

Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

**Estimação da Disponibilidade de Intervalo
em Conexões Ópticas Protegidas
para a Formulação de SLAs**

Autor: Gustavo Da Silva Quitério

Orientador: Prof. Dr. Helio Waldman

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Telecomunicações e Telemática.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Helio Waldman DECOM/FEEC/UNICAMP
Prof. Dr. Gustavo Sousa Pavani CMCC/UFABC
Prof. Dr. Iguatemi Eduardo da Fonseca DCEN/UFERSA

**30 de Outubro de 2009
Campinas, SP - Brasil**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

Q48e	<p>Quitério, Gustavo da Silva Estimação da disponibilidade de intervalo em conexões ópticas protegidas para a formulação de SLAs / Gustavo da Silva Quitério. --Campinas, SP: [s.n.], 2009.</p> <p>Orientador: Helio Waldman. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.</p> <p>1. Comunicações óticas. 2. Comunicações óticas - Proteção. 3. Comunicações óticas - Confiabilidade (Engenharia). 4. Fibras óticas - Sistemas de comunicação. I. Waldman, Helio. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.</p>
------	---

Título em Inglês: Estimation of the interval availability for protected optical connections for SLA formulation

Palavras-chave em Inglês: Optical communications, Optical communications - Protection, Optical communications - Reliability, Fibras optics - communication systems

Área de concentração: Telecomunicações e Telemática

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Iguatemi Eduardo da Fonseca, Gustavo de Sousa Pavani

Data da defesa: 30/10/2009

Programa de Pós Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

Candidato: Gustavo da Silva Quitério

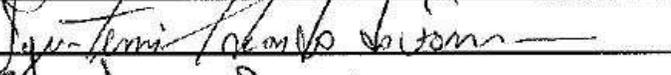
Data da Defesa: 30 de outubro de 2009

Título da Tese: "Estimação da Disponibilidade de Intervalo em Conexões Ópticas Protegidas para a Formulação de SLAs"

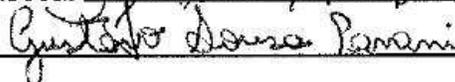
Prof. Dr. Hélio Waldman (Presidente):



Prof. Dr. Iguatemi Eduardo da Fonseca:



Prof. Dr. Gustavo Sousa Pavani:



Resumo

A relação entre os operadores do sistema de telecomunicação e seus clientes é pautada por um contrato de nível de serviço (SLA - *Service Level Agreements*) fixado entre ambas as partes e, o não atendimento a algum dos itens presentes nesse contrato é passível de multa. Dentre as responsabilidades fixadas neste acordo, usualmente se considera a disponibilidade, uma vez que, ao cliente interessa garantias de que a sua conexão estará funcionando adequadamente e, ao operador, limites de responsabilidade no serviço prestado. A disponibilidade pode ser definida como a probabilidade média de o sistema estar operando em um intervalo de observação que tende ao infinito. Entretanto, os SLAs são normalmente fixados para períodos de tempo inferiores a um ano, o que abre espaço para a utilização de uma métrica diferente, a disponibilidade de intervalo. A disponibilidade de intervalo é uma variável aleatória definida como a fração de uma janela de tempo finita em que a conexão permanece operante. Ela é portanto uma métrica mais eficaz para ser utilizada em SLAs. Esta dissertação investiga duas técnicas existentes para a estimação da disponibilidade de intervalo e propõe um novo método que, em determinados cenários, apresenta elevada acurácia e fácil implementação.

Palavras-chave: Redes Ópticas, Habilidade de Sobrevivência, Disponibilidade, Disponibilidade de Intervalo, SLA.

Abstract

The relation between telecommunication system operators and their customers is guided by a service level agreement (SLA) set by both sides, and the non-attendance to some clauses is punishable by a fine. Among the responsibilities set out in this agreement, usually, availability is considered, once that to the customers what matters are warranties that their connection will be working properly and, to the operator the important are the limits of responsibilities over the service. Availability can be defined as the probability that the system is working during an interval of observation which tend to the infinity. However, SLAs are generally set for periods of less than one year, which suggests the use of a different measurement, the interval availability. The interval availability is a random variable defined as the fraction of a finite time window in which the operation remains working. It is, therefore, a more effective measurement to be used in SLAs. This dissertation investigates two existing techniques for estimating the interval availability, and proposes a new method that, in certain scenarios, has high accuracy and easy implementation.

Keywords: Optical Networks, Reliability, Availability, Interval Availability, SLA.

Agradecimentos

Agradeço a todos os meus amigos pela força e paciência durante todo este período.

Aos meus colegas da Faculdade de Engenharia Elétrica, que contribuíram de forma direta e indireta para a realização deste trabalho.

Ao meu orientador, Helio Waldman, pelas idéias e empenho no desenvolvimento da dissertação.

Ao Darli, amigo e grande incentivador deste trabalho.

À minha família que muito me apoiou para que essa dissertação fosse realizada.

À minha querida namorada, pelo incentivo e compreensão.

À Universidade Estadual de Campinas, que forneceu o apoio necessário à realização da pesquisa.

À FAPESP, pelo apoio financeiro.

Sumário

Resumo	i
Abstract	ii
Sumário	iii
Lista de Figuras	vi
Lista de Tabelas	viii
Publicações Associadas à Dissertação	ix
1 Introdução	1
2 Mecanismos de Proteção e Restauração em Redes Ópticas em Malha	4
2.1 Diferenças entre Proteção e Restauração	6
2.1.1 Proteção de Enlace (<i>Span Protection - SP</i>) e Proteção de Caminho Dedicada (<i>Dedicated Path Protection - DPP</i>)	7
2.1.2 Proteção por Ciclos Pré-Configurados (<i>P-Cycles</i>)	8
2.1.3 Proteção de Caminho com Capacidade Compartilhada (<i>Shared Backup Path Protection - SBPP</i>)	9
2.1.4 Proteção por Roteamento em Sub-Grafos (<i>Sub-Graph Routing Protection - SGRP</i>)	10
2.1.5 Proteção por Sub-Caminhos Compartilhados (<i>Short-Leap Shared Protection - SLSP</i>)	11
2.1.6 Restauração de Enlace (<i>Span Restoration - SR</i>) e Restauração de Caminho (<i>Path Restoration - PR</i>)	12
2.2 Parâmetros de Medida da Habilidade de Sobrevivência de Redes	13
2.2.1 Confiabilidade	13
2.2.2 Disponibilidade	14
2.2.2.1 Indisponibilidade (U - <i>Unavailability</i>)	16
2.2.2.2 Failure in Time (FIT)	17
2.2.3 Cálculo da Disponibilidade em Sistemas Série/Paralelo	17
2.2.3.1 Elementos em Série	17

2.2.3.2	Elementos em Paralelo	18
3	Cálculo da Disponibilidade de Conexões Protegidas em Redes Ópticas	20
3.1	Cálculo da Diponibilidade Usando os Modelos Série / Paralelo	21
3.1.1	Conexões sem Proteção	21
3.1.2	Conexões com DPP	21
3.1.3	Conexões com SBPP	21
3.2	Cálculo da Diponibilidade Usando Cadeias de Markov	22
3.2.1	Conexões em Redes Nacionais com Proteção de Falha Simples em Enlace	24
3.2.2	Conexões em Redes Nacionais com Falha em Nó e Proteção de Falha Simples em Enlace	25
3.2.3	Conexões em Redes Continentais com Proteção de Nó e Falhas Simples e Duplas de Enlace	27
3.2.4	Caso Geral	28
4	Cálculo da Disponibilidade de Intervalo de Conexões Protegidas em Redes Ópticas	33
4.1	Cálculo da Distribuição da Disponibilidade de Intervalo	34
4.1.1	Método Numérico	34
4.1.2	Método Simplificado	34
4.1.3	Novo Método	35
5	Resultado das Simulações	38
5.1	Cenário 1A	38
5.2	Cenário 1B	40
5.3	Cenário 2	42
5.4	Cenário 3	44
5.5	Cenário 4a	44
5.6	Cenário 4B	46
6	Conclusão	48
A	Topologias	50
B	Cálculo dos Limitantes	52
C	Apêndice 3: Método Numérico	54
C.1	Uniformização	54
C.2	Propriedades dos processos poissonianos	56
C.3	Cálculo do Tempo Operacional Cumulativo	58
C.4	Cálculo de Ω	61
D	Lista de Acrônimos	66

Referências Bibliográficas

68

Lista de Figuras

2.1	Caminho \overline{AB} formado pelos enlaces \overline{AC} , \overline{CD} e \overline{DB} - linha contínua. Capacidade alternativa representada pela linha tracejada.	5
2.2	Mecanismos de proteção e restauração.	6
2.3	Proteção de enlace e proteção de caminho.	7
2.4	Proteção por Ciclos Pré-Configurados (<i>P-Cycles</i>).	8
2.5	Diferenças entre a proteção de caminho dedicada e compartilhada.	9
2.6	Proteção por roteamento em sub-grafos (<i>sub-graph routing protection</i> - SGRP).	11
2.7	Proteção por sub-caminho compartilhada (<i>short leap shared protection</i> - SLSP).	12
2.8	Elementos dispostos em série.	18
2.9	Elementos dispostos em paralelo.	18
3.1	Compartilhamento de capacidade na SBPP.	22
3.2	Exemplo de compartilhamento e seu modelo de Markov.	23
3.3	Modelo de Markov para uma rede de dimensões nacionais com proteção de nó e proteção de falha simples em enlace.	24
3.4	Modelo de Markov para uma rede de dimensões nacionais com proteção de falha simples em enlace.	26
3.5	Modelo de Markov para um rede de dimensões continentais com proteção de nó e falhas simples e duplas de enlace.	28
3.6	Estado central da cadeia de Markov do estado de falhas da rede.	29
3.7	Estado genérico da cadeia de Markov do estado de falhas da rede.	30
4.1	Cadeia de Markov com dois estados.	36
5.1	Cenário 1A. Risco de não cumprimento da disponibilidade garantida no intervalo de um ano (3x9, 4x9 e 5x9 correspondem à disponibilidade de 0,999, 0,9999 e 0,99999 respectivamente). Simulação representada pela linha contínua, método simplificado pelo degrau contínuo e método novo pela linha pontilhada.	40
5.2	Cenário 1B. Risco de não cumprimento da disponibilidade garantida no intervalo de um ano (3x9, 4x9 e 5x9 correspondem à disponibilidade de 0,999, 0,9999 e 0,99999 respectivamente). Simulação representada pela linha contínua, método simplificado pelo degrau contínuo e método novo pela linha pontilhada.	41

5.3	Cenário 2. Risco de não cumprimento da disponibilidade garantida no intervalo de um ano (3x9, 4x9 e 5x9 correspondem à disponibilidade de 0,999, 0,9999 e 0,99999 respectivamente). Simulação representada pela linha contínua, método simplificado pelo degrau contínuo e método novo pela linha pontilhada. . . .	43
5.4	Cenário 3. Risco de não cumprimento da disponibilidade garantida no intervalo de um ano (3x9, 4x9 e 5x9 correspondem à disponibilidade de 0,999, 0,9999 e 0,99999 respectivamente). Simulação representada pela linha contínua, método simplificado pelo degrau contínuo e método novo pela linha pontilhada. . . .	45
5.5	Cenário 4A. Risco de não cumprimento da disponibilidade garantida no intervalo de um ano (3x9, 4x9 e 5x9 correspondem à disponibilidade de 0,999, 0,9999 e 0,99999 respectivamente). Simulação representada pela linha contínua, método simplificado pelo degrau contínuo e método novo pela linha pontilhada. . . .	47
5.6	Cenário 4B. Risco de não cumprimento da disponibilidade garantida no intervalo de um ano (3x9, 4x9 e 5x9 correspondem à disponibilidade de 0,999, 0,9999 e 0,99999 respectivamente). Simulação representada pela linha contínua, método simplificado pelo degrau contínuo e método novo pela linha pontilhada. . . .	47
A.1	Rede NSFNet.	51
A.2	Rede italiana.	51
C.1	Representação de intervalos de tamanho Y_i	57
C.2	Processo recursivo para o cálculo de $\Omega[n, k]$	64

Lista de Tabelas

- 5.1 Tabela de Conexões - Cenário 1A e 1B 39
- 5.2 Tabela de Conexões - Cenário 2 42
- 5.3 Tabela de Conexões - Cenário 3 44
- 5.4 Tabela de Conexões - Cenário 4A e 4B 46

Publicações Associadas à Tese

1. D. A. A. Mello, G. S. Quitério, H. Waldman, e D. A. Schupke. Specification of SLA survivability requirements for optical path protected connections. In *Optical Fiber Communication Conference and Exposition*, Anaheim, EUA, março 2006.
2. M. S. Savasini, G. S. Quitério, H. Waldman. Compartilhamento Parcial de Banda entre Usuários Não-Cooperativos. In *XXII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBrT 2005)*, Campinas, SP, 2005.
3. H. Waldman, M. S. Savasini, G. S. Quitério. Bandwidth Sharing in Circuit-Switching Networks. In *16th ITS European Regional Conference (ITS 2005)*, Porto, Portugal, 2005.

Capítulo 1

Introdução

O consenso de que empresas capitalistas tem como principal objetivo a geração de dividendos para seus acionistas é real, e as operadoras de telecomunicações não são exceções a esta regra. A venda de serviços de conectividade que é oferecida pelas operadoras busca, basicamente, a geração de lucro.

O lucro pode ser definido como a diferença positiva de receita menos despesa. Uma maneira de se diminuir as despesas seria através da otimização do uso dos recursos disponíveis na rede. Já a receita pode ser alavancada pelo aumento das vendas. Muito se fala na segmentação de mercado como forma de viabilizar este aumento e isso também está presente no ramo das telecomunicações. Enquanto alguns usuários estão interessados somente em capacidade, outros estão mais preocupados com a disponibilidade dos serviços e há ainda, aqueles que se preocupam somente com o valor a ser pago.

Este trabalho considera que os serviços de conectividade oferecidos pelas operadoras baseiam-se em sistemas de comunicação ópticos. Esta hipótese é largamente aceita, tendo em vista que, atualmente, as fibras ópticas se tornaram o meio de transporte dominante dentre os sistemas de telecomunicações de grande capacidade. Teoricamente, a largura de banda de uma fibra óptica estende-se por várias dezenas de THz, grandeza muito maior do que a taxa de transmissão atingível por qualquer sinal elétrico com a tecnologia eletrônica disponível hoje.

As estratégias de diminuição de custos e aumento de receita citadas acima pressupõem o conhecimento das características da rede a ser operada. Saber o comportamento da mesma frente a entrada em operação de uma nova conexão, a capacidade de transmissão desta rede e a habilidade de cada conexão sobreviver a determinados cenários de falha é imprescindível. Mais do que isso, conhecer as características da rede é fundamental na elaboração de contratos de níveis de serviços (SLAs - *service level agreements*). Estes contratos são responsáveis pela definição formal das responsabilidades de cada uma das entidades envolvidas no negócio e a não conformidade em algum dos itens acordados é passível de multa (o que pode impactar diretamente no lucro das empresas). Algumas variáveis comumente utilizadas em SLAs são a capacidade de transmissão e a disponibilidade das conexões.

Este trabalho trata da disponibilidade. A disponibilidade pode ser definida como a probabilidade média de o sistema estar operando em um período de observação que tende ao infinito. Diversos trabalhos propõem estimar a disponibilidade de uma conexão protegida modelando-a por adaptações de esquemas série/paralelo dos elementos constituintes. Entretanto, essa abordagem apresenta modelos muito simplificados para casos de redes com proteção compartilhada. Uma nova abordagem, proposta em [MSW05], utiliza uma cadeia de Markov para modelar o estado das falhas da rede e calcular, a partir disso, o valor da disponibilidade de maneira mais precisa. Contudo, a disponibilidade é uma métrica que leva em consideração um intervalo de observação que tende ao infinito, o que não condiz com os SLAs, que costumam referir-se a uma janela de tempo específica. Surge assim a necessidade de se calcular a disponibilidade de intervalo. A disponibilidade de intervalo é uma variável aleatória definida como a fração de uma janela de tempo finita em que a conexão permanece operante. Sugere-se então a utilização da disponibilidade de intervalo na formulação de SLAs. Além disso, é possível associar a disponibilidade de intervalo garantida ao risco de não cumprimento de contrato.

Esta dissertação investiga duas técnicas existentes para a estimação da disponibilidade

de intervalo e propõe um novo método. As técnicas existentes apresentavam deficiências em termos de complexidade computacional e acurácia (aqui, mutuamente exclusivas). Já o novo método concilia essas duas características em redes com determinadas propriedades desejáveis: redes de porte nacional. Essas propriedades são plausíveis e aparecem em diversos casos práticos.

A dissertação está estruturada da seguinte maneira: o Capítulo 2 discute os sistemas de proteção e restauração mais comumente encontrados na literatura, além de definir parâmetros de medida da habilidade de sobrevivência. O capítulo 3 revisa métodos para o cálculo da disponibilidade de uma rede por meio de cadeias de Markov. O capítulo 4, apresenta os dois métodos de estimação da disponibilidade de intervalo disponíveis na literatura e desenvolve um novo método. O capítulo 5 apresenta as simulações que avaliam os resultados propostos nos capítulos anteriores. Finalmente, o Capítulo 6 conclui o trabalho.

