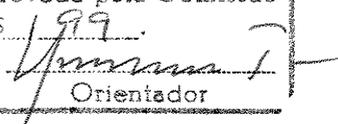


Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
Departamento de Engenharia de Sistemas

Este exemplar corresponde a redação final da tese
defendida por Roberto Yoshihiro
Nakamura e aprovada pela Comissão
Julgada em 02/06/99.

Orientador

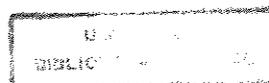
Planejamento de Anéis Unidirecionais da Hierarquia Digital Síncrona

Autor:
Roberto Yoshihiro Nakamura

Orientador:
Dr. Hermano de Medeiros F. Tavares

Banca Examinadora:
Dr. Hermano de Medeiros F. Tavares
Dra. Eunice Luvizotto Medina Pissolato
Dr. Akebo Yamakami

Tese de Mestrado - Junho de 1999



9916017

Ficha Catalográfica

UNIVERSIDADE	BC
N.º (23/0004)	
	UNICAMP
V.	N145p
TOMBO BC/	38453
PROC.	229/99
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	24/08/99
N.º CPD	

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

CM-00125587-6

N145p

Nakamura, Roberto Yoshihiro

Planejamento de anéis unidirecionais da hierarquia digital síncrona. / Roberto Yoshihiro Nakamura.-- Campinas, SP: [s.n.], 1999.

Orientador: Hermano de Medeiros F. Tavares.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Pesquisa operacional. 2. Programação linear. 3. Telecomunicações. I. Tavares, Hermano de Medeiros F.. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Resumo

Com o avanço tecnológico das telecomunicações, na área de transmissão, a Hierarquia Digital Síncrona (SDH) vem substituindo rapidamente a Hierarquia Digital Plesiócrona (PDH). Com isso, topologias de rede em anel são amplamente utilizadas. Este trabalho contribui para o planejamento de anéis unidirecionais SDH com um modelo matemático que aloca e dimensiona os equipamentos a serem utilizados, faz o roteamento de forma a atender à demanda de tráfego e minimiza os custos da rede. É utilizado um modelo de programação linear inteira mista em que o tráfego entre os nós da rede é representado por um fluxo multi-produto associado a uma matriz origem-destino e a rede é representada por um grafo. O modelo para interligação dos anéis unidirecionais é feito com restrições adicionais que utilizam variáveis reais e que é inédito na literatura. Serão apresentados também resultados de uma aplicação do modelo a duas redes urbanas.

Abstract

With the technological advance in telecommunications in the transmission area, Synchronous Digital Hierarchy (SDH) is replacing the Plesiochronous Digital Hierarchy (PDH). Thus, ring network topologies are being widely used. This work contributes for planning SDH unidirectional rings with a mathematical model, which allocates and dimensions the equipment to be used, makes the routing in order to meet traffic demand and minimize the network costs. A mixed integer linear programming model is used in which the traffic between network nodes is represented by a multicommodity flow associated to an origin-destination matrix, and the network is represented by a graph. The model for interconnecting unidirectional rings is made with additional constraints that use real variables and is unprecedented in the literature. Results of applications of the model to two urban networks will be also presented.

Agradecimentos

À minha família,
Mary, Mariza, Beatriz e André,

aos amigos e colegas do CPqD,
Argemiro, Claudia, João Luís, Loreno,
Trindade e tantos outros,

ao meu orientador,
Hermano,

agradeço o carinho e apoio que sempre recebi.

Índice

	página
Capítulo 1. Introdução Geral	1
1. Introdução	1
2. Sumário dos Capítulos	2
Capítulo 2. A Hierarquia Digital Síncrona	5
1. Introdução	5
2. Padronização Total	6
3. Facilidades de Derivação e Inserção de Tributários	11
4. Grande Capacidade para Gerência de Rede	12
5. Evolução das Redes de Transmissão	14
Capítulo 3. Técnicas Para Aumento de Disponibilidade em Redes da Hierarquia Digital Síncrona	15
1. Introdução	15
2. Restabelecimento	16
3. Proteção	17
3.1. Aspectos Gerais	19
3.1.1. Classes de Proteção	19
3.1.2. Arquiteturas de Proteção	19
3.1.3. Tipos de Comutação	21
3.1.4. Tipos de Roteamento	22
3.1.5. Modos de Operação	24
3.2. Principais Arquiteturas de Proteção	24
3.2.1. Proteção Linear de Seção de Multiplexação	24
3.2.2. Anéis	25
3.2.2.1. Anéis com Proteção Compartilhada de Seção de Multiplexação	27
3.2.2.2. Anéis com Proteção de SNC	31
3.2.2.2.1. Interligação de Anéis Unidirecionais	34
4. Dimensionamento de Anéis Unidirecionais	35
Capítulo 4. Modelo Matemático	37
1. Introdução	37
2. Apresentação do Modelo Matemático	38
3. Modelo para Redes Grandes	46
4. Evolução do Modelo	48
4.1. Interligação de 3 Anéis	49
4.2. Interligação de Anéis por 2 Nós	53
Capítulo 5. Aplicações do Modelo	57
1. Introdução	57
2. Maceió	58
3. Belo Horizonte	62
Capítulo 6. Conclusões	65
Capítulo 7. Referências Bibliográficas	67
Anexo. Abreviaturas	69

Capítulo 1.

Introdução Geral

1. Introdução

Desde 1991, aproximadamente, a Fundação CPqD que na época era o Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Telebrás, vem realizando projetos relacionados a Hierarquia Digital Síncrona (“Synchronous Digital Hierarchy” - SDH). Destes projetos, que ainda estão em andamento, os principais resultados obtidos foram:

A elaboração de documentos normativos, as Práticas da Telebrás, que foram amplamente discutidas pelas empresas operadoras do Sistema Telebrás e pelos fornecedores de equipamentos brasileiros. Atualmente, estes documentos que estão em constante evolução são a base para a regulamentação desta área pela Agência Nacional de Telecomunicações, a ANATEL

A construção de um laboratório que permite avaliar a conformidade dos equipamentos da SDH à regulamentação da ANATEL.

Preparação e apresentação de palestras em seminários e congressos e de cursos que disseminaram a cultura sobre o assunto em praticamente todo o Brasil. Foram e continuam sendo apresentados cursos para quase todas as operadoras do antigo Sistema Telebrás, cursos de especialização em várias Universidades e cursos em outras empresas, inclusive da iniciativa privada.

Consultorias para várias empresas operadoras para auxílio na preparação de seus editais de compra de sistemas SDH. Estas consultorias envolvem aspectos de especificação dos equipamentos para atendimento às normas em vigência, gerência, sincronismo e o planejamento de suas redes.

Como conseqüência destes projetos, desde 1992 têm sido gerados alguns artigos [1 a 6] e esta tese de mestrado.

Esta tese de mestrado é fruto de necessidades reais encontradas durante os trabalhos de consultoria fornecidos às empresas operadoras. Foi realizada com o objetivo de se obter uma ferramenta utilizável em situações práticas de planejamento de anéis unidirecionais da SDH. Sem esta ferramenta, todo o trabalho de planejamento teria que ser feito manualmente. O desenvolvimento desta ferramenta permite diminuir muito o tempo necessário para a realização do planejamento, além de aumentar a qualidade do resultado final.

2. Sumário dos Capítulos

O capítulo 2 apresenta uma visão geral do que é a SDH, apontando os principais aspectos que a tornam uma evolução para as redes de transporte em relação à sua antecessora, a Hierarquia Digital Plesiócrona. Estes aspectos são: a padronização total que é importante para viabilizar um ambiente multi-fornecedor de equipamentos de transmissão e de gerência; a variedade de tipos de equipamentos, que devido à facilidade com que realizam a derivação e inserção de tributários viabilizam novas arquiteturas de rede como anéis, malhas e cadeias; a maior capacidade de gerência de rede, necessária para atender os requisitos de qualidade dos novos serviços de telecomunicações.

No capítulo 3 são descritas as técnicas para aumento de disponibilidade em redes da SDH que são o restabelecimento e a proteção. É dada ênfase para as arquiteturas

de proteção que utilizam anéis unidirecionais cujo planejamento é o objeto central deste trabalho.

O modelo matemático para o planejamento de anéis unidirecionais é apresentado no capítulo 4. São discutidos seus detalhes e sua aplicação a redes de diferentes tamanhos. São apresentadas também evoluções para o modelo básico, que consideram a interligação de 3 anéis e a interligação de anéis por 2 nós.

Aplicações do modelo usando dados reais fornecidos por empresas operadoras são feitas para as redes metropolitanas de Maceió e Belo Horizonte, e são apresentadas no capítulo 5.

O capítulo 6 é de conclusões. Nele são resumidos os resultados obtidos durante a elaboração desta tese de mestrado.

No Anexo, estão as abreviaturas, com seus significados, utilizadas neste trabalho.

Capítulo 2.

A Hierarquia Digital Síncrona

1. Introdução

A evolução recente da tecnologia de telecomunicações, componentes, fibras ópticas e equipamentos não mudou substancialmente a topologia da rede de transmissão que até há poucos anos atrás utilizava os equipamentos apenas com a função de interligar um nó da rede a outro. Com esse propósito, a Hierarquia Digital Plesiócrona (“Plesyochronous Digital Hierarchy – PDH”), que utiliza principalmente equipamentos Terminais Multiplexadores (TMs), vinha se mostrando adequada.

No entanto, com a necessidade das redes modernas de aumentar a capacidade de transmissão para taxas da ordem de Gbit/s, oferecer serviços com qualidade elevada e atender ao cliente mais rapidamente e sob demanda, a PDH se mostrou limitada [4].

Uma das principais limitações é a padronização parcial de interfaces em geral e funcionalidades de gerência, que impossibilitam um ambiente multifornecedor de equipamentos de transmissão em uma mesma rede. Outra limitação importante é a dificuldade para se realizar a derivação e inserção de tributários a partir de um agregado de grande capacidade, o que torna pouco eficiente a utilização de topologias de rede como anéis, cadeias e malhas. Também é uma limitação a pequena capacidade de transmissão reservada para gerência de rede, insuficiente face aos requisitos de qualidade dos novos serviços.

A seguir são descritas as características da Hierarquia Digital Síncrona (“Synchronous Digital Hierarchy – SDH”) que mostram o grande avanço que essa hierarquia traz para as novas redes de transmissão.

2. Padronização Total

Um dos objetivos da SDH é permitir a convivência de vários fornecedores de equipamentos (ambiente multifornecedor) em uma mesma rede, tanto de transmissão quanto de gerência. Para atingir tal objetivo, o ITU-T (“International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector”) busca uma padronização completa da SDH que envolve taxas de bit, estrutura de quadro e de multiplexação, interfaces de tributários, interfaces de linha do sinal SDH, mecanismos de proteção, funcionalidades dos equipamentos de transmissão e gerência e interfaces de gerência.

Os níveis da SDH associados às suas designações e taxas de bit são apresentados na Tabela 1 [7]. Cada nível tem a taxa de bits e a capacidade de transmissão que é quatro vezes a do nível anterior. Há a padronização de um "sub-nível" com taxa de 51,84 Mbit/s, denominado STM-0 (“Synchronous Transport Module level 0”).

Nível SDH	Taxas (Mbit/s)	Designação
1	155,52	STM-1
4	622,08	STM-4
16	2488,32	STM-16
64	9953,28	STM-64

Tabela 1: Taxas de bit da SDH

Uma interface STM-N, N=1, 4, 16 ou 64, é definida pelas suas estruturas de quadro e de multiplexação. A estrutura de quadro especifica a função de cada um dos bytes que formam os STM-N e a estrutura de multiplexação o processo de formação do STM-N. Na formação do STM-N cada tributário é mapeado em um Container adequado. Ao Container é adicionado um “overhead” que o acompanha por toda a transmissão dentro da

rede SDH, dando origem a um Virtual Container (VC). Este “overhead” possui funções que possibilitam gerenciar a transmissão do VC.

A SDH, no Brasil, possui interfaces para os sinais de 2, 34 e 140Mbit/s da PDH. Cada STM-1 pode transmitir 63 tributários de 2Mbit/s ou 3 de 34Mbit/s ou 1 de 140Mbit/s ou ainda combinações de 2 e 34Mbit/s. A capacidade de um STM-N é N vezes maior que a de um STM-1. O STM-0 tem 1/3 da capacidade do STM-1.

A Tabela 2 associa os tributários da PDH aos VCs que os transmitem.

Tributário PDH (Mbit/s)	Virtual Container
2	VC-12
34	VC-3
140	VC-4

Tabela 2: Tributários PDH

O ITU-T também padronizou a forma como os feixes de células ATM serão transmitidos na SDH. De maneira genérica, a SDH pode ser vista como a camada física de transmissão para os sinais das redes PDH e para os sinais das redes ATM, sendo compatível com ambas.

A interface de linha STM-1 está padronizada para os meios óptico e elétrico, sendo utilizada também para enlace rádio. As interfaces STM-4, STM-16 e STM-64 estão padronizadas apenas para o meio óptico. A interface STM-0 é utilizada em enlace rádio e aplicações via satélite.

O ITU-T não padroniza a implementação dos equipamentos da SDH. Porém, todas as suas funcionalidades de transmissão e de gerência são padronizadas por uma descrição formal [8].

Há quatro tipos básicos de equipamentos: Terminal Multiplexador, Multiplexador com Derivação e Inserção (“Add and Drop Multiplexer – ADM”), Roteador

Síncrono (“Synchronous Digital Cross-Connect – SDXC”) e Regenerador. Todos estes equipamentos incluem a função de terminação de linha que nos equipamentos da PDH era realizada pelos equipamentos terminais de linha, por exemplo, equipamentos terminais de linha óptica ou rádio.

A Figura 1 mostra os tipos de equipamentos **Terminais Multiplexadores** os quais diferem apenas quanto ao tipo de tributário que pode ser SDH ou PDH.

Se a interface de agregado for STM-4 o equipamento pode possuir por exemplo, 252 tributários de 2Mbit/s, 12 de 34Mbit/s ou 4 de 140Mbit/s no caso da Figura 1 (a), ou então 4 STM-1s no caso da Figura 1 (b), ou 2 de 140Mbit/s e 2 STM-1s no caso da Figura 1(c).

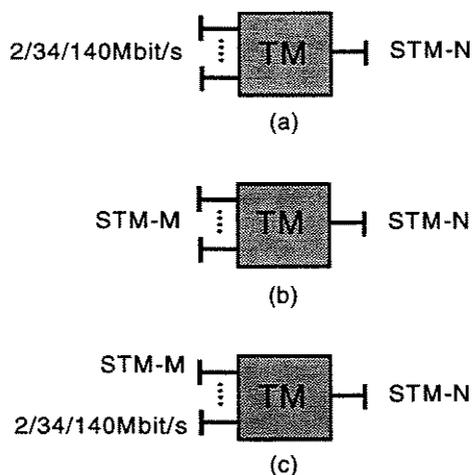


Figura 1: Tipos de TMs

A Figura 2 mostra como estes equipamentos poderiam se interligar em uma rede simples.

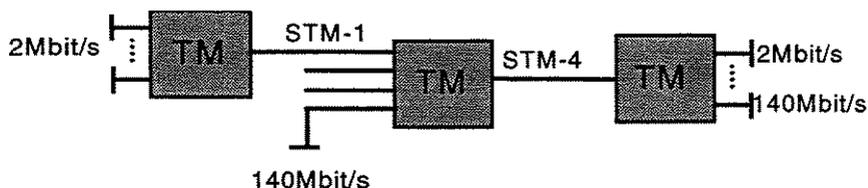


Figura 2: Exemplo de Aplicação de TMs

A Figura 3 mostra os tipos de equipamentos **Multiplexadores com Derivação e Inserção - ADM**. Estes equipamentos, como os Terminais, diferem quanto ao tipo de interface de tributário.

Como exemplo, equipamentos ADM com interface de sinal agregado STM-4 podem possuir derivação e inserção de 252 tributários de 2Mbit/s no caso do equipamento da Figura 3 (a), 4 tributários STM-1 no caso da Figura 3 (b) ou 2 tributários STM-1 e 126 tributários de 2Mbit/s no caso da Figura 3 (c). A figura 4 mostra a utilização destes equipamento em um anel.

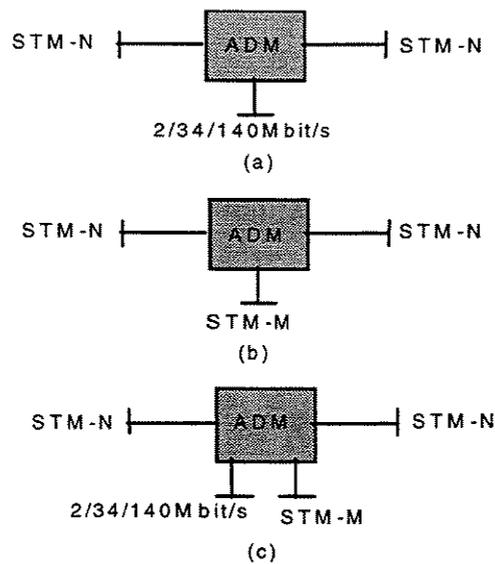


Figura 3: Tipos de ADMs

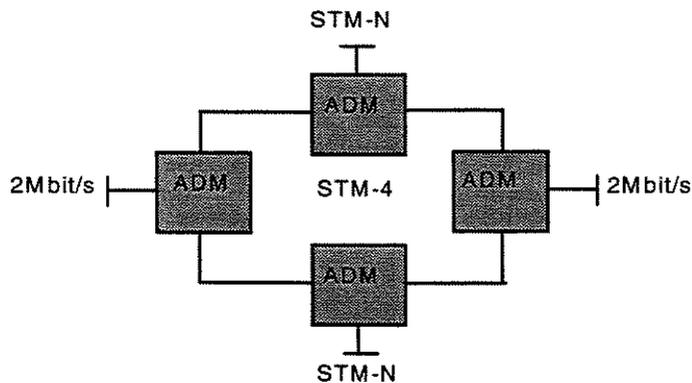


Figura 4: Exemplo de Aplicação de ADMs

Os equipamentos **Roteadores Síncronos - SDXC** realizam roteamento de tráfego em nível de VC. São definidos dois tipos de equipamentos SDXC o 4/4 e o 4/1. O equipamento 4/4 mostrado na Figura 5 (a) realiza roteamentos em nível de VC-4. O equipamento pode possuir várias interfaces de 140Mbit/s e STM-N. O equipamento 4/1 mostrado na Figura 5 (b) é mais flexível pois realiza roteamentos em nível menor do que VC-4, VC-12 e VC-3, por exemplo, podendo também rotear VC-4. O equipamento pode possuir várias interfaces de 2, 34 , 140Mbit/s e STM-N.

