

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

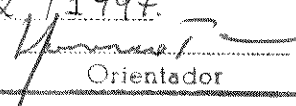
**PLANEJAMENTO DA REDE DE TRANSMISSÃO EM
TELECOMUNICAÇÕES: O PROBLEMA DO ENFEIXAMENTO**

por: **Eduardo José Quaglia**
orientador: **Hermano de M. F. Tavares**

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

Q23p
32941/BC

– Dezembro de 1997 –

Este exemplar corresponde a redação final da tese
defendida por EDUARDO JOSÉ QUAGLIA
e aprovada pela Comissão
Julgada em 11 / 12 / 1997

Orientador

UNIDADE	BC
N.º CHAMADA	112 UNICAMP
V.	Ex. 10.23.12
TCMBO BC	30991
PROC.	39598
C	☐
D	☒
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	07/03/98
N.º CPD	

CM-00106514-7

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

Q23p

Quaglia, Eduardo José

Planejamento da rede de transmissão em
telecomunicações: o problema do enfeixamento. /
Eduardo José Quaglia.--Campinas, SP: [s.n.], 1997.

Orientador: Hermano de M. F. Tavares

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação.

1. Telecomunicações. 2. Análise de redes
(Planejamento). 3. Otimização combinatória. 4.
Modelos matemáticos. I. Tavares, Hermano de M. F. II.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Ao Hermano, pela orientação e exemplo de dedicação.

Ao Raul pelo auxílio nos assuntos de telecomunicações.

A Jamile, minha irmã, pela correção ortográfica.

Aos colegas, Bergamaschi, Saulo, Oderson, Adriano, Antônio, Alda, Nathan, Gustavo, Argemiro e Nakamura que de alguma forma participaram da realização deste trabalho.

Aos amigos do CPqD, Reynaldo, Trindade, Ide e Adriana.

Aos amigos da TELESP, Edna, Maia e Edson, e à empresa pelos dados fornecidos.

Ao pessoal do DENSIS.

Ao pessoal do CORI, que intermediou minha viagem ao Japão.

E especialmente a Zefina, minha mãe, que sempre deu crédito às minhas realizações.

Meu Deus, obrigado por eu ter conhecido estas pessoas.

“O escarnecedor procura a sabedoria, e não a encontra,
mas para o prudente o conhecimento é fácil”

Provérbios 14:6

RESUMO

O setor de telecomunicações tem apresentado altos índices de crescimento, motivando o aparecimento de novas tecnologias. Na área da transmissão aparece a tecnologia SDH (Hierarquia Digital Síncrona), substituindo a PDH (Hierarquia Digital Plesiócrona), que passou a oferecer uma série de melhorias quanto à gerência, retirada/inserção de canais dos agregados e segurança de rede. Esta tecnologia permite a utilização de novas estruturas, os anéis e cadeias, que requerem planejamento criterioso para a sua instalação.

O planejamento da rede de telecomunicações é dividido em fases. A que define o conjunto de equipamentos de transmissão, a topologia lógica da rede e o roteamento das demandas entre centros de fios é denominada Enfeixamento. Este trabalho apresenta um modelo de otimização para esta fase do planejamento. É um Problema Linear Inteiro Misto (PLIM) com variáveis inteiras (facilidades) e reais (fluxos nos caminhos). Caracteriza-se como um problema de fluxo multiproduto implementado na abordagem de fluxo por caminho. A técnica de otimização utilizada foi o branch-and-bound.

A construção de uma ferramenta computacional, dedicada à montagem da formulação matemática, permitiu a aplicação deste modelo a redes reais, cujos resultados fazem parte do conteúdo deste trabalho. O programa resolvidor utilizado foi o CPLEX.

ABSTRACT

Telecommunications has experienced high growth rates, causing a rapid development of new technologies. In the transmission area, the SDH technology (Synchronous Digital Hierarchy) replaces the PDH technology (Plesyochronous Digital Hierarchy), offering several improvements in management, channels add-dropping on the main stream and network security. The SDH technology allows the utilization of new structures, the rings and chains, that need perceptive planning for their installation.

The telecommunication network planning is divided in several phases. The one that defines the transmission equipment set, the network logical topology and the demand routing among central offices is named “Bundling”. This work presents an optimization model for the “Bundling” phase. It is a Mixed Integer Linear Problem with integer variables (facilities) and real variables (flow on path). It can be defined as a multi-commodity flow problem implemented in path flow approach. The optimization technique used was the branch-and-bound.

The kernel of this work is a computer program that produces a mathematical model suited for the CPLEX solver. Results from real problems are presented at the end of the work.

SUMÁRIO

Agradecimentos	ii
Resumo	iv
Abstract.....	v
Sumário.....	vi
Índice de figuras	viii
Capítulo 1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivo.....	1
1.2. Conteúdo	2
Capítulo 2. TELECOMUNICAÇÕES	5
2.1. Perspectivas para o Terceiro Milênio.....	5
2.2. Planejamento (fases)	6
2.3. Transmissão.....	9
2.4. Novas Tecnologias	11
2.5. Estruturas Topológicas.....	17
Capítulo 3. CONSIDERAÇÕES SOBRE O MODELAMENTO MATEMÁTICO	23
3.1. Pesquisa Operacional e Telecomunicações.....	23
3.2. Programação Linear Inteira Mista.....	24
3.3. Estrutura de Fluxo por Caminho	26
3.4. Clusterização e Hubeamento	28
Capítulo 4. MODELO DO ENFEIXAMENTO	33
4.1. Rede2.....	34
4.2. Rede3.....	36
4.3. Rede7.....	39
4.4. Rede3 com Anel Bidirecional – Rede3AnelBi	43
4.5. Rede3 com Anel Unidirecional – Rede3AnelUni.....	45

4.6. Rede7 com Anel e Cadeia – Rede7Anel	47
4.7. Softwares	52
Capítulo 5. TÉCNICAS HEURÍSTICAS.....	55
5.1. Linearização de Variáveis	55
5.2. Número de Grãos	57
5.3. Manipulação na Árvore de Branch-and-bound	61
Capítulo 6. ESTUDO DE CASOS	63
6.1. Santos	64
6.2. Belo Horizonte	69
6.3. Campinas.....	74
6.4. Resultados comparativos entre as cidades.	82
Capítulo 7. CONCLUSÕES	85
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
ANEXOS	91
Anexo 1 – Arquivo Rede7.lp	91
Anexo 2 – Arquivo Rede7anel.lp.....	92
Anexo 3 – Santos	94
Anexo 4 – Belo Horizonte	98
Anexo 5 – Campinas	106

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Rede de telecomunicações.	7
Figura 2: Rede de telecomunicações.	8
Figura 3: Demultiplexação em equipamento OLTM (PDH).....	12
Figura 4: Caminhos e Seções.....	13
Figura 5: Synchronous Transport Module - STM e Virtual Container - VC.	14
Figura 6: Percurso utilizado pelo STM.	14
Figura 7: Duas configurações de ADM.....	16
Figura 8: Synchronous Digital Cross-Connect - SDxC.....	17
Figura 9: Ponto-a-ponto.....	18
Figura 10: Anel Unidirecional.....	19
Figura 11: Anel Bidirecional.	20
Figura 12: Cadeia.....	22
Figura 13: Duas maneiras de se expressar fluxo em uma rede.....	26
Figura 14: Clusterização passo a passo.	30
Figura 15: Clusterização, hubeamento e backbone da rede.....	31
Figura 16: Configuração para 2 CFs (Rede2).....	35
Figura 17: Topologia de rede resultante para 2 CFs (Rede2).....	36
Figura 18: Configuração para 3 CFs (Rede3).....	37
Figura 19: Topologia de rede resultante para 3 CFs (Rede3).....	38
Figura 20: Configuração para 7 CFs (Rede7).....	41
Figura 21: Possibilidade de Caminhos para a Demanda dEF (Rede7).....	42
Figura 22: Topologia de rede resultante para 7 CFs (Rede7).....	43
Figura 23: Facilidades Anel e Cadeia Candidatas (Rede7Anel).	48
Figura 24: Topologia de rede resultante para Rede7Anel. Solução 7.1.	49
Figura 25: Topologia de rede “melhorada” para Rede7Anel. Solução 7.2.	50
Figura 26: Outra topologia de rede para Rede7Anel. Solução 7.3.	51

Figura 27: Ferramenta de auxílio ao planejamento da transmissão.....	53
Figura 28: Topologia de rede resultante para Rede7Anel. Solução linear.	56
Figura 29: Incidência de grãos para um CF denominado H.	60
Figura 30: Ordenação das variáveis de branch baseada no custo de cada variável.....	62
Figura 31: Facilidades candidatas, anéis, para a rede de Santos.	65
Figura 32: Facilidades candidatas, cadeia e ponto-a-ponto, para a rede de Santos.	67
Figura 33: Solução mais barata para a rede de Santos.	68
Figura 34: Facilidades candidatas, anéis e cadeias, para a rede de Belo Horizonte.....	70
Figura 35: Facilidades candidatas, ponto-a-ponto, para a rede de Belo Horizonte.	72
Figura 36: Solução mais barata para a rede de Belo Horizonte.....	74
Figura 37: Facilidades candidatas, anéis, para a rede de Campinas.	77
Figura 38: Facilidades candidatas, cadeias e ponto-a-ponto, para a rede de Campinas.	79
Figura 39: Solução mais barata para a rede de Campinas.	82

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

1.1. Objetivo

O setor de telecomunicações tem apresentado, mundialmente, altos índices de crescimento, caracterizando uma verdadeira revolução tecnológica. O advento da fibra óptica como meio transmissor tornou possível a utilização de novas tecnologias de transmissão, onde se destaca a SDH (Synchronous Digital Hierarchy – Hierarquia Digital Síncrona) [RNT 97]. Estas tecnologias viabilizam novos serviços de telecomunicações que, por sua vez, requerem **planejamento** mais apurado da Rede de telecomunicações.

O planejamento de uma Rede de telecomunicações é dividido em planejamento da comutação e das redes externa e de transmissão. O planejamento da rede de transmissão, por sua vez, também é subdividido. Uma das partes é caracterizada como **Enfeixamento**. Nesta etapa é dimensionado o número de equipamentos de transmissão que interligarão os centros de fios da rede e são definidas as taxas de transmissão. Para este fim é necessário conhecer: a matriz de demanda entre centros de fios, a matriz de demanda de circuitos não comutados ou linhas privadas e os custos dos equipamentos.

Este trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para a etapa Enfeixamento do planejamento através de um modelo matemático na forma de “Programação Linear Inteira Mista”, onde as variáveis de decisão são binárias e indicam a instalação ou não de equipamentos na rede de transmissão. Este modelo utiliza também variáveis reais que indicam o caminho por onde escoar a demanda entre cada par de centro de fios da rede. A técnica utilizada para resolução do problema foi o branch-and-bound.

Este modelo requer ferramentas computacionais específicas para: leitura de dados de entrada, montagem do problema na forma matemática, processamento da otimização matemática e visualização gráfica de resultados. Com exceção do processamento da otimização, que foi realizada através de pacote comercial (CPLEX), estas ferramentas foram desenvolvidas na Faculdade de Engenharia Elétrica e Computacional da Unicamp.

Esse procedimento permitiu o planejamento de redes em cidades como Santos, Belo Horizonte e Campinas. Possibilitou também o planejamento de áreas extensas como a área metropolitana de São Paulo e a rede interurbana do Estado de São Paulo, cujos dados foram gentilmente cedidos pela TELESP – Telecomunicações do Estado de São Paulo.

1.2. Conteúdo

Este trabalho compreende 7 capítulos:

O Capítulo 1 faz uma Introdução do trabalho realizado.

O Capítulo 2 discute a situação atual e o futuro das telecomunicações. Os recentes avanços nesta área requerem criterioso planejamento nas redes de telecomunicações. São apresentadas as etapas deste planejamento com ênfase na transmissão, apresentando-se tecnologias desenvolvidas recentemente e as estruturas topológicas possíveis no momento, mencionando os mecanismos de proteção utilizados. Dentro desta etapa é descrita a fase Enfeixamento, objetivo deste trabalho.

O Capítulo 3 descreve conceitos utilizados em pesquisa operacional, programação linear e inteira, e estrutura arco-caminho. Também são apresentados os conceitos de clusterização e hubeamento de rede, utilizados no modelo a ser descrito.

O Capítulo 4 apresenta o modelo matemático que auxilia o planejamento do Enfeixamento em redes de transmissão. É um problema de pesquisa operacional baseado em programação linear inteira mista na estrutura arco-caminho. Apresenta

também o funcionamento das ferramentas computacionais criadas para auxiliar o planejamento na fase Enfeixamento.

O Capítulo 5 aborda as dificuldades computacionais que ocorrem no dimensionamento de redes complexas, em geral de grande porte. Aqui são apresentadas técnicas heurísticas que amenizam essas dificuldades, exercendo controle no processamento do branch-and-bound (B&B), gerando restrições que aceleram a busca no B&B, e permitindo manipulação de variáveis afim de facilitar o trabalho da otimização.

O Capítulo 6 apresenta a descrição, modelamento e resultados para casos estudados: as cidades de Santos, Belo Horizonte e Campinas. São apresentados os resultados a partir da utilização das ferramentas criadas.

O Capítulo 7 contém as conclusões deste trabalho.

Considero que minhas principais contribuições estão nos capítulos 4 e 6. Durante o desenrolar da minha tese publiquei 5 artigos:

Bortolon, Saulo; Ribeiro, Raul; Tavares, Hermano; Bergamaschi, Marco; Quaglia, Eduardo; **“Planejamento Otimizado de Redes SDH em Telecomunicações.”**, XI Simpósio Brasileiro de Automática, São Paulo/SP, pp.251-256, setembro de 1996.

Bortolon, Saulo; Ribeiro, Raul; Tavares, Hermano; Bergamaschi, Marco; Quaglia, Eduardo; **“A Methodology to SDH Networks Design using Optimization Tools.”**, IEEE Global Telecommunications Conference, pg 1867-1871, 1996, November, London – UK.

Budri, A.; Yamakami, A.; Quaglia, E. J.; Tavares, H.; Bonatti, I.; Ribeiro, R.; Figueiredo, R.; **“Planejamento Integrado da Comutação e da Transmissão: Estudo de Caso”**, Revista Telebrás, vol. 19, nº 63, pp. 22-30, julho de 1996.

Quaglia, Eduardo; Tavares, Hermano; Ribeiro, Raul; **“O Enfeixamento no Planejamento da Transmissão: Um Estudo de Caso.”**, Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, Águas de Lindóia/SP, pp.458-463, 1995.

Quaglia, E.; Tavares, H.; Ribeiro, R.; **“Uma Heurística para a Fase de Enfeixamento do Planejamento da Transmissão”**, XXVII SBPO, Vitória, novembro de 1995.

CAPÍTULO 2. TELECOMUNICAÇÕES

2.1. Perspectivas para o Terceiro Milênio

O Setor de telecomunicações tem apresentado, mundialmente, altos índices de crescimento, caracterizando uma verdadeira **revolução tecnológica**. No início dos anos noventa, foram previstos para essa década investimentos no setor da ordem de 1,5 trilhões de dólares [Coy 92]. O Brasil tem acompanhado esta tendência, almejando adentrar o terceiro milênio em posição melhorada em relação a outras nações [Siqueira 96].

Com o advento da **fibra óptica** como meio transmissor e o avanço da microeletrônica, as pesquisas nesse setor foram direcionadas para a comutação e transmissão de sinais digitalizados na rede de telefonia. Novos serviços, usando técnicas digitais, já são realidade, como transmissão de dados, linhas privadas não comutadas (LP), TV de alta definição, vídeo conferência, etc. Essa gama de novos serviços deverá ser o motor da transformação da antiga rede de telefonia em uma rede de telecomunicações chamada **Rede Digital de Serviços Integrados de Faixa Larga (RDSI-FL)**.

A eficácia destas inovações exige um planejamento cuidadoso para a efetiva aplicação de cada novo equipamento ou serviço. Esse planejamento é necessário em virtude dos custos financeiros de implementação e controle e do gerenciamento de rede que passa a ser bastante complexo.

2.2. Planejamento (fases)

Uma rede de telecomunicações pode ser dividida em níveis (Figura 1). Em um nível superior temos um conjunto de **redes urbanas** interligadas por uma **rede interurbana de transmissão**. Cada rede urbana é constituída por um grupo de **áreas de comutação** interligadas por uma **rede de troncos**. Por sua vez, uma área de comutação contém um **centro de fios – CF** (estação telefônica) e uma **rede externa**. A rede externa permite a interligação entre: (1) os assinantes e sua respectiva **seção de serviço (rede secundária)** e (2) as seções de serviço ao CF a que pertencem (**rede primária**).

Os centros de fios (CFs) contêm as **centrais de comutação** e os **equipamentos de transmissão**. Estes equipamentos e os meios de transmissão interligam os CFs e constituem a rede de transporte ou transmissão, por onde circulam as mensagens comutadas de fonia e outros serviços, como linhas privadas de voz, dados, sinais de vídeo, etc. (Figura 2)

Tanto as centrais de comutação quanto os equipamentos de transmissão sofreram forte evolução. As centrais de comutação passaram de centrais analógicas (controle de chaveamento eletro-mecânico), para centrais CPA (Controle por Programa Armazenado) com comutação totalmente eletrônica administrada por software. Os equipamentos de transmissão [Ferrari 91] passam a transmitir cada vez mais informações a velocidades mais altas e de forma mais eficiente, usando técnicas de multiplexação como a PCM (Modulação por Código de Pulso) usada nos equipamentos SDH.

O planejamento de um sistema de telecomunicações, devido à sua complexidade, é dividido em fases relacionadas a partes distintas do sistema: rede externa, comutação e transmissão. O planejamento do sistema de transmissão requer resolução de forma integrada devido a interdependência dos subsistemas que o compõem.

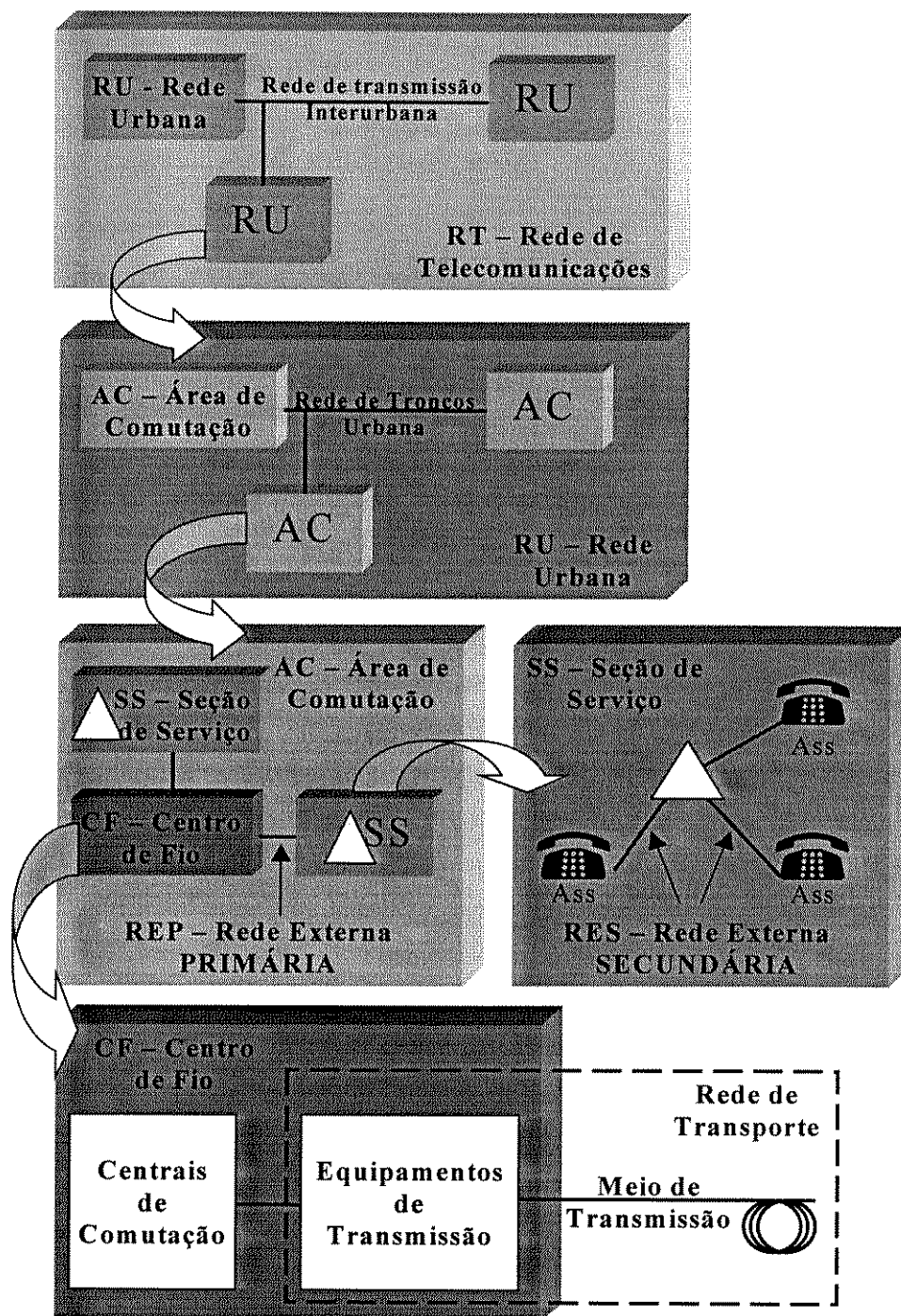


Figura 1: Rede de telecomunicações.

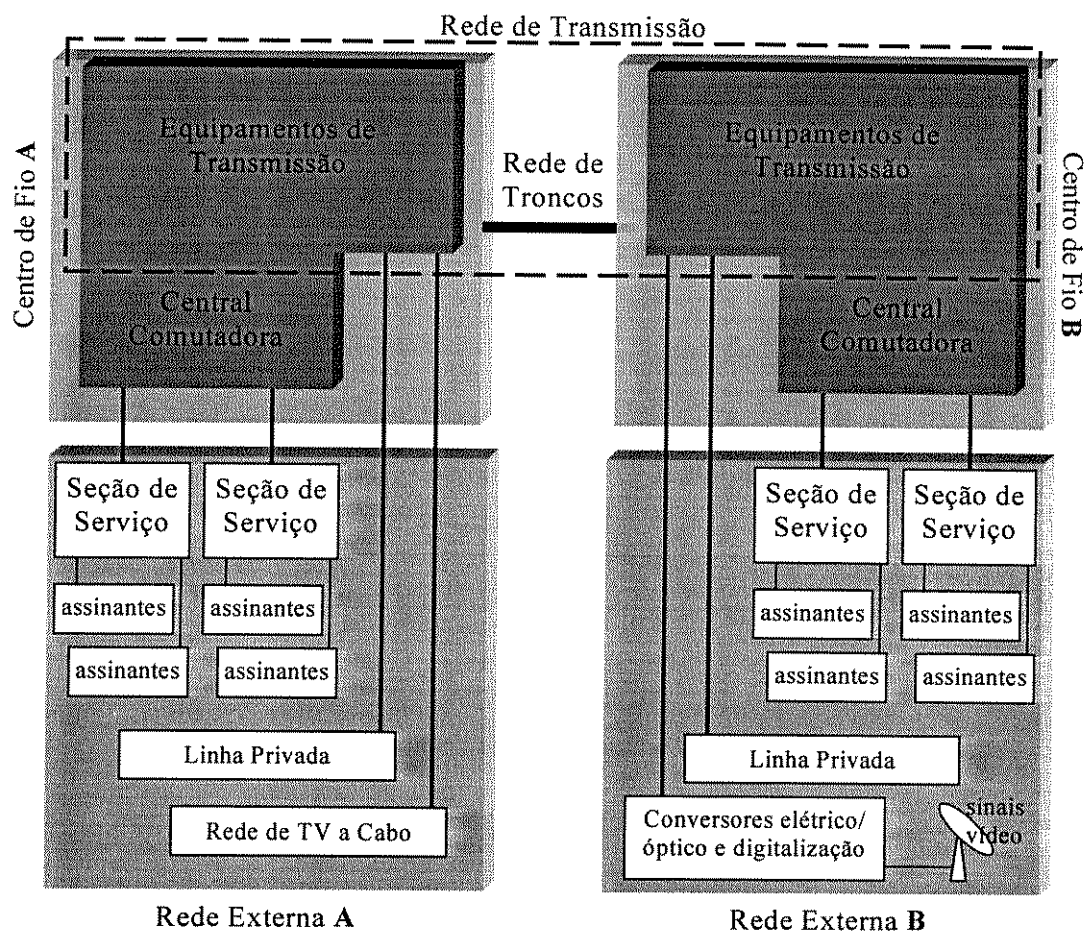


Figura 2: Rede de telecomunicações.

Planejamento de rede externa: Estabelece um balanço de investimentos entre (1) os prédios com equipamentos de comutação ou Centros de Fios e (2) a rede externa que interliga os assinantes aos CFs. Nesta fase, define-se a localização dos CFs, sua abrangência geográfica (cortes de área) e a sua data de implantação (evolução da rede). Os CFs devem ser interligados entre si através da rede de transmissão.

Planejamento de Comutação: Dimensionam-se as centrais de comutação a serem instaladas nos CFs quanto à capacidade de tráfego telefônico. Definem-se ainda, a partir do interesse de tráfego entre as centrais telefônicas, o encaminhamento das chamadas através das centrais e dimensiona-se o número de circuitos necessários à interligação entre elas, obtendo-se ao final uma **matriz de circuitos comutados** que devem interligar as centrais.

