

Haroldo do O'Carvalho

*Alocação de tráfego em redes ópticas em
anel com proteção*

Belo Horizonte

2007

Haroldo do O'Carvalho

*Alocação de tráfego em redes ópticas em
anel com proteção*

Dissertação apresentada ao curso de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador:

Prof. Dr. Geraldo Robson Mateus

Co-orientador:

Prof. Dr. Rodney Rezende Saldanha

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
CPDEE - CENTRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Belo Horizonte

2007

Dissertação de Mestrado sob o título “*Alocação de tráfego em redes ópticas em anel com proteção*” defendida por Haroldo do O’Carvalho e aprovada em, em Belo Horizonte, estado de Minas Gerais, pela banca examinadora constituída pelos Doutores:

Prof. Dr. Geraldo Robson Mateus - Orientador
Departamento de Ciência da Computação - ICEX - Universidade Federal de
Minas Gerais

Prof. Dr. Rodney Rezende Saldanha - Co-orientador
Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica - CPDEE -
Universidade Federal de Minas Gerais

Prof. Dr. Carlos Roberto Venâncio de Carvalho
Departamento de Engenharia de Produção - dep - Universidade Federal de
Minas Gerais

Prof. Dr. Maurício Cardoso de Souza
Departamento de Engenharia de Produção - dep - Universidade Federal de
Minas Gerais

Prof. Dr. Ricardo Hiroshi Caldeira Takahashi
Departamento de Matemática - ICEx - Universidade Federal de Minas
Gerais

Belo Horizonte, 21 de dezembro de 2007

Agradecimentos

Agradeço a meus pais pela minha existência, pelo amor e dedicação.

A minha esposa Magda, pelo incentivo e compreensão.

Ao prof. Geraldo Robson Mateus, meu orientador, pela paciência e colaboração.

Ao Prof. Rodney Saldanha, meu co-orientador, pela confiança e por acreditar no sucesso deste trabalho.

A todos os colegas que me incentivaram e contribuíram direta ou indiretamente para a execução desse trabalho.

Resumo

Este trabalho apresenta um modelo de Programação Linear para uma rede óptica SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*) com proteção SNC-P (*Subnetwork Connection Protection*) que tem como objetivo otimizar o roteamento do tráfego cursado.

O modelo foi descrito pelo *software* AMPL e resolvido através do pacote comercial Cplex¹. Foram realizados diferentes testes em relação à topologia da rede e perfil do tráfego.

O modelo representa as características tecnológicas de uma rede SDH configurada em anel com elementos *Add-Drop Multiplex*(ADM). Vários testes foram realizados em diferentes cenários de interesse de tráfego afim de avaliar a qualidade das soluções obtidas com a ferramenta computacional utilizada.

O problema de otimização de tráfego objeto desse trabalho é de natureza combinatória e é caracterizado como um problema *NP-completo*.

É importante observar que devido a presença de variáveis inteiras no modelo, para determinadas dimensões de rede se torna necessária a aplicação de heurísticas que contribuam com a redução de tempo de máquina na solução do problema não sendo, portanto, o escopo desse trabalho. Sendo assim, os resultados dos testes computacionais indicaram que o modelo desenvolvido atende melhor aos critérios estabelecidos para redes menores com até 8 (oito) nós.

¹Copyright ©Ilog 1997-2004. Cplex é uma marca registrada da Ilog.

Abstract

This work report presents the application of a Linear Programming model to an optical SDH (Synchronous Digital Hierarchy) network which employs the SNC-P (Subnetwork Connection Protection) protection scheme, in order to optimize the routing of the carried-out traffic.

The model was described through the AMPL software and solved on the commercial package Cplex¹. Different tests in relationship with network topology and traffic profile were performed.

The model represents the technological characteristics of a SDH network configured in rings, with ADM (Add-Drop Multiplex) elements. Several tests were made, considering different traffic conditions, in order to evaluate the quality of the solutions obtained with the use of the adopted computing tool.

The traffic optimization problem aimed by this paper has a combinatorial nature and is characterized as a NP-complete problem.

It is worth to note that, for certain network dimensions, the presence of integer variables in the model demands the employment of machine-time reducing heuristics, which are not in the scope of this work. So that, the computational tests results indicated that the model developed is better fitted to networks configured with no more than 8 (eight) nodes.

¹Copyright ©Ilog 1997-2004. Cplex is a trademark of ILOG.

Sumário

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

1	Introdução	p. 9
1.1	Motivação	p. 9
1.2	Engenharia de Tráfego	p. 12
1.3	Objetivo	p. 13
1.4	Organização deste trabalho	p. 13
2	Redes ópticas em anel	p. 14
2.1	Características Básicas das redes ópticas SDH em anel	p. 14
2.1.1	Arquitetura de Redes SDH	p. 14
2.1.1.1	Proteção MS-SP Ring	p. 16
2.1.1.2	Proteção SNC-P	p. 16
2.1.1.3	Balanço de custos e capacidade - MS-SP Ring x SNC-P	p. 18
3	Roteamento em redes SDH	p. 20
3.1	Definição do Problema	p. 20
3.2	Considerações tecnológicas aplicadas ao modelo	p. 23
3.3	Formulação Matemática	p. 25
4	Validação do Modelo	p. 31
4.1	Testes para diferentes cenários de rede	p. 33
5	Conclusão	p. 40
	Referências	p. 42

Lista de Figuras

1	Pirâmide de custo das Operadoras de Telecomunicações.	p. 11
2	Técnica de grooming	p. 12
3	Funcionalidades do nó SDH	p. 15
4	Anel SDH com proteção MS-SP Ring.	p. 17
5	Nó SDH com proteção SNC-P	p. 17
6	Anéis SDH com proteção SNC-P	p. 18
7	Alocação de Tráfego MS-SP Ring x SNC-P	p. 19
8	Modelo proposto para um anel	p. 24
9	Modelo proposto para dois anéis	p. 25
10	modelo proposto para três anéis	p. 26
11	Testes de tráfego para rede com 5 anéis	p. 31
12	Testes de tráfego para rede com 5 anéis	p. 32
13	Perfis de Demanda de Tráfego	p. 34
14	Topologia de Rede com 8 Anéis	p. 35
15	Topologia de Rede com 16 Anéis	p. 37

Lista de Tabelas

1	Demanda do Produto VC12	p. 31
2	Demanda concentrada do Produto VC12 para rede com 8 anéis	p. 36
3	Demanda distribuída do Produto VC12 para rede com 8 anéis	p. 36
4	Demanda concentrada do Produto VC12 para rede com 16 anéis	p. 38
5	Demanda distribuída do Produto VC12 para rede com 16 anéis	p. 38
6	Resultado dos Testes com Padrão de Demanda Concentrado	p. 38
7	Resultado dos Testes com Padrão de Demanda Distribuído	p. 39

1 *Introdução*

1.1 *Motivação*

O tráfego cursado nas redes de telecomunicações, quer seja de dados, voz ou vídeo, demandam por requisitos de qualidade e disponibilidade cada vez mais rígidos e exigidos pelos usuários. Para garantir tais requisitos nas redes de telecomunicações, são implementadas funcionalidades técnicas capazes de oferecer a segurança e a qualidade requerida.

Portanto, quando se fala em QoS (*Quality of Service*) e SLA (*Service Level Agreement*)¹, ou seja, qualidade e disponibilidade do serviço prestado, as redes com funcionalidades de proteção reúnem os requisitos técnicos necessários para atenderem as exigências de mercado e, por isso, são hoje uma das melhores opções de infra-estrutura para transporte de serviços corporativos de telecomunicações.

A qualidade do serviço prestado QoS (*Quality of Service*) é medida em função dos parâmetros de qualidade necessários para cada tipo de serviço cursado na rede. Os parâmetros de QoS permitem ao usuário definir os requisitos de qualidade desejados para cada serviço a ser utilizado. Por sua vez, o SLA é definido por meio de um contrato entre o cliente e o provedor do serviço para o qual os limites especificados são suportados pelas medidas de QoS. Para [1], um dos cenários de aplicação de QoS é a detecção do real comportamento do serviço prestado com o objetivo de confrontar com os limites dos parâmetros de SLA acordados em contrato .

Uma rede com a funcionalidade de proteção oferece segurança e confiabilidade para o transporte dos serviços de telecomunicações e este ambiente é encontrado normalmente nos núcleos da rede onde há concentração de tráfego. Portanto, a queda de um elemento da rede ocasionaria uma interrupção de grandes proporções nos serviços. Com isso justifica o investimento da funcionalidade de proteção que visa obter a máxima disponibilidade possível do serviço prestado garantindo dessa forma o SLA. Normalmente a prestação de serviços dentro das redes em anel com proteção se dá para usuários que demandam um SLA com alta qualidade e disponibilidade, como por exemplo, grandes empresas, bancos, ISP (*Internet Service Provider*), etc.

Por outro lado as redes com topologia em árvore proporcionam uma relativa facilidade de implementação e proporcionam um menor investimento além de oferecer também uma plataforma de serviços convergentes ao usuário e por isso são uma boa opção de acesso para serviços residenciais e pequenas empresas onde o SLA não possui requisitos de QoS tão exigentes. Por essa razão tais redes estão sendo largamente utilizadas no acesso aos

¹QoS e SLA são requisitos de qualidade e garantia de serviço acordados em um contrato de prestação de serviço de telecomunicações ou regulados através da Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL)

usuários, onde através de um mesmo meio estão presentes os serviços chamados *triple-play*: telefonia, acesso a internet e TV por assinatura.

Com o maior parque instalado no mundo dentre as redes de transporte de informação, o investimento realizado na implantação das redes SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*) foi muito alto. Ainda mais o fato de que o desenvolvimento tem acompanhado a evolução tecnológica para atendimento às demandas de fluxo de dados de serviços convergentes através de implementações que permitem uma conectividade simples e transparente com as redes multiserviço ². Resta às operadoras a manutenção de sua utilização por vários anos.

A implementação da funcionalidade de proteção nas redes de telecomunicações garante uma alta disponibilidade dos serviços cursados proporcionando ao usuário uma garantia de continuidade de serviço. As funcionalidades de proteção possuem estratégias que garantem a recuperação da conexão do tráfego por outro caminho caso haja uma ocorrência de falha em um dos arcos da rede. As redes SDH dispõem de tempos de recuperação de tráfego abaixo de 50ms (cinquenta milissegundos) [10] permitindo um melhor compromisso entre eficiência de capacidade e cobertura de falha.

Em [8] é descrito o funcionamento e algumas vantagens de aplicação dos mecanismos de proteção das redes SDH em anel e apresenta também um estudo de caso prático ilustrando os ganhos alcançados em adotar tais estratégias.

Qualquer empreendimento realizado principalmente num mercado de competição acirrada como o de telecomunicações, é necessário minimizar o tempo destinado ao retorno do investimento. Uma das formas de realizar esta estratégia é a utilização otimizada dos recursos disponíveis na rede principalmente em relação ao fluxo das demandas de interesse de tráfego dado pelo estudo de mercado no momento da elaboração do *plano de negócio*.

