

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS – UNICAMP
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO – FEEC
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE SISTEMAS – DENNIS

**SOBREVIVENCIABILIDADE E INDISPONIBILIDADE NO
PLANEJAMENTO DE REDES DE TELECOMUNICAÇÕES**

ODERSON DIAS DE MELLO

Orientadores:

Dr. Marcos Carneiro da Silva

&

Prof. Dr. Hermano de M. F. Tavares

9305012
Este exemplar corresponde à redação final da tese
defendida por Oderson Dias de Mello

e aprovada pela Comissão

Julgadora em 13.11.1996.


Orientador

Tese submetida à Faculdade de
Engenharia Elétrica e de Computação
da Universidade Estadual de
Campinas – UNICAMP, como parte
dos requisitos exigidos para obtenção
do título de **Mestre em Engenharia
Elétrica.**

- Novembro de 1996 -

“Para começar a ser sábio basta ter uma forte determinação, uma vontade firme de conseguir a sabedoria a qualquer preço. Dê a ela o devido valor, agarre-se a ela e a sabedoria o cobrirá de honras. Dará a você uma valiosa coroa, admiração e respeito. Meu filho, ouça e coloque em prática os meus conselhos; assim, você terá uma vida longa e feliz.”

— Salomão

Aos meus pais e irmãs

Oder, Ghisleine, Gisele e Geisa.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Hermano de M. F. Tavares, orientador e amigo, por sua inestimável ajuda, enorme competência e grande incentivo.

Ao também orientador Dr. Marcos C. da Silva pelo auxílio, principalmente no que se refere às implementações computacionais.

Ao Prof. Dr. Raul R. Vinhas e aos amigos da Telesp pela oportunidade de participação no convênio Telesp — UNICAMP.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa Científica e Tecnológica pela concessão da bolsa de mestrado.

Ao Saulo Bortolon, ao Eduardo J. Quaglia, ao José R. Formigoni e ao Paulo D. B. da Silveira pela assessoria.

Ao Walcir Fontanini e a Suzelei M. Ganade pelo grande apoio no Laboratório de Otimização.

À Márcia H. G. Fracaro pela sua fineza e eficiência na secretaria.

À família pela cumplicidade total, apoio e carinho.

À Luciana Assunção, minha namorada e amiga, por fazer parte da minha vida, estando sempre ao meu lado nos momentos mais difíceis e nos mais felizes.

Enfim, quero agradecer de forma geral a todos os colegas e amigos que colaboraram de forma direta ou indireta para a realização deste trabalho.

Obrigado Deus querido.

RESUMO

Com o crescimento da utilização de fibras ópticas, a confiabilidade tem adquirido importância fundamental no planejamento da rede de galerias para transmissão. Neste trabalho descrevemos várias medidas de prevenção aos desastres; também desenvolvemos uma ferramenta que auxilia o planejador na escolha de uma rede que satisfaça as restrições de segurança, e seja orientada por custo. Definimos índices que medem a confiabilidade e mostramos resultados que revelam como regras de segurança aplicadas a enlaces especiais afetam os valores destes índices.

ÍNDICE

1. A MOTIVAÇÃO DA TESE: O AVANÇO DAS TELECOMUNICAÇÕES	7
1. 1. Introdução	7
1. 2. Alguns acidentes históricos recentes e suas causas	9
1. 3. Medidas de prevenção	11
2. AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA DE UMA REDE	14
2. 1. Introdução	14
2. 2. Característica de uma falha na rede	14
2. 3. ULE (User Lost Erlang)	17
2. 4. Sobrevivenciabilidade	18
2. 5. Indisponibilidade	23
3. REDE DE GALERIAS	30
3. 1. Introdução	30
3. 2. Modelo matemático	32
3. 3. Proposta de solução — heurísticas	33
3. 3. 1. Método das Orelhas Gulosas	34
3. 3. 2. Método da Dupla Árvore	42
3. 3. 3. Método do Carregamento de Demandas	45
3. 4. Teste computacional na rede da cidade de São Paulo	47
3. 5. Conclusões	49
4. INDISPONIBILIDADE: UM ESTUDO DE CASO	51
4. 1. Introdução	51
4. 2. A rede de Campinas	51
4. 3. Cálculos de indisponibilidade: rede de Campinas	55
4. 4. Conclusões	58
5. SOBREVIVENCIABILIDADE EM REDES DE TELECOMUNICAÇÕES	59
5. 1. Introdução	59
5. 2. Sobrevivenciabilidade — estudo de caso	61
5. 3. Conclusões	70
6. CONCLUSÕES FINAIS	72
APÊNDICE A: REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
APÊNDICE B: BIBLIOGRAFIAS ADICIONAIS	78

1. A MOTIVAÇÃO DA TESE: O AVANÇO DAS TELECOMUNICAÇÕES

1. 1. Introdução

Nós vivemos na era da informação onde os serviços de telecomunicações desempenham uma parte importante na nossa vida diária. Os investimentos em telecomunicações têm crescido bastante, e os resultados se revelam nas receitas. Estima-se que a Europa terá no ano de 2002 uma receita superior a 150 bilhões de dólares, enquanto os Estados Unidos devem ultrapassar os 300 bilhões de dólares. Somente o serviço de vídeo-conferência deve ultrapassar 1 bilhão de dólares de receita até o ano 2000 nos Estados Unidos e Europa [EDMONDSON]. Os países em desenvolvimento também correm atrás do prejuízo, como pode ser visto na Tabela 1, lançando mão do fato de poderem pular etapas no desenvolvimento das telecomunicações.

	Milhões de linhas de telefone adicionadas, 1993-2000	Porcentagem de linhas aumentadas anualmente	Bilhões de dólares de investimento
China	35,5	19,3	53,3
Rússia	15,5	6,7	23,3
Índia	9,1	11,2	13,7
Brasil	6,8	6,4	10,2
México	6,3	8,5	9,4
Tailândia	4,3	16,7	6,6
Malásia	3,1	11,9	4,6
Polônia	2,7	6,7	4,0
Indonésia	2,6	13,6	3,9

Tabela 1: Dados da “International Telecommunication Union”

Cada vez mais cresce o uso e o número dos serviços que se utilizam das telecomunicações. Além do tradicional serviço de voz, já dispomos ou disporemos num futuro próximo de serviços como: o supermercado e o banco virtual, a TV a cabo, o videofone, a vídeo-conferência, a TV interativa e o correio eletrônico. O serviço de monitoramento e controle remoto já está sendo utilizado na proteção residencial e comercial, no acompanhamento médico, em processos industriais com planta distribuída e controle em tempo real, e, na monitoração de grandes sistemas distribuídos através da rede pública.

Tais serviços ganharam força e diversos deles se tornaram possíveis através do desenvolvimento de novos equipamentos e da substituição da tecnologia de fios de cobre pela tecnologia de cabos de fibra óptica. Como vantagens da fibra óptica sobre os fios de cobre, podemos citar: o baixo custo, alta capacidade e alta velocidade de transporte e, manutenção mais fácil e barata. Uma linha telefônica com fibra pode transportar um *gigabit* ou dois de informação (equivalente a uma Enciclopédia Britânica) em um segundo. Isso é 10000 vezes mais do que o cabo de cobre é capaz [CAREY].

O crescimento do consumo anual de fibras nos últimos anos, para utilização em redes de telecomunicação, foi superior a 20%. Previsões conservadoras estimam um crescimento anual de 15% no consumo de fibra nos próximos anos. Essas previsões não incluem a aplicação de fibras na rede externa, aplicação que deve crescer com os novos serviços, considerando somente sua utilização nas redes de entroncamento, onde atualmente concentra-se grande parte da demanda [FORMIGONI].

A crescente utilização de novas tecnologias através de fibras ópticas, possibilita o transporte de milhares de conversações telefônicas e dados, em alta velocidade, e em poucos fios de fibra. Essa situação tem aumentado a possibilidade de perdas severas no serviço, no evento de uma falha na central ou na ligação de fibra.

1. 2. Alguns acidentes históricos recentes e suas causas

No dia 8 de maio de 1988, domingo, Dia das Mães, as 16:00 horas, tocou o alarme na Central Controladora de Rede em Springfield, Illinois - USA, indicando uma falha de energia e possivelmente fogo no centro de fios de Hinsdale, a aproximadamente 250 km de Springfield. Um supervisor próximo a Wheaton, cidade vizinha de Hinsdale, foi notificado e tentou chamar os bombeiros, mas o fogo já tinha chegado às linhas de acesso. Técnicos foram enviados de Wheaton para Hinsdale onde o fogo já era visível. O impacto do fogo começava a ser sentido pela comunidade. No hospital mais próximo, enfermeiras tentavam em vão telefonar de um andar para o outro. Os controladores de tráfego aéreo no Aeroporto Internacional O'Hare (de Chicago), um dos aeroportos de maior tráfego do mundo, perdiam muitos dos seus circuitos de dados e voz, e não podiam programar corretamente os seus vôos. Vendedores não conseguiam verificar os cartões de crédito. O telefone de emergência 911 chamava sem resposta. O resultado do acidente causou a perda de serviço e isolamento em 35000 telefones residenciais, 37000 troncos, 13500 circuitos especiais, 118000 circuitos de fibra óptica de longa distância e 50% dos telefones celulares de Chicago [NATIONAL COMMUNICATIONS SYSTEM citado por MCDONALD]. Ao todo, 500000 consumidores residenciais e comerciais que fazem 3,5 milhões de chamadas telefônicas por dia foram atingidos pelo fogo [KING citado por MCDONALD]. O serviço só voltou ao normal no dia 5 de junho de 1988.

Dois meses depois, técnicos em Framingham, Massachusetts, acidentalmente queimaram dois fusíveis de 600A no centro de fios da Union Street. O comutador local deixou de operar, e 35000 chamadas de consumidores residenciais e comerciais não foram completadas por mais de um dia. Na área bancária o sistema de alarmes foi acionado e a sua rede de comunicação fechou por razões de segurança [BROWN citado por MCDONALD].

Em novembro de 1988, muitos dos serviços de longa distância da costa leste dos Estados Unidos foram interrompidos quando trabalhadores de uma construção acidentalmente cortaram um dos principais cabos de fibra óptica em New Jersey. Três

milhões e quinhentas mil chamadas telefônicas foram bloqueadas [SIMS citado por MCDONALD].

Em 1990, uma falha num sistema de Sinalização de Sinal comum nº 7 (SS7) teve impacto nacional nos Estados Unidos, e envolveu a perda de 65 milhões de chamadas telefônicas [FITZGERALD citado por MCDONALD].

No dia 24 de julho de 1995, uma segunda-feira, São Paulo, a maior cidade da América do Sul, ficou literalmente isolada do resto do mundo. Durante pelo menos quatro horas ninguém conseguiu falar ou transmitir algum dado eletrônico por via telefônica de ou para São Paulo. Exatamente uma semana depois, na segunda-feira, 31 de julho, a situação voltou a ocorrer, tendo 20 % do Produto Interno Bruto brasileiro ficado isolado do resto do mundo entre 9 e 13 horas [NÊUMANNE]. Em 1995 as centrais telefônicas da Empresa Brasileira de Telecomunicações (Embratel) responsáveis pelo tráfego de interurbanos e ligações internacionais em São Paulo, sofreram 16 panes, o que representou mais de 32 horas de isolamento do Estado com o resto do país. As panes foram causadas por problemas no *software* das quatro centrais telefônicas da Embratel na cidade: as de Ingleses (Bela Vista), Lapa, Morumbi e Penha. As quatro centrais foram fornecidas pela NEC do Brasil entre 1989 e 1994, mas a maior parte do *software* foi desenvolvido pela NEC Corporation, no Japão. Segundo relatórios de engenheiros da Embratel, a central de Bela Vista (centro), uma das maiores do mundo (43200 troncos), registrou 35 tipos de erros de *software* de novembro de 94 a agosto de 95 [LOBATO], [LOZANO].

Uma falha pode ocorrer na rede devido a defeito na arquitetura, defeito de projeto, procedimento inadequado de manutenção, incêndio, raio, tornado, furacão, terremoto, inundação, tsunami, choque de bloco de gelo com ponte que transporta cabos de fibras ópticas, ataque de roedores aos cabos não protegidos devidamente, acidente de automóvel, descarrilamento de trem, empregados descontentes, *hackers*, vírus, defeito de *software*, guerra, terrorismo, vandalismo, tiro, etc.

1. 3. Medidas de prevenção

As redes de telecomunicações são sistemas vastos, compostos de edifícios, torres de aço com antenas, cabos aéreos, postes telefônicos e galerias subterrâneas cobrindo uma grande área. Não é fácil nem barato construir um sistema em que todos os componentes resistam aos desastres em todos os lugares. Mas, como medidas preventivas podemos colocar como metas três princípios fundamentais [ADACHI]:

1. AUMENTO DA CONFIABILIDADE DA REDE.

1.1. Construções reforçadas.

1.1.1. Projeto de construções de edifícios e galerias com desempenho assísmico.

1.1.2. Para reduzir o dano causado por incêndio, o número de janelas na sala dos comutadores é diminuído, venezianas e portas corta-fogo são instaladas para impedir o avanço das chamas. Os centros de fios devem ter detectores de fumaça e extintores de incêndio. Para combater o fogo nas galerias, cabos resistentes a chamas e coberturas não inflamáveis são utilizadas.

1.1.3. Para proteger os centros de fios contra marés altas, tsunamis e inundações; portas e placas de contenção de água são instaladas quando necessário. Nas galerias um sistema de supervisão remota é colocado para avisar em caso de desastre ou problemas de equipamento.

1.2. Configuração redundante.

1.2.1. Descentralização do equipamento de comutação.

- 1.2.2. Implementação de rotas de transmissão duplicadas ou múltiplas. Em áreas montanhosas ou outros lugares onde as linhas de transmissão são de construção difícil, circuitos alternativos são fornecidos por ligações de satélite.
- 1.2.3. Duplicação das rotas e múltipla acomodação (acomodação de um circuito em mais de um centro de fio) das linhas dos assinantes.
- 1.2.4. Descentralização da fonte de energia.
- 1.2.5. Expansão da utilização de satélites.
- 1.2.6. Controle de sobrecarga dinâmico.

2. PREVENÇÃO DE ISOLAMENTO.

- 2.1. Prevenindo o isolamento de cidades ou bairros.
 - 2.1.1. Utilização de equipamento de rádio móvel.
 - 2.1.2. Expansão da utilização de satélites de comunicação.
- 2.2. Assegurando a comunicação para instituições públicas.
 - 2.2.1. Provendo telefones de rádio para uso emergencial durante o período de restauração que segue ao desastre.

3. RESTAURAÇÃO RÁPIDA DOS SERVIÇOS.

- 3.1. Provisão de *hardware*.
 - 3.1.1. Provisão de centrais telefônicas móveis para uso emergencial.
 - 3.1.2. Provisão de baterias ou geradores nos centros de fios.
 - 3.1.3. Provisão de vários tipos de veículos com fornecimento móvel de energia (de 50 KVA até 1000 KVA).

- 3.1.4. Provisão de vários tipos de equipamentos de rádio portátil.
 - 3.1.5. Implementação de cabos para uso emergencial depois do desastre.
O trabalho que mais consome tempo na restauração de circuitos é a conexão de cabos. Cabos de fibra óptica para emergência são leves e fáceis de transportar. Eles podem ser conectados a conversores eletroópticos e usados para restaurar circuitos metálicos.
- 3.2. Planejamento de operações de emergência.
- 3.2.1. Formulação de um plano de emergência para medidas a serem tomadas na ocorrência de certo tipo de desastre.
 - 3.2.2. Estabelecimento da organização para o trabalho de restauração.
 - 3.2.3. Execução de treinamento de prevenção de desastres.

As medidas de prevenção envolvem um compromisso entre a confiabilidade da rede e seu custo. Nenhum passo no planejamento deve ser tomado antes de um estudo da relação custo/benefício.

2. AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA DE UMA REDE

2. 1. Introdução

Neste capítulo apresentaremos três categorias de falhas na perspectiva do usuário (catastrófica, grande e pequena), e algumas medidas de avaliação da segurança de uma rede. Essas medidas são necessárias para quantificar o quanto uma rede é mais segura que outra ou quanto um desastre é mais grave do que outro. As medidas descritas são:

1. a ULE (*User Lost Erlang*),
2. a Sobrevivenciabilidade, e
3. a Indisponibilidade.

2. 2. Característica de uma falha na rede

Na perspectiva do usuário, uma falha na rede pode ser representada pelos seguintes itens principais [ZOLFAGHARI]:

1. A *Unservability* (**U**) é definida em termos de uma unidade de uso. Para uma rede de comutação pública, a função mais comum da rede é a habilidade de estabelecer ou manter uma conexão de uma origem para um destino em certos limites. U pode ser definido como a porcentagem de chamadas que falham, ou como a porcentagem de pacotes que não são entregues em um certo tempo pré-determinado, ou como a porcentagem de canais que falham (por exemplo, *Digital Signal level 0* (DS-0), DS-1, DS-3).

2. A **Duração (D)** define o tempo da ocorrência de U na rede. É medido pela determinação dos momentos inicial e final de uma falha, baseado no valor de U a partir de um dado limiar.
3. O **Peso (P)** inclui o contexto da área geográfica, da população, e do padrão de tráfego no qual U excede um certo limiar.

A tripla U, D, P é a base para medir a quantidade de falhas na rede e seu impacto nos serviços e usuários. Dependendo dos valores de U, D, e P, as falhas na rede podem ser classificadas como catastróficas, grandes ou pequenas.

Dependendo da combinação U, D e P de uma falha, as seguintes categorias podem ser atribuídas para falhas de causas humanas ou naturais:

- **Catastrófica:** Uma falha (ou falhas) na rede com uma combinação de U, D, e P que é bastante severa, atingindo boa parte da população, e onde a maior parte do serviço deve ser restaurado manualmente. Exemplos possíveis: falhas em vários centros de fios causadas por terremoto, inundação, furacão, tornado, falha na companhia fornecedora de energia, defeito geral no *hardware/software*, guerra, etc.
- **Grande:** Uma falha (ou falhas) na rede com uma combinação de U, D, e P que não é tão severa quanto a catastrófica, e onde o serviço será restaurado parte manualmente e parte automaticamente. Exemplos possíveis: falha causada por fogo ou terrorismo no CCS (*Common Channel Signaling*), tandem ou centro de fios (CF); falha numa rota de cabos de fibra que servem vários CFs, defeito de *software*, falha no DCS (*Digital Cross-connect System*), etc.
- **Pequena:** Uma falha (ou falhas) na rede com uma combinação de U, D, e P tal que a restauração do serviço pode ser automática e virtualmente transparente para o usuário. Exemplos possíveis: falha simples de fibra, falha de equipamento de linha, etc.

Para falhas catastróficas afetando muitas pessoas, alguns serviços podem ser restaurados automaticamente, mas a maior parte do serviço será restaurada manualmente e tão rápido quanto possível. Para falhas grandes, uma alta porcentagem do serviço pode ser restaurado automaticamente e o restante será restaurado manualmente. Para falhas pequenas, a restauração do serviço será automática e virtualmente não sentida pelo usuário.

Podemos categorizar as falhas na rede por diferentes conjuntos de valores da tripla (U, D, P). Por exemplo, uma categoria de falha seria definida por limitantes inferiores e superiores, $U_0 \leq U \leq U_1$, $D_0 \leq D \leq D_1$, $P_0 \leq P \leq P_1$ para os limiares dados, (U_0, D_0, P_0) e (U_1, D_1, P_1) . Porém fórmulas mais complexas de qualificação podem ser estabelecidas para redes, serviços ou usuários. A Figura 1 ilustra três regiões simples de qualificação. A inatividade da rede pode ser classificada como catastrófica, grande ou pequena dependendo a que região de qualificação a tripla (U, D, P) pertence.

