

# PLANEJAMENTO DE REDES DE TRANSMISSÃO SDH DIVIDIDO EM CAMADAS FUNCIONAIS

MARCO A. BERGAMASCHI, JOANA T. MACHADO, RAUL V. RIBEIRO, HERMANO M. F. TAVARES

Departamento de Engenharia de Sistemas, Faculdade de Engenharia Elétrica e Computacional, UNICAMP  
Caixa Postal 6101, CEP 13081-970, Campinas, SP  
marco@denisis.fee.unicamp.br

## ABSTRACT

This paper presents a planning methodology of SDH Transmission Network divided in functional layers, emphasizing the Path Layer and the Section Layer. The Path Layer maps demands of E1 channels (2 Mbps) on Virtual Containers VC-4, transport structure that carries 63 E1 channels. The planning of this layer searches to minimize the number of VC-4 and the amount of times that the 2 Mbps demands are transconnected from a VC-4 to another one along network paths. We use a Rule Based System to optimize this mapping of E1 channels on VC-4. In the Section Layer, the VC-4 are multiplexed on Synchronous Transport Modules (STM) and carried in SDH networks. In this layer, we define the set of equipment to be installed and its transmission rate (155 Mbps, 622 Mbps or 2,5 Gbps), searching some objectives, such as, provides higher network reliability, reduces equipment installation costs, aspects of management and operation network. The resulting model is a Mixed Integer Linear Programming problem. The method presented here has been applied to large size brazilian transmission network.

## 1 INTRODUÇÃO

O uso de fibras ópticas como meio transmissor e o surgimento de novas tecnologias de equipamentos de transmissão, como, por exemplo, a **SDH (Hierarquia Digital Síncrona)** [10], vêm compor um novo cenário caracterizado pela procura por novos serviços de Telecomunicações. Neste contexto, o Planejamento de Redes de Telecomunicações assume um papel fundamental. O **Planejamento de Redes de Transporte ou de Transmissão** é uma das fases importantes deste processo de planejamento.

Neste artigo propomos uma metodologia de planejamento da Rede SDH de Transmissão, baseada numa estrutura de rede decomposta em *camadas funcionais*. A proposta de decomposição da Rede de Transmissão considera quatro camadas funcionais, que são: camada de **Circuitos**, de **Vias (Path)**, de **Enlaces (Section)** e de **Meios Físicos**. Discutiremos uma Metodologia de Planejamento da Rede de Transmissão a partir dessa decomposição, propondo um algoritmo de otimização baseado em regras para a Camada de Vias e um modelo matemático de otimização para a Camada de Enlaces.

Na tecnologia SDH, as demandas dos usuários (*payloads*) são acrescidas de um cabeçalho denominado **POH (Path OverHead)**, compondo um estrutura de transporte denominada VC (*Virtual Container*). A **Camada de Vias** é a camada responsável pela alocação dessas demandas dos usuários em VC's. O cabeçalho POH fornece informações utilizadas na

definição da trajetória da demanda entre a sua origem e o seu destino (sequência de enlaces ou arcos da rede).

Na **Camada de Enlaces**, os VC's são multiplexados em módulos de transporte síncronos denominados **STM**. Este contém outro cabeçalho denominado **SOH (Section OverHead)** com informações adicionais para gerenciar os enlaces ou seções da rede (segmento que interliga dois equipamentos). Nesta camada definimos as taxas de transmissão do conjunto de equipamentos que serão instalados na rede e como estes equipamentos são combinados para formar a topologia de rede.

No item II discutiremos a respeito das camadas e suas funções dentro da Rede de Transmissão. O item III destaca a proposta da metodologia de planejamento da Camada de Vias baseada num conjunto de regras, enquanto que a parte IV mostra o modelo matemático utilizado no planejamento da Camada de Enlaces. Um estudo de caso de uma rede real, os resultados e comentários vêm nos itens seguintes.

