si.

O primeiro somatório da função Objetivo detalhada pela equação 3.20 procura minimizar de forma ótima a quantidade de interrupções de tráfego causadas por qualquer combinação de dupla falha em enlaces (enlaces distintos) para todas as demandas entre os pares de nós origem e destino. O segundo somatório busca a redução da quantidade de banda alocada em cada enlace. Para cada enlace determinamos um custo, que é calculado pela distância em quilômetros multiplicada por 1 mais a quantidade média de interrupções anual do referido enlace, ou seja, custo = $\phi_e(1 + \delta)$. Exemplificando, para um enlace que possui uma média de duas interrupções por ano, seu custo será de três vezes sua distância em quilômetros.

A restrição 3.21 determina a soma de banda de transmissão por enlace para recuperação de falhas e/ou para os caminhos distintos escolhidos para atender a cada demanda. A próxima restrição, 3.22, insere um limite para a quantidade de banda de transmissão para cada enlace. Toda banda de transmissão por enlace, necessária para atender aos caminhos distintos selecionados para cada demanda são contabilizados pela restrição 3.23. A quantidade de demandas entre os pares de nós origem e destino, $\sigma_{o,d}$, determina a quantidade de pares de caminhos distintos que podem ser selecionados para atender cada uma das demandas entre pertencentes ao conjunto D, desta forma, é garantido pela restrição 3.24 que pelo menos um par de caminhos distintos será selecionado. Para cada par de caminhos distintos que é selecionado, devemos incrementar a variável referente a cada um dos caminhos, isso é feito na restrição 3.25. A restrição 3.26 seleciona o(s) caminho(s) de proteção para uma determinada demanda, pertencente ao conjunto de

demandas D , na presença de uma dupla falha de enlace que afeta o(s) par(es) de caminhos distintos selecionado(s) para atender à referida demanda. Esta restrição é aplicada a cada demanda e a cada combinação de dupla falha de enlace possível na rede. O cálculo de toda a capacidade necessária em cada enlace, para restauração de tráfego das demandas afetadas por uma dupla falha, é feito pela restrição 3.27, que possui o parâmetro $\alpha \in \{0,1\}$ permitindo selecionar o uso do recurso “Reuso de Enlaces”. Quando selecionado, permite considerar como banda disponível para restauração toda a banda aprovionada nos enlaces íntegros pertencentes a caminhos afetados pela dupla falha.

Conjuntos:

$$D \quad 3.1$$

$$E \quad 3.2$$

$$T_r^{o,d} \subset E \quad \forall d \in D, \forall r \in \{1, 2, \dots, \pi_{o,d}\} \quad 3.3$$

Parâmetros:

$$\sigma_{o,d} \in \mathbb{N} \quad \forall o \neq d : o, d \in D \quad 3.4$$

$$\phi_e \in \mathbb{R}_+ \quad \forall e \in E \quad 3.5$$

$$\pi_{o,d} \in \mathbb{N} \quad \forall o \neq d : o, d \in D \quad 3.6$$

$$\delta_e \in \mathbb{N} \quad \forall e \in E \quad 3.7$$

$$\beta_e \in \mathbb{R}_+ \quad \forall e \in E \quad 3.8$$

$$P_{o,d} = \{r : r \in \{1, 2, \dots, \pi_{o,d}\}, T_r^{o,d} \neq \emptyset\} \quad \forall o \neq d : o, d \in D, \forall e \in E : e \in T_r^{o,d} \quad 3.9$$

$$P'_{o,d} = \{(r_1, r_2) : r_1, r_2 \in \{1, 2, \dots, \pi_{o,d}\}, r_1 \neq r_2 \wedge T_{r_1}^{o,d} \cap T_{r_2}^{o,d} = \emptyset\} \quad \forall o \neq d : o, d \in D, \forall e \in E : e \in T_r^{o,d} \quad 3.10$$

$$K > \sum_{e \in E} \phi_e \delta_e \quad \forall e \in E \quad 3.11$$

$$\alpha \in \{0,1\} \quad 3.12$$

Variáveis:

$$P_r^{o,d} \in N \quad \forall o \neq d : o, d \in D, \forall r \in \{1, 2, \dots, \pi_{o,d}\} \quad 3.13$$

$$L_e \in N \quad \forall e \in E \quad 3.14$$

$$P_{r_1, r_2}^{o,d} \in N \quad \forall o \neq d : o, d \in D \quad 3.15$$

$$I_{f,g}^{o,d} \in N \quad \forall o \neq d : o, d \in D, \forall f, g \in E : f \neq g \quad 3.16$$

$$CP_{r,o,d}^{f,g} \in N \quad \begin{aligned} &\forall f, g \in E, \forall o \neq d : o, d \in D, \\ &\forall r \in \{1, 2, \dots, \pi_{o,d}\} : f \neq g \end{aligned} \quad 3.17$$

$$W_e \in N \quad \forall e \in E \quad 3.18$$

$$S_e \in N \quad \forall e \in E \quad 3.19$$

Função Objetivo:

Minimizar :

$$k \sum_{\substack{o,d \in D \\ f,g \in E, f \neq g}} I_{f,g}^{o,d} + \sum_{e \in E} \phi_e (1 + \delta) L_e \quad 3.20$$

Restrições

$$S_e + W_e = L_e \quad \forall e \in E \quad 3.21$$

$$L_e \leq \beta \quad \forall e \in E \quad 3.22$$

$$\sum_{\substack{\{o,d \in D, \\ r \in \{1, 2, \dots, \pi_{o,d}\} : e \in T_r^{o,d}\}}} P_r^{o,d} = W_e \quad \forall e \in E \quad 3.23$$

$$\sum_{\substack{\{o,d \in D, \\ r \in \{1, 2, \dots, \pi_{o,d}\} : e \in T_r^{o,d}\}}} P_{r_1, r_2}^{o,d} = \sigma_{o,d} \quad \forall o \neq d : o, d \in D \quad 3.24$$

$$\sum_{(r_1, r_2) \in P_{o,d}'} P_{r_1, r_2}^{o,d} + \sum_{(r_2, r_1) \in P_{o,d}'} P_{r_2, r_1}^{o,d} = P_r^{o,d} \quad \begin{aligned} &\forall o \neq d : o, d \in D, \\ &r \in \{1, 2, \dots, \pi_{o,d}\} \end{aligned} \quad 3.25$$

$$\sum_{\substack{r \in P_{o,d}: \\ f \wedge g \notin T_r^{o,d}}} CP_{r,o,d}^{f,g} + I_{f,g}^{o,d} = \sum_{\substack{\{(r_1, r_2) \in P_{o,d}\}: \\ (f \in T_{r_1}^{o,d}) \wedge g \in T_{r_2}^{o,d}) \vee \\ (f \in T_{r_2}^{o,d}) \wedge g \in T_{r_1}^{o,d})}} P_{r_1, r_2}^{o,d} \quad \forall o \neq d : o, d \in D, \quad 3.26$$

$$\forall f, g \in E : f \neq g$$

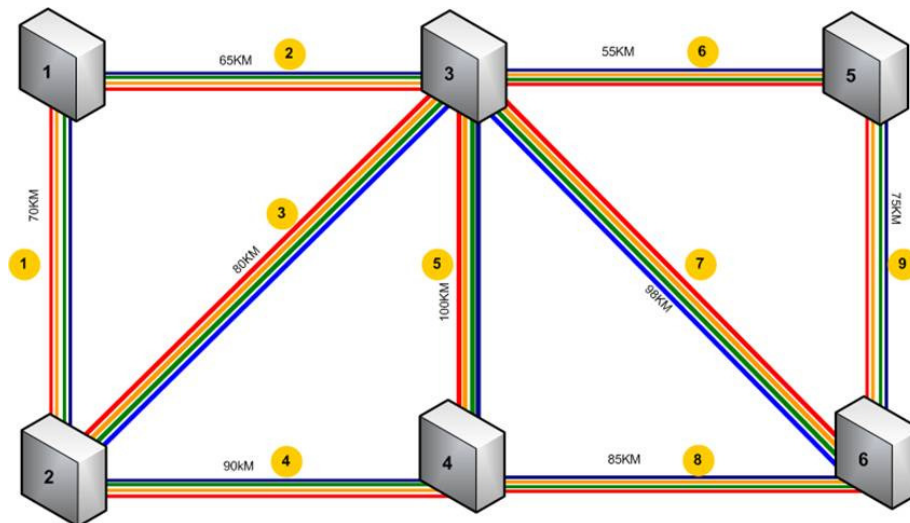
$$\sum_{\substack{\{o,d \in D, \\ r \in \{1,2,\dots,\pi_{o,d}\}: \\ e \in T_r^{o,d}\}}} CP_{r,o,d}^{f,g} \leq S_e + \alpha \times \sum_{\substack{\{o,d \in D, \\ r \in \{1,2,\dots,\pi_{o,d}\}: \\ e \in T_r^{o,d} \wedge (f \vee g \in T_r^{o,d})}} P_r^{o,d} \quad \forall f, g, e \in E: \quad 3.27$$

$$f \neq e \neq g \neq f$$

A seguir, aplicaremos o modelo PRC-RE a uma rede hipotética para exemplificar a linguagem de escrita utilizado pelo LP_solve, software utilizado para resolvê-lo. Outro ponto a ser considerado é que este modelo gera um arquivo extenso, com milhares de linhas, inviabilizando sua escrita manual. Por esta razão criamos rotinas em Visual Basic do MS-Excel, que geram automaticamente o arquivo “.lp” (extensão do software LP_Solve), que serão descritas mais adiante.

3.3 EXEMPLO DE ESCRITA DO MODELO

A rede escolhida para demonstrar a escrita do modelo em programação linear inteira é mostrada na Figura 3.1 abaixo. Composta por 6 nós, 9 enlaces e tendo o conjunto D com 13 demandas de tráfego, o modelo PRC-RE resultante possui mais de 2000 linhas, com cerca de 200 caracteres por linha. Isso porque as formulações acima devem ser aplicadas a todas as combinações possíveis de eventos de falha, de caminhos distintos, de escolha de caminhos para recuperação de falha, etc. Para que um problema descrito em programação linear possa fornecer a solução ótima, todas as situações possíveis devem ser fornecidas.



A matriz de tráfego, obtida a partir do conjunto D, é mostrada abaixo e é composta pelos pares de nós com relação de demanda de tráfego entre si. O cruzamento com o nó origem e o nó destino possui a quantidade de tráfego, sempre bi-direcional, entre eles.

		NÓ ORIGEM					
		01	02	03	04	05	06
NÓ DESTINO	01		5	3	2		2
	02	5		5	3	3	4
	03	3	5			7	2
	04	2	3			4	6
	05		3	7	4		3
	06	2	4	2	6	3	

Figura 3.2- Matriz de tráfego

Como a quantidade de linhas referentes a este modelo inviabiliza sua inclusão neste trabalho, pois representaria mais de 150 páginas, mostraremos apenas exemplos de linhas que foram geradas a partir de cada equação mostrada no capítulo 3.2.

A função objetivo definida na equação 3.20 possui duas partes, uma que relaciona todas as interrupções possíveis, causadas por dupla falha, e outra que relaciona o custo total pelo uso de cada enlace. A função objetivo sempre busca minimizar ou maximizar uma determinada equação, portanto, observe a palavra “MIN:” que inicia a linha. O parâmetro $K=100000$, que aparece multiplicando a variável $I_{f,g}^{o,d}$, determina a prioridade atribuída a imunização contra interrupção causada por dupla falha em relação a segunda parte da equação. Consegue-se esta prioridade porque o software LP_Solve, e qualquer outro que resolva problemas de programação linear, tentará minimizar o valor da equação fazendo igual a zero todas as variáveis de maior custo em detrimento das variáveis de menor custo, sempre que esta condição atender às restrições do modelo. Após relacionar todas as possíveis interrupções para cada demanda e para cada combinação de dupla falha, a função objetivo recebe a relação de enlaces com seus respectivos custos definidos por $\phi_e(1 + \delta)$.

Uma parte da função objetivo, pertencente ao arquivo “.lp”, é mostrada abaixo. A título de curiosidade, só a função objetivo para esta rede representaria mais de 100 linhas neste documento, portanto, somente algumas são mostradas: “MIN: + 100000 I01_02_1_2 + 100000 I01_02_1_3 + 100000 I01_02_1_4 + 100000 I01_02_1_5 + 100000 I01_02_1_6 + 100000 I01_02_1_7 + 100000 I01_02_1_8 + 100000 I01_02_1_9 + 100000 I01_02_2_1 + 100000 I01_02_2_3 + 100000 I01_02_2_4 + + 70 L1 + 65 L2 + 80 L3 + 90 L4 + 100 L5 + 55 L6 + 98 L7 + 85 L8 + 75 L9;”

A restrição 3.21 totaliza a quantidade de banda de transmissão para cada enlace, enquanto a restrição 3.22 limita esta quantidade, conforme mostrado a seguir:

$$S1 + W1 = L1 ;$$

$$L1 \leq 50 ;$$

.

.

$$S9 + W9 = L9 ;$$

$$L9 \leq 50 ;”$$

O total de banda de transmissão para os caminhos selecionados, para atender cada demanda, é calculado pela restrição 3.23. A idéia aqui é listar todas as opções de caminhos entre cada origem e destino que passam por cada enlace, assim, as rotas que atendem as demais restrições são escolhidas e a variável We representa sua soma. Esta equação existe para cada enlace da rede: “+ P1_01_02+ P1_02_03+ P1_01_03+ P2_01_03+ P3_01_03+ P4_01_03+ P5_01_03+ P6_01_03+ P3_01_06+ P4_01_06+ P5_01_06+ P9_01_06+ P10_01_06+ P1_04_05+ P1_03_05+ P1_05_02+ P6_05_02+ P10_05_02+ P1_01_04+ P2_01_04+ P6_01_04+ P1_02_04+ P2_02_04+ P4_02_06+ P5_02_06+ P1_01_07+ P2_01_07+ P1_03_08+ P2_03_08+ P1_05_07+ P2_05_07+ P1_06_07+ P2_06_07 = W1 ;

.