Capítulo 2

Mecanismos de Proteção e Restauração em Redes Ópticas em Malha

Este trabalho trata da ocorrência de falhas em sistema ópticos. Parece natural portanto começá-lo discutindo a periodicidade com que elas acontecem. A referência [Cra93] apresenta o resultado de uma pesquisa realizada nos Estados Unidos realizada entre março de 1992 e fevereiro de 1993. Nela foram registrados 160 cortes em fibras - aproximadamente um corte a cada dois dias. Dos cortes avaliados, aproximadamente 60% ocorreram devido a escavações. As colisões de veículos em postes, derrubando assim a rede de transmissão aérea, são responsáveis por 8% dos cortes. Os erros humanos geralmente decorrentes de procedimentos errados durante manutenções são responsáveis por 7% das interrupções. Tendo em vista a quantidade de informação transportada por uma fibra óptica, não restam dúvidas acerca da importância de se evitar essas falhas. Duas alternativas podem ser adotadas. A primeira seria tornar o sistema praticamente imune a falhas, por exemplo, protegendo todo o trajeto percorrido pela fibra. A segunda alternativa seria tornar o sistema tolerante a

falhas por meio do desenvolvimento de sistemas de proteção e restauração que garantam o funcionamento da rede, mesmo sob a ocorrência das falhas. Neste trabalho, explora-se a segunda alternativa.

Serão apresentadas, a seguir, algumas definições importantes adotadas ao longo do texto. Denomina-se enlace a interconexão entre dois nós adjacentes e caminho óptico o conjunto de enlaces que provê conectividade entre quaisquer nós da rede. Além disso, chama-se capacidade alternativa a capacidade utilizada por um enlace (ou caminho) em situações de falha no seu enlace (ou caminho) original. Considera-se também que os enlaces são bidirecionais.

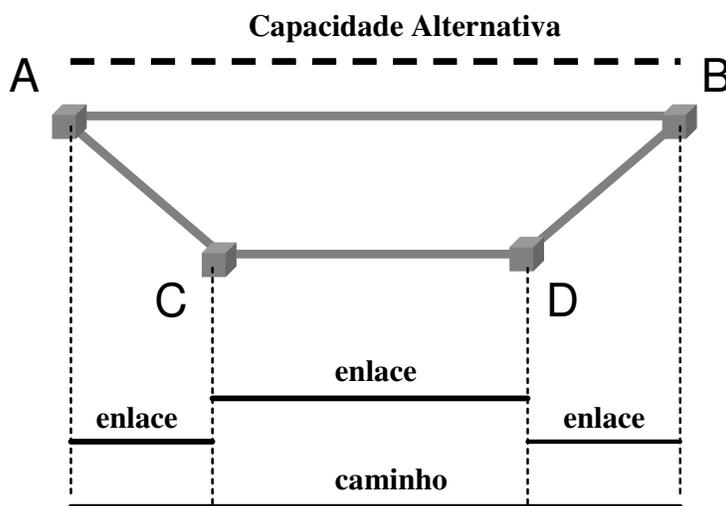


Figura 2.1: Caminho \overline{AB} formado pelos enlaces \overline{AC} , \overline{CD} e \overline{DB} - linha contínua. Capacidade alternativa representada pela linha tracejada.

A Figura 2.1 ilustra as definições de caminho e enlace. O caminho \overline{AB} é formado pelos enlaces \overline{AC} , \overline{CD} e \overline{DB} . Além disso, caso exista algum problema em algum dos enlaces utilizados, a rede possui capacidade alternativa, representada na figura pela linha tracejada. Pode-se afirmar, pois, que um caminho é roteado através de diversos elementos que podem falhar. Portanto, a reserva de capacidade alternativa surge como opção para elevar a disponibilidade de conexões. As próximas seções apresentam as técnicas de proteção e

restauração mais comuns na literatura. A Seção 2.2 apresenta aspectos básicos da engenharia de confiabilidade, onde serão expostos conceitos fundamentais para a compreensão deste trabalho.

2.1 Diferenças entre Proteção e Restauração

Os mecanismos de sobrevivência podem ser divididos em dois grandes grupos, mecanismos de *proteção* e mecanismos de *restauração* [ZM04], [ZM04]. Nos mecanismos de proteção, aloca-se *a priori* capacidade de reserva para ser utilizada em caso de falha, garantindo desta forma a proteção a determinados cenários de falha e diminuindo o tempo de atuação da proteção. O mecanismo de restauração calcula, após a ocorrência da falha, a nova rota a ser utilizada pela conexão. Esse mecanismo não garante a sobrevivência da conexão após a falha, contudo ele apresenta uma melhor utilização dos recursos disponíveis na rede.

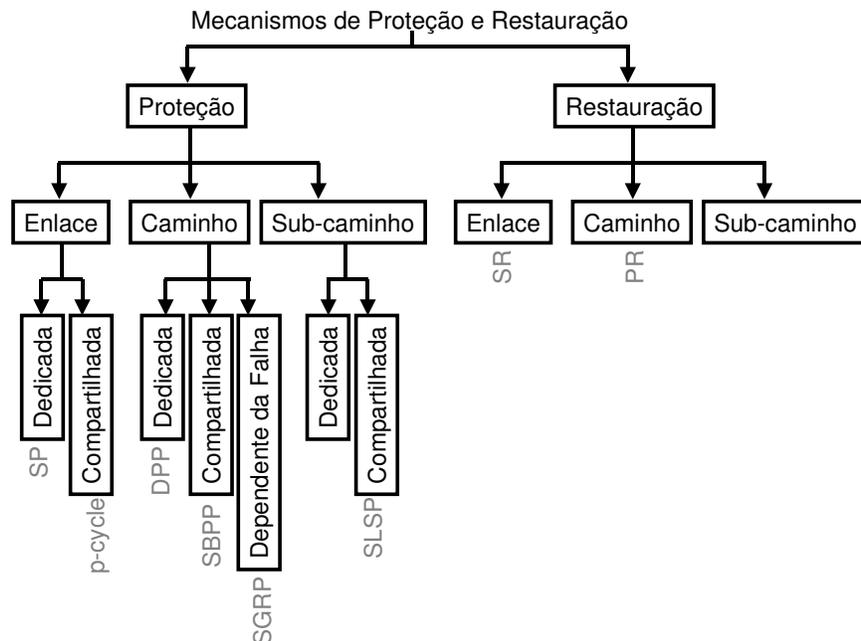


Figura 2.2: Mecanismos de proteção e restauração.

A Figura 2.2 apresenta um resumo dos mecanismos de proteção/restauração mais comuns

na literatura. A descrição sucinta de cada um destes mecanismos é apresentada a seguir.

2.1.1 Proteção de Enlace (*Span Protection - SP*) e Proteção de Caminho Dedicada (*Dedicated Path Protection - DPP*)

Na Figura 2.3, a linha contínua é o caminho de trabalho pelo qual o tráfego é normalmente roteado. A linha pontilhada é o caminho de proteção pelo qual o tráfego é roteado em caso de falha em algum ponto do caminho de trabalho. A Figura 2.3a apresenta um exemplo de proteção de enlace. Este mecanismo de proteção age somente nos nós adjacentes ao enlace que apresenta falha, tornando-os responsáveis por re-rotear o tráfego. Os demais enlaces permanecem inalterados. Já na proteção de caminho (Figura 2.3b), são os nós de origem e destino do tráfego os responsáveis por este re-roteamento, ou seja, sempre que ocorre uma falha, o tráfego é redirecionado para um caminho disjunto, conhecido como caminho de proteção.

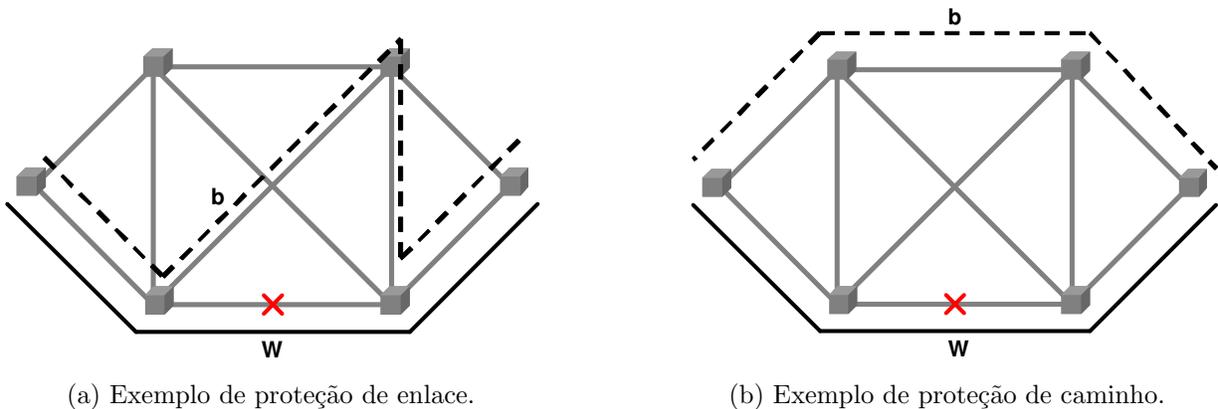


Figura 2.3: Proteção de enlace e proteção de caminho.

A DPP (*Dedicated Path Protection*) pode ser $1 + 1$ (diz-se um mais um) no caso de os caminhos de trabalho e proteção transportarem simultaneamente a mesma informação; ou $1 : 1$ (diz-se um para um), no caso de o caminho de proteção transportar dados apenas se o caminho da trabalho falhar. O esquema $1 + 1$ possui um tempo de reparo menor, sendo

necessário somente comutar o recebimento da informação no nó de destino. No esquema 1 : 1 o caminho de proteção (ocioso em situações normais de operação) pode transportar tráfego de baixa prioridade, aproveitando melhor os recursos da rede. O tráfego de baixa prioridade é descartado na ocorrência de uma falha, para dar lugar ao caminho de trabalho.

2.1.2 Proteção por Ciclos Pré-Configurados (*P-Cycles*)

Pode-se pensar nos *p-cycles* como um anel bidirecional com comutação de linha que, além de proteger seus enlaces, provê proteção adicional a enlaces de apoio (*straddling links*). Enlaces de apoio são rotas que não fazem parte do *p-cycles* mas que possuem suas extremidades sobre ele.

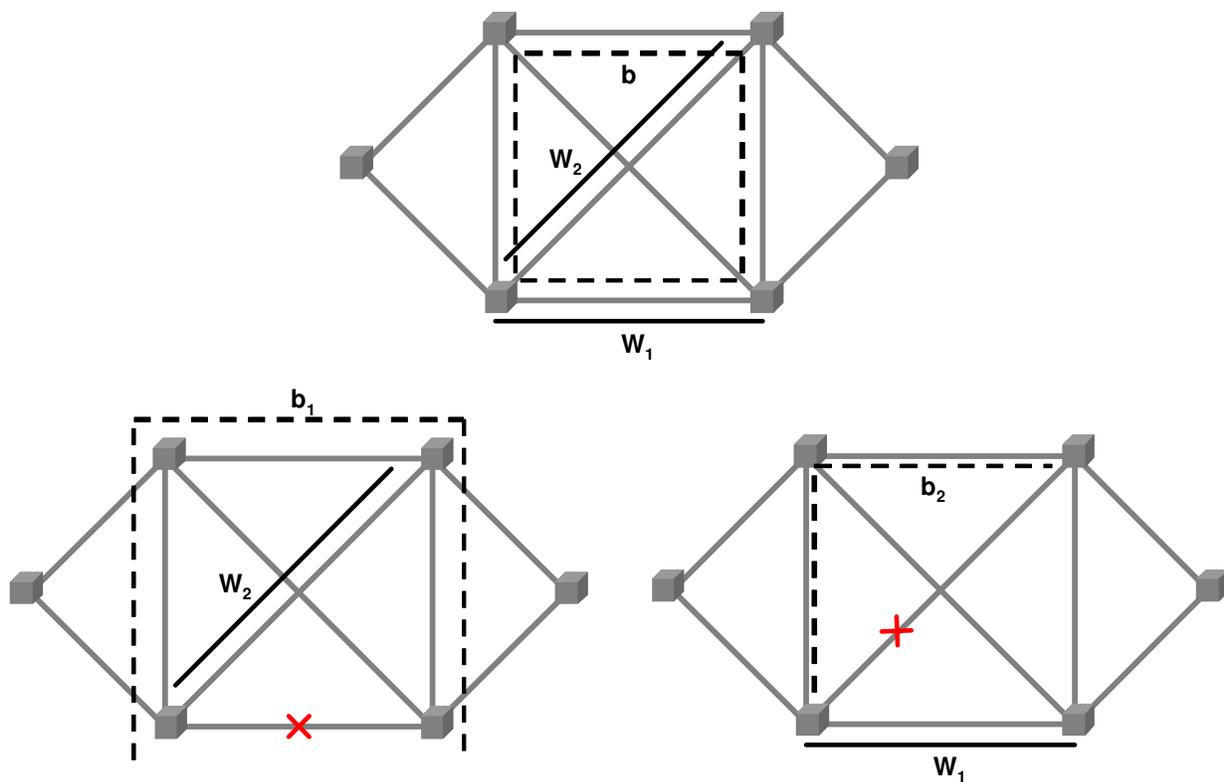


Figura 2.4: Proteção por Ciclos Pré-Configurados (*P-Cycles*).

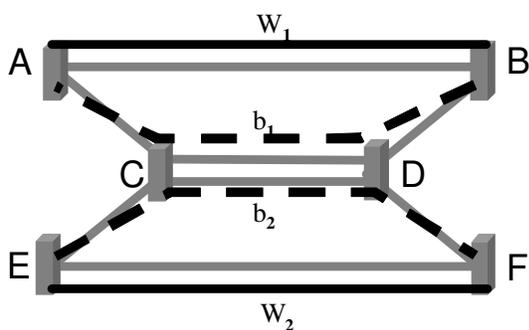
A Figura 2.4 apresenta um exemplo de proteção em *p-cycles*. Nota-se que, ocorrendo

uma falha num enlace pertencente ao anel principal (caminho w_1), o tráfego é re-roteado. Ocorrendo uma falha em um enlace de apoio (caminho w_2), utiliza-se a capacidade de sobrevivência do anel para transpor a falha.

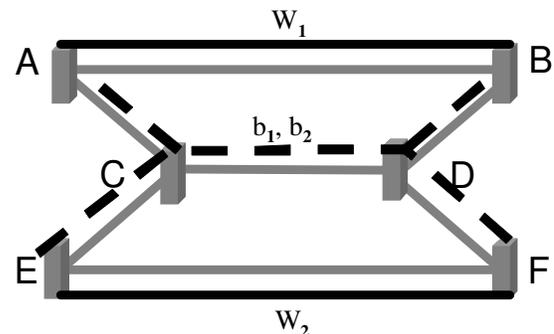
2.1.3 Proteção de Caminho com Capacidade Compartilhada (*Shared Backup Path Protection - SBPP*)

A Figura 2.5 procura exemplificar as diferenças entre a proteção de caminho com capacidade compartilhada e a proteção de caminho dedicada. Na proteção de caminho dedicada, Figura 2.5a, há exclusividade no uso da capacidade alternativa, ou seja, em caso de falha no caminho de trabalho W_1 , utiliza-se a capacidade alternativa b_1 sem prejuízo a capacidade alternativa b_2 que continua livre para atender a possíveis falhas em W_2 . Tem-se portanto um elevado valor de disponibilidade.

Na SBPP, representada pela figura 2.5b, ao ocorrer uma falha no caminho de trabalho W_1 , a capacidade alternativa é alocada e não pode mais ser utilizada em caso de falha em W_2 . Este mecanismo visa melhorar o aproveitamento dos recursos disponíveis da rede por meio do compartilhamento dos recursos de proteção. Os recursos compartilhados podem ser um caminho inteiro ou somente alguns enlaces.



(a) Exemplo de proteção de caminho dedicada.



(b) Exemplo de proteção de caminho com capacidade compartilhada.

Figura 2.5: Diferenças entre a proteção de caminho dedicada e compartilhada.

Para viabilizar esse esquema, os caminhos de proteção devem ser disjuntos sempre que estiverem protegendo caminhos de trabalho que compartilhem recursos de algum grupo de enlaces com risco compartilhado (SRLG - *Shared Risk Link Group*). A SRLG define um conjunto de enlaces que serão afetados em caso de falha de um determinado elemento de rede (nó ou fibra). Enlaces que dividem o mesmo cabo, ou caminhos roteados pelo mesmo nó, são exemplos de grupos com risco compartilhado, uma vez que o corte de um cabo, no primeiro caso, ou a falha de um nó, no segundo caso, poderão afetar mais de uma conexão.

O Capítulo 3 voltará a tratar dos esquemas de proteção SBPP.