A figura 6 mostra uma aplicação de equipamentos roteadores na interligação de dois anéis. O SDXC torna flexível esta interligação.

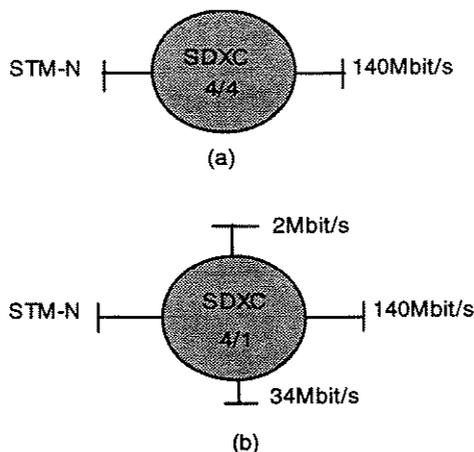


Figura 5: Tipos de SDXC

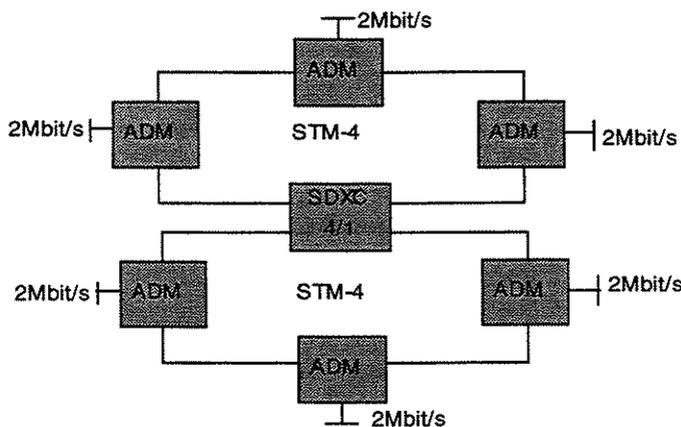


Figura 6: Exemplo de Aplicação de SDXC

A SDH possui mecanismos para aumentar a disponibilidade das redes de transmissão. Os mecanismos de proteção atuam automática e independentemente do operador da rede ou mesmo da gerência da rede. São padronizadas arquiteturas de proteção para redes com topologia linear ou em anel. Além dos mecanismos de proteção, são utilizados também mecanismos para restabelecimento de tráfego que são adequados para redes em malha com alto volume de tráfego. [9]

Na padronização de uma interface de gerência para um equipamento da SDH [10] devem ser considerados pelos menos três aspectos: o aspecto funcional de gerência, que apresenta quais funcionalidades existentes no equipamento devem ser gerenciadas e de que forma, o aspecto de informação, que modela as funcionalidades que devem ser gerenciadas estabelecendo a sintaxe e a semântica das mensagens que trafegarão na interface e o aspecto de comunicação, que define qual o perfil de protocolo ideal para atender ao aspecto funcional e ao aspecto de informação definidos. O ITU-T tem hoje padronizados o aspecto funcional de gerência e o aspecto de comunicação. Está completando a padronização do aspecto de informação através da especificação do Modelo de Informação que, em linguagem orientada a objetos, modela o aspecto funcional. Por não haver uma padronização completa das interfaces de gerência, ainda não é possível hoje se constituir um ambiente multifornecedor para a rede de gerência.

3. Facilidades de Derivação e Inserção de Tributários

A estrutura de quadro dos sinais STM-N possui características que facilitam a derivação e inserção de tributários. Estas facilidades fazem com que a rede SDH seja altamente flexível.

Estas facilidades de derivação e inserção permitem que sejam viabilizados os equipamentos ADM (“Add and Drop Multiplexer”) e o SDXC (“SDH Digital Cross-Connect”). Estes equipamentos possuem matrizes de conexão que podem receber todos os VCs contidos nas interfaces STM-N ou originados no nó onde o equipamento está

instalado. Através de um mapa de conexões programável, estas matrizes roteiam os VCs possibilitando encaminhá-los para os STM-N de saída ou derivá-los localmente.

A existência do ADM e do SDXC permite que topologias de rede mais flexíveis sejam implementadas, tais como cadeia de ADMs, anel e malha.

4. Grande Capacidade para Gerência de Rede

Cerca de 5 % da capacidade dos sinais da SDH é reservada para a transmissão de bytes de “overhead”. Esses bytes auxiliam a realização das funções de gerência da rede SDH. São definidos três níveis de “overhead”: o de Seção de Regeneração (RSOH), o de Seção de Multiplexação (MSOH) e o de Via (POH).

A rede SDH é vista pela gerência de rede como uma superposição de três camadas de gerência, que podem ser visualizadas na Figura 7, sendo que para cada camada está disponível um “overhead” específico. O POH está associado à camada de Via de Ordem Inferior ou Superior, o MSOH à camada de Seção de Multiplexação e o RSOH à camada de Seção de Regeneração.

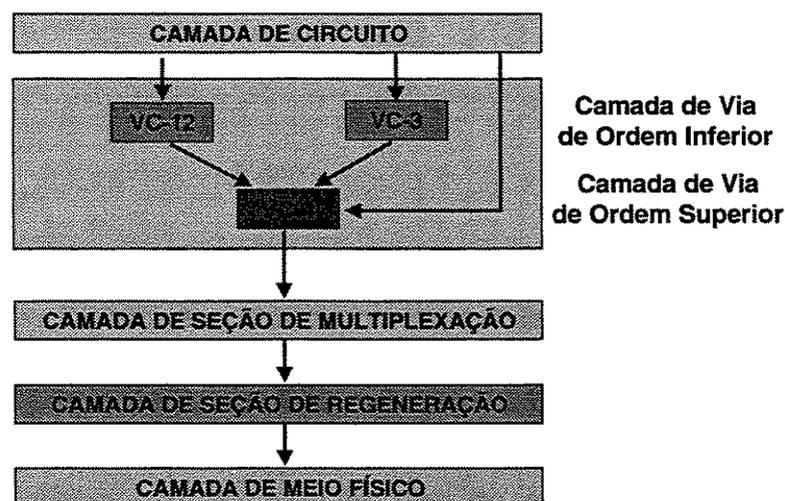


Figura 7: Modelo em Camadas da SDH

Uma Via é definida entre os pontos onde é montado e desmontado um VC. Para a gerência de Via, não importa qual o caminho físico percorrido pelo VC na rede SDH e sim os pontos onde o VC é montado (POH inserido) e desmontado (POH retirado). A Figura 8 mostra o exemplo de três Vias que transmitem sinais de 34Mbit/s em uma rede SDH.

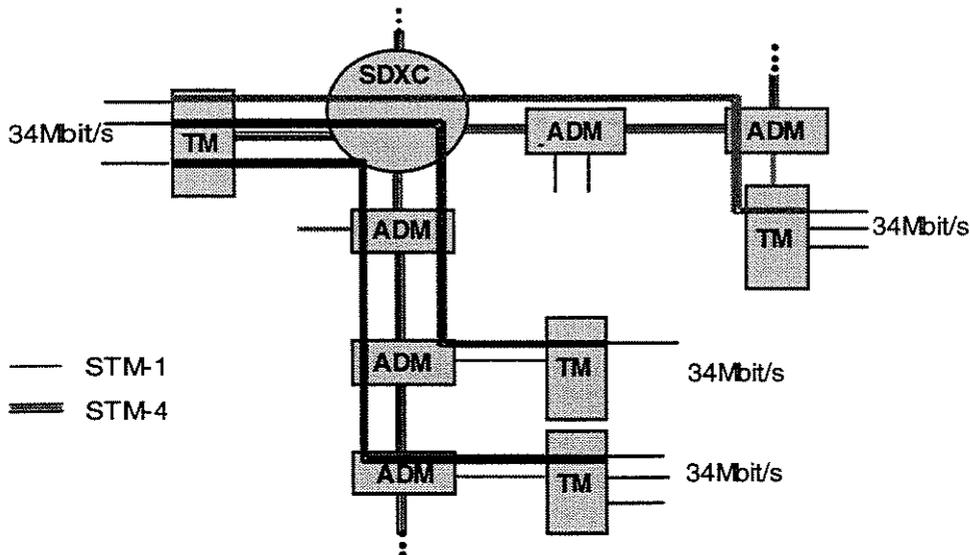


Figura 8: Exemplo de 3 Vias

Uma Seção de Multiplexação conecta dois equipamentos SDH adjacentes, excetuando-se regeneradores. Os regeneradores e o meio físico estão incluídos na Seção de Multiplexação. No equipamento onde é originado o sinal STM-N, é inserido um MSOH que passa transparentemente pelos regeneradores e é lido no equipamento ao qual o sinal se destina. Para a gerência de Seção de Multiplexação, não importa qual o caminho físico percorrido pelo sinal da SDH e sim os pontos onde o MSOH é inserido e retirado.

Uma Seção de Regeneração é o menor segmento que pode ser observado pela gerência de rede. É definida entre dois equipamentos quaisquer da SDH, incluindo regeneradores. Assim, uma Seção de Multiplexação pode ser formada por algumas Seções de Regeneração que são definidas pelo ponto onde o RSOH é inserido e o ponto onde o RSOH é retirado.

Na Figura 9 é mostrada, como exemplo, uma pequena rede à qual são associadas as Vias de Ordem Inferior de VC-3, que transmitem sinais de 34Mbit/s, as Vias de Ordem Superior de VC-4, as Seções de Multiplexação e as Seções de Regeneração. São mostrados também os “overheads” associados.

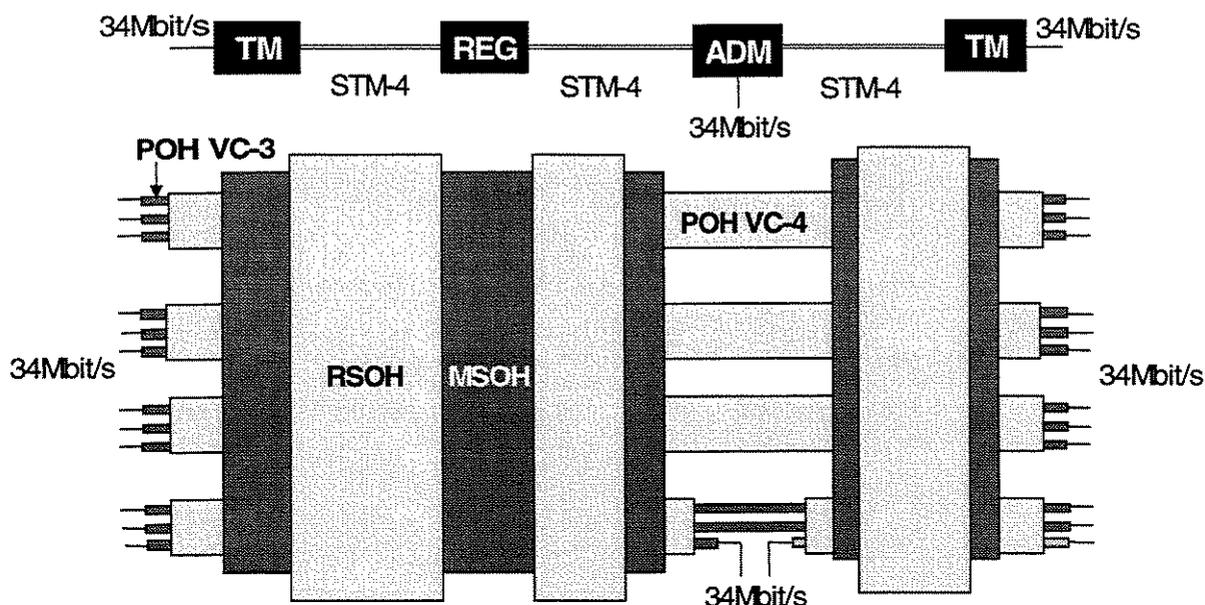


Figura 9: Exemplo de Vias e Seções de Multiplexação e de Regeneração

5. Evolução das Redes de Transmissão

As características da SDH que fazem com que essa hierarquia represente uma evolução significativa estão resumidas na Tabela 3.

	REDE ATUAL	REDE DA SDH
PADRONIZAÇÃO	PARCIAL	AMBIENTE MULTIFORNECEDOR
ARQUITETURA DE REDE	PONTO-A-PONTO	FLEXÍVEL E PROTEGIDA
CAPACIDADE PARA GERÊNCIA	POUCA	GRANDE

Tabela 3: Evolução das Redes de Transmissão

Capítulo 3.

Técnicas para Aumento de Disponibilidade em Redes da SDH

1. Introdução

As redes de telecomunicações evoluem rapidamente em direção a sistemas de maior capacidade com serviços especiais que exigem maior confiabilidade, com isto a questão da disponibilidade torna-se um fator importante. A disponibilidade de uma rede de transporte SDH pode ser definida, de forma simplificada, como a porção do tempo durante o qual esta rede suporta normalmente seu tráfego. Uma definição baseada em parâmetros mensuráveis pode ser encontrada na referência [11].

As principais estratégias que podem ser utilizadas para aumentar a disponibilidade da rede de transporte, através da substituição da entidade de transporte em falha ou degradada são: restabelecimento e proteção [12].

Estratégias de **restabelecimento** fazem uso de qualquer capacidade de transporte disponível entre os nós da rede. Os algoritmos usados envolvem re-roteamento do tráfego. Com o uso destas estratégias, uma porcentagem da capacidade da rede de transporte deve ser reservada para re-roteamento do tráfego principal.

Estratégias de **proteção** fazem uso de capacidade de transporte pré-determinada entre os nós da rede. A arquitetura mais simples possui uma entidade de transporte de

proteção dedicada para cada entidade principal (1+1). A arquitetura mais complexa possui m entidades de transporte de proteção compartilhadas por n entidades principais ($m:n$, $m \leq n$).

2. Restabelecimento

Estratégias de restabelecimento de tráfego envolvem a utilização de equipamentos com capacidade de realizar "cross-connections". Estas estratégias podem ser classificadas de acordo com as seguintes técnicas de implementação: controle do processo de restabelecimento (centralizado ou distribuído), nível de restabelecimento do sinal (enlace ou via), planejamento do enlace ou via alternativa (pré-planejado ou dinâmico).

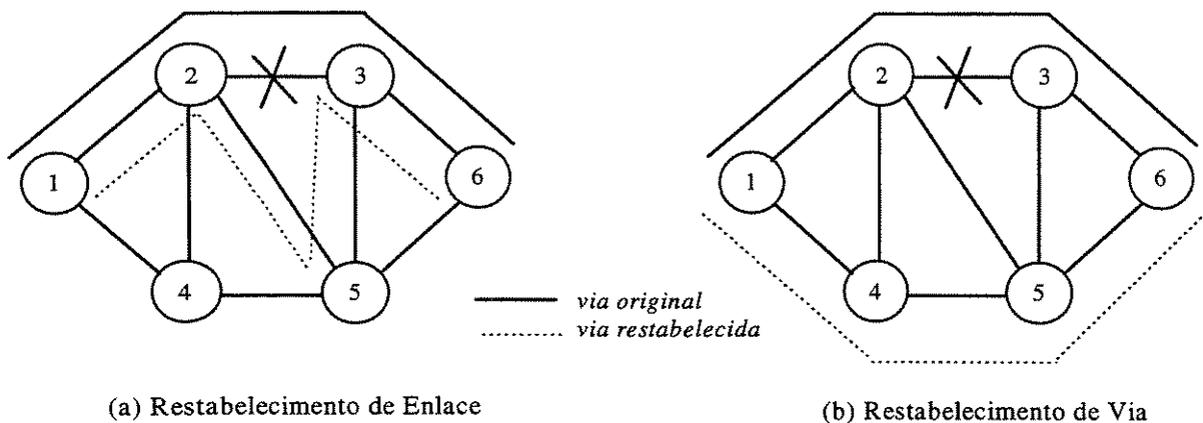
Na estratégia que utiliza controle centralizado há um controlador central que concentra informações sobre mapas de conectividade e facilidades de transporte reservadas de todos os nós da rede. Quando ocorre uma falha, o controlador central é informado e escolhe o enlace ou via alternativa baseado nas últimas informações sobre a rede.

Na estratégia que utiliza controle distribuído é necessário um controlador para cada equipamento com capacidade de realizar "cross-connections". Este controlador pode ser externo ou interno ao equipamento. Cada controlador armazena a capacidade das facilidades de transporte em uso e reservadas de cada enlace que chega ao equipamento. Quando uma falha é detectada, um dos equipamentos afetados começa a procurar enlaces ou vias alternativas para restabelecer o tráfego afetado usando informações locais armazenadas em cada um dos equipamentos. Nesta estratégia não é usado nenhum controlador central.

Quando é utilizado o restabelecimento de enlace, todas as facilidades de transporte em uso que passam por uma Seção de Multiplexação em falha são re-roteadas através de uma única rota alternativa que restabelece as facilidades de transporte entre as

terminações da Seção de Multiplexação em falha. A Figura 1 (a) mostra um exemplo de restabelecimento de enlace.

Quando é utilizado o restabelecimento de via, cada uma das facilidades de transporte que passam pela Seção de Multiplexação em falha é re-roteada através de uma rota alternativa que restabelece as facilidades de transporte entre seus pontos de terminação. A Figura 1 (b) mostra um exemplo de restabelecimento de via.