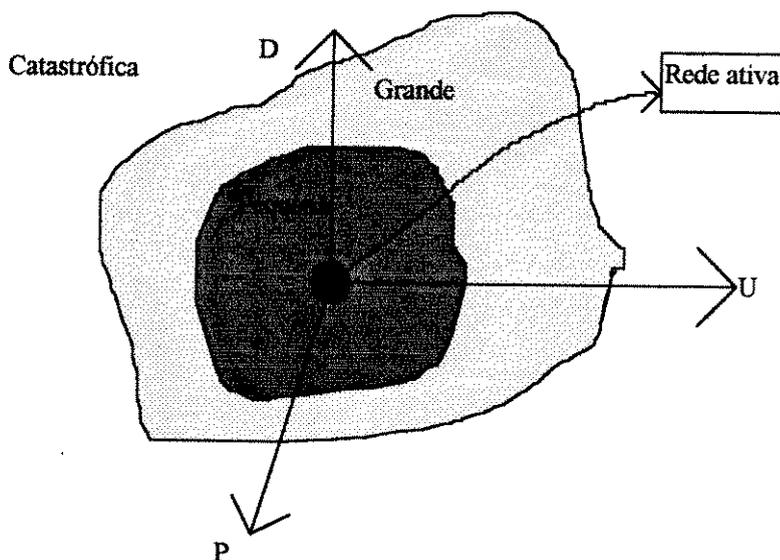


Figura 1: Exemplo de regiões de qualificação para (U, D, P).

2. 3. ULE (*User Lost Erlang*)

A ULE é definida como [MCDONALD, 1992], [MCDONALD, 1994]:

$$\text{ULE} = \log_{10}(E.H), \quad \text{para } E.H > 1$$

onde

E = Média da perda estimada de tráfego do usuário durante o tempo da falha, em Erlang, tomada de registros históricos.

H = Tempo da falha em horas.

Podemos notar que E e H fazem respectivamente os papéis de U (*Unservability*) e D (Duração) da seção 2. 2.

Uma ULE é igual a 10 *User Lost Erlang*, duas ULE's são iguais a 100, e assim por diante. Uma falha de âmbito nacional nos Estados Unidos em um SS7 de uma rede da AT&T em janeiro de 1990 registrou 6,3 ULE's. Isso significa que os usuários perderam mais de um milhão de Erlangs de uso da rede. Em 1991 uma outra falha de SS7 em Washington, DC mediu 6,8 ULE's. O limiar do FCC (*Federal Communications Commission*) para registro de falha numa rede é 3,4 ULE's.

As vantagens da ULE são as seguintes:

1. É logarítmica, como a escala Richter. Diariamente acontecem mais de 1000 terremotos que não chegam a 2 na escala Richter e, portanto, não aparecem na primeira página dos jornais. O público está bem servido no que se refere à escala Richter, mas a imprensa ainda está sem parâmetros para medir falhas na rede, e não é incomum aparecerem artigos em jornais sobre falhas de relevância quase nula.

2. Mede o impacto sobre a população (por exemplo, uma falha as 2:00 horas da manhã, ou num feriado, tem um impacto diferente de uma falha no meio da semana no horário comercial).
3. É fácil de medir desde que as curvas temporais padrões (*patterns*) de tráfego sejam bem conhecidas.
4. Mede somente o impacto de uma falha no usuário tomando em conta a redundância da rede.
5. É fácil de ser comunicada às pessoas que não conhecem o jargão da área uma vez que ela é análoga à escala Richter.

2. 4. Sobrevivenciabilidade

A sobrevivenciabilidade pode ser conceituada como a capacidade da rede sobreviver, total ou parcialmente, na ocorrência de falha. Sobreviver significa manter os serviços em certos níveis. Há muitas maneiras de avaliar a integridade da rede após a ocorrência de uma catástrofe; pode-se, por exemplo, calcular o volume de tráfego sobrevivente, o número de assinantes conectados, a receita preservada ou outra característica da rede que seja uma medida de interesse.

Se uma medida da rede, que chamaremos de x , puder ser quantificada, poderemos então definir a sobrevivenciabilidade da rede, S , como a fração de x que resta depois do instante de acontecimento do desastre considerado. Em geral, S é uma variável aleatória, e podemos propor que a sobrevivenciabilidade da rede seja caracterizada por uma função de sobrevivenciabilidade, ao invés de apenas uma medida simples de sobrevivenciabilidade (um número representando seu valor). Como exemplo, considere a Figura 2, na qual estaremos interessados no número de nós restantes conectados ao nó central, em uma rede do tipo anel que é atingida por uma tempestade forte. Alguns dos nós podem ser destruídos por raios. Dependendo de quais nós são

destruídos, o valor de S pode ser diferente. Suponhamos que o conjunto de nós fora de operação possa ser caracterizado probabilisticamente; então temos um espaço amostral $E = \{e\}$ consistindo de todos os subconjuntos de nós, onde cada um deles têm atribuída uma medida representando a probabilidade dos nós que estão em mau funcionamento. É claro que $\sum_{e \in E} P_e$ deve ter valor unitário. Assim, para cada ponto amostral e , temos uma probabilidade P_e e uma sobrevivenciabilidade S_e , onde S_e é a fração dos nós conectados ao nó central. Desta forma, a função de sobrevivenciabilidade, que é a probabilidade da fração de nós que continuam conectados ao nó central ser s , poderá ser expressa como segue [LIEW, 1992], [LIEW, 1994]:

$$P[S = s] = \sum_{e: S_e = s} P_e.$$

A partir da função de sobrevivenciabilidade podemos deduzir diferentes grandezas que correspondem a características particulares da rede. Por exemplo, podemos obter a sobrevivenciabilidade esperada $E[S]$, a sobrevivenciabilidade do pior caso s^* , a sobrevivenciabilidade τ -porcento s_τ , e a probabilidade da sobrevivenciabilidade ser zero P_0 :

$$E[S] = \sum_s s \cdot P[S = s],$$

$$s^* = \min_{P[S=s] > 0} s,$$

$$s_\tau = \max_{P[S \leq s] \leq \tau/100} s,$$

$$P_0 = P[S = 0].$$

Valores altos de $E[S]$, s^* , s_τ , e $(1 - P_0)$ correspondem a redes de maior sobrevivenciabilidade, mas cada parâmetro mostra um aspecto diferente da sobrevivenciabilidade da rede. Para ilustração, mostramos na Figura 3 as quantidades acima baseadas em uma função de sobrevivenciabilidade fictícia.

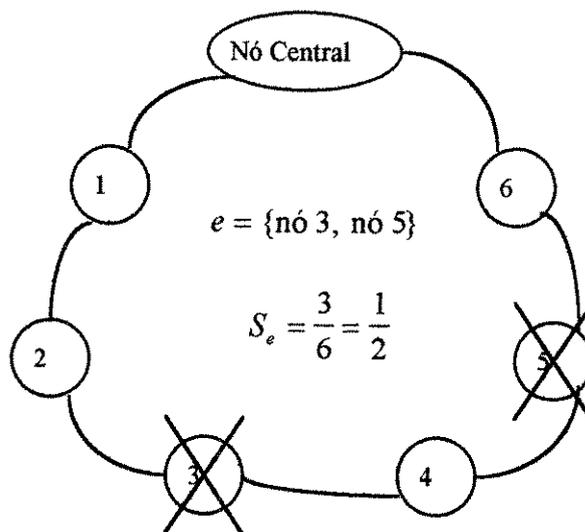


Figura 2: Rede anel sujeita a falhas de nós causadas por uma forte tempestade.

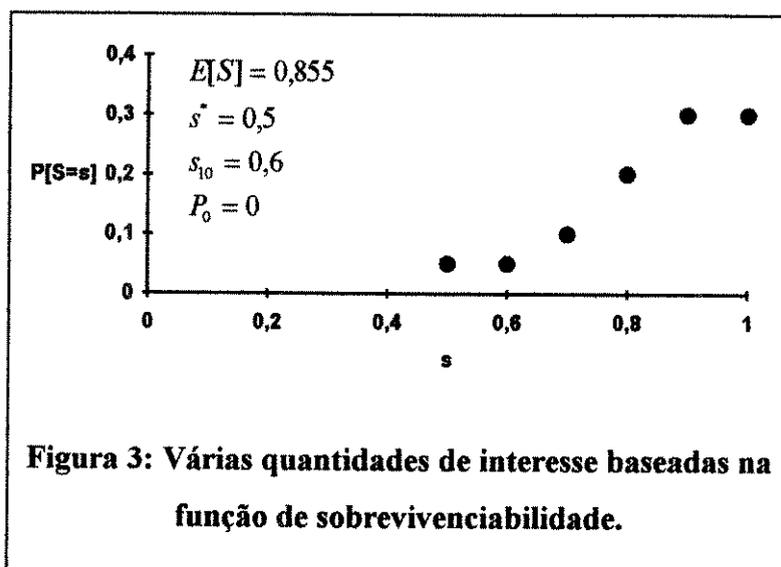


Figura 3: Várias quantidades de interesse baseadas na função de sobrevivenciabilidade.

O procedimento geral para o cálculo da sobrevivenciabilidade de uma rede é o seguinte [ZOLFAGHARI]:

- 1) especificar o tipo de desastre a ser estudado;
- 2) definir a medida de sobrevivenciabilidade;

- 3) listar os pontos amostrais $\{e\}$, ou todas as combinações de eventos que podem acontecer no tipo de desastre considerado;
- 4) determinar a sobrevivenciabilidade S_e ;
- 5) determinar ou atribuir a probabilidade P_e de cada evento e ; e
- 6) calcular a função de sobrevivenciabilidade $P[S = s] = \sum_{e: S_e = s} P_e$.

A seguir, descrevemos os passos acima em maior detalhe. Antes de calcularmos a função de sobrevivenciabilidade, devemos primeiro identificar o tipo de desastre e a definição da medida de sobrevivenciabilidade de interesse. Isso é importante desde que tipos diferentes de desastres afetam a rede de forma distinta. Por exemplo, uma tempestade forte pode deixar mais de um nó (centro de fios) da rede fora de operação, enquanto um corte de cabo costumeiramente destrói apenas a transmissão entre dois nós. Desta forma, o prejuízo na rede e a sua caracterização probabilística serão diferentes nestes dois casos. Podemos também obter diferentes resultados do cálculo de sobrevivenciabilidade dependendo do tipo de medida que escolhemos. Por exemplo, a medida poderia ser o número de assinantes conectados a um nó central, como no exemplo da Figura 2, ou a receita auferida. Se alguns assinantes contribuírem com a receita mais do que outros, os valores da sobrevivenciabilidade baseados naquelas duas definições poderiam ser diferentes. Isso também sugere que o planejador da rede poderia dar uma prioridade mais alta na sobrevivenciabilidade da rede para os assinantes que pagam mais.

O próximo passo é listar todas as possíveis combinações de eventos que poderiam acontecer na ocorrência de determinado tipo de desastre. Entretanto, isso pode não ser tão fácil quanto parece. A rede anel da Figura 2 é um caso especial no qual os pontos amostrais podem ser enumerados facilmente. Dada uma rede mais geral e uma definição da medida de sobrevivenciabilidade diferente, listar todos os pontos amostrais pode ser trabalhoso e possível de ser feito somente com a utilização de um computador. Mesmo fazendo uso do computador, o espaço amostral pode ser muito grande, e neste

caso tentaríamos eliminar pontos amostrais que têm uma probabilidade muito pequena de ocorrer.

Depois de listar os pontos amostrais, o próximo passo é calcular a sobrevivenciabilidade para cada ponto amostral. Esse cálculo depende da definição de sobrevivenciabilidade utilizada. Se a definição é o número de nós conectados a um nó central particular, como no exemplo da Figura 2, então é necessário termos um algoritmo eficiente que pode determinar se existe um caminho do nó central para os demais nós. A idéia de construir um algoritmo geral que pode determinar a sobrevivenciabilidade em qualquer rede dada não nos parece tão boa quanto querer identificar algoritmos mais eficientes através da exploração de estruturas particulares da rede em estudo. É claro que a solução para a rede da Figura 2 pode ser obtida exatamente sem qualquer algoritmo sofisticado.

Para cada ponto amostral, podemos atribuir uma medida representando a probabilidade da sua ocorrência. A atribuição de probabilidade para os pontos amostrais será baseada nas observações do passado ou na experiência. Entretanto, se o desastre considerado acontece muito raramente (por exemplo, um ataque nuclear), as observações do passado não são disponíveis e teremos que usar nosso julgamento para a atribuição das probabilidades. Neste caso, um estudo de sensibilidade dos resultados feitos através de variações nas probabilidades atribuídas é necessário para estabelecermos o nível de confiança que teremos nos resultados. Para casos especiais em que os problemas considerados têm uma estrutura homogênea ou uniforme, podemos atribuir probabilidades uniformemente. Por exemplo, na rede de anel da Figura 2 cada ligação têm probabilidade igual de falha.

Ao completarmos os passos acima, é fácil calcularmos cada ponto da função de sobrevivenciabilidade através da soma das probabilidades de todos os pontos amostrais com a mesma sobrevivenciabilidade.

2. 5. Indisponibilidade

A indisponibilidade de um canal de comunicação é definida como a probabilidade de que ele esteja fora de serviço em certo período de tempo, podendo ser expressa como a porcentagem de tempo ou como o número de minutos por ano em que o canal esteve fora de atividade [MELLO, 1996, Julho], [SEXTON], [TO]:

Indisponibilidade =

$$= 100\% \cdot (\text{tempo de falha})/(\text{tempo total})$$

$$= (525600 \text{ min/ano}) \cdot (\text{tempo de falha})/(\text{tempo total})$$

$$= U \text{ min/ano.}$$

Para calcularmos a indisponibilidade total de um canal, temos que considerar falhas de diversas origens, incluindo equipamentos (eletrônicos e eletroópticos), sistemas de energia, cortes de cabo e atividades de manutenção. Analisaremos somente as falhas causadas por corte de cabo ou defeito no par transmissor/receptor (T/R). O procedimento de cálculo exposto pode ser adotado para a análise dos outros tipos de falhas.

Para calcularmos os índices de indisponibilidade, utilizamos estatísticas de corte de cabo, de falhas em equipamentos, e tempos médios de reparo. Os números para falhas de equipamentos e cortes de cabo são mostrados na Tabela 2. Eles foram extraídos da Bellcore [KOBAYASHI citado por TO]. O número médio de falhas corresponde a 1 falha a cada 10,5 anos no transmissor e a cada 26,5 anos no receptor.

Podemos calcular, a título de exemplo, a indisponibilidade de uma simples ligação de 100 quilômetros com um regenerador como mostrado na Figura 4.

Tempo médio de reparo de equipamento	2 horas
Tempo médio de reparo de corte de cabo	12 horas
Taxa de corte de cabo	2,73/ano/1000 km
Média do número de falhas do transmissor (T) em 10^9 horas	10867
Média do número de falhas do receptor (R) em 10^9 horas	4311

Tabela 2: Taxas de falhas e tempos de reparo (Bellcore).

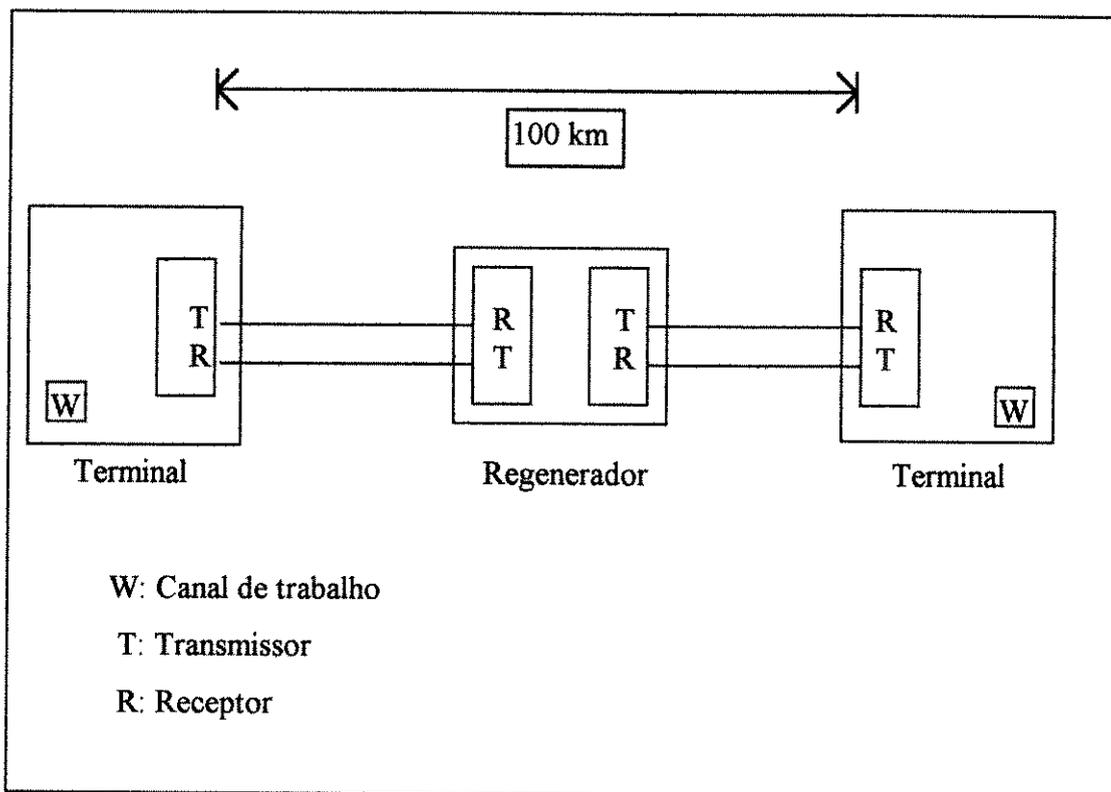


Figura 4: Canal de comunicação sem nenhum equipamento de proteção.

Qualquer falha em um dos quatro pares T/R causará uma perda de tráfego. Calculando a indisponibilidade do canal bidirecional para falhas de equipamentos de alta velocidade (U_e), temos:

$$U_e = 4 \times U_{T/R},$$

onde $U_{T/R}$ é a indisponibilidade de um par T/R, calculado como se segue:

$$U_{TR} = (10867 + 4311) \times 2 \text{ horas} / 10^9 \text{ horas} = 3,04 \times 10^{-5}.$$

Então:

$$U_e = 4 \times U_{TR} = 4 \times (3,04 \times 10^{-5}) = 1,21 \times 10^{-4} = 63,8 \text{ min/ano}.$$

A indisponibilidade do canal por cortes de cabo (U_c) é dada pela expressão:

$$\begin{aligned} U_c &= (2,73 / (\text{ano} \times 1000 \text{ km})) \times 12 \text{ horas} \times 100 \text{ km} = \\ &= 3,74 \times 10^{-4} = 196,6 \text{ min/ano}. \end{aligned}$$

Como estamos considerando apenas falhas de equipamentos de alta velocidade e cortes de cabo, a indisponibilidade total U , será definida como: $U = U_e + U_c$. Para o exemplo acima, $U = 260,4 \text{ min/ano}$.