2.1.4 Proteção por Roteamento em Sub-Grafos (*Sub-Graph Routing Protection - SGRP*)

A proteção por roteamento em sub-grafos consiste em representar a topologia da rede por um grafo em que as arestas são os enlaces e os vértices são os nós da rede. Uma falha simples é representada por um sub-grafo sem a aresta (enlace) com falha. De posse desse novo sub-grafo, faz-se o re-roteamento do caminho afetado, garantindo assim a reserva da capacidade de proteção contra essa falha. Ao se estender esse algoritmo para as demais falhas simples passíveis de ocorrerem na rede, pode-se garantir a reserva de capacidade contra todos os cenários de falha simples. A SGRP também pode ser utilizada para a reserva de capacidade contra falhas duplas, triplas ou de maior ordem, bastando para isso retirar do sub-grafo, que representa a rede, o número de arestas correspondentes à quantidade de falhas que se deseja analisar. Em casos de falhas duplas, por exemplo, retiram-se dois enlaces para se formar um sub-grafo. A Figura 2.6 ilustra a SGRP. O caminho de trabalho w é representado pela linha contínua, e a capacidade alternativa necessária para garantir o funcionamento da conexão em cenários de falha simples, pelas linhas pontilhadas. Essa capacidade é resultante dos três sub-grafos que representam as falhas em cada um dos três enlaces percorridos por w .

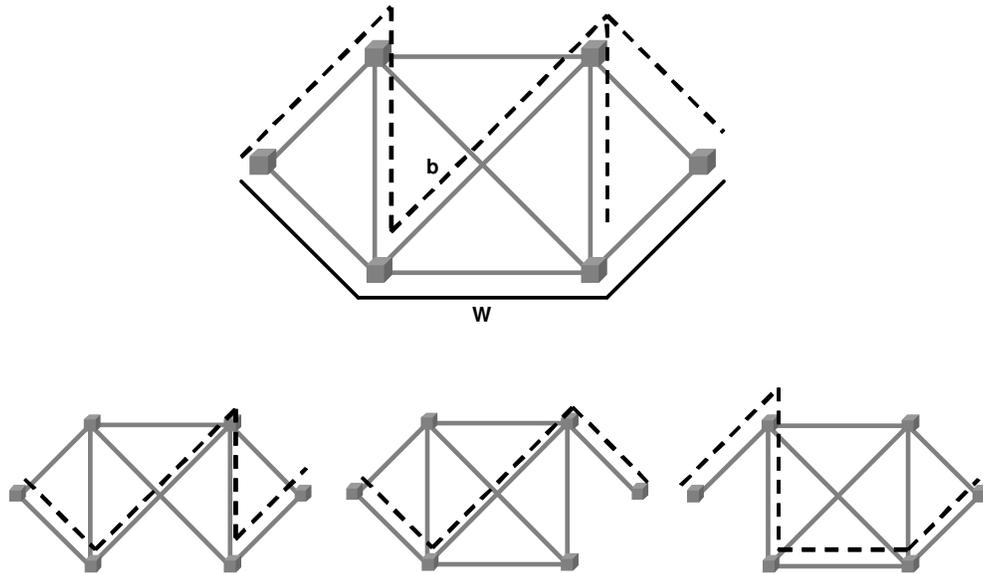


Figura 2.6: Proteção por roteamento em sub-grafos (*sub-graph routing protection* - SGRP).

2.1.5 Proteção por Sub-Caminhos Compartilhados (*Short-Leap Shared Protection* - SLSP)

A proteção por sub-caminhos compartilhados divide o caminho de trabalho de cada conexão em segmentos de mesmo comprimento. Cada segmento possui um enlace comum a seus segmentos vizinhos para proteção nodal. A SLSP aloca, então, trajetos de proteção que conectam as extremidades de cada segmento. Trajetos de proteção podem compartilhar capacidade desde que seus segmentos de trabalho correspondentes sejam disjuntos ou façam parte do mesmo caminho de trabalho. A Figura 2.7 traz um exemplo da SLSP. O caminho w representado pela linha contínua é dividido em dois segmentos, aos quais são associados domínios de proteção que alocam a capacidade representada pela linha tracejada. É interessante notar a superposição dos dois segmentos, característica da SLSP, para a proteção contra falhas nos nós das extremidades dos segmentos.

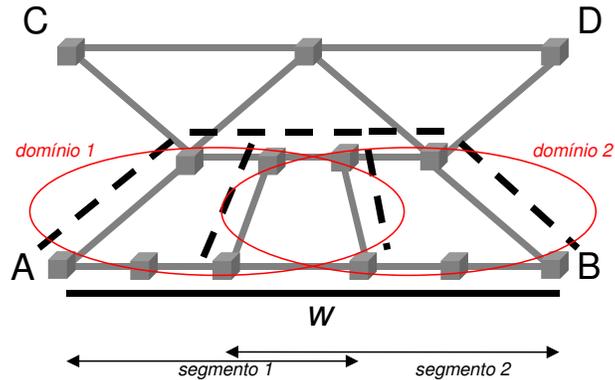


Figura 2.7: Proteção por sub-caminho compartilhada (*short leap shared protection - SLSP*).

2.1.6 Restauração de Enlace (*Span Restoration - SR*) e Restauração de Caminho (*Path Restoration - PR*)

Os esquemas de restauração necessitam de processamento pós-falha para se determinar a capacidade alternativa. Na restauração de enlace, calcula-se o menor trajeto entre os nós adjacentes à falha, enquanto na restauração de caminho calcula-se o menor caminho entre os nós na extremidade do caminho. A restauração costuma utilizar melhor os recursos da rede, uma vez que seu processamento é feito em tempo real e considera as condições da rede no exato momento da ocorrência da falha. No entanto, ela é mais lenta do que os esquemas de proteção (necessidade de processamento em tempo real) e não garante a existência de capacidade de reserva (não existe pré alocação de recursos), o que dificulta a oferta de garantias acerca da disponibilidade da conexão.

2.2 Parâmetros de Medida da Habilidade de Sobrevivência de Redes

2.2.1 Confiabilidade

Confiabilidade é a probabilidade de um elemento (ou sistema de elementos) executar sua função adequadamente, sem reparo ou intervenção, por um intervalo de tempo t . Matematicamente, ela pode ser definida por:

$$R(t) = \text{prob} \{0 \text{ falhas no intervalo } [0, t]\}.$$

Logo,

$$R(0) = 1 \text{ e } R(\infty) = 0.$$

A confiabilidade é o complemento da função de distribuição cumulativa (CDF) da variável aleatória que representa o tempo entre as falhas:

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt = \int_t^{\infty} f(t)dt. \quad (2.1)$$

Outra medida importante é a taxa de falha de um elemento, representada pela função λ :

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{-[R(t + \Delta t) - R(t)]}{\Delta t} \cdot \frac{1}{R(t)} = \frac{-dR(t)}{dt} \cdot \frac{1}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)}. \quad (2.2)$$

Manipulando-se a Equação 2.2 obtém-se:

$$R(t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda(t') dt' \right]. \quad (2.3)$$

O tempo médio até a falha (MTTF - *mean time to failure*) pode ser calculado como função de $R(t)$:

$$MTTF = E(f(t)) = \int_0^\infty t f(t) dt = \int_0^\infty t \frac{-dR(t)}{dt} dt. \quad (2.4)$$

A taxa de falha é normalmente dependente do tempo de operação do sistema ou elemento. Essa dependência tem especial importância quando se considera o envelhecimento do equipamento. Entretanto, para situações em que a falha é causada principalmente por fatores externos, como corte da fibras por escavações ou pela queda de postes, pode-se assumir um valor constante. Nesse caso:

$$R(t) = e^{-\lambda_0 t}; \quad (2.5)$$

$$MTTF = \frac{1}{\lambda_0}. \quad (2.6)$$

2.2.2 Disponibilidade

A seção anterior tratou da confiabilidade. Essa medida de sobrevivência é adequada para sistemas que não podem ser reparados durante seu uso. Por exemplo, um sistema propulsor de um foguete que deve funcionar perfeitamente durante o lançamento. Entretanto, para um usuário de Internet, importa que sua conexão esteja funcionando adequadamente, sem se preocupar se houve falhas em roteadores e se eles foram reparados. Desta forma, a disponibilidade é uma métrica apropriada para sistemas passíveis de reparo (como redes de comunicações).

A disponibilidade descreve o comportamento de um sistema cujo estado alterna-se entre períodos “operantes” e “inoperantes”. Existem diversas definições para a disponibilidade. Este trabalho adota as seguintes:

1. **Disponibilidade Instantânea** $A(t)$: é a probabilidade de um sistema estar operante em um instante t [Ebe97].
2. **Disponibilidade Média de Intervalo** $AA(IT)$: é a probabilidade média de um sistema estar operante em um intervalo $[0, IT]$ [Ebe97]:

$$AA(IT) = (1/IT) \int_0^{IT} A(t) dt. \quad (2.7)$$

3. **Disponibilidade Assintótica (ou apenas Disponibilidade)** A : é a probabilidade média de um sistema estar operante em um intervalo de observação que tende ao infinito. Em termos matemáticos [Ebe97]:

$$A = \lim_{IT \rightarrow \infty} AA(IT). \quad (2.8)$$

4. **Disponibilidade de Intervalo** $I AV(IT)$: é a fração de um período de observação finito de duração $[0, IT]$ em que o sistema permanece operante [RS95]:

$$I AV(IT) = \frac{O(IT)}{IT}, \quad (2.9)$$

em que $O(IT)$ é o tempo total em que o sistema permanece operante durante $[0, IT]$. Diferentemente das definições anteriores, a disponibilidade de intervalo não é uma probabilidade, mas uma variável aleatória.

Segundo a Equação 2.8, a disponibilidade é a probabilidade média de o sistema estar em operação durante um intervalo de observação tendendo a infinito. Se o tempo médio em que

o sistema permanece operante for representado pelo $MTTF$, e o tempo médio até o reparo pelo $MTTR$ (*mean time to repair*), pode-se deduzir a equação mais conhecida no cálculo da disponibilidade:

$$A = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR}. \quad (2.10)$$

Usando a equação 2.6:

$$A = \frac{\mu}{\lambda + \mu}, \quad (2.11)$$

em que $\mu = 1/MTTR$ é a taxa de reparo e $\lambda = 1/MTTF$ é a taxa de falha.

2.2.2.1 Indisponibilidade (U - *Unavailability*)

O complemento da disponibilidade é a indisponibilidade,

$$U = 1 - A. \quad (2.12)$$

Em muitos casos, trabalha-se com a indisponibilidade em vez da disponibilidade, devido à possibilidade de simplificações. Como exemplo, pode-se citar a possibilidade de se somar a indisponibilidade de elementos em série em vez de se multiplicar a disponibilidade:

$$U = \frac{MTTR}{MTTF + MTTR} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \approx \frac{MTTR}{MTTF} = \lambda.MTTR \quad (2.13)$$

uma vez que $MTTF \gg MTTR$. Tipicamente, o $MTTF$ é medido em anos, o $MTTR$ em horas.

2.2.2.2 Failure in Time (FIT)

FIT é uma unidade internacional utilizada para especificar taxas de falhas. Sabendo-se que os elementos possuem, individualmente, elevados valores de confiabilidade, convencionou-se adotar um período de 10^9 horas como unidade de tempo, ou seja, uma taxa de falha de uma falha em 10^9 horas representa 1 FIT.

$$MTTF = \frac{10^9}{\lambda_{FITs}}. \quad (2.14)$$

A indisponibilidade de um elemento pode ser, então, aproximada por:

$$U = \frac{MTTR \cdot \lambda_{FITs}}{10^9}. \quad (2.15)$$

Assim, quando dizemos que um dispositivo possui uma taxa de falha de 1 FIT, espera-se, na média, que o dispositivo tenha uma falha a cada 1 bilhão de horas ou, uma falha a cada 114.155 anos. Assim, utilizando-se a equação 2.14, pode-se calcular que um dispositivo com uma taxa de falha de 200 FITs , tem uma falha a cada 5 milhões de horas (ou 570 anos).

2.2.3 Cálculo da Disponibilidade em Sistemas Série/Paralelo

As próximas seções apresentam métodos para o cálculo da disponibilidade de sistemas em série e/ou paralelo com elementos que falham independentemente e têm taxas de reparo e falha constantes. Esses conceitos serão importantes para a compreensão do assuntos apresentados no Capítulo 3.

2.2.3.1 Elementos em Série

Se o sistema é composto de n componentes em série, todos os componentes devem estar funcionando para o sistema estar operante. A Figura 2.8 apresenta elementos dispostos em série.

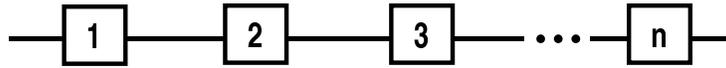


Figura 2.8: Elementos dispostos em série.

A confiabilidade pode ser calculada por:

$$R(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t). \quad (2.16)$$

A disponibilidade e a indisponibilidade podem ser calculadas, por:

$$A = \prod_{i=1}^n A_i, \quad (2.17)$$

$$U = 1 - \prod_{i=1}^n A_i.$$

2.2.3.2 Elementos em Paralelo

Se o sistema é composto de n componentes em paralelo, pelo menos um componente deve estar funcionando para o sistema estar operante. A Figura 2.9 apresenta elementos dispostos em paralelo.

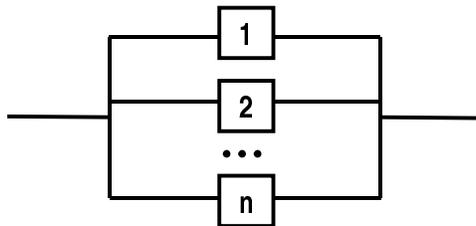


Figura 2.9: Elementos dispostos em paralelo.

A confiabilidade pode ser calculada pela equação 2.18.

$$R(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t)). \quad (2.18)$$

A disponibilidade pode ser calculada por:

$$A = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - A_i). \quad (2.19)$$

A indisponibilidade, por sua vez, é obtida por:

$$U = \prod_{i=1}^n U_i. \quad (2.20)$$

Capítulo 3

Cálculo da Disponibilidade de Conexões Protegidas em Redes Ópticas

Se por uma lado as taxas de transmissão alcançadas pelos sistemas de transmissão ópticos atuais ajudam a escoar melhor a crescente demanda de informação, por outro lado, tem-se a preocupação de que o sistema opere sem interrupções. Neste contexto, a disponibilidade aparece como uma alternativa para se mensurar a habilidade de sobrevivência de conexões. A Seção 3.1 abordará o cálculo da disponibilidade de conexões usando modelos série/paralelo. Entretanto esses modelos não são eficientes para calcular a disponibilidade de conexões protegidas pela proteção de caminho com capacidade compartilhada, como será demonstrado na próxima seção. A Seção 3.2 discutirá outras técnicas que, por meio de cadeias de Markov, conseguem sanar as dificuldades apresentadas pelo cálculo série/paralelo.

3.1 Cálculo da Diponibilidade Usando os Modelos Série / Paralelo

3.1.1 Conexões sem Proteção

Neste caso não existe capacidade alternativa, e a conexão fica indisponível em caso de falha em qualquer elemento de rede, E_i^w , pertencente ao caminho de trabalho w . Portanto, a disponibilidade desta conexão pode ser calculada com a ajuda da Equação 2.17.

$$A_c = \prod_i A_{E_i^w}. \quad (3.1)$$

3.1.2 Conexões com DPP

Neste caso, existe um caminho de proteção b especialmente alocado para transportar o tráfego em caso de falha no caminho de trabalho w . Trata-se do cálculo da disponibilidade de dois caminhos em paralelo, formados por enlaces em série. Pode-se, portanto, utilizar as Equações 2.17 e 2.19. Logo,

$$A_c = 1 - \left(1 - \prod A_{E_i^w}\right) \left(1 - \prod A_{E_i^b}\right). \quad (3.2)$$

3.1.3 Conexões com SBPP

A disponibilidade de conexões protegidas pela SBPP não pode ser calculada pelas relações série/paralelo como nos exemplos anteriores, conforme será demonstrado a seguir. Suponha uma rede contendo dois caminhos de trabalho que compartilham capacidade em seus respectivos caminhos de proteção, como demonstra a Figura 3.1.

Neste caso, a conexão \overline{AB} ficaria indisponível se houvesse uma falha em w_1 e uma falha em b , ou se houvesse uma falha em w_1 e a capacidade de proteção b estivesse ocupada. O

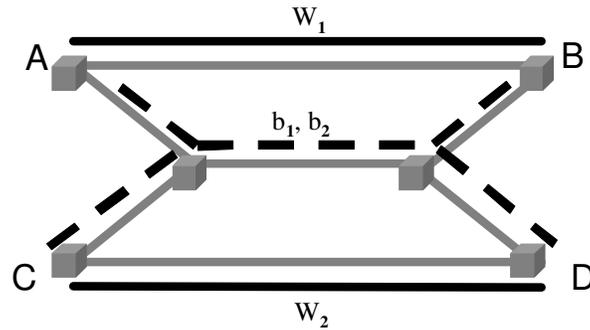


Figura 3.1: Compartilhamento de capacidade na SBPP.

primeiro caso, falha em w_1 e b , pode ser calculado pela Equação 3.2. Entretanto, o segundo caso possui dependência temporal em relação à ordem em que ocorrem as falhas, dado que uma falha em um outro caminho de trabalho, w_2 neste caso, deixaria b ocupado. Como as relações série/paralelo não consideram o fator temporal da ordem das falhas, necessita-se de métodos alternativos para o cálculo da disponibilidade dessa rede.