(a) Restabelecimento de Enlace

(b) Restabelecimento de Via

Figura 1: Nível de Restabelecimento do Sinal

No método pré-planejado o controlador, central ou do equipamento, possui todas ou a maioria das informações relacionadas à reestruturação da rede para todos os cenários de falha pré-planejados.

No método dinâmico o controlador toma a decisão de re-roteamento com base nas condições da rede (configuração, capacidade reservada, tipo de falha, etc...) no momento da falha.

3. Proteção

Proteção é definida como o uso da capacidade reservada entre os nós da rede com o objetivo de substituir uma entidade de transporte degradada ou em falha [9]. Duas

classes de proteção são identificadas: Proteção de Trilha e Proteção de Conexão de Sub-Rede (“Sub-Network Connection – SNC”). A comutação de Proteção de um sinal, através da redundância de equipamentos e da ação da comutação, faz com que no evento de falha de uma Trilha/SNC principal o sinal correspondente esteja disponível em uma Trilha/SNC de Proteção. Para a SDH, em redes com proteção, tem-se como Trilha a Via de Ordem Inferior, a Via de Ordem Superior e a Seção de Multiplexação. Uma SNC representa um segmento de Trilha.

As Figuras 2 e 3 mostram exemplos de Proteção de Trilha, que neste caso é uma via, e de SNC, que neste caso é um segmento de via, respectivamente.

No exemplo da Figura 2 a informação é transmitida em duas vias distintas, uma que é utilizada em situação normal e a outra que é utilizada em caso de necessidade de proteção. No exemplo da Figura 3 a informação é protegida apenas em um segmento da via, a SNC, que neste caso é transmitida por um anel.

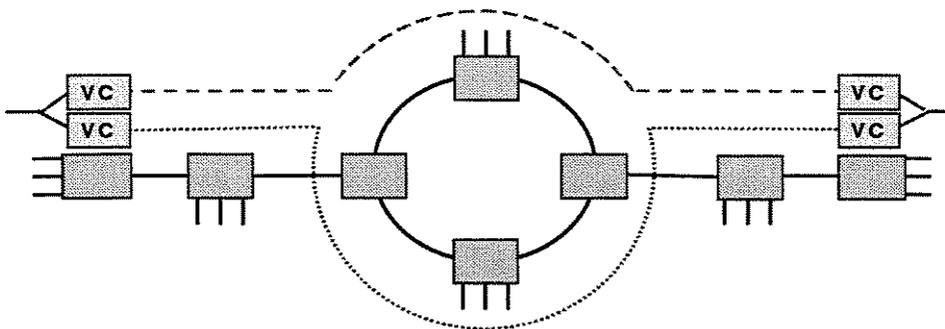


Figura 2: Exemplo de Proteção de Trilha

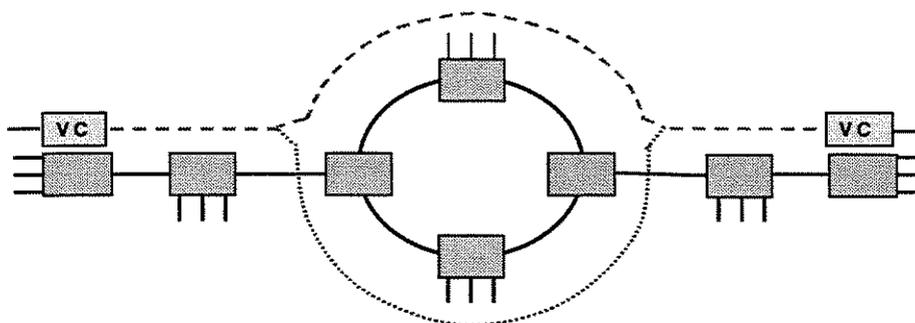


Figura 3: Exemplo de Proteção de SNC

3.1 Aspectos Gerais

Nos itens a seguir são definidos alguns aspectos comuns aos esquemas de proteção da SDH.

3.1.1. Classes de Proteção

Proteção de Trilha: uma Trilha principal, em caso de falha ou degradação de desempenho, é substituída por uma Trilha de proteção.

Proteção de SNC: uma SNC principal, em caso de falha ou degradação de desempenho, é substituída por uma SNC de proteção.

3.1.2. Arquiteturas de Proteção

Duas arquiteturas são definidas: 1+1 (um mais um) e 1:n (um para n).

Arquitetura 1+1 (Figura 4):

Em uma arquitetura 1+1, o sinal STM-N ou VC-n (canal principal) é transmitido simultaneamente em duas Trilhas/SNCs chamadas de principal e de proteção. Assim, na transmissão o sinal é permanentemente conectado (tornado paralelo) nas Trilhas/SNCs principal e de proteção. A função de comutação automática de proteção na recepção monitora as condições dos sinais recebidos das duas Trilhas/SNCs e seleciona o sinal apropriado, realizando a comutação quando necessário.

Recomendam-se rotas fisicamente independentes para as Trilhas/SNCs principal e de proteção para que haja proteção efetiva contra falhas na rota física.

Devido ao paralelamente permanente do canal principal, a arquitetura 1+1 não permite o envio de um canal de tráfego extra (dados não prioritários e portanto não protegidos) através da Trilha/SNC de proteção.

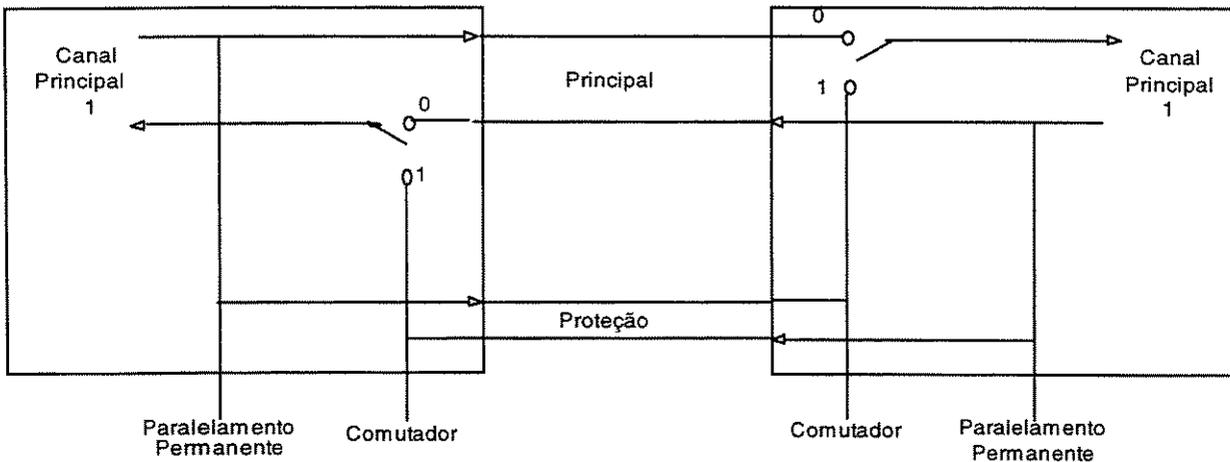


Figura 4: Arquitetura de Proteção 1 + 1

Arquitetura 1:n (Figura 5):

Em uma arquitetura 1:n, a Trilha/SNC de proteção é compartilhada por n canais principais. Os valores de n permitidos vão de 1 a 14 para o caso de Seção de Multiplexação.

Nos dois terminais (local e remoto) qualquer um dos canais principais ou um canal de tráfego extra (ou possivelmente um sinal de teste) pode ser conectado à Trilha/SNC de proteção. O par de funções de comutação automática monitora e avalia as condições dos sinais recebidos e realiza o paralelamente e comutação do sinal apropriado para a Trilha/SNC de proteção.

O tráfego da Trilha/SNC de proteção é descartado em caso de necessidade de proteção.

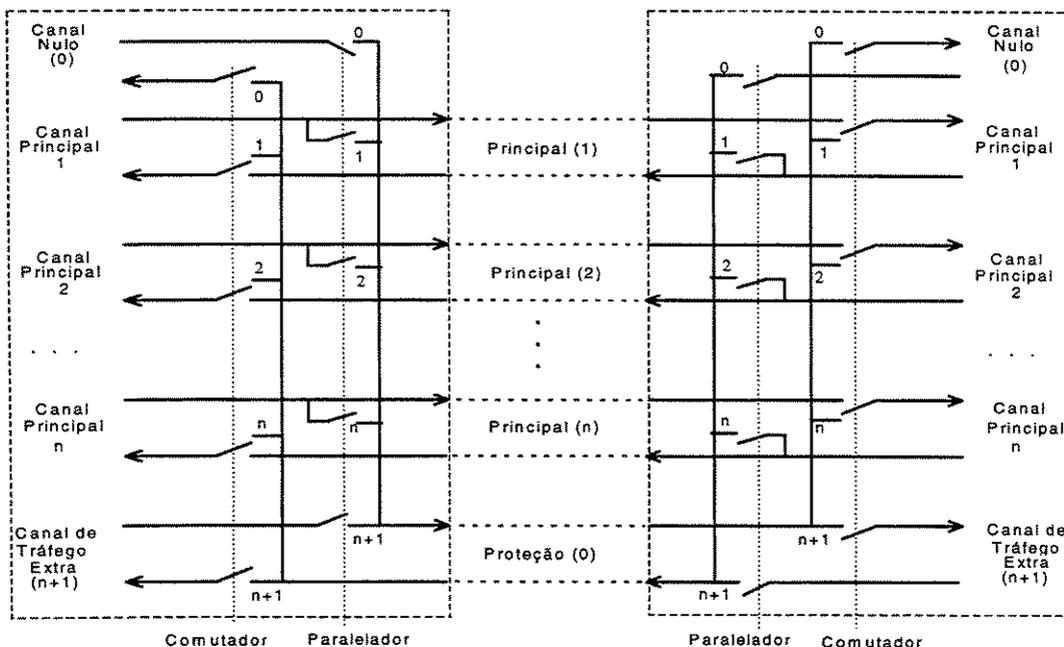


Figura 5: Arquitetura de Proteção 1 : n

3.1.3. Tipos de Comutação

A comutação de Proteção de Trilha/SNC pode ser bidirecional ou unidirecional.

Na **comutação bidirecional** o sinal é comutado para a Trilha/SNC de proteção nos dois sentidos de transmissão e é requerido um canal de comunicação entre as duas pontas da Trilha/SNC. Este canal de comunicação é denominado canal de comutação de proteção automática (“Automatic Protection Switching - APS”). As duas pontas da Trilha/SNC comunicam-se para iniciar a transferência do sinal. Pode ser transportado tráfego extra (não prioritário) na Trilha/SNC de proteção quando esta não estiver protegendo tráfego principal.

Em **comutação unidirecional** a comutação se completa quando o canal no sentido com falha é comutado para a Trilha/SNC de proteção. Não há necessidade de um canal APS. Pode ser mais rápida que a comutação bidirecional pelo fato de não requerer um protocolo APS.

3.1.4. Tipos de Roteamento

Quanto ao tipo de roteamento, há o uniformemente distribuído e o diversamente distribuído.

No **uniformemente distribuído** o tráfego nos dois sentidos de transmissão passa pelos mesmos equipamentos da rede.

No **diversamente distribuído** o tráfego em um sentido de transmissão passa por um conjunto de equipamentos e o tráfego de sentido oposto passa por um outro conjunto de equipamentos.

As Figuras 6 a 9 mostram exemplos de aplicações em rede combinando os dois tipos de comutação (unidirecional e bidirecional) e os dois tipos de roteamento (uniforme e diversamente distribuído).

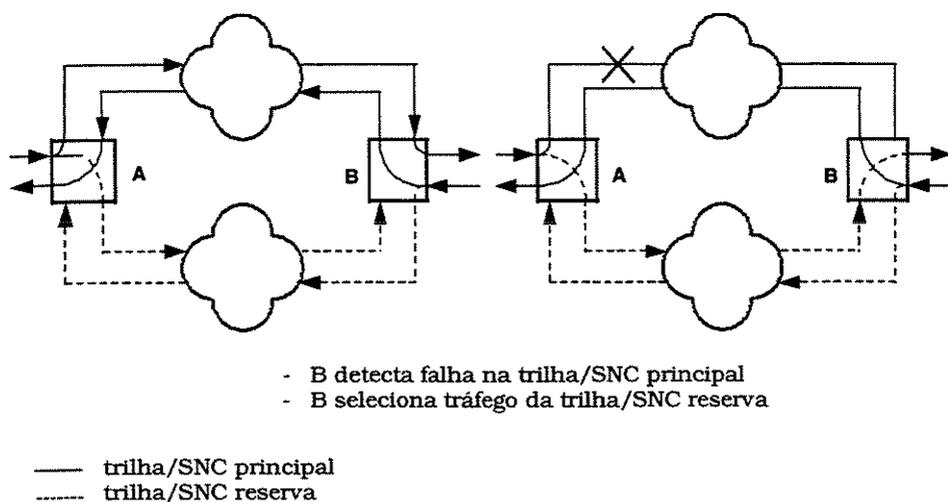


Figura 6: Comutação Unidirecional: 1+1 Uniformemente Distribuído

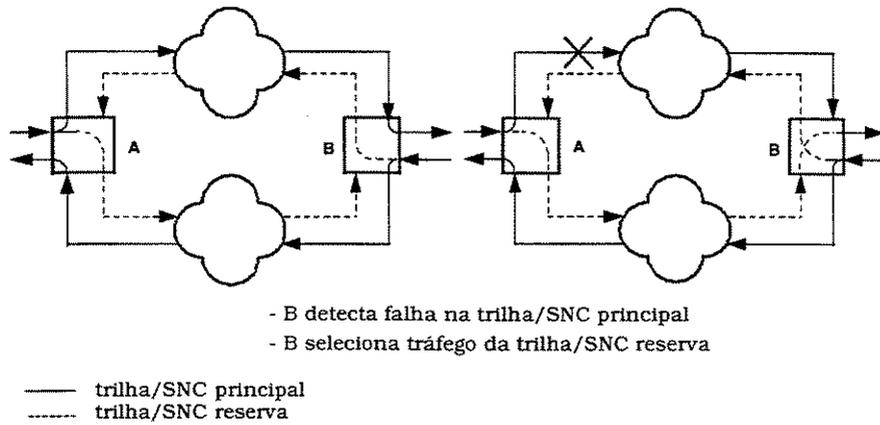


Figura 7: Comutação Unidirecional: 1+1 Diversamente Distribuído

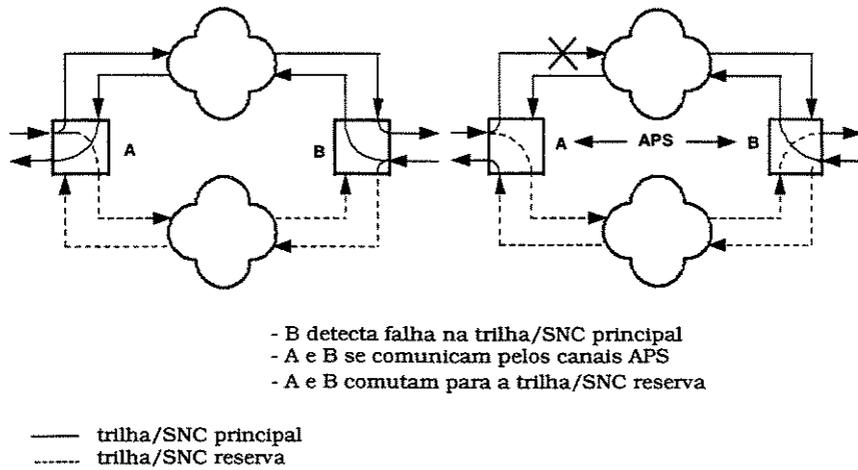


Figura 8: Comutação Bidirecional: 1+1 Uniformemente Distribuído

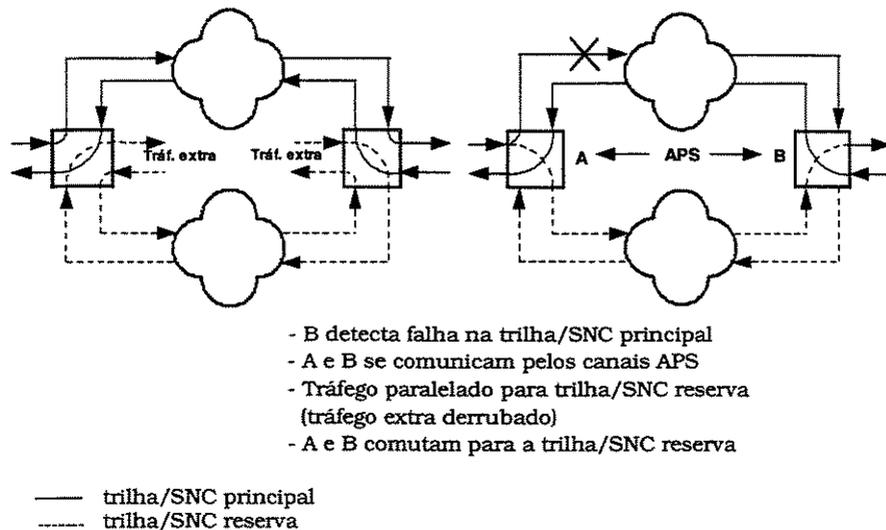


Figura 9: Comutação Unidirecional: 1:1 Uniformemente Distribuído

3.1.5. Modos de Operação

A operação pode ser reversível ou não-reversível.

Na **operação reversível**, o canal principal é comutado de volta para a Trilha/SNC principal correspondente quando cessar o pedido de comutação, isto é, quando a Trilha/SNC principal recuperar-se do defeito ou extinguir-se o pedido externo de comutação. Para arquiteturas 1:n somente o modo reversível é permitido.

Na **operação não-reversível**, a comutação é mantida mesmo após a eliminação da falha na Trilha/SNC principal.

3.2. Principais Arquiteturas de Proteção

A seguir serão discutidas as arquiteturas de proteção com maior aplicação nas redes que estão sendo implantadas atualmente.