.

$$P4_01_07+ P6_01_07+ P8_01_07+ P12_01_07 + P2_01_07+ P1_03_08+ P3_03_08+ P7_03_08+ P5_03_08+ P10_05_07+ P2_05_07 + P26_05_07+ P4_05_07+ P22_05_07+ P10_06_07+ P2_06_07+ P26_06_07+ P4_06_07 + P22_06_07+ P2_08_02+ P2_07_08 = W13;”$$

A restrição 3.24 informa ao programa linear que é seu dever selecionar pelo menos uma das rotas distintas, que podem atender cada demanda, limitado a quantidade de tráfego entre os referidos nós. Verifique na matriz de tráfego que o parâmetro limitante desta equação é o cruzamento do nó origem e destino, ou seja, a demanda de tráfego entre si. Esta equação é aplicada a cada demanda presente no conjunto D: “ + P01_02_1_2 + P01_02_1_3 + P01_02_1_4 + P01_02_1_5 + P01_02_1_6 + P01_02_1_7 + P01_02_2_1 + P01_02_3_1 + P01_02_4_1 + P01_02_5_1 + P01_02_6_1 + P01_02_7_1 = 5;

.

.

P04_06_4_8 + P04_06_4_9 + P04_06_4_5 + P04_06_8_4 + P04_06_8_9 + P04_06_8_6 + P04_06_9_4 + P04_06_9_8 + P04_06_9_5 + P04_06_9_6 + P04_06_9_7 + P04_06_5_4 + P04_06_5_9 + P04_06_6_8 + P04_06_6_9 + P04_06_7_9 = 6; “

Todo caminho possível entre origem e destino pode, ou não, ser combinado com outro para formar um par de caminhos distintos, ou seja, não há sequer um enlace comum entre eles. Caso algum caminho não possa compor um par de caminhos distintos, este é igualado a zero. Estas condições são descritas pela restrição 3.25, que possui a seguinte sintaxe em programação linear: “+ P01_02_1_2 + P01_02_1_3 + P01_02_1_4 + P01_02_1_5 + P01_02_1_6 + P01_02_1_7 + P01_02_2_1 + P01_02_3_1 + P01_02_4_1 + P01_02_5_1 + P01_02_6_1 + P01_02_7_1 = P1_01_02;

.

.

P04_06_9_7 + P04_06_7_9 = P7_04_06;”

O modelo, descrito em programação linear, deve receber informações sobre quais caminhos poderá utilizar para recuperar toda combinação possível de dupla falha, de acordo com os pares de caminhos distintos selecionados para cada demanda. Nos casos onde a dupla falha isola um dos nós do par origem e destino, não haverá caminhos possíveis para recuperação, portanto, a referida variável $CP_{r,o,d}^{f,g}$ será nula. Outra situação é onde a dupla falha não interrompe a conexão entre origem e destino, fazendo o lado direito da equação igual a zero. A restrição 3.26 faz este trabalho através da seguinte sintaxe: “+

$$I01_02_1_2 = + P01_02_1_2 + P01_02_1_3 + P01_02_1_4 + P01_02_1_5 + P01_02_1_6 + P01_02_1_7 + P01_02_2_1 + P01_02_3_1 + P01_02_4_1 + P01_02_5_1 + P01_02_6_1 + P01_02_7_1;$$

$$I01_02_1_2 = I01_02_2_1;$$

.

.

$$CP1_01_02_2_3 + I01_02_2_3 = 0;$$

$$I01_02_2_3 = I01_02_3_2;$$

.

.

$$I07_08_12_13 = + P07_08_1_2 + P07_08_2_1;$$

$$I07_08_12_13 = I07_08_13_12;”$$

Para a última restrição, equação 3.27, a sintaxe contempla, para cada dupla falha e demanda entre origem e destino, todas as opções de recuperação contra dupla falha são fornecidas para forçar que a variável Se seja maior ou igual a sua soma. A parcela da equação que é somada à variável Se, do lado direito da igualdade, representa a funcionalidade “Reuso de Enlaces”. Caso o projetista habilite esta funcionalidade, todos os caminhos que são afetados pela dupla falha em análise serão informados ao modelo, descrito em programação linear, da seguinte forma: “+ CP2_02_03_1_2 + CP3_04_05_1_2 + CP3_03_05_1_2 + CP3_03_06_1_2 + CP4_03_06_1_2 + CP7_05_02_1_2 + CP2_05_02_1_2 + CP11_05_02_1_2 + CP2_06_05_1_2 + CP6_06_05_1_2 + CP6_02_04_1_2 + CP7_02_04_1_2 + CP8_02_04_1_2 + CP9_02_04_1_2 + CP10_02_04_1_2 + CP10_02_06_1_2 + CP9_02_06_1_2 + CP4_04_06_1_2 <= S3 + P2_01_02 + P1_01_03 + P3_01_06 + P4_01_06 + P5_01_06 + P1_01_04 + P2_01_04;

.

.

$$CP5_01_02_1_5 + CP7_01_02_1_5 + CP5_02_03_1_5 + CP16_01_06_1_5 + CP9_04_05_1_5 + CP9_03_05_1_5 + CP3_03_06_1_5 + CP8_03_06_1_5 + CP13_05_02_1_5 + CP11_05_02_1_5 + CP9_06_05_1_5 + CP10_01_04_1_5 + CP12_01_04_1_5 + CP8_02_04_1_5 + CP10_02_04_1_5 + CP9_02_06_1_5 +$$

CP14_02_06_1_5 + CP8_04_06_1_5 <= S9 + P4_01_03 + P6_01_03 + P4_01_06 + P9_01_06 + P6_04_05 + P6_03_05 + P5_03_06 + P10_05_02 + P4_02_06 + P5_04_06;”

A programação linear inteira é a arte de representar um problema na forma de inequações e equações que contribuem para encontrarmos valores ótimos para cada variável e, conseqüentemente, para o problema. Infelizmente, problemas complexos, como o que estamos tratando neste trabalho, geram modelos de centenas de milhares de linhas quando aplicados a redes reais, que possuem dezenas de nós e enlaces. Para resolver o problema de escrita do modelo em programação linear, criamos diversas rotinas em visual basic do MS-EXCEL, detalhadas no capítulo a seguir.

3.4 AUTOMAÇÃO DO PROCESSO DE ESCRITA DO MODELO

Por ser muito extensa e susceptível a erros de escrita, a formulação do modelo na linguagem do software LP_Solve foi automatizada através de Macros criadas no MS-Excel. Conjuntos, parâmetros, variáveis, função objetivo e restrições foram distribuídas em planilhas denominadas:

- Demanda_x_Estações: correlação entre nó origem e destino e a demanda de tráfego, ou seja, é o conjunto D do nosso modelo;
- Estações-De_Para: apenas uma planilha de apoio, para conversão dos nomes das estações em rótulo alfanumérico de dois dígitos. Isso facilita a composição das variáveis evitando nomes muito extensos;
- Projeto: contem os parâmetros K = prioridade da imunização contra dupla falha em relação a distribuição de tráfego pelo menor caminho, α = utilização ou não do reuso de enlaces e habilita/desabilita o uso do heurístico, na escrita do modelo. Possui também a relação de atalhos de teclado para execução de cada etapa do projeto através das rotinas criadas em VBA do Excel;
- Rede: contem a lista de incidência de cada nó da rede;
- Rotas: relacionam todos os caminhos selecionados para cada demanda pertencente a D e um conjunto de caminhos selecionados via heurística, respectivamente. Este é o conjunto $P_{o,d}$;

- Demandas: relacionam todos os pares de caminhos distintos para cada demanda pertencente a D e um conjunto de pares de caminhos selecionados via heurística, respectivamente. Este é o conjunto $P'_{o,d}$;
- Enlaces_Rotas: contém a relação de todos os caminhos para todas as demandas, pertencentes a D, por enlace;
- Script e Script_H_PC:: modelo PRC com ou sem reuso de enlaces e modelo PC, Proteção de Caminho, utilizado na Heurística Dupla Fase;
- Resultado_LP-Solve e Resultado_LP_Solve_PC:: reservada para inclusão do resultado obtido pela solução do modelo;
- Resultado e Resultado_PC: recebe a “tradução” do resultado do modelo em linguagem compreensível para projetistas de rede.

O conjunto de pares de nós com relação de demanda foi descrito na planilha Demanda_x_Estações na forma de uma matriz “MxM” tendo como linhas e colunas o nome das estações que possuem os equipamentos de transmissão que compõem a rede e em seu cruzamento a quantidade de tráfego entre os elas.

		B																	
A		BNU-BNU2	BSA-ETCE	BSA-ETCO	CBA-ECOX	CPE-CPCE	CSC-CSGO	CTA-CTJE	CTA-CTME	FNS-FNS	GNA-CTO	MGA-MGNM	MGA-MGRC	MUR-MUR	PAE-BVA	PAE-MTZ	PEX-PEX	ROI-EROI	SPO-ETPA
BNU-BNU2			2				3	1		12			1						
BSA-ETCE		2				14	1		31		24						29		21
BSA-ETCO		4	4			1		1											21
CBA-ECOX		17				1											1	2	
CPE-CPCE		14	1				5	1					1						
CSC-CSGO		3	1				5	2	17	1			1	1					
CTA-CTJE		1		1		1	2	14	14	2	1		2		2	1			
CTA-CTME			31				17	14		31		15	4		4	52			42
FNS-FNS		12					1	2	31						1	29			
GNA-CTO			24					1											
MGA-MGNM									15				3						
MGA-MGRC		1				1	1	2	4			3		1					
MUR-MUR							1						1						
PAE-BVA		1						2	4	1						20			
PAE-MTZ			29					1	52	29					20				
PEX-PEX						1													
ROI-EROI																			
SPO-ETPA			21	21					42										

Figura 3.3- Planilha Demanda_x_Estações

- Imunidade da rede contra dupla falha, para a demanda de conexões presentes no

conjunto D. Esta imunidade é calculada através da equação $1 - \frac{\sum_{\forall f, g \in E: f \neq g} I_{f,g}^{o,d}}{m(m-1)}$, onde

m é o total de enlaces da rede;

- Demandas interrompidas: lista de demandas que não foram protegidas contra dupla falha de enlaces seja por falta de banda de transmissão ou devido a dupla falha ter ocorrido nos únicos dois enlaces pertencentes a um dos nós da demanda, isolando-o da rede. Para cada demanda listada há a combinação de dupla falha de enlaces que causará a interrupção, se ocorrerem;
- Capacidade por enlace: relação da quantidade de banda necessária para garantir a imunidade da rede contra dupla falha de enlaces, dividida em banda para os caminhos distintos (Principal e Secundário) e banda para o processo de restauração (Reservada);
- Caminhos Seleccionados: lista de todos os caminhos seleccionados para atender a cada demanda contendo o par o_d , a quantidade de tráfego, a seqüência de nós que formam o caminho, o valor de $r \in \{1, 2, \dots, \pi_{o,d}\}$ e a distância total em quilômetros;
- Caminhos pré-seleccionados para recuperação: lista de todos os caminhos a serem utilizados no caso de dupla falha de enlace por demanda, contendo o par o_d , a seqüência de nós que compõem o caminho, o número $r \in \{1, 2, \dots, \pi_{o,d}\}$ da rota, a quantidade de tráfego e a dupla falha de enlaces (falha 1 e falha 2).