3.2 Cálculo da Diponibilidade Usando Cadeias de Markov

Suponha duas conexões c_1 e c_2 com caminhos de trabalho w_1 e w_2 respectivamente, como na Figura 3.2a. Nota-se que ambos os caminhos percorrem somente uma fibra e provêm conexão ao mesmo par origem/destino. O caminho de proteção b é compartilhado pelas duas conexões e também percorre somente uma fibra. Supondo que o caminho de proteção nunca falhe, ou seja, $A_b = 1$, a Figura 3.2b apresenta a cadeia de Markov que modela o sistema descrito pela Figura 3.2a.

No estado S_0 , w_1 e w_2 estão operando normalmente. A taxa de falha de w_1 é representada por λ_1 e a taxa de reparo por μ_1 . No estado S_1 , w_1 possui uma falha e w_2 esta operando normalmente. O estado S_2 representa o oposto, com operação normal em w_1 e falha em w_2 . Os estados $S_{1,2}$ e $S_{2,1}$ representam a falha de ambos os caminhos, sendo que em $S_{1,2}$ a

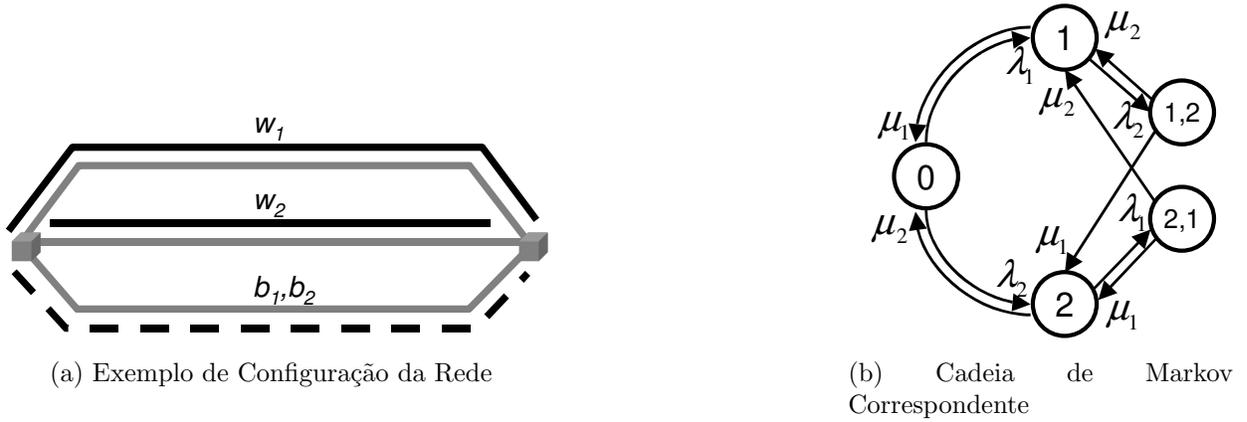


Figura 3.2: Exemplo de compartilhamento e seu modelo de Markov.

falha ocorreu primeiro em w_1 , portanto o tráfego de w_1 está utilizando b . Em $S_{2,1}$ acontece o inverso. Assim, a probabilidade estacionária $\pi_{2,1}$ é a indisponibilidade da conexão c_1 . A probabilidade estacionária $\pi_{1,2}$ é a indisponibilidade da conexão c_2 . As probabilidades estacionárias dos estados $S_{1,2}$ e $S_{2,1}$ podem ser calculadas por:

$$(\mu_1 + \mu_2)\pi_{1,2} = \lambda_2\pi_1, \quad (3.3)$$

$$(\mu_1 + \mu_2)\pi_{2,1} = \lambda_1\pi_2. \quad (3.4)$$

Aplicando $\pi_1 = \pi_2 = A(1 - A)$ às equação acima:

$$\pi_{1,2} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}\pi_{2,1}. \quad (3.5)$$

A Equação 3.5 mostra que a indisponibilidade (e conseqüentemente, a disponibilidade) das conexões c_1 e c_2 depende da relação entre a taxa de falha das conexões. Análises deste tipo não podem ser obtidas através das relações série/paralelo apresentadas na Seção 3.1.

3.2.1 Conexões em Redes Nacionais com Proteção de Falha Simples em Enlace

A seção anterior motivou a utilização de cadeias de Markov no cálculo da disponibilidade. Esta seção propõe modelar uma rede de dimensões nacionais, como, por exemplo, uma rede típica italiana (veja o Apêndice A), usando cadeias de Markov. Algumas observações a serem feitas: será desprezada a contribuição das falhas triplas ou de ordem superior para a indisponibilidade da conexão, uma vez que falhas dessa natureza são muito raras em redes deste porte. Também serão desconsideradas falhas em nós da rede, uma vez que eles podem ser protegidos por redundância interna (desconsidera-se o efeito de catástrofes naturais). Estas considerações são amplamente aceitas na literatura [JH04], [CG02]. A rede pode, então, ser modelada pela cadeia de Markov da Figura 3.3. Os estados dos elementos da rede alternam-se entre operantes e inoperantes.

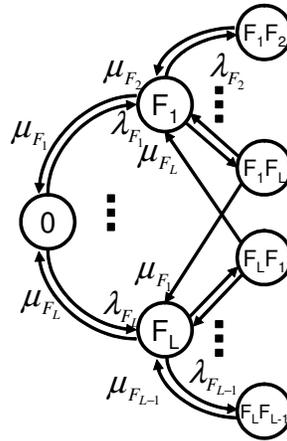


Figura 3.3: Modelo de Markov para uma rede de dimensões nacionais com proteção de nó e proteção de falha simples em enlace.

Se a rede encontra-se no estado S_0 , todos os enlaces estão operantes. Se a rede encontra-se no estado S_{F_i} todos os enlaces, exceto F_i , estão operantes. Se a rede encontra-se no estado S_{F_i, F_j} todos os enlaces, exceto F_i e F_j , estão operantes e o enlace F_i falhou antes do enlace F_j . Sendo S^I o conjunto de todos os estados onde a conexão está inoperante, a indisponibilidade

pode ser calculada pela soma das probabilidades estacionárias dos estados contidos em S^I , ou seja, ela é a soma das probabilidades estacionárias dos estados que correspondem às falhas duplas que tornam a conexão inoperante:

$$U_c = \sum_{S_{F_i, F_j}^I} \pi_{F_i, F_j}. \quad (3.6)$$

No modelo, uma conexão torna-se inoperante se dois enlaces falharem simultaneamente e é reestabelecida se um dos enlaces que falharam for reparado. O MTTR da conexão pode ser calculado pela média ponderada do tempo médio em que a cadeia de Markov permanece em cada um dos estados de inoperância da conexão.

$$MTTR_c = \frac{\sum_{S_{F_i, F_j}^I} \frac{\pi_{F_i, F_j}}{\mu_{F_i} + \mu_{F_j}}}{\sum_{S_{F_i, F_j}^I} \pi_{F_i, F_j}}. \quad (3.7)$$

Pode-se calcular os valores das probabilidades estacionárias *offline*, uma vez que elas são propriedades da rede analisada. As Equações 3.6 e 3.7 devem ser calculadas *online* pois dependem das conexões existentes na rede.

3.2.2 Conexões em Redes Nacionais com Falha em Nó e Proteção de Falha Simples em Enlace

Se por alguma razão, como falta de redundância interna ou maior precisão do modelo, for importante considerar a possibilidade de falhas em nós nas redes de dimensões nacionais, pode-se adicionar, ao modelo apresentado na seção anterior, estados que representem falhas em nós. Assume-se que não ocorrem falhas duplas que envolvam uma falha em enlace e uma falha em nó. Assim, a rede pode ser modelada conforme a Figura 3.4. Neste caso, a conexão torna-se inoperante quando atingida por falhas duplas ou falhas simples em nós. Desta forma, a indisponibilidade da conexão pode ser calculada por:

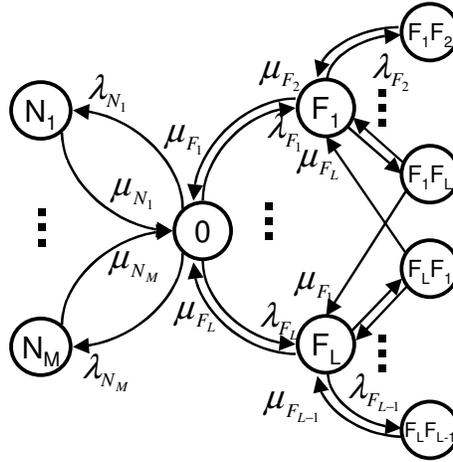


Figura 3.4: Modelo de Markov para uma rede de dimensões nacionais com proteção de falha simples em enlace.

$$U_c = \sum_{S_{F_i, F_j}^I} \pi_{F_i, F_j} + \sum_{S_{N_i}^I} P_{N_i}. \quad (3.8)$$

O MTTR da conexão pode ser calculado pela média ponderada do tempo em que a cadeia permanece nos estados de inoperância da conexão devido a falhas duplas e devido a falhas em nós. Assim, o MTTR é dado por:

$$MTTR_c = \frac{\sum_{S_{F_i, F_j}^I} \frac{\pi_{F_i, F_j}}{\mu_{F_i} + \mu_{F_j}} + \sum_{S_{N_i}^I} \frac{P_{N_i}}{\mu_{N_i}}}{\sum_{S_{F_i, F_j}^I} \pi_{F_i, F_j} + \sum_{S_{N_i}^I} P_{N_i}}. \quad (3.9)$$

Pode-se calcular os valores das probabilidades estacionárias \$\pi_{F_i, F_j}\$ e \$P_N\$ *offline*, uma vez que são propriedades da rede analisada. As Equações 3.8 e 3.9 devem ser calculadas *online*, pois dependem das conexões existentes na rede.

3.2.3 Conexões em Redes Continentais com Proteção de Nó e Falhas Simples e Duplas de Enlace

Em redes com dimensões continentais, como por exemplo a NSFNet (veja o Apêndice A), a contribuição das falhas triplas em enlaces torna-se relevante. Nesse tipo de rede, as falhas em nós são insignificantes ante às falhas em enlaces. A rede pode ser modelada pela cadeia de Markov da Figura 3.5. Se a conexão estiver protegida contra falhas simples e duplas em enlaces, sua indisponibilidade pode ser calculada pela soma das contribuições de todas as falhas triplas que tornam a conexão inoperante, ou seja:

$$U_c = \sum_{S_{F_i, F_j, F_k}^I} \pi_{F_i, F_j, F_k}. \quad (3.10)$$

O MTTR da conexão é dado por:

$$MTTR_c = \frac{\sum_{S_{F_i, F_j, F_k}^I} \frac{\pi_{F_i, F_j, F_k}}{\mu_{F_i} + \mu_{F_j} + \mu_{F_k}}}{\sum_{S_{F_i, F_j, F_k}^I} \pi_{F_i, F_j, F_k}}. \quad (3.11)$$

Se a conexão for protegida somente contra falhas simples, a indisponibilidade pode ser calculada pela soma das contribuições das falhas duplas e triplas que tornam a conexão inoperante:

$$U_c = \sum_{S_{F_i, F_j, F_k}^I} \pi_{F_i, F_j, F_k} + \sum_{S_{F_i, F_j}^I} \pi_{F_i, F_j}. \quad (3.12)$$

O cálculo do MTTR não pode ser abordado com a mesma metodologia empregada para os casos anteriores devido à existência de estados adjacentes na cadeia de Markov para os quais a conexão torna-se inoperante. Por exemplo, a partir de um estado de falha tripla, um reparo de um enlace faz o sistema migrar para um estado de falha dupla, no qual a conexão pode continuar inoperante. A seção seguinte apresenta uma abordagem mais genérica para

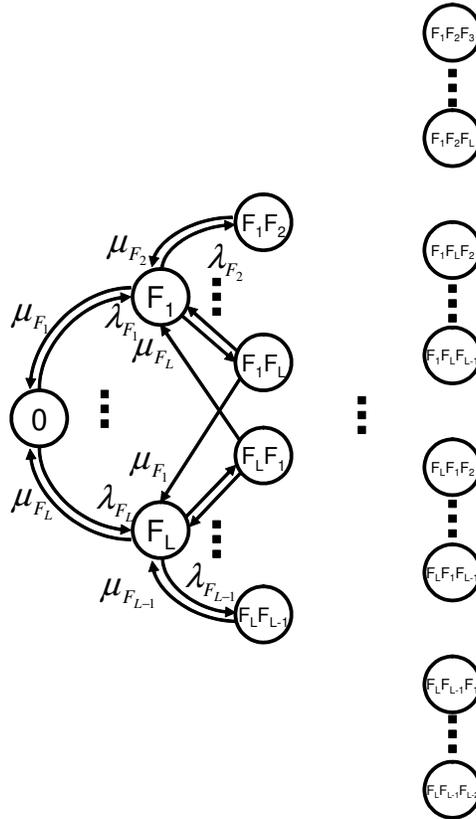


Figura 3.5: Modelo de Markov para um rede de dimensões continentais com proteção de nó e falhas simples e duplas de enlace.

o cálculo da indisponibilidade.

3.2.4 Caso Geral

Os modelos de Markov apresentados nas seções anteriores foram elaborados para redes com características particulares. De fato, é possível adaptar um modelo de Markov para cada tipo de rede, desde que ele considere todos os estados que causam inoperância da conexão. Entretanto, a Referência [MW08] propõe uma abordagem mais genérica através da utilização de limitantes. O caso geral pode ser modelado pela cadeia de Markov das Figuras 3.6 e 3.7. Cada estado representa o conjunto de falhas presentes na rede, ordenado na seqüência na qual aconteceram. A Figura 3.6 mostra a porção central da cadeia completa. No estado

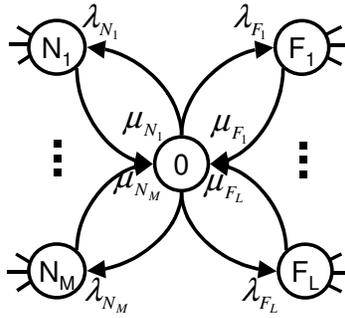


Figura 3.6: Estado central da cadeia de Markov do estado de falhas da rede.

S_0 todos os enlaces e nós da rede estão operantes. No estado S_{F_i} todos os nós e enlaces da rede estão operantes, exceto o enlace F_i . No estado S_{N_i} , todos os nós e enlaces da rede estão operantes, exceto o nó N_i . A figura mostra, também, as taxas de transição entre os estados. No modelo da Figura 3.7 todos os elementos podem falhar. Os estados da cadeia representam os conjuntos dos elementos que falharam na rede ordenados na seqüência em que eles falharam. Nos estados $S_{E_1 \dots E_k}$ os elementos $E_1 \dots E_k$ falharam. O elemento E_i falhou antes do elemento E_{i+1} . Nos estados à esquerda, os elementos $E_1 \dots E_{k-1}$ falharam. Nos estados acima, além dos elementos $E_1 \dots E_k$, foi introduzido o elemento V, que também falhou, mas não foi o último a falhar. Nos estados de baixo, um elemento $E_i \neq E_j$ está operante. Nos estados à direita, além dos elementos $E_1 \dots E_k$, foi introduzido o elemento U, que também falhou, mas não foi o último a falhar.

Como dito anteriormente, a indisponibilidade pode ser calculada pelo somatório das probabilidades estacionárias relativas a todos os estados que tornam a conexão inoperante. Assim, seria necessário somar a contribuição das falhas simples, duplas, triplas, quádruplas, etc. Entretanto, este cálculo não é trivial, pois requer a resolução da cadeia completa de Markov. Em vez de se calcular a cadeia de Markov completa e, com isso, a indisponibilidade exata, a referência [MW08] propõe calcular limitantes de tal forma que o valor exato da indisponibilidade esteja contido entre esses limitantes. Sabendo que nas redes atuais a probabilidade de ocorrerem falhas quádruplas ou de maior grau é baixa, calcula-se um

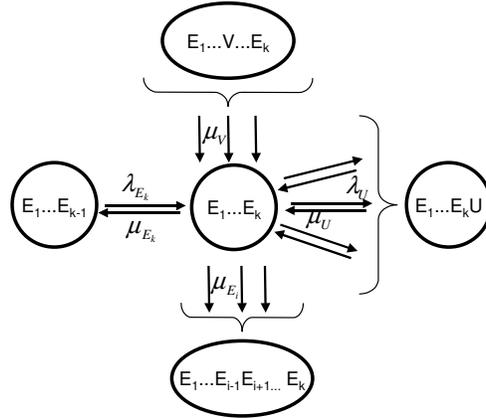


Figura 3.7: Estado genérico da cadeia de Markov do estado de falhas da rede.

limitante inferior, considerando-se os estados de falhas simples, duplas e triplas que tornam a conexão inoperante e um limitante superior, somando a contribuição de todas as falhas quádruplas ou de maior grau.