Além das arquiteturas abordadas existem também a Proteção de Via de Ordem Inferior, a Proteção de Via de Ordem Superior e o Anel com Proteção Dedicada de Seção de Multiplexação [9] que não têm aplicação prática atualmente.

3.2.1. Proteção Linear de Seção de Multiplexação

A Proteção Linear de Seção de Multiplexação protege a camada de Seção de Multiplexação e aplica-se a redes físicas ponto-a-ponto. Não provê proteção contra falhas em nós. A Proteção Linear de Seção de Multiplexação restabelece todo o tráfego (exceto tráfego extra) que tenha sido interrompido devido a falha de uma Seção de Multiplexação do enlace protegido.

Há dois tipos de arquitetura 1+1 e 1:n. Na arquitetura 1:n, o protocolo de comutação acomoda até 14 seções principais e pode ser transportado tráfego extra na Seção de Multiplexação de proteção.

A comutação pode ser unidirecional ou bidirecional.

Para arquitetura 1+1, os modos de operação reversível e não reversível são providos. Para arquitetura 1:n, somente o modo de operação reversível se aplica.

3.2.2. Anéis

Os sistemas de transmissão por fibra óptica desempenham um papel fundamental nas redes de telecomunicações devido a seu baixo custo, alta capacidade e qualidade de serviço. A utilização econômica da alta capacidade da fibra frequentemente leva à utilização de redes em estrela. O nó central da estrela é encarregado de rotear o tráfego entre os outros nós. No entanto, este tipo de arquitetura é vulnerável a quebras do cabo óptico e a falhas nos nós, principalmente do nó central.

A SDH viabiliza redes em anel devido à fácil realização de funções de derivação/inserção em um sinal agregado de alta velocidade. Anéis podem ser implementados de modo a garantir 100% de disponibilidade do serviço, mesmo em casos de quebra de cabos de fibra óptica ou de falha nos nós sem a necessidade de interferência da TMN ("Telecommunications Management Network"), pois os mecanismos de comutação são automáticos e embutidos nos equipamentos.

Um anel é formado por um conjunto de nós dispostos de forma que cada nó é conectado a dois nós adjacentes através de uma comunicação duplex. Um anel tem capacidade de transmissão e/ou equipamentos redundantes de forma a assegurar a continuidade do serviço após a detecção de uma falha no anel.

O anel pode ser classificado, de acordo com o mecanismo de proteção, como Anel com Proteção de Seção de Multiplexação e Anel com Proteção de SNC.

Os Anéis com Proteção de Seção de Multiplexação utilizam as indicações de eventos de falha da Seção de Multiplexação para efetuar a comutação. Em caso de falha de uma Seção de Multiplexação é utilizada a de proteção. A coordenação da comutação é feita pelo protocolo APS.

Os Anéis com Proteção de Seção de Multiplexação com aplicação prática, atualmente, são os com proteção compartilhada, os com proteção dedicada, como já foi comentado, são pouco usados.

Nos anéis que utilizam Proteção de SNC, a configuração mais utilizada na prática é a com arquitetura 1+1 em que o canal principal é enviado por duas SNCs distintas, uma no sentido horário e outra no sentido anti-horário. No nó de recepção, há uma seleção entre os dois VCs associados às duas SNCs, baseada na monitoração e detecção de falha e/ou degradação no equipamento multiplexador com deriva-insere (ADM). A Proteção de SNC independe da implementação da Proteção da Seção de Multiplexação e pode independe da utilização do protocolo de APS.

A aplicação de um ou outro tipo de anel depende, entre outros fatores, do padrão de demanda de tráfego, ou seja, da forma como o tráfego se distribui na rede. Dependendo do padrão de demanda de tráfego, a máxima carga que pode ser transportada por um Anel com Proteção Compartilhada de Seção de Multiplexação pode exceder a que um Anel com Proteção de SNC pode transportar, para a mesma interface STM-N e o mesmo número de fibras no anel. Isto dá aos Anéis com Proteção Compartilhada de Seção de Multiplexação uma vantagem de capacidade de transporte, exceto nos casos em que o padrão de demanda de tráfego é centralizado, ou seja, todo o tráfego da rede é destinado a um único nó do anel, neste caso, são equivalentes aos Anéis com Proteção de SNC [5, 13, 14]. Na prática, o padrão de demanda centralizado é encontrado em redes de acesso, na

interligação de uma central com seus estágios de linha remotos, ou ainda na interligação de centrais locais a centrais trânsito .

3.2.2.1. Anéis com Proteção Compartilhada de Seção de Multiplexação

Anéis com Proteção Compartilhada de Seção de Multiplexação (“Multiplex Section Shared Protection Ring - MS SPRING”) a duas fibras (MS SPRING/2) necessitam apenas de duas fibras para cada arco do anel. Cada fibra transporta tanto canais principais quanto de proteção. Sobre cada fibra, metade dos canais são definidos como principais e metade de proteção (Figura 10). Os canais principais em uma fibra são protegidos através dos canais de proteção que trafegam na direção oposta do anel. Isto permite o transporte bidirecional do tráfego principal. Somente um conjunto de canais de “overhead” é usado em cada fibra.

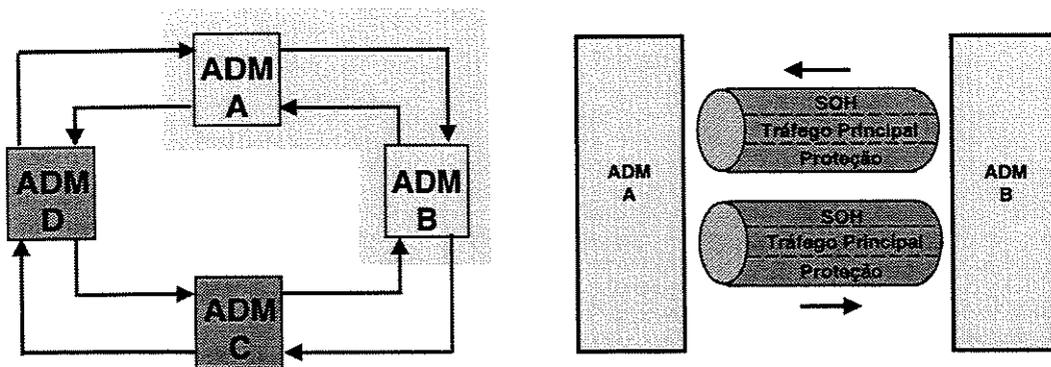


Figura 10: Visão Detalhada de Anel com MS SPRING/2

Anéis MS SPRING/4 necessitam de quatro fibras para cada arco do anel. Os canais principais e de proteção são transportados sobre fibras diferentes: duas Seções de Multiplexação transmitindo em direções opostas transportam os canais principais enquanto outras duas, também transmitindo em direções opostas, transportam os canais de proteção (Figura 11). Isto permite o transporte bidirecional do tráfego principal. O “overhead” da Seção de Multiplexação é dedicado para cada canal principal ou de proteção uma vez que os canais principais e de proteção não são transportados sobre as mesmas fibras.

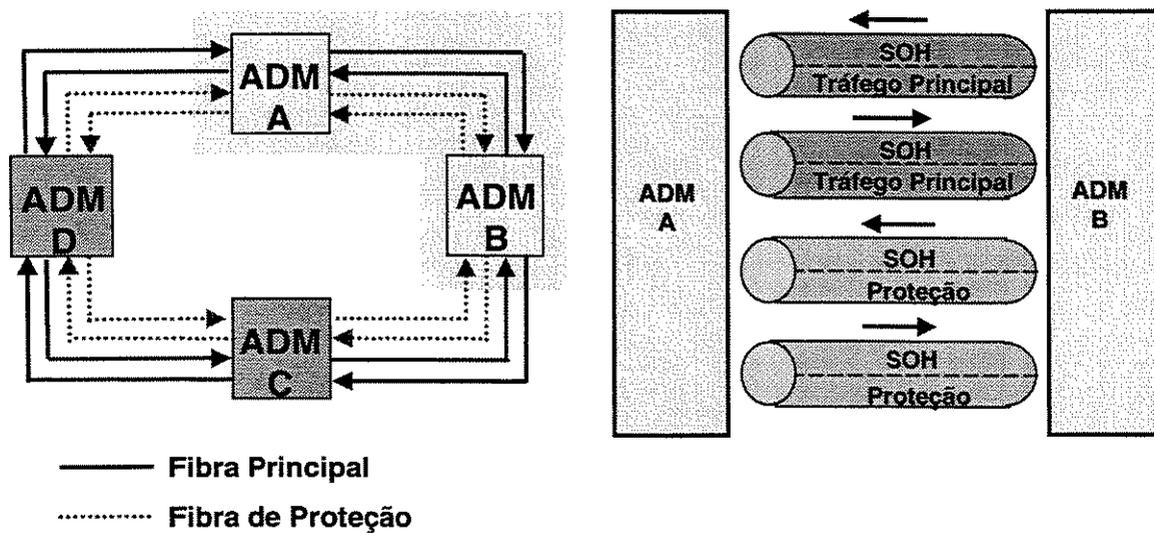


Figura 11: Visão Detalhada de Anel com MS SPRING/4

Em um MS SPRING, os grupos de VC-4s que trafegam no arco entre dois nós adjacentes são divididos em canais principais e de proteção. No caso de anéis a duas fibras, o sinal STM-N pode ser visto como a multiplexação de $N \times VC-4$, onde os VC-4s são numerados de 1 a N segundo a ordem em que são multiplexados. Os VC-4s numerados de 1 a $N/2$ são designados canais principais e os VC-4s numerados de $(N/2)+1$ até N são designados canais de proteção. Além disto, o canal principal m será protegido pelo canal de proteção $(N/2)+m$. Por exemplo, um sinal STM-4 pode ser considerado a multiplexação de quatro VC-4s numerados de um a quatro. Os VC-4s numerados um e dois são designados canais principais e os VC-4s numerados três e quatro são designados canais de proteção. Isto se aplica às duas direções de transmissão e a todos os nós. No caso de anel a quatro fibras, cada sinal STM-N principal e de proteção é transportado em fibras separadas.

A partir da perspectiva de um nó de um anel a quatro fibras, há dois canais de proteção para um dado canal principal: um caminho-curto sobre o arco usado na comutação de arco e um caminho-longo sobre todos os arcos do anel usados na comutação de anel. Com a comutação de arco, cada arco em um anel a quatro fibras pode comportar-se de modo similar a um sistema com proteção linear 1:1. Portanto, falhas que afetem apenas os canais principais e não os canais de proteção podem ser restabelecidas usando uma

comutação de arco. Anéis a quatro fibras usam comutação de arco sempre que possível para que múltiplas comutações de arco possam coexistir. Portanto, comutação de arco tem prioridade sobre comutação de anel para pedidos de paralelamento do mesmo tipo (por exemplo: Falha de Sinal, Degradação de Sinal, Comutação Forçada). A Figura 12 ilustra um exemplo de comutação de arco. Uma comutação de arco de prioridade inferior não será mantida no evento de um pedido de paralelamento de anel de prioridade superior. Um anel a duas fibras usa somente comutação de anel para restabelecer o tráfego.

Um MS SPRING/4 pode operar de modo similar a uma cadeia linear de ADMs quando não conectados como um anel contínuo, usando apenas comutação de arco para proteger o tráfego. Esta configuração pode existir porque um segmento isolado de anel pode ser estabelecido antes que todos os arcos estejam completamente operacionalizados.

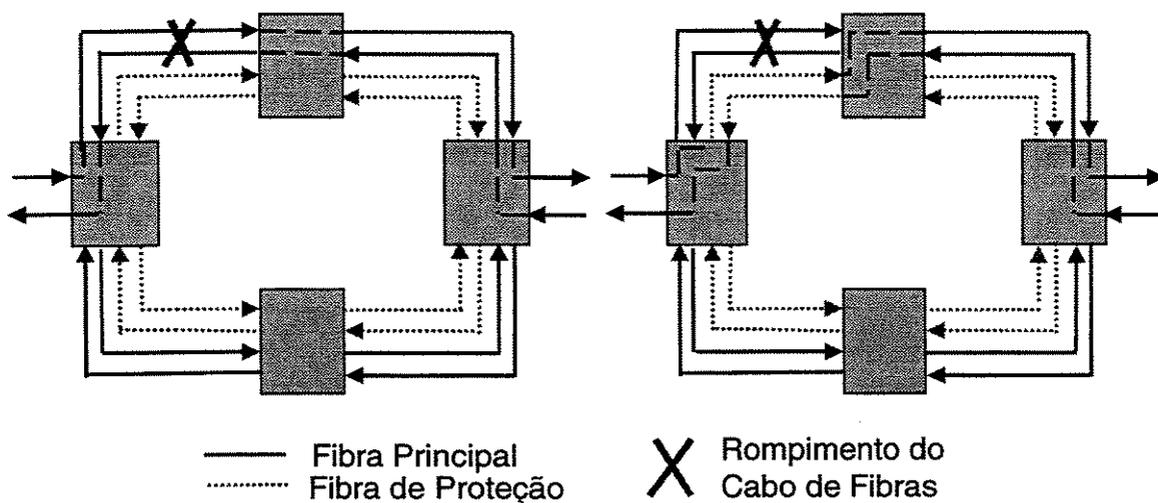


Figura 12: Comutação de Arco em Anel com Proteção MS SPRING/4

Como exemplo para ilustrar o processo de comutação, considere-se um anel consistindo de quatro nós, A, B, C e D, onde o arco entre B e C está em falha. Em um anel a duas fibras, o nó B tornará paralelo os canais VC-4 numerados de 1 a $N/2$ (principais) que estavam sendo transmitidos de B para C para os canais VC-4 numerados de $(N/2)+1$ a N (proteção) sendo transmitidos de B para A, estes alcançarão C percorrendo o anel. Esta ação é denominada paralelamento. O nó C comuta os canais de proteção recebidos de B através de A de volta para os canais principais em direção ao nó D. Esta ação é denominada

comutação. A Figura 13 ilustra o exemplo acima mostrando como seria o re-roteamento da tráfego entre os nós B e D.

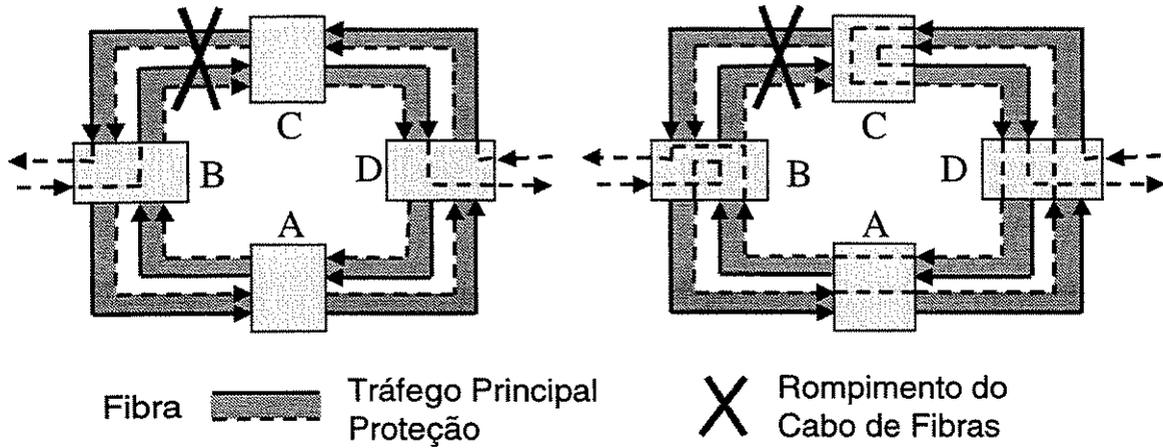


Figura 13: Comutação de Anel com MS SPRING/2

Caso a comutação de anel neste exemplo ocorra em um anel a quatro fibras, o nó B tornará paralelos os canais que estavam sendo transmitidos na fibra principal de B para C para os canais sendo transmitidos na fibra de proteção de B para A. Analogamente, C comutará os canais da fibra de proteção recebida do nó D para os canais transmitidos pela fibra principal em direção a D (conforme a Figura 14).

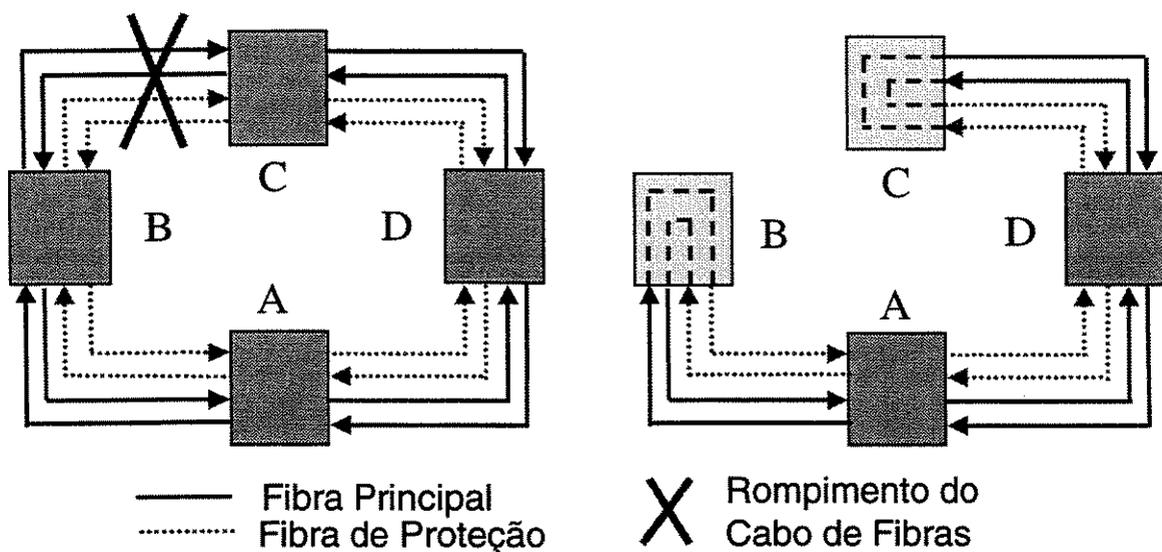


Figura 14: Comutação de Anel com MS SPRING/4

O resultado final para este exemplo é que todos os canais que estavam sendo enviados de B para D através do arco com falha, passando pelo nó C, agora são enviados de B para D através do nó A. Esta situação é mostrada na Figura 15. Ações simétricas ocorrerão para proteger os canais que estavam sendo enviados de D para B.