Como a evolução tecnológica das plataformas de redes anda a passos largos, impulsionada pelas demandas por serviços cada vez mais carregados de multimídia, o custo por bit transmitido tende a cair exponencialmente. Portanto, há uma necessidade premente das operadoras de telecomunicações utilizarem ferramentas que as possibilitem otimizar seus recursos garantindo um retorno mais rápido do investimento. Neste sentido, a renovação/substituição das redes é feita gradualmente, evitando investimentos desnecessários e melhorando assim a competitividade das Empresas.

A figura 1 nos mostra que uma substituição da tecnologia de rede na planta de uma Operadora de Telecomunicações, requer investimentos não só em equipamentos mas também em treinamento para o corpo técnico de operação e manutenção, podendo atingir até uma alteração na infraestrutura física da rede atual. Portanto, o desenvolvimento e o aprimoramento da infra-estrutura em uso, maximiza o ROI (return on investment) devido a esse custo evitado. Outro fator que maximiza o ROI é a otimização da utilização da banda disponível tal que mais usuários possam ser servidos sem ter que expandir a infra-estrutura existente [4].

Uma das ferramentas que mais contribuem para diminuir os custos de operação de uma rede de telecomunicações é a aplicação de uma engenharia de tráfego que otimize e melhor aproveite a banda disponível pela busca da alocação otimizada do tráfego. A im-

²Redes Multiserviço são redes que proporcionam o provimento de vários serviços em uma única infraestrutura de rede



Figura 1: Pirâmide de custo das Operadoras de Telecomunicações.

plementação desta técnica garante um crescimento ordenado e gradual da rede permitindo uma maior flexibilidade nas alternativas de novos investimentos.

Buscando o aprimoramento das questões relacionadas ao problema de alocação de tráfego em uma rede SDH, este trabalho trata do problema de *roteamento* cujo objetivo é definir o melhor caminho para o tráfego entre os nós da rede, considerando os caminhos disponíveis entre cada par origem-destino, a capacidade e o custo de tráfego de cada anel a um custo mínimo. Uma técnica bastante utilizada para alocação de tráfego em redes SDH é a técnica de *grooming*, e só é possível devido à estrutura de multiplexação apresentada por essa tecnologia. Esta técnica consiste na aglutinação dos produtos de mesmo interesse de demanda em determinado ponto da rede. É tratado como um problema de projeto de topologia de rede lógica onde busca prover o assinalamento dos diversos produtos que circulam na rede [7].

A figura 2 mostra como o emprego da técnica de *grooming* pode reduzir as conexões físicas de uma rede tendo como consequência a redução do custo da mesma. Considerando que:

- os nós N1, N2, N3 e N4 são nós de origem e possuem 4 (quatro) unidades dos produtos A, B, C e D respectivamente para serem distribuídos;
- os nós N5, N6, N7 e N8 são nós de destino e demandam dos nós N1, N2, N3 e N4 uma unidade de cada produto A, B, C e D.

A figura 2a mostra que uma rede de transporte sem *grooming*, necessita que cada par origem-destino possua uma conexão direta para a distribuição completa dos produtos demandados. No nosso exemplo estas conexões resultaram em 16(dezesseis) arcos de interligação.

A figura 2b mostra que com a adição do nó de *grooming* o número de conexões é reduzido pela metade, o que contribui para a redução do custo da rede. Neste caso o nó de grooming exerce a função de interface entre os pares origem-destino aglutinando e redirecionando os produtos ao destino de interesse.

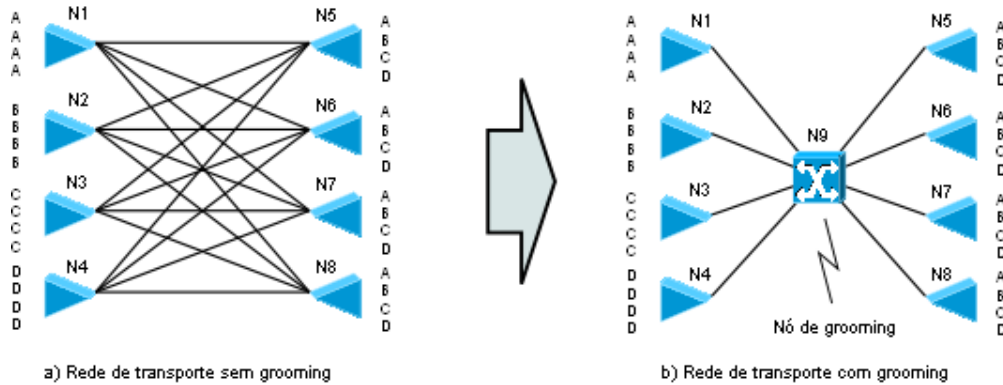


Figura 2: Técnica de grooming

Apesar de ser bastante utilizada, esta técnica não é tratada plenamente no contexto deste trabalho. Neste trabalho o *grooming* é tratado segundo as condições de contorno definidas na seção 3.1.

1.2 Engenharia de Tráfego

O objetivo fim de um sistema de telecomunicações é prover a conexão entre dois ou mais pontos atendendo as necessidades de comunicação entre eles. Quando uma conexão acontece entre dois pontos dizemos que há um ponto de origem, um ponto de destino e um fluxo de sinal sob um canal de propagação. O fluxo de sinal é a representação da ocupação da rede dada a necessidade de comunicação entre esses dois pontos o qual chamamos de demanda. Esta demanda é representada pelo tipo de produto, dado pelo interesse de tráfego entre o par origem-destino. Os produtos que são habilitados a trafegar na estrutura da rede fazem parte da demanda de um determinado par origem-destino e consomem uma determinada quantidade de recursos ao longo do percurso de conexão onde sofre o que chamamos de roteamento de tráfego. A Engenharia de Tráfego, é o processo de alocação de tráfego em uma rede, de forma a otimizar a utilização de seus recursos. Em [6] a Engenharia de tráfego é citada como um mecanismo capaz de controlar e otimizar o roteamento da rede. As técnicas utilizadas de alocação de tráfego nas redes SDH são a definição do *roteamento* e dos nós de *grooming*.

Dentre as potencialidades oferecidas pela Engenharia de tráfego, podemos citar:

- redução de pontos de congestionamento, que representam gargalos na rede;
- redução de custos pelo melhor aproveitamento dos enlaces, com uso mais eficiente da banda disponível;
- melhoria geral na qualidade de serviço, facilitando a administração dos recursos utilizados e como consequência uma operação e manutenção da rede menos onerosa e mais eficiente.

1.3 Objetivo

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver um modelo que permita representar as características tecnológicas de uma rede óptica SDH em anel com proteção e otimizar o custo do tráfego cursado utilizando as técnicas de *roteamento* e *grooming* no contexto da PLI (*Programação Linear Inteira*).

São objetivos específicos deste trabalho:

- apresentar um modelo válido de representação para rede óptica em anel com proteção;
- atribuir um modelo em grafo para facilitar que a implementação expresse as condições tecnológicas das funcionalidades dos mecanismos de proteção de uma rede óptica em anel;
- Implementar a técnica de *roteamento* através do modelo como facilitadora da otimização do fluxo dos produtos na rede;

1.4 Organização deste trabalho

Este trabalho está organizado da seguinte forma: O capítulo 2 contém uma breve explicação sobre a tecnologia de uma rede SDH óptica em anel, seus elementos, mecanismos de proteção e demais aspectos relevantes ao entendimento de seu funcionamento. No capítulo 3 apresentamos os aspectos tecnológicos levados em consideração no modelo matemático e sua representação em grafo, o modelo matemático de referência e o modelo matemático experimental. No capítulo 4 apresentamos alguns testes para validação do modelo bem como vários cenários de carregamento da rede e as discussões acerca dos resultados. Finalizando, o capítulo 5 apresenta a conclusão e algumas possibilidades para aplicação em trabalhos futuros.

2 *Redes ópticas em anel*

Para entendermos melhor as questões relativas ao funcionamento das redes ópticas em anel com proteção, iremos nos referir à tecnologia SDH. Essa foi padronizada pelo ITU (International Telecommunication Union)¹, através de seu setor de padronização para telecomunicações ITU-T, que apresenta recomendações para a produção de equipamentos e projeto de arquitetura de rede que são adotadas por todos os fabricantes e fornecedores de equipamentos SDH do planeta. As redes ópticas têm como principal função o transporte de informações. Seu padrão de utilização prevê o estabelecimento de uma conexão entre os pontos de origem e destino de uma dada demanda, garantindo assim a continuidade da comunicação através da disponibilização do canal no nível da camada física ou enlace de rede [2]. Por meio dessa característica os canais de uma rede óptica são transparentes a quaisquer protocolos de comunicação, e permitem o transporte de diferentes aplicações de serviços. Além de proporcionar alta robustez do canal de comunicação, provê também uma alta capacidade de restabelecimento da continuidade do serviço em caso de falha em um dos pontos da rede, através dos mecanismos de proteção intrínsecos à tecnologia. A seguir são apresentadas as principais características das redes SDH, sua concepção e os padrões estabelecidos pelo ITU-T.

2.1 **Características Básicas das redes ópticas SDH em anel**

2.1.1 **Arquitetura de Redes SDH**

A arquitetura das redes SDH padronizada pela recomendação G.803 do ITU-T estabelece diversas maneiras de se construir uma rede na prática [11]. Dentre elas podemos citar:

- *Topologia Ponto-a-Ponto*
- *Topologia em Anel (Unidirecional e Bidirecional)*
- *Topologia em Malha (Mesh)*
- *Topologia Mista*

¹O ITU é formado pelos setores: ITU-R de rádio comunicação, ITU-T de padronização para telecomunicações e ITU-D de desenvolvimento para telecomunicações

O padrão SDH viabiliza redes em anel com nós denominados ADM (Add Drop Multiplex) devido à realização de funções do tipo deriva/insere em um sinal denominado agregado de mais alta velocidade conforme mostrado na figura 3.

Um nó SDH pode possuir diversas interfaces de diversas hierarquias definidas na estrutura de multiplexação [8]. As interfaces que possuem a maior hierarquia em um determinado nó óptico são denominadas *Interfaces de Agregado* e as interfaces cujas hierarquias são menores e o tráfego é terminado ou inserido na estação onde se encontra o nó são chamadas de *Interfaces de Tributário*.

O tráfego em uma *Interface de Agregado* é constituído pelo somatório dos tráfegos das diversas *Interfaces de Tributário* dos nós pertencentes ao anel.

As *Interfaces de Agregado* são interligadas através de fibras ópticas em uma estrutura sequencial dos nós de modo a formar um anel. Uma *Interface de Agregado* é constituída de um conjunto de *timeslots* que possuem a capacidade de agrupar os produtos a serem transportados. Sendo assim os arcos dos anéis são formados pela conexão dos agregados dos nós e possuem uma determinada capacidade em número de *timeslots*. Esta estrutura pode ser comparada aos sistemas DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) onde a conexão entre os nós possuem um conjunto de portadoras de luz com comprimento de ondas distintos. Cada comprimento de onda possui uma capacidade de tráfego determinada pela hierarquia do sistema. Os atendimentos às demandas em uma rede DWDM, emprega-se também a técnica de roteamento tal qual é utilizada nos sistemas SDH.