Assim, sendo $S_{E_i}^I$, S_{E_i, E_j}^I e S_{E_i, E_j, E_k}^I o conjunto que contém as falhas simples, duplas e triplas que podem deixar a rede inoperante, os limitantes superiores (UB - *upper bound*) e inferiores (LB - *lower bound*) podem ser calculados por:

$$U^{LB} = \sum_{S_{E_i}^I} P_{E_i} + \sum_{S_{E_i, E_j}^I} \pi_{E_i, E_j} + \sum_{S_{E_i, E_j, E_k}^I} \pi_{E_i, E_j, E_k}; \quad (3.13)$$

$$U^{UB} = U^{LB} + P_{4+}; \quad (3.14)$$

onde

$$P_{4+} = 1 - P_0 - \sum_{E_i} P_{E_i} - \sum_{E_i, E_j} P_{E_i, E_j} - \sum_{E_i, E_j, E_k} P_{E_i, E_j, E_k}. \quad (3.15)$$

Entretanto, o cálculo exato dos valores de π_{E_i, E_j} e π_{E_i, E_j, E_k} também implica na resolução da cadeia de Markov completa. Logo, propõe-se utilizar a mesma abordagem descrita acima

e calcular limitantes inferiores e superiores também para π_{E_i, E_j} e π_{E_i, E_j, E_k} . Desta forma, tem-se:

$$U^{LB} = \sum_{S_{E_i}^I} P_{E_i} + \sum_{S_{E_i, E_j}^I} \pi_{E_i, E_j}^{LB} + \sum_{S_{E_i, E_j, E_k}^I} \pi_{E_i, E_j, E_k}^{LB}; \quad (3.16)$$

$$U^{UB} = \sum_{S_{E_i}^I} P_{E_i} + \sum_{S_{E_i, E_j}^I} \pi_{E_i, E_j}^{UB} + \sum_{S_{E_i, E_j, E_k}^I} \pi_{E_i, E_j, E_k}^{UB} + P_{4+}, \quad (3.17)$$

em que P_{4+} continua sendo calculada pela Equação 3.15. As expressões para o cálculo de π_{E_i, E_j}^{LB} , π_{E_i, E_j}^{UB} , π_{E_i, E_j, E_k}^{LB} e π_{E_i, E_j, E_k}^{UB} são apresentadas no Apêndice B.

As equações 3.16 e 3.17 devem ser calculadas *online*, uma vez que são dependentes das conexões. Os valores das probabilidades estacionárias podem ser calculados *offline* pois dependem somente das propriedades da rede. A referência [MW08] aplica, com sucesso, esta abordagem para conexões roteadas na NSFNet, sugerindo que pode ser utilizada para outras redes similares, ou menores, também com sucesso. Como já mencionado, a indisponibilidade da conexão encontra-se entre os limitantes calculados. Aproximar a indisponibilidade da conexão pela média aritmética dos limitantes garante um erro de estimação menor que a metade do intervalo:

$$U_c \approx \frac{U^{LB} + U^{UB}}{2}. \quad (3.18)$$

As equações 3.7, 3.9 e 3.11 apresentam uma forma heurística para se calcular o MTTR das conexões. Seguindo a mesma heurística tem-se:

$$MTTR \approx \frac{\sum_{S_{E_i}^I} \frac{P_i}{\mu_i} + \sum_{S_{E_i, E_j}^I} \frac{\pi_{ij}^{med}}{\mu_i + \mu_j} + \sum_{S_{E_i, E_j, E_k}^I} \frac{\pi_{ijk}^{med}}{\mu_i + \mu_j + \mu_k}}{U_c}, \quad (3.19)$$

em que o sobrescrito *med* corresponde à média aritmética dos limitantes superiores e

inferiores. Essa equação representa a média ponderada do tempo médio em que a cadeia de Markov que representa o sistema permanece em cada um dos estados nos quais a conexão é inoperante. Vale ressaltar que o MTTR calculado pela Equação 3.19 é uma aproximação, pois não representa situações onde, mesmo com o reparo de elementos de rede, a conexão continua inoperante. Isso pode prejudicar o método quando aplicado a redes onde as falhas triplas, quádruplas ou de ordem superior são comuns. Entretanto, uma vez que falhas de terceira ordem ou superiores são pouco comuns, como ocorre em redes de porte nacional europeu, as aproximações podem ser suficientes.

Capítulo 4

Cálculo da Disponibilidade de Intervalo de Conexões Protegidas em Redes Ópticas

A disponibilidade é a probabilidade média de um sistema estar operante em um intervalo de observação que tende ao infinito. Entretanto, SLAs são firmados em intervalos de observação finitos, de alguns meses ou anos. Por exemplo, caso a disponibilidade da conexão seja de 5x9's, estima-se um período de inoperância acumulado anual de 5 minutos. Mas o tempo médio de reparo de uma conexão tem a ordem de algumas horas. Esse aparente paradoxo surge do fato de que na maioria dos períodos de vigência do SLA não haverá qualquer caso de inoperância mas, quando ela acontecer, provavelmente o SLA será violado. Como uma alternativa para resolver esse problema, propõe-se utilizar a disponibilidade de intervalo. A disponibilidade de intervalo é uma variável aleatória definida como a fração de tempo em que a conexão está operante dentro de uma janela de tempo finita. Nota-se que, se a janela de tempo tender ao infinito, a disponibilidade de intervalo tenderá à disponibilidade.

Este capítulo, apresenta três métodos distintos para o cálculo da distribuição da disponibilidade

de intervalo. Primeiramente, aplica-se, aos modelos de Markov apresentados no capítulo anterior, um método numérico proposto em [dSeSG86]. Apesar de fornecer soluções acuradas, o método numérico demanda intenso processamento computacional. Em seguida, apresenta-se um método analítico aproximado, proposto em [ZG05], que privilegia simplicidade em detrimento da acurácia. Finalmente, propõe-se um novo método que, para determinados cenários específicos (redes de porte nacional europeu nas quais o tempo de reparo dos enlaces é constante), consegue baixa complexidade computacional com acurácia satisfatória.

4.1 Cálculo da Distribuição da Disponibilidade de Intervalo

4.1.1 Método Numérico

Esse método numérico recursivo foi proposto em [dSeSG86]. Ele permite calcular a distribuição da disponibilidade de intervalo associada a qualquer cadeia de Markov que puder ser dividida em estados “operantes” ou “inoperantes.” As principais vantagens desse método numérico são a acurácia, uma vez que se pode especificar o erro máximo tolerado, a estabilidade e a simplicidade de implementação. Entretanto, esses atributos são suportados pelo intenso esforço computacional necessário para os cálculos, o que nos motivou a procurar soluções alternativas capazes de mesclar acurácia e reduzido gasto computacional.

Com o objetivo de tornar esta dissertação auto-contida, transcrevem-se, no Apêndice C, os principais passos do método.

4.1.2 Método Simplificado

O primeiro trabalho a propor um método simplificado para o cálculo da disponibilidade de intervalo foi [ZG05], que assumiu que as falhas em um rede óptica ocorrem de acordo com um processo de Poisson com taxa λ . Ele também supõe um tempo de reparo determinístico. Se os processos de falha e reparo forem Poissonianos, taxa de falha λ e o tempo de reparo μ

da conexão relacionam-se à indisponibilidade pela fórmula clássica:

$$U = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}. \quad (4.1)$$

Quando $\lambda \ll \mu$,

$$\lambda = \frac{U}{MTTR}. \quad (4.2)$$

Pode-se, então, calcular o número de falhas que devem ocorrer durante um intervalo finito de tempo por meio da distribuição de Poisson:

$$p(x, \lambda, T) = \frac{(\lambda T)^x e^{-\lambda T}}{x!}, \quad (4.3)$$

em que T é o intervalo de observação, e x o número de falhas no período. A idéia deste método consiste em relacionar a disponibilidade garantida durante o intervalo T , ao número de falhas, x , calculadas em 4.3. A Referência [ZG05] assume um tempo de reparo contante para as conexões, de maneira que a distribuição do período de indisponibilidade da conexão em T aparece diretamente da distribuição do número de falhas no período.

4.1.3 Novo Método

Com o intuito de refinar o método apresentado na Seção 4.1.2, são feitas as seguintes hipóteses:

1. não ocorrem falhas triplas ou de maior ordem em redes de dimensões nacionais;
2. o tempo até a falha segue uma distribuição exponencial com taxa λ . Essa hipótese é razoável pois o sistema não possui memória.
3. o tempo até o reparo segue uma distribuição exponencial com taxa μ . Essa hipótese é razoável quando todos os enlaces da rede tem o mesmo tempo médio de reparo.

Feitas essas hipóteses, o novo método propõe modelar a conexão por uma cadeia de Markov de dois estados (veja a Figura 4.1), na qual a conexão pode estar no estado operante ou inoperante.

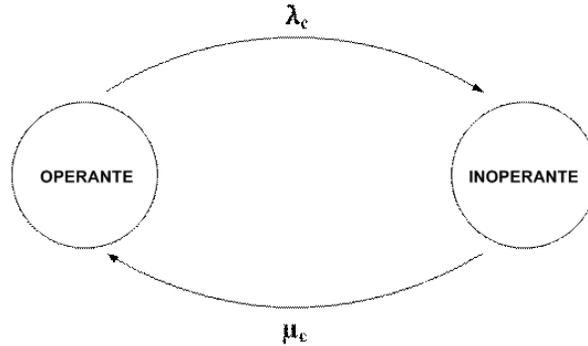


Figura 4.1: Cadeia de Markov com dois estados.

A Referência [Tak57] apresenta então uma fórmula analítica aproximada para a distribuição da disponibilidade de intervalo para uma cadeia de Markov de dois estados. Entretanto, a fórmula tem complexidade computacional relativamente alta, uma vez que envolve a solução de uma integral de função de Bessel de primeira ordem. Uma simplificação pode ser encontrada no próprio trabalho, onde o autor prova que a distribuição tende a uma distribuição normal quando o período de observação tende ao infinito. Contudo, interessa-nos períodos de observação relativamente curtos, uma vez que os SLAs são baseados em períodos não superiores a um ano. A aproximação para pequenos intervalos foi estudada em [FY94]. Essa referência demonstra que a distribuição da disponibilidade de intervalo para uma cadeia de Markov de dois estados, considerando-se um intervalo de observação pequeno, pode ser calculada por:

$$\zeta(\tau) \approx F(\tau)\overline{G}(t - \tau), \quad (4.4)$$

em que $\zeta(\tau)$ é a distribuição da disponibilidade de intervalo em $\tau \leq t$, $F(\tau)$ é a função distribuição cumulativa dos períodos de inoperância, e $\overline{G}(\tau)$ é o complemento da função de distribuição cumulativa do tempo de reparo.

Considerando-se o tempo até a falha e o tempo de reparo exponencialmente distribuídos, tem-se a distribuição do período de inoperância τ :

$$\zeta(\tau) \approx (1 - e^{-\frac{\tau}{MTTFC}})(e^{-\frac{(t-\tau)}{MTTRc}}). \quad (4.5)$$

O próximo capítulo irá comparar, através de simulações, o comportamento de cada um dos métodos descritos no Capítulo 4, destacando seu desempenho em diversos tipos de redes.

Capítulo 5

Resultado das Simulações

Esta seção avalia os métodos descritos nas seções 4.1.1, 4.1.2 e 4.1.3 por meio de simulações de eventos discretos. Para se calcular a distribuição da disponibilidade de intervalo usando o método simplificado e o método novo, deve-se conhecer a disponibilidade e o tempo médio de reparo das conexões analisadas. O Capítulo 3 apresentou algumas formulações que permitem calcular esses parâmetros. Através da Equação 3.18 pode-se obter a indisponibilidade da conexão e da Equação 3.19 o MTTR. Nas simulações, as conexões são protegidas pela SBPP. Para cada conexão designou-se um caminho de trabalho w_c e um caminho de proteção b_c , que pode ser utilizado por outras conexões desde de que seus caminhos de trabalho não compartilhem capacidade com w_c (restrição de grupo de enlace com risco de compartilhamento). As duas topologias representativas simuladas encontram-se no Apêndice A. As simulações assumem um período de 80.000 anos.

5.1 Cenário 1A

Neste cenário, o caminho de proteção da conexão analisada compartilha capacidade com os caminhos de proteção de outras três conexões. Os nós da rede nunca falham. As conexões são roteadas na rede italiana de acordo com a Tabela 5.1, em que os nós são representados

Tabela 5.1: Tabela de Conexões - Cenário 1A e 1B

w	Fir-Rom-Nap-Pal
b	Fir-Per-Pes-Nap-Cat-Pal
Caminho 1 em <i>sg</i>	Bolz-Mil-Gen-Pis-Rom-Per
Caminho 2 em <i>sg</i>	Bolz-Tri-Ven-Ver-Bol-Anc
Caminho 3 em <i>sg</i>	Anc-Pes-Bar-Pot-Catz
Caminho de <i>Backup</i> 1	Bolz-Ven-Bol-Fir-Per
Caminho de <i>Backup</i> 2	Bolz-Mil-Gen-Fir-Per-Pes-Anc
Caminho de <i>Backup</i> 3	Anc-Bol-Fir-Per-Pes-Nap-Cat-Catz

pelas três primeiras letras do nome da cidade a que se referem.

As conexões descritas na Tabela 5.1 possuem os seguintes parâmetros.

Parâmetros das Conexões - Cenário 1A

Topologia da rede	Apêndice A
Taxa de falha das conexões	200 FIT/km
MTTR das conexões	Variam conforme descrito na figura (6 horas e 20 horas)
Taxa de falha dos nós	Os nós não falham nesse cenário

Os resultados são apresentados na Figura 5.1. O método simplificado apresenta como resultado um degrau, uma vez que ele assume como constante o valor do tempo de reparo. O novo método comporta-se de modo muito similar ao apresentado pela simulação de eventos discretos.

A Figura 5.1 mostra que se o operador da rede desejar trabalhar com um risco de não cumprir o contrato menor do que 1%, ele possui duas alternativas: 1) oferecer ao cliente uma conexão com garantia de 5x9s de disponibilidade de intervalo, operando a rede a um tempo médio de reparo de 6 horas, ou 2) oferecer uma conexão com garantia de disponibilidade de intervalo de 3x9s, operando a um tempo médio de reparo de 20 horas. A diferença entre os

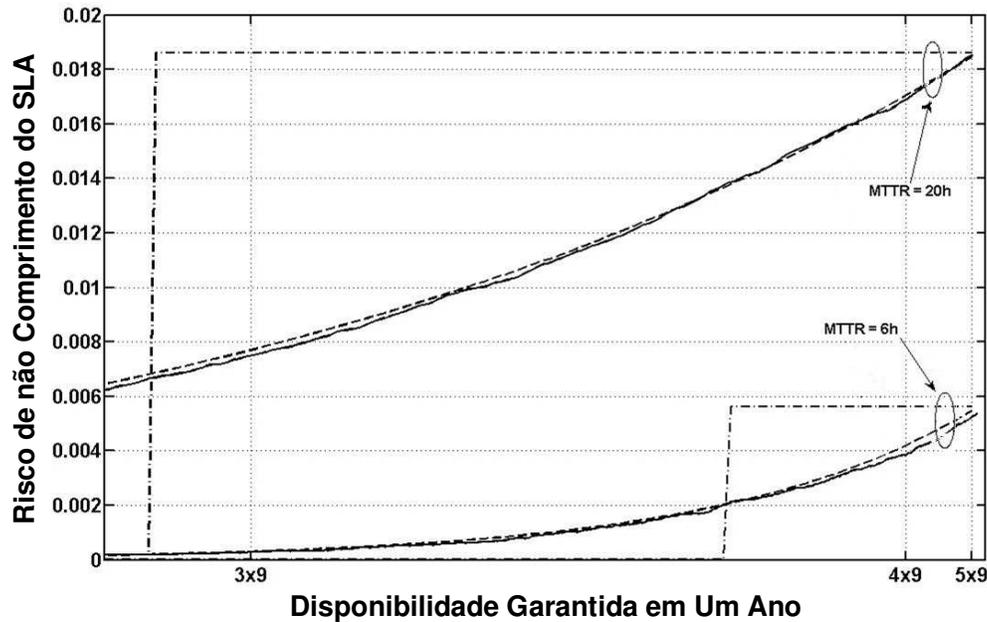


Figura 5.1: Cenário 1A. Risco de não cumprimento da disponibilidade garantida no intervalo de um ano (3x9, 4x9 e 5x9 correspondem à disponibilidade de 0,999, 0,9999 e 0,99999 respectivamente). Simulação representada pela linha contínua, método simplificado pelo degrau contínuo e método novo pela linha pontilhada.

tempos de reparo de 20 e 6 horas pode ser controlado, por exemplo, pelo número de equipes de reparo.

5.2 Cenário 1B

Neste cenário, as conexões continuam a ser roteadas de acordo com a Tabela 5.1. Aqui, os nós da rede podem falhar.

Parâmetros das Conexões - Cenário 1B

Topologia da rede	Apêndice A
Taxa de falha das conexões	200 FIT/km
MTTR das conexões	Variam conforme descrito na figura (6 horas e 20 horas)
Taxa de falha dos nós	5000 FIT
MTTR dos nós	2h

Os resultados são apresentados pela Figura 5.2. Nota-se que, para MTTR de 6 horas, o resultado obtido pelo novo método é similar ao apresentado pela simulação. Contudo, para MTTR de 20 horas, o resultado do método novo difere da simulação, especialmente para valores de disponibilidade de intervalo elevados.