REDE OTIMIZADA - PROTEÇÃO E RESTAURAÇÃO COMBINADAS E REUSO DE ENLACES																							
FATOR K: 100,000 Quantidade maior, maior a importância dada à recuperação por dupla falha																							
COMPRIMENTO TOTAL DOS CAMINHOS SELECIONADOS (KM)												22.281											
IMUNIDADE DA REDE CONTRA DUPLA FALHA												97,44%											
DEMANDAS INTERROMPIDAS												CAPACIDADE POR ENLACE		CAMINHOS SELECIONADOS									
DEMANDA	FALHA 1	FALHA 2	ENLACE	PRIM-SEC	RESERVA	TOTAL	KM	DEMANDA	QTDE	CAMINHO	ID_CAMINHO	TOTAL (KM)	DEMANDA	CAMINHO	ID_CAMINHO	QTDE	TOTAL (KM)	FALHA 1	FALHA 2				
RL_02	1	2	E1	42	1	43	70	RL_02	5	0102	1	70	RL_02	0102002	3	4	252	1	3				
RL_02	2	1	E2	42	0	42	65	RL_02	5	0102	2	145	RL_02	0102003002	5	1	270	1	3				
RL_02	1	2	E3	43	0	43	80	RL_02	5	020303	1	135	RL_02	02040303	4	5	182	1	3				
RL_02	2	1	E4	43	0	43	90	RL_02	5	0203	2	80	RL_02	02040303	4	5	182	2	3				
RL_02	1	2	E5	10	1	11	100	RL_02	3	010203	1	150	RL_02	01020303	3	2	272	2	3				
RL_02	2	1	E6	25	1	27	55	RL_02	3	0103	7	82	RL_02	0103020406	15	2	242	1	7				
RL_02	1	2	E7	27	0	27	98	RL_02	2	0102030405	3	200	RL_02	0102030405	3	2	272	2	3				
RL_02	2	1	E8	25	0	25	85	RL_02	2	040205	07	163	RL_02	01020305	3	2	272	2	6				
RL_02	1	2	E9	24	1	25	75	RL_02	2	040205005	1	200	RL_02	01020305	3	2	272	2	8				
RL_02	2	1	E10	24	0	24	70	RL_02	2	0405	7	40	RL_02	01020305	4	2	280	2	8				
RL_02	11	12	E11	31	0	31	70	RL_02	3	040605	3	225	RL_02	01020305	3	2	272	3	7				
RL_02	11	13	E12	31	0	31	70	RL_02	3	040605	3	180	RL_02	01020305	10	2	242	6	7				
RL_02	12	11	E13	31	0	31	70	RL_02	3	0301020405	1	252	RL_02	01020305	4	1	280	7	8				
RL_02	11	12						RL_02	3	0305	7	32	RL_02	01020305	3	1	272	7	8				
RL_02	11	12						RL_02	3	0301020405	1	252	RL_02	01020305	10	2	242	7	8				
RL_02	12	11						RL_02	3	030505	3	970	RL_02	04020305	3	1	252	1	10				
RL_02	12	11						RL_02	3	0305	3	210	RL_02	04020305	3	1	252	1	10				
RL_02	12	11						RL_02	3	03010205	6	220	RL_02	04020305	3	2	252	2	10				
RL_02	12	11						RL_02	3	0301020505	3	202	RL_02	04020305	1	2	280	1	8				
RL_02	11	12						RL_02	4	0305	3	30	RL_02	0405	7	2	40	3	3				
RL_02	11	12						RL_02	4	0305	3	30	RL_02	0405	7	2	40	4	8				
RL_02	11	12						RL_02	4	030102	4	222	RL_02	0405	7	2	40	4	3				
RL_02	11	12						RL_02	1	030102	1	130	RL_02	040505	5	2	152	4	10				
RL_02	11	12						RL_02	11	03010202	11	250	RL_02	040505	5	2	270	6	8				
RL_02	12	11						RL_02	2	03010202	1	130	RL_02	0405	7	2	40	6	3				
RL_02	12	11						RL_02	2	03010202	19	210	RL_02	040505	3	2	160	6	10				
RL_02	12	11						RL_02	3	0305	3	75	RL_02	03020405	3	3	210	1	6				
RL_02	12	11						RL_02	3	030505	4	123	RL_02	03020405	3	3	210	1	7				
RL_02	12	11						RL_02	8	030304	8	162	RL_02	03020405	3	3	210	1	5				
RL_02	12	11						RL_02	2	030304	16	160	RL_02	03020405	3	3	210	2	6				
RL_02	11	12						RL_02	3	0304	11	30	RL_02	03020405	3	3	210	2	7				
RL_02	11	12						RL_02	3	0304	11	30	RL_02	03020405	3	3	210	2	7				
RL_02	11	12						RL_02	4	0301020505	1	252	RL_02	03020405	3	3	210	3	5				
RL_02	11	12						RL_02	1	030304	10	970	RL_02	0305	7	1	32	3	8				
RL_02	11	12						RL_02	4	0301020505	4	252	RL_02	0301020405	1	4	252	3	5				
RL_02	11	12						RL_02	1	030406	15	972	RL_02	0301020405	8	5	220	4	5				
RL_02	11	12						RL_02	15	0305	15	972	RL_02	0301020405	3	3	140	4	7				
RL_02	11	12						RL_02	250	03010205	5	250	RL_02	03010205	5	3	140	4	7				
RL_02	11	12						RL_02	10	030304	10	970	RL_02	030405	5	1	140	4	8				
RL_02	11	12						RL_02	4	030406	15	972	RL_02	030405	5	1	140	4	8				
RL_02	11	12						RL_02	3	0405	3	82	RL_02	0305	7	1	32	5	10				
RL_02	11	12						RL_02	3	0405	3	82	RL_02	0305	7	1	32	5	10				
RL_02	11	12						RL_02	7	040505	7	330	RL_02	0305	7	1	32	8	10				
RL_02	11	12						RL_02	2	040505	8	152	RL_02	0305	7	1	32	9	10				
RL_02	11	12						RL_02	2	0405	3	82	RL_02	03040506	5	2	212	3	7				
RL_02	11	12						RL_02	2	040505	3	410	RL_02	03040506	5	2	212	3	7				
RL_02	11	12						RL_02	3	03010207	3	210	RL_02	030505	8	1	130	7	8				
RL_02	11	12						RL_02	1	0301020700	1	332	RL_02	03050506	7	1	180	7	3				
RL_02	11	12						RL_02	4	030304	4	210	RL_02	030505	8	1	130	7	8				
RL_02	11	12						RL_02	3	04020405	2	340	RL_02	03050506	7	1	180	7	3				
RL_02	11	12						RL_02	3	0301020700	3	440	RL_02	03040202	5	1	130	1	7				
RL_02	11	12						RL_02	5	03010208	5	480	RL_02	030402	5	1	130	1	7				
RL_02	11	12						RL_02	2	0301020807	2	220	RL_02	03040202	7	2	220	1	8				
RL_02	11	12						RL_02	2	0301020807	2	220	RL_02	03040202	7	2	220	1	8				

COMPRIMENTO TOTAL DOS CAMINHOS SELECIONADOS (KM)	22.281
IMUNIDADE DA REDE CONTRA DUPLA FALHA	97,44%

DEMANDAS INTERROMPIDAS								CAPACIDADE POR ENLACE				CAMINHOS SELECIONADOS							
DEMANDA	FALHA 1	FALHA 2	ENLACE	PRIM-SEC	RESERVA	TOTAL	KM	DEMANDA	QTDE	CAMINHO	ID_CAMINHO	TOTAL (KM)	DEMANDA	QTDE	CAMINHO	ID_CAMINHO	TOTAL (KM)		
01_02	1	2	E1	42	1	43	70	01_02	5	0102	1	70	01_02	5	010203	2	145		
01_02	2	1	E2	42	0	42	65	01_02	5	010203	1	135	01_02	5	020103	2	80		
01_03	1	2	E3	43	0	43	80	01_03	5	0203	2	150	01_03	3	010203	3	85		
01_03	2	1	E4	43	0	43	90	01_03	5	0203	2	80	01_06	2	010203050406	7	330		
01_06	1	2	E5	10	1	11	100	01_06	2	010203	3	150	01_06	2	010306	17	162		
01_06	2	1	E6	26	1	27	55	01_06	3	0103	3	85	01_07	2	0402010305	1	280		
01_04	1	2	E7	27	0	27	98	01_07	2	0405	2	40	01_07	2	0405	7	40		
01_04	2	1	E8	25	0	25	85	01_07	2	040505	2	225	01_07	11	042020305	3	225		
01_07	1	2	E9	24	1	25	75	01_07	2	040505	2	160	01_07	11	040605	3	160		
01_07	2	1	E10	24	0	24	70	01_07	2	040505	2	160	01_07	12	0301020405	1	265		
01_07	11	12	E11	31	0	31	70	03_05	3	0301020405	1	265							
01_07	11	13	E12	31	0	31	70												
01_07	12	11	E13	31	0	31	70												

Figura 3.11- Planilha Resultado

A solução encontrada para facilitar a escrita e a interpretação dos resultados do modelo proposto foi baseada em Rotinas criadas em VBA (Macros) do MS-Excel, mas poderia ter sido implementada em qualquer linguagem de programação. Para facilitar o entendimento do processo de automação e até mesmo estimular a criação de softwares com a solução proposta neste trabalho, descrevemos a seguir a lógica aplicada a cada macro.

3.4.1 Macro para transformação da matriz de tráfego em conjunto D

Tendo preenchido a planilha Demanda_x_Estações e atribuído um rótulo a cada estação na planilha Estações-De_Para, a macro denominada “conjunto D” pode ser acionada para preencher a planilha Demandas com as informações de Origem, Destino e Quantidade. A rotina inicia com a primeira estação (coluna A) verificando sua relação de tráfego com as demais estações (ou seja, começa pela primeira linha da matriz de tráfego), obtendo o nome da estação A e o nome da estação B cujo cruzamento delas possua um valor maior que zero. Encontrando esta condição, armazena os nomes das estações A e B e a quantidade de tráfego a ser provisionado entre elas. Em seguida, consulta na planilha Estações-De_Para qual o rótulo atribuído a cada uma das estações, A e B. A planilha Demandas recebe os rótulos referentes às estações A e B na segunda coluna (a primeira coluna possui o título das linhas), linhas 2 e 3 respectivamente, e a quantidade de tráfego entre elas, linha 4. O processo descrito acima se repete, com as devidas alterações de coluna na planilha Demandas, até que a todos os cruzamentos não nulos para as estações da coluna A terminem. Como acima e abaixo da diagonal da matriz de tráfego temos os mesmos valores, quando o processo troca de estação A, a coluna referente à estação B é sempre uma posição a frente em relação a posição de início na análise anterior. Para exemplificar, observe a Figura 3.3- Planilha Demanda_x_Estações, após analisar a linha referente a estação “BNU-BNU2” o processo muda para a próxima linha, estação BSA-ETCE, e não pode começar na primeira coluna, onde está “BNU-BNU2” porque já foi considerada na análise anterior e não pode começar com a segunda coluna porque refere-se à mesma estação, portanto, a coluna inicial sempre deve ser deslocada uma posição a frente em relação a coluna de início anterior.

3.4.2 Macro para descoberta de caminhos

As entradas para esta rotina são:

- Nó de origem e nó de destino da planilha Demandas;
- Seleção do uso da heurística (a ser descrita mais adiante) através da planilha Projeto;
- Matriz de incidência da planilha Rede;
- Nó_A, Nó_B, enlace e DIST(KM) da planilha Enlaces_Rotas;

A matriz de incidência é uma forma de representação de rede que consiste em relacionar cada nó da rede com seus respectivos vizinhos (nós adjacentes). Abaixo, a matriz incidência referente a rede mostrada na Figura 3.6- Planilha Rede.

MATRIZ INCIDÊNCIA					
NÓS	INCIDÊNCIA				
01	02	05	/		
02	01	04	/		
03	04	05	07	/	
04	02	03	06	/	
05	01	03	/		
06	04	07	08	11	/
07	03	06	10	/	
08	06	09	/		
09	08	10	17	/	
10	07	09	15	/	
11	06	12	13	14	/
12	11	14	25	/	
13	11	14	/		
14	11	12	13	/	
15	10	16	17	/	
16	15	22	/		
17	09	15	18	/	
18	17	19	/		
19	18	20	21	/	
20	19	23	25	/	
21	19	22	23	/	
22	16	27	28	21	/
23	20	21	26	/	
25	12	20	26	/	
26	23	25	/		
27	22	28	/		
28	22	27	/		

Figura 3.12- Matriz incidência

A rotina utiliza esta matriz para “caminhar” pela rede à procura de todos os caminhos possíveis entre cada nó origem e nó destino presentes na planilha Demandas. Todos os passos da rotina são descritos a seguir:

1. Origem e destino são obtidos da planilha Demandas;
2. O nó origem é localizado na matriz de incidência e seu próximo nó adjacente é analisado (exemplo: nó origem igual a 01, primeira adjacência: 02);
3. Verifica se o caminho que está sendo montado está na lista de caminhos a serem evitados (uma espécie de “Lista Negra”):
 - a. Não: continua no passo 4;
 - b. Sim (isso significa que todos os caminhos, a partir deste nó, já foram analisados): exclui o nó em questão e volta ao passo 2 para analisar a próxima adjacência do nó que está em análise;
4. Caso o nó adjacente seja igual ao nó destino, a rotina verifica se este caminho já não foi encontrado:
 - a. Não: insere o caminho encontrado na planilha rotas atribuindo um índice (1,2,3, ...) ao mesmo. Volta ao passo 2 e analisa a próxima adjacência do nó que está em análise;
 - b. Sim: Volta ao passo 2 e analisa a próxima adjacência do nó que está em análise;
5. Caso o nó adjacente não seja o nó de destino, ele recebe o nome de nó origem e sua próxima adjacência é avaliada:
 - a. Adjacência é um nó válido (diferente de “/”): segue para o passo 2;
 - b. Adjacência é igual a “/” e o nó origem é diferente do nó origem da demanda: inclui o caminho resultante desta pesquisa na lista de caminhos a serem evitados, exclui o último nó deste caminho. O último nó agora é chamado de origem. Siga para o passo 2;
 - c. Adjacência é igual a “/” e o nó origem é igual ao nó origem da demanda: busca novos nós, origem e destino, na planilha Demandas;
6. Nós origem e destino são válidos (diferentes de <vazio>): retorna ao passo 1;

7. Nós origem e destino são inválidos (iguais a <vazio>): vá para o passo 6.
8. Retorna a planilha Rotas e busca o primeiro caminho encontrado, que é a relação de nós por onde passa o tráfego, interligando origem e destino, exemplo: 010304081720, representa uma das opções de caminho para a demanda do nó 01 para o nó 20;
9. Extraia do caminho analisado cada par de nós e encontre, na planilha Enlace_Rotas, qual a distância do enlace que os interliga. Exemplo: primeiro par de nós para o exemplo do passo 6: 01 e 03, segundo par de nós: 03 e 04, e assim por diante até que todos os pares sejam analisados;
10. Some cada distancia encontrada e insira o valor final na planilha Rotas, coluna “Dist. Total (KM)”;
11. Após executar os passos 7 e 8 para todos os caminhos da planilha Rotas, a rotina inicia a descoberta de quais enlaces são utilizados por quais caminhos. Inicia-se no primeiro caminho da planilha Rotas;
12. Extraia do caminho analisado os pares de nós que o compõe;
13. Para cada par de nós, localize na planilha Enlace_Rotas o nome do enlace que os interliga;
14. Localize este enlace na planilha Rotas e insira um “X” na respectiva coluna;
15. A rotina faz este procedimento para todos os caminhos e no final, inclui “0” em todas as colunas que estão em branco.
16. Fim.

3.4.3 Macro para listagem de caminhos por enlace

As entradas para esta rotina são:

- Nó A e nó B da planilha Enlace-Rotas;
- Índice, O-D e Rota da planilha Rotas;

A rotina busca na string Rota a string formada pelo nó A e nó B, ao encontrar, gera uma nova string formada por “P” + Índice + O-D, que é gravada na coluna referente ao enlace em análise na planilha Enlace-Rotas. Este procedimento se repete até que todos os enlaces da planilha Enlace-Rotas sejam preenchidos.

3.4.4 Macro para escrita do modelo

Esta rotina descreve tanto o modelo PRC-SRE como o PRC-RE e faz uso de todos os conjuntos criados pelas macros anteriores e os parâmetros de projeto, que são definidos pelo projetista antes de acionar este processo.

Para escrever a função objetivo aplica-se a todo o conjunto de demandas (nó origem e nó destino), presente na planilha Demandas, o seguinte procedimento:

1. Da planilha Projeto, obtém-se o valor de K e da planilha Enlaces_Rotas o valor de f e g, que representam as duas falhas que podem ocorrer na rede, sendo f diferente de g;
2. A string a ser gravada na planilha “Script” é montada da seguinte forma: <+><espaço><K><espaço><I><nó origem><_><nó destino><_><f><_><g> (exemplo: + 100000 I01_02_1_2);
3. Ao terminar a análise de todas as combinações de falhas para todas as demandas de tráfego, os enlaces são adicionados com seus respectivos custos. Da planilha Enlace_Rotas vem o número do enlace, a média de interrupções por ano e a distância;
4. Determina-se o custo, fazendo <distância> x (1 + <média de interrupções por ano>) e a string a ser inserida na planilha “Script” como parte da função objetivo. Formação da string: <+><espaço><custo><espaço><E><número do enlace> (exemplo: + 564 E1);
5. Ao final deste processo, acrescenta-se “;” ao final da referida função.