No caso desse mesmo sistema receber a proteção tipo 1:1 sem rotas disjuntas (Figura 5), seriam criados 2 canais, um denominado de trabalho (W) e outro de proteção (P), com equipamentos de mesma característica, e com os dois pares de fibra sob o mesmo cabo óptico. Dessa forma, a indisponibilidade de ambos os canais seria idêntica à calculada anteriormente, porém, seria necessário que ambos falhassem para haver perda de tráfego. Portanto, U_e é dada por:

$$U_e = U_W \times U_P = (1,21 \times 10^{-4}) \times (1,21 \times 10^{-4}) = 1,46 \times 10^{-8} = 0,008 \text{ min/ano}.$$

Para indisponibilidade de cabo os cálculos são os mesmos que os realizados para o canal sem proteção, pois a ruptura do cabo implicaria a perda dos dois canais. Neste caso,

$$U = (0,008 + 196,6) \text{ min/ano} \approx 196,6 \text{ min/ano}.$$

No caso do sistema com segurança 1:1 da Figura 5 incluir rotas disjuntas para os canais de trabalho e proteção, a indisponibilidade para cortes de cabo seria:

$$\begin{aligned} U_c &= ((2,73 / (\text{ano} \times 1000 \text{ km})) \times 12 \text{ horas} \times 100 \text{ km})^2 = \\ &= (3,74 \times 10^{-4})^2 = \end{aligned}$$

= 0,07 min/ano.

U neste caso seria aproximadamente igual a 0,08 min/ano.

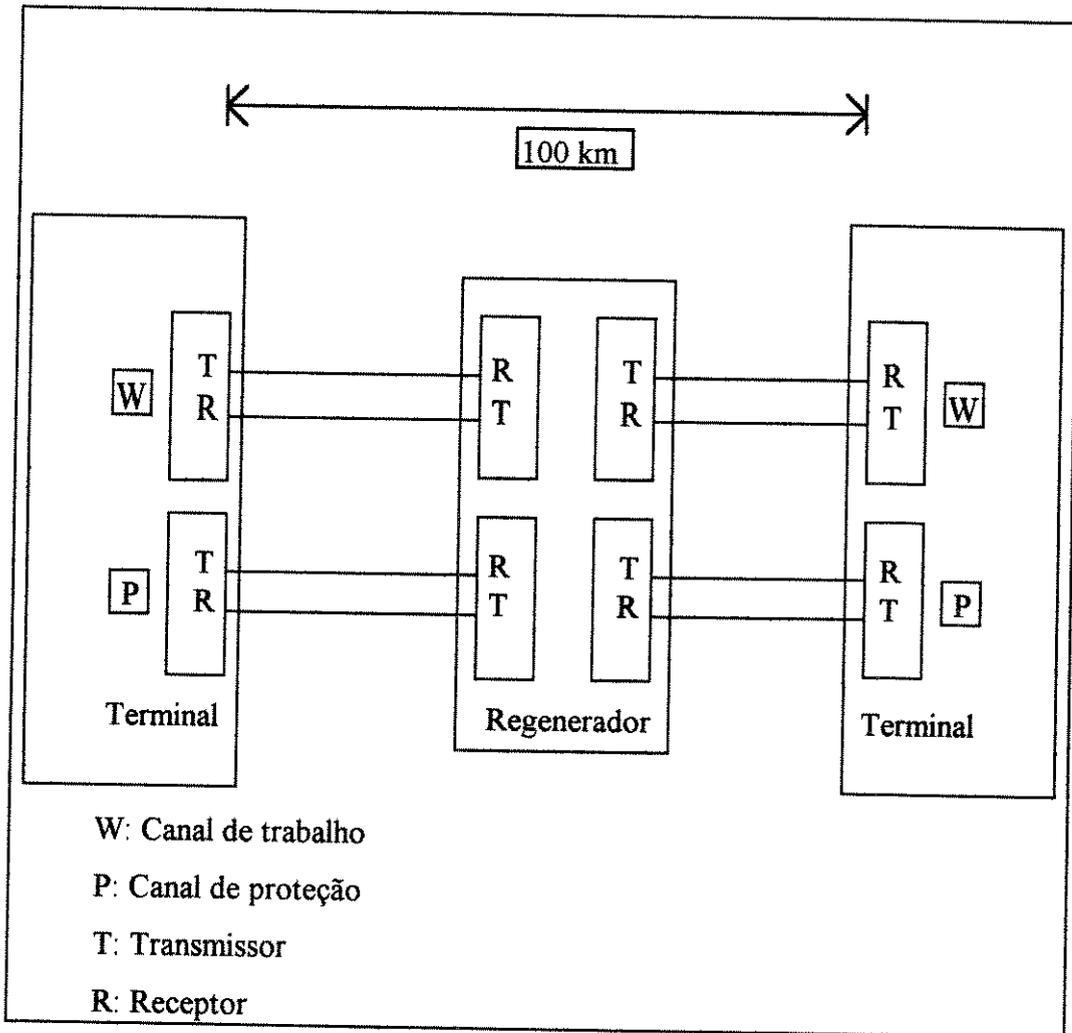


Figura 5: Canal de comunicação com proteção de equipamento 1:1.

Consideraremos a seguir o cálculo de U_e para um canal de comunicação de 100 quilômetros com proteção de equipamento do tipo 1:N, ou seja; para N canais de trabalho temos 1 canal de proteção (Figura 6). Neste caso o fluxo de informação que passa por Y, onde Y é um dos canais de trabalho, falhará se:

1. o canal de trabalho Y e o canal de proteção ficarem simultaneamente indisponíveis, ou
2. o canal de trabalho Y e um dos outros canais de trabalho ficarem simultaneamente indisponíveis.

A indisponibilidade da primeira componente (indisponibilidade do canal de trabalho Y e do canal de proteção):

$$\begin{aligned}
 &= (U_{\text{canal de trabalho Y}} \times U_{\text{canal de proteção}}) = \\
 &= (1,21 \times 10^{-4})^2 = \\
 &= 1,46 \times 10^{-8} = \\
 &= 0,008 \text{ min/ano.}
 \end{aligned}$$

A indisponibilidade da segunda componente (indisponibilidade do canal de trabalho Y e de um outro canal de trabalho) para N = 5:

$$\begin{aligned}
 &= [U_{\text{canal de trabalho Y}} \times (\sum U_{\text{canais restantes}})] \times (1/2) = \\
 &= [(1,21 \times 10^{-4})^2 \times (N-1)] \times (1/2) = \\
 &= 2,93 \times 10^{-8} = \\
 &= 0,015 \text{ min/ano.}
 \end{aligned}$$

O fator (1/2) é devido ao canal de trabalho Y ter igual probabilidade de ser socorrido pelo canal de proteção à frente do outro canal de trabalho com falha.

A indisponibilidade de equipamento U_e para o canal com proteção 1:N é então (N = 5):

$$\begin{aligned}
 U_{\text{canal}} &= 1,46 \times 10^{-8} + 2,93 \times 10^{-8} = \\
 &= 4,39 \times 10^{-8} =
 \end{aligned}$$

= 0,023 min/ano.

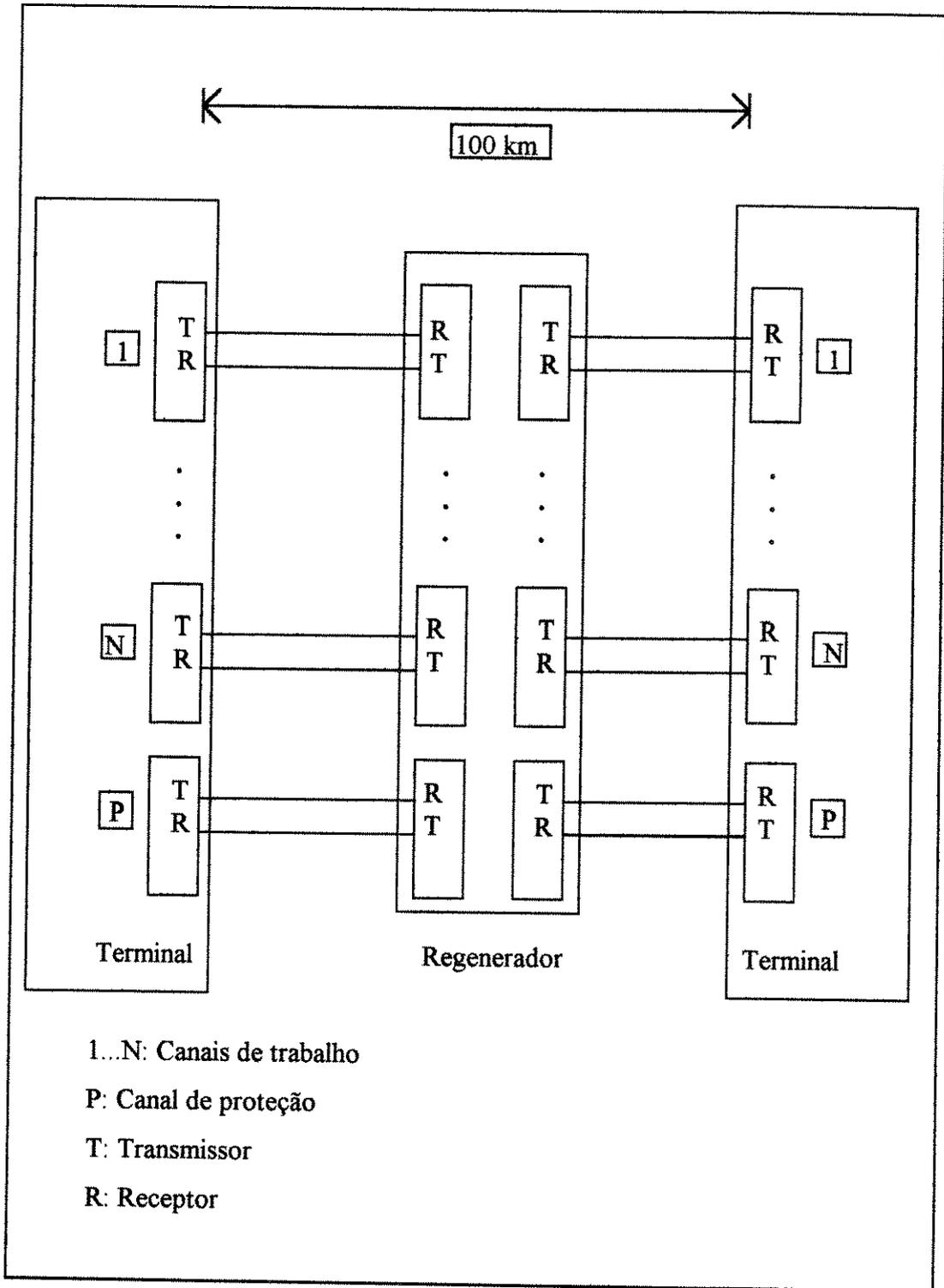


Figura 6: Canal de comunicação com proteção 1:N.

Similarmente, os cálculos apresentados podem ser estendidos a outras arquiteturas de proteção e utilizados em uma rede completa.

3. REDE DE GALERIAS

3. 1. Introdução

A tecnologia de fibras ópticas está rapidamente tornando-se um dos principais componentes das redes de Telecomunicações do futuro [MONMA]. Esta nova tecnologia tem a capacidade de transportar grandes volumes de dados em alta velocidade e em poucos cabos de fibra óptica. Nesta situação existe a possibilidade de graves perdas no serviço em caso de falhas numa central telefônica ou em ligações entre centrais [CARDWELL]. No caso de perda da ligação entre dois centros de fios, o serviço pode ser total ou parcialmente restaurado pelo transporte da demanda entre eles através de uma rota alternativa, se por ventura este tipo de preocupação foi levada em consideração durante o processo de planejamento da rede.

O objetivo a ser alcançado neste capítulo é prover auxílio ao planejador através de uma ferramenta que selecione as galerias que irão receber os cabos de fibra óptica sobre os quais trafegarão os feixes de demandas entre os centros de fios, respeitando o grau de conectividade determinado, por exemplo, a cada um desses feixes.

No caso de redes de telefonia é possível antever que a construção de redes com segurança para todos os centros de fios e conseqüentemente para todas as demandas terá custo muito elevado. Em outras palavras, quanto mais alto for o índice de sobrevivenciabilidade ou quanto mais baixo for o índice de indisponibilidade desejado (Capítulo 2), maior será o custo da rede planejada. Por isso, é importante proceder uma pré-classificação seja dos centros de fios seja das demandas que circulam na rede rotulando-os como especiais ou comuns. Exemplificando para o caso das demandas, serão classificadas como especiais aquelas demandas que possuam importância destacada dentro do sistema seja pela receita auferida por ela, seja por motivos técnicos ou qualquer outra característica que lhe dê o destaque. Elas deverão ter conectividade maior

ou igual a 2, ou seja, terão garantidas a existência de pelo menos dois caminhos arco-disjuntos para roteá-las. Assim, as falhas simples de arco estariam passíveis de serem cobertas. Por outro lado, demandas classificadas como comuns poderão ter à disposição apenas um caminho para o seu roteamento.

Como se vê, uma forma de aumentar a segurança das demandas mais importantes e conseqüentemente aumentar o índice de sobrevivenciabilidade (ou diminuir o índice de indisponibilidade), consiste em parcelá-las e roteá-las fisicamente por caminhos arco-disjuntos. Dois caminhos são arco-disjuntos se não usam um ou mais trechos de galerias em comum. A garantia da existência de caminhos disjuntos entre centros de fios que possuam demanda especial entre eles através da rede de galerias pode ser visto como um problema matemático de selecionar um grafo p -conexo, onde p é o número de caminhos disjuntos que se deseja ter entre os nós do grafo [RELATÓRIO TÉCNICO DA ORDEM DE SERVIÇO N^o 10 — CONTRATO TELESP/UNICAMP N^o 1560/93]. Dito de outra maneira, um grafo é p -conexo se e somente se existirem p caminhos disjuntos entre cada um dos seus pares de nós [SZWARCFITER], [BERGE].

Na realidade a questão de garantir conectividade, no mínimo igual a 2 para centros de fios ou demandas especiais pode trazer confusão dentro do contexto do nosso estudo de redes de fibras. Pedir conectividade 2 para os centros de fios é uma exigência mais forte do ponto de vista topológico. Nesta situação haverão dois caminhos disjuntos entre todos os centros de fios classificados como especiais, mesmo que a demanda entre dois deles quaisquer não tenha importância significativa a ponto de merecer esse aspecto de segurança. Assim, para um centro de fio ser elevado à categoria de especial basta que ele possua uma única demanda que necessite de conectividade maior ou igual a 2.

Neste capítulo apresentaremos um conjunto de algoritmos heurísticos que procuram definir o conjunto de galerias que serão utilizadas para a implantação de fibras ópticas ao final do processo de planejamento da rede, garantindo a conectividade desejada para os centros de fios ou para as demandas que trafegarão pela rede. Com isso, pretende-se obter uma rede cujo aspecto de segurança esteja contemplado no que diz respeito a falha nas rotas consideradas principais e que possua comprimento reduzido.

3. 2. Modelo matemático

O problema em questão consiste na definição das galerias que podem vir a ser utilizadas para a implantação de fibras ópticas, que farão as ligações entre os centros de fios provendo a conectividade desejada para cada par deles.

As galerias candidatas à colocação de fibras são as já existentes na rede com capacidade para instalação de fibra ou as que possuem fibra com disponibilidade e novas galerias que se pretenda construir. É claro que com o baixo custo da fibra óptica, a construção de novas galerias é de modo geral evitada, e os pares de fibra acabam por percorrer um caminho maior pelas galerias já construídas.

Cada ligação tem um custo que é proporcional ao comprimento das galerias associadas. Trabalha-se com um grafo não-orientado $G=(V,E)$, onde V representa o conjunto de nós ou localizações dos centros de fios e E representa o conjunto de arcos ou as possíveis ligações [GONDRAN]. Associado a cada arco (i,j) existe um custo não negativo c_{ij} . Cada nó i tem um inteiro não negativo associado designando a sua conectividade r_i . As restrições de conectividade requerem que exista pelo menos $r_{ij} = \min\{r_i, r_j\}$ caminhos disjuntos entre cada par distinto de nós i e j da rede.

Consideramos apenas nós com conectividade 0, 1 e 2. Os nós com conectividade 2 representam centros de fios de importância relevante chamados especiais. Os de conectividade 1 são os centros de fios classificados como comuns. Os nós com conectividade 0 são os que representam os pontos de passagem, portanto sem nenhum tipo de equipamento instalado ou edificação especial.

Uma rede factível consiste de uma parte duplamente conectada contendo todos os nós especiais, na qual cada par de nós possua pelo menos 2 caminhos disjuntos entre eles e eventualmente nós do tipo 1 ou 0. Os nós comuns restantes são ligados à parte duplamente conectada através de um único caminho.

Dada uma matriz de distância $[d_{ij}]$ e uma matriz de conectividade $[S_{ij}]$, onde cada elemento s_{ij} é a conectividade entre os nós i e j , o problema da rede com segurança constitui-se em: dado um grafo $G = (V, E)$, encontrar um subconjunto dos ramos do conjunto E que possua comprimento mínimo, e que atenda as restrições de conectividade. Em linguagem matemática, temos:

$$\text{Min } \sum_{[i,j] \in E} d_{ij}$$

$$\text{s.a } r_{ij} \geq S_{ij} \quad \forall i, j; i \neq j.$$

Esse tipo de problema pertence a classe dos problemas combinatoriais do tipo NP-Completo [PAPADIMITRIOU]. A dificuldade de resolução desses problemas cresce exponencialmente com a sua dimensão; e como consequência, problemas reais de grande dimensão não podem ser resolvidos exatamente. Assim, passaremos a procurar boas soluções para o problema através de procedimentos heurísticos e não soluções ótimas que podem ser computacionalmente inviáveis.

3. 3. Proposta de solução — heurísticas

A seguir, descreveremos as heurísticas desenvolvidas para auxiliarem na resolução do problema de definição de galerias a serem utilizadas. São propostas três heurísticas: Orelhas Gulosas, Dupla Árvore e Carregamento [CARDWELL], [MELLO, 1995], [MONMA], [ORDEM DE SERVIÇO N^o 10 — CONTRATO TELESP/UNICAMP N^o 1560/93], [WASEM, 1991, October], [WASEM, 1991, December], [WASEM, 1994], [WU, 1990], [WU, 1992]. Das três heurísticas desenvolvidas, a do Carregamento apresenta a característica de contemplar a demanda entre centro de fios desde o início do processo enquanto que no método das Orelhas Gulosas e no método da Dupla Árvore a demanda não é considerada. Os nós do grafo (rede) foram classificados em três grupos: nós que representam centros de fios especiais que deverão ter conectividade maior ou igual a 2; nós que representam centros de fios

comuns que terão conectividade pelo menos igual a 1; e nós de conectividade 0 que correspondem a nós de passagem os quais, na solução final, poderão até estar desconectados da rede. É importante ressaltar que esses três grupos devem estar definidos pelos dados de entrada dos programas computacionais. Nos resultados pode ocorrer que nós de conectividade 1 ganhem caminhos disjuntos durante o processo de ligação dos nós especiais por estarem, por exemplo, no caminho de ligação entre estes.

3.3.1. Método das Orelhas Gulosas

Esse procedimento é rotulado como sendo do tipo guloso, isto é, a cada passo procura tomar a decisão de maior ganho naquele momento.

A construção do método é baseada no procedimento de adição de orelhas, que é descrito resumidamente na Figura 7 e mais detalhadamente a seguir. Inicialmente cria-se um ciclo C , selecionando aleatoriamente um nó especial v e encontrando um outro nó especial w , cujo caminho mínimo P entre w e v é o maior caminho mínimo entre v e todos os outros nós especiais. Seja u o nó especial mais próximo de w pelo caminho P . Encontramos um outro caminho mínimo Q entre u e w sem a utilização dos arcos do caminho P . Note que esse caminho deve sempre existir, do contrário, não haveriam dois caminhos entre dois nós considerados especiais, no caso u e w , o que caracterizaria o problema como infactível, ou seja, sem solução. A união dos caminhos P e Q forma o ciclo inicial C (solução parcial).