Os elementos da matriz de circuitos comutados representam módulos de 30 canais de 64 Kbps, num total de 2 Mbps, no caso de centrais digitais. Como cada CF pode abrigar mais de uma central de comutação, a matriz anterior é transformada em uma menor, a **matriz de demanda de sistemas de 2 Mbps entre CFs**.

Nesta fase também é feito o **plano de sinalização**, tratando da comunicação entre as centrais, enviando informações referentes à numeração dos assinantes (sinalização de assinantes) e aos troncos (sinalização de linha).

Planejamento de transmissão: Tem por objetivo dimensionar o número de equipamentos de transmissão que interligarão os CFs e suas respectivas taxas de transmissão. Os dados utilizados para o dimensionamento são: **matriz de demanda entre CFs** e a **matriz de demanda de circuitos não comutados ou linhas privadas**. São também dados de entrada a malha de galerias e os meios de transmissão que já se utilizam desta malha, tais como, fibras ópticas e cabos de pares.

A partir daqui o foco deste trabalho passa a ser o planejamento da rede de transmissão.

2.3. Transmissão

O planejamento da rede de transmissão é também suficientemente complexo para ser subdividido em fases apresentadas a seguir:

Agrupamento: Procura-se organizar os CFs em grupos ou “**clusters**”, maximizando as demandas de canais 2 Mbps **intraclusters** [Aubry et alii 95]. Cada “**cluster**” possui um CF principal ou “**hub**”, que serve a grosso modo como ponto de contato dos CFs deste cluster com os outros clusters. Estes conceitos são detalhados no item 3.4. do próximo capítulo.

Enfeixamento: Define-se o conjunto de equipamentos de transmissão ótimo, de acordo com algum critério, e a forma de interligação destes equipamentos, ou seja,

a topologia de transmissão da rede que pode ocorrer em várias formas: enlaces ponto-a-ponto, cadeias e anéis. Define ainda quais demandas serão transmitidas através de cada equipamento. Em outras palavras, é definido o roteamento das demandas que correspondem às ligações lógicas da rede, considerando critérios de otimização, tais como, custos, confiabilidade/sobrevivenciabilidade, número de enlaces totais da rede, folga na operação dos equipamentos, etc.

Os equipamentos de transmissão são modulares e há forte economia de escala quando se passa aos de maior taxa de transmissão. Por isso é interessante **enfeixar** ou agregar demandas de forma a utilizar módulos de maior capacidade e, portanto, com menor custo por sistema de 2 Mbps.

Arranjo e Dimensionamento da rede de transmissão: Seleciona um conjunto de galerias na rede que garante conectividade entre os CFs e define os caminhos onde serão colocados os cabos de fibras ópticas, de forma a conectar os equipamentos de transmissão. Questões relativas à segurança e sobrevivenciabilidade devem ser consideradas nesta fase [Mello 96].

Utilizando os resultados obtidos no enfeixamento (equipamentos de transmissão e roteamento das demandas) e a definição da rede de galeria, resta definir a disposição ou os caminhos por onde passarão os cabos de fibras ópticas na rede de galeria, também considerando aspectos de confiabilidade.

Evolução: Definida nas fases anteriores a rede de transmissão para o ano horizonte, elabora-se um cronograma de instalação ou atualização de equipamentos ao longo do período de planejamento, considerando-se o atendimento da demanda em períodos intermediários e os custos financeiros dos investimentos [Zanandrea & Garcia 96]. Nesta fase, também se faz uso de critérios de otimização, tais como, custos de investimentos, confiabilidade, folga na operação de equipamentos, substituição de equipamentos, etc.

2.4. Novas Tecnologias

Já vimos que a área de transmissão está em franca transformação graças à utilização de fibra óptica como meio transmissor e ao desenvolvimento da microeletrônica. Essa transformação vem se dando através da substituição de tecnologias de equipamentos de transmissão: os equipamentos **SDH (Synchronous Digital Hierarchy – Hierarquia Digital Síncrona)** substituem aqueles do tipo **PDH (Plesiochronous Digital Hierarchy – Hierarquia Digital Plesiócrons)** [RNT 97]. A seguir veremos as principais características destas linhas de concepção de equipamentos de transmissão e os motivos da substituição.

PDH

Nas últimas duas décadas, equipamentos PDH foram instalados na interligação de uma central de comutação a outra. Contudo, atualmente vigora uma nova situação, onde esses equipamentos são incapazes de fornecer a eficiência necessária. Capacidade de transporte em taxas da ordem de Gbps, rápida configuração da rede para o atendimento sob demanda ao cliente e arquitetura de redes protegida contra falhas são características que os equipamento PDH não comportam. Algumas das razões destas ineficiências são:

- Não é permitida a instalação de equipamentos de diferentes fabricantes em uma mesma rede. Isto ocorre pela não padronização de protocolos de transmissão entre os equipamentos nas pontas opostas de um sistema de transmissão, o que implica na existência de interfaces de linha e gerência proprietárias, não permitindo equipamentos de fabricantes distintos trabalharem em conjunto. Além disso, tem-se padrões diferenciados de estrutura de quadros; existem os padrões japonês, europeu e americano.
- Preços muito altos de equipamentos que efetuam, de forma automática, a operação de derivação/inserção de sinais de menor hierarquia (tributários) em um sinal de hierarquia mais alta (agregado). Qualquer inserção/derivação de tributário, em seu ponto de destino, percorre toda a cadeia de multiplexação/demultiplexação. Toda solicitação de derivação de sinal de baixa

hierarquia, em um nó intermediário de transmissão, onde existem duas pontas de sistemas de transmissão diferentes (Figura 3), pode-se constituir em um trabalho manual demorado, no caso em que o equipamento não seja automatizado, não sendo justificado para solicitações de médio e curto prazo. No caso da Figura 3, retirar “um” sinal de 2 Mbps do sistema D de 140 Mbps, que passa diretamente, através do nó, implica em demultiplexar o sinal D através de toda a cadeia: $140 \rightarrow 4 \times 34 \rightarrow 16 \times 2$ (Figura 3).

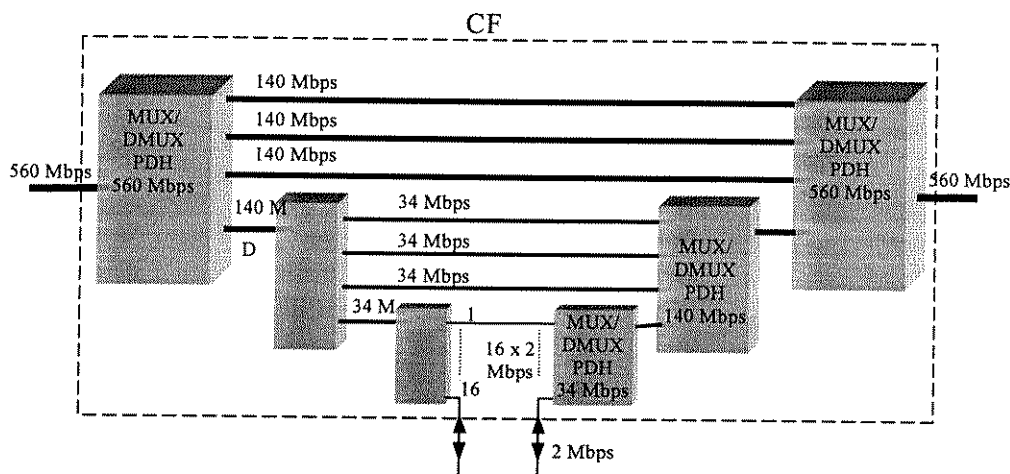


Figura 3: Demultiplexação em equipamento OLTM (PDH).

- Capacidade deficiente para gerência de rede devido à quantidade reduzida de bits reservadas para overhead.

A maioria das redes de transmissão implementadas ainda usam equipamentos PDH. Elas vêm sendo modernizadas pela implantação de SDH em frentes de expansão da rede. Contudo, algumas redes, em situação de expansão de demanda por novos serviços, podem também estar modernizando a rede já instalada.

SDH

A tecnologia SDH é uma resposta eficiente para as deficiências dos equipamentos PDH:

- permitirá no futuro a convivência de **vários fornecedores** de equipamento em uma mesma rede, tanto em relação a taxas de transmissão quanto em relação a gerência;
- o gerenciamento das facilidades de derivação/inserção de tributários é **automatizado**;
- contém matrizes de comutação controladas por software e de fácil **reconfiguração** que facilitam o re-roteamento de sinais na rede de transporte.

A Figura 4 explica a relação entre **caminho (path)** e **seção (section)** utilizados na tecnologia SDH. Caminho é um trajeto predeterminado, interligando dois ou mais equipamentos da rede, percorrido por um sinal (origem ao destino), e seção é um trecho entre dois equipamentos de transmissão da rede. Um caminho é composto por uma ou mais seções. Estes conceitos são utilizados para definir **Virtual Container (VC)** e **Synchronous Transport Module (STM)** (Figura 5 e Figura 6).

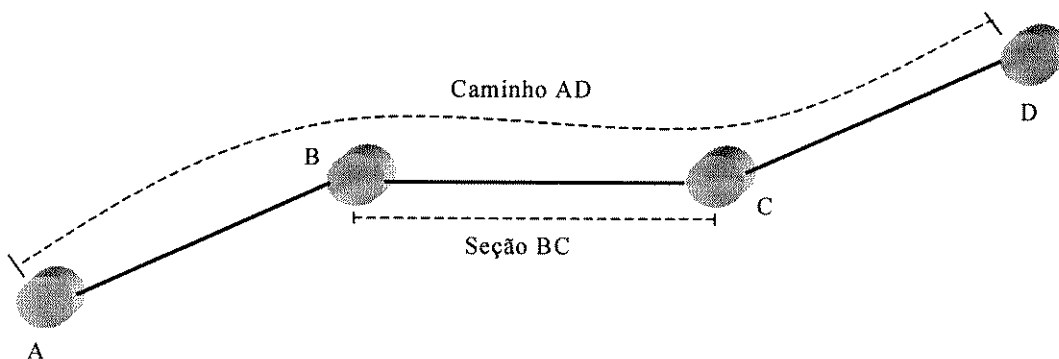


Figura 4: Caminhos e Seções.

O VC é usado para empacotar as mensagens; é composto de um quadro de informações constituído de sinais tributários e de bits de cabeçalho para controle de caminhos (**path overhead**). Este cabeçalho carrega informações de controle, gerenciamento e sincronismo, permitindo (a) checar a qualidade da transmissão entre a origem e o destino (pontos terminais); (b) indicar a existência de caminho entre os pontos terminais; e (c) alertar sobre a ocorrência de problemas com o sinal recebido. Através do empacotamento de informações plesiócronas (PDH) em VCs é possível transportar esses sinais em redes SDH sem perda de qualidade.

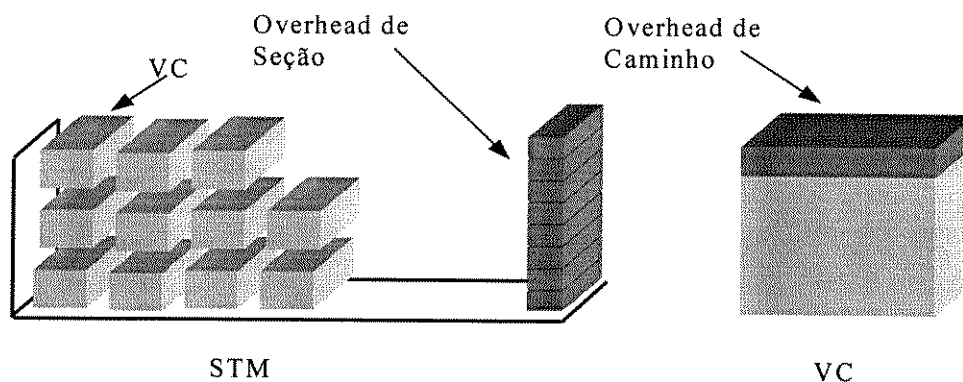


Figura 5: Synchronous Transport Module - STM e Virtual Container - VC.

O STM-N transporta um grupo de VCs pela extensão de uma seção, controlado por bits de cabeçalho para controle de seção.

Existem, para o caso brasileiro, três tipos de containers virtuais: VC-12 que transporta informação de 2 Mbps, VC3 para o transporte de sinal de 34 Mbps e VC4 para 140 Mbps. O VC4 pode ainda conter 3 VC3 ou 63 VC12.

Em um quadro STM-1 podem caber 63 containers virtuais (VC) do tipo VC12, 3 do tipo VC3 e 1 do tipo VC4, ou algumas combinações de VC12 e VC3. Um quadro STM-N é constituído de exatamente N quadros STM-1.

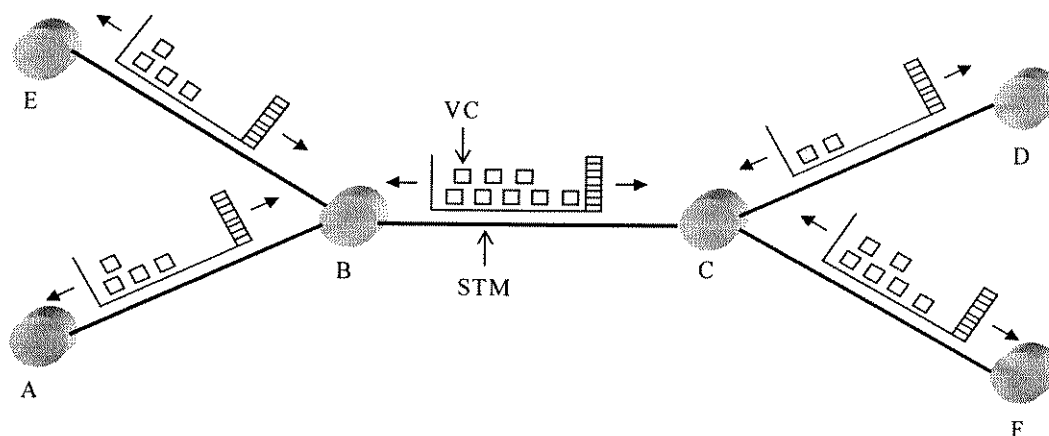


Figura 6: Percurso utilizado pelo STM.

Na tecnologia SDH, como o seu overhead é bastante extenso [Mendes et alii 95], é possível transportar informações de operação, controle, gerência e monitoramento da rede, facilitando a implementação de um novo conceito de

Gerência de Rede, chamada **TMN (Telecommunications Management Network)** [Mendes et alii 95].

A possibilidade de se fazer a baixo custo a derivação/inserção de sinais de mais baixa hierarquia, chamados tributários, tornam a tecnologia SDH funcional, dado que o sinal agregado não precisa ser desmontado no nó de intersecção de duas seções, isto é, os VCs podem passar de um STM para outro (Figura 6) sem que ocorra toda a cadeia de multiplexação e demultiplexação. Isto viabiliza serviços de médio ou curto prazo, sem custos adicionais.

Há quatro tipos básicos de equipamentos SDH: **regenerador**, **OLTM** (Optical Line Terminal Multiplexer – Multiplexador de Terminal de Linha Óptica), **ADM** (Add/Drop Multiplexer – Multiplexador de insere/deriva) e **SDxC** (Synchronous Digital Cross-Connect – Transconector Cruzado Digital) [Wu 92].

Regenerador – este equipamento contém três elementos: um receptor, um transmissor e um amplificador/regenerador de sinal. Só é utilizado em linhas extensas, onde o sinal perde potência ou sofre interferências acima dos níveis aceitáveis. Tem como função principal restaurar o sinal.

Atualmente existem equipamentos em que a amplificação é realizada com “amplificadores de fibras dopados com **érbio**” [Wu 92]. A utilização deste elemento, com fibras de melhor qualidade, permite um aumento das distâncias máximas entre dois equipamentos sem a necessidade de regeneração.

OLTM – realiza a operação de multiplexação, ou seja, agrega diversos tributários em um sinal de hierarquia superior (agregado ou feixe principal) e realiza ainda a conversão do sinal agregado elétrico em óptico e vice-versa. Este equipamento aceita várias configurações de tributários. Um OLTM com agregado STM-1, 155 Mbps, pode ter 63 tributários de 2 Mbps, ou 3 tributários de 34 Mbps, ou um tributário de 140 Mbps ou até mesmo uma mistura entre eles. Os sinais tributários podem ser elétricos ou ópticos.

ADM – tem um grupo de tributários e dois agregados. Realiza a função de multiplexação além de inserir/retirar tributários de um quadro. Além disso, este equipamento pode possuir uma **matriz de conexão** que trata todos os VCs contidos nas interfaces STM-N ou originados/terminados no CF, onde o equipamento está instalado. Através de um **mapa de conexões programável**, estas matrizes roteiam os VCs possibilitando encaminhá-los para os STM-N de saída ou derivá-los localmente. Como mostrado na Figura 7, o conjunto dos tributários não pode exceder a capacidade de cada agregado.

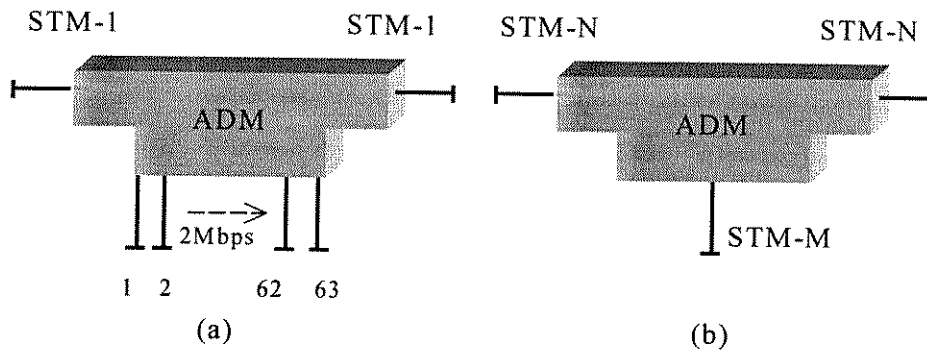


Figura 7: Duas configurações de ADM.

SDxC – tem apenas agregados e aos pares. Tem a função de rotear VCs de uma porta (entrada e saída de agregados) a outra. No caso mais simples, com quatro portas (Figura 8), funciona como dois ADMs ligados pelos tributários através de uma matriz de comutação, que permite trocas de tributários entre os vários agregados de acordo com programas armazenados nesta matriz, embora o SDxC não seja realmente construído desta forma. A matriz de comutação é dividida em duas partes: **LPC** (Lower-Order Path Connection) e **HPC** (Higher-Order Path Connection), que fazem a comutação dos sinais de baixas hierarquias (VC12 ou VC3) e altas hierarquias (VC4) respectivamente, entre agregados de diferentes portas de entrada.

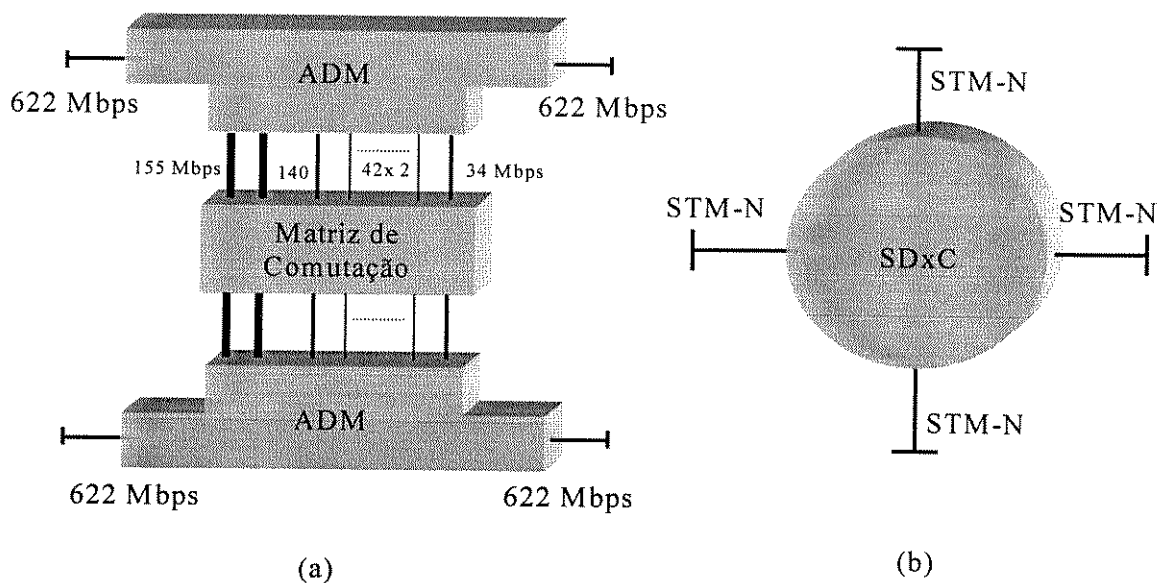


Figura 8: Synchronous Digital Cross-Connect - SDxC.

2.5. Estruturas Topológicas

A existência do ADM e do SDxC, expandiram o conjunto de **estruturas topológicas (facilidades)** além da existente na tecnologia PDH, que permitia apenas a estrutura **ponto-a-ponto**, para três novas estruturas em SDH: **anel**, **cadeia** e **malha de SDxC**. Estas facilidades permitem mecanismos de proteção à rede (segurança e sobrevivenciabilidade), assunto para o item 2.6 deste capítulo. Este trabalho não utiliza a estrutura em malha.

A partir deste ponto, faremos considerações sobre estas estruturas topológicas. O equipamento regenerador pode ser usado nas três estruturas, não interferindo no funcionamento das mesmas; por esta razão, os regeneradores não serão objeto destas considerações. Há casos em que regeneradores podem ser utilizados para economia de equipamentos em anéis [Wu 92], mas não é esta a intenção deste trabalho.

Ponto-a-ponto – liga dois CFs e é construída com um equipamento multiplex OLTM em cada extremidade (Figura 9).

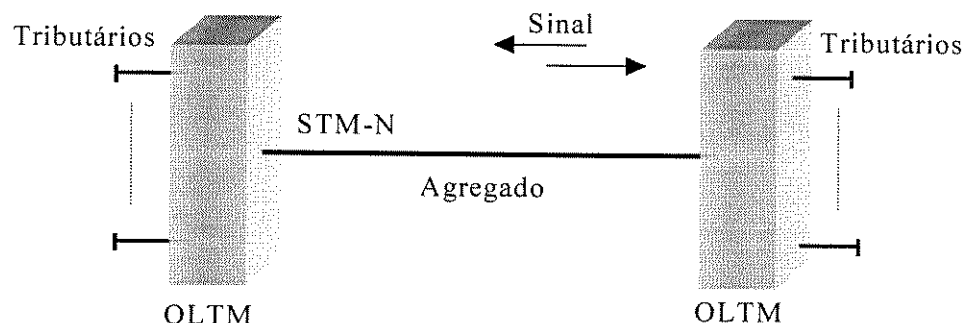


Figura 9: Ponto-a-ponto.

O ADM possibilita a construção de sistemas de transmissão com arquitetura em anel. É arbitrado um lado **leste** e um **oeste** para cada ADM do anel. Os nós do anel são os ADMs e os arcos são constituídos por fibras ópticas. Os ADMs devem todos, evidentemente, ter a mesma capacidade de fluxo agregado ($n \times 155$ Mbits/s, $n=1, 4, 16, \dots$), ou seja, devem ser da mesma hierarquia.

Em um anel há sempre dois caminhos entre dois nós quaisquer. Se um arco da rede é rompido, ou um nó apresenta problemas, o anel automaticamente reencaminha a informação ou os quadros SDH, com seus containers, pelo caminho alternativo, daí o nome anel auto-regenerativo (**SHR - Self-Healing Ring**). A propriedade de auto-regeneração do anel garante uma maior confiabilidade de transmissão. Evidentemente esta capacidade auto-regenerativa do anel só é possível por haver capacidade redundante ou de reserva, o que pode implicar em custo adicional. A arquitetura SHR e a funcionalidade SDxC vão portanto permitir topologias de redes mais confiáveis e flexíveis.

Os anéis podem ser de dois tipos:

- **Anel Unidirecional** (Unidirectional Path Switched Self-Healing Ring- UPSHR)
- **Anel bidirecional** (Bidirectional Line Switched Self-Healing Ring- BLSHR) que pode ser a duas ou a quatro fibras.

Nos Anéis Unidirecional e Bidirecional a duas fibras há um conjunto transmissor/receptor em cada lado, leste e oeste, dos ADMs. Cada um destes conjuntos está ligado a um par de fibras ópticas.

No Anel Unidirecional a mesma informação é transmitida (ou transportada) nos dois sentidos opostos, de trabalho e de proteção, como mostrado na Figura 10a. As duas cópias da informação chegam ao seu destino de lados opostos, leste e oeste, e são lidas; se a cópia de trabalho apresentar erros ou for inexistente, é utilizada a cópia de proteção. Se um enlace de fibra óptica (Figura 10b) se rompe ou um ADM apresenta defeito (Figura 10c) a proteção é obtida como mostrado nas figuras. Neste caso, como vemos pela descrição do anel, temos uma proteção do tipo 1:1.