## 2 A TECNOLOGIA SDH E O MODELO EM CAMADAS

Numa Rede de Telecomunicações, vários assinantes são agrupados em **Centros de Fios (CF's)**, edifícios nos quais são instalados os equipamentos de transmissão. A Rede de Transporte interliga os CF's através destes equipamentos de transmissão. Da necessidade dos assinantes se comunicarem entre si (tráfego telefônico), surgem demandas entre cada par de CF's que deverão fluir pela Rede de Transporte, desde sua origem até seu destino. Essas demandas estão associadas a uma taxa de transmissão dada em número de canais ou circuitos de 2 Mbps.

Na Rede de Transporte, as ligações entre CF's podem ser diretas ou passar por pontos intermediários (não diretas). Os "hubs" (CF's principais) são os principais responsáveis por estas últimas.

Utilizaremos equipamentos de transmissão da tecnologia SDH para efetuar estas ligações entre CF's. Eles podem ser dos seguintes tipos:

- **OLTM (Optical Line Terminal Multiplexer)**: realiza a operação de multiplexação, isto é, vários sinais se agregam para formar um único com taxa de transmissão superior. Aos primeiros, chamaremos de **tributários**; ao último, de **agregado**;
- **ADM (Add/Drop Multiplexer)**: consiste em 2 terminais de linha ópticos (agregados) e um conjunto de tributários, conectados por uma matriz de comutação SDH, que executa operações de inserção/retirada dos tributários sobre os agregados;

• **SDxC** (*Synchronous Digital Cross-Connect*): consiste num conjunto de matrizes de comutação SDH associadas a um conjunto de tributários, de modo que sinais provenientes de um tributário podem ser conduzidos a qualquer outro tributário.

Os equipamentos SDH podem ser combinados para produzir diferentes **topologias** de rede, tais como, enlaces ponto-a-ponto, cadeias de ADM's, anéis de ADM's e estrela (**figura 1**).

Na eventualidade de falhas, a rede deve assegurar níveis de confiabilidade aceitáveis. Tal comportamento é alcançado pela redundância da topologia e/ou busca de conexões alternativas. Diversos esquemas de proteção podem ser combinados numa mesma rede SDH para torná-la mais confiável como, por exemplo: **anéis auto-regeneradores, redes baseadas em "cross-connects", duplicação dos componentes ópticos dos equipamentos e dos cabos de fibras ópticas** [11].

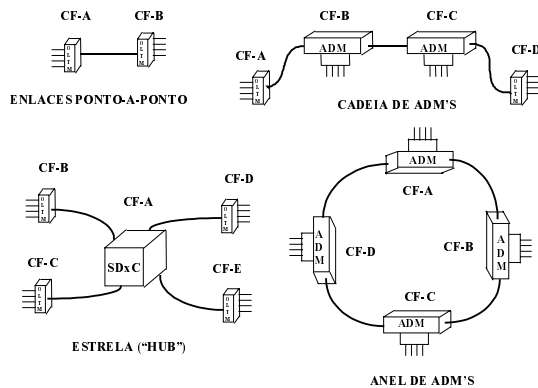


Figura 1. Topologias de Rede

A Rede de Transmissão SDH pode ser considerada a partir de um modelo dividido em camadas funcionais, onde cada camada realiza **funções** específicas e transporta algum "conteúdo" específico de um ponto a outro.

Sexton & Reid [10] propõe um modelo composto por 4 camadas: Circuitos, de Vias ou Caminhos (subdividida em ordem superior e ordem inferior), de Enlaces ou Seções, e de Meios Físicos. O tipo de carga transportada pelas camadas estão mostrados na **tabela 1**.

Tabela 1 – Cargas transportadas pelas Camadas SDH

Camada	Tipo de carga transportada
de Circuitos	Canais 2, 8, 34, 140 Mbps, células ATM
de Vias ( <i>Path</i> )	
de baixa ordem	Containers VC-12
de alta ordem	Containers VC-4
de Enlace ( <i>Section</i> )	Quadros STM-1, STM-4, STM-16
de Meios Físicos	Emissões ópticas em diversos comprimentos de onda; pares de fibra óptica

A **Camada de Circuitos** traduz o tráfego dos serviços requeridos pelos usuários numa taxa de bits equivalente. Esta taxa calculada para todos os enlaces da rede, fornece uma matriz de demanda dos assinantes, que será utilizada como dada de entrada pelas outras camadas.