O próximo passo é adicionar orelhas repetidamente a essa solução parcial corrente até que todos os nós especiais estejam nessa rede duplamente conectada. Isto é feito pela seleção do nó especial z , fora da solução, cujo caminho mínimo R à solução parcial duplamente conectada é o maior entre todos os nós especiais ainda não incluídos na solução. Encontramos então dois caminhos disjuntos de soma mínima de z até a solução parcial. Note que é obrigatória a existência desses caminhos para a factibilidade do problema. A combinação desse dois caminhos cria uma orelha que é adicionada à

solução (Figura 8). O Método não impede que os vértices v_1 e v_2 sejam distintos, mas este problema pode facilmente ser contornado.

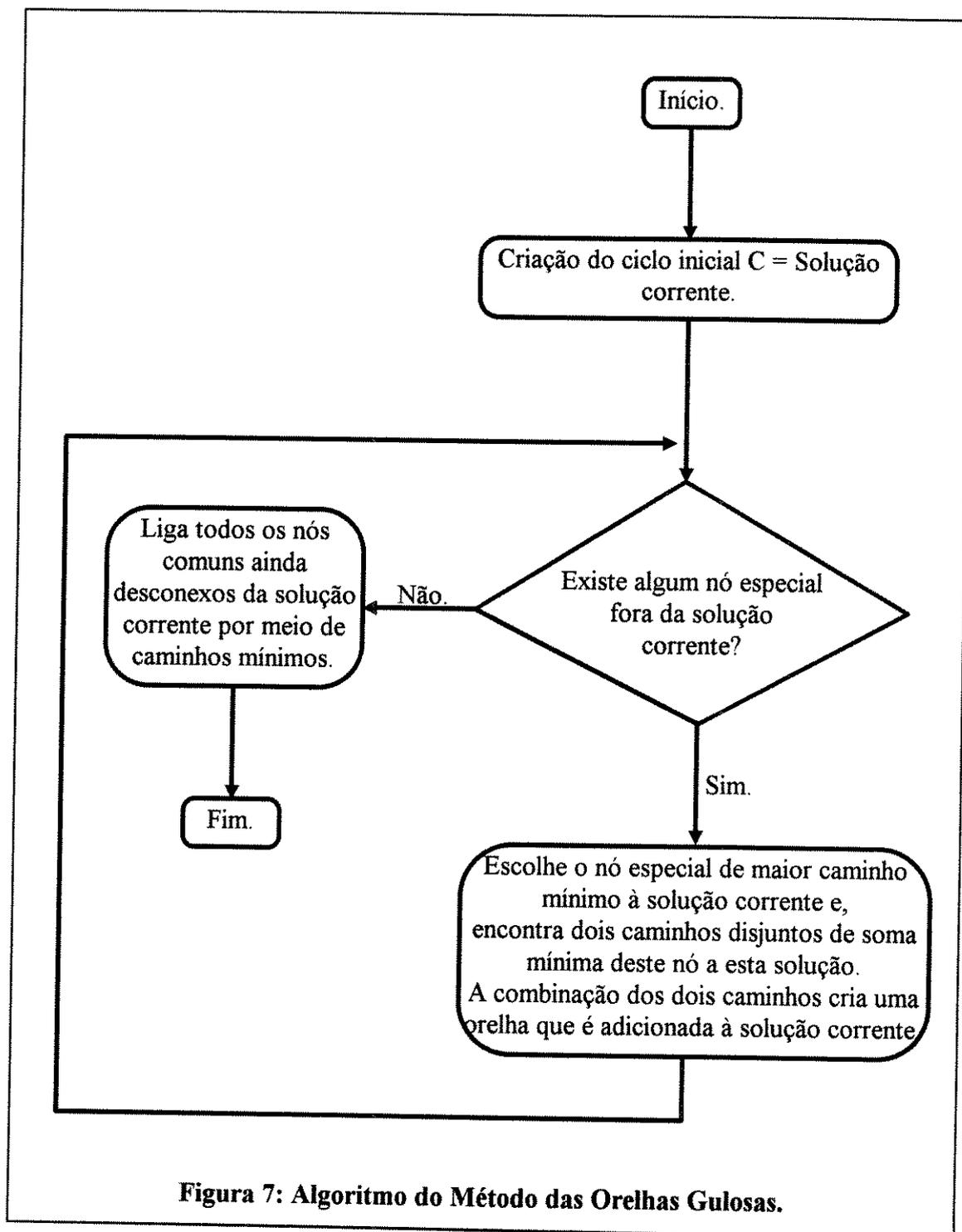


Figura 7: Algoritmo do Método das Orelhas Gulosas.

Quando não houver mais nó de conectividade 2 para ser acrescentado à solução duplamente conectada, podem ainda existir nós de conectividade 1 para serem ligados a rede a fim de torná-la conexa. A ligação de todos os nós de conectividade 1, que permaneceram desconexos da solução atual é realizada por meio de caminhos mínimos.

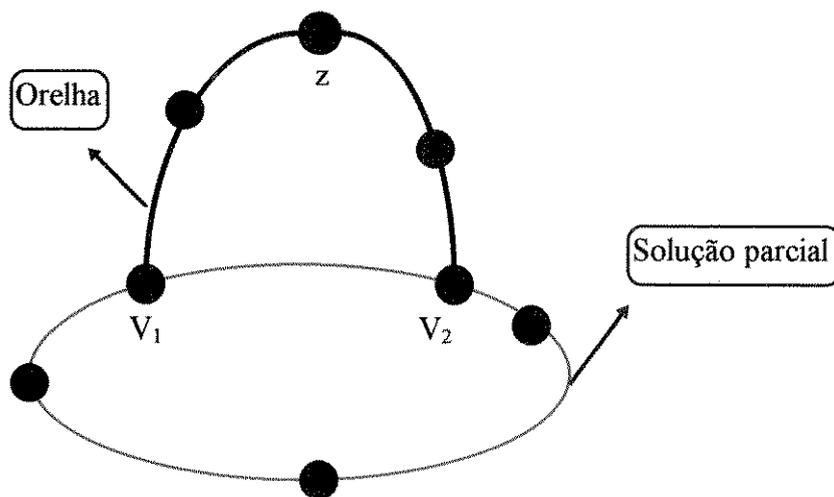


Figura 8: Adição de orelha.

A heurística das Orelhas Gulosas fornece um subconjunto de arcos como solução que possui a característica interessante de não ser nem muito “enxuto” nem muito malhada. Isso o torna um candidato natural à solução inicial. A heurística pode oferecer soluções variadas quando é alterado o nó de conectividade 2 escolhido para ser o nó inicial. Na verdade, geralmente podem ser geradas diversas soluções para a mesma rede fazendo-se esse tipo de alteração.

A rede da Figura 9, doravante denominada Rede de 12, será alvo de nosso estudo: ela tem 12 nós e 20 arcos. Sete nós, que aparecem hachurados, são declarados especiais (de conectividade 2), os demais são nós comuns (de conectividade 1). Os números perto dos arcos representam seus comprimentos em quilômetros.

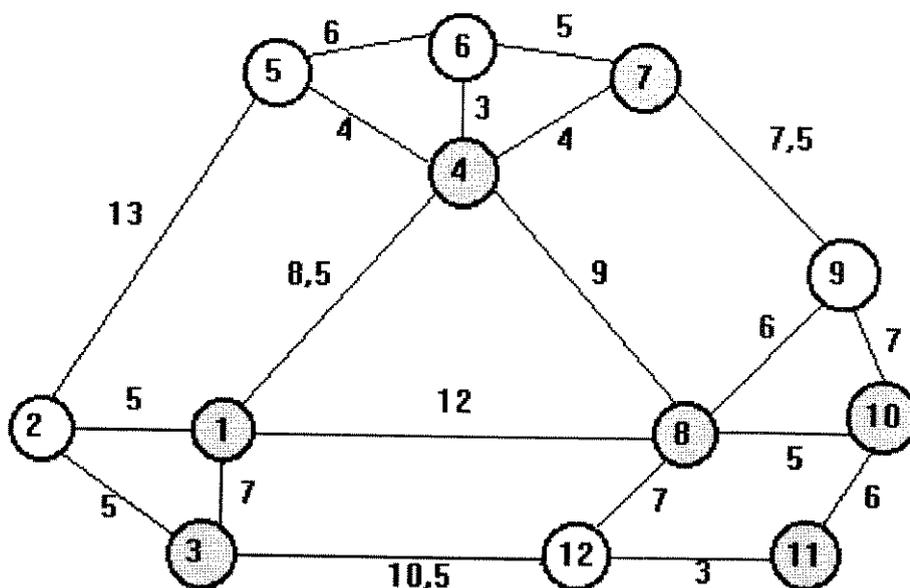


Figura 9: Rede de 12 nós.

A demanda entre dois centros de fios (CFs) distintos corresponde ao número de troncos necessários à comunicação entre eles. A Tabela 1 apresenta os números de troncos das 66 diferentes demandas da Rede de 12, totalizando 728 canais de 2 Mbps.

Faremos uso da Rede de 12 para exemplificarmos o Método das Orelhas Gulosas.

O nó escolhido arbitrariamente como nó inicial para dar início ao procedimento foi o nó 8. Lembramos que esse nó precisa obrigatoriamente ser um nó de conectividade dois. Para dar início ao algoritmo, devemos escolher o nó de conectividade 2 que é mais distante do nó 8, comparando-se os caminhos mínimos entre o nó 8 e todos os outros nós. O resultado é o nó 3 que dista 17,5 quilômetros do nó inicial. Ao procurarmos neste caminho, do nó 3 ao nó 8, o nó de conectividade 2 mais próximo do nó 3 em direção ao nó 8, encontramos o próprio nó 8 como tal, porque não existe outro nó de conectividade 2 no caminho.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	-	17	19	10	14	8	7	5	10	12	8	9
2		-	20	13	11	16	10	7	12	10	10	12
3			-	5	5	9	5	7	10	6	8	9
4				-	25	15	30	15	5	8	3	4
5					-	11	13	6	9	5	7	7
6						-	18	5	10	13	4	7
7							-	5	8	3	4	2
8								-	15	16	25	20
9									-	19	13	18
10										-	17	20
11											-	19
12												-

Tabela 3: Matriz de demandas da Rede de 12.

A seguir devemos proceder à formação do ciclo inicial. Para isso, elevamos artificialmente o custo dos arcos que fazem parte do caminho mínimo entre o nó 8 e o nó 3 para valores muito altos. Ao procurarmos um outro caminho entre esses dois nós com os novos custos para o problema, a distância mínima entre o nó 8 e o nó 3 fica em 19 quilômetros, fazendo o caminho $Q=\{8, 1, 3\}$. Ao sobrepormos as duas soluções de caminhos mínimos encontramos o ciclo inicial $C_{83}=\{8, 1, 3, 12\}$. Aqui vale a pena ressaltar que o nó 12 ganhou a conectividade 2 “de presente” pois esta não era uma restrição do problema.

Começa o processo de adição de orelhas. Os nós de conectividade 2 que ainda não têm a restrição de conectividade atendida são: 4, 7, 10 e 11. Escolhemos o nó de conectividade 2 mais distante do ciclo formado, no caso o nó 7. Determinamos dois caminhos arco-disjuntos de soma mínima a fim de garantir a segurança desejada entre o nó 7 e os demais nós especiais que já fazem parte do ciclo. A orelha (1-4-7-9-8) é

acrescentada ao ciclo inicial; a Figura 10 apresenta a solução biconectada até o momento.

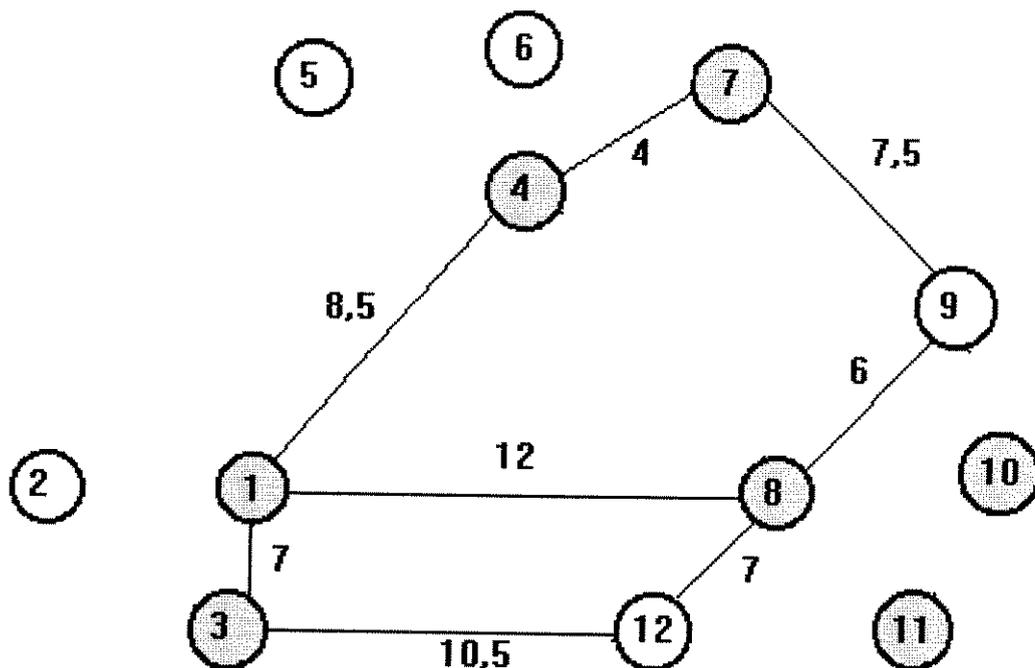


Figura 10: Criação da primeira orelha a partir do nó 7.

Os dois caminhos arco-disjuntos que biconectaram o nó 7 ao ciclo passam pelos nós 4 e 9. Dessa forma o nó 4 já possui também duplo caminho para todos os outros nós especiais que estão presentes a esta altura na solução, o nó 9 ganha “de presente” a dupla conectividade. O procedimento de formação de orelhas é repetido para os outros nós especiais que ainda não estão presentes na solução escolhendo-se primeiramente o nó 10 (o mais distante da solução atual) que se liga aos nós 8 e 9, orelha (8-10-9); e posteriormente o nó 11 que se liga através dos nós 10 e 12, orelha (12-11-10). A Figura 11 apresenta a solução completa biconectada. Os nós comuns 2, 5 e 6 são ligados a solução através do caminho mínimo.

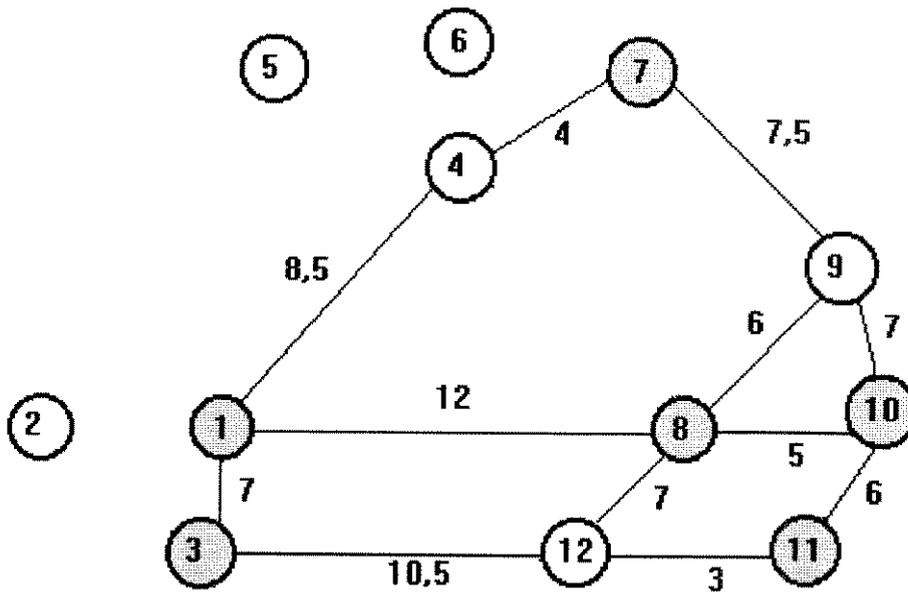


Figura 11: Solução biconectada

A Figura 12 apresenta a solução final atendendo as restrições de conectividade para os centros de fios e de conexidade da rede. Como pode se ver a solução possui arcos que podem ser retirados respeitando-se a conectividade dos nós; por exemplo, poder-se-ia retirar o arco entre os nós 8 e 10 que a solução continuaria a atender as restrições de conectividade. Note também que os nós 9 e 12, embora fossem classificados como comuns, ganharam tratamento de nó especial por estarem no caminho de formação das orelhas.

O comprimento total da solução é de 95,5 quilômetros. Dá para se notar que é possível encontrar uma solução com menor comprimento (67,5 quilômetros) como mostrado na Figura 13. Esta solução seria alcançada usando heurísticas de troca e/ou de retirada. Porém, a heurística de retirada também chamada de “enxugamento” deve ser realizada quando as demandas enfileiradas estiverem sendo contempladas nessa rede, sendo interessante haver de início certo grau de redundância para o seu roteamento.

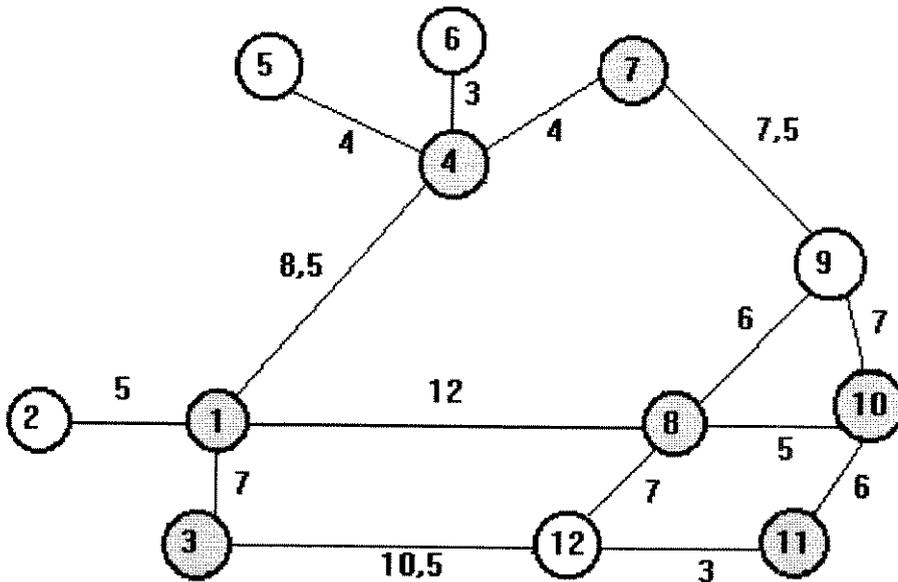


Figura 12: Solução final do Método das Orelhas Gulosas.

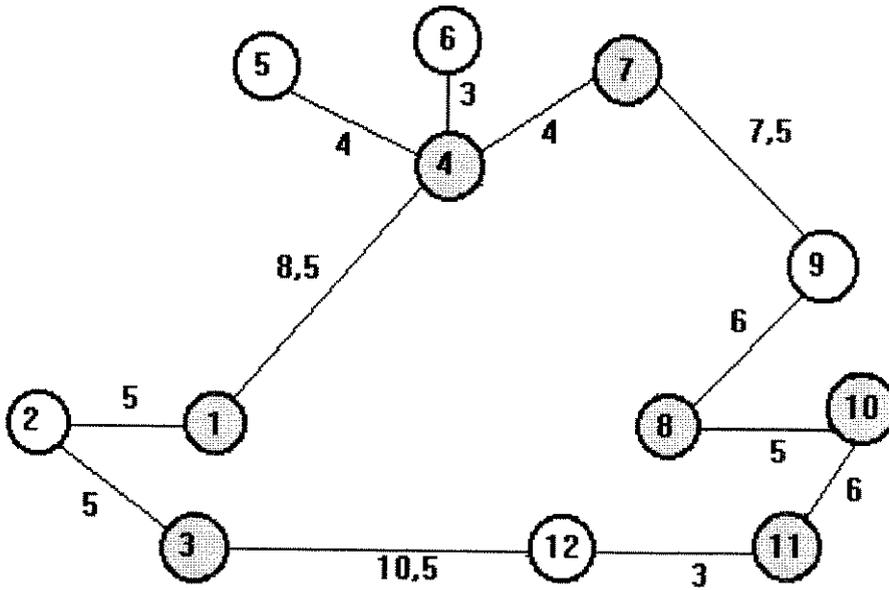


Figura 13: Solução factível de menor comprimento.