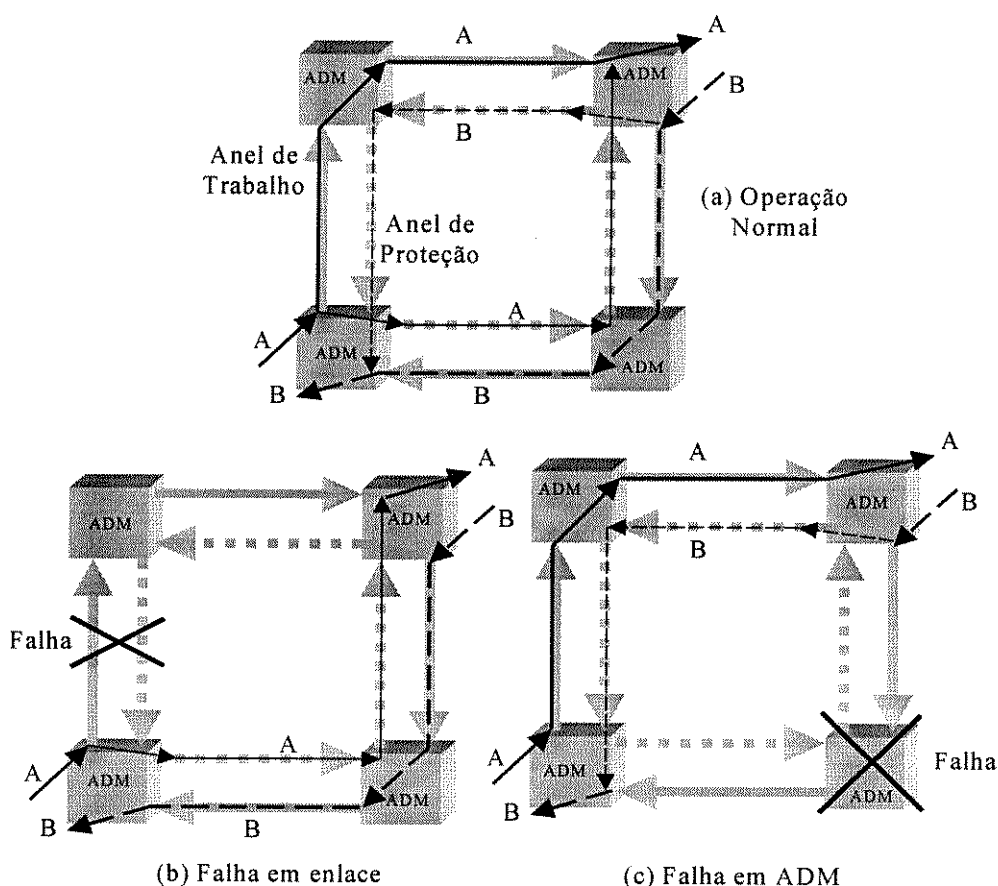


Figura 10: Anel Unidirecional

No anel unidirecional, a informação fundamental para a modelagem matemática é que a quantidade máxima de informação circulante no anel como um todo deve ser menor ou igual à capacidade de fluxo agregado que circula por ele, pois cada container virtual ocupa todos os arcos do anel.

No **anel bidirecional a duas fibras** a informação entre dois nós circula, em geral, pelo caminho mais curto do anel. A proteção aqui é obtida mantendo-se uma capacidade ociosa de 50% em cada arco, ou seja, o fluxo deve ser em cada arco metade da capacidade do anel (Figura 11a). Se um par de fibra óptica se rompe ou um ADM apresenta defeito, os dois ADMs adjacentes ao defeito comutam para o par alternativo e utilizam a sua capacidade ociosa para, através do caminho mais longo do anel, realizar a sua tarefa, (Figura 11b) e (Figura 11c).

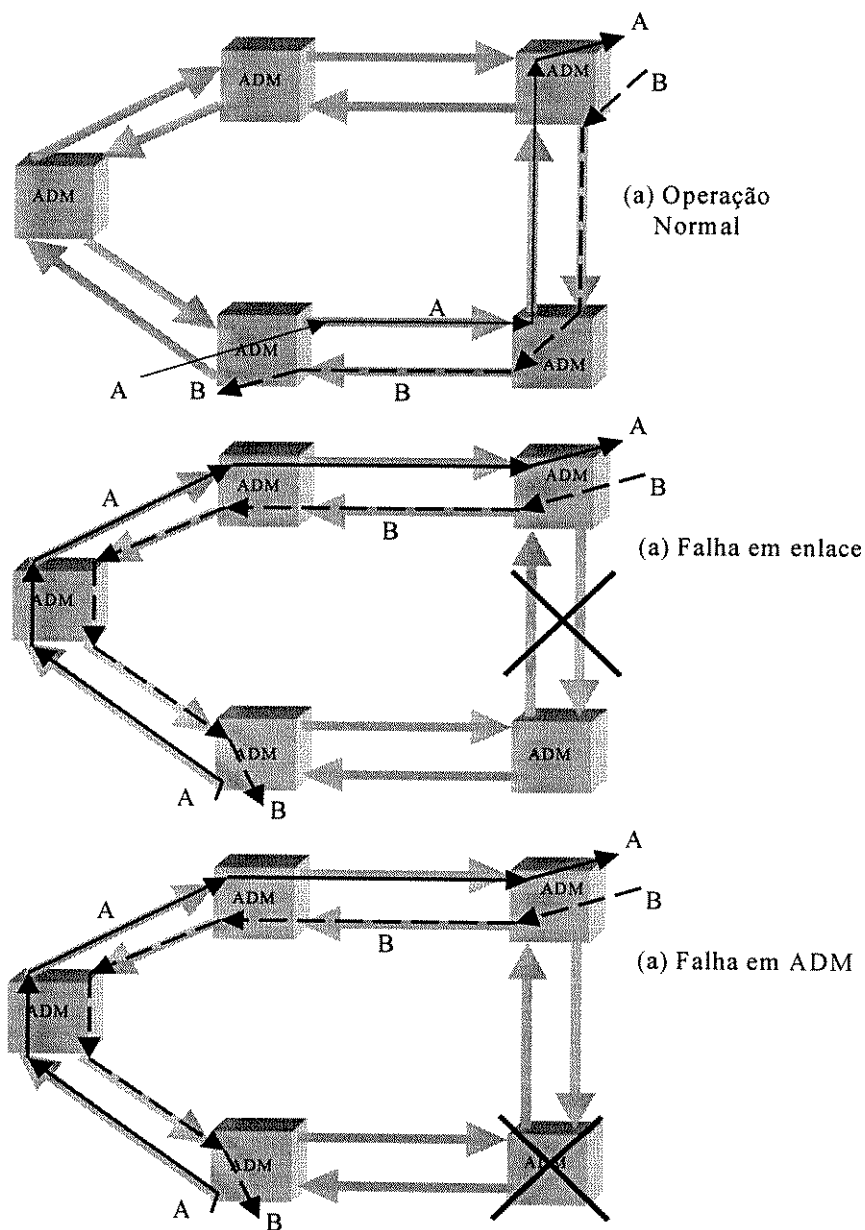


Figura 11: Anel Bidirecional.

No anel bidirecional a duas fibras a restrição está localizada no arco. A informação total transportada em cada arco deve ser menor ou igual à metade da capacidade do fluxo agregado, pois cada container só ocupa os arcos que ligam sua origem a seu destino.

Se neste anel a informação em cada nó for direcionada para o nó vizinho e somente ele, a informação total a ser transmitida pode chegar a $(m \times \text{fluxo agregado})/2$, onde m é o número de nós do anel. A capacidade deve, obviamente, diminuir à medida que o padrão de demanda de informação entre os nós se torne mais malhado. A capacidade ociosa deste tipo de anel pode ser utilizada para transmitir informação que pode ser descartada na eventualidade de uma falha.

O **anel bidirecional a quatro fibras** apresenta dois conjuntos transmissor/receptor em cada lado do ADM, leste e oeste, ligados a quatro fibras, um par de trabalho e o outro de proteção.

O anel a quatro fibras tem funcionamento semelhante ao do anel bidirecional a duas fibras, mas, agora, cada par de trabalho, em cada arco, pode usar todo o fluxo agregado para transporte de informação.

Este anel tem uma característica adicional, se um conjunto emissor/receptor apresenta defeito, o ADM comuta para o conjunto adicional, utilizando o par de fibra de proteção. Mas se o conjunto de fibras em um arco se rompe, o esquema de proteção é semelhante ao caso anterior. Se os dois pares de fibras entre cada par de nós forem roteados fisicamente pelo mesmo caminho, a confiabilidade deste anel é similar ao caso do anel a duas fibras. Mas se os caminhos forem disjuntos (roteamento disjunto), a confiabilidade cresce bastante.

Estudos de caso para várias situações típicas mostram que o anel unidirecional poderia ser mais conveniente para situações em que o padrão de demanda é caracterizado por uma forte concentração de demanda de todos os nós para um único nó, característica da rede de acesso. Os dois tipos de anéis bidirecionais seriam mais convenientes para situações em que a demanda é mais distribuída, característica do padrão de demanda de troncos entre centros de fios, portanto seriam anéis mais

adequados para a rede de transporte. Utilizar somente anéis unidirecionais na rede de acesso pode simplificar o modelamento matemático desta rede, levando a um modelo especializado e mais eficiente [Formigoni 95]. No modelo de otimização apresentado aqui os três tipos de anéis podem ser utilizados pela rede de transporte.

Outra arquitetura possível seria a do anel aberto ou **cadeia** (bus) (Figura 12), possível de ser utilizada em situações onde só se tem entre os nós da rede um único caminho de dutos para a disponibilização de fibras, contudo, mesmo aqui, talvez possa ser conveniente fechar o anel (flat ring), garantindo-se a rede contra falhas dos ADMs embora não contra cortes de fibras.

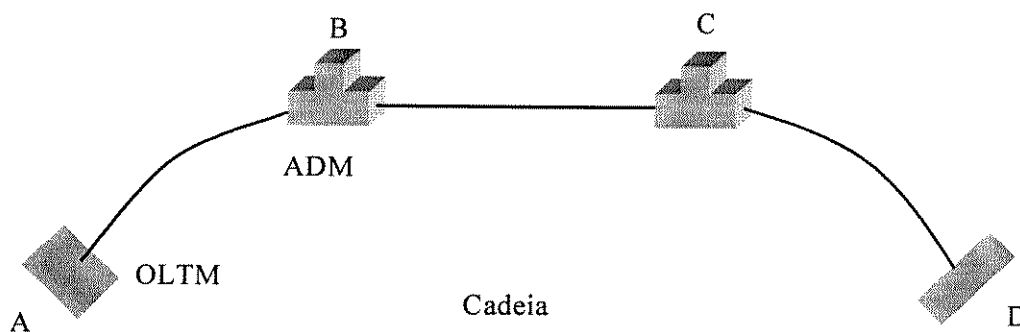


Figura 12: Cadeia.

CAPÍTULO 3. CONSIDERAÇÕES SOBRE O MODELAMENTO MATEMÁTICO

Este Capítulo apresenta alguns conceitos básicos visando facilitar o entendimento do próximo Capítulo (Modelo do Enfeixamento). São feitos comentários e explicações sobre conceitos matemáticos a respeito de Pesquisa Operacional, Escoamento Multiproduto e outros conceitos técnicos, como Clusterização e Hubeamento em Redes de Telecomunicações.

Toma-se a liberdade de chamar a atenção somente sobre os pontos de maior relevância para a montagem do modelo do Capítulo 4. Dispensa-se também tratamentos formais e apresentações rigorosas.

3.1. Pesquisa Operacional e Telecomunicações

Pesquisa Operacional (PO) é uma técnica que visa racionalizar a operação de processos, sobretudo no âmbito da engenharia, **otimizando** custos e promovendo a competição entre tecnologias alternativas, avançadas e conservadoras. Em particular, a pesquisa operacional é utilizada em telecomunicações, buscando, por exemplo, atender as necessidades descritas no Capítulo 2.

Esta técnica teve seus estudos iniciados na II Guerra Mundial para problemas estratégicos e táticos relacionados ao conflito [Phillips et alii 76]. Sua utilização foi além da guerra, crescendo dia a dia em virtude de necessidades emergentes em indústrias e empresas provedoras de serviços. Para esse fim, Universidades e Instituições de pesquisa estão gastando tempo e recursos financeiros de alta monta, desenvolvendo variantes desta técnica, das quais algumas são descritas neste capítulo.

Aplicando-se PO ao planejamento da Transmissão (Capítulo 2), almeja-se suprir a demanda de troncos em áreas distintas (regiões, cidades, estados ou até países), buscando uma configuração de rede que ajude os profissionais a trabalharem de maneira mais prática e eficaz e a custos atrativos.

3.2. Programação Linear Inteira Mista

Iniciaremos falando sobre o problema da Programação Matemática cuja descrição geral é dada por:

$$\begin{aligned} \text{Max } & f(x) \\ & x \in S \subseteq \mathbb{R}^n \end{aligned}$$

onde $f(x)$ é uma função de valores reais (**função objetivo**), definida no conjunto S (**conjunto das restrições**), e $\mathbb{R}^n$ é o conjunto de todos os vetores de números reais de dimensão n .

A partir daí, podemos definir um problema de **Programação Inteira**. Neste caso, o conjunto S é definido apenas para valores inteiros, valendo a relação:

$$S \subseteq \mathbb{Z}^n \subseteq \mathbb{R}^n$$

onde $\mathbb{Z}^n$ é o conjunto de todos os vetores de números inteiros de dimensão n .

Sendo mais abrangente, num problema de Programação Inteira Mista pelo menos um dos componentes de $x \in S$ deve ser inteiro.

Um problema de Programação Linear é aquele cuja função objetivo e as equações e inequações do conjunto de restrições S são lineares. Se um problema de Programação Inteira Mista tem estas condições de linearidade, ele é chamado de problema de **Programação Linear Inteira Mista (PLIM)**.

O modelo do Enfeixamento, a ser descrito no próximo capítulo é um exemplo de problema PLIM, onde a decisão a ser tomada está relacionada à utilização ou não de produtos em sua totalidade. Por exemplo, decisão sobre o número de equipamentos roteadores a serem instalados em um centro de fios (CF). Não faz sentido escolher um valor quebrado, como 2,7 equipamentos; mas sim valores inteiros, como 2 ou 3 equipamentos roteadores.

Problemas de PL, em geral, são de fácil resolução, podendo-se utilizar métodos como o “Simplex” [Bazaraa et alii 90] e “Pontos Interiores” [Bazaraa et alii 90], largamente apresentados na literatura. Estes métodos são rápidos, mesmo em problemas grandes, e de pronta implementação em virtude dos softwares de otimização existentes no mercado (CPLEX, OSL, LINDO, GAMS e outros). Programação linear inteira mista, por sua vez, necessita de métodos mais sofisticados: métodos enumerativos, como o “Branch-and-bound”; método de “Balas”; métodos de Decomposição ou Partição; métodos dos Planos de Corte; métodos de Busca por Vizinhança, como “Busca Tabu”, “Algoritmos Genéticos” ou “Simulated Annealing”.

O **branch-and-bound** [Nemhauser & Wolsey 88] é um método implementado nos principais softwares de otimização (os mesmos citados para PL). Apesar de eficiente, o tempo de processamento praticamente dobra para cada **variável inteira** acrescentada ao problema, afetando a performance mesmo em computadores de alta capacidade de processamento. Em geral trabalha com um máximo de 100 variáveis inteiras, que é pouco para muitos problemas reais. Alguns outros métodos, como o “simulated annealing” [Aarts & Laarhoven 87] e “método de balas” [Balas 65], podem ter uma implementação geral, i.e., não dependem de particularidades do modelo. Possivelmente diminuem o tempo de processamento, mas não há garantia de que isso venha a ocorrer em todos os casos. Por outro lado, os métodos “busca tabu” e “algoritmos genéticos” provavelmente são mais eficazes, mas requerem uma heurística particular para cada modelo.

Estas dificuldades de implementação motivam uma infinidade de trabalhos em universidades e instituições de pesquisa, apresentados em congressos e revistas científicas. No Brasil, anualmente se realiza um congresso específico em PO – SBPO – Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, promovido pela SOBRAPO – Sociedade

Brasileira de Pesquisa Operacional. Este congresso reúne profissionais renomados e estudantes de PO. Além deste, outros congressos e revistas, não específicos em PO, tem recebido trabalhos com contribuições a esta área de pesquisa. Podem ser citados SBA – Simpósio Brasileiro de Automática, SBT – Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, Revista Telebrás, entre outros.

3.3. Estrutura de Fluxo por Caminho

A rede de telecomunicações será modelada através de um grafo (N,A) onde os nós (N) representam CFs e os arcos (A) , os enlaces físicos. O problema de satisfazer uma matriz de demandas por troncos, essência do Planejamento da Transmissão, será encaixado como um problema de fluxo em redes.

Na formulação de problemas de fluxo em redes, pode-se adotar uma entre duas abordagens de modelamento equivalentes: **fluxo por arco** ou **fluxo por caminho e ciclo** [Magnanti et alii 93]. Por exemplo, o fluxo por arco mostrado na Figura 13a manda 7 unidades de fluxo do nó 1 para o nó 6. A Figura 13b mostra um fluxo por caminho e ciclo correspondente para este fluxo por arco: no fluxo por caminho e ciclo são mandadas 4 unidades através do caminho 1-2-4-6, 3 unidades através do caminho 1-3-5-6, e 2 unidades através do ciclo 2-4-5-2.

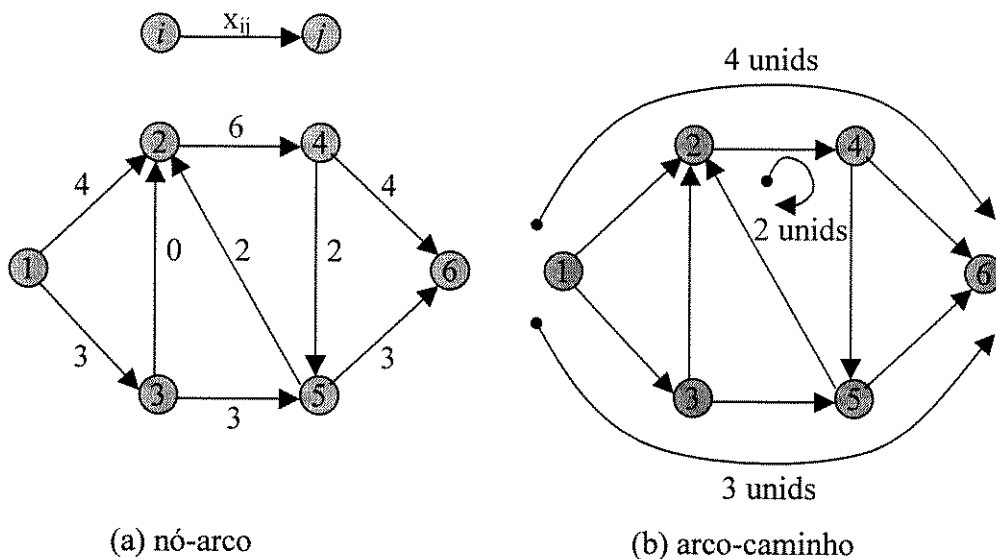


Figura 13: Duas maneiras de se expressar fluxo em uma rede.

Nesta discussão, “fluxo por arco” significa dizer um vetor $X = \{X_{ij}\}$ que satisfaz as seguintes restrições:

$$\sum_{\{j:(i,j) \in A\}} X_{ij} - \sum_{\{j:(j,i) \in A\}} X_{ji} = b(i) \quad \forall i \in N$$

$$0 \leq X_{ij} \leq u_{ij} \quad \forall (i,j) \in A$$

onde $\sum_{i=1}^n b(i) = 0$. O termo $b(i)$ representa o fluxo de saída menos o fluxo de entrada do nó i . No escopo da Transmissão, se o fluxo de saída é maior que o fluxo de entrada, $b(i) > 0$, dizemos que o nó i é a *origem* da demanda. Se o fluxo de entrada é menor que o fluxo de saída, $b(i) < 0$, dizemos que o nó i é *destino* da demanda. Se o fluxo de entrada é igual ao fluxo de saída, dizemos que o nó i é *nó de transbordo*.

Na formulação fluxo por arco, as variáveis de decisão básicas são fluxos X_{ij} nos arcos $(i,j) \in A$. A formulação fluxo por caminho e ciclo começa com uma enumeração de todos os caminhos direcionados P entre qualquer par de nós e todos os ciclos direcionados W da rede. $\mathbf{P}$ é definido como a coleção de todos os caminhos e $\mathbf{W}$ como a coleção de todos os ciclos. As variáveis de decisão na formulação por caminho são $f(P)$, o fluxo no caminho P , e $f(W)$, o fluxo no ciclo W ; definimos estas variáveis para todo caminho direcionado P em $\mathbf{P}$ e todo ciclo direcionado W em $\mathbf{W}$.

Nota-se que o conjunto de todos os fluxos por caminho e ciclo determina de forma única fluxos por arco numa forma natural: o fluxo X_{ij} no arco (i,j) é igual à soma dos fluxos $f(P)$ e $f(W)$ para todo o caminho P e ciclo W que contém este arco. Formalizamos esta observação pela definição de algumas novas notações: $\delta_{ij}(P)$ igual a 1 se o arco (i,j) está contido no caminho P ou igual a 0 no caso contrário, e similarmente para $\delta_{ij}(W)$ igual a 1 se o arco (i,j) está contido no ciclo W ou 0 no caso contrário. Então,

$$X_{ij} = \sum_{P \in \mathbf{P}} \delta_{ij}(P) \cdot f(P) + \sum_{W \in \mathbf{W}} \delta_{ij}(W) \cdot f(W)$$

A formulação fluxo por caminho e ciclo pode ser utilizada sem contemplar todos os caminhos ou ciclos possíveis na rede. Por este motivo, a formulação fluxo por arco pode gerar um número de variáveis e restrições no modelo maior do que na formulação fluxo por caminho e ciclo. Dado que o modelo do Enfeixamento gera um problema de

grande porte, e pelo fato da noção de caminho ser mais natural ao planejador, o trabalho aqui apresentado deu preferência a abordagem fluxo por caminho e ciclo. Na realidade, seria mais correto nos referirmos a abordagem “fluxo por caminho”, visto que no modelo do Enfeixamento não é razoável a utilização de ciclos. Nesse caso, a coleção dos ciclos W é um conjunto vazio.

Outro trabalho [Formigoni 95] onde é proposta a alocação de equipamentos para Rotas Estratégicas, contendo similaridades com o trabalho aqui apresentado, emprega a formulação fluxo por arco, alcançando excelentes resultados. Isto ocorre porque este problema contém k produtos, k origens, mas 1 único destino, simplificando de forma decisiva o modelamento do problema que passa a ser encarado como uni-produto.

3.4. Clusterização e Hubeamento

Este trabalho propõe um modelo de otimização para o dimensionamento de uma rede de telecomunicações a ser apresentado no Capítulo 4. É um PLIM com variáveis inteiras e reais:

As variáveis inteiras representam facilidades (*facilities*). As facilidades correspondem a estruturas técnicas, constituídas de equipamentos de transmissão e recepção, fibras ópticas, etc., que providenciam conexão (enlace) para sinais de telecomunicações entre CFs da rede. Em termos do modelo de grafo, as facilidades correspondem a arcos que são candidatos a tomarem parte na rede.

As variáveis reais são fluxos nos caminhos, os quais escoam demandas. Na realidade, o problema da Transmissão corresponde ao escoamento de múltiplos produtos (*commodities*). Cada produto é individualizado pelo par origem-destino e quantificado por um valor de demanda por canais de comunicação. Os caminhos são agrupados por produto; os caminhos de um mesmo produto tem em comum a mesma origem e o mesmo destino.

Seria possível montar a formulação para esse modelo, candidatando-se todas as facilidades cabíveis a essa rede, isto é, permitindo que todos os enlaces da rede

concorressem na busca da solução final. Seria possível também usar todos os caminhos que ligam cada par de centro de fios. Porém, apesar de realizável, essa formulação não é aconselhável. Ela gera um número excessivo de variáveis reais e principalmente inteiras, o que inviabiliza o processo de otimização. Também não aproveita as particularidades geográficas e de interesse de tráfego.

Facilidades candidatas com avaliação prévia muito desfavorável, devido a grande distância e pouca demanda entre origem e destino, devem ser eliminadas a priori, não participando do processo de competição, via otimização, travado pelos demais candidatos. Este procedimento de eliminação propicia um alívio no número de variáveis inteiras. O planejamento da transmissão objetiva também diminuir o número de equipamentos instalados facilitando o trabalho da operação. Certos caminhos nunca seriam utilizados, por passarem por diversos CFs, dificultando o controle da **sobrevivenciabilidade**. Caminhos “longos”, isto é, caminhos que ocupam muitos enlaces, tendem a esgotar a capacidade da rede, inviabilizando-a em caso de falha. Visando reprimir as dificuldades citadas, este modelo aproveita as particularidades da rede utilizando as idéias de **Clusterização e Hubeamento**.

Primeiramente é preciso imaginar uma rede com seus CFs todos desconectados (Figura 14a). Deseja-se fazer uma conexão lógica entre esses CFs de forma organizada, bem arranjada, e que facilite o trabalho do planejador.