A restrição 3.21 é descrita exatamente como é mostrada, substituindo-se o “e” pelo número de cada enlace presente na planilha Enlace_Rotas. O mesmo ocorre para restrição 3.22 onde o “e” e o “ β_e ” recebem o número de cada enlace e o valor da capacidade presentes na planilha Enlace_Rotas, respectivamente. Lembrando-se sempre de acrescentar “;” no final de cada equação.

A restrição 3.23 precisa apenas da planilha Enlace_Rotas para ser escrita, uma vez que possui tanto o número do enlace quanto os caminhos que passam por cada um deles. Segue o resumo do processo:

1. Para cada número de enlace, monta-se uma string representando a soma de todos os caminhos que por ele passam. Exemplo: “+ P1_01_02 + P2_01_03 + ...= W1;”, que significa que o caminho número 1, da demanda entre os nós 01 e 02, e o caminho 2, da demanda entre os nós 01 e 03 podem utilizar o enlace 1;
2. A string formada por <+><espaço><caminho><espaço><+><espaço><caminho>...= <W><número do enlace> é inserida na planilha Script;
3. Ao término da equação deve-se acrescentar sempre <;>

Com a restrição 3.24 e os dados referentes à quantidade de tráfego, nó origem, nó destino e opções de caminhos distintos entre cada par de nós, presentes na planilha Demandas, conseguimos montar a equação como segue:

1. Cada linha referente à opção de tráfego em análise é agrupada como uma string que representa a soma de todos os caminhos distintos, concluindo esta parte, acrescenta-se à string o sinal de igualdade e a quantidade de tráfego entre o par origem e destino da demanda;
2. A planilha Script recebe a string no formato “<+><espaço><P><nó origem><_><nó destino><_><caminhos distintos><+><espaço><P><nó origem><_><nó destino><_><caminhos distintos>...= <quantidade de tráfego>;”. Exemplo: “+ P_01_02_1_2 + P01_03_13_99 + ...= 32;”

O processo de escrita para a restrição 3.25 utiliza o nó origem, o nó destino e os caminhos distintos da planilha demandas e forma uma string com soma de caminhos distintos para cada opção de caminho utilizada. Segue o resumo do processo:

1. Caminhos distintos são analisados quanto a sua composição;

2. Para o primeiro caminho do par de caminhos distintos, cria-se uma string contendo a soma de todos os pares de caminhos distintos que a contém;
3. Concluído o passo acima, iguala-se a soma ao referido caminho analisado;
4. Repetem-se os passos acima até que todos os caminhos sejam analisados;
5. A string a ser inserida na planilha Script é da forma: “<+><espaço><P><nó origem><_><nó destino><_><caminhos distintos><+><espaço><P><nó origem><_><nó destino><_><caminhos distintos>...= <P><caminho em análise><_><nó origem><_><nó destino>;”. Exemplo: “+ P_01_02_1_2 + P01_02_1_99 + ...= P1_01_02;”

Em relação às combinações de dupla falha, pode-se simplificar a restrição 3.26 iniciando a análise pela variável “T”, que funciona como uma pergunta do tipo “a combinação atual de falhas interrompe a referida demanda?”, parcela iniciada por “CP” responde “se interromper use este(s) caminho(s)”, que refere(m)-se ao(s) caminho(s) não afetado(s) pelas falhas em questão, e a parcela do lado direito da equação responde “cairá se utilizar esta(s) opção(ões) de caminhos distintos”. O processo que descreve esta restrição utiliza o nó origem, o nó destino e todos os caminhos distintos por demanda, da planilha Demandas e todas as opções de caminho por enlace da planilha Enlace_Rotas, conforme segue:

1. Agrupa-se em uma única string, denominada “falha”, todos os caminhos presentes nos dois enlacs, f e g, que consideraremos como afetados pela dupla falha;
2. Busca-se em todos os demais enlacs, não afetados pela dupla falha em questão, caminhos que podem manter o nó origem e o nó destino, obtidos da planilha Demandas, conectados. Isto é feito comparando cada caminho presente em cada enlace que não falhou, e pertencente à referida demanda, com os caminhos listados na string “falha”. Se o caminho não pertence à “falha” então ele é inserido na planilha Script da seguinte forma: <+><espaço><C><caminho que não pertence a string “falha”><_><f><_><g>. Repete-se este passo até que todos os caminhos de todos os enlacs que não falharam sejam analisados, considerando sempre caminhos pertencentes a referida demanda, evitando-se caminhos repetidos;

3. Concluída a parcela “CP”, a variável “I” é inserida na equação, da seguinte forma:

$$\langle + \rangle \langle \text{espaço} \rangle \langle I \rangle \langle \text{nó origem} \rangle \langle _ \rangle \langle \text{nó destino} \rangle \langle _ \rangle \langle f \rangle \langle _ \rangle \langle g \rangle \langle \text{espaço} \rangle \langle = \rangle;$$
4. O lado direito da equação recebe todos os caminhos distintos obtidos da planilha Demandas cujos caminhos tenham sido afetados um pela falha “f” e o outro pela falha “g”. Para isso, a rotina analisa se os dois caminhos que formam o par de caminhos distintos pertencem a string “falha”, descrita no passo 2. Se afirmativo, a string $\langle + \rangle \langle \text{espaço} \rangle \langle P \rangle \langle \text{nó origem} \rangle \langle _ \rangle \langle \text{nó destino} \rangle \langle _ \rangle \langle \text{número do primeiro caminho} \rangle \langle _ \rangle \langle \text{número do segundo caminho} \rangle$ é inserida na planilha script.
5. Após concluir a análise para uma combinação de dupla falha, seleciona-se uma nova combinação, até que se esgotem todas as possibilidades, retornando sempre para o passo 1.

A restrição 3.27 é mais fácil de compreender se analisada a partir da variável “Se”. É como se esta variável perguntasse: “quanto de banda para recuperação em caso de dupla falha devo reservar no enlace e ?” o lado esquerdo da equação responde “estes caminhos não são afetados pela dupla e pertencem ao enlace e analisado”, já o lado direito irá responder apenas se o Reuso de enlaces estiver permitido. Estando habilitado, o lado direito responde “estes caminhos passam pelo enlace e e foram afetados pela dupla falha, portanto, considere-os, neste caso, como disponíveis”. Para a rotina que escreve a equação os passos são similares aos da restrição anterior:

1. Agrupa-se em uma única string, denominada “falha”, todos os caminhos presentes nos dois enlaces, f e g , que consideraremos como afetados pela dupla falha;
2. Seleciona-se um enlace e diferente de f e g . Para este enlace é que será determinada sua capacidade de banda extra para os casos onde a dupla falha em análise ocorrer;
3. Busca-se no enlace e , caminhos que podem manter o nó origem e o nó destino, obtidos da planilha Demandas, conectados. Isto é feito comparando cada caminho presente neste enlace com os caminhos listados na string “falha”. Se o caminho não pertence à “falha” então ele é inserido na planilha Script da seguinte forma:

<+><espaço><C><caminho que não pertence a string “falha”><_><f><_><g>. Repete-se este passo até que todos os caminhos do enlace e sejam analisados;

4. Concluída a parcela “CP”, a variável “Se” é inserida na equação, da seguinte forma: <=><espaço><S><número do enlace e >;
5. O lado direito da equação recebe todos os caminhos pertencentes a ao enlace e que foram afetados ou pela falha “f” ou pela falha “g”. Para isso, a rotina analisa se os caminhos pertencentes ao enlace e pertencem também à string “falha”, descrita no passo2. Se afirmativo, a string <+><espaço><caminho> é inserida na planilha script.
6. Após concluir a análise para uma combinação de dupla falha, seleciona-se uma nova combinação, até que se esgotem todas as possibilidades, retornando sempre para o passo 1.

Concluindo a fase de escrita do modelo, observamos que o conjunto de variáveis é muito extenso para ser analisado pelos projetistas, portanto, criamos uma rotina que interpreta o resultado gerado pelo software LP_Solve.

3.4.5 Macro para Interpretação do resultado LP_Solve

Copiando o modelo criado, presente na planilha Script, e colando-o no ambiente de trabalho do software LP_Solve, chega o momento de obter o resultado ótimo de distribuição e imunização de tráfego que pode conter milhares de variáveis, a grande maioria iguais a zero uma vez que a função objetivo busca o mínimo valor. Para facilitar o trabalho dos projetistas, uma nova macro foi criada para interpretar o resultado do modelo.

Ao término do processo de solução, o software LP_Solve permite salvar o resultado na extensão “.csv” do Excel. Copiando o resultado e colando na planilha Resultado_LP-Solve esta macro irá eliminar todas as variáveis nulas e em seguida selecionar as variáveis e seus valores referentes aos campos da planilha Resultado:

- Demandas Interrompidas: variáveis iniciando com a letra “T”
- Capacidade por enlace: variáveis “W” para a coluna “Prim+Sec” e variáveis “E” para a coluna “Total”. A coluna “Reserva” é obtida pela subtração de “W” e “E” e a coluna “KM” recebe o valor da planilha Enlace_Rotas;

- Caminhos Selecionados: variáveis $P_{r_1, r_2}^{o, d}$ acrescidas das informações caminho, número do caminho e distancia provenientes da planilha Rotas;
- Caminhos Selecionados para restauração após dupla falha: variáveis $CP_{r, o, d}^{f, g}$ acrescidas das informações caminho, número do caminho e distancia provenientes da planilha Rotas;
- Índice de proteção à dupla falha na rede: calculada de forma automática pela macro

que aplica a fórmula: $1 - \frac{\sum_{\forall f, g \in E: f \neq g} I_{f, g}^{o, d}}{m(m-1)}$. Este indicador, formado por 1 menos a

soma de todas as interrupções sobre todas as possíveis combinações de dupla falha na rede, representa a porcentagem de demandas que foram protegidas contra dupla falha.

- Comprimento total dos caminhos selecionados: é o somatório de todos os produtos entre a coluna Total e a coluna KM da tabela capacidade por enlace. Quanto maior este valor mais enlaces foram utilizados na solução e, portanto, mais banda de transmissão deve ser disponibilizada.

O tempo de processamento do modelo, pelo software LP_Solve ou similar, passa a ser considerável para redes reais, uma vez que o número de linhas e variáveis do modelo ultrapassam centenas de milhares, o que amplia o universo de busca pela solução ótima. Para viabilizar a aplicação destes modelos em redes de grandes operadoras de Telecomunicações, optamos por criar um heurístico denominado Dupla Fase, que divide o problema em duas fases: distribuição e alocação de banda para restauração.

3.5 HEURÍSTICO DUPLA FASE

As tarefas atribuídas ao modelo PRC, RE ou SRE, são basicamente:

- Distribuição de tráfego;
- Alocação de banda por enlace para restauração; e
- Otimizar o reuso de enlaces (para o PRC-RE).

Dentre as tarefas do modelo, a que pode ser resolvida separadamente é a Distribuição de tráfego com escolha do par de caminhos distintos por demanda, ou seja, utilizando o

mecanismo de proteção de caminho. Assim, resolvemos previamente as restrições de 3.21 a 3.25 e em seguida resolvemos o problema como um todo.

Como atua na fase de distribuição de tráfego, a heurística não compromete diretamente a imunização contra dupla falha, que é nosso principal objetivo, porém, fará com que o PRC-RE utilize mais banda de transmissão. Isso ocorre porque a fase de distribuição de tráfego trabalha segundo o modelo de proteção por caminhos distintos, que não aplica o processo de restauração para casos de dupla falha e nem o de reuso de enlace. Mesmo com esta penalização, o PRC-RE ainda utiliza em média 15% menos banda que o PRC-SRE.

3.6 METODOLOGIA PROPOSTA

O objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia que permita aperfeiçoar o processo de distribuição e gestão de banda de transmissão buscando imunização contra dupla falha em redes de topologia arbitrária e protegidas pelo mecanismo de Proteção e Restauração Combinadas (PRC), utilizado na ASON (Automatic Switched Optical Network). A distribuição e imunização ótimas atendem aos requisitos definidos com o menor custo possível através dos modelos desenvolvidos em programação linear inteira. Tanto a escrita dos modelos como a interpretação dos resultados foram automatizadas por rotinas criadas em VBA do Excel.

Nos capítulos anteriores deste trabalho, foi introduzido o problema em estudo e foram apresentados os elementos teóricos utilizados. Nas seções anteriores deste capítulo, foi apresentada a validação dos modelos propostos quanto aos critérios de Consistência, Confiabilidade, Eficiência, Equivalência e Precisão. Aprovados os modelos e comprovada a funcionalidade das rotinas criadas em VBA do MS-Excel para suportar a metodologia proposta, podemos abordar as particularidades dos resultados apresentados aplicados ao projeto e operação da rede.