Na **Camada de Vias**, essas demandas são empacotadas em unidades de transporte denominadas VC's (*Virtual Contai-*

*ners*) que, por sua vez, serão roteadas entre os CF's. Um VC é formado pela carga (**payload**) do assinante acrescido de um cabeçalho denominado **POH** (*Path OverHead*) que contém informações sobre a trajetória entre a origem e o destino da carga transportada. Esta trajetória corresponde a uma sequência de um ou mais enlaces (arcos da rede) e pode passar por vários equipamentos de transmissão. Esta camada é dividida em 2 subcamadas, uma para os VC's de baixa ordem (VC-12 para transporte de canais E1) e outra para os de alta ordem (VC-4). Nesta camada são definidos: (i) os números e tipos de VC's entre os CF's e (ii) como os VC-12 são mapeados ou "arrumados" em VC-4. A matriz de VC-4 entre CF's gerada é repassada para a Camada de Enlaces.

Na **Camada de Enlaces**, os VC-4 são multiplexados em módulos de transporte síncronos denominados **STM**. Este contém outro cabeçalho denominado **SOH** (*Section OverHead*) que carrega informações adicionais para gerenciar os enlaces da rede (segmento entre dois equipamentos adjacentes). As taxas de transmissão dos módulos STM podem ser de 155 Mbps (**STM-1**), 622 Mbps (**STM-4**) ou 2,5 Gbps (**STM-16**). Nesta camada definimos as taxas de transmissão do conjunto de equipamentos que serão instalados e como estes equipamentos são combinados para formar a topologia de rede.

A **Camada de Meios Físicos** trata da ligação entre os CF's através de cabos de fibra óptica. Nesta camada realizamos o roteamento dos cabos de fibras pelos dutos da rede e a necessidade de transportar vários sinais ópticos em vários comprimentos de ondas dentro de um mesmo par de fibras.

A subdivisão da Rede de Transporte SDH em **camadas funcionais** sugere que a Metodologia de Planejamento seja também dividida em fases, embora a sequência de etapas realizadas no planejamento não tenha que necessariamente coincidir com a sequência das camadas do modelo funcional. A Metodologia de Planejamento aqui desenvolvida segue passo-a-passo o Modelo Funcional e está mostrada na **figura 2**. Tal metodologia deve considerar que os resultados obtidos numa etapa de planejamento possam provocar ou sugerir modificações nos resultados de uma etapa planejada anteriormente, além de levar em conta as especificidades de cada rede a ser planejada (Redes de Telefonia Urbana e Interurbana ou Redes ATM). Em muitos estudos o Planejamento da Camada de Enlaces é realizado anteriormente [3] [5] ou simultaneamente [9] ao Planejamento da Camada de Vias.

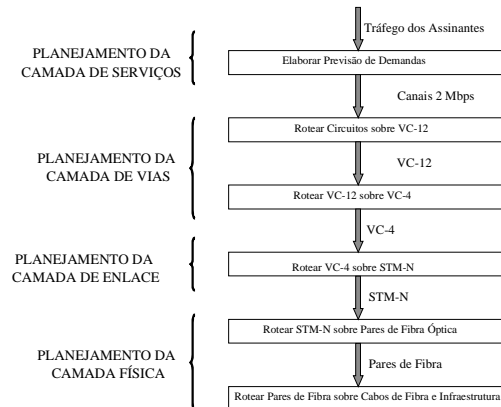


Figura 2. Fluxo de Informações nas Camadas SDH

### 3 PLANEJAMENTO DA CAMADA DE VIAS

A metodologia proposta para o Planejamento da Camada Lógica é baseada em regras criteriosas que buscam alocar toda a demanda de canais E1 da rede utilizando o menor número possível de VC-4. Além disso, essas regras se preocupam em minimizar as atividades de transconexão (troca de posição de tributários entre diferentes agregados) que necessitam de matrizes de comutação 4/1 (comutação de VC-12) e 4/4 (comutação de VC-4) para serem realizadas [10]. Visando atingir tais objetivos, a metodologia propõe a criação de dois tipos de VC-4: *diretos* e *mistos* [8].