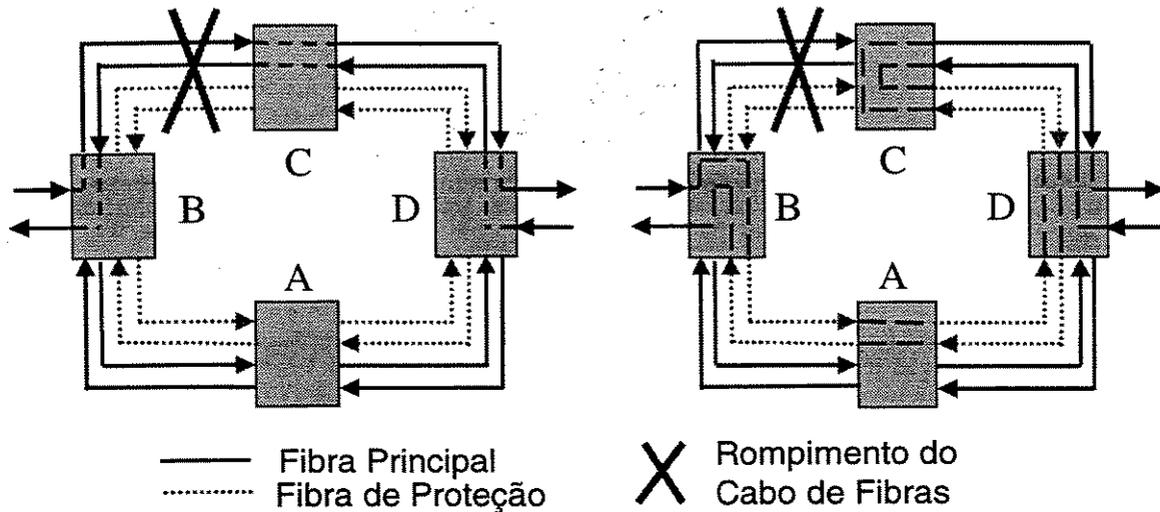


Figura 15: Comutação de Anel com MS SPRING/4: Tráfego entre B e D

Para um único ponto de falha, o anel protege todo o tráfego que passaria pelo nó em falha como se não houvesse ocorrido falha. Em anéis sem tráfego extra, sem pedido anterior de comutação e com menos de 1200 km de fibra o tempo completo de comutação é menor que 50 ms. A comutação neste tipo de anel é bidirecional. O protocolo de comutação é capaz de acomodar até 16 nós no anel. Sendo 16, portanto, o número máximo de equipamentos ADM em um MS SPRING.

3.2.2.2. Anéis com Proteção de SNC

Proteção de SNC de Ordem Inferior e Superior é uma proteção de camada de via. É um esquema de proteção dedicado que pode ser usado em diferentes estruturas de rede: malha, ponto a ponto, anel, etc., no entanto, atualmente, tem sido usado apenas em anéis.

Esta proteção dedicada pode usar arquitetura 1+1 ou 1:1, onde o tráfego principal e o tráfego de proteção são transmitidos em dois caminhos distintos pelo nó transmissor da SNC. A proteção dedicada 1:1 pode suportar tráfego extra.

No caso de proteção dedicada 1+1, o nó transmissor está sempre em paralelismo, o que faz com que o tráfego seja transmitido nas SNCs principal e de proteção simultaneamente. No nó receptor da SNC, uma comutação de proteção é efetuada para selecionar um dos sinais baseada em informação puramente local. O protocolo APS não é necessário para este esquema de proteção caso ele use comutação unidirecional. A Figura 16 mostra um Anel com Proteção de SNC 1+1, que também é chamado de Anel Unidirecional. Em cada nó deste anel há um equipamento ADM que tem as funções de derivar e inserir tributários e proteger o tráfego. No equipamento de origem do tráfego o sinal do tributário a ser protegido é mapeado em um Virtual Container (VC) que por sua vez é transmitido através de duas SNCs distintas, uma delas percorre o sentido anti-horário do anel através da fibra 1 e a outra o sentido horário através da fibra 2. Deste modo, o VC chega ao ADM de destino do tributário através de duas SNCs distintas. O ADM na recepção, em caso de falha na SNC principal, seleciona a SNC reservada para proteção. Esta função é realizada pelo seletor de Conexão de Sub-Rede (SNC). Caso haja rompimento do cabo de fibras em um arco do anel todas as SNCs que passam através dele serão interrompidas. Neste caso, tais SNCs serão protegidas usando o outro sentido do anel.

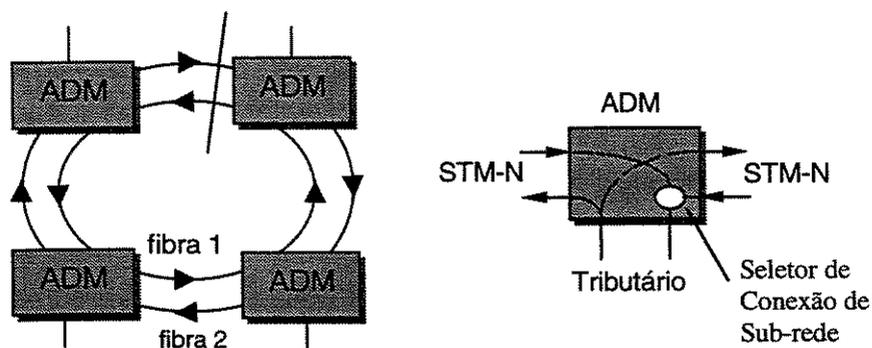


Figura 16: Anel com Proteção de SNC 1+1 (Anel Unidirecional)

No caso de comutação de proteção bidirecional e de proteção 1:1 com transporte de tráfego extra na SNC de proteção, um protocolo APS é necessário para coordenar as operações de paralelismo e comutação entre os nós local e remoto.

Tempo de comutação: Um valor de 50 ms tem sido proposto. Este tempo pode ser difícil de se conseguir quando muitas SNCs estão envolvidas. O tempo de comutação de proteção exclui o tempo de detecção necessário para iniciar o processo de comutação e o tempo de “hold-off”.

Tempos de “Hold-off”: são úteis para o inter-funcionamento de esquemas de proteção (esquemas de proteção superpostos) e correspondem a tempos de espera entre o surgimento de uma condição de defeito e a ativação do mecanismo de comutação. Estes tempos devem ser fornecidos a cada VC individualmente. A condição de defeito é continuamente monitorada por todo o tempo de “hold-off” antes que a comutação ocorra. O tempo de “hold-off” é programável de 0 a 10 segundos em passos da ordem de 100 ms.

Extensão da proteção: a Proteção de SNC restabelece todo o tráfego (exceto tráfego extra) que tenha sido interrompido devido à falha de um enlace que faça parte de um esquema de Proteção de SNC.

Tipos de comutação: a Proteção de SNC 1+1 suporta comutação unidirecional. Outras arquiteturas estão em estudo pelo ITU-T.

Modos de operação: a comutação 1+1 unidirecional suporta comutação reversível, não-reversível ou ambas. O roteamento do tráfego principal (com diversidade ou uniformidade de rota) não é fixado pelo esquema de Proteção de SNC. O operador de rede pode escolher rotas uniformemente ou diversamente distribuídas para cada SNC.



3.2.2.2.1. Interligação de Anéis Unidirecionais

O uso intensivo de anéis em redes da SDH frequentemente torna necessária a interligação de anéis. Quando esta interligação é feita através de um único ponto, como mostra a Figura 17(a), uma falha neste ponto leva à perda do tráfego que passa de um anel para outro. Por outro lado, a mesma situação de falha pode ser protegida se a interligação dos anéis é feita usando dois ou mais pontos de interligação como mostra a Figura 17(b).

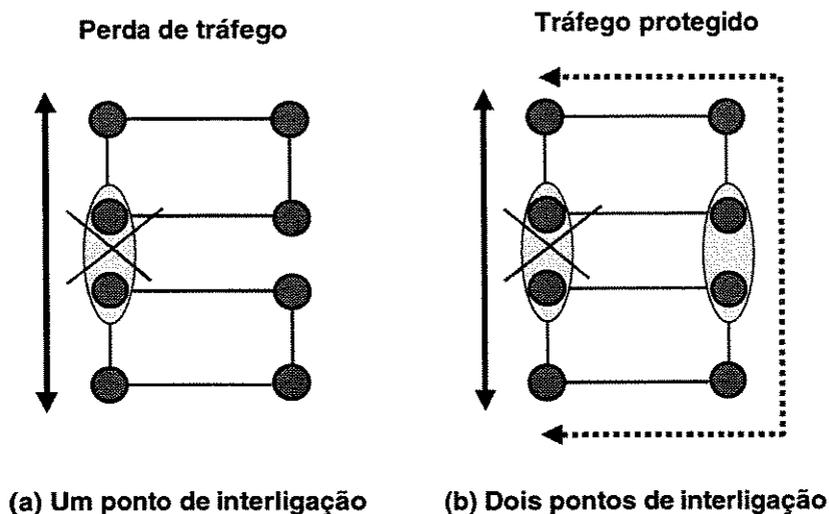


Figura 17: Interligação de Anéis Unidirecionais

São várias as formas possíveis para interligação de Anéis Unidirecionais, a forma que se destaca pela simplicidade e eficiência é a que faz uso de ADMs com deriva e continua (drop and continue) [6, 15]. A utilização de ADMs com esta funcionalidade protege completamente o tráfego contra falhas em qualquer um dos anéis e contra falhas em um dos pontos de interligação dos anéis.

Outra característica importante da interligação de anéis usando ADMs com deriva e continua é que o dimensionamento dos anéis não é afetado, ou seja, não é necessária capacidade de transporte adicional no anel devido à funcionalidade deriva e continua [6].

4. Dimensionamento de Anéis Unidirecionais

O tráfego transportado em um anel pode ser igual nos dois sentidos. Neste caso o tráfego é simétrico, caso contrário é assimétrico (distribuição de vídeo, por exemplo). Na Figura 18 é mostrado o roteamento de um tributário de 2Mbit/s simétrico, com proteção de SNC, que é transportado por dois VC-12, um para cada sentido do tráfego. Nesta figura, percebe-se que os VC-12s principal e de proteção ocupam todos os arcos das duas fibras do anel, isto ocorre quaisquer que sejam os nós de entrada e saída dos tributários protegidos. Assim, a capacidade de transporte dos Anéis Unidirecionais independe de quais sejam os nós de origem e destino da demanda quando o tráfego é protegido.

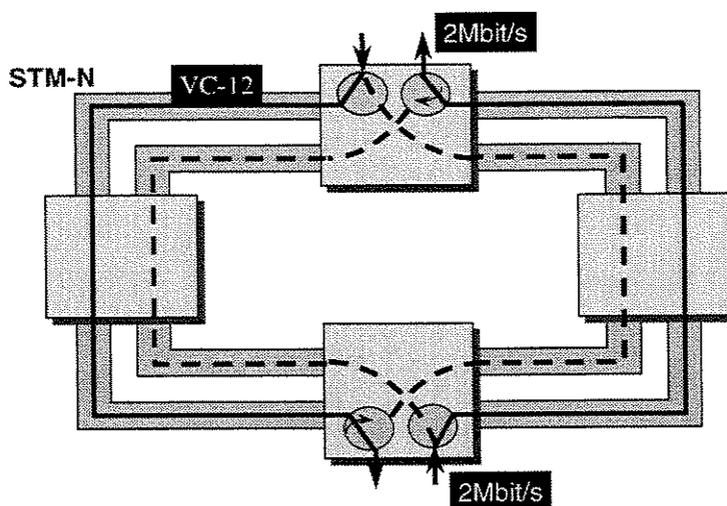


Figura 18: Anel Unidirecional

Na Figura 19 além do tributário de 2Mbit/s da Figura 18 é transportado um outro tributário de 2Mbit/s. Os dois tributários compartilham a capacidade das interfaces STM-N que interligam os ADMs do anel. Na Figura 19 são mostrados os dois VC-12s que compartilham as interfaces STM-N, mais VC-12s podem ser transportados pelo anel, desde que sua quantidade não exceda a capacidade da interface STM-N.

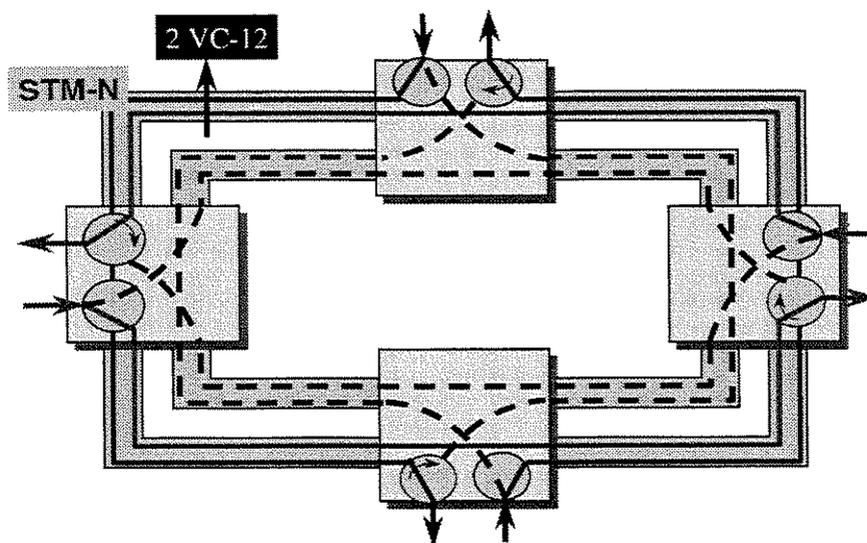


Figura 19: Anel Unidirecional com 2 Tributários de 2Mbit/s

Para dimensionar o anel é preciso somar a capacidade dos tributários simétricos protegidos que entram no anel, esta soma não deve exceder a capacidade das interfaces STM-N do anel.

Os Anéis Unidirecionais podem ser configurados para proteger ou não cada uma das SNCs transportadas. Quando o tráfego não é protegido, a capacidade do anel depende da distribuição do tráfego entre os nós da rede, pois este tráfego não ocupa todos os arcos das duas fibras do anel. Para o caso em que nenhum dos tributários transportados pelo anel é protegido, a capacidade do anel é pelo menos duas vezes maior do que se fossem completamente protegidos. Um anel STM-1, por exemplo, pode transportar 63 tributários de 2Mbit/s protegidos, ou pelo menos 126 tributários de 2Mbit/s não protegidos.

Capítulo 4.

Modelo Matemático

1. Introdução

O modelo proposto a seguir trata o planejamento de anéis unidirecionais da SDH (Anéis com Proteção de SNC - Arquitetura 1+1) de uma rede de telecomunicações.

Seu objetivo é minimizar os custos totais dos equipamentos ADM a serem implantados, necessários para escoar o tráfego entre os nós da rede.

Além do custo da solução, são obtidas também as seguintes informações:

- nó e anel em que o equipamento ADM deve ser instalado;
- hierarquia do anel (STM-N, $N = 1, 4, 16$ ou 64) e
- roteamento do tráfego.

O roteamento de um certo tráfego pode ser feito dentro de um único anel ou através da interligação de dois anéis.

Considera-se que o tráfego a ser transportado nos anéis unidirecionais é protegido. Não se considera a situação em que o tráfego não é protegido.

Considera-se também que todos os nós da rede podem fazer parte de pelo

menos um anel unidirecional e que sistemas ponto a ponto podem ser descritos como anéis com apenas dois nós. Para tanto, os sistemas ponto a ponto pressupõem proteção 1+1 ou 1:1 [9].

O modelo adotado corresponde a um problema de fluxo capacitado com restrições adicionais que é resolvido com técnicas de programação linear inteira mista. O tráfego é representado por um fluxo multi-produto associado a uma matriz origem-destino e deve ser escoado pela rede de anéis unidirecionais que é representada por um grafo. As restrições adicionais exprimem a alocação dos equipamentos e a interligação dos anéis unidirecionais. O modelo para interligação de anéis é feito com restrições adicionais e variáveis reais, e é inédito na literatura [1,2].

2. Apresentação do Modelo Matemático

As características funcionais necessárias ao planejamento de anéis unidirecionais podem ser expressas pela seguinte formulação matemática:

Minimizar:

$$\sum_{h \in H} \sum_{l \in L} p_l e_{lh} + \frac{1}{M} \sum_{l \in L} t_l \quad (1)$$

Sujeito a:

$$t_l = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{lij} + \sum_{\substack{n \in L \\ n \neq l}} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{lnij} + \sum_{\substack{m \in L \\ m \neq l}} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{mlij}, \quad l \in L, i \neq j \quad (2)$$

$$t_l \leq c_l, \quad l \in L \quad (3)$$

$$\sum_{m \in L} \sum_{n \in L} x_{mnij} = d_{ij}, \quad i \in I, j \in J, i \neq j \quad (4)$$

$$\sum_{\substack{i \in I \\ i \neq h}} \sum_{m \in L} x_{mlih} + \sum_{\substack{j \in J \\ j \neq h}} \sum_{n \in L} x_{lnhj} \leq M e_{lh}, \quad l \in L, h \in H \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} e_{mh} \text{ AND } e_{nh} &\leq e_{mh} \\ e_{mh} \text{ AND } e_{nh} &\leq e_{nh} \\ e_{mh} \text{ AND } e_{nh} &\geq e_{mh} + e_{nh} - 1 \\ 0 &\leq e_{mh} \text{ AND } e_{nh} \leq 1 \end{aligned} \right| \quad m, n \in L, m > n, h \in H \quad (6)$$

$$x_{mnij} \leq M \sum_{h \in H} e_{mh} \text{ AND } e_{nh}, \quad m, n \in L, m > n, i \in I, j \in J, i \neq j \quad (7)$$

$$x_{mnij} \leq M \sum_{h \in H} e_{nh} \text{ AND } e_{mh}, \quad m, n \in L, m < n, i \in I, j \in J, i \neq j \quad (8)$$

$$x_{mnij} \geq 0, \quad m, n \in L, i \in I, j \in J, i \neq j \quad (9)$$

Onde:

- p_l : custo de um ADM no anel l ;
- c_l : capacidade do anel l ;
- d_{ij} : demanda de tráfego em 2Mbit/s com origem no nó i e destino no nó j ;
- e_{lh} : variável inteira binária (0/1) que indica a existência do equipamento ($e_{lh} = 1$) no nó h do anel l ou a inexistência ($e_{lh} = 0$);
- x_{mnij} : variável real para o tráfego de 2Mbit/s com origem no nó i do anel m e destino ao nó j do anel n ;
- $e_{mh} \text{ AND } e_{nh}$: variável real que indica se o nó h é comum aos anéis m e n ($e_{mh} \text{ AND } e_{nh} = 1$) ou não ($e_{mh} \text{ AND } e_{nh} = 0$);
- t_l : variável real para o tráfego circulante no anel l ;
- H : conjunto dos nós da rede;

- I : conjunto dos nós de origem do tráfego;
 J : conjunto dos nós de destino do tráfego;
 L : conjunto dos anéis unidirecionais;
 M : valor positivo muito grande.