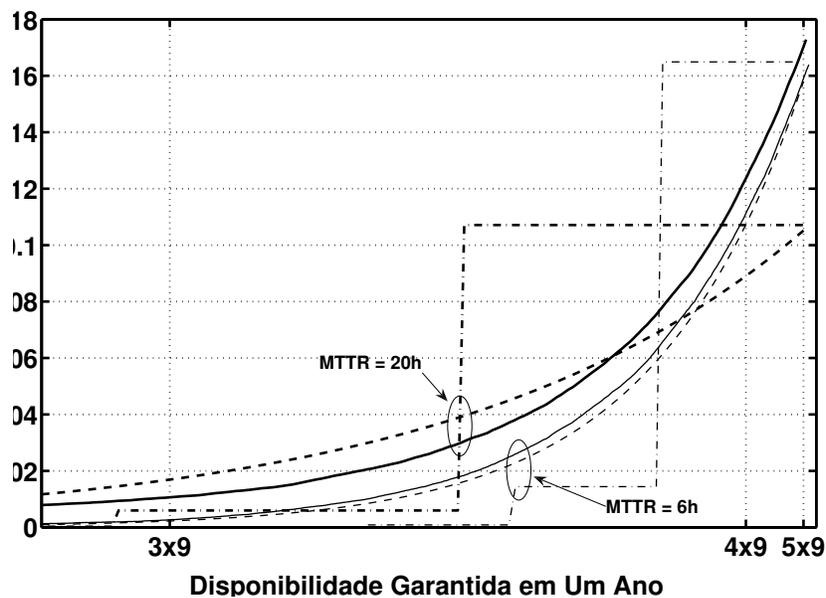


Figura 5.2: Cenário 1B. Risco de não cumprimento da disponibilidade garantida no intervalo de um ano (3x9, 4x9 e 5x9 correspondem à disponibilidade de 0,999, 0,9999 e 0,99999 respectivamente). Simulação representada pela linha contínua, método simplificado pelo degrau contínuo e método novo pela linha pontilhada.

Tabela 5.2: Tabela de Conexões - Cenário 2

w	Rom-Cag-Pal
b	Rom-Nap-Pal
Caminho 1 em <i>sg</i>	Anc-Pes-Bar-Pot-Catz
Caminho 2 em <i>sg</i>	Per-Pes-Nap-Cat-Pal
Caminho de <i>Backup</i> 1	Anc-Bol-Fir-Rom-Nap-Pal-Cat
Caminho de <i>Backup</i> 2	Per-Rom-Nap-Pal

Isso ocorre porque para um MTTR de 6 horas, as falhas nodais são dominantes. No entanto, para um MTTR de 20 horas, a contribuição das falhas de enlace equipara-se à das falhas nodais. Assim, falhas duplas envolvendo um nó e um enlace tornam-se significativas. Nos modelos de Markov utilizados, essa situação é representada por uma falha dupla em elementos de rede. Quando as duas falhas são de enlace, o reparo de uma delas devolve a conexão ao estado operante. Porém, quando há uma falha de nó e uma falha de enlace, a conexão não deixa de ser necessariamente inoperante quando o enlace é reparado, pois a falha no nó continua a prejudicar a conexão (nas configurações simuladas, os caminhos de proteção e trabalho são disjuntos em enlaces, mas não necessariamente nos nós). Conseqüentemente, o MTTR da conexão calculado pela Equação 3.19 torna-se subestimado. O mesmo ocorre com o método simplificado, uma vez que ele utiliza o mesmo valor de MTTR.

5.3 Cenário 2

Neste cenário, o caminho de proteção divide capacidade com outras duas conexões. Os caminhos de trabalho, por sua vez, não compartilham capacidade. A fibra utilizada pelo caminho de trabalho possui diferentes características da fibra utilizada pelas demais conexões. As conexões são roteadas na rede italiana de acordo com a Tabela 5.2.

Os parâmetros assumidos são:

Parâmetros das Conexões - Cenário 2

Topologia da rede	Apêndice A
Taxa de falha das conexões (exceto em w)	200 FIT/km
Taxa de falha das conexões utilizadas por w	100 FIT/km
MTTR das conexões (exceto w)	6 horas
MTTR das conexões utilizadas por w	Variam conforme descrito na figura (6 e 20 horas)
Taxa de falha dos nós	Os nós não falham nesse cenário

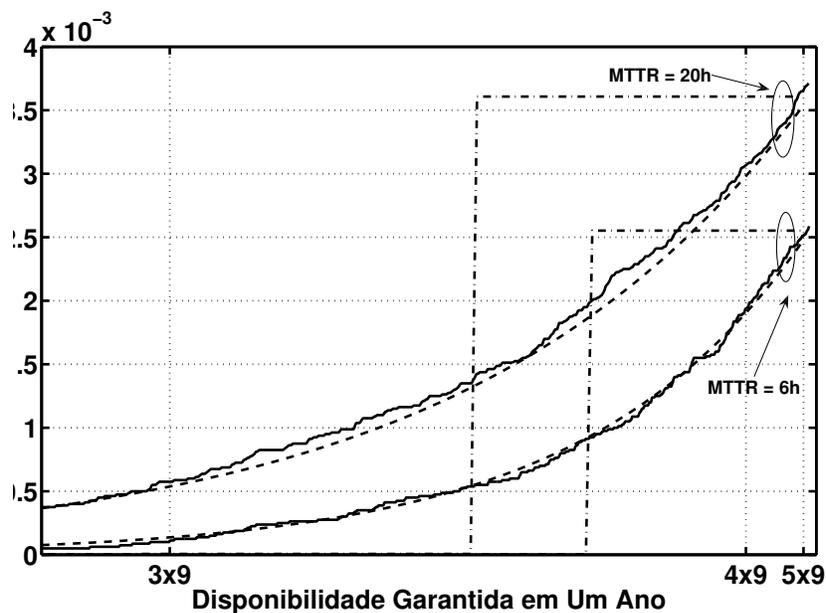


Figura 5.3: Cenário 2. Risco de não cumprimento da disponibilidade garantida no intervalo de um ano (3x9, 4x9 e 5x9 correspondem à disponibilidade de 0,999, 0,9999 e 0,99999 respectivamente). Simulação representada pela linha contínua, método simplificado pelo degrau contínuo e método novo pela linha pontilhada.

A Figura 5.3 apresenta os resultados do Cenário 2. O novo método apresenta um comportamento muito similar ao apresentado pela simulação numérica.

Tabela 5.3: Tabela de Conexões - Cenário 3

w	Fir-Rom-Nap-Pal
b	Fir-Per-Pes-Nap-Cat-Pal
Caminho 1 em <i>sg</i>	Bol-Fir-Pis-Rom-Cag-Pal
Caminho 2 em <i>sg</i>	Fir-Pis-Rom-Cag-Pal
Caminho de <i>Backup</i> 1	Bol-Anc-Pes-Bar-Pot-Catz-Cat-Pal
Caminho de <i>Backup</i> 2	Fir-Per-Pes-Nap-Pal

5.4 Cenário 3

Neste cenário, o caminho de proteção *b* compartilha capacidade com os caminhos de proteção de outras duas conexões. As conexões são roteadas de acordo com a Tabela 5.3.

Os parâmetros considerados são:

Parâmetros das Conexões - Cenário 3

Topologia da Rede	Apêndice A
Taxa de falha das Conexões	200 FIT/km
MTTR das Conexões	Variam conforme descrito na figura (6 horas e 20 horas)
Taxa de falha dos nós	Os nós não falham nesse cenário

A disponibilidade de intervalo para este cenário pode ser vista na Figura 5.4. O novo método comporta-se de modo muito similar ao apresentado pela simulação para os dois valores de MTTR, sugerindo que pode ser aplicado em redes que contenham fibras com diferentes características.

5.5 Cenário 4a

Neste cenário, as conexões são roteadas na NSFNet, de acordo com a Tabela 5.4

Os parâmetros considerados são:

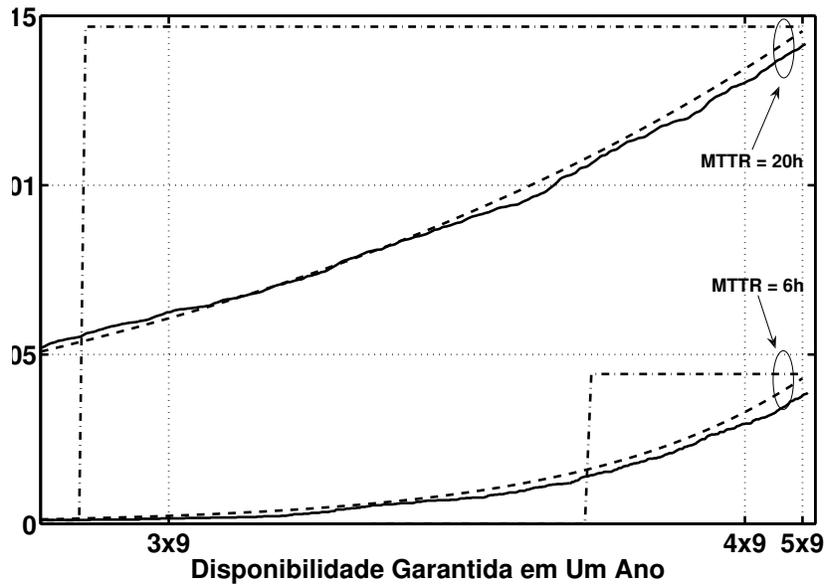


Figura 5.4: Cenário 3. Risco de não cumprimento da disponibilidade garantida no intervalo de um ano (3x9, 4x9 e 5x9 correspondem à disponibilidade de 0,999, 0,9999 e 0,99999 respectivamente). Simulação representada pela linha contínua, método simplificado pelo degrau contínuo e método novo pela linha pontilhada.

Parâmetros das Conexões - Cenário 4A

Topologia da Rede	Apêndice A
Taxa de falha das Conexões	314 FIT/km
MTTR das Conexões	Variam conforme descrito na figura (6 horas e 20 horas)
Taxa de falha dos nós	Os nós não falham nesse cenário

Os resultados das simulações são apresentados na Figura 5.5. Nota-se que há divergência entre os resultados encontrados pela simulação e pelo novo método, especialmente para valores maiores do MTTR. Isso decorre das falhas triplas, que ocorrem com maior probabilidade em uma rede com dimensões continentais como a NSFNet.

Tabela 5.4: Tabela de Conexões - Cenário 4A e 4B

w	10-14-18-24-23-22
b	10-9-12-16-22
Caminho 1 em <i>sg</i>	7-6-11
Caminho 2 em <i>sg</i>	11-19-20-21
Caminho 3 em <i>sg</i>	7-8
Caminho de <i>Backup</i> 1	7-9-12-11
Caminho de <i>Backup</i> 2	11-12-16-22-21
Caminho de <i>Backup</i> 3	7-9-10-8

5.6 Cenário 4B

Neste cenário, as conexões continuam a serem roteadas na NSFNet de acordo com a Tabela 5.4, entretanto, os nós agora podem falhar. Desta forma, consideramos os seguintes parâmetros:

Parâmetros das Conexões - Cenário 4B

Topologia da Rede	Apêndice A
Taxa de falha das Conexões	314 FIT/km
MTTR das Conexões	Variam conforme descrito na figura (6 horas e 20 horas)
Taxa de falha dos nós	5000 FIT
MTTR dos nós	2 horas

Os resultados deste cenário são apresentados pela Figura 5.6 e são semelhantes aos do cenário 5.5.

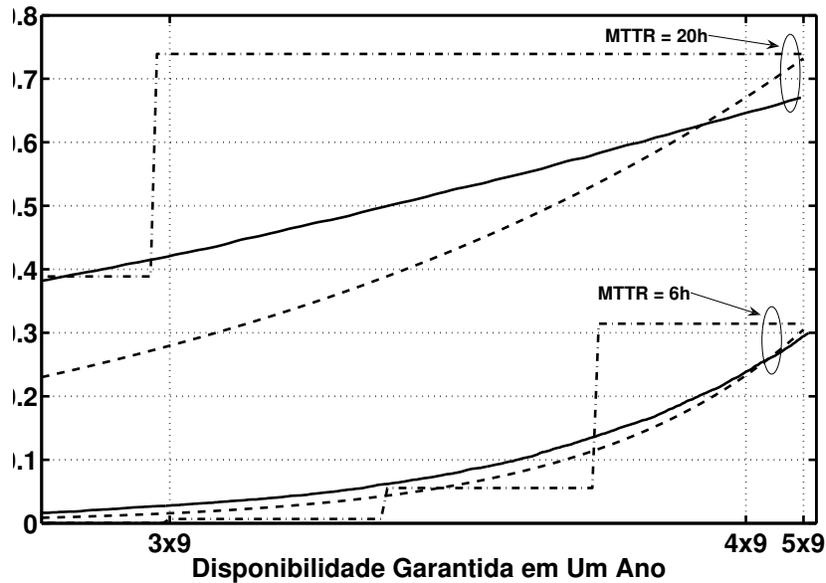


Figura 5.5: Cenário 4A. Risco de não cumprimento da disponibilidade garantida no intervalo de um ano (3x9, 4x9 e 5x9 correspondem à disponibilidade de 0,999, 0,9999 e 0,99999 respectivamente). Simulação representada pela linha contínua, método simplificado pelo degrau contínuo e método novo pela linha pontilhada.

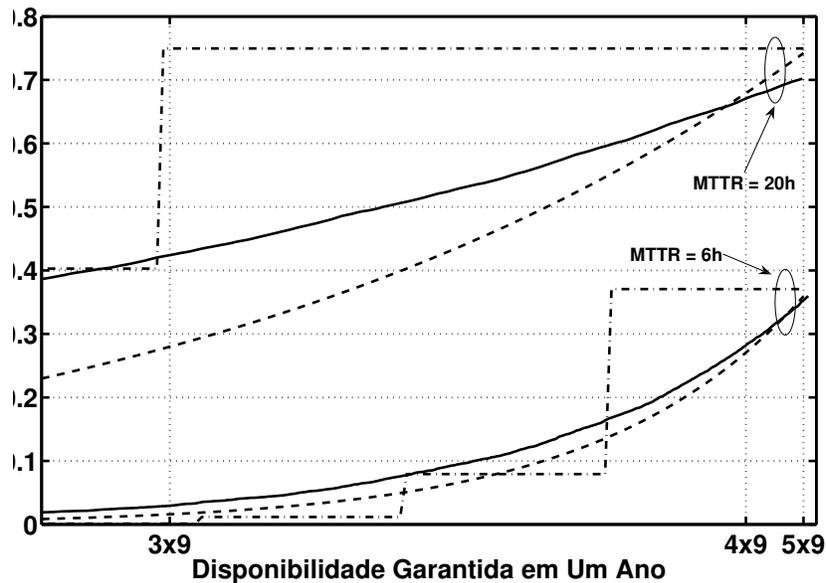


Figura 5.6: Cenário 4B. Risco de não cumprimento da disponibilidade garantida no intervalo de um ano (3x9, 4x9 e 5x9 correspondem à disponibilidade de 0,999, 0,9999 e 0,99999 respectivamente). Simulação representada pela linha contínua, método simplificado pelo degrau contínuo e método novo pela linha pontilhada.

Capítulo 6

Conclusão

Habilidade de sobrevivência é a aptidão de o sistema continuar operando na presença de falhas. Operadores de redes de telecomunicações podem dotar conexões de habilidade de sobrevivência valendo-se de mecanismos de proteção e restauração. Entretanto, aos clientes de serviços de conectividade é indiferente os mecanismos de sobrevivência adotados, desde que a conexão esteja funcionando quando lhes é conveniente. Nesse cenário, a disponibilidade surge como uma métrica interessante para pautar as relações entre provedores de serviço e usuários nos acordos de nível de serviço (SLAs). Aparece portanto o desafio de se calcular a disponibilidade. Para redes lineares, pode-se lançar mão das tradicionais regras de cálculo para sistemas série/paralelo. Mas as redes em malha com esquemas de proteção compartilhados necessitam de modelos mais refinados. A Referência [MSW05] utiliza cadeias de Markov para modelar a rede e calcular a disponibilidade das conexões com proteção compartilhada.

A disponibilidade, contudo, ainda não é a métrica ideal para ser utilizada em SLAs, uma vez que ela representa um valor esperado ao longo de um período de observação que tende ao infinito. Sabendo que os SLAs são firmados em janelas de tempo não maiores do que alguns meses, sugere-se a utilização de outra métrica, a disponibilidade de intervalo. Ela é a fração de tempo na qual uma conexão permanece operante dentro de uma janela de

observação finita. Em [MQWS06], apresentamos um método numérico para o cálculo da disponibilidade de intervalo. Esse método é suficientemente acurado, uma vez que se pode determinar o erro máximo tolerado (ele pode ser tão pequeno quanto se queira). Todavia, o método numérico demanda intenso esforço computacional, o que dificulta a sua aplicação prática. Uma segunda alternativa, proposta em [ZG05], assume que conexões têm tempo até a falha exponencial e tempo de reparo determinístico e conhecido. Ela calcula então a distribuição da disponibilidade de intervalo usando a distribuição de Poisson para o número de falhas, e aproximando o período total de inoperância pelo produto do tempo de reparo pelo número de falhas no período. Não há menção aos casos de proteção compartilhada.