Para a alocação das demandas nesses dois tipos de VC-4, a idéia é dividir toda a demanda em três grupos: **grupo 1**, de demandas cujos volumes são maiores ou iguais a 63 – capacidade máxima de um VC-4 – ou a outro limiar mínimo de formação de VC-4 direto, que denominaremos **L-direto**; **grupo 2**, com demandas de volumes entre o L-direto e o limiar mínimo de formação de VC-4 misto, **L-misto**; e **grupo 3**, de demandas menores que o L-misto.

Demandas que fazem parte do grupo 1 serão alocadas em **VC-4 diretos**. O VC-4 direto não realiza comutação 4/1, apenas comutação 4/4. Logo, é conveniente alocar o maior número possível de canais E1 em VC-4 deste tipo. As regras de alocação das demandas do **grupo 1** estão descritas na **fase 1** da metodologia.

Demandas pertencentes ao **grupo 2** compartilharão **VC-4 mistos**. O VC-4 misto pode transportar demandas de várias origens para vários destinos, ou seja, ao longo do seu caminho, canais E1 serão alocados e retirados mais de uma vez de VC-4 mistos, em nós da rede que realizam atividades de comutação 4/1 (montagem e desmontagem de VC-4 com diferentes VC-12). As regras desta alocação estão descritas na **fase 2** da metodologia.

As regras de alocação das demandas do **grupo 3**, que serão alocadas nas folgas dos VC-4 mistos, estão descritas na **fase 3** da metodologia.

Da fase 1 da metodologia resultará uma matriz de VC-4 diretos, e das fases 2 e 3 uma matriz de VC-4 mistos. A soma dessas matrizes é a matriz de demandas total da rede em VC-4, a ser utilizada como dado de entrada para o Planejamento da Camada de Enlace, conforme mostrado na **figura 3**.

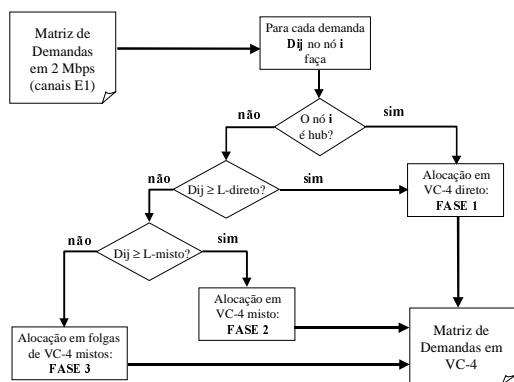


Fig 3 – Fluxograma de Alocação de canais E1 em VC-4

#### FASE 1:

A estratégia da fase 1 é alocar toda a demanda do grupo 1 em VC-4 diretos, obtendo a matriz de VC-4 diretos. A regra é dividir cada elemento do grupo 1 pelo valor do limiar mínimo de formação de VC-4 direto. A parte inteira desta divisão representa o número de VC-4 diretos entre o respectivo par de CF's. A parte fracionária representa o resto, demanda que não "coube" no VC-4 direto ou não justificou a criação de um outro VC-4 direto. Esse resto será somado às demandas dos grupos 2 ou 3, que serão alocadas em VC-4 mistos ou em suas folgas.

#### FASE 2:

Para a fase 2 vamos pressupor que os nós da rede são agrupados em *clusters*, conjunto de CF's. Em cada *cluster*, um dos nós, denominado *hub*, é definido como aquele que possui a funcionalidade de transconexão de baixa ordem, ou seja, o nó onde as cargas de VC-4 mistos são rearrumadas.

A fase 2 deve agrupar e alocar toda a demanda do grupo 2 em *containers* VC-4 mistos, e rotear tais VC-4 mistos para os *hubs*, de modo a minimizar o número desses VC-4 e o número de comutação 4/1. A proposta é agrupar demandas que tenham entre si algum ponto em comum, por exemplo, demandas de um nó para vários destinos, ou demandas de vários nós para o mesmo destino. Demandas relacionadas realizam um número menor de comutação 4/1. Para o roteamento, uma das regras é não permitir que demandas sejam transportadas de um VC-4 misto para outro mais de três vezes. A **figura 4** abaixo ilustra essa idéia. Repare que os VC-12 podem ser transportados entre os nós A e B utilizando um VC-4 direto, dois VC-4 mistos efetuando uma comutação 4/1 no *hub* 1 ou 2, ou três VC-4 mistos efetuando duas comutações 4/1 nos *hubs* 1 e 2.