A função objetivo (1) representa a soma ponderada do custo total dos equipamentos e do tráfego de toda a rede. A ponderação é feita usando o fator $1/M$ que torna a minimização dos custos dos equipamentos mais importante. Minimizar o tráfego maximiza a folga da solução encontrada, e implica na redução dos custos de Operação Administração Manutenção e Provisãoamento (OAM&P) da rede. Os custos dos equipamentos variam em função da hierarquia do anel unidirecional.

Nas equações (2) são calculados os tráfegos circulantes em cada um dos anéis (t_l). O primeiro termo do lado direito das equações representa o tráfego com roteamento dentro do anel l , Figura 1 (a). O segundo termo representa o tráfego com roteamento entre dois anéis com origem no anel l , Figura 1 (b). E o terceiro termo representa o tráfego com roteamento entre dois anéis com destino ao anel l , Figura 1 (c).

As restrições de capacidade (3) asseguram que o tráfego circulante no anel l não ultrapasse a sua capacidade c_l . A capacidade varia em função da hierarquia do anel unidirecional e representa o número máximo de tributários que podem ser transportados.

As restrições (4) impõem o atendimento da demanda de tráfego. O lado esquerdo das equações é o somatório da demanda de tráfego entre os nós i e j transportado pelos anéis alocados. O lado direito das equações é a demanda de tráfego que é representada por uma matriz origem-destino d_{ij} , chamada Matriz de Entroncamento.

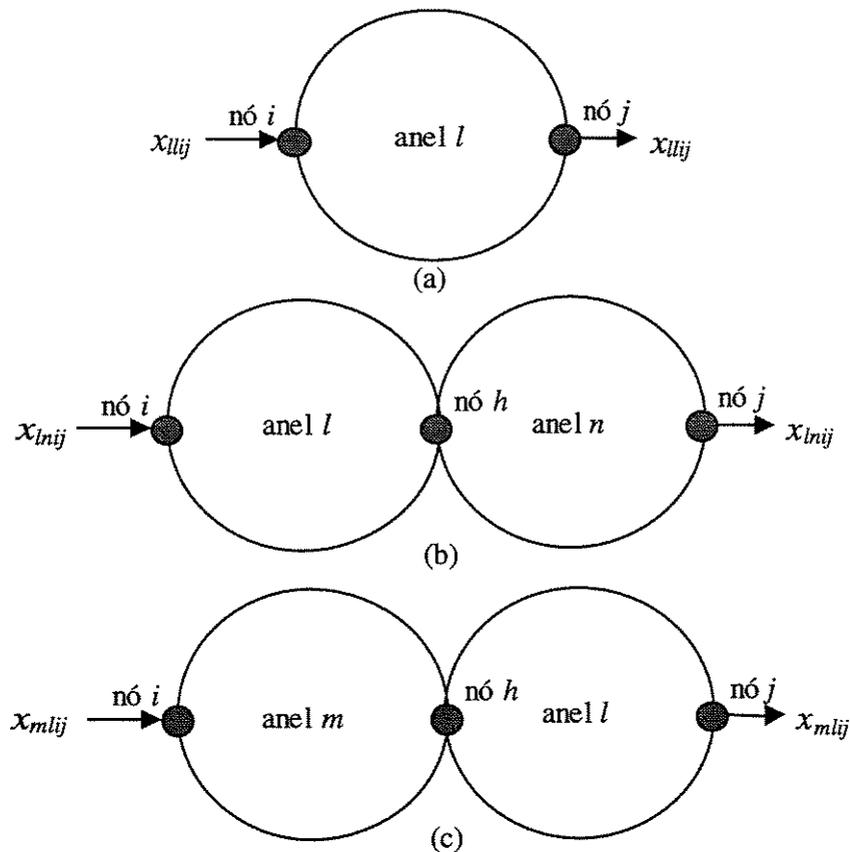


Figura 1: Variável de fluxo x_{mnij}

Caso todo o tráfego da rede a ser projetada seja simétrico a Matriz de Entroncamento também é simétrica, assim, basta considerar a matriz diagonal superior (ou inferior). O caso de tráfego assimétrico, mas protegido, também pode ser reduzido à situação de simetria. São estes os casos considerados neste modelo.

Para reduzir o caso de tráfego assimétrico para a situação de simetria é preciso somar a Matriz de Entroncamento com a sua matriz transposta e considerar apenas a matriz diagonal superior (ou inferior).

O modelo como foi apresentado atende ao caso assimétrico, sem fazer a redução para a situação de simetria. Para considerar a situação de simetria basta trocar as referências a $i \neq j$, do modelo, por $i < j$ ou $i > j$, caso a Matriz de Entroncamento a ser considerada seja a diagonal superior ou inferior, respectivamente.

As inequações (5) são a tradução algébrica da seguinte proposição lógica:

IF "o nó h não pertence ao anel l "
THEN "o fluxo que sai do nó h via anel l é bloqueado" AND
 "o fluxo que que entra no nó h via anel l é bloqueado"
ELSE ("o nó h pertence ao anel l ")
 "o fluxo que que sai do nó h via anel l é liberado" AND
 "o fluxo que que sai do nó h via anel l é liberado"

Ou,

<p>IF $h \notin l$ ($e_{lh} = 0$) THEN $x_{mlih} = 0$ AND $x_{lnhj} = 0$ ELSE ($h \in l$ ($e_{lh} = 1$)), $x_{mlih} \geq 0$ AND $x_{lnhj} \geq 0$</p>	<p>$l, m, n \in L, i \in I, j \in J, h \in H, h \neq j$ e $i \neq h$</p>
---	--

Esta proposição lógica, expressa nas restrições adicionais (5), impõe que só há tráfego entrando (x_{lnhj}) em ou saindo (x_{mlih}) de o nó h via anel l se o correspondente ADM tiver sido alocado ($e_{lh} = 1$), Figura 2.

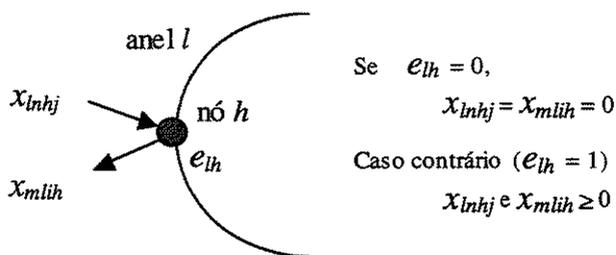


Figura 2: Alocação de Equipamento

Um equipamento ADM nunca será alocado desnecessariamente, ou seja, sem que exista tráfego entrando ou saindo dele, pois isto implicaria em aumento desnecessário do custo da solução o que contraria a minimização da função objetivo.

As inequações (6) são a tradução algébrica de três proposições lógicas:

1ª proposição:

IF "o nó h é comum aos anéis m e n "

THEN "o nó h pertence ao anel m " **AND** "o nó h pertence ao anel n "

2ª proposição:

IF "o nó h não pertence ao anel m " **OR** " h não pertence ao anel n "

THEN "o nó h não é comum aos anéis m e n "

3ª proposição:

IF "o nó h pertence ao anel m " **AND** "o nó h pertence ao anel n "

THEN "o nó h é comum aos anéis m e n "

Ou,

1ª proposição:

IF $e_{mh} \text{AND} e_{nh} = 1$

THEN $e_{mh} = 1 \text{ AND } e_{nh} = 1$

2ª proposição:

IF $e_{mh} = 0 \text{ OR } e_{nh} = 0$

THEN $e_{mh} \text{AND} e_{nh} = 0$

3ª proposição:

IF $e_{mh} = 1 \text{ AND } e_{nh} = 1$

THEN $e_{mh} \text{AND} e_{nh} = 1$

$m, n \in L \text{ e } h \in H$

Este conjunto de proposições lógicas verifica a existência de nós comuns aos

anéis a serem interligados.

Estas restrições também podem ser interpretadas como a expressão de um "AND" de álgebra "Booleana" pois a variável real $e_{mh} \text{AND} e_{nh} = 1$ apenas se as variáveis inteiras $e_{mh} = e_{nh} = 1$, caso contrário $e_{mh} \text{AND} e_{nh} = 0$. Assim, se houver um nó h comum aos anéis m e n então $e_{mh} \text{AND} e_{nh} = 1$ caso contrário $e_{mh} \text{AND} e_{nh} = 0$, isto é representado na Tabela 1.

e_{mh}	e_{nh}	$e_{mh} \text{AND} e_{nh}$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Tabela 1 $e_{mh} \text{AND} e_{nh} = e_{mh}$ "AND" e_{nh}

As variáveis $e_{mh} \text{AND} e_{nh}$ devido às inequações (6), podem assumir apenas dois valores, "0" ou "1", não obstante, são tratadas como reais. Isto é de grande importância para o sucesso da técnica matemática utilizada, pois variáveis reais não aumentam em demasia o esforço computacional para resolver o problema como é o caso de variáveis inteiras. Este tipo de modelamento é original, inédito na literatura.

As inequações (7) e (8) são a tradução algébrica de proposições lógicas com estrutura semelhante à expressa nas inequações (5).

IF "nã há nó h comum aos anéis m e n "
THEN "o fluxo entre os anéis m e n é bloqueado"
ELSE ("há nó h comum aos anéis m e n ")
" o fluxo entre os anéis m e n é liberado"

Ou,

$$\text{IF } \sum_{h \in H} e_{nh} \text{ AND } e_{mh} = 0$$

THEN

$$x_{mnij} = 0$$

$$\text{ELSE } \left(\sum_{h \in H} e_{nh} \text{ AND } e_{mh} \geq 1 \right)$$

$$x_{mnij} \geq 0$$

$m, n \in L, i \in I, j \in J, i \neq j \text{ e } m > n$ (7) ou

$m < n$ (8)

Estas proposições lógicas impõem que o tráfego x_{mnij} só pode passar de um anel m para outro n se houver pelo menos um nó h comum aos dois anéis. O lado esquerdo destas inequações será diferente de zero apenas se houver um nó comum aos dois anéis a serem interligados. Se houver um nó h comum, as variáveis de fluxo utilizadas para escoar o tráfego de um anel para o outro x_{mnij} não são restringidas, caso contrário são bloqueadas com valor igual a zero, Figura 3.

As variáveis de fluxo de tráfego x_{mnij} devem ser sempre maiores ou iguais a zero (9) para que a solução final seja factível.

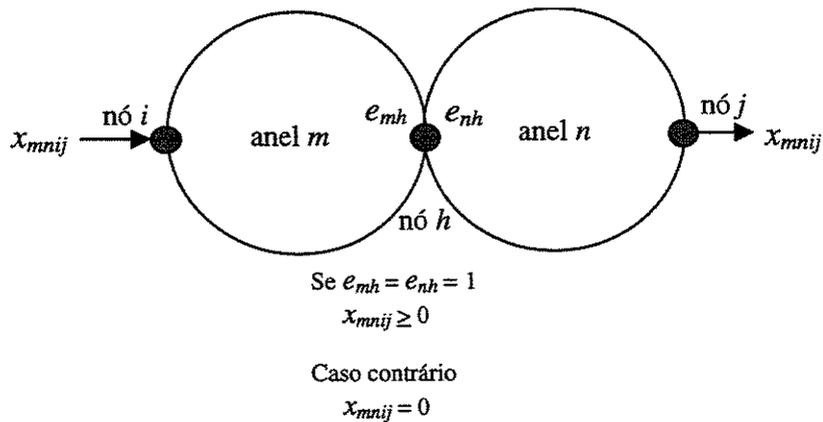


Figura 3: Tráfego em Dois Anéis

3. Modelo para Redes Grandes

Foram analisados dois tipos de aplicação do modelo. Aplicação a redes pequenas e a redes grandes.

O limite entre redes pequenas e grandes depende dos recursos computacionais existentes e do tempo que se pretende utilizar para fazer o planejamento da rede. Este limite pode ser expresso em termos de um número de variáveis inteiras necessárias para modelar o problema. O esforço computacional para resolver o problema cresce exponencialmente com o aumento do número destas variáveis. Se este número for muito grande, executar o programa para obter uma solução ótima pode ser inviável.

No modelo proposto, que é aplicável a redes pequenas, o número de variáveis inteiras é igual ao número de nós da rede vezes o número de anéis candidatos. Desta forma, garante-se a obtenção de uma solução de custo mínimo dos equipamentos para o problema, que é escoar o tráfego da Matriz de Entroncamento utilizando anéis unidirecionais, considerando que o escoamento pode ser feito por um ou dois anéis.

Para a aplicação o planejador deve escolher um número suficiente de anéis candidatos que satisfaçam às restrições de atendimento da demanda. Uma abordagem interessante é ser econômico para se fazer a escolha dos anéis, pois se o número de candidatos for grande, o limite de variáveis inteiras, que define o limite entre redes pequenas e grandes, pode ser excedido. Se a quantidade e a capacidade dos candidatos for insuficiente na primeira rodada, o problema torna-se infactível e devem ser feitas outras escolhas de candidatos até que seja alcançado o resultado ótimo.

Estender a aplicação para redes grandes fica inviável porque o número de variáveis inteiras torna-se excessivo. No caso de redes grandes o modelo é modificado para se obter uma solução satisfatória que atenda a critérios de engenharia propostos pelo planejador da rede. Sendo assim, a escolha destes critérios pode influenciar fortemente a

qualidade da solução final.

A forma de candidatura dos anéis e nós é mudada para reduzir o número de variáveis inteiras. São candidatados anéis dos quais apenas um número limitado de nós pode fazer parte, não quaisquer nós como é o caso da aplicação a redes pequenas. Desta forma, o número de variáveis inteiras fica reduzido para a soma dos nós candidatos de todos os anéis. Deve-se enfatizar que não há mais garantia de que a solução de custo mínimo seja obtida.

Além disso, para se obter a solução final são necessárias várias rodadas, sendo que em cada uma são propostos novos candidatos. As rodadas devem ser viabilizadas respeitando-se o limite de variáveis inteiras para cada uma.

A seleção dos candidatos para uma nova rodada é o fator mais importante para que a solução final seja satisfatória. Uma boa estratégia é manter os candidatos eleitos e eliminar os outros para uma nova rodada. Quanto maior for o número de rodadas, com a proposição de bons candidatos, maiores serão as possibilidades para obtenção de uma boa solução.

A seleção de candidatos pode ser feita analisando-se a quantidade de tráfego dos nós, que indica a quantidade de equipamentos a serem utilizados, e a distribuição do tráfego na rede, que indica quais nós podem compor os anéis. Indicadores matemáticos baseados nestes dois dados podem ser obtidos para que bons candidatos sejam gerados de forma semelhante ao que é feito nas referências [16, 17] para o caso de MS-SPRINGs.

As alterações no modelo necessárias para aplicações em redes grandes são:

- Introdução de um novo parâmetro a ser definido pelo planejador, c_{lh} , que é igual a "1" se existir candidato no nó h do anel l , ou igual a "0" se não existir candidato;

- As variáveis inteiras de decisão e_{lh} só existirão se o correspondente parâmetro c_{lh} for igual a "1";
- As variáveis de fluxo só existirão se existirem nós candidatos na origem e no destino do tráfego. Isto é, x_{mnij} existirá se $c_{mi} = 1$ e $c_{nj} = 1$;
- As variáveis que verificam a existência de um nó h comum aos anéis m e n , $e_{mh} \text{ AND } e_{nh}$, só existirão se $c_{mh} = c_{nh} = 1$.

O restante do modelo permanece sem alterações.

4. Evolução do Modelo

O modelo básico apresentado no item 2 pode evoluir para considerar outras características de rede compostas por anéis unidirecionais.

São apresentadas a seguir duas destas características que podem ser incorporadas ao modelo básico sem que haja aumento do número de variáveis inteiras utilizadas e portanto, sem que haja aumento significativo do esforço computacional para resolver o problema.

Estas características podem ser utilizadas no modelo para redes grandes ou pequenas e simultaneamente ou não.

As novas características de rede modeladas são:

- tráfego sendo transportado em 3 anéis interligados e
- tráfego sendo transportado por anéis interligados por 2 nós.

4.1. Interligação de Três Anéis

Um modelo que considere a interligação de três anéis sempre vai levar a soluções melhores ou iguais a de modelos que considerem a interligação de apenas dois anéis pois o número de combinações de roteamento para escoar o tráfego utilizando os mesmos anéis candidatos aumenta.