A estrutura de um *timeslot* para aglutinação dos produtos considerada neste trabalho está descrita na seção 3.2. A figura 3 a seguir detalha as funcionalidades de um nó SDH juntamente com suas interfaces.

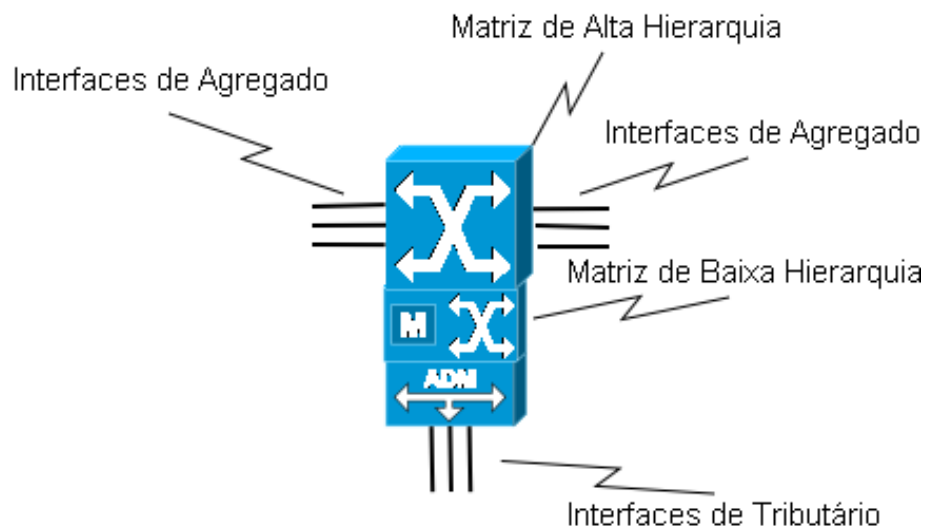


Figura 3: Funcionalidades do nó SDH

O tráfego que passa pelo nó SDH é direcionado da seguinte forma:

- **Interface de Agregado - Matriz de Alta Hierarquia - Interface de Agregado**, desta forma o tráfego é caracterizado como passante no nó e não sofre qualquer tipo de ação deriva/insere e/ou *grooming*, apenas o roteamento;

- **Interface de Agregado - Matriz de Alta Hierarquia - Matriz de Baixa Hierarquia - Matriz de Alta Hierarquia - Interface de Agregado**, neste caso o tráfego sofre uma ação de *grooming* na *Matriz de Baixa Hierarquia*;
- **Interface de Agregado - Matriz de Alta Hierarquia - Matriz de Baixa Hierarquia - Interface de Tributário**, o tráfego é demandado no nó através de uma ação deriva/insere;

O tráfego em uma rede SDH é bidirecional, portanto considera-se equivalente a quantidade de tráfego que circula nos dois sentidos de cada conexão.

Anéis tolerantes a falha (ATFs) podem ser implementados de modo a garantir aproximadamente 100% de disponibilidade do serviço [9]. Essas arquiteturas são classificadas quanto ao tráfego e ao mecanismo de proteção [8]. Comparações entre estes ATFs em termos de custo e capacidade, demonstram que a viabilidade de uma arquitetura ou outra vai depender fortemente do padrão de demanda de tráfego da região a ser servida pelo ATF. Os ATFs podem ser divididos em dois grupos:

- Multiplex Section-Shared Protection Ring (MS-SP Ring) - Proteção de seção Multiplex²
- Sub-Network Connection Protection (SNC-P) - Proteção de via³

2.1.1.1 Proteção MS-SP Ring

O mecanismo de proteção no qual é baseado o MS-SP Ring tem como premissa a reserva de metade da capacidade dos arcos para proteção do tráfego cursado, ou seja, a cada arco do anel, metade de sua capacidade é utilizada para o tráfego de serviço e metade é reservada para a proteção deste serviço. Vale ressaltar que em condições normais de operação, a capacidade reservada para proteção em cada arco do anel permanece inutilizada aguardando a ocorrência de alguma falha. No caso de um rompimento do arco entre os nós A e B, como podemos verificar na figura 4, através de um mecanismo denominado *loop-back* a capacidade de transmissão disponível para proteção entre os arcos adjacentes aos nós C e D é utilizada para transportar o tráfego de serviço interrompido. Assim, após a falha no arco AB, o tráfego entre os nós A e B é restabelecido através da capacidade de proteção disponível nos arcos BC, CD e DA.

2.1.1.2 Proteção SNC-P

O modelamento realizado no nosso trabalho implementa a técnica de proteção SNC-P (Subnetwork connection Protection). Esta técnica é bastante utilizada em redes de acesso, devido ao tempo de comutação extremamente baixo (cerca de 10ms). Esta funcionalidade possibilita ao operador da rede estar realizando um maior número de intervenções de abertura dos anéis para inserção e retirada de nós, provocada pela dinâmica de atendimento

²Uma seção Multiplex é a conexão entre dois pontos nos quais existe a possibilidade de se extrair tráfego do anel.

³Uma via é o caminho no qual a demanda é transmitida.

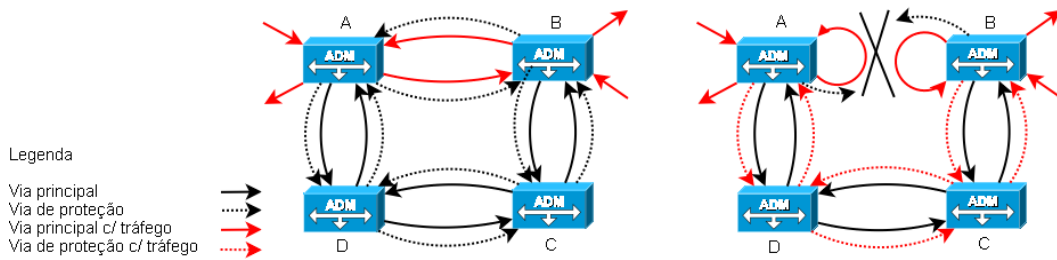


Figura 4: Anel SDH com proteção MS-SP Ring.

dos clientes, sem comprometer a qualidade do serviço prestado uma vez que o tempo de restabelecimento do tráfego diante da abertura de um dos arcos do anel é curto o bastante para não comprometer a qualidade dos serviços que por ele trafegam. As redes de acesso urbanas SDH são normalmente compostas de anéis de baixa hierarquia que funcionam como coletores de tráfego. Esses anéis se estendem por todos os bairros do município com a função de transporte do tráfego concentrado por meio de uma rede com formato radial, daquela região até o ponto central onde se encontra o equipamento núcleo daquele ponto de presença. Existem clientes que demandam uma quantidade de banda tal justificando uma instalação de um nó ADM SDH em suas dependências, na maioria dos casos são empresas ou corporações. Este nó é interligado a um ATF coletor de tráfego, e portanto, o SLA disponibilizado em contrato para este cliente prevê uma disponibilidade diferenciada podendo chegar em torno de 99,99%.

A figura 5 nos mostra o comportamento de um nó SDH trabalhando com a comutação SNC-P em sua condição normal e de falha. No sentido de transmissão o sinal é paralelo e enviado nas duas direções do anel. No sentido de recepção teremos o sinal presente pelas duas direções do anel e a seleção é realizada no nó de saída para a melhor das duas conexões, baseado em um critério de falha em conexão.

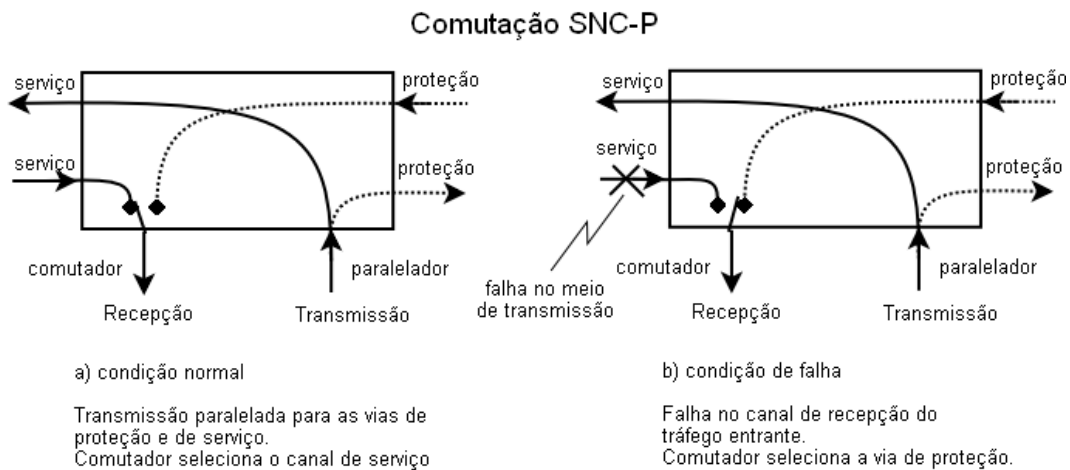


Figura 5: Nó SDH com proteção SNC-P

A configuração da proteção SNC-P pode ser realizada de duas formas: uma chamada de SNC-P Unidirecional e a outra de SNC-P Bidirecional como podemos ver na figura 6. A proteção Unidirecional é configurada de tal maneira que os sinais de transmissão e recepção da via principal dos nós circulem num mesmo sentido no anel e por sua vez os sinais de transmissão e recepção da via de proteção circulem em sentido contrário. Já a

proteção Bidirecional é configurada para que os sinais de transmissão da via principal e recepção da via de proteção do anel circulem num mesmo sentido e os sinais de transmissão da via de proteção e recepção da via principal também circulem no mesmo sentido.

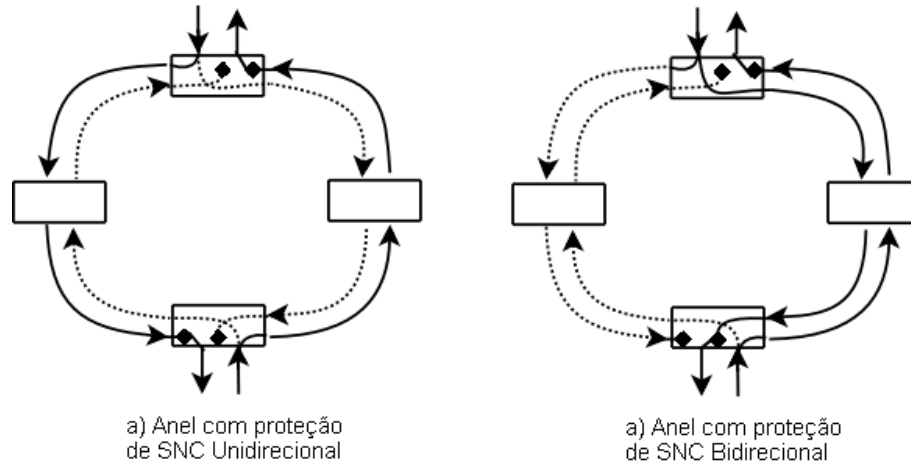


Figura 6: Anéis SDH com proteção SNC-P

2.1.1.3 Balanço de custos e capacidade - MS-SP Ring x SNC-P

As diferentes propriedades de cada tipo de anel têm implicações nas regras de alocação de capacidade aplicadas. A conexão protegida no SNC-P ocupa, por convenção, um *timeslot* do canal para todo anel. Uma conexão protegida similar no MS-SP Ring, ocupa somente um *timeslot* do canal da rota selecionada, deixando o mesmo *timeslot* do canal disponível para carregar mais tráfego nos outros arcos do anel não pertencente à rota estabelecida. Esta capacidade de reutilização da largura de banda nos outros arcos do anel, permite maior eficiência em situações onde o tráfego é quase uniforme, isto é, com interesses de tráfego distribuídos entre todos os nós do anel. No entanto, se o tráfego é predominantemente centralizado, isto é, o interesse de tráfego converge de todos os nós para um único nó do anel não há nenhuma vantagem quanto a capacidade de alocação de tráfego do MS-SP Ring sobre o SNC-P. Isto significa que a utilização da técnica SNC-P em redes onde a característica do tráfego é concentrado a exemplo das redes de acesso, não tem desvantagens sobre a proteção MS-SP Ring. Já em redes com perfil de tráfego distribuído, a técnica MS-SP Ring tem grande vantagem visto a sua capacidade de alocação e reutilização de largura de banda.