3. 3. 2. Método da Dupla Árvore

A idéia básica deste método para criar caminhos disjuntos entre nós que representam centros de fios que foram classificados como especiais na rede, é a de criar duas árvores geradoras de custo mínimo e sobrepor as duas soluções. Árvore Geradora de Custo Mínimo [SZWARCFITER], [BERGE] é um problema clássico da otimização combinatória no qual procura-se identificar um conjunto de arcos que conecta todos os nós do grafo e cujo comprimento total seja mínimo. Neste caso, o custo associado aos arcos representa o seu comprimento. Como procura-se o comprimento mínimo para realizar tal fato, é conhecido da literatura que a solução encontrada é necessariamente uma árvore, ou seja, é um grafo conexo, sem ciclo e que portanto define um único caminho entre os pares de nós. Um aspecto interessante desse problema é que a solução ótima é encontrada através de uma heurística do tipo gulosa, sendo a sua resolução extremamente eficiente do ponto de vista computacional possibilitando a resolução exata de problemas de grande porte.

Quando a primeira árvore é gerada ela cobre todos os nós do grafo e estabelece um único caminho entre os nós da rede, atendendo assim, aos nós que representam centros de fios com conectividade 1. A seguir, os arcos que fizeram parte dessa primeira árvore têm o seu custo majorado com o objetivo de não participarem da segunda árvore geradora. Essa segunda árvore geradora por sua vez, deve cobrir apenas os nós que representam centro de fios especiais e portanto devem ter conectividade 2. Para se realizar essa tarefa, é necessário criar um novo grafo, com características diferentes do original; o seu conjunto de nós é composto apenas pelos nós especiais e, ele deve ser completo, isto é, existem ligações de um nó para todos os outros. O custo dessas ligações é dado pelo caminho mínimo entre os nós. Note que quando se procura o caminho mínimo entre os nós de conectividade 2, os arcos que tiveram seu custo majorado não deveriam parecer novamente na solução. Monta-se uma árvore geradora de custo mínimo sobre esse grafo e sobrepõe-se essa solução à árvore inicial. Dessa forma obtém-se dois caminhos arco-disjuntos entre os nós especiais.

Para finalizar o método, varremos todos os pontos de passagem que estão ligados à solução por apenas um arco retirando este arco da solução.

A Heurística da Dupla Árvore possui um problema que é inerente à sua construção. Quando da construção da primeira árvore geradora é possível que ela utilize todos os arcos que, por exemplo, cheguem a um determinado centro de fio com conectividade 2. Isso pode ocorrer quando esses arcos tiverem comprimento pequeno sendo por isso, os primeiros a serem escolhidos para entrarem na árvore. Nesta situação, quando da formação da segunda árvore geradora pelo menos um desses arcos, cujo custo foi majorado, será necessariamente reutilizado, podendo comprometer as restrições de conectividade. A ocorrência desse tipo de problema é atribuída à utilização de redes pouco densas, isto é, com o número de arcos sendo pouco maior que o número de nós (por exemplo uma vez e meia). A remoção do problema requer trabalhos adicionais, seja nos dados, seja solicitando a intervenção do planejador, etc.

O exemplo da Heurística da Dupla Árvore utilizará a Rede de 12 (Figura 9). Seguindo o algoritmo da heurística devemos inicialmente construir uma Árvore Geradora de Custo Mínimo que está apresentada na Figura 14. Como o custo para o nosso problema está associado ao comprimento dos arcos, essa solução reflete o menor comprimento possível para se obter um grafo conexo e sem ciclos. Seu comprimento é de 57 quilômetros.

A seguir monta-se uma nova Árvore Geradora, desta vez apenas com os nós especiais e com os custos dos arcos que já estão presentes na primeira elevados artificialmente a fim de não aparecerem novamente na solução. Como se pode notar esse tipo de artifício nem sempre é suficiente para garantir o atendimento às restrições de conectividade; tome-se como exemplo o nó 11, ele possui grau 2 na rede original e os seus dois arcos apareceram na primeira Árvore Geradora de forma que é impossível que na segunda Árvore Geradora montada pelo menos um deles não reapareça. Quando este tipo de problema acontece o atendimento às restrições de conectividade pode ficar comprometido. A Figura 15 apresenta a árvore formada. Os arcos que aparecem sem custo são aqueles que já estiveram presentes na primeira árvore e tiveram seus custos majorados.

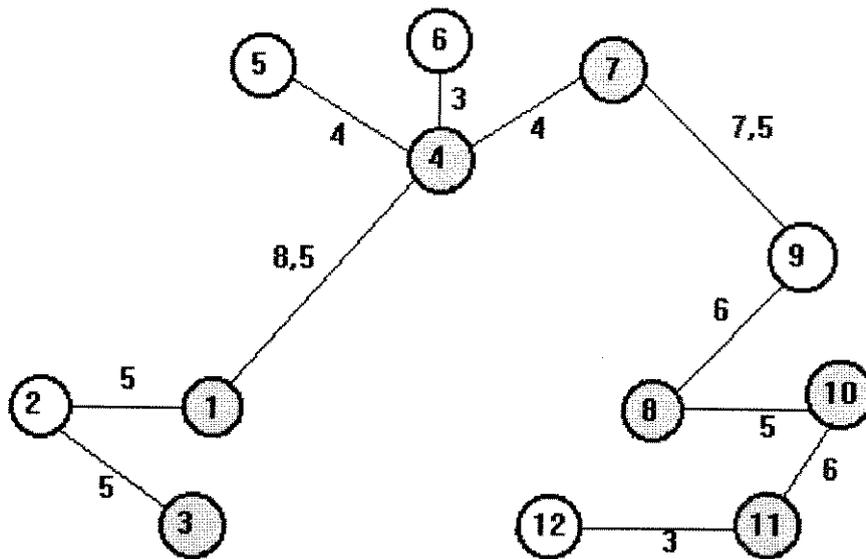


Figura 14: Árvore Geradora de Custo Mínimo inicial.

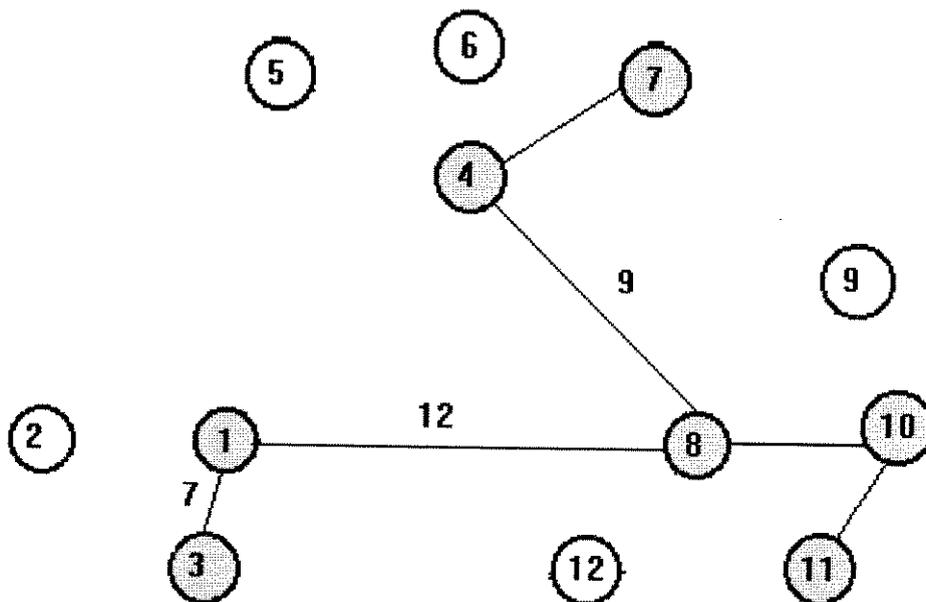


Figura 15: Árvore Geradora de Custo Mínimo entre nós especiais.

A Figura 16 apresenta a sobreposição das duas Árvore Geradoras. O seu comprimento total é de 85 quilômetros. Os arcos que estão destacados são aqueles que

fizeram parte de ambas as soluções. Como pode se ver, as restrições de conectividade não são atendidas para os nós 10 e 11 devido aos problemas já mencionados. Seria possível incorporar procedimentos heurísticos que contornassem este tipo de incômodo. Por exemplo, podemos construir a segunda árvore geradora utilizando somente os nós de ponta ao invés de utilizarmos todos os nós especiais. Nós de ponta são nós especiais que não estão no caminho de qualquer outros nós especiais na primeira árvore geradora. Utilizando este procedimento teremos como solução a rede da Figura 13.

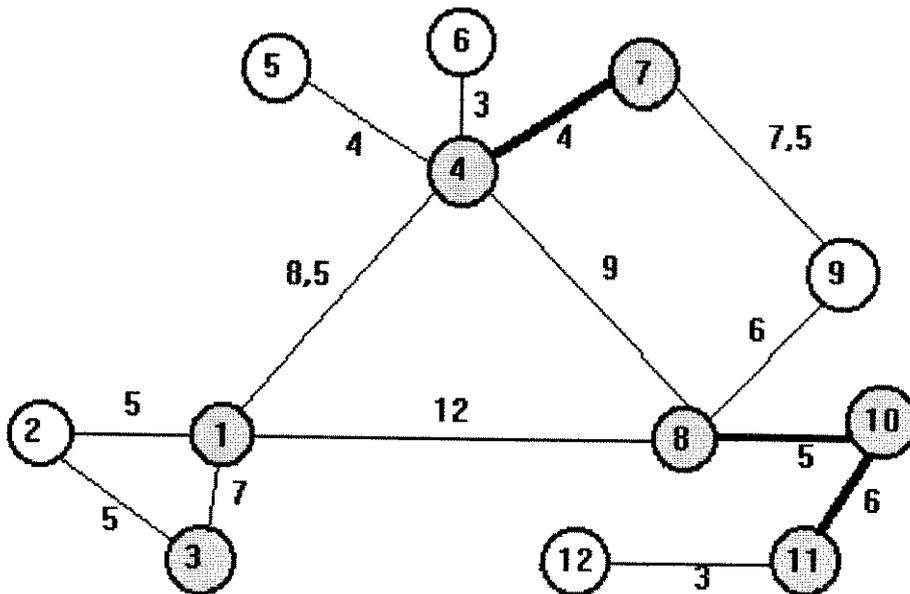


Figura 16: Solução encontrada pelo Método da Dupla Árvore.

3. 3. 3. Método do Carregamento de Demandas

O procedimento de Carregamento de Demandas, procura levar em consideração a demanda entre os centros de fios e a conectividade definida para cada uma delas a fim de roteá-las pelo caminho mínimo, no caso de demandas comuns, e pelos dois caminhos arco-disjuntos de soma mínima no caso de demandas especiais. O método é composto então por dois passos:

Passo 1: Procede-se o carregamento das demandas comuns, de grau 1, através do caminho mínimo entre os centros de fios responsáveis por elas.

Passo 2: Procede-se o carregamento das demandas de grau 2, através de dois caminhos arco-disjuntos de soma mínima entre os centros de fios responsáveis por elas.

Como são roteadas todas as demandas da rede sem um procedimento de agrupamento previamente realizado, é possível, sobretudo em redes pequenas, que a solução encontrada utilize todos (ou quase todos) os arcos da rede. Esse tipo de solução evidentemente não auxilia o planejador na definição das galerias, porque apenas galerias “muito ruins” não estariam sendo utilizadas.

Na verdade, este método demandou uma nova aplicação heurística de retirada de arcos da solução observando algum critério a fim de que a solução pudesse ser “enxugada” na direção desejada. Este “enxugamento” poderia inclusive ser aplicado também nas heurísticas das Orelhas Gulosas e da Dupla Árvore. O critério escolhido foi o de retirar os arcos que tivessem as menores demandas agregadas, procurando-se, dessa forma, intervir o mínimo possível nos melhores caminhos para cada uma delas. A retirada de arcos até o limite dificilmente fornecerá uma solução atraente, devendo o critério de parada estar a cargo do planejador [RELATÓRIO TÉCNICO DA ORDEM DE SERVIÇO Nº 11 — CONTRATO TELESP/UNICAMP Nº 1560/93]. Novamente, vale repetir que as demandas entre os centros de fios não circularão “livremente” pela rede, elas serão enfeixadas e aí sim serão roteadas [BORTOLON]. Muito embora a demanda seja a principal grandeza a ser estudada em problemas de planejamento, e esta foi a principal motivação deste método, no caso da definição do conjunto de galerias a ser utilizado para a colocação de fibras ópticas, a sua utilização não é fundamental, porque estaríamos tratando com a demanda entre centros de fios e não com a demanda enfeixada.

A solução do nosso problema de seleção de galerias através do Método do Carregamento de Demandas para a Rede de 12 é dada na Figura 17. Como pode se

observar a Figura 9 é idêntica à Figura 17, ou seja, nenhum arco foi aliçado da solução. Esse resultado é previsível, pois a rede trabalhada é “cheia” em demandas e pouco densa em arcos.

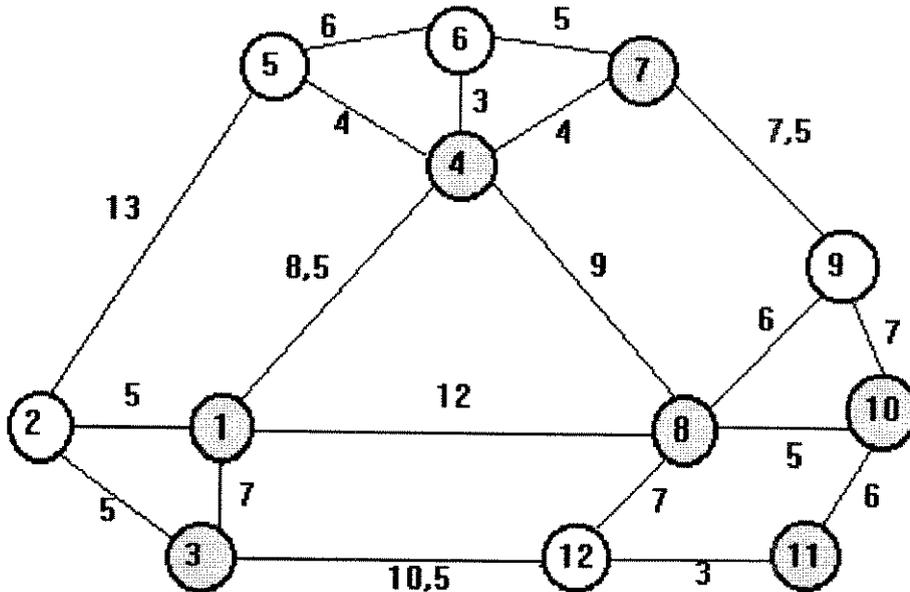


Figura 17: Solução obtida pelo Método do Carregamento de Demandas.

3. 4. Teste computacional na rede da cidade de São Paulo

As três heurísticas foram testadas na rede da cidade de São Paulo. O grafo representativo dessa rede possui 367 nós e 518 arcos (Figura 18). Do conjunto de nós 174 representam centros de fios e 193 pontos de passagem. Dos nós que representam centros de fios 91 possuem demanda, e 17 foram considerados especiais e portanto exigem conectividade 2. Os pontos de passagem foram representados na Figura 18 por pequenos pontos, enquanto os centros de fios sem demanda, ou seja, centros de fios futuros, são representados por pequenos traços. Os centros de fios especiais estão representados por triângulos. Os centros de fios comuns com demanda são representados por círculos. Existem ao todo 2602 demandas. O comprimento total da rede de galerias é de 1049 quilômetros. O programa computacional com os três métodos heurísticos

(Orelhas Gulosas, Dupla Árvore e Carregamento de Demandas) foi executado em microcomputador Pentium 90 Megahertz e 8 Megabytes de memória RAM. Os tempos de execução para a rede de São Paulo foram da seguinte ordem: para o método das Orelhas menos do que 30 segundos, para o Dupla Árvore menos do que 5 segundos e para o Carregamento 40 segundos. A Tabela 4 compara os resultados dos três métodos.

	Total de quilômetros de galerias na solução		Número de galerias na solução		Tempo de execução do programa
	quilômetros	%	número	%	
Orelhas Gulosas	456,8 km	43,5 %	248	47,9 %	< 30 segundos
Dupla Árvore	511,5 km	48,8 %	307	59,3 %	< 5 segundos
Carregamento	776,6 km	74,0 %	403	77,8 %	40 segundos

Tabela 4: Comparação dos Métodos das Orelhas Gulosas, Dupla Árvore e Carregamento de Demandas.

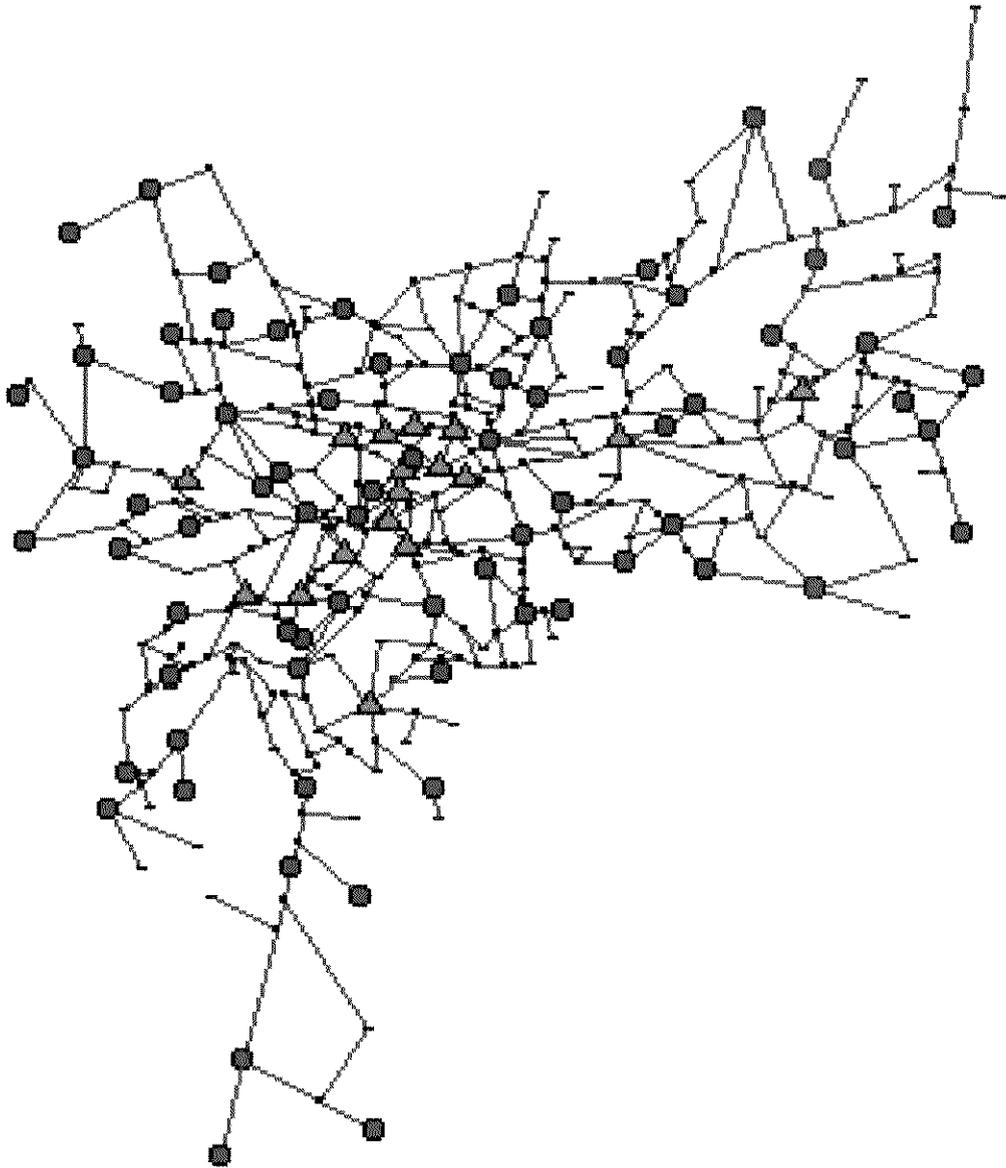


Figura 18: Rede da cidade de São Paulo.