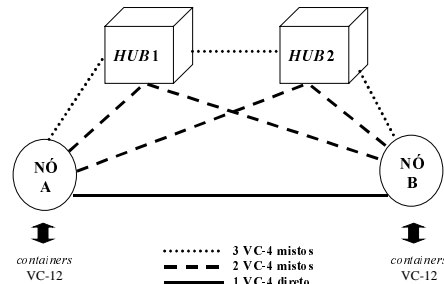


Figura 4 – Rotas das demandas em VC-4 mistos e diretos

A fase 2 propõe quatro tipos de alocação, que diferem entre si pelo tipo de demanda – *intracluster* (demandas de um nó destinadas à nós do mesmo *cluster*) ou *extracuster* (demandas de um nó destinadas à nós de outros *clusters*) – alocadas no VC-4 misto.

Para agrupar demandas relacionadas, são definidos subgrupos de somas para cada nó da rede.

- Soma  $SC_{ir}$  – soma das demandas do nó  $i$  para o *cluster*  $r$ ;
- Soma  $SI_i$  – soma das demandas do nó  $i$  para nós pertencentes a seu *cluster*;
- Soma  $SS_{ir} = SC_{ir} + SI_i$ ;
- Soma  $ST_i$  – soma das demandas do nó  $i$  para todos os nós da rede (todos os *clusters*).

As somas  $SC_{ir}$  e  $SS_{ir}$  devem ser listadas em ordem decrescente,  $Lista\_SC_{ir}$  e  $Lista\_SS_{ir}$  respectivamente. É a partir da  $lista\_SC_{ir}$  que se organizará também uma  $Lista\_de\_nós$  (o nó de maior  $SC_{ir}$  será o primeiro da lista). A cada alocação; tipo 1,

2, 3 ou 4, descritas a seguir; todos esses valores, somas e ordem das listas, são atualizados:

**ALOCAÇÃO TIPO 1** → Nesta alocação estão envolvidas apenas demandas *extracusters* do nó  $i$  para nós do *cluster*  $r$ . O VC-4 misto sai do nó  $i$  e tem como destino o nó *hub* do *cluster*  $r$ . Este VC-4 só realiza comutação 4/1 no nó final.

**ALOCAÇÃO TIPO 2** → A alocação do tipo 2 aloca demandas da soma  $ST_i$ , ou seja, demandas *extracusters* do nó  $i$  para todos os *clusters* da rede, e também demandas *intraclusters*. O VC-4 misto sai do nó  $i$  e vai para o “hub” do *cluster*  $i$ , onde as demandas *intraclusters* realizam comutação 4/1. As demandas *extracusters* ainda devem ser alocadas em outros VC-4 mistos, com destino aos seus respectivos *clusters*, realizando comutação 4/1 em dois *hubs*, *hub* do *cluster*  $i$  e o *hub* do seu *cluster*.

**ALOCAÇÃO TIPO 3** → Aqui são alocadas as demandas da soma  $SS_{ir}$ , demandas *intraclusters* e *extracusters* para o *cluster*  $r$ . O VC-4 misto sai do nó  $i$  e chega no *hub* do *cluster*  $i$ . As demandas *intraclusters* realizam comutação 4/1 apenas no *hub* do *cluster*  $i$ , e as demandas *extracuster* realizam comutação 4/1 também no *hub* do *cluster*  $r$ .

**ALOCAÇÃO TIPO 4** → Nesta alocação só demandas *intraclusters* estão envolvidas. O VC-4 misto sai do nó  $i$  e chega ao *hub* do *cluster*  $i$ . Tais demandas realizam comutação 4/1 apenas neste *hub* final.