A seguir, a figura 7 ilustra sobre a comparação MS-SP Ring x SNC-P, no que diz respeito a alocação de banda. Note que a matriz origem x destino da figura 7 apresenta um tráfego convergente de demandas de 252 unidades de tráfego do nó N1 para todos os outros nós do anel. Tais demandas são atendidas igualmente pelos dois anéis sendo que para o anel com proteção SNC-P os arcos ficam totalmente ocupados, isto porque a capacidade total do anel é de 1008 unidades de tráfego e a proteção deve ser realizada conforme mencionada na seção 2.1.1.2. Já no anel com proteção MS-SP Ring as demandas são atendidas, porém, nem todos os arcos tem a capacidade totalmente esgotada graças ao seu mecanismo de proteção descrito na seção 2.1.1.1. Esta é a prova de que anéis com configuração de proteção MS-SP Ring tem uma vantagem muito significativa na alocação

do tráfego para demandas distribuídas e por esse motivo são preferencialmente utilizados nos núcleos e backbones das redes SDH.

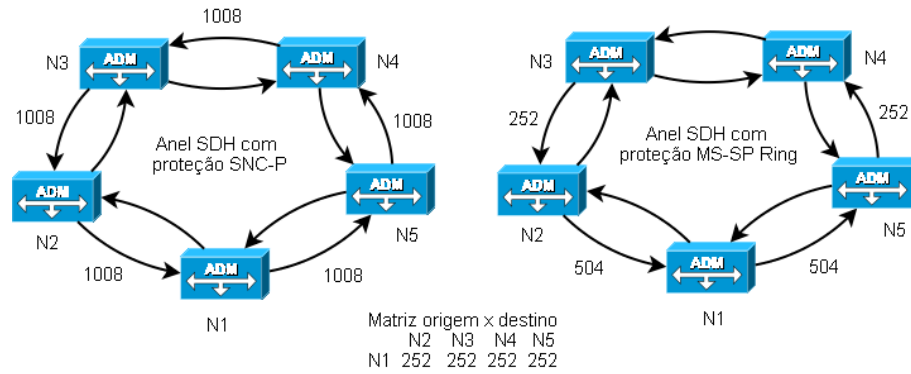


Figura 7: Alocação de Tráfego MS-SP Ring x SNC-P

3 Roteamento em redes SDH

Uma rede SDH é por natureza determinística, e normalmente, o provisionamento e encaminhamento das demandas ao longo da rede é definido pelo operador. O problema do provisionamento de tráfego nas redes SDH passa pela definição da alocação de recursos lógicos para o encaminhamento das demandas dos produtos entre os seus diversos pares origem-destino através da técnica de roteamento. Este problema surge quando ocorre uma demasiada concentração de tráfego em alguns pontos da rede levando a investimentos desnecessários de expansão e implicando em uma deterioração dos resultados financeiros da operadora de telecomunicações. Assim torna-se necessário realizar investimentos no sentido de prover recursos técnicos suficientemente eficientes para dimensionar a alocação do tráfego de maneira otimizada.

3.1 Definição do Problema

O modelo desenvolvido neste trabalho e apresentado neste capítulo, leva em consideração os aspectos tecnológicos de uma rede SDH apresentados na seção 2.1.1. É baseado no problema de *Multifluxo de Custo Mínimo* [5], devido às características existentes para o encaminhamento do tráfego aliada aos objetivos a serem alcançados.

O modelo consiste em rotear as demandas entre os anéis da rede considerando os interesses de tráfego interno ao anel ou entre anéis, ou seja, para as demandas internas ao anel serão consumidos recursos do próprio anel, e de um anel para o outro toda a demanda de interesse entre aqueles anéis serão transportadas de um para o outro em tantos *timeslots* quantos forem necessários. O modelo matemático geral para o problema de *Multifluxo de Custo Mínimo* é apresentado a seguir.

Minimize:

$$\sum_{k=1}^p c^k x^k$$

Sujeito a

$$Ax^k = b^k \quad k=1, \dots, p$$

$$l \leq \sum_{k=1}^p x^k \leq h$$

$$l^k \leq x^k \leq h^k \quad k=1, \dots, p$$

Onde:

x^k é o vetor de fluxos do produto k na rede;

A é a matriz de incidência do grafo para a rede em análise;

b^k é o vetor de ofertas e demandas do produto k ;

c^k é o vetor contendo o custo em cada arco para o produto k ;

h e l são respectivamente os vetores de limites superiores e inferiores para o fluxo total em cada arco da rede;

h^k e l^k são respectivamente os vetores de limites superiores e inferiores para o fluxo do produto k ;

Considerando uma rede composta por vários ATFs, o problema de roteamento proposto neste trabalho é baseado no modelo geral, sendo que a restrição de limite de fluxo nos arcos é substituída por uma restrição de limite de capacidade de um determinado *timeslot* em transportar os produtos do tipo k a partir das seguintes condições de contorno:

1. Fluxo das demandas com origem e destino no mesmo anel;
2. Fluxo das demandas com origem e destino em anéis adjacentes;
3. Fluxo das demandas com origem e destino em anéis disjuntos;

Cada *timeslot* tem a capacidade de transportar uma determinada quantidade de um determinado produto e a capacidade dos anéis é composta por um conjunto de *timeslots*. Cada *timeslot* somente pode transportar demandas que estejam em condições de contorno idênticas, que podem ocupar um *timeslot* ou parte deste, que por sua vez é parte da capacidade do anel.

O modelo proposto resumido é definido a seguir:

Minimize:

$$\sum_{z=1}^Z ct^z \quad (3.1)$$

Sujeito a:

$$Ax^k = b^k \quad k = 1, \dots, p \quad (3.2)$$

$$\sum_{k=1}^p (x^k/q^k) \leq w^z \quad \forall z \in Z \quad (3.3)$$

$$l \leq \sum_{z=1}^Z w^z \leq h \quad (3.4)$$

$$w^z \geq 0 \quad (3.5)$$

$$\sum_{z=1}^Z t^z = w^z \quad (3.6)$$

$$t^z \in \{0, 1\} \quad (3.7)$$

onde:

Parâmetros

\mathbf{c} é o vetor contendo o custo em cada *timeslot* utilizado no anel;

\mathbf{A} é a matriz de incidência do grafo para a rede em análise;

\mathbf{b}^k é o vetor de ofertas e demandas do produto k;

\mathbf{h} e \mathbf{l} são respectivamente os vetores de limites superiores e inferiores para a quantidade de *timeslot*;

\mathbf{w}^z é o vetor de ocupação dos *timeslots* da condição de contorno do tipo z ;

Variáveis

\mathbf{w}^z é o vetor de ocupação dos *timeslots* da condição de contorno do tipo z ;

\mathbf{q}^k capacidade do *timeslot* de transportar o produto k.

t^z é o vetor de utilização dos *timeslots* da condição de contorno do tipo z ;

x^k é o vetor de fluxos do produto k na rede.

Este modelo resumido apresenta a função objetivo na equação 3.1 como a minimização do custo de utilização dos *timeslots* na rede para uma determinada condição de contorno z definida acima. As equações 3.2 definem a matriz de incidência com suas respectivas demandas. As equações 3.3 tratam-se da aglutinação dos produtos em uma determinada quantidade de *timeslots* w sob uma dada condição z . As equações 3.4 delimitam a capacidade de *timeslots*. As equações 3.5 definem um valor positivo para o *timeslot*. As equações 3.6 garantem que a utilização dos *timeslots* será igual a quantidade de *timeslots* ocupada pelas demandas. E por fim as equações 3.7 garantem uma condição binária na utilização dos *timeslots*.

3.2 Considerações tecnológicas aplicadas ao modelo

Devido à proteção SNC-P apresentada na seção 2.1.1.2 operar com dois caminhos simultâneos para o sinal transmitido do nó de origem ao nó de destino esses caminhos determinam a circulação do sinal por todos os arcos do anel. Dessa forma podemos reduzir esse anel a um único nó já que para qualquer demanda por ele transportada, esta consumirá uma determinada capacidade de tráfego em todos os seus arcos.

Para consolidarmos o modelo, as entradas de tráfego dos nós ADM do anel deverão ser consideradas parte integrante de um todo representado pelo nó proposto, e para o atendimento às demandas internas ao anel o modelo prevê o consumo de recurso em *timeslot* do próprio anel. Portanto, a representação de um anel no modelo proposto toma a forma de um único nó facilitando a implementação da restrição relativa a funcionalidade de proteção SNC-P, que impõe a ocupação de todos os arcos do anel pelas demandas aprovionadas. A figura 8 apresenta um anel SDH na configuração SNC-P e a sua transformação na modelagem proposta.

Assim se existe uma demanda do nó N1 para o nó N2, esta ocupa tantos *timeslots* quantos forem necessários ao atendimento absorvendo recursos de capacidade de todo o anel. Esta estratégia atende a condição de contorno (1) descrita na seção 3.1.

A figura 9 apresenta a modelagem para dois anéis interconectados entre si. Cada anel é representado por um nó, e estão conectados através de um ADM comum aos dois anéis. O fluxo das demandas entre os dois anéis diz respeito à condição de contorno (2) apresentada na seção 3.1 e definida para anéis adjacentes. No atendimento às demandas mútuas, *timeslots* são utilizados como recurso de transporte em igual quantidade nos dois anéis.