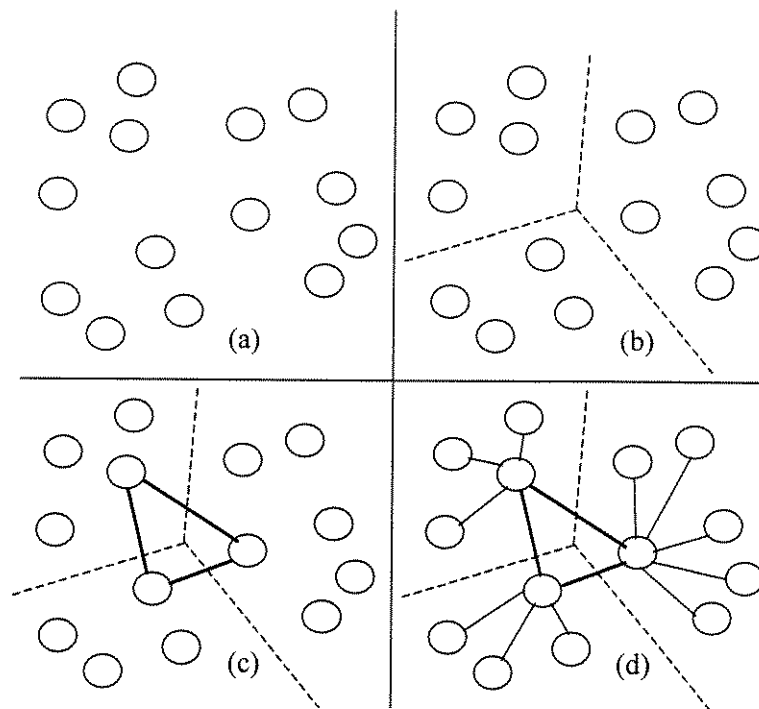


Figura 14: Clusterização passo a passo.

A clusterização, ou agrupamento, promove a divisão da rede em um pequeno número de “pedaços” (clusters). Esta divisão é orientada por aspectos de natureza similar entre os CFs da rede. Os dois aspectos mais importantes para decidir a clusterização são proximidade geográfica e interesse de tráfego. Na Figura 14b a rede aparece dividida em 3 clusters. Não é raro que o interesse de tráfego coincida com a proximidade geográfica entre os CFs, isto é, CFs próximos geograficamente tem maior interesse de tráfego.

Após dividir estes CFs em n clusters, deseja-se que estes clusters se comuniquem entre si. Primeiro será discutida a comunicação entre 2 clusters, que serão chamados “cluster 1” e “cluster 2”, para depois prosseguir com as demais conexões. É interessante que os clusters 1 e 2 tenham poucas conexões, no exemplo somente uma (Figura 14c). Entende-se por conexão, a possibilidade de 2 CFs se comunicarem. Essa conexão única deve ser feita através da ligação de um CF contido no cluster 1 com um CF do cluster 2. Após isso, são conectados todos os CFs do cluster 1 com o CF do mesmo cluster que se ligou ao cluster 2. Com isso, todos os CFs do cluster 1 poderão conversar entre si e também com os CFs do cluster 2. Se houver esse tipo de conexão entre os diversos clusters, como mostra a Figura 14d, todos os CFs dessa rede poderão conversar uns com

os outros. A escolha de um CF em cada cluster, que faz o papel de conector com os outros cluster da rede, foi denominada hubeamento.

O hubeamento elege um **hub**, o CF principal dentro de cada cluster. Para a escolha desse CF, deseja-se que ele tenha as demandas mais expressivas para os outros CFs do seu cluster e para muitos dos CFs dos outros clusters. Os CFs terão facilidades candidatas ligando-os ao hub do seu cluster e, por sua vez, cada hub terá facilidades candidatas ligando-o aos Hubs dos outros clusters, maximizando a demanda **intraclusters**, conforme a Figura 15. Essa formação cria o que chamamos de **backbone**, uma ligação mínima e organizada entre todos os CFs da rede.

Além das facilidades mencionadas, outras ligações ponto-a-ponto poderão ser candidatas conforme algum critério, como demanda alta entre CFs de clusters diferentes, ou CFs do mesmo cluster com exceção do hub; espera-se que tais casos apareçam com pouca frequência.

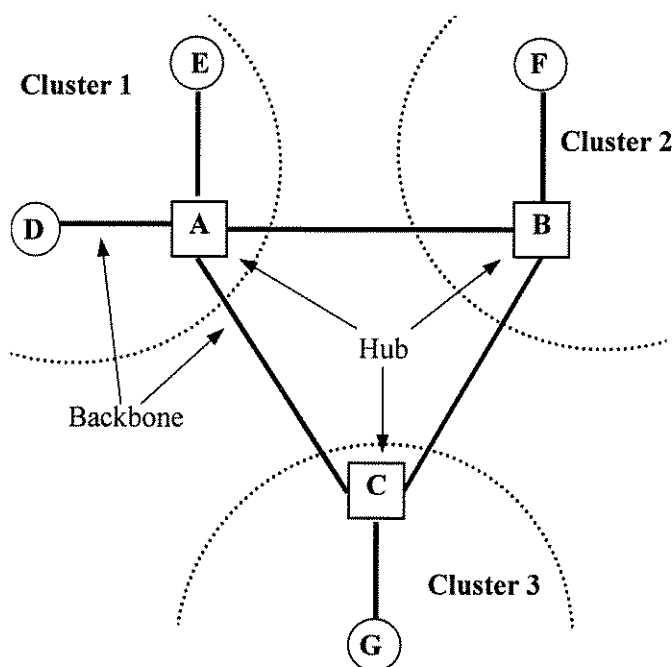


Figura 15: Clusterização, hubeamento e backbone da rede.

Neste ponto começa-se a perceber a importância da participação do planejador e das interfaces gráficas, para a boa performance do processo de otimização. Esta importância será acentuada pelo uso de Anéis e Cadeias. Explicando: além das

facilidades ponto-a-ponto é prático e, muitas vezes, econômico trabalhar com outras facilidades, chamadas anéis e cadeias, caracterizadas por estruturas topológicas mais complexas. O backbone auxilia o planejador a escolher as facilidades anéis e cadeias mais apropriadas. O modelo aproveita do planejador, de forma inteligente, a mescla do conhecimento prévio de detalhes técnicos da rede com o que é visto no desenho do backbone. Além disso, já estão sendo realizados estudos para automatização da proposta de anéis e cadeias.

Estas formas de candidatura de facilidades proporciona uma diminuição drástica do número de equipamentos candidatos, facilitando o processo de otimização. Também o número de caminhos escolhidos será reduzido, utilizando regras como as descritas no item 4.3.

CAPÍTULO 4. MODELO DO ENFEIXAMENTO

A rede de Telecomunicações é representada por um **grafo** (N,A) ; os nós do conjunto N correspondem aos centros de fios (CF), os arcos de A correspondem aos enlaces de Telecomunicações utilizáveis. Sobre esta rede devem ser roteadas demandas múltiplas; para tanto é necessária a disposição adequada (deployment) de equipamentos roteadores.

Este Capítulo é considerado o “coração” deste trabalho. Ele apresenta o modelo matemático criado para o planejamento da fase do Enfeixamento (item 2.3). É um modelo de fácil entendimento; ele será introduzido através de 6 exemplos, partindo da rede mais simples possível e, gradativamente, acrescentando elementos até que o modelo do Enfeixamento apresente-se de forma plena.

Tabela 1: Capacidades e custos para equipamentos de transmissão.

Equipamento	Capacidade (canais de 2 Mbps)	Custo (unidade monetária - \$)
OLTM 34 Mbps	16	6
OLTM 155 Mbps	63	14
ADM bidirecional 155 Mbps	63	25
ADM unidirecional 155 Mbps	63	22

Trata-se de um problema de Programação Linear Inteira Mista. Optamos pela abordagem arco-caminho para representar o escoamento das múltiplas demandas. A formulação sintética do problema é dada no Quadro 1.

A Tabela 1 apresenta os custos e capacidades dos equipamentos utilizados nos exemplos que vem a seguir.

DADOS

demandas entre os CFs

equipamentos: custos e capacidades por taxa de transmissão

agrupamento: clusterização e hubeamento

facilidades: ponto-a-ponto, anéis e cadeias candidatados

OBJETIVO

gerar uma topologia de rede que minimize os custos de equipamentos

SUJEITO A

satisfação da demanda através dos caminhos

A soma dos fluxos de canais nos caminhos que atendem a um par de CFs deve ser igual à demanda requerida por este par de CFs

restrições de capacidade das facilidades

A soma das capacidades das facilidades que ligam 2 CFs deve ser maior ou igual ao fluxo de canais dos caminhos que as utilizam

Quadro 1: Modelo Matemático para o Enfeixamento - Formulação Sintética.

4.1. Rede2

A rede inicial (Figura 16), que chamaremos de Rede2, contém 2 CFs (A e B); a demanda entre eles, anotada por **dAB**, é de 23 canais de 2 Mbps. A princípio o trabalho foi realizado apenas com equipamentos ponto a ponto e para esta configuração de rede tem-se as seguintes variáveis representando facilidades candidatas:

XAB34p – “uma” facilidade (letra “p”) ponto a ponto (X) candidata entre os CFs A e B na velocidade de transmissão de 34 Mbps (capacidade de 16 canais de 2 Mbps e custo de 12 unidades monetárias - \$). Ao final da otimização, esta variável toma o valor 1 quando é escolhida e o valor 0 no caso contrário;

XAB155p – “uma” facilidade (letra “p”) ponto a ponto candidata entre os CFs A e B na velocidade de 155 Mbps (capacidade de 63 canais de 2 Mbps e custo de 28 \$).

XAB155s - “duas” facilidades (letra “s”) ponto a ponto, representando um enlace candidato, entre os CFs A e B na velocidade de 155 Mbps (capacidade de 2x63 canais de 2 Mbps e custo de 56 \$);

Essa demanda única poderá percorrer apenas um caminho representado no modelo matemático pela variável real e positiva **YABd** - caminho direto entre os CFs A e B (Figura 16). Os custos adotados para as facilidades serão 12 \$, 28 \$ e 56\$ (custo do par de OLTMs, um, um e dois em cada ponta) para as facilidades de 34 e 155 e 155 Mbps respectivamente.

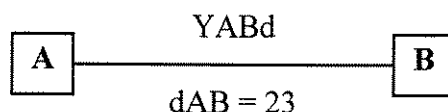


Figura 16: Configuração para 2 CFs (Rede2).

A configuração da Rede2 com suas facilidades candidatadas, gera a formulação matemática apresentada na Quadro 2, conforme o modelo do Quadro 1. A solução alcançada será: a variável XAB34p toma o valor 0, a variável XAB155p o valor 1, a variável XAB155s o valor 0 e a variável YABd o valor 23, com custo total de 28 \$. A facilidade escolhida foi XAB155p porque a facilidade de 34 Mbps não tem capacidade suficiente para sustentar a demanda pedida e XAB155s apresenta custo maior que XAB155p. Esta solução gerou a topologia de rede apresentada na Figura 17.

DADOS

Demandas $dAB = 23$

Capacidades/Taxa de transmissão 16 canais/34 Mbps,
63 canais/155 Mbps

Custos

OLTM 34 Mbps custo 6 \$

OLTM 155 Mbps custo 14 \$

Facilidades XAB34p = 0/1 com custo 12 \$

XAB155p = 0/1 com custo 28 \$

XAB155s = 0/1 com custo 56 \$

OBJETIVO

Minimizar $12 XAB34p + 28 XAB155p + 56 XAB155s$

SUJEITO A

Satisfação de demanda

$YABd = 23$

Restrições de capacidade

$16 XAB34p + 63 XAB155p + 126 XAB155s \geq YABd$

Quadro 2: Formulação Matemática para 2 CFs e 1 caminho (Rede2).

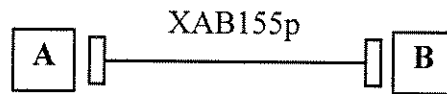


Figura 17: Topologia de rede resultante para 2 CFs (Rede2).

4.2. Rede3

A próxima rede é semelhante à Rede2, adicionando-se o CF C (Figura 18). Permanecem a demanda e as facilidades candidatas entre os CFs A e B e a candidatura somente de facilidades ponto a ponto. Acrescenta-se as demandas $d_{AC} = 40$ e $d_{BC} = 34$. Além das variáveis de facilidades utilizadas na Rede2 (XAB34p, XAB155p e XAB155s), temos novas variáveis representando as facilidades, que são:

XAC34p - “uma” facilidade (letra “p”) ponto a ponto candidata entre os CFs A e C na velocidade de 34 Mbps (capacidade de 16 canais de 2 Mbps e custo de 12 \$);

XAC34s - “duas” facilidades (letra “s”) ponto a ponto, representando um enlace candidato, entre os CFs A e C na velocidade de 34 Mbps (capacidade de 2x16 canais de 2 Mbps e custo de 24 \$);

XAC155p - “uma” facilidade (letra “p”) ponto a ponto candidata entre os CFs A e C na velocidade de 155 Mbps (capacidade de 63 canais de 2 Mbps e custo de 28 \$);

XBC34p, XBC34s, XBC155p, - respectivamente uma, duas, uma, facilidades ponto a ponto candidatas entre os CFs B e C nas velocidades de 34, 34, 155 Mbps.

Cada demanda passará a ter, neste caso, dois caminhos possíveis. Para d_{AB} há o caminho **YABd** – o sinal utiliza apenas a facilidade que liga os CFs A e B, e **YABq** – o sinal passa primeiro pelo CF C antes de chegar ao seu destino, isto é, parte de A em direção a C, parte de C e chega em B, utilizando as facilidades instaladas que ligam

A – C, e C – B (Figura 18a); para a demanda dAC tem-se, de maneira similar, os caminhos **YACd** e **YACq**; e para dBC tem-se **YBCd** e **YBCq** (Figura 18b).

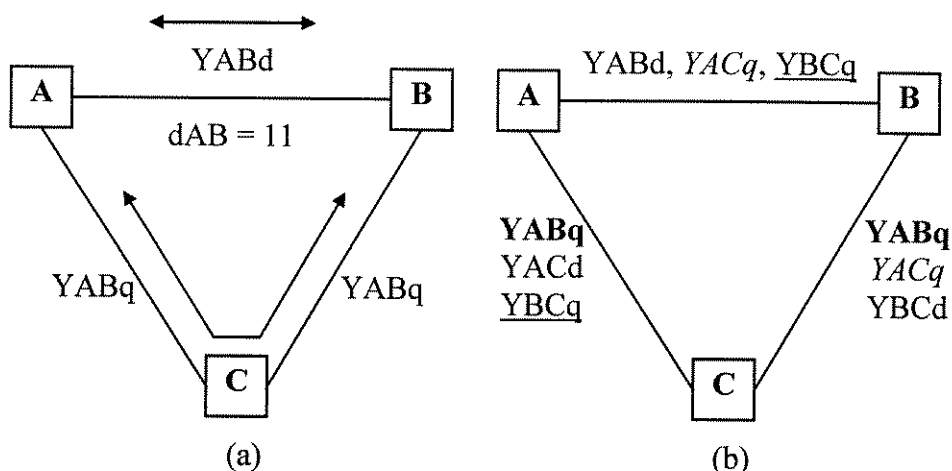


Figura 18: Configuração para 3 CFs (Rede3).

O Quadro 3 apresenta a formulação matemática para a Rede3.

A melhor solução para este caso, isto é, a mais barata é: $XAC155p = 1$ e $XBC155p = 1$, com as outras variáveis de facilidades todas iguais a zero. Quanto às variáveis de caminhos temos: $YBCd = 34$, $YACd = 40$, $YABq = 23$ e as restantes iguais a zero. O custo total foi de 56 \$. Esta solução gerou a topologia de rede apresentada na Figura 19.

Alguns fatos interessantes ocorreram: (a) dois CFs (A e B), apesar de não estarem ligados diretamente por uma facilidade, tiveram a demanda entre si supridas; (b) da mesma forma que na situação anterior, é justificável a candidatura de facilidades com capacidade menor que a demanda pedida, pois parte dessa demanda pode ser escoada através de outros arcos; (c) começa-se a perceber a importância dos caminhos na otimização do Enfeixamento, onde a falta dos mesmos poderia comprometer os resultados; (d) uma facilidade pode ter sua folga bastante diminuída pela necessidade de atender a demandas de pares de CFs diferentes dos CFs correspondentes às suas extremidades.

DADOS

Demandas $d_{AB} = 23$, $d_{AC} = 40$ e $d_{BC} = 34$

Capacidades/Taxa de transmissão 16 canais/34 Mbps,
63 canais/155 Mbps

Custos

OLTM 34 Mbps custo 6 \$

OLTM 155 Mbps custo 14 \$

Facilidades X_{AB34p} , X_{AC34p} , $X_{BC34p} = 0/1$ com custo 12 \$

X_{AC34s} , $X_{BC34s} = 0/1$ com custo 24 \$

X_{AB155p} , X_{AC155p} , $X_{BC155p} = 0/1$ com custo 28 \$

$X_{AB155s} = 0/1$ com custo 56 \$

OBJETIVO

Minimizar $12 X_{AB34p} + 28 X_{AB155p} + 56 X_{AB155s}$
 $+ 12 X_{AC34p} + 24 X_{AC34s} + 28 X_{AC155p}$
 $+ 12 X_{BC34p} + 24 X_{BC34s} + 28 X_{BC155p}$

SUJEITO A

Satisfação de demanda

$$Y_{ABd} + Y_{ABq} = 23$$

$$Y_{ACd} + Y_{ACq} = 40$$

$$Y_{BCd} + Y_{BCq} = 34$$

Restrições de capacidade

$$16 X_{AB34p} + 63 X_{AB155p} + 126 X_{AB155s} \geq Y_{ABd} + Y_{ACq} + Y_{BCq}$$

$$16 X_{AC34p} + 32 X_{AC34s} + 63 X_{AC155p} \geq Y_{ABq} + Y_{ACd} + Y_{BCq}$$

$$16 X_{BC34p} + 32 X_{BC34s} + 63 X_{BC155p} \geq Y_{ABq} + Y_{ACq} + Y_{BCd}$$

Quadro 3: Formulação Matemática para 3 CFs e 6 caminhos (Rede3).

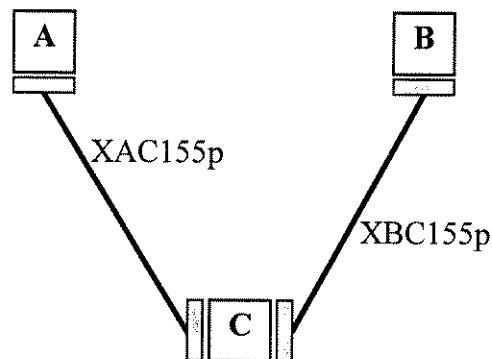


Figura 19: Topologia de rede resultante para 3 CFs (Rede3).

4.3. Rede7

Damos um salto agora para a Rede7, uma rede de 7 CFs (A, B, C, D, E, F e G), com demanda total de 229 canais de 2 Mbps. Continuaremos utilizando apenas facilidades ponto a ponto. A seguir temos a lista das demandas de troncos entre cada par de CFs desta rede, apresentada em forma de matriz de demanda:

	A	B	C	D	E	F	G
A	—	23	40	25	11	5	4
B		—	34	7	5	14	4
C			—	4	2	4	25
D				—	9	2	6
E					—	5	0
F						—	0
G							—

Neste caso foram estipuladas algumas regras para a escolha das facilidades candidatas entre cada par de CFs:

Todos os pares de CFs com demanda maior que 2 terão um enlace de 34 Mbps como candidato, acreditando que as demandas de 2 ou menos canais consideradas “pequenas”, terão a possibilidade de serem escoadas através de outros arcos que não o direto;

Todos os pares de CFs com demanda maior que 8 também terão a facilidade relacionada a dois enlaces de 34 Mbps como candidata;

Todos os pares de CFs com demanda maior que 12 também terão um enlace de 155 Mbps como candidato;

Todos os pares de CFs com demanda maior que 32 também terão a facilidade relacionada a dois enlaces de 155 Mbps como candidata;

Assim a lista das variáveis das facilidades candidatas é a seguinte:

XAB34p, XAB34s, XAB155p, XAC34p, XAC34s, XAC155p, XAC155s, XAD34p, XAD34s, XAD155p, XAE34p, XAE34s, XAF34p, XAG34p, XBC34p, XBC34s, XBC155p, XBC155s, XBD34p, XBE34p, XBF34p, XBF34s, XBF155p, XBG34p, XCD34p, XCF34p, XCG34p, XCG34s, XCG155p, XDE34p, XDE34s, XDG34p, XEF34p.

As regras em questão tem apenas caráter didático. As regras utilizadas nos resultados práticos deste trabalho (Capítulo 6), usam algo mais complicado como as demandas acumuladas.

A Rede7 foi dividida em três clusters conforme a Figura 20: os CFs A, D e E formam o cluster 1 com hub em A (os CFs D e E tem demanda “alta” somente para A, e este, por sua vez, tem uma demanda razoável para todos os CFs da rede), os CFs B e F formam o cluster 2 com hub em B e os CFs C e G o cluster 3 hubeado em C.

Esta situação exemplifica o que acontece na prática, onde é comum a divisão de uma região em áreas. Cada área contém um número de CFs. Todo CF de uma área idealmente tem interesse de tráfego maior para com os outros CFs dessa mesma área. Uma área também tem um CF que concentra a sua demanda para com as outras, geralmente sendo escolhido como hub.

A Figura 20 também sugere o **backbone** da rede (item 3.4). Antes de ocorrer o processamento da otimização do problema, é possível suspeitar, com grande probabilidade, que as facilidades escolhidas serão as facilidades que contêm o backbone além de um ou outro arco. Em redes mais complexas, esta situação sugere a **exclusão** de algumas facilidades candidatas. As facilidades excluídas a princípio escoariam demandas de pequeno valor. Tais demandas provavelmente seriam atendidas pelo backbone. Isto é bom para a economia do número de variáveis inteiras (binárias) do problema e consequente aceleração em termos de tempo de processamento.

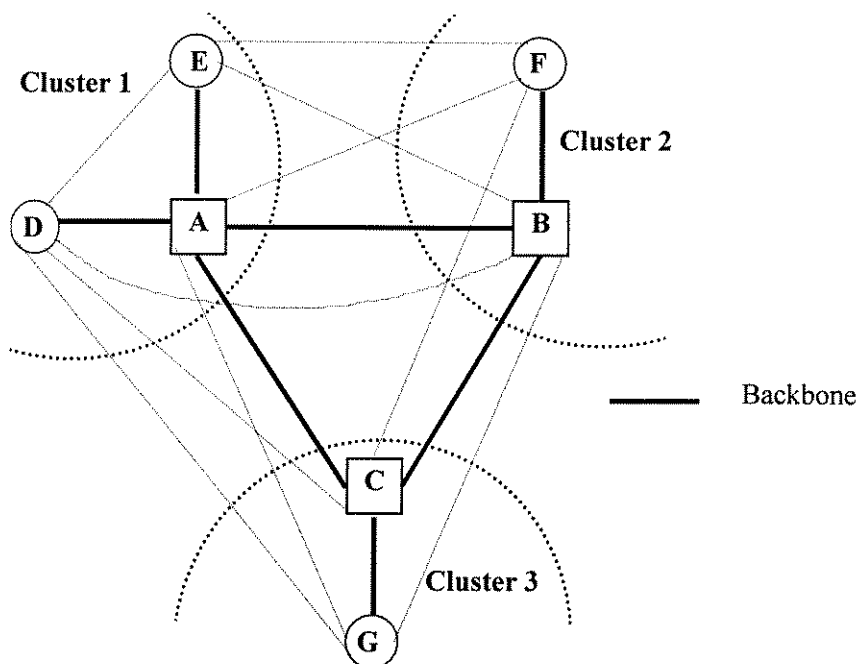


Figura 20: Configuração para 7 CFs (Rede7).

O Anexo 1 apresenta a formulação matemática baseada no Quadro 1. O Quadro 4, uma síntese do Anexo 1, mostra a clusterização adotada. Através da clusterização são escolhidos os caminhos para o escoamento de demanda. Conhecidos os caminhos e os candidatos, procede-se à montagem do modelo.

DADOS	
	Demandas
	Custos e capacidades
	Facilidades
	<u>Agrupamento</u>
	<u>cluster 1: A, D, E com hub A</u>
	<u>cluster 2: B, F com hub B</u>
	<u>cluster 3: C, G com hub C</u>
OBJETIVO	
	Minimizar custos de equipamento
SUJEITO A	
	Satisfação de demanda
	Restrições de capacidade

Quadro 4: Formulação Matemática para 7 CFs (Rede7 – pedaço do Anexo 1).

Nem todos os caminhos possíveis entrarão no problema, a fim de não carregar a formulação matemática; tenta-se privilegiar os caminhos que se utilizam do backbone. Por exemplo, na Figura 20 nota-se que é possível criar um caminho de D para F

passando pelos arcos D–G, G–B e B–F, por outro lado é previsível que não serão escolhidas as facilidades candidatas dos arcos G–D ou G–B, devendo a demanda de D para F passar pelo backbone, porque é bastante pequena ($DF = 2$). Assim o caminho D–G–B–F não foi criado como possível escoadouro da demanda $d_{DF}=2$; este tipo de simplificação é a principal razão para a escolha da abordagem arco-caminho em vez da abordagem nó-arco.

Buscando evitar caminhos como o citado acima, são utilizados os caminhos direto, por 1 hub ou por 2 hubs. Por exemplo, para a demanda d_{EF} teremos como possibilidade os caminhos: (i) direto – YEFd; (ii) pelo hub de E – YEFh, passando pelos arcos E–A e A–F; (iii) pelo hub de F – YFEh, passando pelos arcos E–B e B–F; e (iv) pelos dois hubs – YEFb, passando pelos E–A, A–B e B–F (Figura 21). É importante notar que os caminhos YEFh e YFEh são distintos, pois passam por hubs diferentes. Assinala-se também que o caminho YEFb repousa totalmente sobre o backbone do sistema.