Essa dissertação propõe um novo método que modela o estado de falhas da rede por cadeias de Markov, como proposto em [MSW05], e calcula a disponibilidade e o tempo médio de reparo (MTTR) das conexões. Utilizando esses parâmetros e assumindo que a conexão pode ser modelada por uma cadeia de Markov de dois estados (operante e inoperante) calcula-se a disponibilidade de intervalo. Essa aproximação é válida em redes de dimensões nacionais européias (nas quais falhas triplas em enlaces e falhas envolvendo um nó e um enlace são desprezíveis), em que o tempo de reparo das conexões é exponencialmente distribuído com média constante. Através de simulações de evento discreto, comparou-se o desempenho do método proposto e do método simplificado. Como resultado, constatou-se a elevada acurácia do novo método para as redes de dimensões nacionais européias nas quais os nós não falham, e os enlaces têm tempo de reparo exponencialmente distribuído e com mesma média. Na medida em que as redes ficam maiores, o novo método perde sua atratividade.

Apêndice A

Topologias

As topologias das redes NSFNet Ampliada e italiana foram extraídas das Referências [HWZ⁺04] e [AD00], respectivamente.

Como pôde ser observado no Capítulo 5, a probabilidade de falha de enlace é dada em FITs/km. Desta forma, as dimensões dos enlaces são muito importantes no comportamento da rede estudada. Optou-se por utilizar a Rede Italiana como exemplo de uma rede nacional (enlaces pequenos e conseqüentemente com menor probabilidade de falha) e a Rede NSFNet ampliada como exemplo de uma rede continental (enlaces maiores e conseqüentemente com maiores probabilidades de falha).

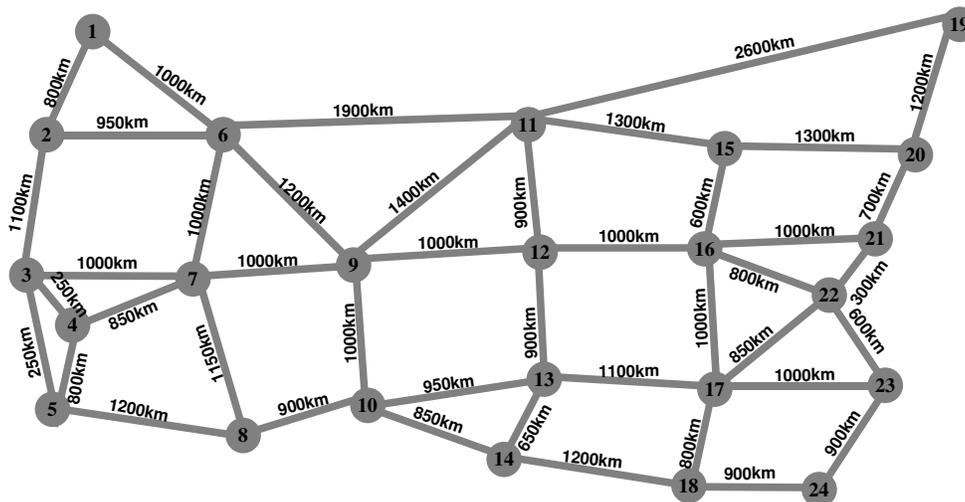


Figura A.1: Rete NSFNet.

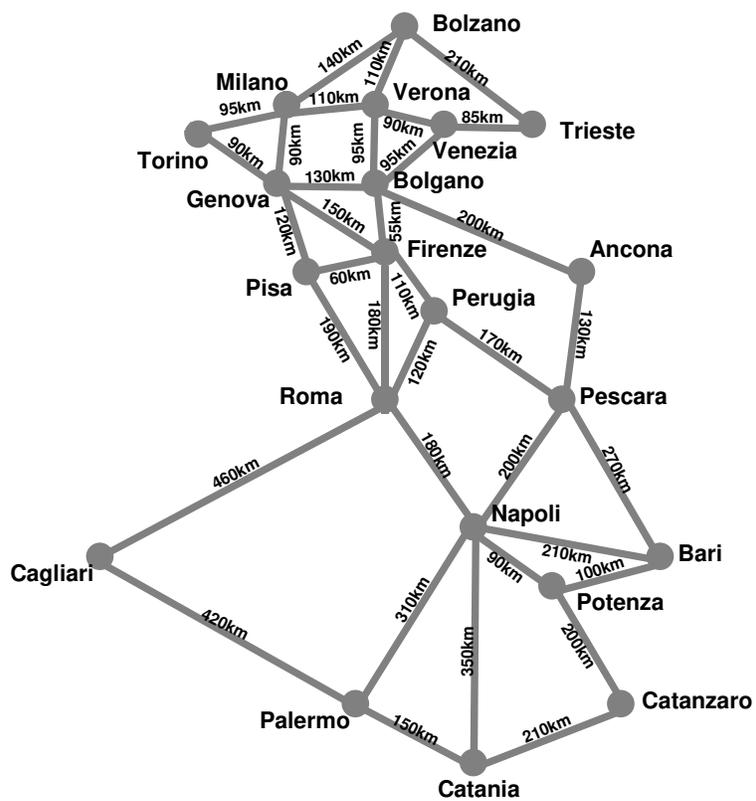


Figura A.2: Rete italiana.

Apêndice B

Cálculo dos Limitantes

Neste apêndice são apresentadas as equações para o cálculo de π_{E_i, E_j}^{LB} , π_{E_i, E_j}^{UB} , π_{E_i, E_j, E_k}^{LB} e π_{E_i, E_j, E_k}^{UB} .

$$\pi_{E_i, E_j} = \frac{\lambda_{E_j} P_{E_i} + \sum_{k \neq i, k \neq j} \mu_{E_k} (\pi_{E_i, E_j, E_k} + \pi_{E_k, E_i, E_j} + \pi_{E_i, E_k, E_j})}{\lambda_{E_T} - \lambda_{E_i} - \lambda_{E_j} + \mu_{E_i} + \mu_{E_j}}, \quad (\text{B.1})$$

$$\pi_{E_i, E_j, E_k} = \frac{\lambda_{E_k} \pi_{E_i, E_j} + \sum_{l \neq i, l \neq j, l \neq k} \mu_{E_l} (\pi_{E_l, E_i, E_j, E_k} + \pi_{E_i, E_l, E_j, E_k} + \pi_{E_i, E_j, E_l, E_k} + \pi_{E_i, E_j, E_k, E_l})}{\lambda_{E_T} - \lambda_{E_i} - \lambda_{E_j} - \lambda_{E_k} + \mu_{E_i} + \mu_{E_j} + \mu_{E_k}}. \quad (\text{B.2})$$

$$\pi_{E_i, E_j, E_k} + \pi_{E_k, E_i, E_j} + \pi_{E_i, E_k, E_j} \leq \frac{\lambda_{E_k} \pi_{E_i, E_j} + \lambda_{E_j} P_{E_k, E_i} + \sum_{l \neq i, l \neq j, l \neq k} \mu_{E_l} P_{E_i, E_j, E_k, E_l}}{\lambda_{E_T} - \lambda_{E_i} - \lambda_{E_j} - \lambda_{E_k} + \mu_{E_i} + \mu_{E_j} + \mu_{E_k}} \quad (\text{B.3})$$

$$\pi_{E_i, E_j, E_k} + \pi_{E_k, E_i, E_j} + \pi_{E_i, E_k, E_j} \geq \frac{\lambda_{E_k} \pi_{E_i, E_j} + \lambda_{E_j} P_{E_k, E_i}}{\lambda_{E_T} - \lambda_{E_i} - \lambda_{E_j} - \lambda_{E_k} + \mu_{E_i} + \mu_{E_j} + \mu_{E_k}} \quad (\text{B.4})$$

$$\pi_{E_i, E_j} \leq \pi_{E_i, E_j}^{UB} = \left[(\lambda_{E_T} - \lambda_{E_i} - \lambda_{E_j} + \mu_{E_i} + \mu_{E_j}) - \sum_{k \neq i, k \neq j} \frac{\lambda_{E_k} \mu_{E_k}}{\lambda_{E_T} - \lambda_{E_i} - \lambda_{E_j} - \lambda_{E_k} + \mu_{E_i} + \mu_{E_j} + \mu_{E_k}} \right]^{-1} \left[\lambda_{E_j} P_{E_i} + \sum_{k \neq i, k \neq j} \mu_{E_k} \frac{\lambda_{E_j} P_{E_k, E_i} + \sum_{l \neq i, l \neq j, l \neq k} \mu_{E_l} P_{E_i, E_j, E_k, E_l}}{\lambda_{E_T} - \lambda_{E_i} - \lambda_{E_j} - \lambda_{E_k} + \mu_{E_i} + \mu_{E_j} + \mu_{E_k}} \right] \quad (\text{B.5})$$

$$\pi_{E_i, E_j} \leq \pi_{E_i, E_j}^{UB} = \left[(\lambda_{E_T} - \lambda_{E_i} - \lambda_{E_j} + \mu_{E_i} + \mu_{E_j}) - \sum_{k \neq i, k \neq j} \frac{\lambda_{E_k} \mu_{E_k}}{\lambda_{E_T} - \lambda_{E_i} - \lambda_{E_j} - \lambda_{E_k} + \mu_{E_i} + \mu_{E_j} + \mu_{E_k}} \right]^{-1} \left[\lambda_{E_j} P_{E_i} + \sum_{k \neq i, k \neq j} \mu_{E_k} \frac{\lambda_{E_j} P_{E_k, E_i}}{\lambda_{E_T} - \lambda_{E_i} - \lambda_{E_j} - \lambda_{E_k} + \mu_{E_i} + \mu_{E_j} + \mu_{E_k}} \right] \quad (\text{B.6})$$

$$\pi_{E_i, E_j, E_k} \leq \pi_{E_i, E_j, E_k}^{UB} = \frac{\lambda_{E_k} \pi_{E_i, E_j}^{UB} + \sum_{l \neq i, l \neq j, l \neq k} \mu_{E_i} P_{E_i, E_j, E_k, E_l}}{\lambda_{E_T} - \lambda_{E_i} - \lambda_{E_j} - \lambda_{E_k} + \mu_{E_i} + \mu_{E_j} + \mu_{E_k}} \quad (\text{B.7})$$

$$\pi_{E_i, E_j, E_k} \leq \pi_{E_i, E_j, E_k}^{LB} = \frac{\lambda_{E_k} \pi_{E_i, E_j}^{LB}}{\lambda_{E_T} - \lambda_{E_i} - \lambda_{E_j} - \lambda_{E_k} + \mu_{E_i} + \mu_{E_j} + \mu_{E_k}} \quad (\text{B.8})$$

Apêndice C

Apêndice 3: Método Numérico

As linhas a seguir apresentam o método numérico proposto em [dSeSG86], que permite calcular a distribuição da disponibilidade de intervalo associada a qualquer cadeia de Markov que puder ser dividida em estados “operantes” ou “inoperantes”. Inicia-se o estudo deste método pela revisão do conceito de uniformização.

C.1 Uniformização

Suponha uma cadeia de Markov de tempo contínuo, na qual o tempo gasto em cada estado (Λ_i) é constante para toda a cadeia, ou seja, $\Lambda_i = \Lambda$ para todos os estados i . Neste caso, o tempo médio gasto em cada estado é exponencialmente distribuído, com taxa Λ . Portanto, o número de transições no tempo t , $N(t)$, é um processo poissoniano com taxa Λ .

Assim, o cálculo das probabilidades de transição P_{ij} pode ser vinculado a $N(t)$:

$$\begin{aligned}
P_{ij}(t) &= P\{X(t) = j | X(0) = i\} \\
&= \sum_{n=0}^{\infty} P\{X(t) = j | X(0) = i, N(t) = n\} P\{N(t) = n | X(0) = i\} \\
&= \sum_{n=0}^{\infty} P\{X(t) = j | X(0) = i, N(t) = n\} e^{-\Lambda t} \frac{(\Lambda t)^n}{n!}.
\end{aligned}$$

O fato de terem ocorrido n transições durante o tempo t oferece informações a respeito do tempo gasto em cada um dos n primeiros estados visitados. Uma vez que a distribuição de tempo é a mesma para todos os estados, e sabendo que $N(t) = n$:

$$P\{X(t) = j | X(0) = i, N(t) = n\} = P_{ij}^n \quad (\text{C.1})$$

em que, P_{ij}^n é a matriz de probabilidades de transição em n passos associada à cadeia de Markov contínua apresentada. Portanto, para $\Lambda_i = \Lambda$, tem-se:

$$P_{ij}(t) = \sum_{n=0}^{\infty} P_{ij}^n e^{-\Lambda t} \frac{(\Lambda t)^n}{n!} \quad (\text{C.2})$$

Entretanto, a suposição inicial, $\Lambda_i = \Lambda$, restringe a aplicação da Equação C.2, uma vez que nem sempre o tempo gasto em cada estado é constante. Uma maneira de solucionar este problema seria supor que as transições são realizadas com tempo médio constante, e que existem transições fictícias de um estado para ele mesmo. Supondo uma cadeia de Markov em que as taxas de transição Λ_i são limitadas por Λ de tal forma que,

$$\Lambda_i \leq \Lambda, \quad (\text{C.3})$$

para todo i . Uma vez no estado i , a taxa de transição real é Λ_i . Contudo pode-se supor que as transições ocorrem com taxa Λ , e somente Λ_i/Λ delas são reais. As demais transições são

fictícias. Portanto, toda cadeia de Markov que satisfizer a condição C.3 pode ser considerada um processo que passa um tempo exponencialmente distribuído (com taxa Λ) no estado i e faz transições para j com probabilidade P_{ij}^* . Logo,

$$P_{ij}^* = \begin{cases} 1 - \frac{\Lambda_i}{\Lambda} P_{ij}, & j = i; \\ \frac{\Lambda_i}{\Lambda} P_{ij} & j \neq i. \end{cases} \quad (\text{C.4})$$

Assim, a equação C.2 pode ser reescrita como:

$$P_{ij}(t) = \sum_{n=0}^{\infty} P_{ij}^{*n} e^{-\Lambda t} \frac{(\Lambda t)^n}{n!} \quad (\text{C.5})$$

em que, P_{ij}^* é a matriz de probabilidade de transição do processo uniformizado.

C.2 Propriedades dos processos poissonianos

Neste ponto, apresentam-se alguns resultados importantes das cadeias de Markov subordinadas a um processo poissoniano, na determinação do tempo cumulativo de operação (ou, equivalentemente, da distribuição de disponibilidade de intervalo) de um sistema passível de reparo.

Assume-se um processo poissoniano com taxa Λ , e a ocorrência de eventos (em instantes τ_i) em $(0, t)$. Tem-se que $0 < \tau_1 < \dots < \tau_n < t$.

Adicionalmente, assumem-se as variáveis U_1, \dots, U_n independentes e identicamente distribuídas em $(0, t)$ e $U(1), \dots, U(n)$ sua ordem estatística (valores ordenados de amostras de variáveis aleatórias independente e identicamente distribuídas). Tem-se que a distribuição conjunta de τ_1 (condicionada a n chegadas em um tempo t) é idêntica à distribuição conjunta de $U(i)$.

Definem-se $n + 1$ intervalos de tamanho Y_i (Figura C.1), em que $Y_1 = U(1), Y_2 = U(2) - U(1), \dots, Y_n = U(n) - U(n - 1), Y_{n+1} = t - U(n)$. Nota-se que Y_1, \dots, Y_{n+1} são variáveis aleatórias dependentes. Entretanto, sabe-se de [dSeSG86] que Y_1 é permutável. Logo,

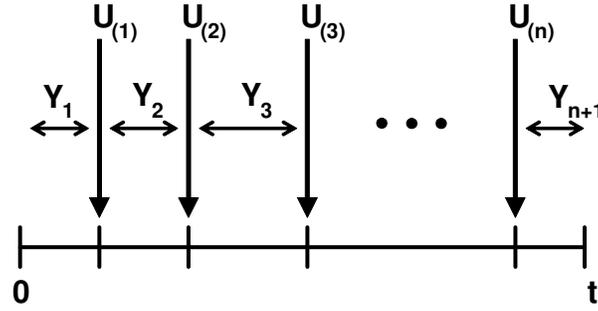


Figura C.1: Representação de intervalos de tamanho Y_i .

$$P[Y_1 \leq s_1, Y_2 \leq s_2, \dots, Y_{n+1} \leq s_{n+1}] = P[Y_{i_1} \leq s_{i_1}, Y_{i_2} \leq s_{i_2}, \dots, Y_{i_{n+1}} \leq s_{i_{n+1}}] \quad (\text{C.6})$$

para todas as permutações i_1, \dots, i_{n+1} de $1, \dots, n+1$.

Em seguida, apresentam-se dois resultados relacionados aos intervalos Y_1, \dots, Y_{n+1} que são conseqüências diretas da propriedade descrita acima.

1. Se $\langle Y_{i_1}, \dots, Y_{i_k} \rangle$ e $\langle Y_{j_1}, \dots, Y_{j_k} \rangle$ são duas seqüências de tamanho k , ambas possuem mesma distribuição conjunta. Note-se que fazendo $k = 1$, tem-se que $P[Y_i \leq s] = P[Y_j \leq s]$ para $1 \leq i, j \leq n+1$.
2. A distribuição da soma de qualquer $k \leq n$ de Y_i é igual à distribuição de $U_{(k)}$.

Aplicando-se os resultados apresentados acima:

$$P[Y_{i_1} + \dots + Y_{i_k} \leq s] = P[U_{(k)} \leq s] = \sum_{i=k}^n \binom{n}{i} \left(\frac{s}{t}\right)^i \left(1 - \frac{s}{t}\right)^{n-i}. \quad (\text{C.7})$$

C.3 Cálculo do Tempo Operacional Cumulativo

Com os resultados obtidos na seção C.2 e utilizando a interpretação física do processo de uniformização, pode-se obter o tempo operacional cumulativo de um sistema reparável por meio da cadeia de Markov que o modela.