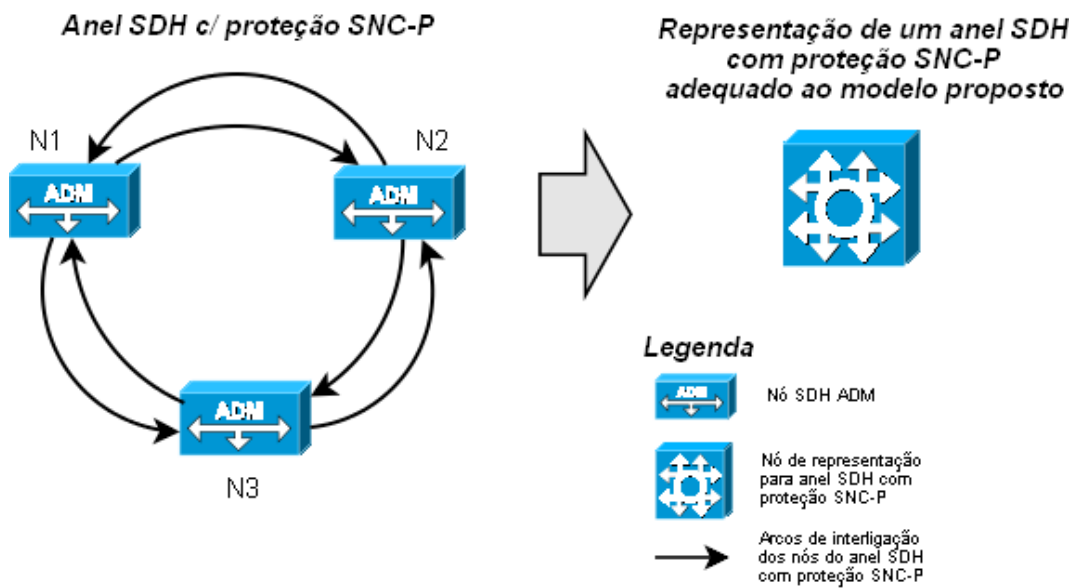


Figura 8: Modelo proposto para um anel

Por fim, a figura 10 mostra a conexão entre três anéis, uma estrutura que nos permite referir às demandas entre anéis disjuntos mencionada na condição de contorno (3) descrita na seção 3.1. As demandas entre os anéis 1 e 3 produzem fluxos que consomem recursos em *timeslots* igualmente nos três anéis. No anel 2 esta demanda é tratada como transbordo de tráfego, e nos demais anéis como demanda originada ou destinada. Esta modelagem nos permite administrar tráfego em redes com arquiteturas em anel, ponto a ponto, malha ou mista citadas na seção 2.1.1.

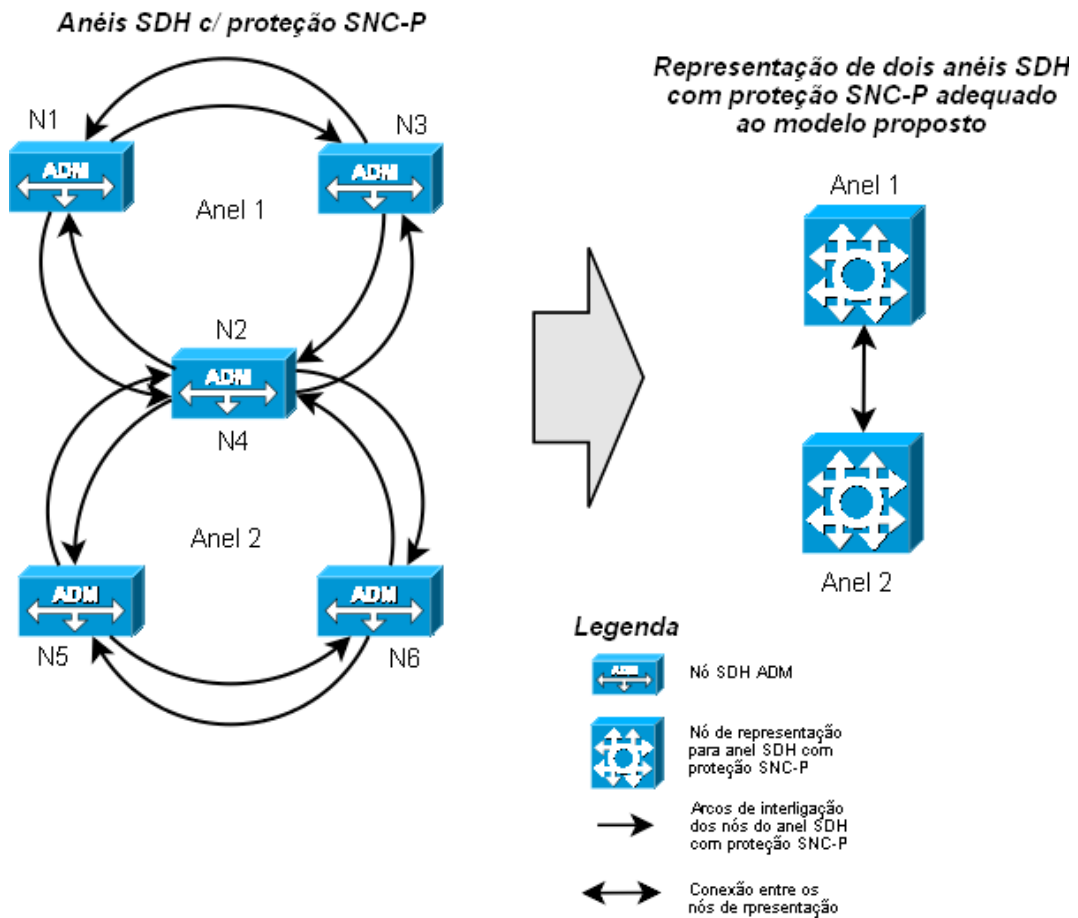


Figura 9: Modelo proposto para dois anéis

Para o modelo proposto foram considerados dois tipos de tráfegos a serem transportados pela rede: um tráfego denominado VC4 e outro tráfego VC12. O tráfego VC4 ocupa um *timeslot* inteiro nos anéis por onde passa, e o tráfego VC12 ocupa 1/63 (um sessenta e três avos) do *timeslot* por onde é transportado, ou seja, se houver a demanda de um único VC12 entre determinados nós do anel, aloca-se um *timeslot* inteiro para o transporte desta única unidade de tráfego entre os nós de origem e destino. Em termos de transporte de banda, um tráfego VC4 é de aproximadamente 140Mbps (cento e quarenta megabit por segundo) o que equivale a capacidade de transportar 1920 (um mil novecentos e vinte) canais telefônicos, e o tráfego VC12 equivale a capacidade de transportar 30 canais telefônicos.

3.3 Formulação Matemática

O modelo é dado pelo grafo $G=(N,A)$ com as considerações da seção 3.2, de onde são definidos conjuntos, variáveis e parâmetros caracterizando-o como um problema de Programação Linear Inteira. Os conjuntos, variáveis e parâmetros, bem como a formulação matemática são mostrados a seguir:

Conjuntos

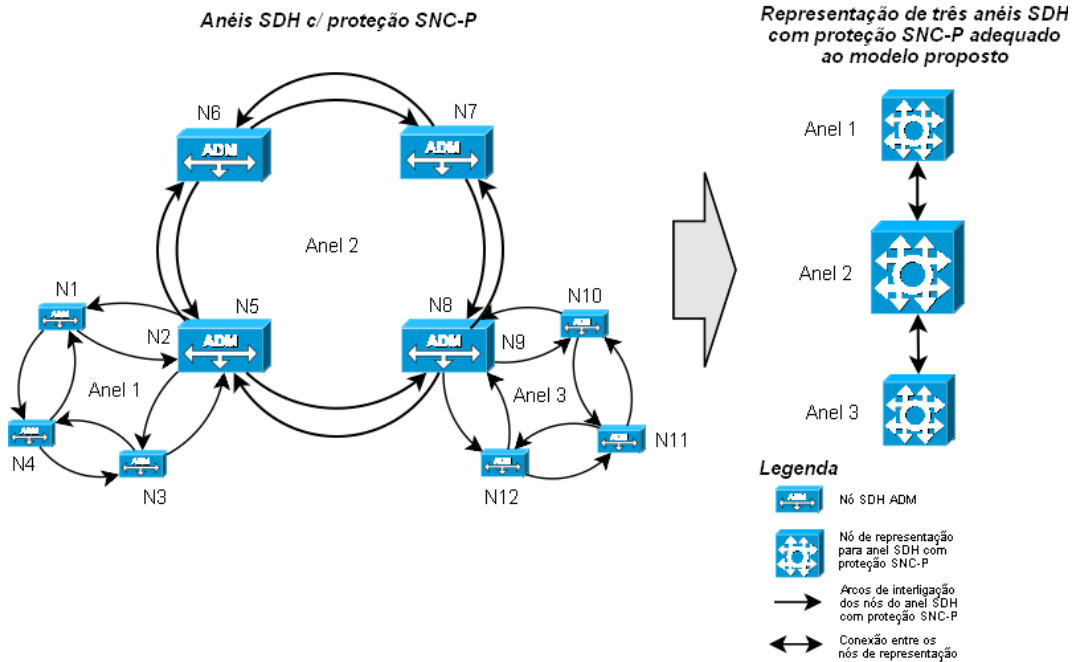


Figura 10: modelo proposto para três anéis

A Conjunto dos anéis da rede tal que $A = \{1, 2, 3, \dots, m\}$, onde m representa o número total de anéis da rede;

S Conjunto de *timeslots* $S = \{1, 2, \dots, n\}$, onde n representa o número total de *timeslots*. Cada *timeslot* $s \in S$ é uma unidade de capacidade em cada anel $i \in A$.

K Conjunto dos produtos a serem transportados na rede $K = 1, 2, \dots, n_k$, representado por $K = k_i^I \cup k_i^{OD} \cup k_i^T$, e n_k é o número total de produtos, onde cada produto k é caracterizado como:

$k = (o_k, d_k, f_k) \mid o_k \in A, d_k \in A, f_k \in \mathbb{Z}_+, 1 \leq k \leq n_k$ com origem o_k , destino d_k e demanda f_k ; e

$k_i^I = (o_k, d_k, f_k) \mid o_k = d_k = i, \forall i \in A$ - conjunto dos produtos cujos nós origem e destino pertencem ao mesmo anel i .

$k_i^{OD} = (o_k, d_k, f_k) \mid (i = o_k \text{ e } i \neq d_k) \text{ ou } (i \neq o_k \text{ e } i = d_k), \forall i \in A$ - conjunto dos produtos onde o anel i é origem ou destino do produto k .

$k_i^T = (o_k, d_k, f_k) \mid i \neq o_k \text{ e } i \neq d_k, \forall i \in A$ - conjunto dos produtos onde o anel i é de passagem para o produto k .

Parâmetros

o_k Anel de origem para transporte do produto $k \in K$, onde $o_k \in A$, o produto k origina internamente no anel o_k ;

d_k Anel de destino para transporte do produto $k \in K$, onde $d_k \in A$, o produto k destina internamente ao anel d_k ;

f^k Demanda do produto $k \in K$ caracterizada por um tipo de tráfego e pelo par origem-destino (o_k, d_k) ;

q^k capacidade do *timeslot* $s \in S$ para transportar o produto $k \in K$;

η fator de penalização para o uso do transbordo no atendimento a demanda f^k , caso a rede não tenha capacidade suficiente para atendimento de toda a demanda;

c_{is} Custo de utilização do *timeslot* $s \in S$ no anel $i \in A$;

NT_i Capacidade do anel $i \in A$ em número de *timeslots*.