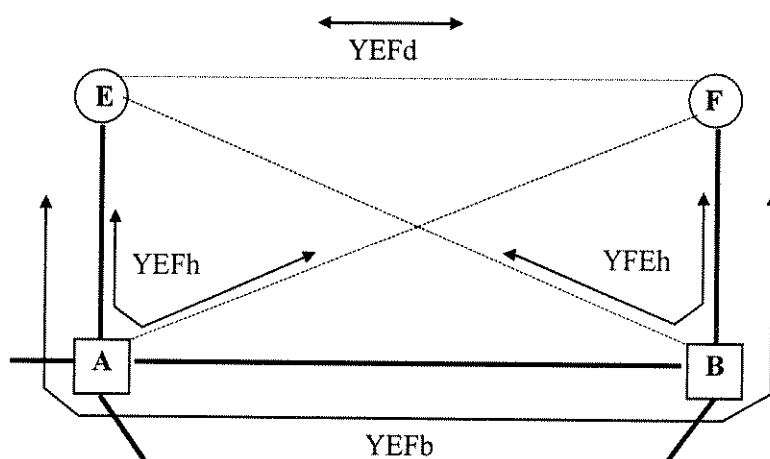


Figura 21: Possibilidade de Caminhos para a Demanda d_{EF} (Rede7).

A solução encontrada após otimização é apresentada na Figura 22 com os seguintes resultados:

Custo total: 188 \$

Facilidades escolhidas

XAB155p, XAC155p, XBC155p, XBF34s XCG155p
XAD155p, XAE34s

Caminhos utilizados

YABd = 23	YBCd = 34	YDCh = 4	YDEh = 9
YACd = 40	YDBh = 7	YECd = 2	YDFb = 2
YADD = 25	YEBh = 5	YFCh = 4	YDGB = 6
YAEb = 11	YBFd = 14	YCGd = 25	YEFb = 5
YFAh = 5	YGBh = 4		
YGAh = 4			

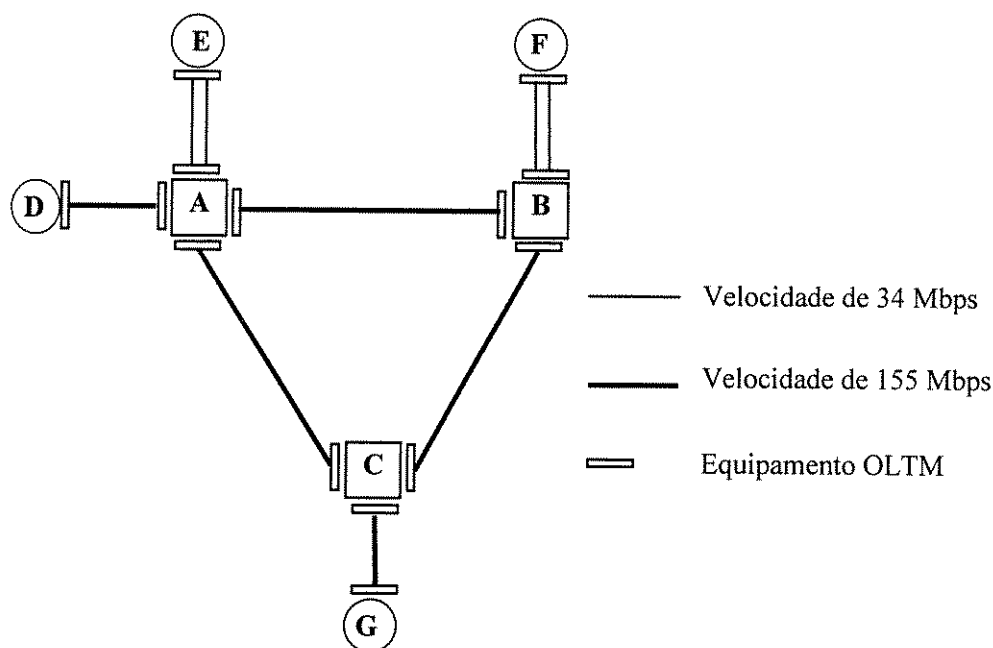


Figura 22: Topologia de rede resultante para 7 CFs (Rede7).

4.4. Rede3 com Anel Bidirecional – Rede3AnelBi

A nova rede a analisar – Rede3AnelBi - é semelhante à Rede3: as demandas, facilidades candidatas ponto-a-ponto e caminhos são os mesmos. A única diferença aparece por conta da inclusão de um anel bidirecional como facilidade candidata. O custo de cada ADM, neste caso, é de 25 \$ para as velocidades 155 Mbps (não há equipamento ADM para 34 Mbps). Esse anel tem as seguintes características:

ZABC155p - Uma facilidade anel bidirecional ligando os CFs A, B e C através dos arcos A–B, B–C e C–A, com velocidade de transmissão de 155 Mbps e custo de 75 \$ (três ADMs bidirecionais a 25 \$ cada).

ZABC155s - Duas facilidades anel bidirecional ligando os CFs A, B e C através dos arcos A–B, B–C e C–A, com velocidade de transmissão de 155 Mbps e custo de 150 \$ (três ADMs bidirecionais a 25 \$, em cada facilidade).

A formulação matemática sofre algumas modificações: (a) acréscimo de variáveis na Função Objetivo; (b) introdução da equação de capacidade do anel ZABC nas restrições de capacidade; e (c) toda restrição de capacidade cujo arco participa do anel ZABC, recebe a variável de capacidade desse anel no lado esquerdo da inequação (Quadro 5).

A solução mais barata para este caso é a mesma mostrada para a Rede3 (Figura 19). O intuito da Rede3Anel é basicamente mostrar as alterações na formulação matemática quando há a introdução de anéis bidirecionais.

Vale ressaltar que as modificações para a introdução de cadeia como facilidade candidata são as mesmas que para anel bidirecional. Neste caso a cadeia funciona como um anel bidirecional com um de seus arcos aberto (capacidade zero).

DADOS

Demandas $d_{AB} = 23$, $d_{AC} = 40$ e $d_{BC} = 34$

Capacidades/Taxa de transmissão 16 canais/34 Mbps,
63 canais/155 Mbps

Custos

OLTM 34 Mbps custo 6 \$

OLTM 155 Mbps custo 14 \$

ADM Bidirecional 155 Mbps custo 25 \$

Facilidades X_{AB34p} , X_{AC34p} , $X_{BC34p} = 0/1$ com custo 12 \$

X_{AC34s} , $X_{BC34s} = 0/1$ com custo 24 \$

X_{AB155p} , X_{AC155p} , $X_{BC155p} = 0/1$ com custo 28 \$

$X_{AB155s} = 0/1$ com custo 56 \$

Anéis Bidirecionais

$Z_{ABC155p} = 0/1$ com custo 75 \$

$Z_{ABC155s} = 0/1$ com custo 150 \$

OBJETIVO

Minimizar $12 X_{AB34p} + 28 X_{AB155p} + 56 X_{AB155s}$
 $+ 12 X_{AC34p} + 24 X_{AC34s} + 28 X_{AC155p}$
 $+ 12 X_{BC34p} + 24 X_{BC34s} + 28 X_{BC155p}$
 $+ 75 Z_{ABC155p} + 150 Z_{ABC155s}$

SUJEITO A

Satisfação de demanda

$Y_{ABd} + Y_{ABq} = 23$

$Y_{ACd} + Y_{ACq} = 40$

$Y_{BCd} + Y_{BCq} = 34$

Restrições de capacidade

$63 Z_{ABC155p} + 126 Z_{ABC155s} = CAPZABC$

$CAPZABC + 16 X_{AB34p} + 63 X_{AB155p} + 126 X_{AB155s} \geq Y_{ABd} + Y_{ACq} + Y_{BCq}$

$CAPZABC + 16 X_{AC34p} + 32 X_{AC34s} + 63 X_{AC155p} \geq Y_{ABq} + Y_{ACd} + Y_{BCq}$

$CAPZABC + 16 X_{BC34p} + 32 X_{BC34s} + 63 X_{BC155p} \geq Y_{ABq} + Y_{ACq} + Y_{BCd}$

Quadro 5: Formulação Matemática para 3 CFs com Anel Bidirecional (Rede3AnelBi).

4.5. Rede3 com Anel Unidirecional – Rede3AnelUni

Na Rede3AnelUni foi aproveitada a mesma rede que a Rede3AnelBi, mudando apenas o anel do tipo bidirecional para unidirecional. Neste caso, essa mudança não altera o resultado da otimização, mas altera a formulação matemática, conforme o Quadro 6. O custo adotado para um ADM unidirecional a 155 Mbps foi de 22 \$.

Para anéis unidirecionais, como cada caminho que utiliza o anel ocupa todos os arcos do mesmo (item 2.6), foi criada uma restrição de capacidade específica, onde a capacidade do anel deve ser maior que a soma dos caminhos que se utilizam dele. Os caminhos para anel unidirecional devem ser igualmente diferenciados dos demais caminhos.

DADOS

Demandas $d_{AB} = 23$, $d_{AC} = 40$ e $d_{BC} = 34$

Capacidades/Taxa de transmissão 16 canais/34 Mbps,
63 canais/155 Mbps

Custos

OLTM 34 Mbps custo 6 \$

OLTM 155 Mbps custo 14 \$

ADM Unidirecional 155 Mbps custo 22 \$

Facilidades X_{AB34p} , X_{AC34p} , $X_{BC34p} = 0/1$ com custo 12 \$

X_{AC34s} , $X_{BC34s} = 0/1$ com custo 24 \$

X_{AB155p} , X_{AC155p} , $X_{BC155p} = 0/1$ com custo 28 \$

$X_{AB155s} = 0/1$ com custo 56 \$

Anéis Unidirecionais

$U_{ABC155p} = 0/1$ com custo 66 \$

$U_{ABC155s} = 0/1$ com custo 132 \$

OBJETIVO

Minimizar $12 X_{AB34p} + 28 X_{AB155p} + 56 X_{AB155s}$
 $+ 12 X_{AC34p} + 24 X_{AC34s} + 28 X_{AC155p}$
 $+ 12 X_{BC34p} + 24 X_{BC34s} + 28 X_{BC155p}$
 $+ 66 U_{ABC155p} + 132 U_{ABC155s}$

SUJEITO A

Satisfação de demanda

$Y_{ABd} + Y_{ABq} + Y_{ABu} = 23$

$Y_{ACd} + Y_{ACq} + Y_{ACu} = 40$

$Y_{BCd} + Y_{BCq} + Y_{BCu} = 34$

Restrições de capacidade

$Y_{ABu} + Y_{ACu} + Y_{BCu} = \text{TOTUABC}$

$63 U_{ABC155p} + 126 U_{ABC155s} = \text{CAPUABC}$

$\text{CAPUABC} \geq \text{TOTUABC}$

$16 X_{AB34p} + 63 X_{AB155p} + 126 X_{AB155s} \geq Y_{ABd} + Y_{ACq} + Y_{BCq}$

$16 X_{AC34p} + 32 X_{AC34s} + 63 X_{AC155p} \geq Y_{ABq} + Y_{ACd} + Y_{BCq}$

$16 X_{BC34p} + 32 X_{BC34s} + 63 X_{BC155p} \geq Y_{ABq} + Y_{ACq} + Y_{BCd}$

**Quadro 6: Formulação Matemática para 3 CFs com Anel Unidirecional
(Rede3AnelUni).**

4.6. Rede7 com Anel e Cadeia – Rede7Anel

Neste item será usada uma rede com todos os tipos de facilidades candidatas permitidas neste trabalho. Esta rede é semelhante à Rede7, onde serão candidatadas as facilidades ponto a ponto mencionadas, algumas facilidades anel bidirecional, anel unidirecional e cadeia (Figura 23), além de montar alguns caminhos que utilizam estas facilidades. As demandas e as facilidades ponto-a-ponto permanecerão as mesmas que para a Rede7. As facilidades anel bidirecional e unidirecional das redes Rede3AnelBi (ZABC155p e ZABC155s) e Rede3AnelUni (UABC155p e UABC155s) também serão candidatadas.

As novas facilidades são:

ZABFE155p - Uma facilidade anel bidirecional ligando os CFs A, B, F e E através dos arcos A–B, B–F, F–E e E–A, com velocidade de transmissão de 155 Mbps e custo de 100 \$ (4 ADMs bidirecionais a 25 \$ cada).

WDACG155p - Uma facilidade cadeia ligando os CFs D, A, C e G através dos arcos D–A, A–C e C–G, com velocidade de transmissão de 155 Mbps e custo de 78 \$ (dois ADMs bidirecionais a 25 \$ cada e dois OLTMs a 28 \$ o par).

WBCG155p - Uma facilidade cadeia ligando os CFs B, C e G através dos arcos B–C e C–G, com velocidade de transmissão de 155 Mbps e custo de 53 \$ (um ADM bidirecional a 25 \$ e dois OLTMs a 28 \$ o par).

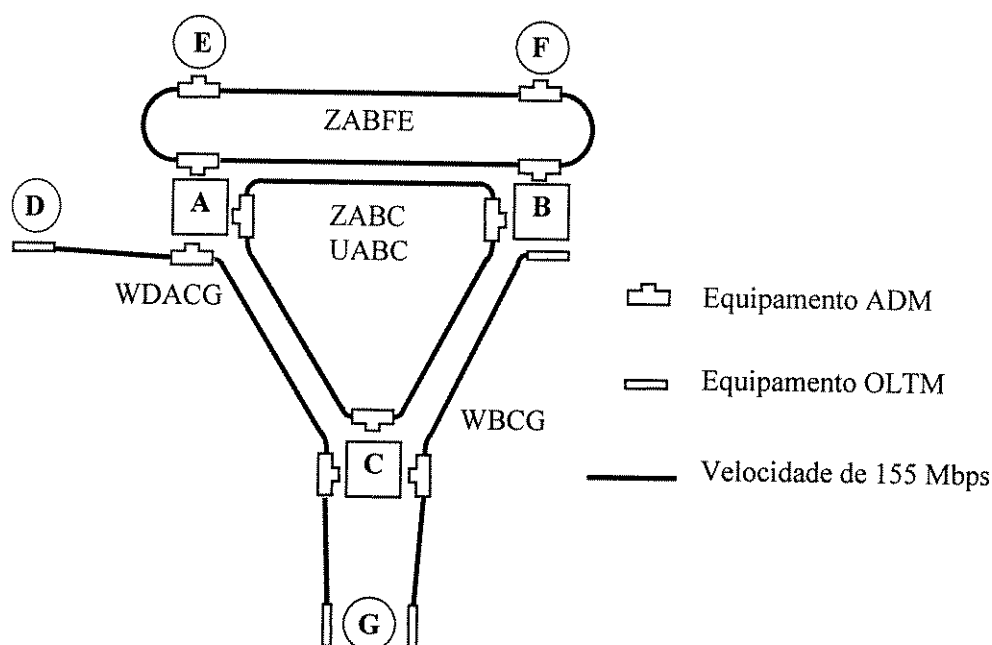


Figura 23: Facilidades Anel e Cadeia Candidatas (Rede7Anel).

A formulação matemática para esta rede é apresentada no Anexo 2. O resultado da otimização aparece na Figura 24. Este resultado, chamado “Solução 7.1”, obteve um custo total de 178 \$, com as facilidades escolhidas

XAB34s	XAF34p	XCF34p
XAE34s	XBC155p	WDACG155p

e os caminhos utilizados

YABd = 18	YBCd = 34	YDCh = 4	YDEh = 9
YAB1 = 5	YDBh = 7	YECd = 2	YDFh = 2
YACd = 40	YEBh = 5	YCFd = 4	YDGB = 6
YADd = 25	YBF1 = 2	YCGd = 25	YEFh = 5
YAEh = 11	YBF2 = 12		
YAFd = 5	YGBh = 4		
YGAh = 4			

A formulação matemática do Anexo 2 contém caminhos diretos, passando por hub e passando por backbone (item 4.3); além disso, apresenta caminhos que se aproveitam das facilidades anel bidirecional, anel unidirecional e cadeia. As regras para montagem destes caminhos não serão apresentadas neste trabalho, mas serão descritos os trajetos dos caminhos utilizados nas soluções apresentadas.

Lembramos que um caminho que se aproveita das facilidades anel bidirecional e cadeia pode ser utilizado mesmo que o respectivo anel ou cadeia não esteja no elenco

das facilidades escolhidas, mas exige que existam enlaces escolhidos em todo o percurso deste caminho. Esse fato não vale para os caminhos unidirecionais, isto é, um caminho por anel unidirecional só pode ser usado caso o respectivo anel seja escolhido.

A Solução 7.1 contém os caminhos YAB1, YBF1 e YBF2 que se aproveitam das facilidades anel e cadeia. O caminho YAB1 é compreendido pelas seções A–C e C–B; YBF1 pelas seções B–A e A–F; YBF2 pelas seções B–C e C–F.

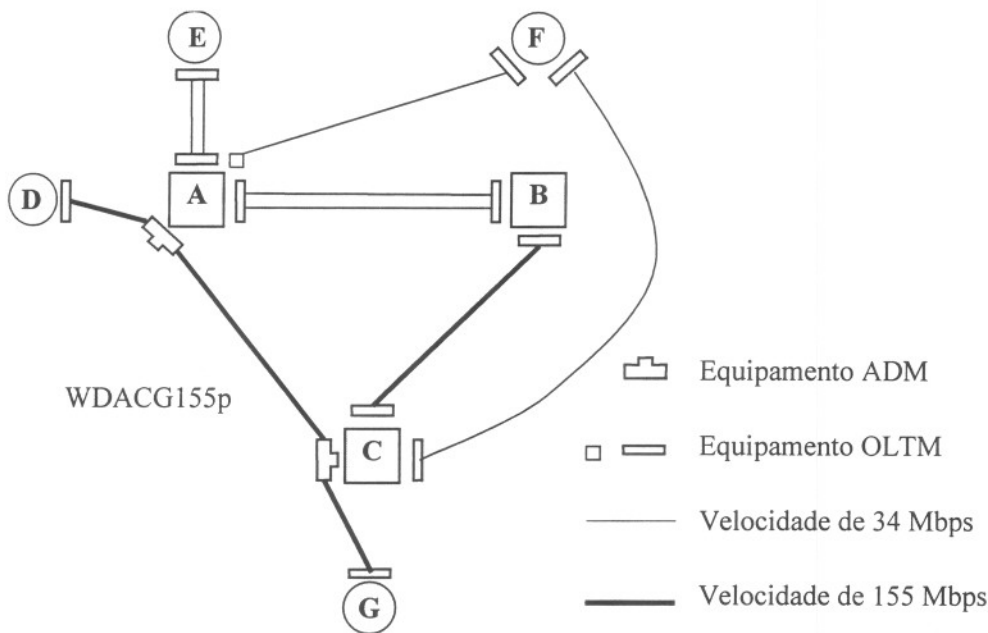


Figura 24: Topologia de rede resultante para Rede7Anel. Solução 7.1.

Em busca de uma solução melhor comportada, foram retiradas do grupo de candidatas as facilidades XAF34p, XAG34p, XBE34p, XBG34p, XCD34p, XCF34p, XEF34p, que são as facilidades motivadas por demandas menores ou igual a 5. Como resultado temos a Figura 25.

Esta nova solução, denominada “Solução 7.2”, obteve custo total de 179 \$, com as facilidades escolhidas

XAD155p	XBF34s	ZABC155p
XAE34s	XCG155p	
e os caminhos utilizados		
YABd = 23	YBCd = 34	YDCh = 4
YACd = 40	YDBh = 7	YDEh = 9
YADD = 25	YEBh = 5	YDFb = 2
		YDGb = 6

YAE_d = 11
YFA_h = 5
YGA_h = 4

YBF_d = 14
YGB_h = 4

YCG_d = 25

YEF_b = 5

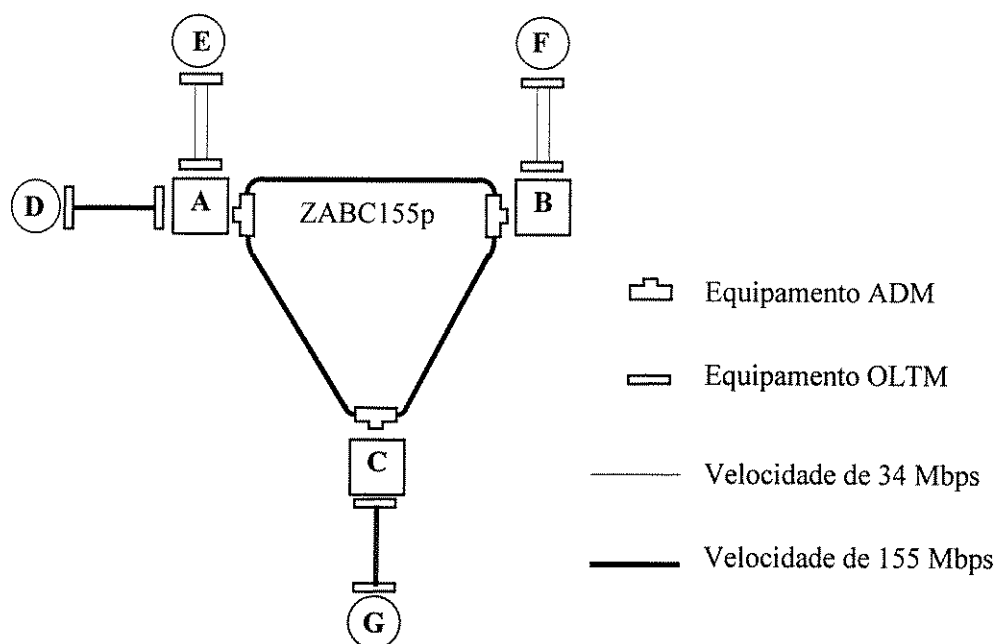


Figura 25: Topologia de rede “melhorada” para Rede7Anel. Solução 7.2.

A formulação matemática apresentada no Anexo 2 contém variáveis auxiliares nas restrições de capacidade, representando: (a) totalidade de canais de 2 Mbps utilizados em cada arco (ABT, ACT, BDT, etc.); e (b) totalidade de canais de 2 Mbps não utilizados, mostrando a folga existente em cada arco (folgaABT, folgaACT, folgaBDT, etc.).

Através das folgas nos arcos é possível fazer ajustes na topologia da rede otimizada. Nem sempre a topologia de rede mais barata é a mais interessante. Por exemplo, é possível substituir as facilidades XAD155p e XAE34s, da Solução 7.2, por uma nova facilidade, no formato de cadeia, que liga os CFs D, A e E através dos arcos D–A e A–E, com velocidade de transmissão de 155 Mbps e custo de 53 \$ (um ADM bidirecional com custo 25 \$ e dois OLTM a 28 \$ o par). Esta topologia, apresentada na Figura 26, será chamada “Solução 7.3”.

O custo de equipamentos nesse trecho da rede, se comparado com a Solução 7.2, cresceu de 52 \$ (um equipamento de 155 Mbps – custo 28 \$, e dois de 34 Mbps – custo 12 \$ cada) para 53 \$, mas a capacidade nestes arcos subiu de 95 canais de 2 Mbps

Tabela 2: Resultados para as soluções da rede 7.

Resultado	Custo (\$)	Capacid.*	Folga*	OLTMs		ADMs
				34 Mbps	155 Mbps	155 Mbps
Solução 7.1	178	348	50	12	4	2
Solução 7.2	179	379	80	8	4	3
Solução 7.3	180	410	111	4	4	4

* em canais de 2 Mbps.

Tabela 3: Comparações da Solução 7.1 com outras soluções.

Resultado	Custo (\$)	Capacidade	Folga	Nº equipamentos
Solução 7.2	0,6%	9%	60%	-17%
Solução 7.3	1,1%	18%	122%	-33%

Vale salientar que tanto a Solução 7.2 quanto a Solução 7.3 cobrem todo o backbone proposto para essa rede, o que não ocorre com a Solução 7.1, que é uma solução mais malhada. Esse fato indica que as novas soluções são mais simples, e fortalece a idéia de que são melhor gerenciáveis.

A Solução 7.3 é a melhor dentre as 3, pois, com exceção do custo, ela mostrou os melhores resultados dentre os parâmetros mencionados.

4.7. Softwares

O emprego de modelos matemáticos é uma forma de racionalizar a tomada de decisão na fase do enfeixamento. A construção manual das equações matemáticas deste modelo é uma tarefa muito penosa, dado o número elevado tanto de equações como de termos nas equações, mesmo para as redes mais simples. Além disso, o planejador, durante o processo de análise, frequentemente deseja fazer alterações, como a inclusão de uma facilidade, inclusão de caminhos ou modificação no custo ou na forma de um anel. Estas modificações requerem alterações nas equações, que além de serem

demoradas, comumente geram erros que poderiam estragar o esforço de dias ou até meses. Por isto é necessária a automatização do processo que cria essas equações.

Este trabalho foi motivado pelo intuito de montar uma ferramenta para o auxílio no planejamento da transmissão em redes da TELESP, através de um convênio desta empresa com a FEE/UNICAMP. Com esta finalidade foi montado um programa, detalhado a seguir.