A Figura 3.13 relaciona todos os passos da metodologia para obtenção de projetos utilizando PRC-SRE ou PRC-RE, com ou sem Heurística Dupla Fase. Com os dados sobre a topologia e a matriz de tráfego inicia-se o processo de tratamento dos dados para obtenção das variáveis do modelo. Concluída esta etapa, o projetista define os parâmetros de projeto: interrupções/ano por enlace, prioridade quanto à imunização contra dupla falha, quantidade de banda disponível por enlace, heurística sim/não e reuso de enlaces sim (PRC-RE)/não (PRC-SRE). O índice de imunização contra dupla falha é resultado de uma

distribuição quase-ótima (com heurística) ou ótima (sem heurística) derivada diretamente dos parâmetros de projeto escolhidos. São quatro projetos possíveis:

- PRC-SRE: utiliza todos os parâmetros e todas as variáveis, resultantes do tratamento dos dados sobre a topologia e matriz de tráfego, alcançando a distribuição de banda de transmissão ótima e com a máxima imunização possível, baseando a solução no mecanismo de proteção e restauração combinadas e sem reuso de enlaces;
- PRC-RE: utiliza todos os parâmetros e todas as variáveis, resultantes do tratamento dos dados sobre a topologia e matriz de tráfego, alcançando a distribuição de banda de transmissão ótima e com a máxima imunização possível, baseando a solução no mecanismo de proteção e restauração combinadas e com reuso de enlaces;
- PRC-SRE com Heurística Dupla Fase: utiliza todos os parâmetros de projeto e os dados resultantes de outro modelo, denominado Proteção de Caminho, gerado a partir de algumas variáveis, obtidas a partir do tratamento dos dados sobre a topologia e matriz de tráfego, alcançando a distribuição de banda de transmissão quase-ótima e com a máxima imunização possível, baseando a solução no mecanismo de proteção e restauração combinadas e sem reuso de enlaces;
- PRC-RE com Heurística Dupla Fase: utiliza todos os parâmetros de projeto e os dados resultantes de outro modelo, denominado Proteção de Caminho, gerado a partir de algumas variáveis, obtidas a partir do tratamento dos dados sobre a topologia e matriz de tráfego, alcançando a distribuição de banda de transmissão quase-ótima e com a máxima imunização possível, baseando a solução no mecanismo de proteção e restauração combinadas e com reuso de enlaces;



Figura 3.13- Dados de entrada e projetos possíveis

As diferenças entre os projetos desejados pouco alteram a forma de trabalhar com a ferramenta desenvolvida neste trabalho, como mostrado no passo-a-passo que segue:

Obter a matriz de tráfego a ser aplicada a rede e preencher a planilha “Demandas x Estações”;

1. Atribuir a cada estação uma designação composta por dois dígitos alfanuméricos (exemplo: 01, 02, AA, AW, etc);
2. Nas planilhas Rede e Enlace_Rotas inserir a Matriz de Incidência e os dados quanto a distância entre cada nó de rede. Deve-se atribuir a cada enlace uma designação composta por dois dígitos alfanuméricos;
3. Execute as seguintes rotinas de tratamento de dados através dos respectivos atalhos de teclado:
 - a. Ctrl+Shift+T: transforma os dados da Matriz de Tráfego e Estações x Designações em demandas para o modelo;
 - b. Ctrl+Shift+R: busca todas as rotas possíveis na rede para atender a todas as demandas de tráfego;
 - c. Na planilha Projeto defina os parâmetros da análise desejada e na planilha Enlace_Rotas os dados quanto a média de interrupções por ano por enlace (não é obrigatório e o valor padrão é 0);

4. Caso na planilha Projeto seja selecionado “Com Heurística” igual a “SIM”, as rotinas de criação do modelo Proteção de Caminho e Interpretação do Resultado serão utilizadas conforme abaixo. Caso a escolha seja “NÃO”, siga para o passo 7:
 - a. A rotina de criação do modelo PC é acionada pelo atalho de teclado: Ctrl+Shift+H;
 - b. Ao término da escrita do modelo PC, as equações e inequações estão disponíveis na planilha Script_H_PC. Copie o referido modelo e cole-o no software LP_Solve, inicie a solução selecionando o botão “Solve” ou tecla F9;
 - c. O software processará as informações e mostrará o resultado na aba “Result”. Quando terminar o processamento, acesse o menu File>Export Result>Objective to CSV.... e salve o resultado em um diretório conhecido;
 - d. Abra o arquivo e copie seu conteúdo para a planilha Resultado_LP_Solve_PC;
 - e. Execute a rotina de interpretação do resultado PC: Ctrl+Shift+J. Ao final da rotina temos o resultado do projeto e a planilha Demandas preenchida com os pares de caminhos distintos selecionados para cada demanda (principal objetivo da Heurística Dupla Fase), e não mais todas as opções de caminhos distintos para cada demanda. Continue com o processo;
5. Segue-se com as rotinas de tratamento dos dados e escrita do modelo:
6. Ctrl+shift+E: relaciona na planilha Enlace_Rotas todas as rotas que passam por cada enlace;
7. Ctrl+S: inicia o processo de escrita do modelo na planilha Script.
8. Concluída a escrita do modelo, copie e cole as equações e inequações no software LP_Solve e inicie o processamento selecionando a opção “Solve” ou F9;
9. Salve o resultado em um diretório conhecido, através do menu File>Export Result>Objective to CSV....;
10. Abra o arquivo com o resultado e cole seu conteúdo na planilha Resultado_LP-Solve;
11. Inicie a rotina de interpretação do resultado selecionado Ctrl+P;

12. Ao término da rotina de interpretação temos o resultado do modelo devidamente organizado na planilha Resultado.

Este capítulo apresentou os modelos, a heurística, as rotinas em VBA que compõem a metodologia proposta para distribuir o tráfego e a banda de transmissão destinada a proteção contra duplas falhas em uma rede de topologia arbitrária utilizando o esquema de proteção PRC com tecnologia ASON.

No próximo capítulo aplicaremos diversos critérios de validação aos modelos propostos para provar sua eficácia e correta aplicação na metodologia, além de analisar os resultados obtidos quando aplicada a uma rede de telecomunicações de uma grande operadora.

4 VALIDAÇÃO DOS MODELOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para suportar a metodologia proposta de distribuição e gestão de banda de transmissão, desenvolvemos dois modelos em programação linear inteira, o PRC-SRE e o PRC-RE, que garantem de forma eficiente a restauração de tráfego via PRC, proteção e restauração combinadas, em eventos de dupla falha na rede.

4.1 VALIDAÇÃO DOS MODELOS

Neste capítulo apresentaremos exemplos de aplicação dos modelos constatando de forma prática seu funcionamento. Alguns critérios de avaliação foram criados e obedecem ao funcionamento do protocolo de proteção e restauração combinadas, PRC, e da funcionalidade de reuso de enlaces, conforme segue:

- Consistência: o resultado deve contemplar a correta quantidade de banda por enlace para atender aos caminhos principais, secundários e de recuperação após dupla falha, selecionados;
- Confiabilidade: a alocação de banda para recuperação de duplas falhas deve ser tal que não falte recursos na rede para recuperar cada uma das combinações de duplas falhas possíveis;
- Eficiência: alocação de recursos versus índice de imunidade à dupla falha. Alocação de recursos comparado a uma distribuição de tráfego que não é imune a dupla falha, a proteção de caminho – PC;
- Equivalência: por ser derivado da proteção de caminho, PC, o protocolo de proteção e restauração combinadas, PRC, deve se comportar igual ao PC quando a rede não dispõe de banda de transmissão suficiente para formar caminhos destinados à restauração em eventos de dupla falha;
- Precisão: propomos o uso de uma heurística para agilizar a solução dos modelos, o que torna a solução sub-ótima. Pretendemos avaliar o quão distante os modelos com a heurística estão da solução ótima.

Aplicaremos à rede da Figura 4.1 diversos cenários que nos permitiram avaliar cada critério definido acima.

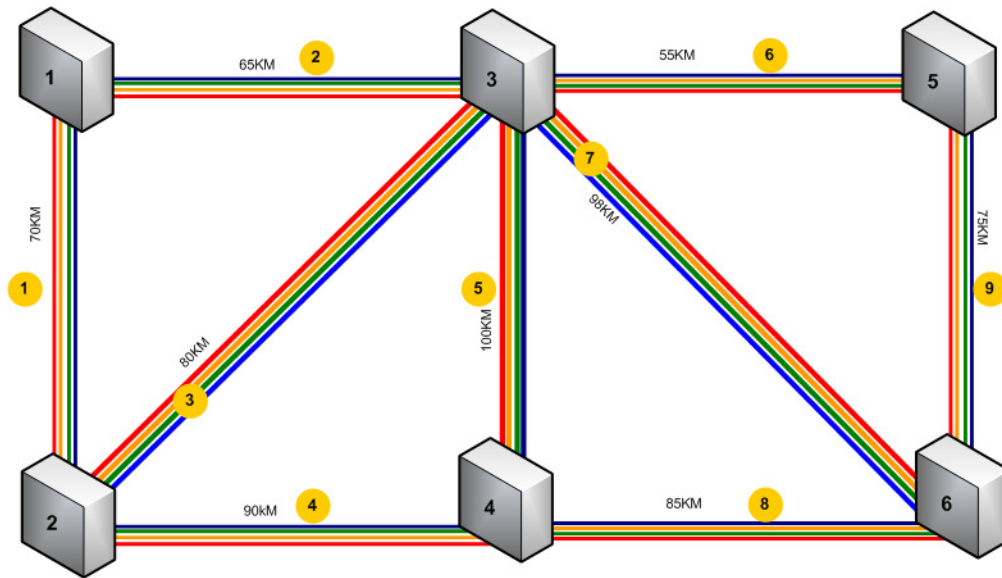


Figura 4.1- Rede escolhida para validação dos modelos

Para avaliarmos o critério de consistência, aplicaremos aos modelos PRC-RE e PRC-SRE, sempre fazendo uso do heurístico Dupla Fase, a demanda de tráfego da Tabela 4-1 e em seguida faremos a contagem da banda alocada por enlace.

Tabela 4-1 – Demanda de Tráfego

ORIGEM	DESTINO					
	01	02	03	04	05	06
01		1				
02	1		1		1	
03		1		1		
04			1			
05		1				1
06					1	

Os parâmetros de projeto foram definidos para o modelo conforme segue:

- K (importância quanto a imunização) = 1.000.000
- Capacidade de Banda por enlace = 50 SMT1's equivalentes para todos os enlaces;
- Média de interrupção por ano por enlace = 0 para todos os enlaces;
- Heurística Dupla Fase: SIM

Informações importantes para esta validação são mostradas na Tabela 4-2, com relação aos parâmetros de projeto e, principalmente, qual enlace interliga qual par de nós.

Tabela 4-2 – Informações adicionais para validação

ENLACE =>	1	2	3	4	5	6	7	8	9
NÓ_A =>	01	01	02	02	03	03	03	04	05
QTDE INTERRUPÇÕES POR ANO (MÉDIA)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NÓ_B =>	02	03	03	04	04	05	06	06	06
CAPACIDADE =>	50	50	50	50	50	50	50	50	50
DIST (KM) =>	70	65	80	90	100	55	98	85	75

Definidos os critérios de validação, a rede e os parâmetros de projeto, analisaremos caso a caso mostrando a viabilidade do uso do PRC-RE e PRC-SRE.

4.1.1 Critério da Consistência

Inseridas as informações no modelo PRC-SRE, o tempo de solução foi inferior a 2 segundos para a primeira parte da heurística e inferior a 3 segundos para a parte final. A resposta do modelo PRC-SRE é mostrada abaixo:

Tabela 4-3 – Resultado do modelo PRC-SRE

CAPACIDADE POR ENLACE				
ENLACE	PRIM+SEC	RESERVA	TOTAL	KM
E1	2	1	3	70
E2	2	1	3	65
E3	3	0	3	80
E4	1	2	3	90
E5	1	0	1	100
E6	2	1	3	55
E7	2	1	3	98
E8	2	2	4	85
E9	2	1	3	75

(a)

CAMINHOS SELECIONADOS				
DEMANDA	QTDE	CAMINHO	ID_CAMINHO	TOTAL (KM)
01_02	1	0102	1	70
01_02	1	010302	2	145
02_03	1	020103	1	135
02_03	1	0203	2	80
02_05	1	020305	5	135
02_05	1	02040605	10	250
03_04	1	0304	3	100
03_04	1	030604	5	183
05_06	1	050306	4	153
05_06	1	0506	5	75

(b)

CAMINHOS SELECIONADOS PARA PROTEÇÃO APÓS DUPLA FALHA						
DEMANDA	CAMINHO	ID_CAMINHO	QTDE	TOTAL(KM)	FALHA 1	FALHA 2
01_02	0103060402	5	1	338	1	3
02_03	0204060503	5	1	305	1	3
02_03	0204060503	5	1	305	2	3
02_05	02010305	2	1	190	3	4
02_05	02010305	2	1	190	3	8
02_05	02010305	2	1	190	3	9
02_05	0201030605	3	1	308	4	6
02_05	0201030605	3	1	308	6	8
03_04	03050604	4	1	215	5	7
03_04	03010204	1	1	225	5	8
05_06	050301020406	1	1	365	7	9

(c)

Com base nas tabelas Tabela 4-2 e Tabela 4-3 (a), (b) e (c), analisaremos a quantidade de banda de transmissão alocada para cada enlace. Observe que o enlace 1 conecta o nó 01 ao nó 02, tabela Tabela 4-2, e recebeu 2 SMT1s equivalentes para suportar os caminhos distintos e 1 SMT1 equivalente para eventos de dupla falha, tabela Tabela 4-3 (a) colunas “PRIM+SEC” e “RESEVA”, respectivamente. Isso significa que a soma dos pares 0102 e 0201, da coluna “Caminho” da tabela Tabela 4-3 (b), não pode exceder a dois e a soma destes pares na tabela Tabela 4-3 (c) não pode exceder a 1 (um) para o mesmo par de falhas (colunas “Falha1” e “Falha2”, tabela Tabela 4-3 (c)). Utilizando este procedimento, vemos que o modelo PRC-SRE foi aprovado no critério Consistência.

O modelo PRC-RE resolveu o problema fornecendo informações quanto a capacidade de banda alocada por enlace, Tabela 4-4(a), os caminhos distintos selecionados para cada demanda, Tabela 4-4 (b) e os caminhos selecionados para eventos de dupla falha, Tabela 4-4 (c).