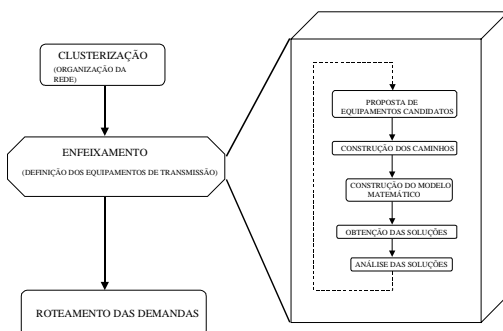
### FASE 3

Na fase 3 as demandas cujos volumes estão abaixo do  $L$ -misto são alocadas nas folgas dos VC-4 mistos já definidos na fase 2.

No caso do volume dessas demandas ser maior que as folgas disponíveis nos VC-4 mistos, VC-4 diretos serão criados para a alocação de tais demandas residuais.

## 4 O PLANEJAMENTO DA CAMADA DE ENLACES

No Planejamento da Camada de Enlaces, a matriz de demandas em VC-4 é multiplexada em módulos de transporte STM-N ( $N=1, 4$  ou  $16$ ). Nesta multiplexação são acrescentados os cabeçalhos SOH e podem ser realizadas comutação 4/4 nos pontos intermediários das rotas entre a origem e o destino das demandas. A **figura 3** mostra as várias fases da metodologia de planejamento proposta para a Camada de Enlaces da Rede de Transmissão SDH.



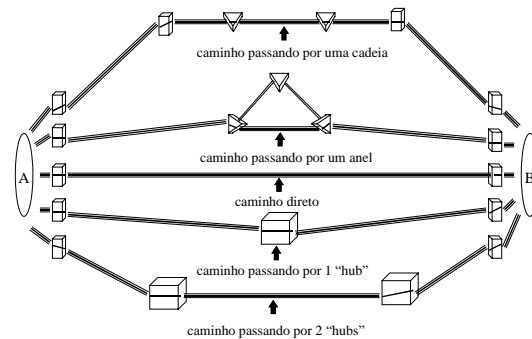
**Figura 3.** Planejamento da Camada de Enlaces

Na **Clusterização**, os CF's são agrupados em *clusters* de acordo com o volume e distribuição de sua demanda e são escolhidos os *hubs*, os nós mais importantes de cada *cluster*.

O primeiro passo da etapa do **Enfeixamento** é a declaração de um conjunto de topologias candidatas (enlaces ponto-a-ponto, anéis, cadeias), do qual escolheremos um subconjunto, utilizando critérios de otimização, de modo a formar uma rede capaz de atender à demanda entre os CF's, que seja eficaz em termos de custo e que atenda a requisitos de confiabilidade, folga na operação dos equipamentos, etc.

O modelo de fluxos em rede (grafos) será utilizado para representar o problema do Enfeixamento. Os nós do grafo representam os CF's e são os geradores de demandas. Cada demanda gerada por um par de nós corresponde a um produto. Os arcos são providenciados pelas fibras ópticas e pelos equipamentos de transmissão. Estes equipamentos e as fibras formam topologias, às quais serão associados um custo e a capacidade de transportar canais de 2Mbps ou de outras taxas de transmissão.

Utilizamos a abordagem de **fluxo por caminho** [1] para este problema. Um **caminho** [3] é definido por uma sequência de nós adjacentes sem repetição por onde um produto pode passar, sendo que cada produto utiliza um ou mais caminhos distintos. Utilizamos no modelo os seguintes tipos de caminhos: diretos entre 2 nós, passando por 1 ou 2 *hubs* e caminhos que utilizam anéis ou cadeias (**figura 4**).



**Figura 4.** Caminhos possíveis entre um CF-A e CF-B

Dadas as topologias elementares candidatas e a classificação de CF's, diversos caminhos são montados. As demandas serão atendidas sempre por um sub-conjunto destes caminhos, de acordo com os equipamentos selecionados.

Com o resultados das etapas anteriores, é montado automaticamente o modelo matemático. Esta é uma tarefa bastante trabalhosa, dado o grande número de equações e variáveis que o modelo pode conter. Ferramentas computacionais são desenvolvidas para esta finalidade [4] [5]. Para exemplificar, a rede da Área Metropolitana de São Paulo que possui 58 CF's pode gerar modelos matemáticos com 5000 variáveis de caminhos, 500 variáveis de topologias candidatas e 1500 equações de satisfação de demanda [2].