O programa é dividido em quatro partes principais (Figura 27):

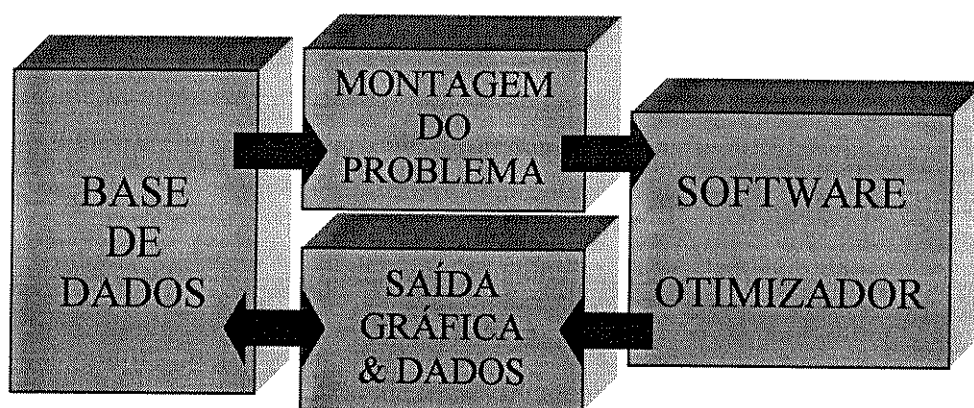


Figura 27: Ferramenta de auxílio ao planejamento da transmissão.

Manipulação da base de dados – os dados necessários à fase do Enfeixamento são basicamente: (a) descrição dos centros de fios: nome e localização geográfica; (b) demanda dos troncos entre cada par (i, j) de CFs; (c) organização da rede: clusterização e hubeamento; (d) elenco de equipamentos roteadores utilizáveis, explicitando características funcionais mais importantes e custos. Esses dados são preparados para manipulação nas partes “montagem do problema” e “saída gráfica & dados”.

Montagem do problema – montagem das equações e inequações do problema, permitindo ao usuário escolher as facilidades candidatas e as regras para montagem de caminhos. Esta etapa cria um PLIM a ser executado no “software otimizador” utilizando informações da “base de dados”.

Software otimizador – esta etapa processa o branch-and-bound através de um software comercial, com o arquivo vindo da “montagem do problema”. Gera uma

listagem que alimenta a “saída gráfica & dados”, com os equipamentos que formam a configuração mais barata para a rede e os caminhos utilizados. Cada software comercial apresenta opções variadas de manipulação para o branch-and-bound.

Saída gráfica & dados – constitui um recurso gráfico para visualização da rede gerada pelo “software otimizador” com os CFs dispostos de acordo com a geografia da região da rede. Não são necessários conhecimentos matemáticos especiais por parte do planejador. Esta fase completa a base de dados preparando informações para outras fases de planejamento (Arranjo e Dimensionamento da Rede de Transmissão e Evolução). Há algumas facilidades nesta parte do programa como: zoom; informações sobre os CFs, equipamentos e caminhos; edição.

CAPÍTULO 5. TÉCNICAS HEURÍSTICAS

A PO é uma técnica comprovadamente eficiente em atividades de planejamento e alcança resultados animadores especialmente no planejamento do Enfeixamento da Transmissão em Telecomunicações. Contudo a sua performance pode ser prejudicada, quando trabalha com redes grandes, que a princípio requerem um número considerável de variáveis inteiras para resolução do problema.

Esta performance pode também sofrer com a limitação dos computadores utilizados. Quantidade de memória e o clock da máquina são os principais fatores limitantes neste tipo de serviço. Porém, nos últimos anos esses equipamentos tem se tornado cada vez mais rápidos e baratos, permitindo sempre um avanço na utilização da técnica mencionada. Mas, apesar destes avanços, este problema terá sempre um caráter combinatorial. O número de nós da árvore de branch-and-bound é calculado pela fórmula $2^{n+1}-1$, onde n representa o número de variáveis inteiras do problema. Isso quer dizer que a cada variável inteira acrescentada ao problema, o tempo de processamento pode dobrar. Um número de variáveis inteiras relativamente pequeno, algo em torno de 200 a 300, provoca uma **explosão combinatorial**, utilizando-se os equipamentos disponíveis nos dias de hoje.

Este problema pode ser contornado de diversas maneiras sem necessitar de heurísticas sofisticadas, como as citadas no Capítulo 3 deste trabalho. Passamos a descrever algumas maneiras que se mostraram eficientes no decorrer do trabalho.

5.1. Linearização de Variáveis

A primeira tentativa de melhoria da performance do modelo consiste da relaxação de algumas variáveis inteiras do problema, transformando-as em variáveis reais. Isto é

tero com as variáveis referentes às facilidades de menor capacidade do problema (em geral 34 Mbps e até 155 Mbps conforme a situação). Este processo diminui consideravelmente o número de variáveis inteiras, consequentemente diminuindo o tempo de processamento. Após a resolução no pacote otimizador, as variáveis linearizadas que ficaram com valor diferente de “zero”, são ajustadas para o valor “um” sendo feito ajuste também no custo final da solução. Esta solução gera resultados satisfatórios com perdas não significativas, ou pelo menos gera uma boa solução que servirá como ponto de partida numa otimização posterior em busca de melhorias.

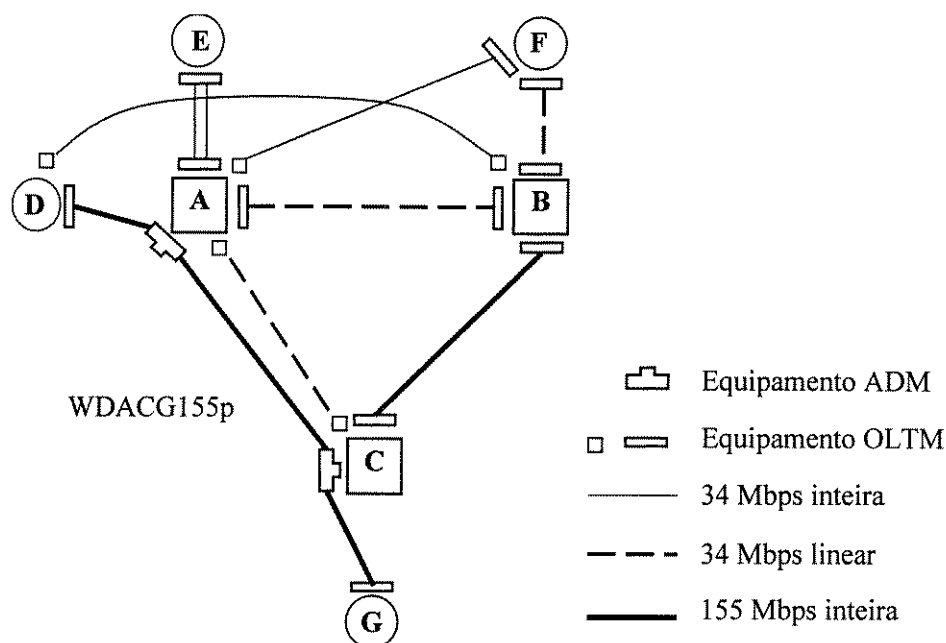


Figura 28: Topologia de rede resultante para Rede7Anel. Solução linear.

Como exemplo, será aplicada esta idéia à rede 7. Serão linearizadas as variáveis referentes às facilidades ponto-a-ponto, de hierarquia 34 Mbps, 1 enlace, que participam do backbone da rede. São elas, XAB34p, XAC34p, XAD34p, XAE34p, XBC34p, XBF34p e XCG34p, que passam a ser, XAB34p_linear, XAC34p_linear, XAD34p_linear, XAE34p_linear, XBC34p_linear, XBF34p_linear e XCG34p_linear. A solução aparece na Figura 28.

A solução encontrada, que chamaremos de “Solução linear”, apresentou como resultado um custo de 176,5 \$. Este valor é um **Lower Bound** para o problema, pois toda solução factível tem valor maior ou igual a este.

Além das variáveis inteiras escolhidas (XAE34s, XAF34p, XBC155p, XBD34p, WDAC_155p), tivemos 3 facilidades que entraram com valores reais (XAB34p_linear = 0.875, XAC34p_linear = 0.125, XBF34p_linear = 0.875). Isto significa que a facilidade XAB34p_linear entrou para satisfazer uma demanda de 2 canais, XAC34p_linear 14 canais e XBF34p_linear 14 canais.

Lógico que não podemos instalar somente um pedaço de uma facilidade, portanto os custos dessas facilidades lineares que entraram na solução devem ser ajustados, e o custo total passa a ser 190 \$. Este valor é um **Upper Bound** para o problema, pois a solução ótima tem valor menor ou igual a este.

Este processo deu origem a um **método heurístico** denominado RODAUT, assunto principal da tese de mestrado de Marco Antônio Bergamaschi [Bergamaschi 96], e que sucintamente passamos a explicar. O método consiste da otimização do problema em várias fases. Na fase inicial, as variáveis referentes às facilidades são linearizadas. Nas fases seguintes estas variáveis mudam sua forma, conforme os seus comportamentos na solução da última fase realizada. Elas mudam a forma: (a) sendo **fixadas** no valor “um”, se frequentemente assumiram valores próximos a um nas fases anteriores; (b) fixadas no valor “zero” quando assumiram valores próximos a zero; (c) permanecendo linearizadas se assumirem valores intermediários; e (d) tornando-se variáveis **livres** (inteira binária) um certo número das variáveis mais expressivas (maior capacidade e custo) do problema. Este processo é repetido até que uma solução inteira factível seja encontrada.

Este processo se mostrou bastante rápido em relação ao tempo de processamento, com soluções a custos animadores quando se trata de problemas de grande porte. Resultados podem ser analisados na tese mencionada neste item.

5.2. Número de Grãos

Antes de explicar a idéia de número de grãos, vamos entender o que é um SOS – Special Ordered Set – controle apresentado no pacote OSL e que define restrições no conjunto das variáveis inteiras do problema.

Selecione um CF da rede, arbitrário, e considere todas as facilidades ponto-a-ponto incidentes a ele. Suponha que as variáveis X_1 , X_2 , X_3 , X_4 e X_5 representem estas facilidades; elas tem em comum um de seus extremos, localizados no CF selecionado. Cada facilidade com custo e capacidade próprias. Supomos de antemão que apenas uma, ou nenhuma dessas facilidades será a escolhida para satisfazer a demanda que passa por esse ponto. Portanto é interessante criar uma restrição (restrição de SOS) da forma:

$$X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 \leq 1$$

Isso representa uma diminuição considerável no número de nós da árvore de branch-and-bound. Nesse caso, o processo de otimização explora apenas 6 possibilidades ($n+1$, onde $n = n^o$ de variáveis) para cada nó da árvore. Não havendo essa restrição, o número de explorações dá um salto para 32 (2^n). O conjunto dessas variáveis é chamado um SOS e um problema real pode ter muitos desses conjuntos.

Suponha agora que os coeficientes da restrição de SOS sejam as capacidades de cada um de seus termos (c_1 , c_2 , c_3 , c_4 e c_5), e que o valor do lado direito da inequação seja o máximo da demanda (*demax*) que poderia passar pelo CF central, teríamos então:

$$c_1 X_1 + c_2 X_2 + c_3 X_3 + c_4 X_4 + c_5 X_5 \leq demax.$$

Sabemos também que existe uma parcela de *demax*, que obrigatoriamente deve passar por esse CF central. Esse novo termo será adicionado à nossa restrição com a denominação *demin*.

$$demin \leq c_1 X_1 + c_2 X_2 + c_3 X_3 + c_4 X_4 + c_5 X_5 \leq demax.$$

Esta inequação é muito semelhante a uma restrição de número de grãos. Neste caso, foi necessário criar um artifício a partir da idéia de **grão**, onde cada grão significa uma capacidade de 16 canais de 2 Mbps. Cada hierarquia de equipamentos comporta um certo n^o de grãos conforme a Tabela 4.

Tabela 4: Tipo/capacidade/n.º de grãos” por hierarquia.

Taxa de bits (Mbps)	34	34	155	155	622	622	2500	2500
Tipo	1p	1s	2p	2s	3p	3s	4p	4s
Capacidade (canais)	16	32	63	126	252	504	1008	2016
“n.º de grãos”	1	2	4	8	16	32	64	128

A idéia é adicionar ao modelo original tantas restrições de “número de grãos” quantos forem os números de CFs da rede em estudo. Para facilidade de exposição apresentaremos a forma de montar estas restrições através de um exemplo. Na Figura 29, apresentamos as demandas (d) entre os CFs A, B, ...,F e o CF H. O nó H é o CF comum entre todas estas demandas.

Entre os nós A e H, a demanda $d = 90$, que é igual a $5,625 \times 16$, precisamos então de uma capacidade equivalente a 6 sistemas de 16 Mbps ou 6 grãos, para transportar a demanda entre A e H. Através deste procedimento obtemos o n.º de grãos entre todos os outros CFs e o CF comum H; o número total mínimo de grãos que devem então passar por H é 12. A este número chamaremos “Mínimo de Grãos(H)”, e é mínimo porque pode haver outras demandas, além daquelas apresentadas na Figura 29, que podem utilizar H como nó de passagem. Entre os CFs A, B, ...F e o CF H existem equipamentos candidatos a interligarem estes nós, representados pelas variáveis:

A – H: XAH1p, XAH1s, XAH2p, XAH2s

B – H: XBH1p, XBH1s

C – H: XCH1p

D – H: XDH1p

E – H: XEH1p

F – H: XFH1p

O limite superior desta restrição, chamado “Máximo de Grãos(H)”, não deve ser tão restritivo que venha a prejudicar o resultado da otimização; a

Tabela 5 corresponde a valores heurísticos estabelecidos a partir de experiências.

Tabela 5: “Máximo de grãos” em função do “Mínimo de grãos”.

min. de grãos = m	$0 < m < 3$	$4 < m < 7$	$8 < m < 15$	$16 < m < 19$	$20 < m < 23$	...
max. De grãos	4	8	16	20	24	...

Logo a restrição de n.º de grãos para o nó H (Figura 29) fica:

$$12 \leq XAH1p + 2 XAH1s + 4 XAH2p + 8 XAH2s + XBH1p + 2 XBH1s \\ + XCH1p + XDH1p + XE1p + XF1p \leq 16$$

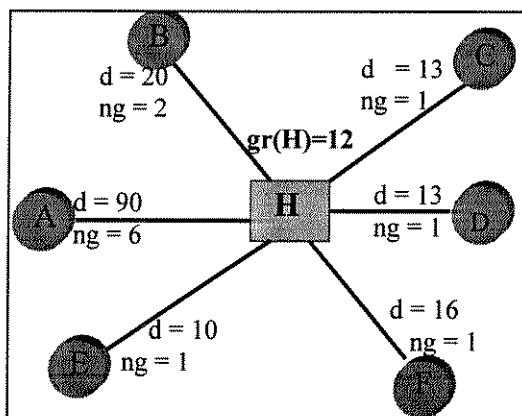


Figura 29: Incidência de grãos para um CF denominado H.

Se o CF em questão não é um HUB, a possibilidade de seus arcos servirem como meio passante é pequena e podemos atribuir valores ao “máximo de grãos” bem próximos ao “mínimo de grãos”, diminuindo sensivelmente o n.º de nós explorados da árvore de “branch-and-bound”. Dessa forma, o “n.º de grãos” funciona de maneira semelhante às rotinas “SOS” do OSL [OSL 91] ou outros aplicativos semelhantes.

Caso o CF seja HUB, os arcos incidentes a esse CF devem, com frequência, servir como meios de passagem de demandas destinadas a outros nós, o que leva o “máximo de grãos” a um valor alto, bem maior que o mínimo. Dessa maneira não há ganho apreciável na rotina do “branch-and-bound”.

A natureza heurística do procedimento recomenda o uso de pós-otimização. Quando o resultado da otimização nos leva a um valor de “n.º de grãos” igual ao máximo de grãos daquele CF, devemos aumentar o máximo de grãos desse CF e proceder nova otimização.

Esta heurística se mostrou eficaz quando as facilidades candidatadas foram apenas ponto-a-ponto. Neste caso, os nós não hub representam “nós fonte” ou “nós sumidouro”, ao passo que os nós hub representam “nós de transbordo”; a heurística não funciona bem para os “nós de transbordo”, que aparecem aqui em pequeno número.

Ao contrário, no caso da candidatura de anéis e cadeias, todos os nós dos anéis e os nós internos das cadeias (os que tem equipamentos ADM) funcionam como “nós de transbordo”, semelhantes aos nós hub. Assim sendo, o ganho de tempo não é expressivo, não justificando a adoção desta heurística.

5.3 Manipulação na Árvore de Branch-and-bound

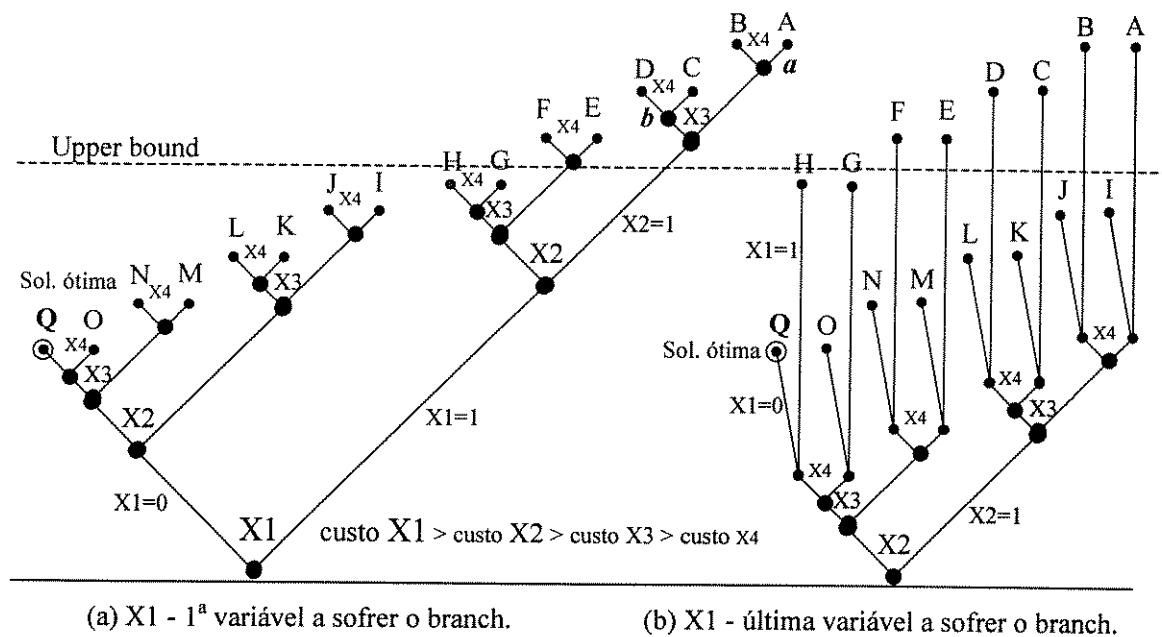
Esta forma de controle requer a manipulação de parâmetros do algoritmo branch-and-bound no pacote otimizador (OSL ou CPLEX, por exemplo) [OSL 91] [CPLEX 89], e/ou controle da escolha dos nós em que serão feitos os cortes na árvore de branch-and-bound.

Como exemplo de controle de escolha dos nós, vale a pena comentar a **ordenação**, pelo custo, das variáveis que sofrerão o “branch” de ramificação da árvore. É interessante que as variáveis com maior custo sofram o branch primeiro. Isto deve forçar com que o upper bound do problema seja alcançado mais rapidamente, diminuindo o número de nós a serem pesquisados na árvore.

No exemplo da Figura 30a, temos uma árvore com 31 nós. A busca é feita em profundidade explorando primeiro a variável X_1 ; em seguida X_2 , X_3 e X_4 . Caso a solução ótima estivesse no nó **Q**, onde $X_1 = X_2 = X_3 = X_4 = 0$, pelo menos 8 nós da rede não seriam explorados, a saber **a**, **A**, **B**, **b**, **C**, **D**, **E**, **F**, por serem ramificações de nós com valor acima de um upper bound conhecido previamente. Para a Figura 30b, a busca é feita em profundidade explorando primeiro a variável X_2 ; em seguida X_3 e X_4 , deixando X_1 como última variável a sofrer o branch. Assim sendo, nenhum nó deixaria de ser explorado pela limitação do upper bound.

Vale lembrar que, à medida que são encontradas novas soluções factíveis, o upper bound tende a melhorar. É interessante a utilização deste artifício quando já se tem idéia

aproximada da solução a ser alcançada antes do processamento do branch-and-bound. No modelo do Enfeixamento é comum o planejador ter uma previsão da solução a ser alcançada, sendo interessante a utilização deste artifício.



CAPÍTULO 6. ESTUDO DE CASOS

O modelo do Enfeixamento foi aplicado a 4 cidades brasileiras (Santos, Belo Horizonte, Campinas e São Paulo) e mais o Litoral Sul do Estado de São Paulo. São mostrados, neste capítulo, alguns resultados destes estudos realizados.

Os dados básicos para os equipamentos são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6: Equipamentos, custos e capacidades.

Equipamento	Capacidade (canais de 2 Mbps)	Custo (unidade monetária - \$)
OLTM 34 Mbps	16	11
OLTM 155 Mbps	63	30
OLTM 622 Mbps	252	60
ADM bidirecional 155 Mbps	63	50
ADM bidirecional 622 Mbps	252	90
ADM unidirecional 155 Mbps	63	35
ADM unidirecional 622 Mbps	252	65

A nomenclatura dos caminhos apresentada nas formulações matemáticas é diferente da utilizada no Capítulo 4. O número de caminhos necessários para satisfação da demanda cresce consideravelmente à medida que aumenta o número de CFs e o número de facilidades. Além disso, como já foi mencionado, o programa que monta a formulação matemática para o Enfeixamento se utiliza de regras de montagem de caminhos não explicadas neste trabalho. A descrição destas regras encontra-se em [Bortolon 96].

O processamento da otimização (Cplex) foi realizado em uma SPARC 10 com 64 Mbytes de memória RAM. Também foi necessário um PC pentium de 100 Mhertz e 32 Mbytes de memória RAM para montagem da formulação matemática e saída gráfica das soluções de rede (item 4.7). Os programas utilizados no PC foram desenvolvidos na linguagem C++. Os casos apresentados (Santos, Belo Horizonte e Campinas) são considerados de pequeno porte, por esse motivo os tempos de processamento foram inexpressivos (5 a 30 segundos em média).

6.1. Santos

Os dados da rede de Santos foram fornecidos pelo grupo de Planejamento de Transmissão da TELESP. Esta rede, com uma demanda total de 743 canais de 2 Mbps, consiste de 8 CFs, denominados:

WL, JM, PP, TO, PT, AB, FB, VC.

A matriz de demanda entre pares de CFs é dada por

	WL	JM	PP	TO	PT	AB	FB	VC	Total
WL	—	74	96	94	100	138	17	106	625
JM		—	12	13	8	28	3	4	68
PP			—	15	10	4	16	5	50
TO				—	0	0	0	0	0
PT					—	0	0	0	0
AB						—	0	0	0
FB							—	0	0
VC								—	0
Total	0	74	108	122	118	170	36	115	743
Acum.	625	142	158	122	118	170	36	115	

A clusterização adotada foi:

Cluster 1: WL, TO, PT, AB e FB, hubeado em WL.

Cluster 2: JM, VC, hubeado em JM.

Cluster 3: PP, hubeado em PP.

As facilidades candidatas são descritas a seguir e apresentadas na Figura 31 e na Figura 32.

Tipo	Facilidades	CFs (em ordem)
Anel bidirecional	ZB1_155p, ZB1_622p	VC, JM, WL, PT, AB
	ZB2_155p, ZB2_622p	JM, WL, PP
Cadeia	WA1_155p, WA1_622p	VC, JM, WL, PT, AB
Anel unidirecional	UB1_155p, UB1_622p	JM, WL, PP

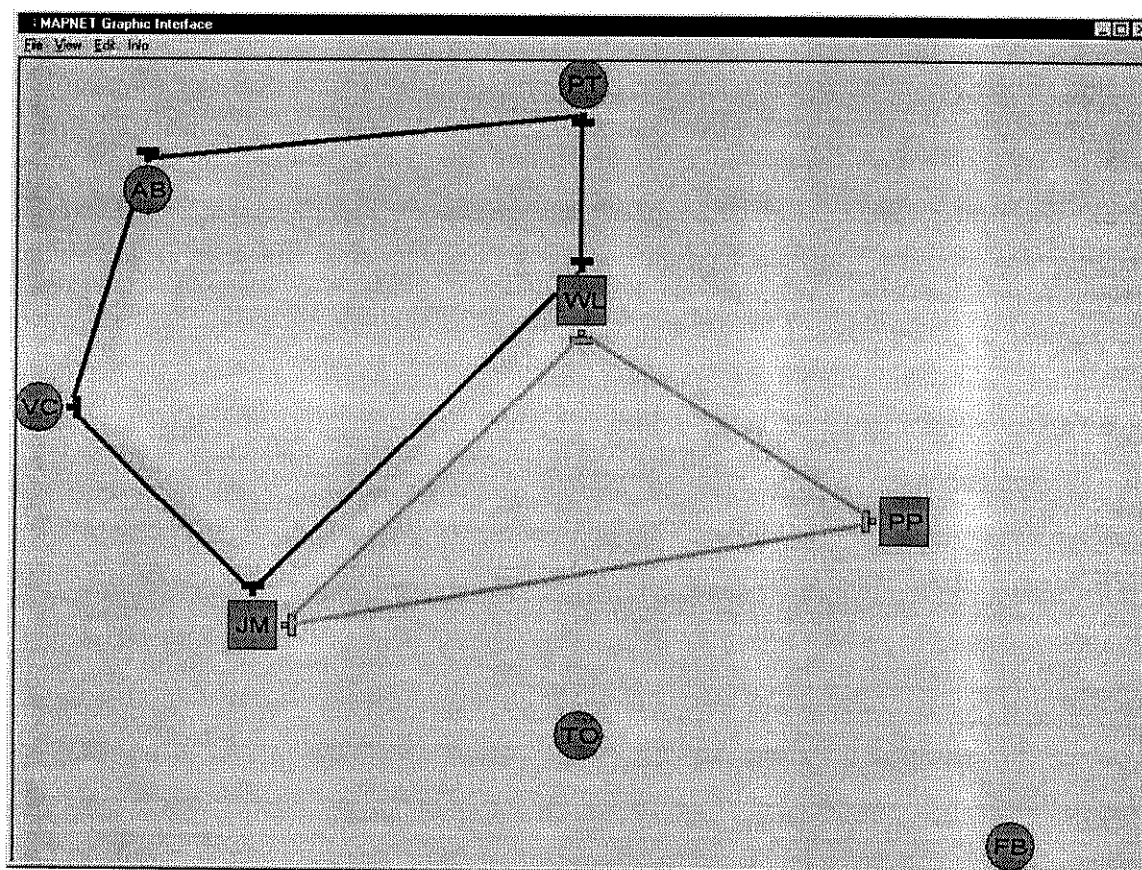


Figura 31: Facilidades candidatas, anéis, para a rede de Santos.