Tabela 4-4 – Resultado do modelo PRC-RE

CAPACIDADE POR ENLACE				
ENLACE	PRIM+SEC	RESERVA	TOTAL	KM
E1	2	1	3	70
E2	2	1	3	65
E3	3	0	3	80
E4	1	2	3	90
E5	1	2	3	100
E6	2	0	2	55
E7	2	0	2	98
E8	2	0	2	85
E9	2	0	2	75

(a)

CAMINHOS SELECIONADOS				
DEMANDA	QTDE	CAMINHO	ID_CAMINHO	TOTAL (KM)
01_02	1	0102	1	70
01_02	1	010302	2	145
02_03	1	020103	1	135
02_03	1	0203	2	80
02_05	1	020305	5	135
02_05	1	02040605	10	250
03_04	1	0304	3	100
03_04	1	030604	5	183
05_06	1	050306	4	153
05_06	1	0506	5	75


(b)

CAMINHOS SELECIONADOS PARA PROTEÇÃO APÓS DUPLA FALHA						
DEMANDA	CAMINHO	ID_CAMINHO	QTDE	TOTAL(KM)	FALHA 1	FALHA 2
01_02	01030402	3	1	255	1	3
02_03	020403	3	1	190	1	3
02_03	020403	3	1	190	2	3
02_05	02010305	2	1	190	3	4
02_05	02010305	2	1	190	3	8
02_05	02010305	2	1	190	3	9
02_05	020103040605	1	1	395	4	6
02_05	0201030605	3	1	308	6	8
03_04	03010204	1	1	225	5	7
03_04	03010204	1	1	225	5	8
05_06	050301020406	1	1	365	7	9

(c)

Com base nas tabelas Tabela 4-2 e Tabela 4-4 (a), (b) e (c), analisaremos a quantidade de banda de transmissão alocada para cada enlace. Observe que o enlace 1 conecta o nó 01 ao nó 02, tabela Tabela 4-2, e recebeu 2 SMT1s equivalentes para os caminhos distintos entre cada demanda, Tabela 4-4 (a) coluna “PRIM+SEC”, isso significa que a soma dos pares 0102 e 0201, da coluna “Caminho” na Tabela 4-4 (b), não pode exceder a dois. Utilizando este procedimento, vemos que o modelo PRC-RE foi aprovado no critério Consistência. Ao utilizar o reuso de enlaces, a quantidade de banda para restauração em condições de dupla falha, coluna “Reserva” da Tabela 4-4 (a), será validada somente quando analisarmos a Confiabilidade deste modelo.

4.1.2 Critério da Confiabilidade

Para o critério Confiabilidade, devemos validar se a distribuição de tráfego e de banda para restauração está devidamente dimensionada para cada combinação de dupla falha. Faremos isso para o modelo PRC-SRE com o auxílio Figura 4.2, que ilustra as conexões entre cada par de nós, origem e destino, de acordo com a Tabela 4-3 (b). Selecionamos a dupla falha que atinge os enlaces 1 e 3, de forma a causar a queda das demandas 01_02 e 02_03. Ao consultar a Tabela 4-3 (c), a primeira e a segunda linhas trazem os caminhos selecionados para recuperação desta combinação de dupla falha. Agora devemos verificar se o caminho presente na coluna “Caminho” da Tabela 4-3 (c), para as duas demandas afetadas, consegue ser provisionado na rede, ou seja, há banda disponível para restauração. A indicação da banda disponível para restauração é identificada pela letra “P”, em , na Figura 3.14. O caminho selecionado para recuperar a demanda 01_02 é composto pelos nós 01, 03, 06, 04 e 02 que demandam um STM1 em cada um dos enlaces 2, 7, 8 e 4, respectivamente. O caminho selecionado para recuperar a demanda 02_03 é composto pelos nós 02, 04, 06, 05 e 03 demandando um STM1 em cada um dos enlaces, 4, 8, 9 e 6, respectivamente. Para ambas as demandas, de acordo com a figura a seguir, há recursos

que viabilizam a recuperação do tráfego pelos caminhos selecionados, portanto, o critério Confiabilidade foi atendido.

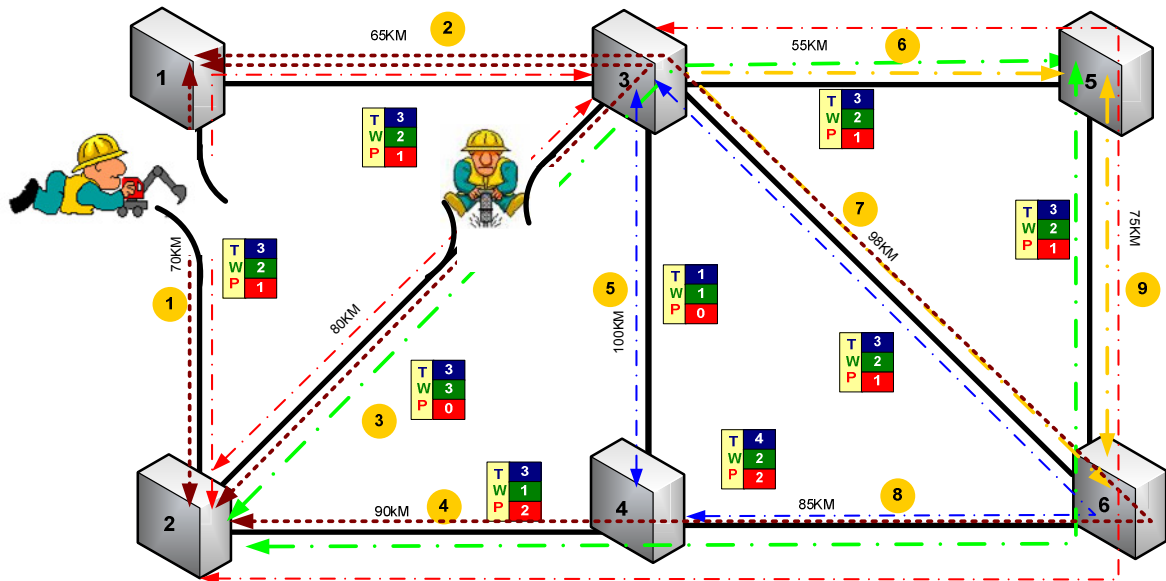


Figura 4.2- Análise do critério da Confiabilidade para o modelo PRC-SRE

As demais demandas foram testadas com todas as combinações de dupla falha possíveis constando o cumprimento do critério da Confiabilidade. Vale ressaltar que não é possível recuperar as demandas de 01_02, 02_05 e 05_06 para as duplas falhas 1 e 2 e 6 e 9 porque causam o isolamento do nó 01 e do nó 05, respectivamente.

Para analisarmos o critério da confiabilidade para o modelo PRC-RE devemos lembrar que o reuso de enlaces está permitido, ou seja, a banda de transmissão de enlaces íntegros e pertencentes a caminhos afetados por uma falha pode ser utilizada para o processo de restauração. A Figura 4.3 mostra as informações contidas nas tabelas Tabela 4-4 (a), capacidade de banda por enlace, (b), caminhos distintos e (c), caminhos selecionados para restauração. A validação deste modelo é similar à do modelo PRC-SRE, portanto, veremos o caso onde há reuso de enlaces que é exclusivo do PRC-RE. A demanda 02_05 é restaurada pelo caminho 02010305 quando os enlaces 3 e 4 falham, ocorre que apenas os enlaces 1 e 2 possuem banda disponível para restauração, enquanto que o enlace 6, que interliga os nós 03 e 05, não possui ($P = 0$). Como o reuso de enlaces está permitido, a banda necessária virá do caminho 020305 que foi afetado pela falha do enlace 3, garantindo a recuperação de tráfego e o critério da Confiabilidade para o PRC-RE.

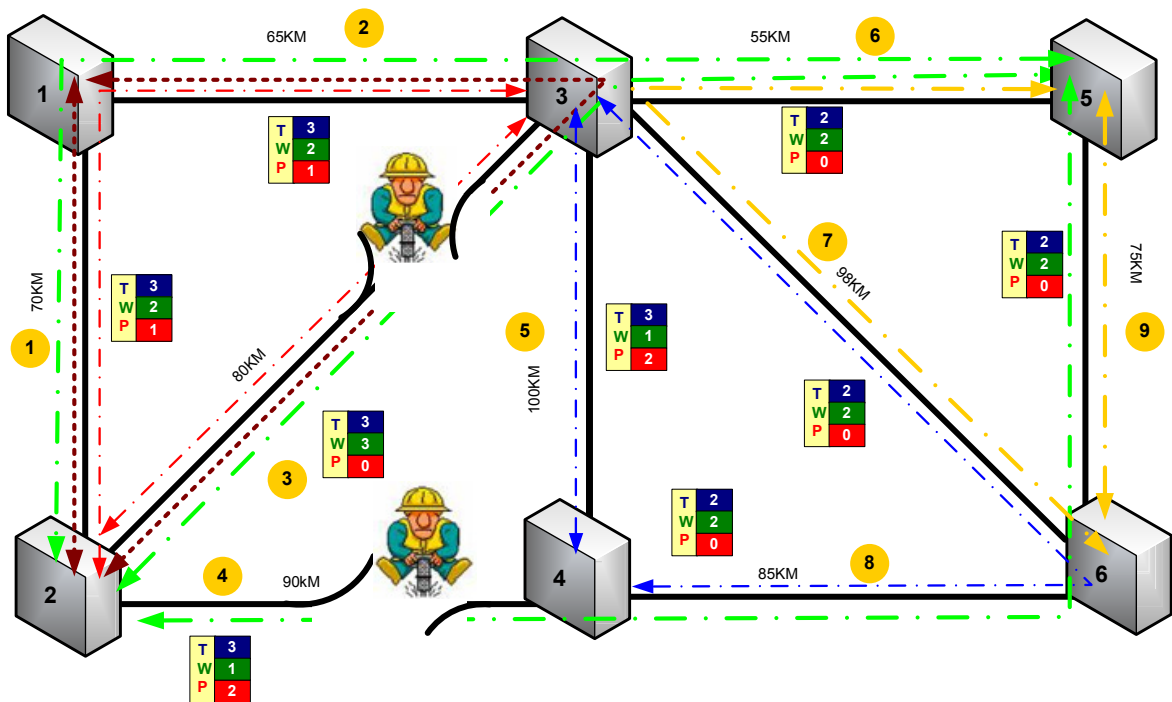


Figura 4.3- Análise do critério da Confiabilidade para o modelo PRC-RE

Mostramos até aqui que o modelo é consistente e confiável ao alocar recursos na rede para atender as demandas de tráfego entre os nós e ao alocar recursos para restauração no caso de qualquer dupla falha ocorrer. Acrescentar e reservar banda de transmissão para eventos de dupla falha significa investimento, ou seja, o quanto custa esta imunização contra duplas falhas em comparação a proteção de caminho, que é 100% garantida para falhas simples na rede? Esta pergunta responderemos através da análise do critério da Eficiência.

4.1.3 Critério da Eficiência

Como já possuímos as quantidades de banda por enlace para os modelos PRC-RE e PRC-SRE, necessários para a análise deste critério, aplicamos os mesmos parâmetros de projeto ao modelo PC, que foi criado para resolver a primeira parte da heurística Dupla-Fase. Os resultados são mostrados na Tabela 4-5 – Resultado do Modelo Proteção de Caminho (PC), abaixo

Tabela 4-5 – Resultado do modelo Proteção de Caminho (PC)

CAPACIDADE POR ENLACE				
ENLACE	PRIM+SEC	RESERVA	TOTAL	KM
E1			4	70
E2			3	65
E3			3	80
E4			1	90
E5			2	100
E6			3	55
E7			1	98
E8			1	85
E9			2	75

Outro resultado importante para esta análise é o índice de imunidade contra dupla falha na rede, mostradas na tabela abaixo.

Tabela 4-6 – Imunidade a dupla falha por modelo

ÍNDICE DE PROTEÇÃO À DUPLA FALHA	
MODELO	ÍNDICE
PC	83,33%
PRC-SRE	97,22%
PRC-RE	97,22%

Resta agora calcularmos o incremento de banda necessário para imunização contra dupla falha na rede utilizando os dois modelos, PRC-RE e PRC-SRE. Este incremento é obtido utilizando os dados presentes na Tabela 4-3 (a), Tabela 4-4 (b) e Tabela 4-5. O resultado da análise é mostrado abaixo.

Tabela 4-7 – Acréscimo de Banda por Modelo

ACRESCIMO DE BANDA POR MODELO					
ENLACE	PC	PRC-SRE	INCREMENTO	PRC-RE	INCREMENTO
E1	4	3	-25,00%	3	-25,00%
E2	3	3	0,00%	3	0,00%
E3	3	3	0,00%	3	0,00%
E4	1	3	66,67%	3	66,67%
E5	2	1	-50,00%	3	33,33%
E6	3	3	0,00%	2	-33,33%
E7	1	3	66,67%	2	50,00%
E8	1	4	75,00%	2	50,00%
E9	2	3	33,33%	2	0,00%
MÉDIA			18,52%	MÉDIA	15,74%

Confirmada nossas expectativas, o PRC-RE é mais eficiente que o PRC-SRE ao fornecer a mesma imunidade, 97,22%, com o menor uso de recursos. Houve um aumento de 14,11% na imunidade à dupla falha com um consumo médio de 15,74% a mais de recursos. Esta vantagem do PRC-RE fica mais evidente quando aplicamos o critério da Equivalência, onde os modelos têm que resolver o problema em redes que possuem banda de transmissão suficiente apenas para atender aos caminhos distintos de cada demanda.

4.1.4 Critério da Equivalência

A disponibilidade de banda de transmissão é um dos mais importantes fatores para se alcançar altos índices de imunidade contra duplas falhas. A escassez deste recurso não pode inviabilizar a distribuição de tráfego para atendimento das demandas, esta deve apenas afetar o índice de imunidade, podendo no caso dos modelos PRC-RE e PRC-SRE, se equivaler ao índice alcançado pelo modelo Proteção de Caminho (PC). Para exemplificar e validar este critério, reduzimos a quantidade de banda de transmissão por enlace ao mínimo necessário para viabilizar o provisionamento dos caminhos distintos entre cada par de nós origem e destino. Desta forma, a quantidade de banda de transmissão por enlace é a mesma da Tabela 4-5. Os resultados dos dois modelos são mostrados nas Tabela 4-8 (a), índice de proteção à dupla falha por modelo, e (b), quantidade de banda de transmissão por enlace para ambos os modelos, e se diferem quanto ao índice de imunidade contra dupla falha, que no modelo PRC-RE ainda pôde ser melhorado.