Variáveis

x_{ij}^k fluxo do produto $k \in K$ que trafega do anel $i \in A$ para o anel $j \in A, i \neq j$;

w_i^I indica a quantidade de *timeslots* utilizados para o tráfego com origem e destino no anel $i \in A$;

w_i^{OD} indica a quantidade de *timeslots* utilizados para o tráfego com origem ou destino no anel $i \in A$;

w_i^T indica a quantidade de *timeslots* utilizados para o tráfego de transbordo no anel $i \in A$;

t_{is}^I variável binária que indica se o *timeslot* $s \in S$ é alocado para o tráfego com origem e destino no anel $i \in A$;

t_{is}^{OD} variável binária que indica se o *timeslot* $s \in S$ é alocado para o tráfego com origem ou destino no anel $i \in A$;

t_{is}^T variável binária que indica se o *timeslot* $s \in S$ é alocado para o tráfego de transbordo no anel $i \in A$;

T^k Variável artificial relativa ao transbordo da demanda f^k ou que não é atendida pelos anéis da rede, $\forall k \in K$.

A formulação matemática é dada por:

Minimize

$$F = \sum_{i \in A} \sum_{s \in S} c_{is} (t_{is}^I + t_{is}^{OD} + t_{is}^T) + \eta \sum_{k \in K} T^k \quad (3.8)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j \in A} x_{i,j}^k - \sum_{l \in A} x_{l,i}^k = \begin{cases} f^k - T^k, & i = o_k \\ -f^k + T^k, & i = d_k \\ 0, & \forall i \in \{A - o_k - d_k\}, \forall k \in K_i^T \end{cases} \quad \begin{cases} \forall k \mid o_k \in K_i^{OD} \\ \forall k \mid d_k \in K_i^{OD} \end{cases} \quad (3.9)$$

$$\sum_{k \in k_i^I} (f^k - T^k) / q^k \leq w_i^I \quad \forall i \in A \quad (3.10)$$

$$\sum_{k \in k_i^{OD}} [(x_{ij}^k + x_{ji}^k) / q^k] \leq w_i^{OD} \quad \forall i \in A \quad (3.11)$$

$$\sum_{k \in k_i^T} [(x_{ij}^k + x_{ji}^k) / q^k] \leq w_i^T \quad \forall i \in A \quad (3.12)$$

$$\sum_{s \in S} t_{is}^I = w_i^I \quad \forall i \in A \quad (3.13)$$

$$\sum_{s \in S} t_{is}^{OD} = w_i^{OD} \quad \forall i \in A \quad (3.14)$$

$$\sum_{s \in S} t_{is}^T = w_i^T \quad \forall i \in A \quad (3.15)$$

$$t_{is}^I + t_{is}^{OD} + t_{is}^T \leq 1 \quad \begin{array}{l} \forall s \in S \\ \forall i \in A \end{array} \quad (3.16)$$

$$\sum_{s \in S} t_{is}^I + t_{is}^{OD} + t_{is}^T \leq NT_i \quad \forall i \in A \quad (3.17)$$

$$t_{is}^I, t_{is}^{OD}, t_{is}^T \in \{0, 1\} \quad \begin{array}{l} \forall i \in A \\ \forall s \in S \end{array} \quad (3.18)$$

$$x_{ij}^k \geq 0 \quad \begin{array}{l} \forall i \in A \\ \forall j \in A \\ \forall k \in K \end{array} \quad (3.19)$$

$$w_i^I, w_i^{OD}, w_i^T \geq 0 \quad \forall i \in A, \text{ inteiras} \quad (3.20)$$

A função objetivo dada pela equação 3.8, tem como premissa minimizar o custo de utilização dos *timeslots* para transporte dos produtos pelos anéis obedecendo as três condições de contorno estabelecidas na seção 3.1. Cada anel possui uma capacidade de tráfego dada por um conjunto de *timeslots*. Para cada demanda que origina ou termina ou ainda passa por um determinado anel, o custo de utilização do *timeslot* é incorporado na função objetivo. Em certas instâncias, o custo dos *timeslots* de um determinado anel

pode ser mais elevado que nos outros anéis da rede, o que o faz tornar uma fonte de recursos de utilização mais onerosa para a passagem de tráfego, restringindo assim a sua utilização como passagem de tráfego no contexto de minimização da função objetivo. Faz parte também da função objetivo uma parcela definida como variável de transbordo de tráfego cuja função é estabelecer sempre uma solução viável para o tráfego mesmo que não seja possível de ser acomodado na rede, ou seja, o fluxo de transbordo dado pela variável \mathbf{T}^k possibilita ao algoritmo gerar uma solução viável mesmo que a rede não comporte a demanda de tráfego estabelecida. Sendo assim a demanda de tráfego transbordada faz parte do contexto da minimização e é atendida por conexões fictícias criadas pela variável \mathbf{T}^k . Afim de evitar que a variável de transbordo \mathbf{T}^k favoreça em certas instâncias a busca de solução pelo algoritmo, esta tem seu custo penalizado através do fator η . As equações 3.9 refere-se às restrições de atendimento às demandas e conservação do fluxo obedecendo a três condições a seguir:

1. a demanda é positiva e atendida do ponto de vista do anel de origem;
2. a demanda é negativa e atendida do ponto de vista do anel de destino;
3. a demanda é nula do ponto de vista de todos os outros casos.

Estas restrições permitem o atendimento do tráfego de transbordo através da variável \mathbf{T}^k já comentada na descrição da função objetivo.

As restrições dadas pelas equações 3.10, garantem que toda a demanda f^k dada pelo sub-conjunto de produtos k_i^I consuma uma determinada quantidade máxima de *timeslots* w_i^I no anel $i \in A$.

As restrições dadas pelas equações 3.11, garantem que todo o fluxo x_{ij}^k dado pelo sub-conjunto de produtos k_i^{OD} consuma uma determinada quantidade máxima de *timeslots* w_i^{OD} no anel $i \in A$.

As restrições dadas pelas equações 3.12, garantem que todo o fluxo x_{ij}^k dado pelo sub-conjunto de produtos k_i^T consuma uma determinada quantidade máxima de *timeslots* w_i^T no anel $i \in A$.

As restrições em 3.13 definem o assinalamento dos *timeslots* utilizados para as demandas internas dos anéis. Para cada *timeslot* utilizado, o mesmo é assinalado pela variável binária t_{is}^I .

As restrições em 3.14 definem o assinalamento dos *timeslots* utilizados para as demandas terminadas nos anéis. Para cada *timeslot* utilizado, o mesmo é assinalado pela variável binária t_{is}^{OD} .

As restrições em 3.15 definem o assinalamento dos *timeslots* utilizados para as demandas de transbordo nos anéis. Para cada *timeslot* utilizado, o mesmo é assinalado pela variável binária t_{is}^T .

As restrições em 3.16 determinam que o *timeslot* $s \in S$ no anel $i \in A$ somente poderá ser ocupado por um tipo de demanda definida pelos sub-conjuntos de produtos k_i^I ou k_i^{OD} ou k_i^T .

As restrições em 3.17 garantem que a ocupação dos *timeslots* no anel não deve ultrapassar a capacidade estabelecida.

As restrições dadas em 3.18, 3.19 e 3.20 definem as variáveis como não negativas e inteiras.

4 Validação do Modelo

Foram realizados alguns testes em uma rede de cinco nós com poucas demandas com o objetivo de verificar o comportamento do modelo.

Para validação do modelo foram realizados vários testes dos quais mostraremos como exemplo uma rede com 5 (cinco) anéis conforme topologia da figura 11. Na mesma figura é mostrado o comportamento da distribuição dos *timeslots* frente a demanda proposta na Tabela 1. O resultado apresentado na figura 11 indica os anéis e seus respectivos *timeslots* utilizados para cada demanda relacionada em seu par origem-destino.

Demanda VC12					
	Anel1	Anel2	Anel3	Anel4	Anel5
Anel1	2	50	56	0	33
Anel2	.	0	0	0	0
Anel3	.	.	0	0	63
Anel4	.	.	.	35	0
Anel5	0

Tabela 1: Demanda do Produto VC12

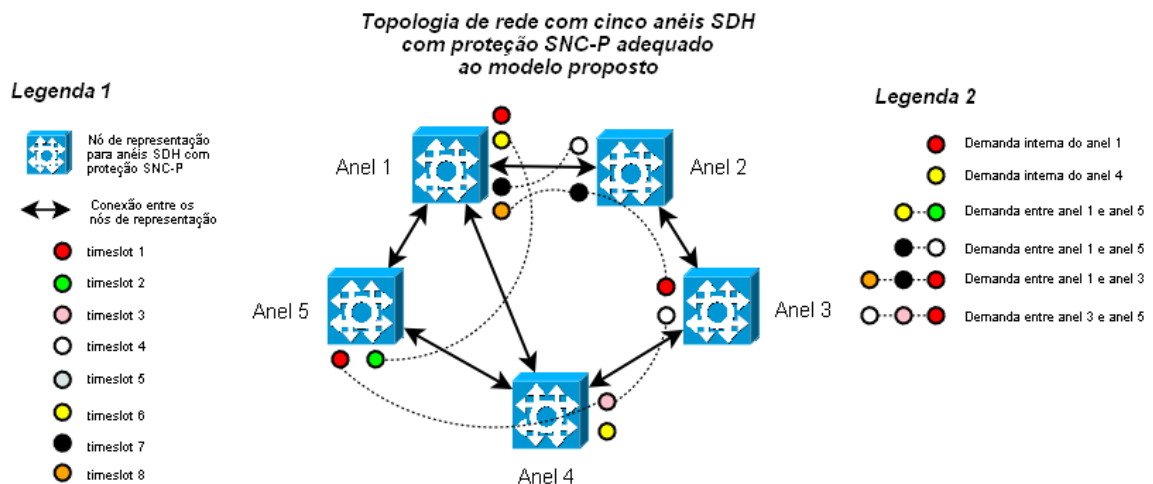


Figura 11: Testes de tráfego para rede com 5 anéis

De acordo com a figura 11 o resultado da simulação dado pela distribuição das demandas foi o seguinte:

- A demanda interna de 2 unidades VC12 no anel 1 utilizou o *timeslot* 1;

- A demanda de 50 unidades VC12 entre os anéis 1 e 2 utilizou respectivamente os *timeslots* 7 e 4;
- A demanda de 56 unidades entre os anéis 1 e 3 utilizou respectivamente os *timeslots* 8 e 1 e o *timeslot* 7 no anel 2 como transbordo de tráfego apesar de ter a alternativa de transbordo também pelo anel 4;
- A demanda interna de 35 unidades VC12 no anel 4 utilizou o *timeslot* 6;
- A demanda de 33 unidades VC12 entre os anéis 1 e 5 utilizou respectivamente os *timeslots* 6 e 2 com uma conexão direta entre eles;
- A demanda de 63 unidades entre os anéis 3 e 5 utilizou respectivamente os *timeslots* 4 e 1 e o *timeslot* 3 no anel 4 como transbordo de tráfego. Esta alternativa foi a de menor custo dado que para as outras a demanda utilizaria o transbordo em dois anéis.