CFs	Facilidades candidatas: ponto-a-ponto
WL, JM	XWLJM34p, XWLJM34s, XWLJM155p, XWLJM622p
WL, PP	XWLPP34p, XWLPP34s, XWLPP155p, XWLPP622p
WL, TO	XWLTO34p, XWLTO34s, XWLTO155p, XWLTO622p
WL, PT	XWLPT34p, XWLPT34s, XWLPT155p, XWLPT622p
WL, AB	XWLAB34p, XWLAB34s, XWLAB155p, XWLAB622p
WL, FB	XWLFB34p, XWLFB34s, XWLFB155p
WL, VC	XWLVC34p, XWLVC34s, XWLVC155p, XWLVC622p
JM, PP	XJMPP34p, XJMPP34s
JM, TO	XJMTO34p
JM, PT	XJMPT34p
JM, AB	XJMAB34p, XJMAB34s
JM, FB	XJMFB34p
JM, VC	XJMVC34p, XJMVC34s, XJMVC155p, XJMVC622p
PP, TO	XPPTO34p
PP, PT	XPPPT34p
PP, AB	XPPAB34p
PP, FB	XPPFB34p, XPPFB34s
PP, VC	XPPVC34p

Nota-se que as facilidades do tipo155s, isto é, com dois enlaces de 155 Mbps, não foram candidatas. Isto ocorreu motivado pela estrutura de custos adotada (Tabela 6). Por exemplo, a facilidade candidata XWLJM155s teria o mesmo valor de custo ($2 \times 60 = 120$ \$) que a facilidade XWLJM622p, mas com capacidade menor.

A formulação matemática (Anexo 3) contém 52 variáveis inteiras (facilidades) e 250 variáveis reais positivas (caminhos) para escoamento das demandas; uma média de 14 caminhos para cada uma das 18 demandas diferentes de zero.

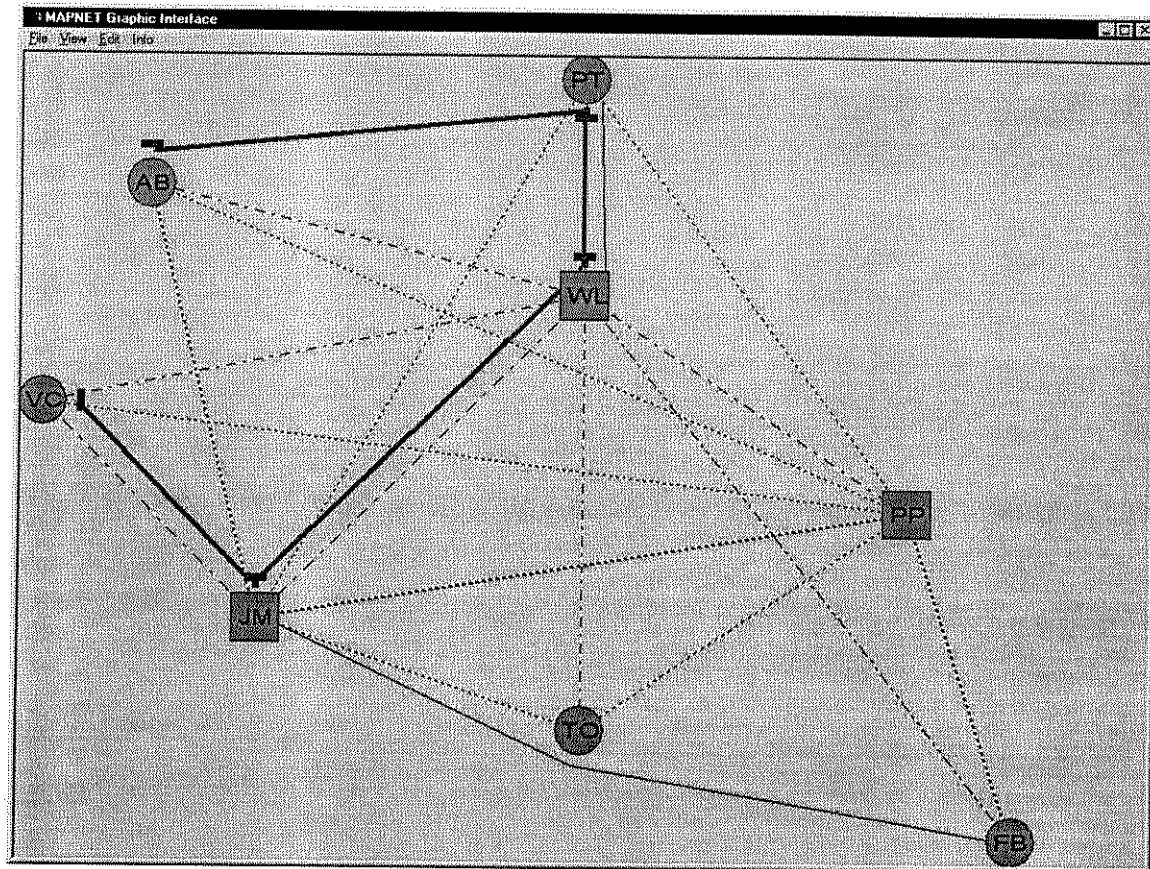


Figura 32: Facilidades candidatas, cadeia e ponto-a-ponto, para a rede de Santos.

A solução de menor custo obtida com esta configuração (Figura 33) teve um valor de 750 \$ e proporcionou uma folga acumulada de 39% (fração da folga total pela capacidade total) (Tabela 7); as facilidades escolhidas foram:

XWLPP622p, XWLTO622p, XWLFB155p, ZB1_622p;

e escoou a demanda através dos 18 caminhos:

YWLJM_direto = 74	YWLVC_porJM = 106	YJMVC_direto = 4
YWLPP_direto = 96	YJMPP_porWL = 12	YPPTO_porWL = 15
YWLTO_direto = 94	YJMTO_porWL = 13	YPPPT_porWL = 10
YWLPT_direto = 100	YJMPTadJMZB1PT = 8	YPPABceWLWA1AB = 4
YWLAB_porPT = 138	YJMAB_porVC = 28	YPPFB_porWL = 16
YWLFB_direto = 17	YJMFB_porWL = 3	YPPVC_porWLJM = 5

A folga para esta solução tem o valor de 709 canais de 2 Mbps, o que representa 95% da demanda total da rede (743 canais de 2 Mbps). Embora essa folga seja muito grande, ela é mal distribuída. O trecho crítico desta distribuição situa-se nos enlaces

WL – JM e WL – PT, cujos fluxos somados correspondem, no mínimo, a 465 canais com uma folga conjunta de apenas 39 canais.

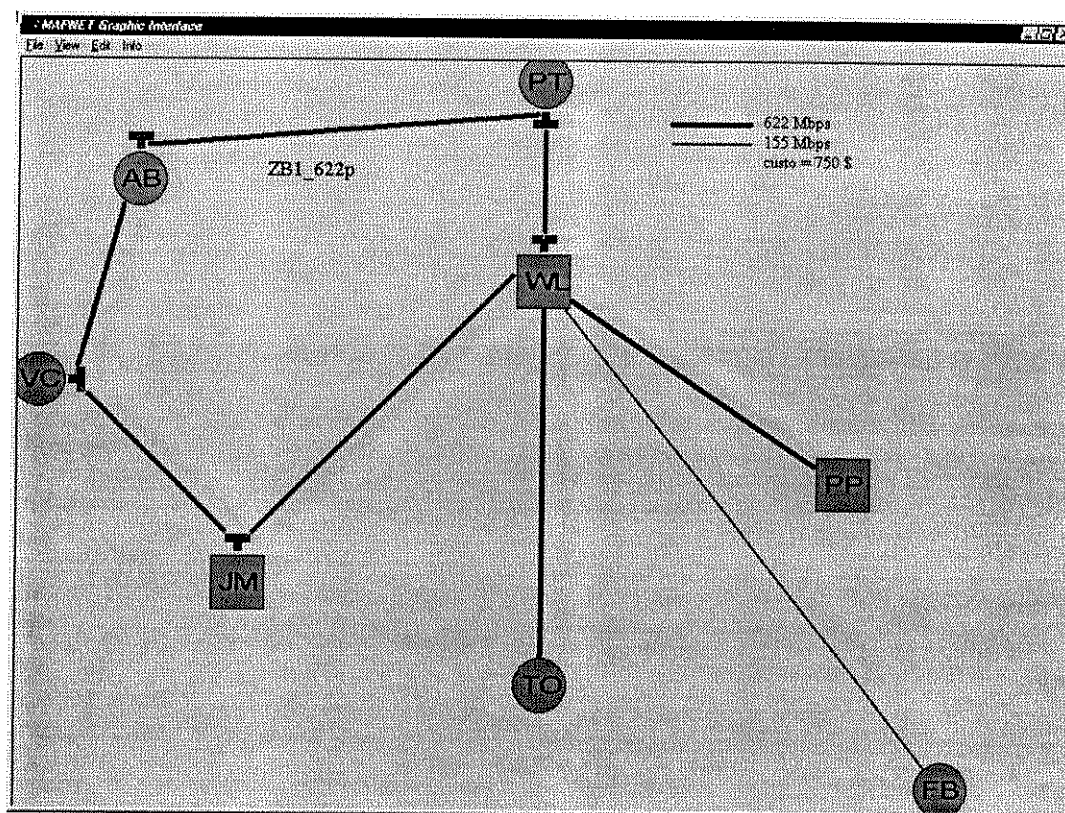


Figura 33: Solução mais barata para a rede de Santos.

Tabela 7: Capacidade, fluxo e folga na solução para Santos.

Extremidades		Capacidade *	Fluxo *	Folga *
WL	JM	252	213	39
WL	PP	252	158	94
WL	TO	252	122	130
WL	PT	252	252	0
WL	FB	63	36	27
JM	VC	252	151	101
PT	AB	252	150	102
AB	VC	252	36	216
Total		1827	1118	709

* canais de 2 Mbps

6.2. Belo Horizonte

A rede da cidade de Belo Horizonte, com uma demanda total de 1.721 canais de 2 Mbps, consiste de 9 CFs, denominados:

HG, MP, GO, BG, CI, PA, BT, CP, BA.

A matriz de demanda entre pares de CFs é dada por

	HG	MP	GO	BG	CI	PA	BT	CP	BA	Total
HG	—	190	140	130	90	95	70	100	90	905
MP		—	130	80	70	70	80	15	10	455
GO			—	60	30	20	35	10	5	160
BG				—	32	28	30	10	10	110
CI					—	32	18	8	5	63
PA						—	16	12	0	28
BT							—	0	0	0
CP								—	0	0
BA									—	0
Total	0	190	270	270	222	245	249	155	120	1721
Acum.	905	645	430	380	285	273	249	155	120	

Belo Horizonte é um exemplo de cidade que tem a maioria de suas demandas centralizadas em um só ponto (HG). Por esse motivo, não foi adotada nenhuma clusterização, e o nó HG tornou-se um hub único para todos os outros CFs da rede.

HG, MP, GO, BG, CI, PA, BT, CP e BA, hubeado em HG.

As facilidades candidatadas são descritas a seguir e apresentadas na **Figura 34** e na **Figura 35**.

Tipo	Facilidades	CFs (em ordem)
Anel bidirecional	ZB1_155p, ZB1_622p	CI, PA, HG
	ZB2_155p, ZB2_622p	CI, CP, PA, HG
	ZB3_155p, ZB3_622p	CP, PA, HG
	ZB4_155p, ZB4_622p	CI, CP, HG
	ZB5_155p, ZB5_622p, ZB5_622s	HG, MP, GO, BG
	ZB6_155p, ZB6_622p, ZB6_622s	HG, MP, BG
Cadeia	WA1_155p, WA1_622p, WA1_622s	PA, HG, MP
	WA2_155p, WA2_622p, WA2_622s	CI, HG, BG
Anel unidirecional	UC1_155p, UC1_622p, UC1_622s	HG, MP, GO, BG

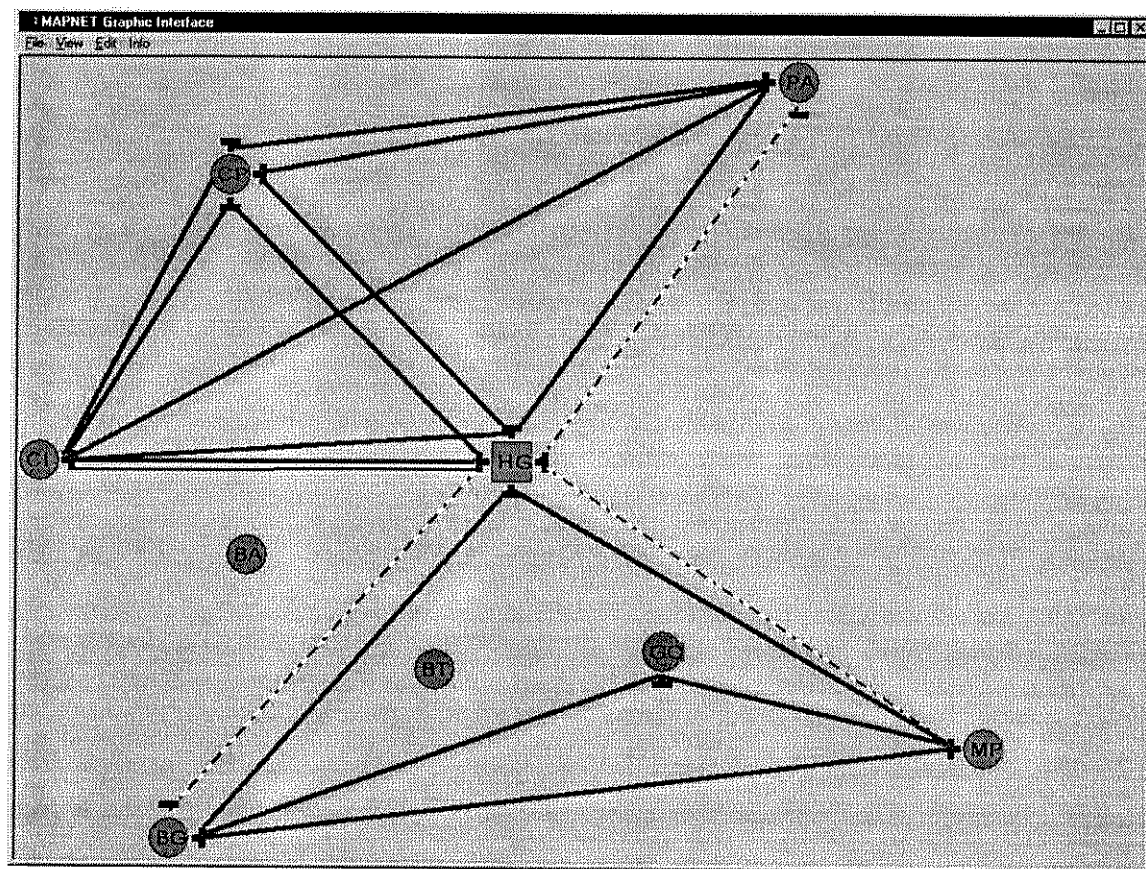


Figura 34: Facilidades candidatas, anéis e cadeias, para a rede de Belo Horizonte.

CFs	Facilidades candidatas: ponto-a-ponto
HG, MP	XHGMP34p, XHGMP34s, XHGMP155p, XHGMP622p, XHGMP622s
HG, GO	XHGGO34p, XHGGO34s, XHGGO155p, XHGGO622p, XHGGO622s
HG, BG	XHGBG34p, XHGBG34s, XHGBG155p, XHGBG622p, XHGBG622s
HG, CI	XHGCI34p, XHGCI34s, XHGCI155p, XHGCI622p
HG, PA	XHGPA34p, XHGPA34s, XHGPA155p, XHGPA622p
HG, BT	XHGBT34p, XHGBT34s, XHGBT155p, XHGBT622p
HG, CP	XHGCP34p, XHGCP34s, XHGCP155p, XHGCP622p
HG, BA	XHGBA34p, XHGBA34s, XHGBA155p, XHGBA622p
MP, GO	XMPGO34p, XMPGO34s, XMPGO155p, XMPGO622p
MP, BG	XMPBG34p, XMPBG34s, XMPBG155p
MP, CI	XMPCI34p, XMPCI34s, XMPCI155p
MP, PA	XMPPA34p, XMPPA34s, XMPPA155p
MP, BT	XMPBT34p, XMPBT34s, XMPBT155p
MP, CP	XMPCP34p
MP, BA	XMPBA34p
GO, BG	XGOBG34p, XGOBG34s, XGOBG155p
GO, CI	XGOCI34p, XGOCI34s
GO, PA	XGOPA34p, XGOPA34s
GO, BT	XGOBT34p, XGOBT34s, XGOBT155p
GO, CP	XGOCP34p
GO, BA	XGOBA34p
BG, CI	XBGCI34p, XBGCI34s, XBGCI155p
BG, PA	XBGPA34p, XBGPA34s
BG, BT	XBGBT34p, XBGBT34s
BG, CP	XBGCP34p
BG, BA	XBGBA34p
CI, PA	XCIPA34p, XCIPA34s, XCIPA155p

CI, BT	XCIBT34p, XCIBT34s
CI, CP	XCICP34p
CI, BA	XCIBA34p
PA, BT	XPABT34p, XPABT34s
PA, CP	XPACP34p

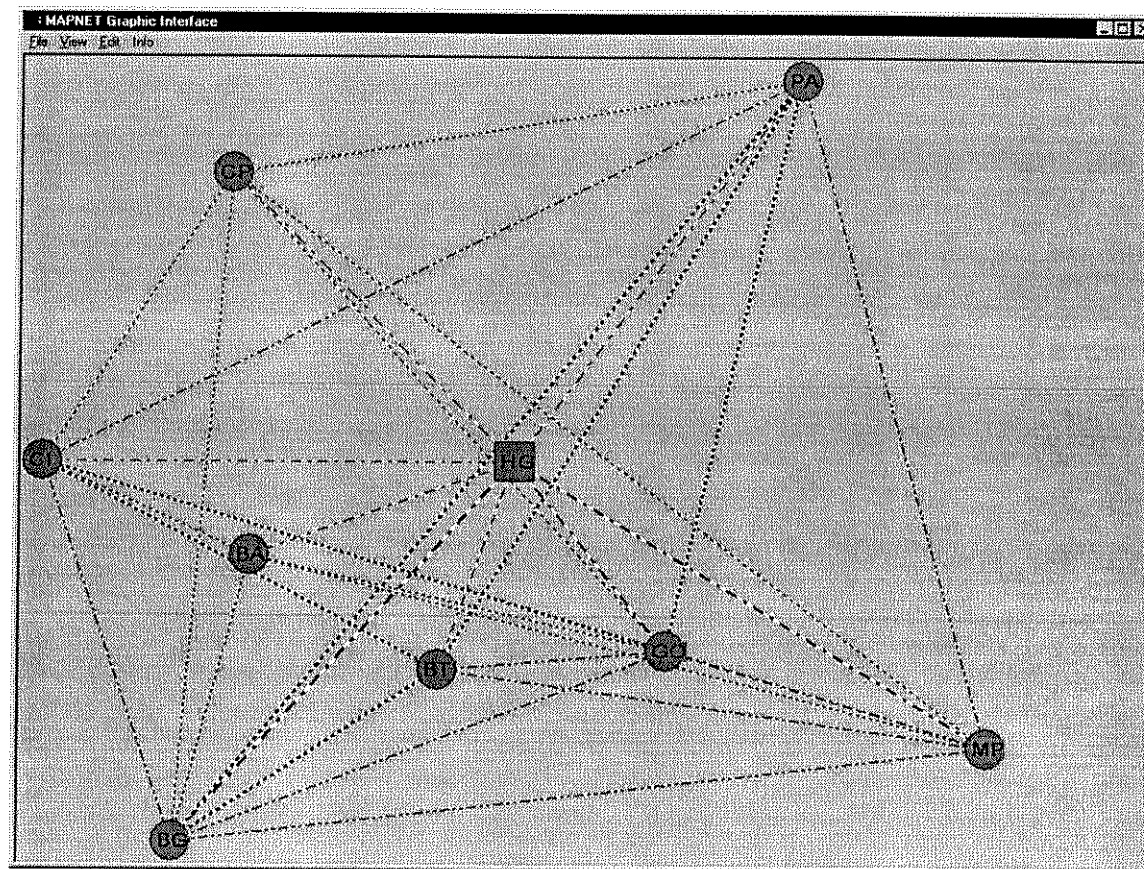


Figura 35: Facilidades candidatas, ponto-a-ponto, para a rede de Belo Horizonte.

A formulação matemática (Anexo 4) contém 107 variáveis inteiras (facilidades) e 600 variáveis reais positivas (caminhos) para escoamento das demandas; uma média de 19 caminhos para cada uma das 32 demandas diferentes de zero.

A solução de menor custo obtida com esta configuração (Figura 36) teve um valor de 1230 \$, utilizou 34 caminhos, proporcionou uma folga acumulada de 23% (fração da folga total pela capacidade total) da rede (Tabela 8), e as facilidades escolhidas foram:

XHGMP622p, XHGGO622p, XHGBT622p, XHGCP622p, XHGBA622p,
ZB1_622p, ZB5_622p

e escoou a demanda através dos 34 caminhos:

YHGMP_direto = 190	YMPCI_porHG = 70	YBGCI_porHG = 32
YHGGO_direto = 140	YMPPA_porHG = 70	YBGPA_porHG = 28
YHGBG_direto = 130	YMPBT_porHG = 80	YBGBT_porHG = 30
YHGCI_direto = 89	YMPCP_porHG = 15	YBGCP_porHG = 10
YHGCI_porPA = 1	YMPBA_porHG = 10	YBGPA_porHG = 10
YHGPA_direto = 95	YGOBG_direto = 60	YCIPA_direto = 32
YHGBT_direto = 70	YGOCI_porHG = 30	YCIBT_porHG = 18
YHGCP_direto = 100	YGOPA_porHG = 20	YCICP_porHG = 8
YHGBA_direto = 90	YGOBT_porHG = 35	YCIBA_porHG = 5
YMPGO_direto = 130	YGOCP_porHG = 10	YPABT_porHG = 16
YMPBG_porHG = 12	YGOBA_porHG = 5	YPACP_porHG = 12
YMPBG_porGO = 68		

Tabela 8: Capacidade, fluxo e folga na solução para Belo Horizonte.

Extremidades		Capacidade *	Fluxo *	Folga *
HG	MP	504	447	57
HG	GO	252	240	12
HG	BT	252	249	3
HG	CP	252	155	97
HG	BA	252	120	132
HG	BG	252	252	0
HG	CI	252	252	0
HG	PA	252	242	10
MP	GO	252	198	54
GO	BG	252	128	124
CI	PA	252	33	219
Total		3024	2316	708

* canais de 2 Mbps

A folga para esta solução representa 41% da demanda total da rede (1.721 canais de 2 Mbps).

Tal como no caso de Santos a folga é mal distribuída, com trecho crítico nos enlaces HG – CI e HG – PA, onde a folga conjunta é de 10 canais. Note que o enlace HG – BG, embora com folga nula, não é crítico, pois há trajetórias alternativas: BG – GO – HG e BG – GO – MP – HG para escoamento de fluxo.