Tabela 4-8 – Imunidade contra dupla falha por modelo

ÍNDICE DE PROTEÇÃO À DUPLA FALHA	
MODELO	ÍNDICE
PC	83,33%
PRC-SRE	83,33%
PRC-RE	86,11%

(a)

CAPACIDADE POR ENLACE				
ENLACE	PRIM+SEC	RESERVA	TOTAL	KM
E1	2	0	2	70
E2	2	0	2	65
E3	4	0	4	80
E4	2	0	2	90
E5	1	0	1	100
E6	2	0	2	55
E7	1	0	1	98
E8	1	0	1	85
E9	2	0	2	75

(b)

A equivalência ao modelo Proteção de Caminho é observada na alocação de banda de transmissão por enlace atribuída pela segunda etapa da heurística Dupla Fase, que deve ser obrigatoriamente idêntica a alocação obtida pela primeira etapa. Assim, os modelos cumpriram o critério da Equivalência, resta validar agora o critério da Precisão, que deve nos informar o quão distante estamos da solução ótima, uma vez que fazemos uso de uma heurística para viabilizar a aplicação dos modelos em redes reais.

4.1.5 Critério da Precisão

Os modelos apresentados podem ser escritos e aplicados na íntegra para redes reais de transmissão, desde que se tenha muito tempo disponível para a confecção automática da programação linear inteira, através das rotinas desenvolvidas em VBA do Excel, e para aguardar a solução, via LP_Solve ou softwares similares. Como exemplo de tempo para a solução, uma rede composta por 25 nós, 38 enlaces e 45 demandas de tráfego levou cerca de 3 dias para gerar a programação linear inteira e mais 3 dias para resolvê-lo, utilizando um Microcomputador comum Athon64X 2800 com 2GB de memória RAM.

Com a heurística proposta, a geração da programação linear inteira passou para 1 dia e a solução foi conseguida em 30 minutos para a primeira etapa e pouco mais de 1 hora para a segunda etapa. Entendemos que o tempo de escrita do modelo, em programação linear inteira, pode ser melhorado com a utilização um servidor adequado e da automação da escrita através de um software desenvolvido com técnicas e linguagens atuais (Java, C++, .Net, etc), ao invés de utilizar o MS-Excel.

Para verificar o critério da Precisão optamos por aplicar os modelos, com e sem heurística, em redes com uma maior demanda de tráfego, mantendo a quantidade de nós e variando a quantidade de enlaces de 9 para 10, conforme abaixo.

Tabela 4-9 – Matriz de tráfego

	B					
A	01	02	03	04	05	06
01		5	3	2		2
02	5		5	3	3	4
03	3	5			7	2
04	2	3			4	6
05		3	7	4		3
06	2	4	2	6	3	

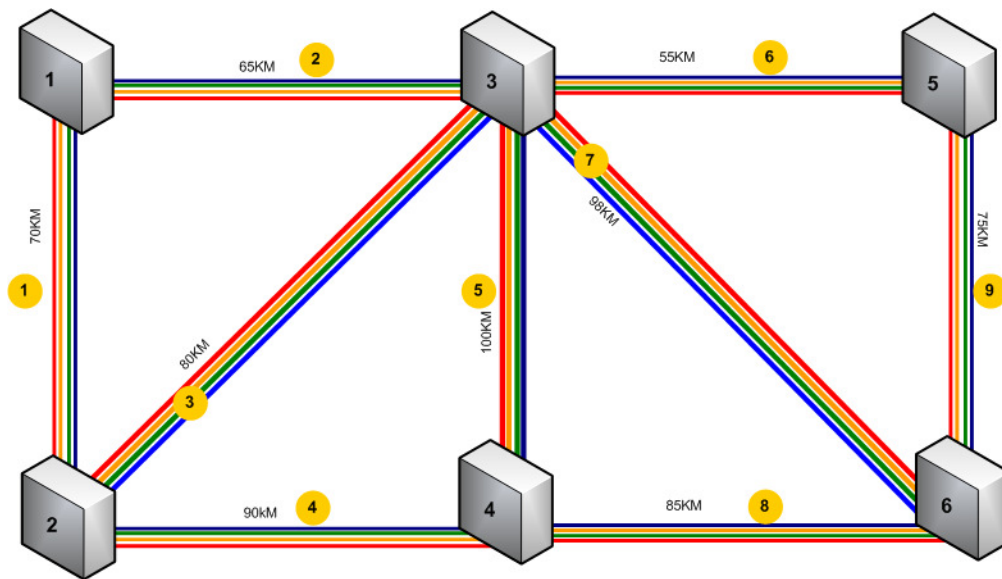


Figura 4.4- Rede 6n9e13d – 6 nós, 9 enlaces e 13 demandas

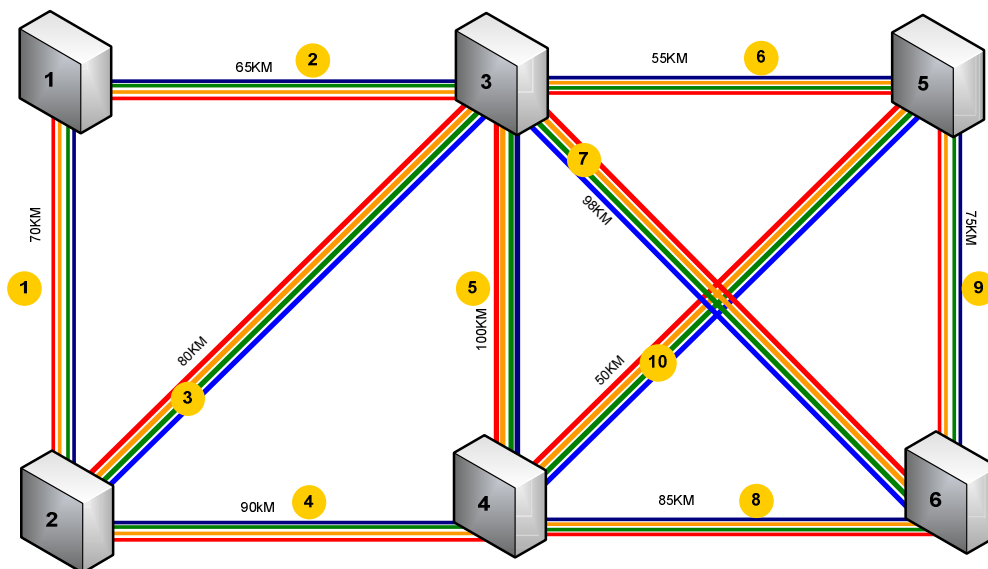


Figura 4.5- Rede 6n10e13d – 6 nós, 10 enlaces e 13 demandas

Para estas redes e demandas os modelos podem ser aplicados sem a heurística Dupla Fase mantendo o tempo de escrita e solução em torno de 4 minutos, viabilizando diversas situações que nos permitem obter a Precisão média, conforme apresentado na Tabela 4-10.

Tabela 4-10 – Comparação do uso da Heurística Dupla Fase

DADOS DO PROJETO			ENLACES									
REDE	REUSO	HEURISTICA	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10
6n9e13d	SIM	NÃO	20	22	22	22	15	28	28	28	17	
6n9e13d	SIM	SIM	23	23	23	22	18	28	28	28	19	
Acrescimento (%)			13,04%	4,35%	4,35%	0,00%	16,67%	0,00%	0,00%	0,00%	10,53%	
6n9e13d	NÃO	NÃO	27	27	27	23	15	31	31	28	31	
6n9e13d	NÃO	SIM	30	30	27	27	19	31	28	34	31	
Acrescimento (%)			10,00%	10,00%	0,00%	14,81%	21,05%	0,00%	-10,71%	17,65%	0,00%	
6n10e13d	SIM	NÃO	20	20	20	20	7	28	28	28	17	12
6n10e13d	SIM	SIM	20	24	21	20	10	28	28	28	19	12
Acrescimento (%)			0,00%	16,67%	4,76%	0,00%	30,00%	0,00%	0,00%	0,00%	10,53%	0,00%
6n10e13d	NÃO	NÃO	25	24	23	22	10	31	31	28	31	15
6n10e13d	NÃO	SIM	25	24	23	22	10	31	31	28	31	15
Acrescimento (%)			0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
PRC	SIM	NÃO	40	42	42	42	22	56	56	56	34	12
PRC	SIM	SIM	43	47	44	42	28	56	56	56	38	12
Acrescimento (%)			6,98%	10,64%	4,55%	0,00%	21,43%	0,00%	0,00%	0,00%	10,53%	0,00%
MÉDIA ACRES.(%)			SIM	SIM	5,41%							
PRC	NÃO	NÃO	52	51	50	45	25	62	62	56	62	15
PRC	NÃO	SIM	55	54	50	49	29	62	59	62	62	15
Acrescimento (%)			5,45%	5,56%	0,00%	8,16%	13,79%	0,00%	-5,08%	9,68%	0,00%	0,00%
MÉDIA ACRES.(%)			NÃO	SIM	3,76%							

Podemos afirmar que o resultado dos modelos sem o auxílio de uma heurística é o resultado ótimo dado a natureza da programação linear, conseqüentemente, ao utilizar artifícios para redução do espaço de busca da solução pelo algoritmo, provocamos uma solução sub-ótima que, para o critério da Precisão, é definido como sendo (1 – média do acréscimo de banda por enlace), portanto, para o modelo PRC-RE, o uso da heurística leva a um resultado com 94,59% de precisão, enquanto que para o modelo PRC-SRE esta precisão sobe para 96,24%.

Concluimos esta seção com ambos os modelos validados conforme os critérios estabelecidos, sendo considerados aptos a suportar a metodologia proposta neste trabalho.

4.2 Análise dos Resultados

A metodologia proposta foi aplicada à rede de uma grande operadora de telecomunicações, buscando o maior índice de imunização possível aplicando o esquema PRC com reuso de enlaces. Como resultado, foi obtida também a distribuição do tráfego através do esquema PC, Proteção de Caminho, que servirá para calcularmos o incremento de banda por enlace pelo incremento do índice de imunização à dupla falha alcançado no PRC-RE.

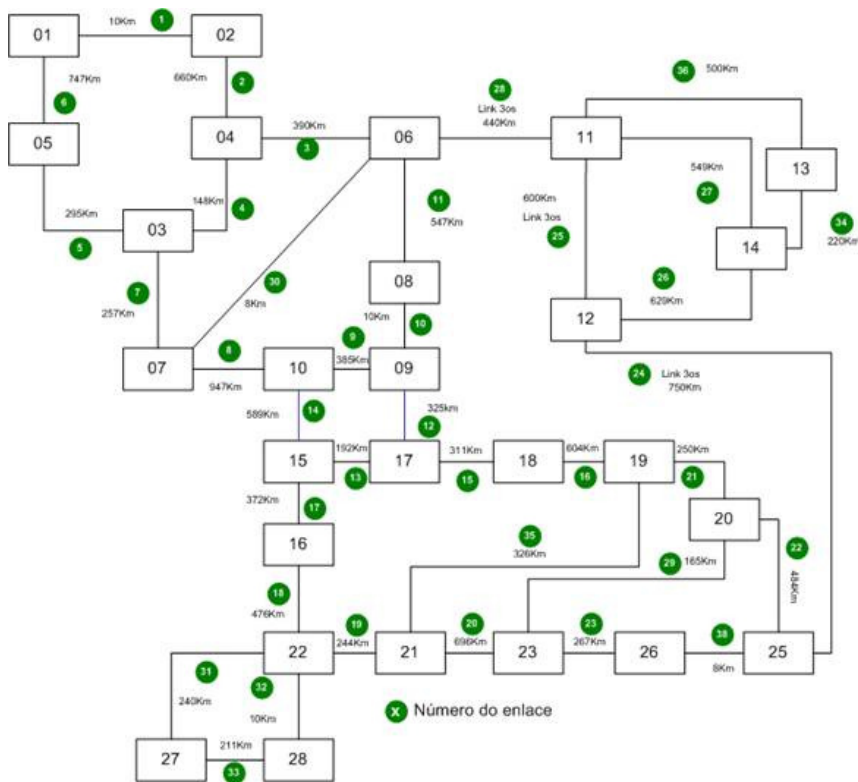


Figura 4.6- Rede de transmissão óptica de uma grande Operadora

A Tabela 4-11 – Demandas de Tráfego, traz a lista de demandas de tráfego por par de nós origem e destino aplicadas ao modelo PRC-RE.

Tabela 4-11 – Demandas de Tráfego

NÓ A	NÓ B	DEMANDA	NÓ A	NÓ B	DEMANDA	NÓ A	NÓ B	DEMANDA
03	25	2	16	10	5	04	01	1
03	10	3	16	07	1	04	02	29
03	07	1	16	09	1	08	09	3
03	04	12	10	07	2	09	19	1
03	09	1	10	06	17	01	02	20
03	01	1	10	04	1			
25	26	4	10	09	1			
25	28	17	10	19	1			
25	16	14	07	06	14			
25	10	1	07	04	2			
25	06	31	07	23	1			
25	23	24	07	09	2			
25	02	29	07	01	2			
25	11	21	07	02	1			
26	16	1	06	04	31			
26	07	1	06	08	15			
26	11	21	06	09	4			
28	16	1	06	01	4			
28	21	1	06	02	52			
28	22	2	06	11	42			

A metodologia aplicada mostra um ganho de 26,57%, saindo de 67,27% para 93,84%, no índice de imunidade contra duplas falhas na rede, sendo necessário para isso, um

acréscimo de 20,37%, em média, na banda de transmissão da rede, conforme apresentado na tabela 4.13. Outro dado importante, a ser utilizado pela área de Operações da Rede (até que os sistemas de gerência de rede façam o controle automaticamente), é a lista de banda de transmissão por enlace que deve ser mantida disponível para que o índice de imunidade projetado seja mantido em 93,84% (vide Tabela 4-13). A informação da vulnerabilidade à dupla falha por demanda é disponibilizada ao projetista, conforme mostrado na tabela 4-12, alertando-o que se nenhuma alteração for feita na rede, tal como inclusão de novos enlaces e/ou expansão de banda de transmissão por enlace, estas demandas estão sujeitas a interrupções para determinadas combinações de duplas falhas.