O modelo matemático, trabalhado por um pacote computacional de otimização, como o **CPLEX**® [6] gera soluções que serão analisadas. Uma solução de rede é constituída pelo conjunto de equipamentos que serão instalados, suas respectivas taxas de transmissão e pela topologia de rede.

Na fase de Roteamento das Demandas define-se quais demandas passarão por quais equipamentos

O modelo obtido para o problema do Enfeixamento é um **Programa Linear Inteiro Misto** [7], no qual cada variável inteira corresponde à decisão de instalar uma topologia candidata (enlace ponto-a-ponto, um anel ou uma cadeia) e as variáveis reais correspondem aos fluxos dos caminhos.

Na função objetivo adotaremos critérios de minimização do custo total dos equipamentos, maximização do número de anéis e das folgas nas capacidades dos equipamentos.

As equações para o **modelo de otimização** [3] para o problema do **Enfeixamento** são as seguintes:

- **funções objetivos:** minimizar custo total da rede, maximizar número total de anéis, maximizar folga total da rede;
- **restrições de satisfação de demandas** (soma dos fluxos dos caminhos entre dois nós  $i$  e  $j$  deve ser igual a demanda entre  $i$  e  $j$ );
- **restrições técnicas de capacidades** (soma dos fluxos dos caminhos que passam por um arco não deve exceder a capacidade do arco);
- **restrições de orçamento:** estipular um valor máximo para o orçamento disponível;
- **declaração de variáveis inteiras;**
- **restrições adicionais:** limitar número de equipamentos num nó, forçar o uso de um equipamento, estabelecer número mínimo de anéis, impor o uso de um caminho, garantir uma folga total mínima, etc.

## 5 A REDE DA ÁREA METROPOLITANA DE SÃO PAULO (AMSP)

A rede da **AMSP** é a maior rede urbana do País, constituindo-se de 58 CF's. Neste trabalho utilizaremos a subrede *backbone* da AMSP, constituída pelos 17 CF's com maior volume de demanda. A matriz de demanda desta rede possui 1260 elementos não nulos, somando uma demanda total de 18.934 canais de 2 Mbps

A partir destes dados, realizamos o planejamento desta rede utilizando o programa **PCLOG** [8] no Planejamento da Camada de Vias; o programa **ENFEIXAMENTO** [4] para montagem do modelo matemático e o **CPLEX**<sup>®</sup> [6] para obtenção das soluções, no Planejamento da Camada de Enlaces.

No Planejamento da Camada de Vias, o algoritmo foi testado diversas vezes, variando-se os limiares mínimos de formação de VC-4 diretos e mistos, L-direto e L-misto. A **tabela 2** mostra os resultados obtidos em relação aos números de VC-4 e aos números de comutação 4/1 para cada um dos testes realizados a partir da variação dos 2 limiares acima citados.

Cada variação dos limiares L-direto e L-misto gera uma matriz de VC-4 distinta, que será utilizada pelo Planejamento da Camada de Enlaces. Seleccionamos algumas dessas matrizes e utilizamos o programa **ENFEIXAMENTO** para montar os respectivos modelos matemáticos e o **CPLEX** para obter as soluções de rede. A relação de custos (em K US\$) e capacidades (em canais de 2 Mbps) utilizados estão mostrados na **tabela 3**.

As matrizes de VC-4 selecionadas são aquelas geradas pelos testes 1 (número máximo de VC's e folga máxima em VC's), 4 (número máximo de comutação 4/1), 8 (folga mínima), 13 (número mínimo de comutação 4/1) e 16 (número mínimo de VC's). Os resultados obtidos pelo Planejamento da Camada de Enlaces estão mostrados na **tabela 4**.