3. 5. Conclusões

Das três heurísticas desenvolvidas a das Orelhas foi a que proporcionou a maior redução no número de galerias, em relação ao total, presentes na solução. A

possibilidade de obter soluções diferentes alterando o nó inicial é uma característica interessante. Além disso, o método sempre apresenta soluções factíveis. A Dupla Árvore também apresenta redução efetiva no número de galerias da solução, trabalha com algoritmos exatos de otimização, e tem um tempo computacional bastante reduzido; porém, pode não atender as restrições de conectividade, fato que demandaria trabalho adicional. A heurística do Carregamento produz uma redução menos significativa no número de galerias presentes na solução pelo fato de trabalhar com todas as demandas entre centro de fios, o que implica num número alto de produtos circulando pela rede que ao terem suas rotas definidas por algoritmos de caminho mínimo acabam por ocupar um subconjunto grande de galerias.

4. INDISPONIBILIDADE: UM ESTUDO DE CASO

4. 1. Introdução

Neste capítulo apresentamos os cálculos de indisponibilidade para a rede de telecomunicações da cidade de Campinas - São Paulo. Campinas é uma cidade de porte médio, com aproximadamente 900 mil habitantes e 170 mil terminais telefônicos. Os resultados mostram como regras de segurança aplicadas a enlaces especiais afetam o valor dos índices de indisponibilidade.

4. 2. A rede de Campinas

A rede da cidade de Campinas corresponde a 16 centros de fios, 20 demandas enfeixadas entre pares de centros de fios, totalizando 20730 canais de 64 kbps que devem ser vinculados por 20 enlaces ponto a ponto. Na Figura 19 mostramos a rede de Campinas. Os triângulos representam os centros de fios considerados especiais, enquanto os círculos maiores representam centros de fios comuns. Os círculos menores são apenas pontos de passagem.

Sobre a rede da Figura 19 pré-selecionamos galerias garantindo a existência de rotas alternativas para centros de fios classificados como especiais, gerando a solução apresentada na Figura 20 na qual serão implantadas as fibras ópticas. Quatro centros de fios foram considerados especiais: CT, CB, CL, CE. Os pontos pequenos na rede (P01, P02,..., P14) são pontos de passagem, portanto sem nenhum tipo de equipamento instalado ou edificação. Os números na figura equivalem à distância em quilômetros entre centros de fios ou pontos de passagem. As outras abreviaturas utilizadas representam os nomes dos centros de fios da cidade de Campinas (Tabela 5).

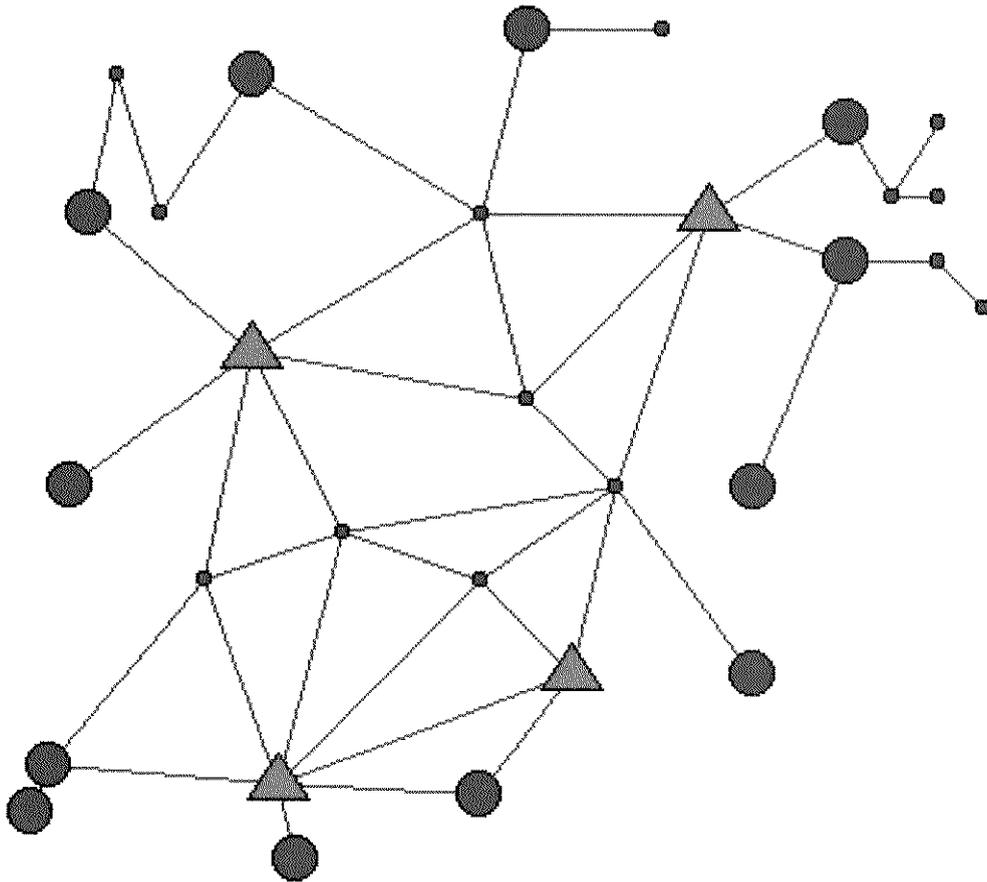


Figura 19: Rede da cidade de Campinas - SP (fora de escala).

Um estudo integrado desta rede, incluindo Comutação e Transmissão, é levado à cabo em [BONATTI]. Parte-se da demanda “bruta”, expressa em Erlang na hora de maior movimento (HMM), e procede-se um entroncamento desta demanda [BUDRI], seguido de um enfeixamento de troncos [BORTOLON].

O algoritmo de enfeixamento define os feixes de troncos ponto a ponto e os equipamentos utilizados para transmitir tais feixes, de forma a minimizar o custo dos equipamentos, explorando a economia de escala existente.

A solução do algoritmo de enfeixamento é o ponto de partida para o cálculo de indisponibilidade que exporemos a seguir. Na Tabela 6, que mostra a solução deste algoritmo, temos o número e o tipo dos equipamentos (622, 155 ou 34 Mbps) a serem

colocados entre os pares de centros de fios, e o número de canais de 2 Mbps utilizados (C2U). Vale lembrar que os equipamentos de 622, 155 e 34 Mbps têm capacidade de 252, 63 e 16 canais de 2 Mbps respectivamente.

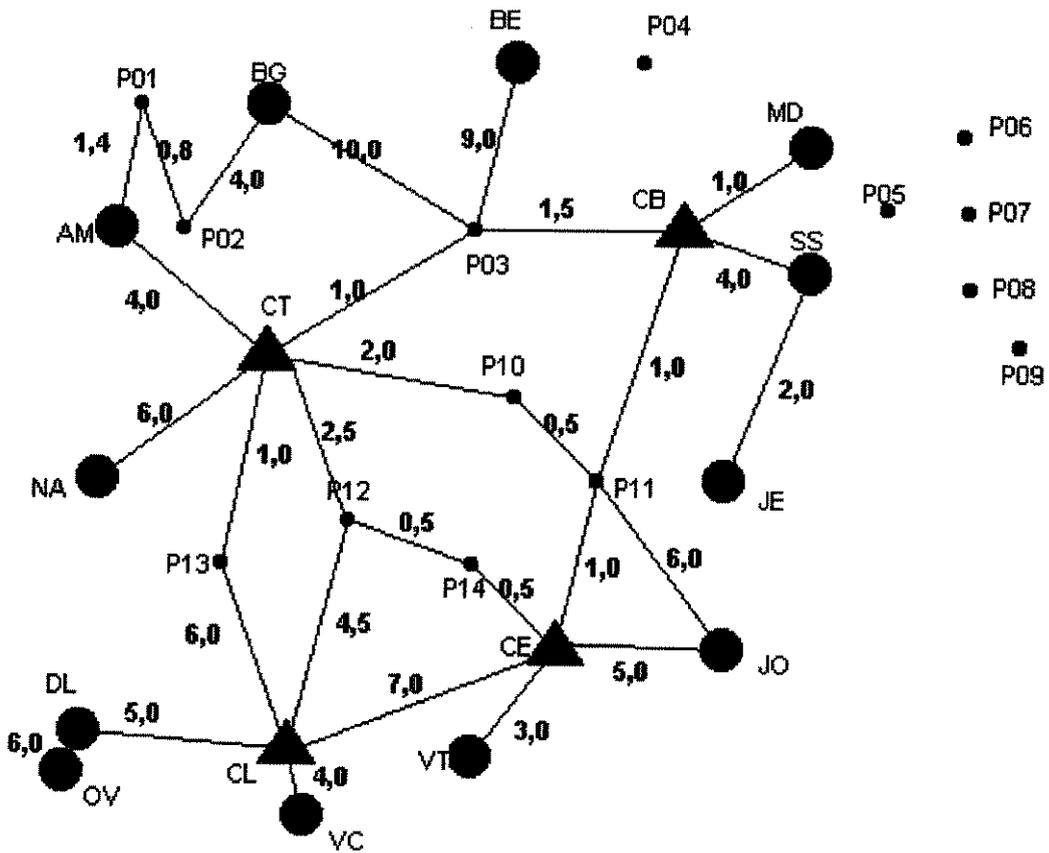


Figura 20: Solução da seleção de galerias para a rede da cidade de Campinas (fora de escala).

ABREVIATURA	CENTRO DE FIO
AM	Amarais
BG	Barão Geraldo
BE	Boa Esperança
CB	Cambuí
CE	Centro
CL	Campos Elisios
CT	Castelo
DL	Dunlop
JE	Joaquim Egídio
JO	Jardim Oliveiras
MD	Monte D'este
NA	Nova Aparecida
OV	Ouro Verde
SS	Souzas
VC	Viracopos
VT	Vila Tupi

Tabela 5: Significado das abreviaturas utilizadas na Figura 20.

Equipamento	tipo	n^o	C2U
CB-CE	155	1	63
CB-CL	34	1	14
CB-JE	34	1	3
CB-MD	34	1	7
CB-SS	34	1	9
CE-BE	34	1	8
CE-CL	155	1	46
CE-NA	34	1	16
CE-VC	34	1	1
CL-DL	34	1	9
CL-OV	34	1	11
CT-AM	34	1	12
CT-BG	155	1	33
CT-CB	155	2	119
CT-CE	622	1	239
CT-CL	155	1	63
CT-JO	155	1	35
CT-NA	34	2	22
CT-VC	34	1	16
CT-VT	34	1	13

Tabela 6: Solução do enfeixamento para a rede da cidade C.

4. 3. Cálculos de indisponibilidade: rede de Campinas

Na Tabela 7 temos o resultado dos cálculos de indisponibilidade para a rede da cidade de Campinas sem nenhuma hipótese de proteção. Na primeira coluna da tabela temos os enlaces entre os centros de fios escolhidos pelo algoritmo de enfeixamento. Nas ligações CT-CB e CT-NA, cujo número de equipamentos recebidos é igual a 2, podemos analisar a falha somente em um dos equipamentos (falha de 50%), ou nos dois (100%). A falha de cabo nestes dois enlaces, assim como para qualquer outro, acarretará sempre a perda de 100% dos troncos, uma vez que as fibras não são colocadas em rotas disjuntas. O tipo do equipamento colocado (622, 155 ou 34 Mbps) é descrito na segunda coluna. A quarta coluna traz o número de canais de 2 Mbps utilizados (C2U) em cada um dos enlaces. O valor do caminho mínimo (CM) em quilômetros percorrido pela fibra, a indisponibilidade de equipamento (U_e), de cabo (U_c) e total (U), em min/ano, são apresentados a seguir. Os valores da perda de tráfego esperada (PTE), que é o produto da indisponibilidade pelo número de canais de 2 Mbps perdidos, estão colocados na última coluna. Da Tabela podemos ver que a soma da coluna C2U é igual a 810. A indisponibilidade média por canal de 2 Mbps (U_m) é de 38 min/ano, enquanto $\Sigma PTE \cong 30729$ canais de 2 Mbps x min/ano (deste valor, aproximadamente 6531 correspondem a enlaces de 34 Mbps).

Para efetuarmos análise da influência da colocação de segurança em enlaces principais, consideramos que os equipamentos de 155 Mbps e 622 Mbps teriam segurança 1:1 com rota disjunta. Isto implica em duplicidade de equipamento para estes enlaces, e na existência de caminhos arco-disjuntos entre os centros de fios.

No caso da existência de dois equipamentos, estamos estudando a segurança 1:2 onde se pressupõe a existência de um equipamento de proteção para os dois de trabalho. O par de fibra óptica que liga o equipamento de proteção é roteado por um caminho arco-disjunto em relação aos dois pares de trabalho.

Os enlaces de 34 Mbps não têm proteção.

Equipamento	tipo	nº	C2U	CM	U _e	U _c	U	PTE
CB-CE	155	1	63	2,0	3,2E+01	3,9E+00	3,6E+01	2258
CB-CL	34	1	14	7,5	3,2E+01	1,5E+01	4,7E+01	653
CB-JE	34	1	3	6,0	3,2E+01	1,2E+01	4,4E+01	131
CB-MD	34	1	7	1,0	3,2E+01	2,0E+00	3,4E+01	237
CB-SS	34	1	9	4,0	3,2E+01	7,9E+00	4,0E+01	358
CE-BE	34	1	8	12,5	3,2E+01	2,5E+01	5,6E+01	452
CE-CL	155	1	46	5,5	3,2E+01	1,1E+01	4,3E+01	1965
CE-NA	34	1	16	9,5	3,2E+01	1,9E+01	5,1E+01	809
CE-VC	34	1	1	9,5	3,2E+01	1,9E+01	5,1E+01	51
CL-DL	34	1	9	5,0	3,2E+01	9,8E+00	4,2E+01	376
CL-OV	34	1	11	11,0	3,2E+01	2,2E+01	5,4E+01	589
CT-AM	34	1	12	4,0	3,2E+01	7,9E+00	4,0E+01	477
CT-BG	155	1	33	10,2	3,2E+01	2,0E+01	5,2E+01	1714
CT-CB 100%	155	2	119	2,5	1,9E-03	4,9E+00	4,9E+00	585
CT-CB 50%	155	1	60	2,5	6,4E+01		6,4E+01	3829
CT-CE	622	1	239	3,5	3,2E+01	6,9E+00	3,9E+01	9270
CT-CL	155	1	63	7,0	3,2E+01	1,4E+01	4,6E+01	2877
CT-JO	155	1	35	8,5	3,2E+01	1,7E+01	4,9E+01	1701
CT-NA 100%	34	2	22	6,0	1,9E-03	1,2E+01	1,2E+01	259
CT-NA 50%	34	1	11	6,0	6,4E+01		6,4E+01	702
CT-VC	34	1	16	11,0	3,2E+01	2,2E+01	5,4E+01	856
CT-VT	34	1	13	6,5	3,2E+01	1,3E+01	4,5E+01	581

Tabela 7: Indisponibilidade da rede da cidade de Campinas sem proteção.

Na Tabela 8 apresentamos os resultados da indisponibilidade com o tipo de proteção descrito acima. Note que para os pares do tipo 155 Mbps ou 622 Mbps existem dois caminhos mínimos (CM-1 e CM-2). No caso de necessidade de caminhos arco-disjuntos eles são escolhidos de forma a possuírem soma mínima. Em termos dos canais C2U, agora 658 deles gozam de proteção e 152 continuam desprotegidos. U_m neste caso é igual a 8 min/ano. Σ PTE = 6827 canais de 2 Mbps \times min/ano (deste valor, aproximadamente 6531 correspondem a enlaces desprotegidos, enquanto 296 correspondem a enlaces que receberam proteção).

Equipamento	tipo	nº	C2U	CM-1	CM-2	U _e	U _c	U	PTE
CB-CE	155	1	63	2,0	6,0	1,9E-03	8,8E-05	2,0E-03	≈ 0
CB-CL	34	1	14	7,5		3,2E+01	1,5E+01	4,7E+01	653
CB-JE	34	1	3	6,0		3,2E+01	1,2E+01	4,4E+01	131
CB-MD	34	1	7	1,0		3,2E+01	2,0E+00	3,4E+01	237
CB-SS	34	1	9	4,0		3,2E+01	7,9E+00	4,0E+01	358
CE-BE	34	1	8	12,5		3,2E+01	2,5E+01	5,6E+01	452
CE-CL	155	1	46	5,5	7,0	1,9E-03	2,8E-04	2,2E-03	≈ 0
CE-NA	34	1	16	9,5		3,2E+01	1,9E+01	5,1E+01	809
CE-VC	34	1	1	9,5		3,2E+01	1,9E+01	5,1E+01	51
CL-DL	34	1	9	5,0		3,2E+01	9,8E+00	4,2E+01	376
CL-OV	34	1	11	11,0		3,2E+01	2,2E+01	5,4E+01	589
CT-AM	34	1	12	4,0		3,2E+01	7,9E+00	4,0E+01	477
CT-BG	155	1	33	10,2	11,0	1,9E-03	8,2E-04	2,8E-03	≈ 0
CT-CB 100%	155	2	119	2,5	3,5	1,2E-07	6,4E-05	6,4E-05	≈ 0
CT-CB 50%	155	1	60	2,5	3,5	5,8E-03	4,9E+00	4,9E+00	295
CT-CE	622	1	239	3,5	3,5	1,9E-03	9,0E-05	2,0E-03	≈ 0
CT-CL	155	1	63	7,0	7,0	1,9E-03	3,6E-04	2,3E-03	≈ 0
CT-JO	155	1	35	8,5	8,5	1,9E-03	5,3E-04	2,5E-03	≈ 0
CT-NA 100%	34	2	22	6,0		1,9E-03	1,2E+01	1,2E+01	259
CT-NA 50%	34	1	11	6,0		6,4E+01		6,4E+01	702
CT-VC	34	1	16	11,0		3,2E+01	2,2E+01	5,4E+01	856
CT-VT	34	1	13	6,5		3,2E+01	1,3E+01	4,5E+01	581

Tabela 8: Indisponibilidade da rede da cidade de Campinas com hipóteses de proteção.