O modelo que considera tráfego sendo transportado por até três anéis é expresso a seguir:

Minimizar:

$$\sum_{h \in H} \sum_{l \in L} p_l e_{lh} + \sum_{l \in L} t_l / M \quad (10)$$

Sujeito a:

$$t_l = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{llij} + \sum_{\substack{n \in L \\ n \neq l}} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{lnij} + \sum_{\substack{m \in L \\ m \neq l}} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{mlij} + \\ \sum_{\substack{n \in L \\ n \neq l \\ n \neq o}} \sum_{\substack{o \in L \\ o \neq l}} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{lnoij} + \sum_{\substack{m \in L \\ m \neq l \\ m \neq n}} \sum_{\substack{n \in L \\ n \neq l}} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{mnlij} + \sum_{\substack{m \in L \\ m \neq l \\ m \neq o}} \sum_{\substack{o \in L \\ o \neq l}} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{mloij}, \\ l \in L, i \neq j \quad (11)$$

$$t_l \leq c_l, \quad l \in L \quad (12)$$

$$\sum_{\substack{m \in L \\ m \neq n \\ m \neq o}} \sum_{n \in L} \sum_{o \in L} x_{mnoij} + \sum_{m \in L} x_{mmnij} = d_{ij}, \\ i \in I, j \in J, i \neq j \quad (13)$$

$$\sum_{\substack{m \in L \\ m \neq l \\ m \neq o}} \sum_{\substack{o \in L \\ o \neq l \\ o \neq h}} \sum_{\substack{i \in I \\ i \neq h}} x_{mloih} + \sum_{\substack{i \in I \\ i \neq h}} x_{llih} + \sum_{\substack{n \in L \\ n \neq l}} \sum_{\substack{o \in L \\ o \neq l}} \sum_{\substack{j \in J \\ j \neq h}} x_{lnohj} + \sum_{\substack{j \in J \\ j \neq h}} x_{llhj} \leq M e_{lh},$$

$$l \in L, h \in H \quad (14)$$

$$\left(\sum_{h \in H} e_{mh} \text{ AND } e_{nh} \right) \cdot M \geq x_{mnnij},$$

$$m, n \in L, i \in I, j \in J, m \neq n, i \neq j \quad (15)$$

$$\left(\sum_{\substack{h1 \in H \\ h1 \neq h2}} \sum_{h2 \in H} (e_{mh1} \text{ AND } e_{oh1}) \text{ AND } (e_{oh2} \text{ AND } e_{nh2}) \right) \cdot M \geq x_{mnoij}$$

$$m, n, o \in L, i \in I, j \in J, m \neq n, m \neq o, n \neq o, i \neq j \quad (16)$$

$$x_{mnoij} \geq 0,$$

$$m, n, o \in L, i \in I, j \in J, i \neq j,$$

$$(m \neq n \text{ e } m \neq o) \text{ ou } m = n = o \quad (17)$$

As variáveis de fluxo receberam mais um índice transformando-se em x_{mnoij} . Esta variável deve transportar o tráfego da demanda d_{ij} entre o nó i do anel m e o nó j do anel n passando pelo anel intermediário o . Se $m = n = o$ o tráfego é transportado por um único anel, se $m \neq n, m \neq o$ e $n = o$ o tráfego é transportado por dois anéis e se $m \neq n, m \neq o$ e $n \neq o$ o tráfego é transportado por três anéis.

Nas inequações (11) são calculados os tráfegos circulantes em cada anel l (t_l). O primeiro termo do lado direito das equações representa o tráfego com roteamento dentro do anel l , Figura 4 (a). O segundo e o terceiro termos representam o tráfego transportado em dois anéis, com origem e destino ao anel l , Figuras 4 (b) e (c) respectivamente. E, os três últimos termos representam o tráfego transportado em três anéis, com origem no anel l , tendo o anel l como intermediário e tendo o anel l como destino, Figuras 4 (d), (e) e (f), respectivamente.

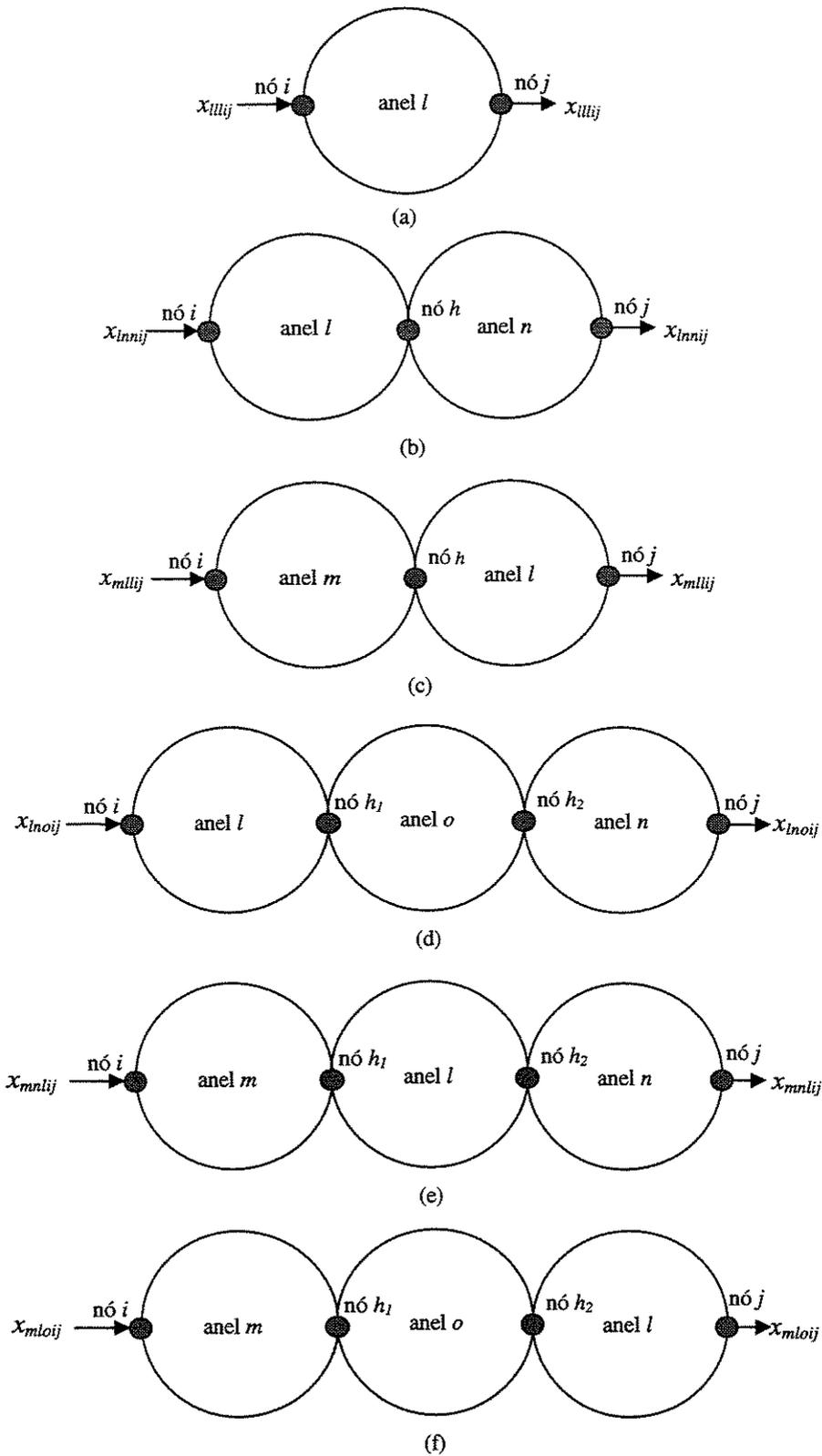


Figura 4 : Fluxo x_{mnoij}

As restrições de atendimento da demanda (13) devem considerar o tráfego transportado por um, dois ou três anéis. As de alocação de equipamento (14) também devem fazer a mesma consideração, Figura 5.

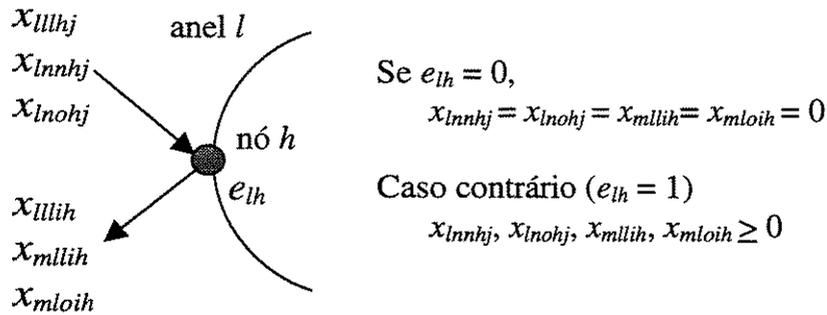


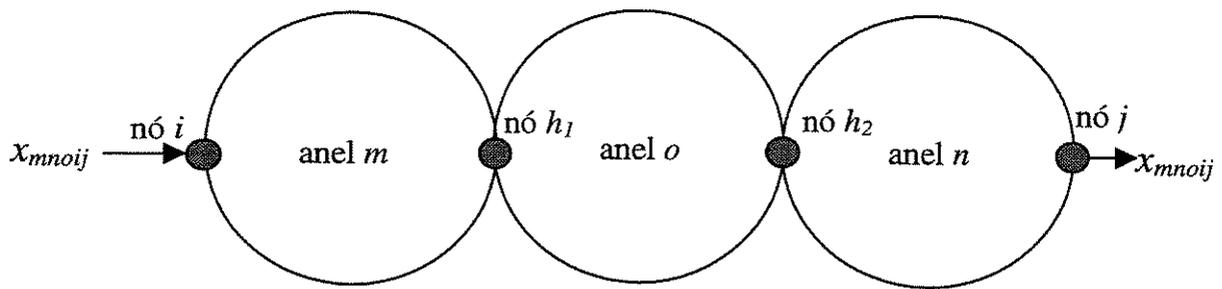
Figura 5: Alocação de Equipamento

As restrições para interligação de dois anéis não sofreram alteração. A apresentação destas restrições em (15) é mais sucinta do que as encontradas em (6), (7) e (8). Em (15) $xANDy$ é uma variável real sujeita às seguintes restrições:

$$\begin{array}{l}
 xANDy \leq x \\
 xANDy \leq y, \\
 xANDy \geq x + y - 1, \\
 0 \leq xANDy, x, y \leq 1
 \end{array} \quad | \quad (18)$$

As restrições em (18), como já foi mencionado, foram inspiradas no AND de álgebra Booleana e fazem com que a variável real $xANDy$ assumo valor 1 apenas quando x e y são iguais a 1, caso contrário, assume valor 0.

Nas restrições para interligação de 3 anéis (16) é preciso que haja pelo menos um nó h_1 comum aos anéis m e o e também que haja pelo menos um nó h_2 ($h_2 \neq h_1$) comum aos anéis o e n para que o fluxo x_{mnoij} seja liberado, caso contrário x_{mnoij} será bloqueada com valor igual a zero, Figura 6.



$$\text{Se } e_{mh1} = e_{oh1} = e_{oh2} = e_{nh2} = 1 \\ x_{mnoij} \geq 0$$

$$\text{Caso contrário} \\ x_{mnoij} = 0$$

Figura 6: Tráfego em Três Anéis

A função objetivo (10), as restrições de capacidade dos anéis (12), e as restrições para que as variáveis de fluxo sejam maiores ou iguais a zero (17) permanecem sem alterações.

O modelo feito desta forma não utiliza mais variáveis inteiras do que o modelo básico apresentado no item 2.

4.2. Interligação de Anéis por 2 Nós

Anéis interligados por 2 nós protegem o tráfego que passa por dois anéis contra falhas simples em qualquer um de seus equipamentos ou arcos, inclusive dos nós e enlases de interligação, como foi visto no Capítulo 3.

Em anéis interligados por 2 nós só pode haver tráfego passando de um anel m para outro n se houver pelo menos dois nós comuns a estes dois anéis.

Para o conjunto de restrições (6), (7) e (8) apresentadas no item 2 deste capítulo bastava a existência de um único nó comum aos dois anéis para que o fluxo entre estes

anéis fosse liberado.

Para considerar anéis interligados por 2 nós as restrições expressas em (6), (7) e (8) devem ser substituídas por:

$$\left(\sum_{\substack{h_1 \in H \\ h_1 \neq h_2}} \sum_{h_2 \in H} (e_{mh_1} \text{ AND } e_{nh_1}) \text{ AND } (e_{mh_2} \text{ AND } e_{nh_2}) \right) \cdot M \geq x_{mnij},$$

$$m, n \in L, m > n, i \in I, j \in J, i \neq j \quad (19)$$

Onde a variável real x_{ANDy} é definida em (18).

Desta forma só vai haver tráfego entre os anéis m e n se houver simultaneamente equipamentos ADM em dois nós h_1 e h_2 dos dois anéis, Figura 7.

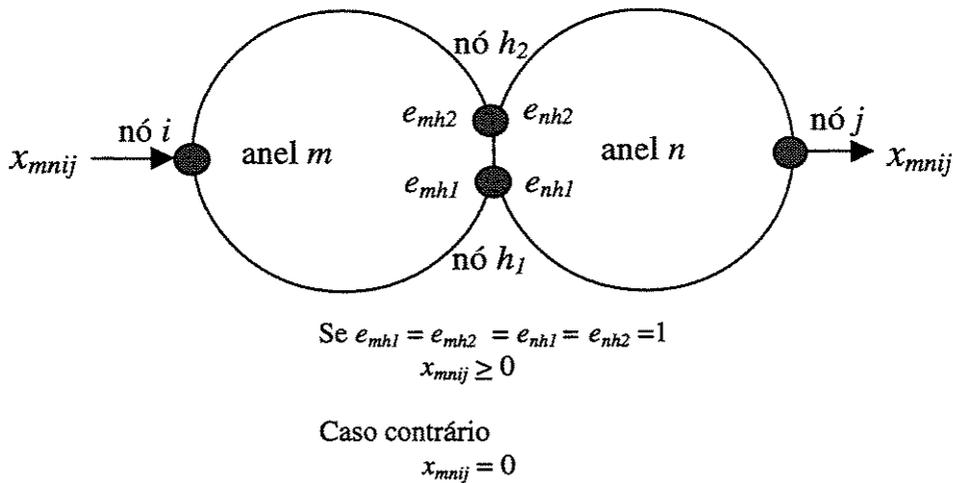


Figura 7: Tráfego em Anéis Interligados por 2 nós

O modelo pode fazer uma diferenciação entre o tráfego a ser transportado por anéis interligados por 2 nós e o tráfego transportado por dois anéis interligados por apenas 1 nó. Para o tráfego d_{ij} a ser transportado pelas variáveis de fluxo x_{mnij} que deve ser transportado por anéis interligados por 2 nós se aplicam as restrições expressas em (19). Se isto não for necessário, se aplicam as restrições expressas em (6), (7) e (8).

A opção por anéis interligados por 2 nós ou anéis interligados por apenas um nó vai depender de considerações sobre a disponibilidade do tráfego a ser transportado o que não é objeto deste trabalho.

É importante ressaltar que o modelo de anéis interligados por 2 nós feito desta forma não implica na utilização de mais variáveis inteiras. Portanto, o acréscimo no esforço computacional para resolver o problema causado pela introdução desta nova característica é pequeno.

Capítulo 5.

Aplicações do Modelo

1. Introdução

Os modelos foram aplicados nas redes das cidades de Maceió e Belo Horizonte. Os dados para as aplicações foram fornecidos pelas Empresas Operadoras do Sistema Telebrás, TELASA e TELEMIG.

Foi usado o modelo para redes pequenas em Maceió e o para redes grandes em Belo Horizonte em função do número de variáveis inteiras necessárias.

Além do modelo básico, foi utilizado o que trata a interligação de três anéis.

Nas duas cidades a quantidade de fibras e dutos já instalados eram suficientes para atender a qualquer solução. Sendo assim, seus custos não foram levados em consideração.

Para a realização destas aplicações foram utilizados os seguintes recursos de informática do Laboratório do DENSIS da Unicamp:

- Pacote comercial para resolução do modelo de programação linear inteira mista CPLEX [18] que rodou em uma estação de trabalho SUN SPARC 20 em ambiente UNIX,

- Linguagem de programação matemática AMPL [19] para elaboração do modelo matemático que rodou em um microcomputador Pentium 133MHz com 64 Mbytes de memória RAM em ambiente Windows 95.

Face à disponibilidade destes recursos, o limite entre redes pequenas e redes grandes foi fixado em aproximadamente 35 variáveis inteiras.

2. Maceió

Os dados para a aplicação do modelo na rede da cidade de Maceió foram passados ao Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Telebrás pela TELASA que solicitou consultoria para elaboração do projeto sistêmico e especificações dos equipamentos SDH a serem licitados.

A Tabela 1 mostra a Matriz de Entroncamento a 2Mbit/s da cidade de Maceió apresentada pela TELASA, que contém um total de 509 troncos distribuídos entre os 7 nós da rede.

Estação	PJA	CEN	EBT	FAR	TAB	SER	JAT
PJA		36	23	36	13	0	10
CEN			35	68	21	0	23
EBT				70	15	0	57
FAR					18	21	46
TAB						5	12
SER							0

Tabela 1: Matriz de Entroncamento/2Mbit/s - Maceió

Nos custos dos equipamentos SDH considerou-se um fator de 2,5 entre hierarquias consecutivas. Considerou-se também que os custos dos equipamentos ADM para anéis unidirecionais e os custos dos equipamentos Terminais Multiplexadores com proteção 1+1 ou 1:1 são iguais para o mesmo nível hierárquico SDH. Portanto, tem-se o custo em Unidades Monetárias (UMs):

- STM-1:
custo do ADM = custo do TM = 1UM
- STM-4:
custo do ADM = custo do TM = 2,5 UM

A topologia da rede da cidade de Maceió é apresentada na Figura 1 que mostra onde estão localizados os centros de fios com as centrais de comutação e a interligação desses centros de fios com cabos de fibras ópticas que passam através de dutos enterrados.