Para cada *timeslot* utilizado foi considerado um custo de 1(uma) unidade em cada anel da rede. A ferramenta utilizada resolveu o problema com 74 iterações no algoritmo simplex em menos de 1(um) segundo de execução apresentando um resultado de custo na função objetivo de 12(doze) unidades. Um outro teste realizado e mostrado a seguir adota a mesma matriz de tráfego do teste anterior, porém, com valor de custo para cada *timeslot* do anel 2 de 2(duas) unidades mantendo-se 1(uma) unidade para os demais anéis. O resultado obtido é mostrado na figura 12.

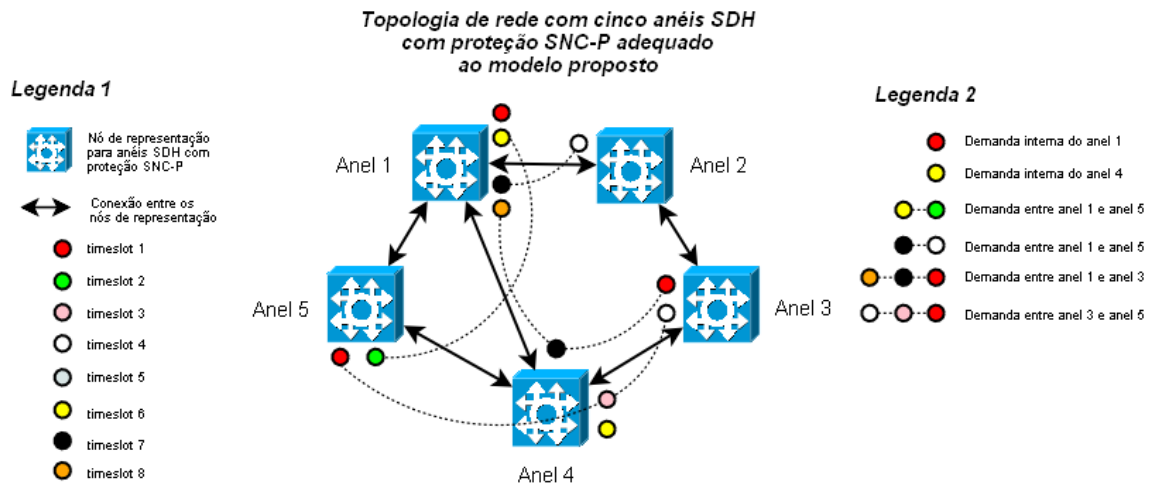


Figura 12: Testes de tráfego para rede com 5 anéis

Podemos notar que a demanda entre os anéis 1 e 3 que anteriormente trafegava pelo anel 2 agora trafega pelo anel 4 cujo custo de transbordo é inferior ao anel 2. O resultado da função objetivo apresentado pela ferramenta foi de 13 unidades, dado pelo acréscimo do custo de utilização dos *timeslots* do anel 4 em atendimento à demanda entre os anéis 1 e 3.

Mantidas as configurações do teste anterior, alteramos o valor dos *timeslots* do anel 4 também para 2(duas) unidades. Obtivemos como resultado de roteamento das demandas, o mesmo dado pela figura 11. Isso se deve ao fato de que o custo de transbordo de tráfego

nos anéis 2 e 4 são equivalentes e portanto o custo de roteamento da demanda entre os anéis 1 e 3 não se altera quando é transbordado pelo anel 2 ou 4. Já o resultado da função objetivo foi de 16(dezesseis) unidades dada pelo acréscimo de custo dos *timeslots* dos anéis 2 e 4 em atendimento às demandas terminadas nos mesmos.

4.1 Testes para diferentes cenários de rede

Foram realizados testes em diferentes configurações de rede para dois cenários de tráfego. Os resultados aqui apresentados foram testados para configurações de rede que variam entre 8 e 16 anéis com a capacidade de até 16 *timeslots* por anel. O padrão de demanda utilizado foi do tipo *concentrado*. O padrão de demanda *concentrado* constitui um padrão cujo tráfego tem a característica de concentração de demanda em determinados anéis da rede, ou seja, determinados anéis cujo interesse de tráfego é estabelecido com a maioria dos nós da rede. Este tipo de tráfego pode ser comparado ao tráfego que cursa sob uma rede de acesso de uma determinada operadora de telecomunicações convergindo para um ou mais de um anel concentrador. Uma rede de acesso tem um perfil de tráfego concentrado e é normalmente formada por anéis de menor hierarquia localizados na borda da rede, interligados a anéis de maior hierarquia até atingir os anéis concentradores da rede. Já o padrão distribuído pressupõe um interesse de tráfego tendendo a uniforme entre os diversos anéis da rede. Este tipo de tráfego pode ser encontrado no núcleo da rede, tráfego este que representa as demandas entre os anéis concentradores. Estes dois perfis são encontrados em determinados agrupamentos de uma rede real [3] e pela natureza de seu padrão são tratados em diferentes perfis ou configuração de uma rede SDH. Exemplos desses perfis de tráfego são mostrados na figura 13.

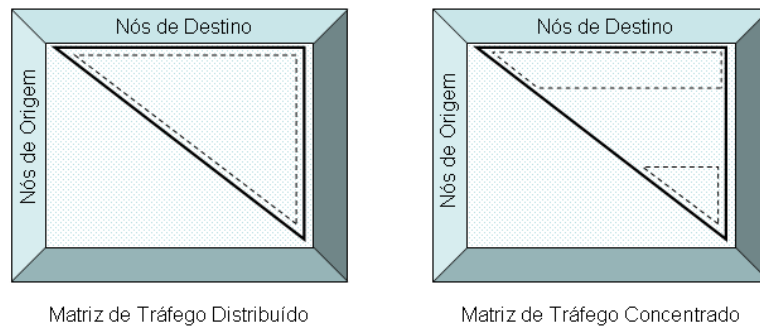


Figura 13: Perfis de Demanda de Tráfego

O objeto de estudo deste trabalho é baseado em uma rede SDH configurada para trabalhar como rede de acesso que possui um perfil de tráfego concentrado, porém, complementaremos os nossos estudos realizando também testes com aplicação de demanda distribuída. Propomos, portanto, testes em duas redes com as características a seguir:

- Topologia com 8(oito) anéis conforme figura 14 e padrão de demanda concentrado conforme tabela 2;
- Topologia com 8(oito) anéis conforme figura 14 e padrão de demanda distribuído conforme tabela 3;
- Topologia com 16(dezesseis) anéis conforme figura 15 e padrão de demanda concentrado conforme tabela 4.
- Topologia com 16(dezesseis) anéis conforme figura 15 e padrão de demanda distribuído conforme tabela 5.

**Topologia de rede com 8 anéis SDH
com proteção SNC-P proposta para testes**

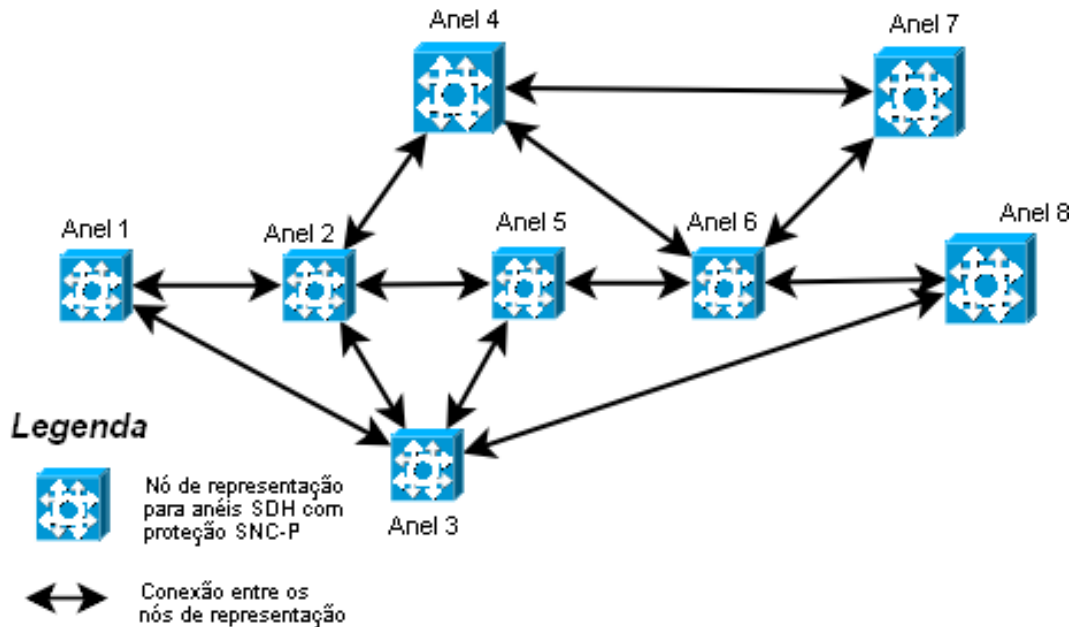


Figura 14: Topologia de Rede com 8 Anéis

Para cada topologia de rede apresentada para teste, foi considerado o custo de 1(uma) unidade para a utilização de cada *timeslot*. As tabelas 6 e 7 apresentam os resultados dos testes com as duas topologias propostas sendo a ferramenta de testes ajustada para os seguintes limites de encerramento de iterações:

- Tempo limite: 3600 segundos;
- Gap: 1%;
- Limite de Memória: 510MB;
- Limite de nós da árvore branch and bound a serem analisados para a rede de 8(oito) nós: 30.000;
- Limite de nós da árvore branch and bound a serem analisados para a rede de 16(dezesseis) nós: 100.000.

Nas tabelas 6 e 7 temos:

NNE número de nós explorados da árvore *branch and bound*;

TS tempo em segundos gasto para a solução do problema;

SI melhor solução inteira encontrada;

Demanda VC12								
	Anel1	Anel2	Anel3	Anel4	Anel5	Anel6	Anel7	Anel8
Anel1	0	54	26	109	45	65	0	99
Anel2	.	0	0	0	0	0	49	0
Anel3	.	.	0	0	0	0	61	0
Anel4	.	.	.	0	0	0	69	0
Anel5	0	0	21	0
Anel6	0	62	0
Anel7	0	120
Anel8	0

Tabela 2: Demanda concentrada do Produto VC12 para rede com 8 anéis

Demanda VC12								
	Anel1	Anel2	Anel3	Anel4	Anel5	Anel6	Anel7	Anel8
Anel1	0	54	26	109	0	65	0	99
Anel2	.	0	29	0	34	0	0	0
Anel3	.	.	0	23	32	88	61	0
Anel4	.	.	.	0	55	0	69	0
Anel5	0	4	0	34
Anel6	0	62	0
Anel7	0	0
Anel8	21

Tabela 3: Demanda distribuída do Produto VC12 para rede com 8 anéis

SBB última solução da relaxação linear dada pela análise do ultimo nó da árvore *branch and bound*;

GAP relação entre a solução inteira e a solução linear dada por: $(SI - SBB)/SI$.