Comparando os resultados obtidos com e sem proteção, podemos fazer várias considerações. No caso do par (CT-CB), que recebeu proteção 1:2, a sua indisponibilidade foi reduzida significativamente, apesar de ainda ser palpável no caso de perda de 50%. Enlaces que tiveram proteção 1:1, como por exemplo CT-CE de 622 Mbps, tiveram indisponibilidade total e PTE próximos a zero. Comparando-se U_m e Σ PTE nos dois casos, observa-se significativa redução nos seus valores, em favor do sistema protegido. Calculando-se U_m para as duas tabelas, mas somente para os pares que receberam proteção na segunda análise (155 Mbps e 622 Mbps); temos:

- caso sem proteção: $U_m = 37$ min/ano,

- caso com proteção: $U_m = 0,5$ min/ano,

demonstrando uma diminuição de aproximadamente 99 % na indisponibilidade do que foi protegido.

4. 4. Conclusões

As proteções utilizadas são efetivas, reduzindo os índices de indisponibilidade a valores praticamente nulos. Para a cidade estudada, U_e e U_c são da mesma ordem de grandeza. U_e tende a ser dominado por U_c quando a distância cresce, como no caso de redes interurbanas. Como esperado, a duplicação é a grande estratégia para diminuição dos índices de indisponibilidade. É preciso porém, estar atento que a duplicação de equipamento sem duplicação de rotas pode não surtir o efeito desejado.

5. SOBREVIVENCIABILIDADE EM REDES DE TELECOMUNICAÇÕES

5. 1. Introdução

Este capítulo exemplifica a metodologia para cálculos de sobrevivenciabilidade em redes de telecomunicações. São estudadas três topologias alternativas para uma rede, projetadas por métodos de otimização. Elas diferem no número de arcos e em como as demandas são roteadas na rede. Os resultados mostram como restrições de segurança aplicadas em demandas especiais aumentam o índice de sobrevivenciabilidade.

Em geral, as falhas são provocadas por eventos não desejados como raio, furacão, terremoto, tornado, incêndio, inundação, tsunami, erro não detectado no *software*, corte de cabo causado pela construção civil, etc. Elas podem ser classificadas em:

- falha de nó — quando ocorre num centro de fios.
- falha de arco — quando ocorre num cabo.

Para efeito do nosso estudo, consideraremos somente falhas nos arcos. Note que a falha de nó pode ser representada como uma falha múltipla em seus arcos incidentes.

Como os diversos tipos de desastre podem ocorrer com frequências diferentes, e afetar a rede em níveis maiores ou menores, a sobrevivenciabilidade da rede em tipos de catástrofes distintas deve ser estudada separadamente. Há muitas maneiras de avaliar a integridade da rede após a ocorrência de uma catástrofe; pode-se, por exemplo, calcular o volume de tráfego sobrevivente, o número de assinantes conectados ou a receita preservada.

Uma vez que proteção está intimamente relacionada com duplicação de rotas e equipamentos, os custos da rede crescem com o aumento do valor desejado de sobrevivenciabilidade, bem como com o volume de tráfego que desejamos proteger. Por isso, é importante proceder uma pré-classificação seja dos centros de fios seja das demandas que circulam na rede rotulando-os como especiais ou comuns. Os especiais terão segurança e os comuns não. Uma demanda será classificada como especial se possui importância destacada; por exemplo, o destaque pode ser conferido pela receita gerada. Demandas especiais deverão ter conectividade maior ou igual a dois, ou seja, garantiremos a existência de pelo menos dois caminhos arco-disjuntos para roteá-las. Assim, tais demandas estariam seguradas contra as falhas simples de arco. Por outro lado, demandas classificadas como comuns terão à disposição apenas um caminho para o seu roteamento.

Inicialmente efetua-se uma redução parcial dos arcos da rede através de uma heurística (Dupla Árvore, Orelhas Gulosas ou Carregamento). A rede remanescente ainda deve ser capaz de garantir a segurança no que foi classificado como especial.

Utilizamos nas nossas considerações de sobrevivenciabilidade a Rede de 12 nós obtida usando a heurística das Orelhas Gulosas (Figura 12), e uma rede árvore (Figura 21). Consideramos as demandas que se originam e terminam em nós especiais como de conectividade 2, e as demais de conectividade 1.

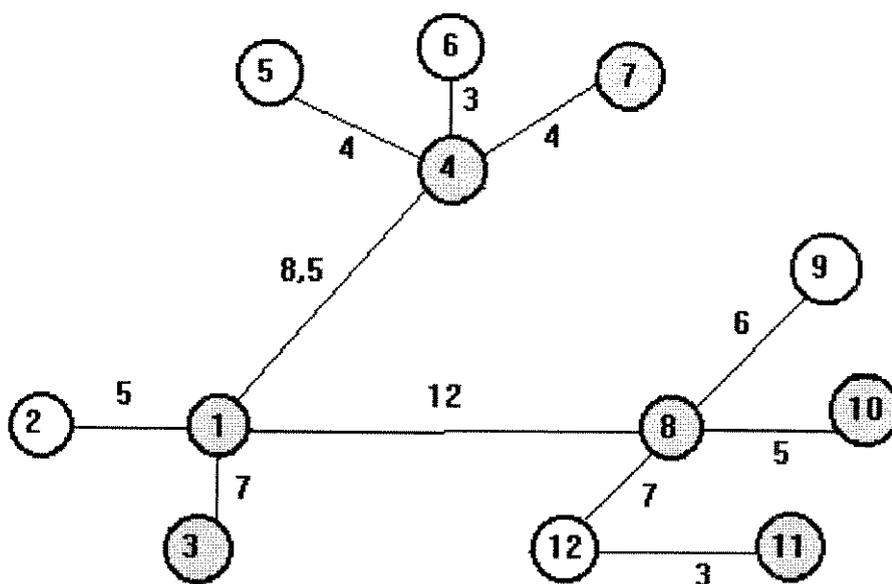


Figura 21: Rede árvore.

5. 2. Sobrevivenciabilidade — estudo de caso

Para simplificação dos cálculos supomos que as falhas nos arcos da rede são independentes. A probabilidade de falha num arco i é proporcional ao seu comprimento l_i , isto é,

$$p_i = P[\text{arco } i \text{ falhar}] = \varepsilon \cdot l_i, \quad 0 < \varepsilon < \frac{1}{\max_i l_i}.$$

A probabilidade de nenhuma falha nos arcos é:

$$p_0 = P[\text{nenhum arco falha}] = \prod_i (1 - \varepsilon \cdot l_i).$$

A constante ε que reflete a intensidade do desastre considerado, é definida como:

$$\varepsilon = \frac{\rho}{\max_i l_i}, \quad 0 < \rho < 1.$$

Adotando os nós 1, 3, 4, 7, 8, 10 e 11 como nós especiais, resulta que 510 troncos são simples e 218 são especiais. Para efetuarmos os cálculos, desenvolvemos um programa computacional.

Consideramos em nossos cálculos $\rho = 0,1$, valor sugerido em [LIEW, 1992] e [LIEW, 1994] para o advento de um furacão. Após obtermos a solução da heurística das Orelhas Gulosas (Figura 12), carregamos a rede de duas formas. Na primeira forma demandas especiais são carregadas por dois caminhos disjuntos de soma mínima, enquanto demandas comuns são carregadas apenas pelo caminho mínimo. Na segunda forma carregamos a rede somente por caminhos mínimos. Chamaremos a rede obtida da primeira e da segunda forma respectivamente de R1 e R2. A rede árvore da Figura 21 será chamada de R3.

Para a rede de 12 nós e 15 arcos, resultante da heurística das Orelhas Gulosas (R1 ou R2), temos $2^{15} = 32768$ eventos possíveis, dos quais 1 corresponde ao funcionamento sem falha e 32767 correspondem a possíveis falhas. Optamos pelo cálculo somente da probabilidade de não haver falha e das probabilidades de falhas simples, duplas e triplas, o que corresponde a mais que 99 % da probabilidade total, abrangendo apenas 576 ($C_0^{15} + C_1^{15} + C_2^{15} + C_3^{15}$) casos dos 32768 possíveis. No caso da rede da Figura 21 (R3), temos $2^{11} = 2048$ combinações possíveis, destas, 11 (C_1^{11}) casos são de falhas simples, 55 (C_2^{11}) de falhas duplas e 165 (C_3^{11}) de falhas triplas. Neste caso também calcularemos a sobrevivenciabilidade somente até falhas triplas, uma vez que apenas estes 231 eventos, mais o evento “não-falha” correspondem a mais que 99 % da probabilidade total (Tabela 9 e Tabela 10).

	<i>P[f. simples]</i>	<i>P[f. duplas]</i>	<i>P[f. triplas]</i>	<i>P[f. quádruplas]</i>
R1 e R2	0,3731	0,1458	0,0349	0,0057
R3	0,3282	0,0834	0,0124	0,0012

Tabela 9: Probabilidades aproximadas de falhas simples, duplas, triplas e quádruplas para as 3 redes analisadas.

	<i>P["não-falha"]</i>	<i>P[universo considerado — até falhas triplas]</i>
R1 e R2	0,4398	0,994
R3	0,5747	0,999

Tabela 10: Probabilidades aproximadas do evento “não-falha” e do universo considerado para as 3 redes analisadas.

Na Tabela 11, mostramos a probabilidade de falhas simples e a sobrevivenciabilidade utilizando a rede da Figura 21 (R3). Na segunda coluna desta tabela temos o número de troncos perdidos na queda do arco. O valor $s[i]$ na quinta coluna é a sobrevivenciabilidade após falha do arco i . Neste caso, o evento “não-falha” tem probabilidade $p_0 = 0.5747$ e corresponde a sobrevivenciabilidade 1. Na Tabela 12 temos o cálculo de sobrevivenciabilidade para falhas simples utilizando a rede da Figura 12 com carregamento das demandas pelos caminhos mínimos. O evento “não-falha” tem probabilidade $p_0 = 0.4398$ e sobrevivenciabilidade 1. Na Tabela 13 fizemos o cálculo utilizando a rede com carregamento das demandas por dois caminhos disjuntos de soma mínima para demandas especiais. Ao analisarmos pela ordem, primeiro a Tabela 11, seguida pela Tabela 12 e Tabela 13, constatamos uma diminuição do número de tronco perdidos (TP), e de forma geral uma melhoria significativa da sobrevivenciabilidade dos arcos ($s[i]$).

<i>Arco</i>	<i>TP</i>	<i>km</i>	<i>P[i]</i>	<i>s[i]</i>
1;2	138	5	0,025	0,810
1;3	103	7	0,036	0,859
1;4	243	8,5	0,044	0,666
1;8	265	12	0,064	0,636
4;5	113	4	0,020	0,845
4;6	116	3	0,015	0,841
4;7	105	4	0,020	0,856
8;9	129	6	0,030	0,823
8;10	129	5	0,025	0,823
8;12	207	7	0,036	0,716
11;12	118	3	0,015	0,838

Tabela 11: Cálculo de sobrevivenciabilidade para falhas simples de arcos (rede da Figura 21).

<i>Arco</i>	<i>TP</i>	<i>km</i>	<i>P_{fij}</i>	<i>s_{fij}</i>
1;2	138	5	0,019	0,810
1;3	102	7	0,027	0,860
1;4	113	8,5	0,034	0,845
1;8	56	12	0,049	0,923
3;12	79	10,5	0,042	0,891
4;5	113	4	0,015	0,845
4;6	116	3	0,011	0,841
4;7	191	4	0,015	0,738
7;9	123	7,5	0,029	0,831
8;9	119	6	0,023	0,837
8;10	28	5	0,019	0,962
8;12	93	7	0,027	0,872
9;10	86	7	0,027	0,882
10;11	81	6	0,023	0,889
11;12	103	3	0,011	0,859

Tabela 12: Cálculo de sobrevivenciabilidade para falhas simples de arcos com carregamento das demandas pelos caminhos mínimos (rede da Figura 12).

<i>Arco</i>	<i>TP</i>	<i>km</i>	<i>P[i]</i>	<i>s[i]</i>
1;2	138	5	0,019	0,810
1;3	65	7	0,027	0,911
1;4	86	8,5	0,034	0,882
1;8	39	12	0,049	0,946
3;12	50	10,5	0,042	0,931
4;5	113	4	0,015	0,845
4;6	116	3	0,011	0,841
4;7	123	4	0,015	0,831
7;9	92	7,5	0,029	0,874
8;9	96	6	0,023	0,868
8;10	10	5	0,019	0,986
8;12	68	7	0,027	0,907
9;10	61	7	0,027	0,916
10;11	44	6	0,023	0,940
11;12	49	3	0,011	0,933

Tabela 13: Cálculo de sobrevivenciabilidade para falhas simples de arcos com carregamento das demandas por dois caminhos disjuntos de soma mínima para demandas especiais (rede da Figura 12).

Para levar a cabo o cálculo da sobrevivenciabilidade deve-se considerar a eventualidade de falhas múltiplas. No caso de falhas duplas (ou triplas) a verificação dos troncos perdidos exige maior cuidado:

- para demanda de conectividade 1 deve-se evitar a possibilidade de contagem dupla (ou tripla), o que ocorreria se ela fosse veiculada nos dois (ou três) arcos defeituosos.
- demanda de conectividade 2 só é interrompida se calhar de dois arcos defeituosos interromperem os dois caminhos arco-disjuntos atribuídos a esta demanda.

Deixa-se de apresentar as tabelas com os cálculos de falhas duplas e triplas devido às suas extensões.

Existem formas alternativas de efetuar cálculos de sobrevivenciabilidade; uma delas é computar a sobrevivenciabilidade para cada uma das 66 demandas. Procedem-se tais cálculos para as duas formas consideradas para carregar a rede da Figura 12 e também uma árvore da Rede de 12 nós (Figura 9) mostrada na Figura 21. Alguns resultados e comentários seguem abaixo:

⇒ **Rede árvore (Figura 21):**

- ◆ pior falha simples: é a falha do arco (1;8) que interrompe 265 troncos, com sobrevivenciabilidade de 63,6 %, e sua ocorrência tem probabilidade 0,0639.
- ◆ pior falha dupla: é a falha dos arcos (1;4) e (8;12) com sobrevivenciabilidade de 43,4 %, e $P[s] = 0,0027$.
- ◆ pior falha tripla: é a falha dos arcos (1;4), (1;8) e (8;12) com sobrevivenciabilidade de 32,6 %, e $P[s] = 0,0003$.
- ◆ demanda menos protegida: a demanda do CF 5 para o CF 11, correspondente a 7 canais de 2 Mbps, tem sobrevivenciabilidade de 74,3 % face a todas as falhas da rede.

- ♦ a esperança matemática, $E[s]$, da sobrevivenciabilidade total da rede é de 0,88 que corresponde a 87,6 troncos perdidos.

⇒ **Rede da Figura 12 carregada pelos caminhos mínimos:**

- ♦ pior falha simples: é a falha do arco (4;7) que interrompe 191 troncos, com $s = 0,738$, e $P = 0,0152$. A melhoria em relação à rede árvore explica-se facilmente: nesta rede há mais arcos e conseqüentemente uma menor concentração de fluxos.
- ♦ pior falha dupla: é a falha dos arcos (1;2) e (4;7) com sobrevivenciabilidade de 56,2 %, e $P[s] = 0,0007$.
- ♦ pior falha tripla: é a falha dos arcos (1;2), (4;7) e (11;12) com sobrevivenciabilidade de 44,4 %, e $P[s] = 2 \times 10^{-5}$.
- ♦ demandas menos protegidas: é a do CF 5 para o CF 11, com $s = 0,783$; a melhoria em relação ao caso anterior se deve à possibilidade de um roteamento mais adequado. Dentre as demandas especiais a menos protegida é a CF 4 - CF 11 com $s = 0,811$
- ♦ esperanças matemáticas: $E[s] = 0,90$ para a rede total; constata-se a perda de 74,4 troncos, em média, sendo

54,3 troncos de conectividade 1, ou seja 7,5 % do total e

20,1 troncos de conectividade 2, representando 2,1 % do total.

⇒ **Rede da Figura 12 carregando as demandas especiais por dois caminhos disjuntos de soma mínima:**

- ♦ pior falha de arco: a falha simples do arco (1;2) é a mais grave, interrompendo 138 troncos de conectividade 1, com $s = 0,810$. O arco (4;7) deixa de ser o pior arco já que algumas demandas que passam por ele estão agora protegidas.

- ◆ pior falha dupla: é a falha dos arcos (1;4) e (4;7) com sobrevivenciabilidade de 62,9 %, e $P[s] = 0,0012$.
- ◆ pior falha tripla: é a falha dos arcos (1;2), (1;4) e (4;7) com sobrevivenciabilidade de 50,8 %, e $P[s] = 5 \times 10^{-5}$.
- ◆ demandas menos protegidas: continua sendo a CF 5 - CF 11 pois sendo de conectividade 1 não mereceu qualquer proteção especial. Entretanto a demanda especial do CF 4 para o CF 11 teve sua sobrevivenciabilidade substancialmente melhorada para $s = 0,958$.
- ◆ esperanças matemáticas: $E[s] = 0,92$ para a rede total com as seguintes perdas:

54,3 troncos de conectividade 1 (7,5 % do total de troncos) e

4,7 troncos de conectividade 2 (0,6 % do total),

mostrando uma diminuição de 77 % nos troncos perdidos de conectividade 2.

5. 3. Conclusões

Neste Capítulo apresentamos uma metodologia de cálculo para estudos de sobrevivenciabilidade em redes de telecomunicações, aplicada a um exemplo com 3 topologias diferentes.

Os índices de sobrevivenciabilidade responderam às questões de segurança colocadas na rede. O roteamento de todas as demandas por caminhos mínimos terá melhor sobrevivenciabilidade quanto maior for a possibilidade de caminhos, pois haverá diminuição do fluxo nos arcos e conseqüentemente na severidade das falhas.

As demandas classificadas como especiais deverão ter proteção do tipo caminho disjunto. Com esse procedimento consegue-se ampliar a sua sobrevivenciabilidade de maneira sensível, garantindo assim serviços essenciais ou de alta rentabilidade para o setor [MELLO, 1996, Agosto].

6. CONCLUSÕES FINAIS

Neste trabalho apresentamos medidas de prevenção para aumentar a confiabilidade das redes de telecomunicações, prevenir o seu isolamento e prover uma restauração rápida dos seus serviços. Desenvolvemos heurísticas de seleção de galerias para a implantação de fibras ópticas, respeitando restrições de confiabilidade impostas pelo planejador. Introduzimos medidas de avaliação do nível de segurança da rede, e analisamos como a duplicação de equipamentos e/ou rotas se refletem nos valores destas medidas. A metodologia utilizada nos cálculos podem ser facilmente estendidas para outras arquiteturas de proteção. No nosso trabalho utilizamos redes reais (como a rede da cidade de Campinas ou da área metropolitana de São Paulo). No caso da sobrevivenciabilidade as proteções propostas para a rede de estudo reduziram o número de troncos especiais perdidos em 77 %. Já a indisponibilidade da rede de Campinas para os enlaces especiais, foi reduzida em 99 % com as proteções propostas. Concluímos ressaltando o fato de como as proteções utilizadas são realmente efetivas e aumentam muito os valores das medidas de segurança (como a sobrevivenciabilidade). A utilidade deste tipo de estudo será cada vez maior, podendo inclusive abordar simultaneamente o custo das proteções.