**Tabela 2.** Resultados obtidos no Planejamento da Camada de Vias

Teste	L-direto	L-misto	Nº total de VC-4	Comutação 4/1	Folga em VC-4
1	63	0	<b>313</b>	1990	<b>1608</b>
2		7	311	1900	1476
3		14	311	1998	1391
4		21	308	<b>2041</b>	1415
5	56	0	308	1687	1596
6		7	307	1597	1527
7		14	306	1691	1397
8		21	300	1712	<b>1255</b>
9	49	0	305	1472	1559
10		7	305	1493	1559
11		14	303	1605	1333
12		21	298	1563	1309
13	42	0	300	<b>1240</b>	1519
14		7	299	1271	1472
15		14	298	1292	1351
16		21	<b>295</b>	1329	1350

**Tabela 3.** Custos e Capacidades dos Equipamentos SDH

Taxa de Transmissão	34 Mbps	155 Mbps	622 Mbps	2.5 Gbps
Custo OLTM	22	60	120	270
Custo ADM	-	50	90	210
Capacidade	16	63	252	1008

**Tabela 4 –** Soluções obtidas na Camada de Enlaces

Teste	Custo (KUS\$)	Anéis 2.5 Gbps	Anéis 622 Mbps	Folga em nº de VC-4
1	<b>7.920</b>	4	3	30
4	8.040	3	3	22
8	8.160	<b>4</b>	<b>4</b>	42
13	8.010	3	3	34
16	<b>8.250</b>	3	2	<b>51</b>

## 6 COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

Ao final do planejamento das duas camadas, dispomos de várias soluções de rede com características distintas. A solução gerada a partir do teste 1 é a mais barata, enquanto que a do teste 16 é a mais cara. No entanto, esta última é a que possui a maior folga total, ou seja, é uma solução que está mais preparada para suportar possíveis crescimentos de demanda. A solução gerada pelo teste 8 possui o maior número de anéis, característica que aumenta a confiabilidade da solução, na medida em que oferece caminhos alternativos para as demandas que circulam pelos anéis. A solução do teste 13 é a que apresenta o menor número de comutação 4/1, conforme dados da tabela 2.

Os resultados obtidos nos mostram que não há soluções ótimas ou melhores, mas sim soluções que, sob um determinado critério, está mais otimizada que outra. Este resultado é importante na medida em que fornece uma variedade de boas soluções para uma mesma rede, possibilitando que o planejador faça uma escolha mais segura.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ahuja, R.; Magnanti, T.; Orlin, J.; “*Network Flows*”, Prentice Hall, 1993.
- [2] Bergamaschi, M. A.; “*Um Método Heurístico de Enfeixamento Aplicado a Redes de Transmissão de Grande Porte*”, Tese de Mestrado, FEEC-UNICAMP, 1996.
- [3] Bortolon, S.; Ribeiro, R.; Tavares, H.; Bergamaschi, M. A.; Quaglia, E.; “*Planejamento Otimizado de Redes SDH em Telecomunicações*”, XI SBA, São Paulo/SP, pp. 251-256, 1996.
- [4] Bortolon, S.; Tavares, H.; Ribeiro, R.; Quaglia, E.; Bergamaschi, M. A.; “*A Methodology to SDH Networks Design using Optimization Tools*”, IEEE Globecom, London/UK, 1996.
- [5] Cosares, S. et alli; “*Sonet Toolkit: A Decision Support System for Designing Robust and Cost Effective Fiber-Optic Networks*”, INTERFACES, vol. 25, n° 1, pp. 20-40, 1995.
- [6] CPLEX Optimization, Inc.; “*Using the CPLEX Callable Library – version 3.0*”, 1994.
- [7] Garfinkel, R. S.; Nemhauser, G. L.; “*Integer Programming*”. John Wiley & Sons, 1972, pp. 154-162.
- [8] Machado, J. T.; “*Rede de Transmissão SDH: Planejamento da Camada Lógica (PCLOG)*”. Tese de Mestrado, FEEC-UNICAMP, 1999.
- [9] Pereira, J. et alli; “*Optimizing the Routing/Allocation of El over VC-4 in SDH Networks*”. I International Workshop on the Design of Communications Networks, Belgium, 04, pp. 1-8, 1998.
- [10] Sexton, M.; Reid, A.; “*Broadband Networking – ATM, SDH and SONET*”, Artech House, 1997.
- [11] Wu, T. H.; “*Emerging Technologies for Fiber Network Survivability*”, IEEE Communications Magazine, vol. 33, n° 2, pp. 58-74, 1995.