Em relação aos resultados obtidos podemos observar que para a rede com 8 anéis, o padrão de demanda distribuído obteve parâmetros com desempenho superior na solução do problema comparado ao padrão de demanda concentrado. O tempo e o *gap* da solução mostram claramente essa superioridade. Já para a rede com 16 anéis, o padrão de demanda concentrado obteve um desempenho superior, observados os parâmetros de tempo e *gap* de solução. A interrupção do processamento da ferramenta computacional com seus respectivos *gaps* para a rede de 8 (oito nós), foi devido a diferença entre as soluções inteira e linear chegarem a seus resultados ótimos. Já para a rede de 16 (dezesesseis nós), a ferramenta interrompeu o processamento limitada pelo número de nós explorados na árvore *Branching and Bound*, limite este imposto devido às limitações de recursos computacionais. O custo do transporte das demandas da rede submetido ao modelo apresentado, foi beneficiado pela técnica de roteamento aplicada. Tomando como exemplo a tabela 2, o resultado obtido para a demanda do anel 3 para o anel 7 foi obtido pela aglutinação ou *grooming* de toda esta demanda em um *timeslot* no anel 3 sendo roteada pelo anel 4 chegando ao anel 7, obedecendo o critério de menor custo de transporte em detrimentos aos outros caminhos existentes. Este tráfego é direcionado e não pode ser compartilhado ao longo do caminho percorrido, de acordo com as diretrizes adotadas no modelo aplicado.

**Topologia de rede com 16 anéis SDH
com proteção SNC-P proposta para testes**

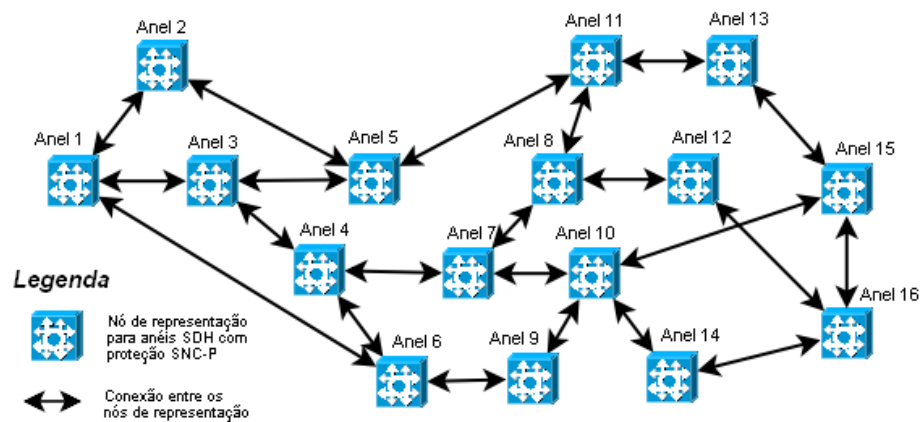


Figura 15: Topologia de Rede com 16 Anéis

No entanto, melhorias no modelo podem ser implementadas, uma vez que podemos compartilhar a capacidade dos *timeslots* por demandas distintas ao longo da rede utilizando a aglutinação e desaglutinação das demandas conhecida como técnica de *grooming*. Um exemplo é notado na tabela 2 para a demanda entre os anéis 2 e 3. Para este atendimento o anel 2 utilizou-se de um *timeslot* nos anéis 2, 5 e 3, para transportar os 29 produtos. Existe uma demanda de 34 produtos entre os anéis 2 e 5 que utiliza outros *timeslot* nos anéis 2 e 5. Podemos notar que se as demandas entre os anéis 2 e 3, e 2 e 5 se aglutinassem no anel 2 e desaglutinassem no anel 5 onde fossem consumidos os 34 produtos de sua demanda e seguindo com os 29 produtos para o anel 3, teríamos minimizado o custo evitando a utilização de um *timeslot* no anel 2 já que um *timeslot* é suficiente para o transporte da soma dessas duas demandas. E mais, o *timeslot* que seguiria com a demanda do anel 2 para o anel 3 partindo do anel 5, poderia estar também compartilhando a demanda de 32 produtos entre os anéis 3 e 5 minimizando ainda mais a solução. Esta é uma implementação para a evolução do modelo proporcionando uma maior eficiência para sua aplicação prática.

Demanda VC12																
	Anel1	Anel2	Anel3	Anel4	Anel5	Anel6	Anel7	Anel8	Anel9	Anel10	Anel11	Anel12	Anel13	Anel14	Anel15	Anel16
Anel1	0	45	21	0	55	0	50	56	0	50	67	0	34	1	145	0
Anel2	.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22
Anel3	.	.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	61
Anel4	.	.	.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	29
Anel5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Anel6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	39
Anel7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Anel8	0	0	0	0	0	0	0	0	20
Anel9	0	0	0	0	0	0	0	45
Anel10	0	0	0	0	0	0	0
Anel11	0	0	0	0	0	101
Anel12	0	0	0	0	0
Anel13	0	0	0	76
Anel14	0	0	0
Anel15	0	25
Anel16	0

Tabela 4: Demanda concentrada do Produto VC12 para rede com 16 anéis

Demanda VC12																
	Anel1	Anel2	Anel3	Anel4	Anel5	Anel6	Anel7	Anel8	Anel9	Anel10	Anel11	Anel12	Anel13	Anel14	Anel15	Anel16
Anel1	0	45	0	0	55	0	50	0	0	50	0	0	34	1	0	0
Anel2	.	0	0	0	0	0	0	0	45	0	0	0	0	0	0	22
Anel3	.	.	35	0	10	0	0	55	0	0	0	44	0	0	56	61
Anel4	.	.	.	43	0	0	0	65	0	0	0	0	43	0	0	29
Anel5	0	0	21	0	0	12	0	22	0	0	0	0
Anel6	32	0	0	29	0	92	0	0	43	0	39
Anel7	0	0	0	0	0	0	0	0	88	0
Anel8	0	33	0	0	90	0	0	0	20
Anel9	0	0	0	0	56	0	0	45
Anel10	0	99	0	0	0	88	0
Anel11	0	67	0	21	0	101
Anel12	0	0	0	0	0
Anel13	19	61	0	76
Anel14	0	7	0
Anel15	0	25
Anel16	0

Tabela 5: Demanda distribuída do Produto VC12 para rede com 16 anéis

Redes com padrão de Demanda concentrado					
Topologia	NNE	TS(s)	SI	SBB	GAP(%)
8 anéis	27.400	27	46	45.00	2.17
16 anéis	99.900	575	94	83.95	10.69

Tabela 6: Resultado dos Testes com Padrão de Demanda Concentrado

Redes com padrão de Demanda Distribuído					
Topologia	NNE	TS(s)	SI	SBB	GAP(%)
8 anéis	6.200	9	54	52.95	1.95
16 anéis	99.900	1172	174	144.54	15.21

Tabela 7: Resultado dos Testes com Padrão de Demanda Distribuído

5 Conclusão

Apesar do modelo deste trabalho estar baseado em uma rede SDH, é também aplicável a outros tipos de rede que possuem a característica de poder estabelecer a proteção do seu tráfego provendo outro caminho como alternativa. As redes ópticas de acesso com tecnologia Ethernet denominadas MetroEthernet possuem essa característica que é fundamental para garantir a qualidade dos serviços prestados.

O modelo apresentado incorporou satisfatoriamente as características tecnológicas propostas e portanto os resultados dos testes apresentaram soluções confiáveis para aplicações práticas em redes reais. No entanto este trabalho contribuiu somente com uma parte do problema vivido pelos operadores de rede de telecomunicações. Além das características de roteamento, temos também a técnica de *grooming* que também permite a otimização de tráfego nas redes a qual não foi tratada neste trabalho apesar da solução buscar o *grooming* para tráfegos com a mesma condição de contorno. Além disso outras técnicas de proteção podem ser utilizadas nas redes como a MS-SP Ring proposta em [3] e seu modelamento incorporado ao modelo aqui apresentado e constituir uma solução completa para um determinado cenário de rede.

É claro que na prática podem surgir várias situações e cenários de rede que deverão ser analisados e implementadas as funcionalidades necessárias ao modelo para ser aplicado. A idéia é possuímos os diversos modelos aplicados a cada funcionalidade existente nas redes para que consigamos uni-los e adequa-los à cada topologia de rede demandada para otimização de tráfego.

Para a aplicação da otimização de tráfego nas redes de telecomunicações, temos dois cenários a serem analisados. O primeiro é dado para uma nova rede a ser implantada e que o tráfego previsto na análise de mercado tem que ser considerado, tanto para o dimensionamento dos anéis como para a alocação ótima dos mesmos. O segundo é um cenário onde a rede já está carregada e deve-se realizar o levantamento de toda a matriz de demanda ali aplicada. Há de se considerar o remanejamento do tráfego de acordo com a solução dada pelo modelo num esforço operacional do operador de telecomunicações para obter as vantagens das sobras de recursos proporcionadas pela aplicação da técnica de otimização. Por fim, a continuidade deste trabalho se dará na proposta de obtermos vários modelos, cada um com uma modelagem específica para cada funcionalidade existente nas redes de telecomunicações, com o objetivo de agrupar tais modelos de forma a viabilizar uma solução completa para aplicações a diversas topologias e cenários práticos de rede. Como trabalhos futuros de pesquisa podemos citar:

- aprimoramento da técnica de *grooming* aplicada ao modelo para melhor aproveitamento dos *timeslots*;

- integração dos modelos MS-SP Ring *propostoem*[3] e *SNC-Ppropostonestetrabalho*;
- adaptação do modelo proposto para aplicações em redes em malha com proteção.

Referências

- [1] Glen Dobson and Alfonso Sánchez-Macián. Towards unified QoS/SLA ontologies. *Computing Department - Lancaster University*, 2006.
- [2] Luiz Fernando Soares, Guido Lemos e Sérgio Colcher. *Redes de Computadores. Das LANs, MANs e WANs às Redes ATM*. Editora Campus, 1995 - cap. 3.
- [3] Ubirajara Fumega. *Roteamento de Demandas em Projeto de Redes Determinísticas de Telecomunicações*. Dissertação Universidade Federal de Minas Gerais, 2002.
- [4] INTEL. Next Generation SONET/SDH Networks White Paper. *Intel Technical Documentation Center* - <http://www.intel.com/design/network/papers/302656.htm>, acessado em 12 de maio 2007.
- [5] Mokhtar S. Bazaraa, John J. Jarvis and Hanif D. Sherali. *Linear Programming and Network Flows*. John Wiley and Sons. Inc., New York, NY, 1990 - pag 587 - 601.
- [6] Y. Lee and B. Mukherjee. Traffic engineering in next-generation optical networks. *IEEE Communications surveys*, 2004 - Volume 6 - No.3.
- [7] Eytan Modiano and Philip J. Lin. Traffic Grooming in WDM Networks. *IEEE Communications Magazine*, 2001.
- [8] Jean-Philippe Vasseur, Mario Pickavet and Piet Demeester. *Network Recovery: Protection and Restoration of Optical, SONET-SDH, IP and MPLS*. Elsevier, New York - NY, 2 edition, 2004 - pages 74 - 113.
- [9] International Telecommunication Union. *Parameters and calculation methodologies for reability and availability of fibre optic systems*. ITU-T Recommendation G.911, 1997.
- [10] International Telecommunication Union. *Types and characteristics of SDH network protection architectures*. ITU-T Recommendation G.841, 1998.
- [11] International Telecommunication Union. *Architecture of transport networks based on the synchronous digital hierarchy*. ITU-T Recommendation G.803, 2000.