APÊNDICE A: REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADACHI, Y.; H. OBATA; “Disaster Prevention Measures of NTT for Telecommunications Network Systems”; *IEEE Communications Magazine*; vol. 28, nº 6, pp. 18-24; June, 1990.
- BERGE, C.; *Graphes*; Gauthier-Villars; 1983.
- BONATTI, I.; A. BUDRI; A. YAMAKAMI; E. QUAGLIA; H. TAVARES; R. RIBEIRO; R. FIGUEIREDO; “Planejamento Integrado da Comutação e da Transmissão: Estudo de Caso”; *Revista Telebrás*; vol. 19, nº 63, pp.22-30; Julho, 1996.
- BORTOLON, S.; *Planejamento Otimizado de Redes de Transporte na Hierarquia Digital Síncrona*; Tese de Doutorado; Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, UNICAMP, Campinas - SP, Brasil; Setembro, 1996.
- BROWN, B.; B. WALLACE; “CO outage refuels users’ disaster fears”; *Network World*; July 11, 1988; *apud* J. C. MCDONALD; “Public Network Integrity—Avoiding a Crisis in Trust”; *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*; vol. 12, nº 1, pp. 5-12; January, 1994.
- BUDRI, A. K.; *Encaminhamento de Chamadas Telefônicas: Análise de Desempenho*; Tese de Doutorado; Faculdade de Engenharia Elétrica, UNICAMP, Campinas - SP, Brasil; Outubro, 1994.
- CARDWELL, R. H.; C. L. MONMA; T.-H. WU; “Computer-Aided Design Procedures for Survivable Fiber Optic Networks”; *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*; vol. 7, nº 8, pp. 1188-1197; October, 1989.
- CAREY, J.; “The Keys to the Future — Optoelectronics”; *Business Week*; pp. 53; June, 1994.

- EDMONDSON, G.; "Brave Old World"; *Business Week*; pp. 44-45; June, 1994.
- FITZGERALD, K.; "Vulnerability exposed in AT&T's 9-hour glitch"; *The Institute*; March, 1990; *apud* J. C. MCDONALD; "Public Network Integrity—Avoiding a Crisis in Trust"; *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*; vol. 12, nº 1, pp. 5-12; January, 1994.
- FORMIGONI, J. R. F.; *Rede Externa: Planejamento de Rotas Estratégicas*; Tese de Mestrado; Faculdade de Engenharia Elétrica, UNICAMP, Campinas - SP, Brasil; Setembro, 1995.
- GONDRAN, M; M. MINOUX; *Graphes et Algorithmes*; Eyrolles; 1985.
- KING, N. R.; "Testimony before the United States senate"; February 7, 1989; *apud* J. C. MCDONALD; "Public Network Integrity—Avoiding a Crisis in Trust"; *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*; vol. 12, nº 1, pp. 5-12; January, 1994.
- KOBAYASHI, D. S.; M. TESHAYE; "Availability of bi-directional line switched rings"; *Rep. T1X1.5/91-070*; April, 1991; *apud* M. TO and P. NEUSY; "Unavailability Analysis of Long-Haul Networks"; *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*; vol. 12, nº 1, pp. 100-109; January, 1994.
- LIEW, S. C.; K. W. LU; "A Framework for Network Survivability Characterization"; *Proceedings of the IEEE International Conference in Communications (ICC) 1992*; pp. 316.1; Chicago - IL, USA; June, 1992.
- LIEW, S. C.; K. W. LU; "A Framework for Characterizing Disaster-Based Network Survivability"; *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*; vol. 12, nº 1, pp. 52-58; January, 1994.
- LOBATO, E.; "Telefonia de São Paulo teve 16 panes este ano"; *Folha de São Paulo*; 30 de setembro, 1995.

- LOZANO, A.; “São Paulo registra 4ª pane telefônica”; *Folha de São Paulo*; 29 de setembro, 1995.
- MCDONALD, J. C.; “Public Networks—Dependable?”; *IEEE Communications Magazine*; vol. 30, pp. 110-112; April, 1992.
- MCDONALD, J. C.; “Public Network Integrity—Avoiding a Crisis in Trust”; *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*; vol. 12, nº 1, pp. 5-12; January, 1994.
- MELLO, O. D.; M. C. SILVA; P. D. B. SILVEIRA; “Planejamento da Rede de Galerias para Transmissão”; *Anais do XXVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*; Vitória - ES, Brasil; Novembro, 1995; a aparecer.
- MELLO, O. D.; M. C. SILVA; H. M. F. TAVARES; “Indisponibilidade em Redes de Telecomunicações”; *Anais do TELEMO 96 — VII Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica & XIV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*; vol. 1, pp. 275-280; Curitiba - PR, Brasil; Julho, 1996.
- MELLO, O. D.; M. C. SILVA; H. M. F. TAVARES; “Sobrevivenciabilidade em Redes de Telecomunicações”; *Anais dos Resumos Estendidos do VIII Congresso Latino-Ibero-Americano de Investigación Operativa e Ingeniería de Sistemas & XXVIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*; vol. 3, pp. 1137-1142; Rio de Janeiro - RJ, Brasil; Agosto, 1996.
- MONMA, C. L.; D. L. SHALLCROSS; “Methods for Designing Communications Networks with Certain Two-Connected Survivability Constraints”; *Operations Research*; vol. 37, nº 4, pp. 531-541; July-August, 1989.
- NATIONAL COMMUNICATIONS SYSTEM; “May 8, 1988 Hinsdale, Illinois telecommunications outage”; August 2, 1988; *apud* J. C. MCDONALD; “Public Network Integrity—Avoiding a Crisis in Trust”; *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*; vol. 12, nº 1, pp. 5-12; January, 1994.

- NÊUMANNE, J.; “Pane programada”; *O Globo*; 14 de agosto, 1995.
- ORDEM DE SERVIÇO Nº 10 — CONTRATO TELESP/UNICAMP Nº 1560/93; “Protótipo Funcional para a Definição da Rede de Galerias para Transmissão”; UNICAMP; 1993.
- PAPADIMITRIOU, C. H.; K. STEIGLITZ; *Combinatorial Optimization: Algorithms and Complexity*; Prentice-Hall; Englewood Cliffs - NJ, USA; 1982.
- RELATÓRIO TÉCNICO DA ORDEM DE SERVIÇO Nº 10 — CONTRATO TELESP/UNICAMP Nº 1560/93; “Rede de Galerias para a Transmissão”; UNICAMP; 1995.
- RELATÓRIO TÉCNICO DA ORDEM DE SERVIÇO Nº 11 — CONTRATO TELESP/UNICAMP Nº 1560/93; “Arranjo e Dimensionamento da Rede de Transmissão”; UNICAMP; 1995.
- SEXTON, M.; A. REID; *Transmission Networking: SONET and the Synchronous Digital Hierarchy*; Artech House; 1992.
- SIMS, C; “AT&T acts to avert recurrence of long-distance line disruption”; *New York Times*; November 26, 1988; *apud* J. C. MCDONALD; “Public Network Integrity—Avoiding a Crisis in Trust”; *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*; vol. 12, nº 1, pp. 5-12; January, 1994.
- SZWARCFITER, J. L.; *Grafos e Algoritmos Computacionais*; Campus; 1986.
- TO, M.; P. NEUSY; “Unavailability Analysis of Long-Haul Networks”; *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*; vol. 12, nº 1, pp. 100-109; January, 1994.
- WASEM, O. J.; “An Algorithm for Designing Rings for Survivable Fiber Networks”; *IEEE Transactions on Reliability*; vol. 40, nº 4, pp. 428-432; October, 1991.
- WASEM, O. J.; “Optimal Topologies for Survivable Fiber Optic Networks Using SONET Self-healing Rings”; *Proceedings of the IEEE Global*

Telecommunications Conference — GLOBECOM '91; pp. 57.5.1-57.5.7;
Phoenix - AZ, USA; December, 1991.

WASEM, O. J.; T.-H. WU; R. H. CARDWELL; “Survivable SONET Networks—
Design Methodology”; *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*; vol.
12, nº 1, pp. 205-212; January, 1994.

WU, T.-H.; *Fiber Network Service Survivability*; Artech House; 1992.

WU, T.-H.; S. F. HABIBY; “Strategies and Technologies for Planning a Cost-effective
Survivable Fiber Network Architecture Using Optical Switches”; *IEEE Journal
of Lightwave Technology*; vol. 8, nº 2, pp. 152-159; February, 1990.

ZOLFAGHARI, A.; F. J. KAUDEL; “Framework for Network Survivability
Performance”; *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*; vol. 12, nº
1, pp. 46-51; January, 1994.

APÊNDICE B: BIBLIOGRAFIAS ADICIONAIS

- ARSHAM, H.; D. DAVANI; "A Warm-Start Dual Simplex Algorithm for the Network Shortest Path Problem with Structural Sensitivity Analyses"; *Proceedings of the Third INFORMS Telecommunications Conference*; pp. 263; Boca Raton - FL, USA; March, 1995.
- BALL, M. O.; A. VAKHUTINSKY; P. CHIMENTO; T. TEDIJANTO; L. GUN; "Routing around Faults in ATM Networks"; *Proceedings of the Third INFORMS Telecommunications Conference*; pp. 179; Boca Raton - FL, USA; March, 1995.
- BARREIRAS, A.; L. GOUVEIA; "Minimal Spanning Trees with Hop Constraints between every Pair of Nodes"; *Proceedings of the Third INFORMS Telecommunications Conference*; pp. 260; Boca Raton - FL, USA; March, 1995.
- BARTOLACCI, M. R.; S. D. WU; "A Heuristic for Single Path and Bifurcated Routing of Telecommunication Networks"; *Proceedings of the Third INFORMS Telecommunications Conference*; pp. 261; Boca Raton - FL, USA; March, 1995.
- BIENSTOCK, D.; O. GÜNLÜK; "A Degree Sequence Problem Related to Network Design"; *Networks*; vol. 24, pp. 195-205; 1994.
- CARDWELL, R.; G. BRUSH; "Meeting the Challenge of Assuring Dependable Telecommunications Services in the '90s"; *IEEE Communications Magazine*; vol. 28, nº 6, pp. 40-45; June, 1990.
- CHIU, S. Y.; J. RYAN; X. SUN; "Optimizing Local Telephone Networks with Flexible Routing Schemes"; *Proceedings of the Third INFORMS Telecommunications Conference*; pp. 166; Boca Raton - FL, USA; March, 1995.

- COAN, B. A.; W. E. LELAND; M. P. VECCHI; A. WEINRIB; L. T. WU; "Using Distributed Topology Update and Preplanned Configurations to Achieve Trunk Network Survivability"; *IEEE Transactions on Reliability*; vol. 40, nº 4, pp. 404-416; October, 1991.
- DOULIGERIS, C.; I. J. PEREIRA; "A Telecommunications Quality Study Using the Analytic Hierarchy Process"; *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*; vol. 12, nº 2, pp. 241-250; February, 1994.
- DOVERSPIKE, R.; "Network Management and Planning for Public ATM/SONET Networks"; *Proceedings of the Third INFORMS Telecommunications Conference*; pp. 27; Boca Raton - FL, USA; March, 1995.
- DOVERSPIKE, R. D.; J. A. MORGAN; W. LELAND; "Network Design Sensitivity Studies for Use of Digital Cross-Connect Systems in Survivable Network Architectures"; *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*; vol. 12, nº 1, pp. 69-78, January, 1994.
- FLANAGAN, T.; "Fiber Network Survivability"; *IEEE Communications Magazine*; vol. 28, nº 6, pp. 46-53; June, 1990.
- FORTZ, B.; M. LABBÉ; F. MAFFIOLI; "Minimum-Weight Two-Connected Networks with Bounded Cycle Lengths"; *Proceedings of the Third INFORMS Telecommunications Conference*; pp. 176; Boca Raton - FL, USA; March, 1995.
- GARDNER, L. M.; M. HEYDARI; J. SHAH; I. H. SUDBOROUGH; I. G. TOLLIS; C. XIA; "Techniques for Finding Ring Covers in Survivable Networks"; *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference — GLOBECOM '94*; pp. 1862-1866; San Francisco - CA, USA; 1994.
- GAVISH, B.; "Telecommunications—A Revolution in Progress"; *Operations Research*; vol. 43, nº 1, pp. 29-32; January-February, 1995.

- HERZBERG, M.; S. J. BYE; “An Optimal Spare-Capacity Assignment Model for Survivable Networks with Hop Limits”; *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference — GLOBECOM '94*; pp. 1601-1606; San Francisco - CA, USA; 1994.
- JONGH, A.; M. LABBÉ; M. GENGREAU; “Minimum Cost Expansion and Finding Disjoint Routes in Telecommunication Networks with Two Technologies”; *Proceedings of the Third INFORMS Telecommunications Conference*; pp. 262; Boca Raton - FL, USA; March, 1995.
- JOO, U. G.; J. H. LEE; “An Integrated Restoration Model for Survivable Transmission Networks”; *Proceedings of the 2nd IEEE Malaysia International Conference on Communications*; pp. 971-974; Malaysia; November, 1995.
- KANE-ESRIG, Y.; G. BABLER; R. CLAPP; R. DOVERSPIKE; J. HEALY; D. KOBAYASHI; D. KOLAR; Y. LURYE; R. MARZEC; J. MORGAN; S. STEVENSON; “Survivability Risk Analysis and Cost Comparison of SONET Architectures”; *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference — GLOBECOM '92*; pp. 841-846; Orlando- FL, USA; December, 1992.
- KASHPER, A.; “Network Design Issues for Re-configurable Networks”; *Proceedings of the Third INFORMS Telecommunications Conference*; pp. 196; Boca Raton - FL, USA; March, 1995.
- LASCIO, M. D.; A. GAMBARO, U. MOCCI; “Protection Strategies for SDH Networks”; *Networks*; pp. 387-392; September, 1994.
- LEE, F. C. Y.; G. ANANDALINGAM; “Design of LAN-LAN Network with a Hierarchical Topology”; *Proceedings of the Third INFORMS Telecommunications Conference*; pp. 198; Boca Raton - FL, USA; March, 1995.

- MARBUKH, V.; A. G. GREENBERG; “A State Dependent, Cost-Based Routing and Trunk Reservation Strategy for Multirate Loss Network”; *Proceedings of the Third INFORMS Telecommunications Conference*; pp. 275; Boca Raton - FL, USA; March, 1995.
- MEDHI, D.; “Dynamically Reconfigurable Wide-Area Broadband Networks based on the Virtual Path Concept”; *Proceedings of the Third INFORMS Telecommunications Conference*; pp. 292; Boca Raton - FL, USA; March, 1995.
- MINOUX, M.; “Algorithms for Network Optimization with Survivability Constraints and a New Decomposition Approach”; *Proceedings of the Third INFORMS Telecommunications Conference*; pp. 131; Boca Raton - FL, USA; March, 1995.
- MONMA, C.; “Telecommunications Network Design: New Challenges and Opportunities”; *Proceedings of the Third INFORMS Telecommunications Conference*; pp. 81; Boca Raton - FL, USA; March, 1995.
- MOSTREL, M. M.; “A Transport Span Protection Strategy for Survivability of Interoffice Facilities Telecommunications Networks of Interoffice Facilities Telecommunications Networks”; *Proceedings of IEEE INFOCOM '90: Ninth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*; pp. 81-93; San Francisco - CA, USA; June, 1990.
- MOSTREL, M. M.; “Issues on the Design of Survivable Common Channel Signaling Networks”; *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*; vol. 12, pp. 526-532; April, 1994.
- MOUETTE, D.; *Utilização do Método de Análise Hierárquica no Processo de Tomada de Decisão no Planejamento de Transporte Urbano: Uma Análise Voltada aos Impactos Ambientais*; Tese de Mestrado; Faculdade de Engenharia Elétrica, UNICAMP, Campinas - SP, Brasil; Agosto, 1993.

- NEWPORT, K. T.; P. K. VARSHNEY; "Design of Survivable Communications Networks under Performance Constraints"; *IEEE Transactions on Reliability*; vol. 40, nº 4, pp. 433-440; October, 1991.
- OKANOUE, Y.; H. SAKAUCHI; S. HASEGAWA; "Design and Control Issues of Integrated Self-healing Networks in SONET"; *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference — GLOBECOM '91*; pp. 22.1.1-22.1.6; Phoenix - AZ, USA; December, 1991.
- SAATY, T. L.; *Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process - Vol. VI*; RWS Publications; 1994.
- SAATY, T. L.; "How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process"; *Interfaces*; vol. 24, nº 6, pp. 19-43; November-December, 1994.
- SAATY, T. L.; L. G. VARGAS; *Prediction, Projection and Forecasting*; Kluwer Academic Publishers; 1991.
- SIQUEIRA, E.; "Uma Fábrica de Tecnologia"; *Revista Nacional de Telecomunicações e Telemática*; ano 15, nº 172; Dezembro, 1993.
- SMITH, D. R.; W. J. CYBROWSKI; F. ZAWISLAN; D. ARNSTEIN; A. D. DAYTON; T. D. STUDWELL; "Contingency/Disaster Recovery Planning for Transmission Systems of the Defense Information System Network"; *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*; vol. 12, nº 1, pp. 13-22; January, 1994.
- SOSNOSKY, J.; "Service Applications for SONET - DCS Distributed Restoration"; *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*; vol. 12, nº 1, pp. 59-68; January, 1994.
- SOSNOSKY, J.; T.-H. WU; "SONET Ring Applications for Survivable Fiber Loop Networks"; *Conf. Proceedings ISSLS '91*; 1991.

- SOSNOSKY, J.; T.-H. WU; “SONET Ring Applications for Survivable Fiber Loop Networks”; *IEEE Communications Magazine*; vol. 29, pp. 51-58; June, 1991.
- SUN, X.; Y. QIU; L. LU; “Least Cost Local Access Network Design”; *Proceedings of the Third INFORMS Telecommunications Conference*; pp. 167; Boca Raton - FL, USA; March, 1995.
- SZENTESI, O. I.; “Reliability of Optical Fiber, Cables, and Splices”; *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*; vol. SAC-4, n° 9, pp. 1502-1508; December, 1986.
- TSAI, E. I.; B. A. COAN; M. KERNER; M. P. VECCHI; “A Comparison of Strategies for Survivable Network Design: Reconfigurable and Conventional Approaches”; *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference — GLOBECOM '90*; vol. 1, pp. 301.1.1-301.1.7; San Diego - CA, USA; December, 1990.
- VARVARIGOU, T. A.; S. AHUJA; “A New Model for Fault and Availability in Complex Multimedia Services”; *Proceedings of the Third INFORMS Telecommunications Conference*; pp. 257; Boca Raton - FL, USA; March, 1995.
- VEERASAMY, J.; S. VENKATESAN; J. C. SHAH; “Effect of Traffic Splitting on Link and Path Restoration Planning”; *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference — GLOBECOM '94*; pp. 1867-1871; San Francisco - CA, USA; 1994.
- VERCAUTEREN, D.; P. DEMEESTER; J. LUYSTERMANS; E. HOUTRELLE; “Availability Analysis of Multi-Layer Networks”; *3rd International Conference on Telecommunication Systems*; pp. 483-493; Nashville - TENN., USA; March, 1995.
- WASEM, O. J.; R. H. CARDWELL; T.-H. WU; “Software for Designing Survivable SONET Networks Using Self-healing rings”; *Proceedings of the IEEE*

International Conference in Communications (ICC) 1992, pp. 316.5.1-316.5.7;
Chicago - IL, USA, June, 1992.

WU, T.-H.; M. E. BURROWES; "Feasibility Study of a High-Speed SONET Self-healing Ring Architecture in Future Interoffice Fiber Networks"; *Proceedings of the IEEE MILCOM '90*, pp. 45.4.1-45.4.6; Monterey - CA, USA; October, 1990.

WU, T.-H.; M. E. BURROWES; "Feasibility Study of a High-Speed SONET Self-healing Ring Architecture in Future Interoffice Networks"; *IEEE Communications Magazine*; vol. 28, nº 11, pp. 33-51; November, 1990.

WU, T.-H.; R. H. CARDWELL; M. BOYDEN; "A Multi-Period Design Model for Survivable Network Architecture Selection for SONET Interoffice Networks"; *IEEE Transactions on Reliability*; vol. 40, nº 4, pp. 417-427; October, 1991.

WU, T.-H.; J. C. MCDONALD; T. P. FLANAGAN; K.-I. SATO; "Integrity of public Telecommunications Networks"; *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*; vol. 12, nº 1, pp. 1-4; January, 1994.