Tabela 4-12 – Necessidade de banda x aumento do indicador de imunidade

RESULTADO PC e PRC-RE													
IMUNIDADE	67,27%	93,84%	INCREMENTO			IMUNIDADE	67,27%	93,84%	INCREMENTO				
ENLACE	TOTAL PC	TOTAL PRC-RE	BANDA	20,37%	IMUNIDADE	26,57%	ENLACE	TOTAL PC	TOTAL PRC-RE	BANDA	20,37%	IMUNIDADE	26,57%
E1	139	149	10				E19	45	111	66			
E2	139	139	0				E20	35	139	104			
E3	155	149	-6				E21	179	139	-40			
E4	118	112	-6				E22	186	161	-25			
E5	139	139	0				E23	84	162	78			
E6	139	139	0				E24	150	162	12			
E7	155	149	-6				E25	0	116	116			
E8	83	121	38				E26	0	84	84			
E9	89	98	9				E25	150	84	-66			
E10	163	159	-4				E28	150	162	12			
E11	163	159	-4				E29	49	90	41			
E12	156	129	-27				E30	166	251	85			
E13	35	85	50				E31	21	21	0			
E14	12	40	28				E32	21	21	0			
E15	189	142	-47				E33	21	21	0			
E16	189	142	-47				E35	10	39	29			
E17	45	85	40				E38	84	185	101			
E18	45	94	49				MÉDIA ENLACE	98,58	118,67	20,08			
E18	45	94	49				% Média de acréscimo de banda na rede			20,37%			

Tabela 4-13 – Banda livre por enlace para garantir a Imunidade projetada

BANDA LIVRE POR ENLACE	
ENLACE	RESERVA
E1	10
E8	9
E9	16
E14	4
E17	4
E18	13
E19	30
E20	41
E22	52
E24	1
E25	18
E26	21
E27	21
E28	1
E29	26
E35	8
E38	23

Tabela 4-14 – Demandas interrompidas x duplas falhas na rede

RELAÇÃO DE DEMANDAS VULNERÁVEIS A DETERMINADAS COMBINAÇÕES DE DUPLAS FALHAS											
DEMANDA	FALHA 1	FALHA 2	DEMANDA	FALHA 1	FALHA 2	DEMANDA	FALHA 1	FALHA 2	DEMANDA	FALHA 1	FALHA 2
07_01	2	6	03_10	3	7	25_06	24	12	25_02	16	24
07_01	3	7	03_10	7	3	25_06	28	12	25_02	16	28
07_01	5	1	03_07	3	7	25_02	1	2	25_02	24	10
07_01	5	2	03_07	7	3	25_02	1	3	25_02	24	11
07_01	5	3	03_09	3	7	25_02	2	1	25_02	24	12
07_01	6	1	03_09	7	3	25_02	2	5	25_02	24	15
07_01	6	2	03_01	1	5	25_02	2	6	25_02	24	16
07_01	6	3	03_01	1	6	25_02	2	7	25_02	28	10
06_02	2	5	03_01	2	5	25_02	2	30	25_02	28	11
06_02	2	6	03_01	2	6	25_02	3	1	25_02	28	12
06_02	2	7	03_01	5	1	25_02	3	5	25_02	28	15
06_02	3	7	03_01	5	2	25_02	3	6	25_02	28	16
06_02	3	1	03_01	6	1	25_02	3	7	25_02	30	2
06_02	3	5	03_01	6	2	25_02	3	30	25_02	30	3
06_02	3	6	25_28	17	19	25_02	5	2	25_11	12	24
06_02	3	7	25_28	18	19	25_02	5	3	25_11	24	12
06_02	5	2	25_28	19	17	25_02	6	2	25_11	24	28
06_02	5	3	25_28	19	18	25_02	6	3	25_11	28	24
06_02	6	2	25_28	31	32	25_02	7	2	26_16	17	18
06_02	6	3	25_28	32	31	25_02	7	3	26_16	17	19
06_02	7	2	25_28	32	33	25_02	10	24	26_16	17	23
06_02	7	3	25_28	33	32	25_02	10	28	26_16	18	17
28_16	18	19	25_16	17	18	25_02	11	24	26_16	19	17
28_16	19	18	25_16	17	19	25_02	11	28	26_16	23	17
28_16	31	32	25_16	18	17	25_02	12	24	26_07	23	24
28_16	32	31	25_16	19	17	25_02	12	28	26_07	23	28
28_16	32	33	25_06	12	24	25_02	15	24	26_07	24	23
28_16	33	32	25_06	12	28	25_02	15	28	26_07	28	23
28_21	15	19	07_02	3	1	06_01	2	7	26_11	23	24
28_21	16	19	07_02	3	5	06_01	3	5	26_11	24	23
28_21	17	19	07_02	3	6	06_01	3	6	26_11	24	28
28_21	18	19	07_02	3	7	06_01	3	7	26_11	28	24
01_02	2	1	07_02	5	2	06_01	5	1	28_16	15	18
01_02	5	1	07_02	5	3	06_01	5	2	28_16	16	18
16_10	19	14	07_02	6	2	06_01	5	3	28_16	17	18
16_10	19	17	07_02	6	3	06_01	6	1	28_16	18	15
16_07	17	18	07_02	7	2	06_01	6	2	28_16	18	16
16_07	17	19	07_02	7	3	06_01	6	3	28_16	18	17
16_07	18	17	06_04	3	7	06_01	7	1	06_11	12	28
16_07	19	17	06_04	7	3	06_01	7	2	06_11	24	28
16_09	17	18	06_08	10	11	06_01	7	3	06_11	28	12
16_09	17	19	04_01	2	5	06_02	1	2	06_11	28	24
16_09	18	17	04_01	2	6	06_02	1	3	04_01	1	5
16_09	19	17	04_01	5	1	06_02	2	1	04_01	1	6
01_02	1	6	28_22	31	32	28_21	19	15	10_04	3	7
01_02	6	1	28_22	32	31	28_21	19	16	10_04	7	3
04_01	6	2	28_22	32	33	28_21	19	17	07_04	3	7
04_02	1	2	28_22	33	32	28_21	19	18	07_04	7	3
04_02	2	1	16_10	14	18	28_21	31	32	07_01	1	5
04_02	2	5	16_10	14	19	28_21	32	31	07_01	1	6
04_02	2	6	16_10	17	18	28_21	32	33	07_01	1	7
04_02	5	2	16_10	17	19	28_21	33	32	07_01	2	5
04_02	6	2	16_10	18	14	04_01	5	2	07_01	7	3
08_09	10	11	16_10	18	17	04_01	6	1	07_02	1	2
08_09	11	10	07_02	1	3	07_02	2	6	06_01	1	7
01_02	1	2	07_02	2	1	07_02	2	7	06_01	2	5
01_02	1	5	07_02	2	5	06_08	11	10	06_01	2	6
06_01	1	6	06_01	1	5						

Neste capítulo validamos através de inspeção os modelos que suportam a metodologia proposta, submetendo-os a uma rede hipotética. Os critérios de Consistência, Confiabilidade, Eficiência, Equivalência e Precisão, aprovaram os modelos. Mostramos e discutimos os resultados da metodologia aplicada a uma rede de uma grande empresa de telecomunicações, tais como aumento do índice de imunização contra duplas falhas pelo aumento médio da quantidade banda de transmissão na rede e a lista de demandas interrompidas por determinada combinação de duplas falhas de enlace.

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÃO

Neste trabalho, baseado em dados da topologia e da matriz de tráfego, disponíveis em uma operadora de telecomunicações, foi formulada uma metodologia para tratar o problema de distribuição de tráfego e alocação de banda de transmissão para o processo de restauração previsto no mecanismo de proteção PRC (Proteção e Restauração Combinadas), em redes que utilizam a tecnologia ASON. A distribuição de tráfego e da banda de transmissão para restauração ótima é aquela que com o menor custo atende aos requisitos de proteção contra duplas falhas de enlace.

Também foram estudadas as estruturas de dados que podem ser utilizadas para representação da rede e foi definido o uso de estruturas de listas para representar as características dos nós e as demandas de tráfego a serem considerados para escrita dos modelos em programação linear inteira.

Foi implementada uma ferramenta baseada na metodologia definida e os resultados obtidos mostram que o objetivo de propiciar ao projetista a possibilidade de realizar análises da rede e encontrar a melhor imunidade contra duplas falhas pelo menor custo envolvido foi atingido.

Os experimentos realizados mostraram que é possível alcançar altos índices de imunidade contra duplas falhas com um baixo incremento de banda utilizando o modelo PRC-RE (Proteção e Restauração Combinadas – Reuso de Enlaces), que também reduz a lista de enlaces, com banda de transmissão destinada à restauração, a ser preservada (mantê-la sempre livre, ou seja, sem tráfego de outros clientes), em casos onde não há falhas na rede.

A redução do tempo de solução através da heurística Dupla Fase viabiliza a aplicação da metodologia em redes de grande porte, porém, reduz a precisão da solução em torno de 5%, ou seja, está a 5% distante da solução ótima.

A ferramenta implementada recebe as informações sobre a topologia e a matriz de tráfego, através de listas geradas manualmente, necessitando da intervenção do projetista apenas para escolha dos parâmetros da rede. A automatização dos passos seguintes fica a cargo das rotinas desenvolvidas para tratamento dos dados a serem utilizados nos modelos, de acordo com a seleção feita pelo projetista.

Conclui-se que a utilização da metodologia proposta torna o trabalho do projetista menos complexo, possibilitando cumprir as tarefas de distribuição de tráfego e alocação de banda de transmissão por enlace da forma mais eficiente e com o menor uso possível de recursos.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho buscamos soluções para todos os problemas encontrados que, de certa forma, impediriam a criação da metodologia proposta ou sua aplicação em uma rede real. Como o foco não estava na escrita automática dos modelos e nem em criar um software para projeto de redes, consideramos que há muito que melhorar neste sentido, pois as rotinas criadas não têm como objetivo o desempenho e sim a exatidão, conseqüentemente, oneram demasiadamente o tempo de escrita dos modelos.

A interpretação do resultado para o projetista preocupou-se apenas com a disposição das informações e com o cálculo do indicador de imunidade contra dupla falha. O aprimoramento da análise dos resultados, visando enriquecer as informações passadas ao projetista, é uma opção muito interessante para trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASHLOCK , Daniel. Evolutionary Computation for Modeling and Optimization. Springer Science+Business Media, Inc. October 2005.
- BOTHAN P. C., HAYAMAN N., TISIAPARAS A. and GAYNORD P. Advanced modeling techniques for designing survivable telecommunications networks. BT Technology Journal, vol 21 n° 2, April 2003.
- CLOUQUEUR Matthieu, GROVER D. Wayne, Computational and Design studies on the Unavailability of Mesh-restorable Networks. IEEE/VDE Design of Reliable Communication Networks (DRCN 2000). Munich, April 2000, pp. 181-186.
- CORMEN Thomas H.; LEISERSON, Charles E.; RIVEST, Ronald L.; STEIN, Clifford. Introduction to Algorithms, Second Edition. MIT Press and McGraw-Hill. 2001.
- DOUCETTE John, CLOUQUEUR Matthieu and GROVER Wayne. On the availability and capacity requirements of shared backup path-protected mesh networks. Optical Networks Magazine, November/December 2003.
- FUMAGALLI Andrea, MARCO Tacca, CERUTTI Isabella, MASETTI Francesco, JAGANNATHAN Rajesh, A Practical Perspective in Designing Mesh Networks Based on 1:N Self-Healing Wavelength Division Multiplexing Rings. Department of Electrical Engineering The University of Texas at Dallas, May 1999.
- G.8080/Y.1304 ITU-T. Architecture for the automatically switched optical network (ASON)
- HE W., SRIDHARAN M., and SOMANI K. A. Capacity Design Studies of Span-Restorable Mesh Networks with Shared-Risk Link Group (SRLG) Effects. In Proc. Of SPIE Optical networking and Communications Conference (OptiComm), number 4874-02, pages 13-24, Boston, MA, USA, 2002.
- HO Pin-Han, University of Waterloo and MOUFTAH T. Hussein, University of Ottawa. Shared Protection in Mesh WDM Networks. IEEE Communications Magazine, January 2004.
- JAMAKOVIC, A.; UHLIG, S. On the relationship between the algebraic connectivity and graph's robustness to node and link failures. 3rd EuroNGI Conference on Next Generation Internet Networks. May 2007.

- LABOURDETTE François Jean. Fast approximate dimensioning and performance analysis of mesh optical networks. IEEE.
- LI Guangzhi, WANG Dongmei, KALMANEK Charles and DOVERSPIKE Robert. Efficient Distributed Path Selection for Shared Restoration Connections. AT&T Labs-Research, INFOCOM (IEEE) 2002.
- MAIER Guido, Variable Aggregation in the ILP Design of WDM Networks with Dedicated Protection, 2003.
- MANZALINI A., CAVAZZONI C., GUERRA S., QUAGLIOTTI M., QUASSO R., RICUCCI G. and SALUTA F. Experience of the IST LION Project “Layers Interworking in Optical Networks” in Switched optical networks. Exp – volume 2 – n. 1 – March 2002.
- MARCO CESAR GOLDBARG;HENRIQUE PACCA L. LUNA, Otimização Combinatória e Programação Linear: Modelos e Algoritmos. Editora Campus.
- OU (Sam) Canhui. New and Improved Approaches for Shared-Path Protection in WDM Mesh Networks. JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 22, NO. 5, MAY 2004
- QIAO Chunming, XIONG Yizhi and XU Dahai. Novel models for efficient shared-path protection. Department of Computer Science and Engineering, State University of New York at Buffalo.
- SCHUPKE A. Dominic, PRINZ G. Robert, Capacity Efficiency and Restorability of Path Protection and Rerouting in WDM Networks Subject to Dual Failures. Munich University of Technology Institute of Communication Networks, May 2005.
- SCHUPKE A. Dominic, AUTENRIECH A., and FICHER T. Survivability of Multiple Fiber Duct Failures. In Proc. Of Third International Workshop on the Design of Reliable Communication Networks (DRCN), pages 213-219, Budapest, Hungary, 2001.
- SOMANI K. Arun. Survivability and Traffic Grooming in WDM Optical Networks. Cambridge University Press, 2005.

TORNATORE Massimo, MAIER Guido and PATTAVINA Achille. WDM network Design by ILP models Based on flow aggregation. Politecnico di Milano, Dept. of Electronics and Information, 2002.

VANDERBEI J. Robert. Linear Programming: Foundations and Extensions. Second Edition, 2001.

ZOMORODIAN, Afra J. Topology for Computing. Cambridge Monographs on Applied and Computational Mathematics. January, 2005.