O objetivo é determinar o tempo gasto em S_0 (conjunto dos estados operacionais) durante um determinado período $(0, t)$. Conforme mencionado anteriormente, a solução de um processo de Markov homogêneo pode ser reduzida, após uniformização, à solução de uma cadeia de Markov na qual o tempo entre as transições entre estados é determinado por um processo poissoniano.

Supondo que ocorram n transições durante o tempo t (equivalente a dizer que ocorreram n eventos do processo poissoniano), t pode ser dividido em intervalos Y_1, \dots, Y_{n+1} . Desta forma, conclui-se que o número de vezes que o processo visita estados operantes é $k \leq n + 1$ e o tempo operacional acumulado é igual ao somatório do tempo dos k intervalos operantes.

Formalizando, define-se um vetor aleatório $\widehat{Z} = \langle z_0, \dots, z_n \rangle$ e um conjunto $G_k \subseteq S^{n+1}$ de tamanho $n + 1$, em que cada elemento representa um dos k estados operacionais. Para um vetor qualquer $v \in G_k$, sendo $i_1(v), \dots, i_k(v)$ o índice de cada um dos k intervalos operacionais correspondentes a v , e sabendo que o processo poissoniano é independente da cadeia de Markov, tem-se a seguinte relação:

$$P[Y_{i_1(v)} + \dots + Y_{i_k(v)} \leq s \mid \widehat{Z} = v] = P[Y_{i_1(v)} + \dots + Y_{i_k(v)} \leq s] = P[Y_1 + \dots + Y_k \leq s] \quad (\text{C.8})$$

nota-se a utilização da propriedade da permutação apresentada na seção C.2. Para o tempo operacional do sistema, considera-se a variável $O(t)$.

$$\begin{aligned}
& P \left[O(t) \leq s \mid \begin{array}{l} \text{n mudanças de estados entre } (0,t), \\ \text{k estados operantes visitados} \end{array} \right] \\
&= \sum_{v \in G_k} P \left[O(t) \leq s \mid \begin{array}{l} \text{n mudanças de estados entre } (0,t), \\ \text{k estados operantes visitados} \end{array}, \widehat{Z} = v \right] \\
&\quad \cdot P \left[\widehat{Z} = v \mid \begin{array}{l} \text{n mudanças de estados entre } (0,t), \\ \text{k estados operantes visitados} \end{array} \right] \\
&= \sum_{v \in G_k} P[Y_{i_1(v)} + \dots + Y_{i_k(v)} \leq s \mid \widehat{Z} = v] \\
&\quad \cdot P \left[\widehat{Z} = v \mid \begin{array}{l} \text{n mudanças de estados entre } (0,t), \\ \text{k estados operantes visitados} \end{array} \right].
\end{aligned}$$

Utilizando a Equação C.8

$$\begin{aligned}
& P \left[O(t) \leq s \mid \begin{array}{l} \text{n mudanças de estados entre } (0,t), \\ \text{k estados operantes visitados} \end{array} \right] \\
&= \sum_{v \in G_k} P[Y_1 + \dots + Y_k \leq s] \\
&\quad \cdot P \left[\widehat{Z} = v \mid \begin{array}{l} \text{n mudanças de estados entre } (0,t), \\ \text{k estados operacionais visitados} \end{array} \right] \\
&= \sum_{v \in G_k} P[Y_1 + \dots + Y_k \leq s].
\end{aligned}$$

Relembrando que para $k \leq n$, tem-se que $Y_1 + \dots + Y_k = U_{(k)}$. Pela equação C.7:

$$\begin{aligned}
P \left[O(t) \leq s \left| \begin{array}{l} n \text{ mudanças de estados entre } (0,t), \\ k \text{ estados operantes visitados} \end{array} \right. \right] &= \\
&= \sum_{i=k}^n \binom{n}{i} \left(\frac{s}{t} \right)^i \left(1 - \frac{s}{t} \right)^{n-i}. \quad (C.9)
\end{aligned}$$

Definindo a variável $\Omega[n, k], 0 \leq k \leq n + 1$ como a probabilidade de a cadeia de Markov obtida após o processo de uniformização visitar k estados operacionais após n mudanças de estados:

$$\begin{aligned}
P \left[O(t) \leq s \left| n \text{ mudanças de estados entre } (0,t), \right. \right] &= \\
&= \sum_{k=0}^n \Omega[n, k] \sum_{i=k}^n \binom{n}{i} \left(\frac{s}{t} \right)^i \left(1 - \frac{s}{t} \right)^{n-i}. \quad (C.10)
\end{aligned}$$

Finalmente, desvinculando o número de mudanças de estados ao tempo t , tem-se:

$$P[O(t) \leq s] = \sum_{n=0}^{\infty} e^{-\Lambda t} \frac{(\Lambda t)^n}{n!} \sum_{k=0}^n \Omega[n, k] \sum_{i=k}^n \binom{n}{i} \left(\frac{s}{t} \right)^i \left(1 - \frac{s}{t} \right)^{n-i}, \quad (C.11)$$

em que v é a taxa do processo poissoniano obtida após uniformização. A Equação C.11 é utilizada para o cálculo da distribuição cumulativa do tempo operacional.

Observa-se que C.11 apresenta uma soma infinita. Entretanto, o cálculo do erro decorrente do truncamento desta soma pode ser calculado. Define-se $e(N)$ como o erro de truncamento:

$$e(N) = \sum_{n=N=1}^{\infty} e^{\Lambda t} \frac{(\Lambda t)^n}{n!} \sum_{k=0}^n \Omega[n, k] \sum_{i=k}^n \binom{n}{i} \left(\frac{s}{t}\right)^i \left(1 - \frac{s}{t}\right)^{n-i}. \quad (\text{C.12})$$

Sabendo que a parcela referente à Equação C.10 é sempre menor ou igual a um, vê-se que $e(N)$ satisfaz a seguinte condição:

$$e(N) \leq 1 - \sum_{n=0}^N e^{\Lambda t} \frac{(\Lambda t)^n}{n!}, \quad (\text{C.13})$$

em que N pode ser definido de acordo com o erro tolerado.

C.4 Cálculo de Ω

A complexidade da Equação C.12 encontra-se no cálculo de Ω . Com exceção de alguns casos particulares, não é possível obter uma fórmula fechada para Ω . Entretanto, a [dSeSG86] propõe um método numérico recursivo para este cálculo.

Primeiramente, define-se a variável $\Omega[n, k, a_i], 0 \leq k \leq n + 1$ como a probabilidade de a cadeia de Markov, obtida após o processo de uniformização, visitar k estados operacionais após n mudanças de estados e tendo a_i como o último estado visitado pela mesma.

Os estados assumidos pela cadeia de Markov podem ser divididos em dois subconjuntos distintos. Um subconjunto representando os estados operantes e o outro os estados inoperantes. Tem-se, assim, a seguinte definição:

$S_O = a_i, i = 1, \dots, L$, correspondente ao conjunto dos estados operantes,

$S_I = a_i, i = L + 1, \dots, M$, correspondente ao conjunto dos estados inoperantes,

$S_T = a_i, i = 1, \dots, M = S_O \cup S_I$, correspondente ao conjunto de todos os estados.

Considerando que a cadeia pode assumir estados pertencentes aos dois grupos distintos - operante (O) e inoperante (I) - se o último estado visitado pela cadeia (a_i) for um estado operante, $\Omega[n, k, a_i]$ depende dos valores anteriores $\Omega[n - 1, k - 1, a_j], j = 1, \dots, M$ para

incrementar seu contador de estados operantes k . Da mesma forma, se a_i for inoperante, $\Omega[n, k, a_i]$ depende somente dos valores anteriores $\Omega[n-1, k, a_j]$, $j = 1, \dots, M$ pois k não será incrementado.

Matematicamente, pode-se escrever:

$$\Omega[n, k, a_i] = \sum_{j=1}^M \Omega[n-1, k-1, a_j] P_{ji}, \quad (\text{C.14})$$

para a_i operante e

$$\Omega[n, k, a_i] = \sum_{j=1}^M \Omega[n-1, k, a_j] P_{ji}, \quad (\text{C.15})$$

para a_i inoperante.

A variável P é a matriz de probabilidade de transição correspondente à cadeia de Markov uniformizada. As condições iniciais das equações C.14 e C.15 são:

$$\Omega[0, 1, a_i] = \begin{cases} \pi_i(0), & \text{se } a_i \in O; \\ 0 & \text{para os demais casos.} \end{cases} \quad (\text{C.16})$$

$$\Omega[0, 0, a_i] = \begin{cases} \pi_i(0), & \text{se } a_i \in I; \\ 0 & \text{para os demais casos.} \end{cases} \quad (\text{C.17})$$

em que $\pi_i(0) = p_i(0)$. Finalmente,

$$\Omega[n, k] = \sum_{j=1}^M \Omega[n, k, a_j], \quad (\text{C.18})$$

corresponde à relação recursiva utilizada para o cálculo de C.12.

Pode-se definir os seguintes vetores:

$$\Omega_O[n, k] = \Omega[n, k, a_1], \dots, \Omega[n, k, a_L],$$

$$\Omega_I[n, k] = \Omega[n, k, a_{L+1}], \dots, \Omega[n, k, a_M],$$

$$\Omega_T[n, k] = \Omega[n, k, a_1], \dots, \Omega[n, k, a_M].$$

Tem-se portanto:

$$\Omega_O[n, k] = \Omega_S[n - 1, k - 1]P_O,$$

$$\Omega_I[n, k] = \Omega_S[n - 1, k]P_F.$$

Define-se também

$$P_O = [P_{i,j}], 1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq L,$$

$$P_I = [P_{i,j}], 1 \leq i \leq M, L + 1 \leq j \leq L.$$

as matrizes associadas às probabilidades de transições correspondentes. Para as condições iniciais da cadeia, considera-se o apresentado pelas equações C.16 e C.17.

O processo recursivo é demonstrado pela Figura C.2, na qual N representa o número de iterações necessárias para se atingir um erro menor ou igual a um limiar pré-definido (Equação C.13).

O vetor $\Omega[n, k, a_i]$ é representado por cada célula (n, k) e as setas indicam quais os valores anteriores a serem considerados na fórmula recursiva.

Assim, o valor de $\Omega[n, k, a_i]$, quando este é operante, depende somente dos valores da célula $(n - 1, k - 1)$ imediatamente acima de (n, k) . Ou seja, uma vez que o estado visitado

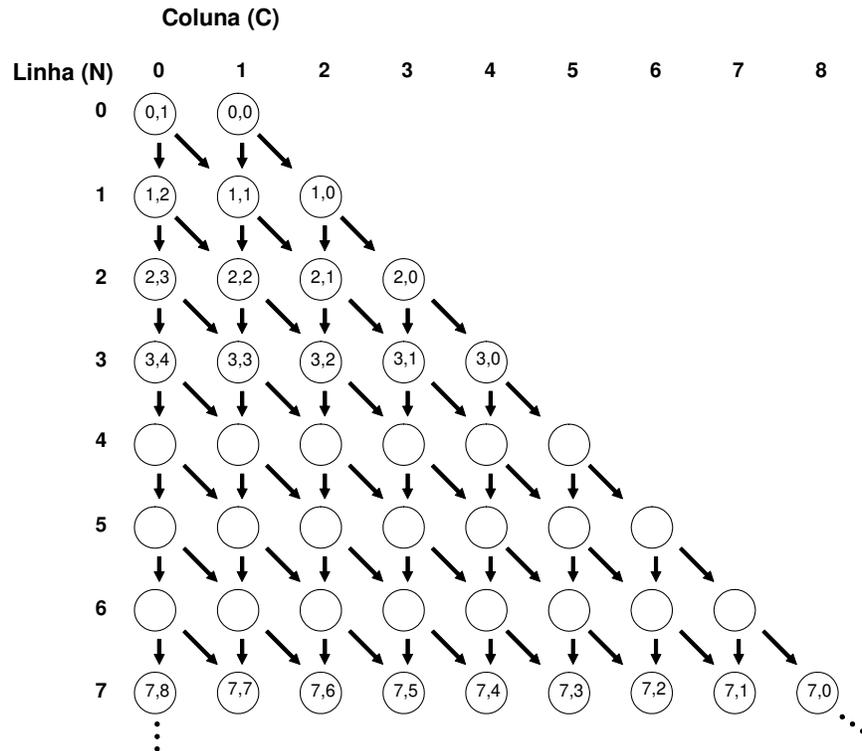


Figura C.2: Processo recursivo para o cálculo de $\Omega[n, k]$.

é operante, devemos incrementar o número de mudanças de estados n e o número de estados operacionais k . Essa operação equivale, na Figura C.2, à transição para o estado imediatamente abaixo.

Por outro lado, o valor de $\Omega[n, k, a_i]$, quando este é inoperante, depende somente dos valores da célula $(n - 1, k)$ imediatamente acima e à esquerda de (n, k) . Ou seja, devemos incrementar somente n . Esta operação equivale, na Figura C.2, à mudança para o estado imediatamente abaixo e à direita.

Podemos supor, sem perda de generalidade, que as redes ópticas permanecem operantes durante a maior parte do tempo. Assim, pode-se prever que a maioria dos estados visitados pela cadeia de Markov corresponde a estados operantes e que k tende a ser um valor próximo de n . A partir dessa constatação, em [dSeSG86], os autores demonstram não ser necessário calcular todos os estados apresentados pela Figura C.2 para se chegar ao erro desejado

(Equação C.13).

Ao invés de se calcular todas as colunas, reescreve-se a Equação C.13 como:

$$e'(N, C) \leq 1 - \sum_{c=0}^c \Omega[N, N - c + 1]. \quad (\text{C.19})$$

Apêndice D

Lista de Acrônimos

CDF Cumulative Distribution Function

DPP Dedicated Path Protection

FIT Failure in Time

LB Lower Bound

MTTF Mean Time to Failure

MTTR Mean Time to Repair

NSFNet National Science Foundation Network

P-Cycle Pre-Configured Cycle

PR Path Restoration

SBPP Shared Backup Path Protection

SGRP Sub-Graph Routing Protection

SLA Service Level Agreement

SLSP Short Leap Shared Protection

SP Span Protection

SR Span Restoration

SRLG Shared Risk Link Group

UB Upper Bound

Referências Bibliográficas

- [AD00] M. Ali and S. Deogun. Power-efficient design of multicast wavelength-routed networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications.*, 18:1852–1862, October 2000.
- [CG02] M. Clouqueur and W. D. Grover. Availability analysis of span-restorable mesh networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications.*, 20:810–821, May 2002.
- [Cra93] D. Crawford. Fiber optical cable dig-ups, causes and cures. In *Network reliability, a report to the nation - compendium of technical papers*, National Engineering Consortium, Chicago, June 1993.
- [dSeSG86] E. de Souza e Silva and H. Richard Gail. Calculating cumulative operational time distributions of repairable computer systems. *IEEE Transactions on Computers*, c-35(4):322–332, April 1986.
- [Ebe97] C. E. Ebeling. *An Introduction to Reliability and Maintainability*. McGraw-Hill, New York, NY, 1997.
- [FY94] K. Funaki and K. Yoshimoto. Distribution of total uptime during a given time interval. *IEEE Transactions in Reliability*, vol. 43(11):pp. 489–492, 1994.

- [HWZ⁺04] Y. Huang, W. Wen, J. Zhang, J. P. Heritage, and B. Mukherjee. A new link-state availability model for reliable protection in optical WDM networks. In *IEEE International Conference on Communications*, Paris, France, June 2004.
- [JH04] M. Jaeger and R. Huelsermann. Service availability of shared path protection in optical mesh networks. In *European Conference on Optical Communication*, Stockholm, Sweden, September 2004.
- [MQWS06] D. A. A. Mello, G. S. Quitério, H. Waldman, and D. A. Schupke. Specification of SLA survivability requirements for optical path protected connections. In *Optical Fiber Communication Conference and Exposition*, Anaheim, USA, March 2006.
- [MSW05] D. A. A. Mello, D. A. Schupke, and H. Waldman. A matrix-based approach to connection unavailability estimation in shared backup path protection. *IEEE Communications Letters*, 9(9):844–846, September 2005.
- [MW08] D. A. A. Mello and H. Waldman. Analytical bounds on the unavailability of protected connections in wdm optical networks. *IEEE Communications Letters*, vol.11(11), November 2008.
- [RS95] G. Rubino and B. Sericola. Interval availability analysis using denumerable Markov processes: application to multiprocessor subject to breakdown and repair. *IEEE Transactions on Computers*, 44(2):286–291, February 1995.
- [Tak57] L. Takács. On certain sojourn time problems in the theory of stochastic process. *Acta Mathematica Academiae Scientiarum Hungaricae*, vol. 8:pp. 169–191, 1957.
- [ZG05] L. Zhou and W. D. Grover. A theory for setting the “safety margin” on availability guarantees in an SLA. In *Design of Reliable Communication Networks*, pages 403–409, Ischia, Italy, October 2005.

- [ZM04] J. Zhang and B. Mukherjee. A review of fault management in WDM mesh networks: basic concepts and research challenges. *IEEE Network*, 18(2):41–48, March/April 2004.