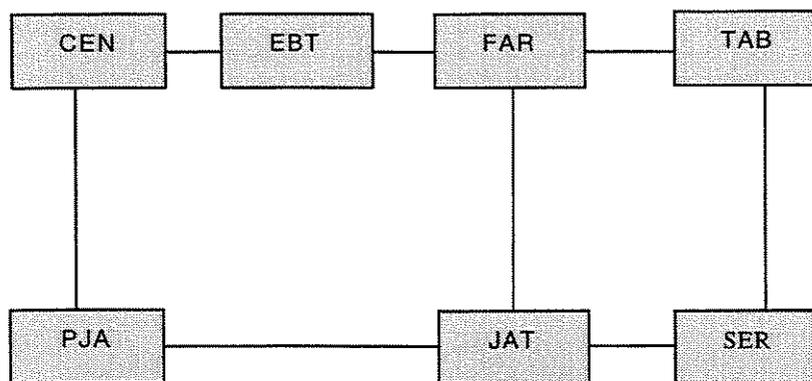


Figura 1: Topologia da Rede

Quando foi utilizado o modelo para redes pequenas, foram propostos 5 anéis candidatos a participarem da solução final, sendo 3 anéis STM-1 e 2 anéis STM-4. Cada um destes anéis podiam ter equipamentos ADM alocados em qualquer um dos 7 nós da rede. Ao todo foram utilizadas 35 variáveis inteiras pelo modelo de otimização (7 nós vezes 5 anéis candidatos).

O tempo total de execução do programa foi de aproximadamente 3700 segundos o que equivale a 62 minutos.

A solução de alocação dos equipamentos e anéis é apresentada na Figura 2. Nesta solução há 2 anéis STM-1, um com 3 e outro com 4 nós, e 2 anéis STM-4, os dois com 3

nós. Sendo assim, o custo final da solução encontrada é de 22 UMs que é igual ao custo da solução apresentada em [3].

O modelo em [3] considera que todo o tráfego da rede deve ser transportado entre nós da rede que pertençam a um único anel, ou seja, não considera que o tráfego pode ser transportado por mais do que um anel. Para se chegar à solução apresentada, foi necessária a interferência dos planejadores.

É importante ressaltar que os resultados aqui apresentados refletem completamente a solução encontrada pelo modelo não tendo havido nenhuma necessidade de interferência por parte do planejador. Isto demonstra a adequação total do modelo ao problema apresentado.

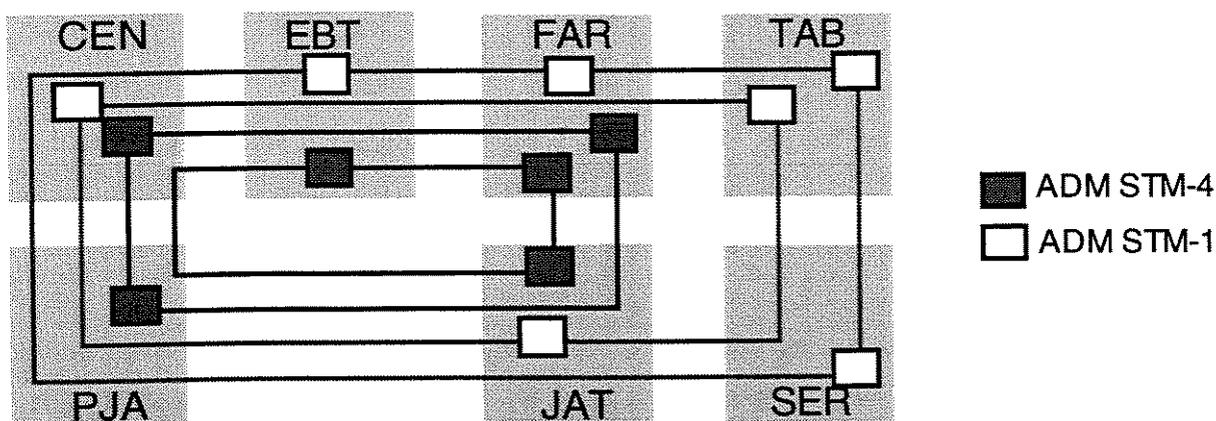


Figura 2: Configuração Física da Rede – Maceió

Na Tabela 2 é mostrado o roteamento do tráfego nos anéis.

Foi realizada uma aplicação utilizando o modelo que trata a interligação de três anéis. O resultado obtido é igual ao apresentado quando se utiliza a interligação de apenas dois anéis. Não houve nenhuma demanda de tráfego sendo transportada por três anéis.

O transporte de tráfego utilizando três ou mais anéis penaliza fortemente o custo da rede. Do ponto de vista de eficiência de utilização da rede, a situação ideal é

aquela em que a solução de menor custo leva a uma situação em que todo o tráfego é transportado sem a necessidade de interligação de anéis. Mesmo assim, a interligação de três ou mais anéis parece ser interessante para o transporte do tráfego entre nós localizados na periferia da rede pois em geral é de baixo volume e pode fazer uso de folgas dos anéis que transportam as demandas de maior volume de tráfego.

	Anel 1 STM-4	Anel 2 STM-4	Anel 3 STM-1	Anel 4 STM-1	Total
PJA/CEN		36			36
PJA/EBT	23*	23*			23
PJA/FAR		36			36
PJA/TAB		9*+4*	9*	4*	13
PJA/JAT	10*	10*			10
CEN/EBT	35*	35*			35
CEN/FAR		68			68
CEN/TAB			21		21
CEN/JAT	2*	2*	21		23
EBT/FAR	70				70
EBT/TAB				15	15
EBT/JAT	57				57
FAR/TAB				18	18
FAR/SER				21	21
FAR/JAT	46				46
TAB/SER				5	5
TAB/JAT			12		12
Total	243	223	63	63	

Anel 1: EBT-FAR-JAT

Anel 3: CEN-TAB-JAT

Anel 2: PJA-CEN-FAR

Anel 4: EBT-FAR -TAB-SER

*tráfego roteado em dois anéis

Tabela 2: Roteamento do Tráfego - Maceió

3. Belo Horizonte

A rede de Belo Horizonte é mais complexa do que a de Maceió devido ao maior número de nós, 9 contra 7, e o maior tráfego, 1721 contra 509 troncos de 2Mbit/s.

Na rede de Maceió, como já foi visto, foram candidatados 5 anéis que poderiam ter como componentes quaisquer nós, isto implica na utilização de 35 variáveis inteiras. Para Belo Horizonte, se fosse utilizado um procedimento semelhante, o número destas variáveis tornaria o tempo de execução do programa excessivo.

Foi preciso então, utilizar o modelo para redes grandes nesta aplicação.

A Tabela 3 mostra a Matriz de Entroncamento de 2Mbit/s de Belo Horizonte [20], que apresenta um total de 1721 troncos.

	HG	MP	GO	BG	CI	PA	BT	CP	BA
HG		190	140	130	90	95	70	100	90
MP			130	80	70	70	80	15	10
GO				60	30	20	35	10	5
BG					32	28	30	10	10
CI						32	18	8	5
PA							16	12	0
BT								0	0
CP									0

Tabela 3: Matriz de Entroncamento/2Mbit/s - Belo Horizonte

Os custos dos equipamentos considerados são apresentados na Tabela 4.

	STM-1	STM-4	STM-16
TM	30	60	135
ADM	35	65	150

Tabela 4: Custo dos Equipamentos em UM

Foram realizadas 8 rodadas e a melhor apresentou custo de 1350 UMs. O tempo total para a realização do planejamento da rede, que envolve tempo de CPU, análise dos

resultados e proposta de novas candidatos de cada rodada, foi menor do que 1 dia.

Nesta solução, que é apresentada na Figura 3, foram utilizados 1 anel STM-16 com 4 nós, 2 anéis STM-4 com 3 nós cada um e 3 sistemas ponto a ponto STM-4.

O roteamento do tráfego na rede é apresentado na Tabela 5.

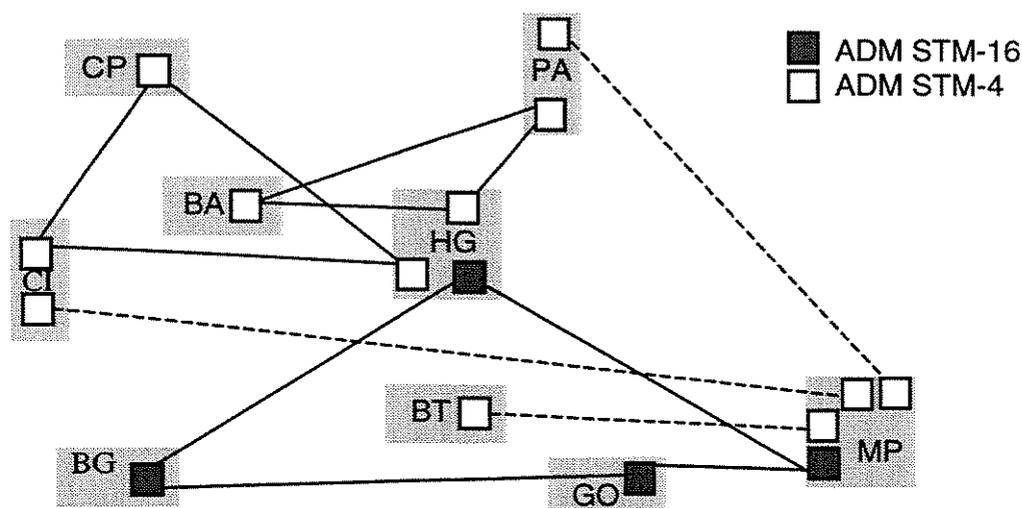


Figura 3: Configuração Física da Rede – Belo Horizonte

Na refererência [20] é apresentada uma solução para este problema que utiliza anéis bidirecionais e sistemas ponto a ponto com custo de 1230 UMs. A aplicação do modelo, neste caso, leva a uma solução que é apenas 9,8% mais cara. Um único ADM STM-16 representa 12,2% de 1230UMs. Isto encoraja a investigação de modelos que utilizem simultaneamente, sistemas ponto a ponto, anéis unidirecionais e anéis bidirecionais.

Da mesma forma que para a rede de Maceió, foi realizada uma aplicação do modelo para interligação de três anéis que teve como resultado a mesma solução encontrada quando foi utilizado o modelo para interligação de dois anéis.

	Anel			Ponto a ponto			Total
	1 STM-16	2 STM-4	3 STM-4	1 STM-4	2 STM-4	3 STM-4	
HG/MP	188		2*		2*		190
HG/GO	140						140
HG/BG	130						130
HG/CI			90				90
HG/PA		95					95
HG/BT	70*			70*			70
HG/CP			100				100
HG/BA		90					90
MP/GO	130						130
MP/BG	80						80
MP/CI					70		70
MP/PA						70	70
MP/BT				80			80
MP/CP			15*		15*		15
MP/BA		10*				10*	10
GO/BG	60						60
GO/CI	30*				30*		30
GO/PA	20*					20*	20
GO/BT	35*			35*			35
GO/CP	10*		10*				10
GO/BA	5*	5*					5
BG/CI	32*				32*		32
BG/PA	28*					28*	28
BG/BT	30*			30*			30
BG/CP	10*		10*				10
BG/BA	10*	10*					10
CI/PA					32*	32*	32
CI/BT				18*	18*		18
CI/CP			8				8
CI/BA		5*	5*				5
PA/BT				16*		16*	16
PA/CP		12*	12*				12
Total	1008	227	252	249	199	176	

Anel 1: HG-MP-GO-BG

Anel 2: HG-PA-BA

Anel 3: HG-CI-CP

Ponto a ponto 1: MP-BT

Ponto a ponto 2: MP-CI

Ponto a ponto 3: MP-PA

*Tráfego roteado em dois anéis

Tabela 5: Roteamento do Tráfego - Belo Horizonte

Capítulo 6.

Conclusões

Este trabalho apresentou as profundas mudanças na topologia que as redes de telecomunicações vêm sofrendo com a substituição da PDH pela SDH e que levam as antigas Empresas Operadoras do Sistema Telebrás a usarem amplamente topologias em anel.

Foi apresentado um modelo matemático para auxiliar o planejamento de redes que fazem uso de anéis unidirecionais SDH. A aplicação do modelo permite ao planejador obter soluções com custo otimizado para alocação e dimensionamento dos anéis unidirecionais e determina também o roteamento do tráfego.

O problema de escoar a demanda de tráfego por uma rede com anéis unidirecionais foi representado por um modelo de programação linear inteira mista com fluxo capacitado e restrições adicionais de alocação de equipamentos e de interligação dos anéis. A interligação dos anéis foi modelada de forma inédita na literatura.

Foram feitas aplicações do modelo nas cidades de Maceió e Belo Horizonte. No último caso foi utilizado um método que viabiliza a aplicação do modelo a redes grandes, pois permite diminuir o número de variáveis inteiras, associando os anéis candidatos a participarem da solução a um número limitado de nós.

Os resultados foram bastante satisfatórios e nos encorajam a trabalhar na sua evolução. Os trabalhos futuros devem considerar aplicações de anéis unidirecionais interligados por 2 nós e mais do que dois anéis interligados. O modelo também pode ser estendido para considerar anéis bidirecionais.

Capítulo 7.

Referências Bibliográficas

- [1] Nakamura, R. Y.; Tavares, H.; “A New Model for Optimal Planning of Synchronous Digital Hierarchy Unidirectional Rings”, Anais do SBT/ IEEE International Telecommunications Symposium, Ago. 1998, São Paulo, pp. 335-340.
- [2] Nakamura, R. Y.; Tavares, H.; “Modelo de Otimização para o Planejamento de Anéis Unidirecionais da Hierarquia Digital Síncrona”, Anais do XII Congresso Brasileiro de Automática, Uberlândia, Mar. 1998, CD-ROM.
- [3] Trindade, M. B.; Nakamura, R. Y.; Sousa Filho, A. O.; “Planejamento de Anéis Síncronos Unidirecionais: Modelo de Otimização e um Estudo de Caso”, Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, 1995, Águas de Lindóia, pp. 452-457.
- [4] Mendes, J. L. A.; Sousa Filho, A. O., Nakamura, R. Y.; “Hierarquia Digital Síncrona (SDH): A Evolução das Redes de Transporte”, Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, 1995, Águas de Lindóia, pp. 470-475.
- [5] Nakamura, R. Y.; Mendes J. L. A.; Sousa Filho, A. O.; “Anéis Tolerantes a Falha em Redes da Hierarquia Digital Síncrona”, Anais do XI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, 1992, Natal, pp. 241-246.
- [6] Sousa Filho, A. O. ; Mendes J. L. A.; Nakamura, R. Y.; “Interfuncionamento de Anéis da Hierarquia Digital Síncrona”, Anais do XI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, 1992, Natal, pp. 247-252.
- [7] ITU-T Recommendation G.707, “Network Node Interface for the SDH”, Mar. 1996.
- [8] ITU-T Recommendation G.783, “Characteristics of Synchronous Digital Hierarchy Functional Blocks”, Feb. 1998.
- [9] ITU-T Recommendation G.841, “Types and Characteristics of SDH Network Protection Architectures”, Nov. 1997.

-
- [10] ITU-T Recommendation G.784, “Synchronous Digital Hierarchy (SDH) Management”, Jan. 1994.
- [11] ITU-T Recommendation G.827, “Availability Parameters and Objectives for Path Elements of International Constant Bit Rate Digital Paths at or Above the Primary Rate”, Aug. 1996
- [12] ITU-T Recommendation G.805, “Generic Functional Architecture of Transport Networks”, Nov. 1995.
- [13] Wu, T. H.; “Fiber Network Services Survivability”, Artech House, Norwood, 1992.
- [14] Wu, T. H.; Lau, R. C.; “A Class of Self-Healing Ring Architectures for Sonet Network Applications”, IEEE Globecom’90, Dec. 1990, San Diego, CA, pp. 403.2.1-403.2.8.
- [15] ITU-T Recommendation G.842, “Internetworking of SDH Network Protection Architectures”, Apr. 1997.
- [16] Grover, W. D.; Slevinsky, J. B.; MacGregor, M. H.; “Optimized Design of Ring-Based Survivable Networks”, Can. J. Elect. & Comp. Eng., Vol. 20, nº3, 1995, pp. 139-149.
- [17] Slevinsky, J. B.; Grover, W. D.; MacGregor, M. H.; “An Algorithm for Survivable Design Employing Multiple Self-Healing Rings”, Proc. IEEE Globecom’93, pp. 1568-1573, Nov. 1993.
- [18] CPLEX Optimization, Inc. "Using the CPLEX Callable Library – version 3.0". 1989-1994.
- [19] Fourer, R.; Gay, D. M.; Kernighan, B. W.; "AMPL: a Modeling Language for Mathematical Programming". The Scientific Press. San Francisco - Califórnia - USA. 1993.
- [20] Quaglia, E. J.; “Planejamento da Rede de Transmissão em Telecomunicações: O Problema do Enfeixamento”, Tese de Mestrado, Dez. 1997, FEEC, Unicamp.

Anexo.

Abreviaturas

ADM	- Add and Drop Multiplexer (Multiplexador com Derivação e Inserção)
APS	- Automatic Protection Switching (Comutação de Proteção Automática)
ITU-T	- International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector
MSOH	- Multiplexer Section Overhead (Overhead da Seção de Multiplexação)
MS-SPRING	- Multiplexer Section Shared Protection Ring (Anel com Proteção Compartilhada de Seção de Multiplexação)
OH	- Overhead
PDH	- Plesyochronous Digital Hierarchy (Hierarquia Digital Plesiócrona)
POH	- Path Overhead (Overhead de Via)
RSOH	- Regenerator Section Overhead (Overhead de Seção de Regeneração)
SDH	- Synchronous Digital Hierarchy (Hierarquia Digital Síncrona)
SDXC	- Synchronous Digital Cross Connect (Roteador Síncrono)
SNC	- Sub-Network Connection (Conexão de Sub-Rede)
SOH	- Section Overhead (Overhead de Seção)
STM-N	- Synchronous Transport Module level N
TM	- Terminal Multiplexer (Terminal Multiplexador)
TMN	- Telecommunications Management Network
VC	- Virtual Container