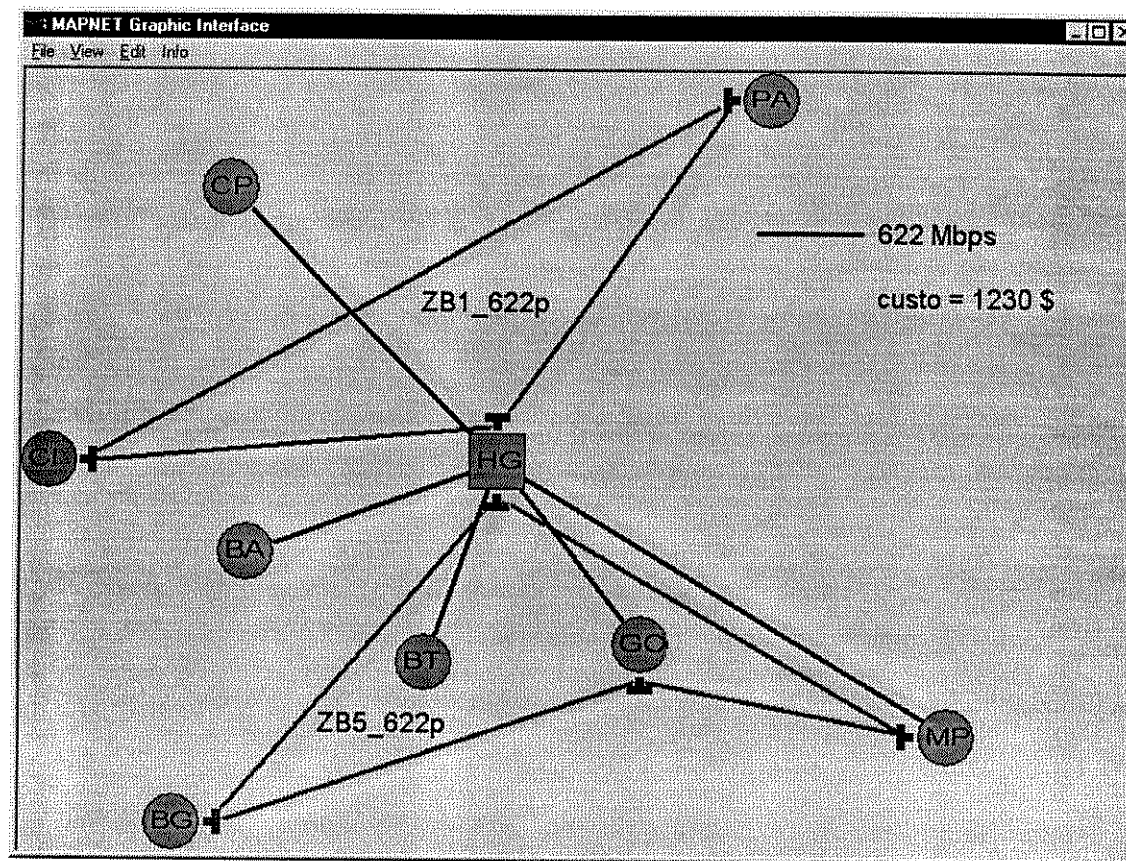


Figura 36: Solução mais barata para a rede de Belo Horizonte.

6.3. Campinas

Os dados da rede de Campinas foram fornecidos pelo grupo de Planejamento de Redes Locais e da Área de Redes Interurbanas da TELESP [Budri et alii 96]. Esta rede, com uma demanda total de 1224 canais de 2 Mbps, consiste de 16 CFs, denominados:

CL, JO, CE, BG, NA, CT, AM, CB, BE, DL, OV,

VT, VC, MD, SS, JE

As demandas diferentes de zero são dadas por:

CFs	Demanda	CFs	Demanda	CFs	Demanda
CL JO	6	JO CT	40	NA CB	40
CL CE	80	JO CB	18	CT AM	14
CL BG	8	CE BG	16	CT CB	154
CL NA	8	CE NA	16	CT BE	10
CL CT	102	CE CT	220	CT VT	14
CL AM	2	CE AM	6	CT VC	16
CL CB	62	CE CB	134	AM CB	12
CL DL	18	CE BE	8	CB BE	2
CL OV	22	CE VT	6	CB VT	10
CL VT	2	CE VC	12	CB VC	12
CL VC	6	BG CT	26	CB MD	14
JO CE	18	BG CB	30	CB SS	18
JO NA	2	NA CT	34	CB JE	6

E a demanda total que passa por cada CF é:

CF	Demanda total	CF	Demanda total	CF	Demanda total
CL	316	AM	34	VT	32
JO	84	CB	512	VC	46
CE	516	BE	20	MD	14
BG	80	DL	18	SS	18
NA	100	OV	22	JE	6
CT	630				

A clusterização adotada foi:

Cluster 1: CL, DL, OV, VC, hubeado em CL.

Cluster 2: CE, JO, VT, hubeado em CE.

Cluster 3: CB, BG, BE, MD, SS, JE, hubeado em CB.

Cluster 4: CT, NA, AM hubeado em CT.

A solução de menor custo (1150 \$) não agradou, pelo fato de montar uma rede bastante malhada e não aproveitar o backbone. Essa solução continha 50 OLTMs de 34 Mbps, 8 OLTMs de 155 Mbps, 4 ADMs de 622 Mbps e capacidade total de 1660 canais. Em função dessa deficiência, 21 sistemas de 34 Mbps e 2 de 155 Mbps, em 15 diferentes arcos, que não participavam do backbone, foram retirados do conjunto das facilidades candidatas.

Após novo processo de otimização, foi alcançada uma solução satisfatória, que tomava praticamente todo o backbone. Ela custou 1198 \$, continha 38 OLTMs de 34 Mbps, 6 OLTMs de 155 Mbps, 4 OLTMs de 622 Mbps, 4 ADMs de 622 Mbps e capacidade total igual a 2005 canais. Comparando com a solução anterior, enquanto o custo teve aumento de 4%, a capacidade teve um acréscimo de 21%, o que em uma análise custo/benefício é um resultado atraente.

Porém, ocorreu que dois enlaces (CB—BG e CE—JO) aceitaram 2 facilidades, uma com 2 sistemas de 34 Mbps mais 1 sistema de 155 Mbps. O planejador preferiu substituir esses 3 sistemas em cada enlace por um único sistema de 622 Mbps. Para fazer isso, 4 sistemas de 34 Mbps, em 2 diferentes arcos, saíram do conjunto das facilidades candidatas.

A solução se tornou mais cara, mas melhor gerenciável. Ela custou 1246 \$, continha 26 OLTMs de 34 Mbps, 4 OLTMs de 155 Mbps, 8 OLTMs de 622 Mbps, 4 ADMs de 622 Mbps e capacidade total igual a 2350 canais. Acarretou aumento de 8% em relação a 1ª solução e 4% em relação a 2ª. Por outro lado, a capacidade teve acréscimo de 42% e 17% relativos respectivamente a 1ª e 2ª soluções. Resultado também bastante atraente.

As facilidades candidatas são descritas a seguir e apresentadas nas **Figura 37** e 38.

Tipo	Facilidades	CFs (em ordem)
Anel bidirecional	ZB1_155p, ZB1_622p	CL, CT, CB, CE
	ZB2_155p, ZB2_622p	CL, CT, CE
	ZB3_155p, ZB3_622p	CT, CB, CE
Cadeia	WA1_155p, WA1_622p	OV, CL, CE, CB
Anel unidirecional	UC1_155p, UC1_622p	CT, CB, CE

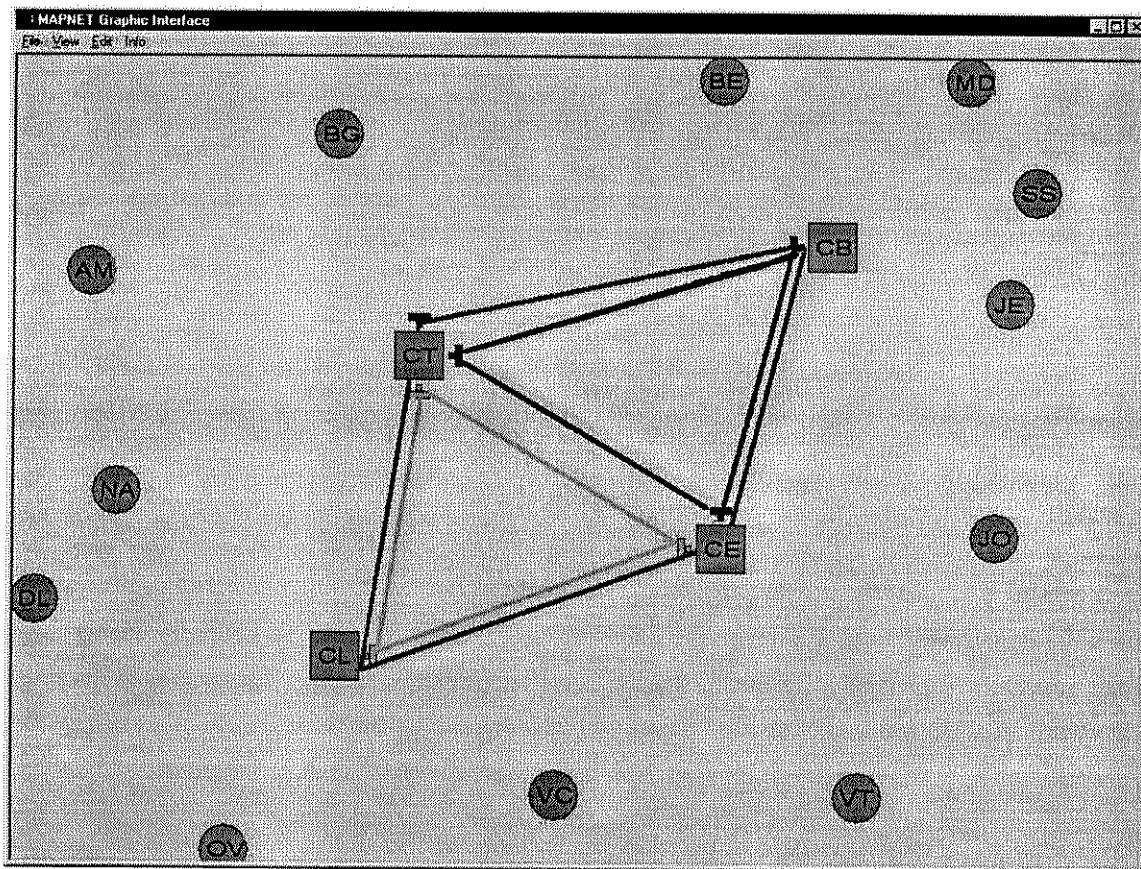


Figura 37: Facilidades candidatas, anéis, para a rede de Campinas.

CFs	Facilidades candidatas: ponto-a-ponto
CL CE	XCLCE34p, XCLCE34s, XCLCE155p, XCLCE622p
CL CB	XCLCB34p, XCLCB34s, XCLCB155p
CL CT	XCLCT34p, XCLCT34s, XCLCT155p, XCLCT622p
CL DL	XCLDL34p, XCLDL34s
CL OV	XCLOV34p, XCLOV34s
CL VC	XCLVC34p, XCLVC34s, XCLVC155p
CE CB	XCECB34p, XCECB34s, XCECB155p, XCECB622p
CE CT	XCECT34p, XCECT34s, XCECT155p, XCECT622p
CE JO	XCEJO622p_fixa
CE VT	XCEVT34p, XCEVT34s, XCEVT155p
CB CT	XCBCT34p, XCBCT34s, XCBCT155p, XCBCT622p
CB BG	XCBBG622p_fixa
CB BE	XCBBE34p, XCBBE34s
CB MD	XCBMD34p
CB SS	XCBSS34p, XCBSS34s
CB JE	XCBJE34p
CT VC	XCTVC34p, XCTVC34s
CT NA	XCTNA34p, XCTNA34s, XCTNA155p, XCTNA622p
CT AM	XCTAM34p, XCTAM34s, XCTAM155p

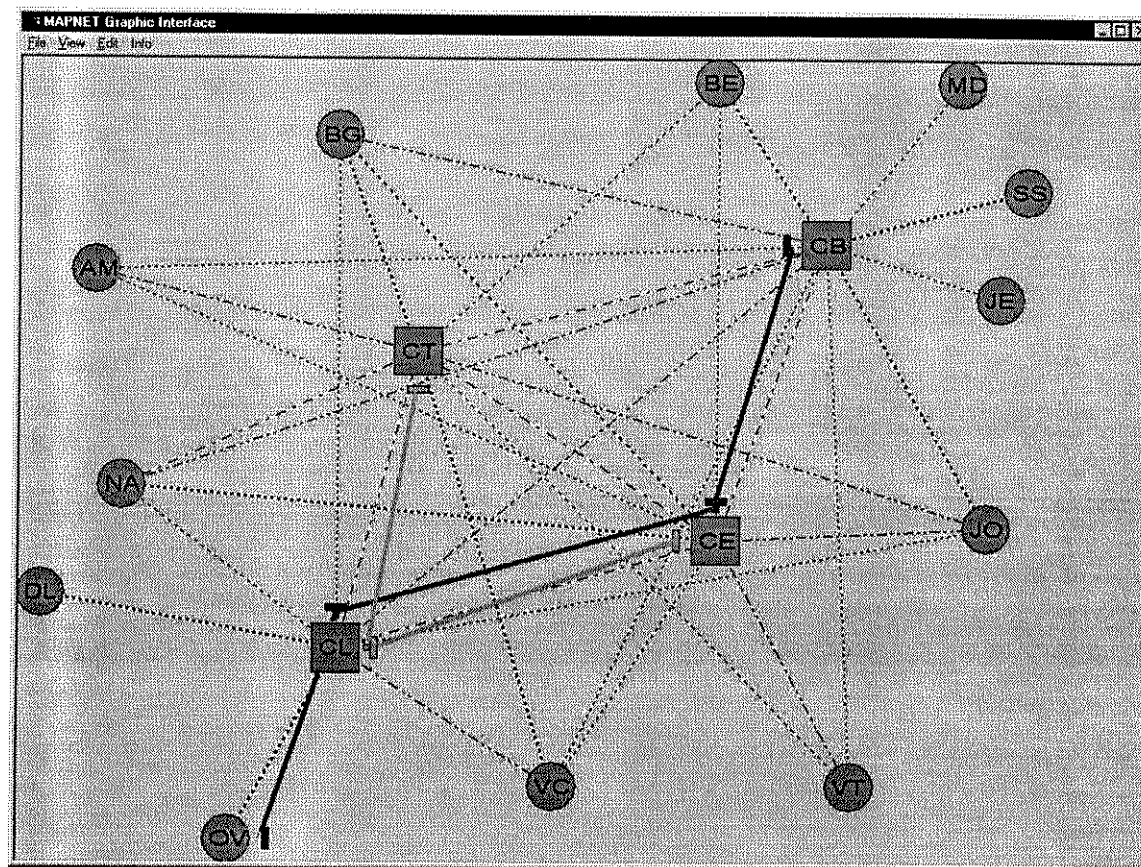


Figura 38: Facilidades candidatas, cadeias e ponto-a-ponto, para a rede de Campinas.

A formulação matemática contém 60 variáveis inteiras (facilidades), e 159 variáveis reais positivas (caminhos) para escoamento das demandas; uma média de 4 caminhos para cada uma das 39 demandas diferentes de zero. Duas das variáveis inteiras foram fixadas para o valor 1 (XCEJO622p_fixa e XCBBG622p_fixa) forçando a entrada dessas facilidades.

O fato deste modelo apresentar apenas 159 variáveis de caminhos é estranho a primeira vista, mas tem motivos. A solução de menor custo (1150 \$) continha 469 caminhos para escoamento das 39 demandas, passando por 36 arcos. Porém, 23 sistemas, em 15 diferentes arcos, foram excluídos do conjunto das facilidades candidatas, o que representa 43% dos arcos candidatados na rede. O número de arcos caiu para 21, o que fez cair o número de caminhos do modelo.

A solução de custo mais baixo obtida com esta configuração (**Figura 39**) teve um valor de 1246 \$, proporcionou uma folga acumulada de 30% (fração da folga total pela capacidade total) da rede (Tabela 9), e as facilidades escolhidas foram:

XCLDL34s, XCLOV34s, XCLVC155p, XCECB34p, XCECT622p,
XCEJO622p_fixa, XCEVT34s, XCBBG622p_fixa, XCBBE34s, XCBMD34p,
XCBSS34s, XCBJE34p, XCTNA622p, XCTAM155p, ZB1_622p

e escoou a demanda através dos 40 caminhos:

YCLCE_direto = 80	YCEVC_porCL = 12	YCBMD_direto = 14
YCLCB_porCE = 62	YCEJO_direto = 18	YCBSS_direto = 18
YCLCT_direto = 102	YCEVT_direto = 6	YCBJE_direto = 6
YCLDL_direto = 18	YCEBG_porCB = 16	YCBNA_porCT = 40
YCLOV_direto = 22	YCEBE_porCB = 8	YCBAM_porCT = 12
YCLVC_direto = 6	YCENA_porCT = 16	YCTVC_porCL = 16
YCLJO_porCE = 6	YCEAM_porCT = 6	YCTJO_porCLCE = 40
YCLVT_porCE = 2	YCBCT_direto = 154	YCTVT_porCE = 14
YCLBGadCLZB1CB = 8	YCBVCcdCBWA1CL = 12	YCTBG_porCB = 26
YCLNA_porCT = 8	YCBJO_porCE = 18	YCTBE_porCB = 10
YCLAM_porCT = 2	YCBVT_porCE = 10	YCTNA_direto = 34
YCECB_direto = 134	YCBBG_direto = 30	YCTAM_direto = 14
YCECT_direto = 214	YCBBE_direto = 2	YJONAadCEZB2CT = 2
YCECT_porCL = 6		

A folga para esta solução tem o valor de 712 canais de 2 Mbps, o que representa 58% da demanda total da rede (1224 canais de 2 Mbps). Novamente a folga é mal distribuída, sobretudo no trecho que compreende os enlaces CB – CT e CB – CE com folga conjunta de 10 canais.

Tabela 9: Capacidade, fluxo e folga na solução para Campinas.

Extremidades		Capacidade *	Fluxo *	Folga *
CL	CE	252	228	24
CL	CT	252	174	78
CL	DL	32	18	14
CL	OV	32	22	10
CL	VC	63	46	17
CE	CB	268	268	0
CE	CT	252	252	0
CE	JO	252	84	168
CE	VT	32	32	0
CB	CT	252	242	10
CB	BG	252	80	172
CB	BE	32	20	12
CB	MD	16	14	2
CB	SS	32	18	14
CB	JE	16	6	10
CT	NA	252	100	152
CT	AM	63	34	29
Total		2350	1638	712

* canais de 2 Mbps

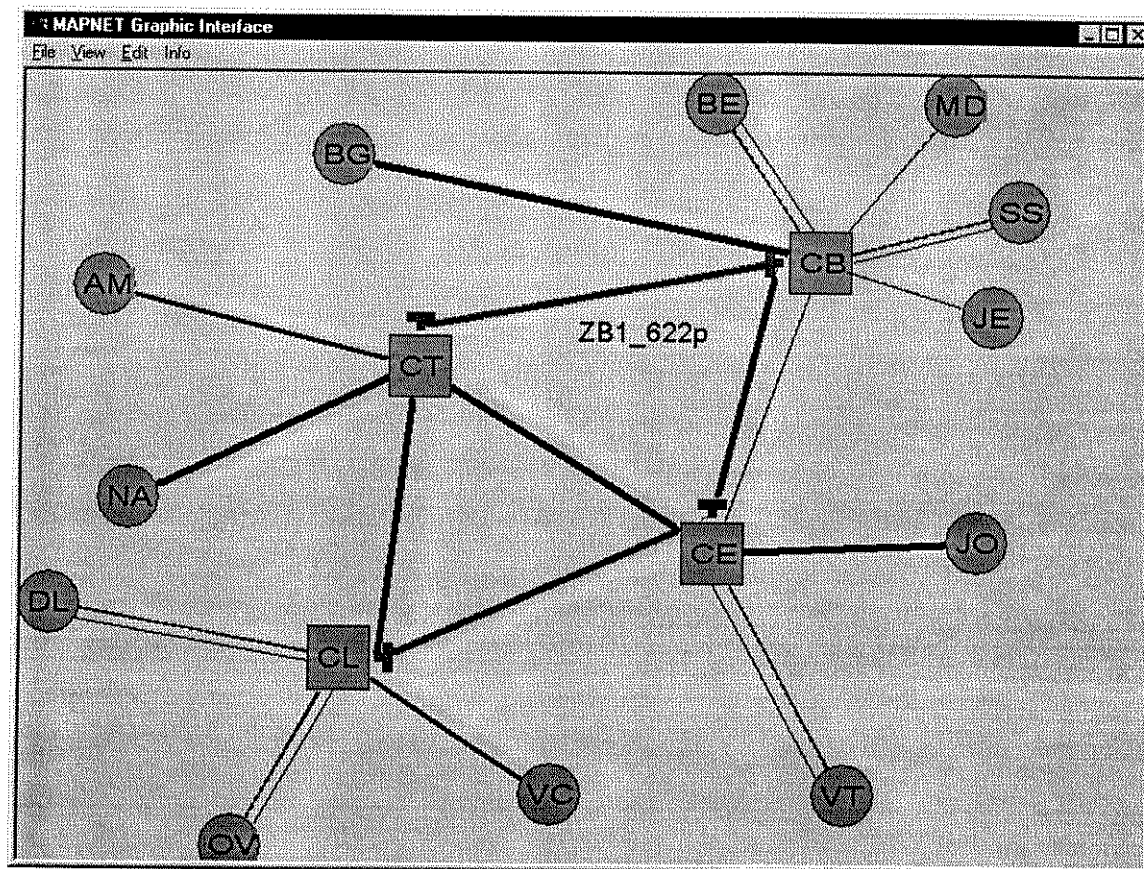


Figura 39: Solução mais barata para a rede de Campinas.

6.4. Resultados comparativos entre as cidades.

A partir dos resultados para Campinas foi montada uma “solução simplificada”. Permaneceram apenas os CFs considerados mais importantes na rede e foram excluídos os restantes, cujas demandas foram incorporadas a seus respectivos hubs. Os CFs BE, MD, SS, e JE, foram incorporados a CB; os CFs DL e OV foram incorporados a CL; e VT incorporado a CE.

A seguir serão feitas comparações entre os resultados para as cidades de Santos, Belo Horizonte, Campinas e Campinas simplificada. Dentre os resultados apresentados na Tabela 10, a linha Produtos refere-se ao número de demandas da rede com valor diferente de zero.

Tabela 10: Comparação de resultados entre cidades estudadas.

		Santos	Belo Horizonte	Campinas	Campinas simplificada
Dados	Canais	743	1721	1224	1138
	CFs	8	9	16	9
	Hubs	3	1	4	4
	Produtos	18	32	39	27
Modelo	Candidatos	52	107	60	47
	Caminhos	250	600	159	133
Resultado	Custo	750 \$	1230 \$	1246 \$	982 \$
	Caminhos	18	34	40	28
	OLTM 34 M	-	-	26	2
	OLTM 155 M	2	-	4	4
	OLTM 622 M	4	10	8	8
	ADM 622 M	5	7	4	4
	Capacidade (canais)	1827	3024	2350	2158
	Folga (canais)	709	708	712	650
	Folga/Capacidade	39%	23%	30%	30%
Relação \$/canal		1,009	0,715	1,018	0,863

A Tabela 10 mostra que a relação custo/canal fornece maior economia quando são escolhidos equipamentos de hierarquias altas. A solução para Belo Horizonte, que apresentou a melhor relação de custo (0,715 \$/canal) dentre as soluções analisadas, utilizou somente equipamentos de 622 Mbps, enquanto que a solução para Campinas apresentou a pior relação de custo (1,018 \$/canal) com vários equipamentos de baixa hierarquia, principalmente 34 Mbps. A solução para Campinas simplificada melhorou consideravelmente a relação de custo, pelo fato de conter somente os CFs mais importantes, isto é, os que tem as maiores demandas para o resto da rede e consequentemente os equipamentos das hierarquias mais altas.

Observa-se também que o número de caminhos utilizados na solução, em todos os casos, teve um valor igual ou pouco superior ao número de produtos, independente de quantos caminhos foram utilizados no modelo. Acredita-se que este fato é decorrência de operarmos com redes folgadas, onde um produto não é forçado a dividir-se entre dois ou mais caminhos distintos em razão do esgotamento de capacidades.

É necessário fazer comentário sobre a segurança. As observações feitas sobre a exiguidade das folgas pode levar à conclusão de que os anteprojetos apresentados ficam a desejar quanto à confiabilidade e à segurança. Não é fato: (1º) os circuitos aqui dimensionados são lógicos e não físicos; (2º) o estabelecimento de índices de confiabilidade e/ou segurança são obtidos através da duplicação de equipamentos e/ou o lançamento de rotas disjuntas para os cabos ópticos, como fartamente discutido em [Mello 96].

Além dos resultados apresentados na Tabela 10, a rede de São Paulo também foi bastante explorada, tanto a rede da área metropolitana, quanto a rede interurbana do Estado. Os dados foram fornecidos pelo grupo de Planejamento da Transmissão da TELESP. A área metropolitana compreende 91 CFs. Os resultados foram analisados para uma rede básica com 58 nós divididos em 5 clusters, com uma demanda total de 18.934 canais de 2 Mbps. Em média, os modelos utilizaram 385 candidatos ponto-a-ponto, 22 anéis bidirecionais, 28 cadeias e de 1700 a 6.500 caminhos para escoar 695 demandas. Também foram realizadas análises simplificadas com 40 e 17 nós, divididos em 5 e 7 clusters.

A rede interurbana do Estado de São Paulo compreende 60 CFs com uma demanda superior a 3.000 canais de 2 Mbps. Os resultados foram analisados para uma rede reduzida com 28 nós divididos em 14 clusters. Utilizou 148 candidatos ponto-a-ponto, 17 anéis bidirecionais, 6 cadeias e 2196 caminhos para escoar 170 demandas.

Vários resultados são apresentados nas teses de doutorado de Saulo Bortolon [Bortolon 96], e de mestrado de Marco Antonio Bergamaschi [Bergamaschi 96], esta última também com aplicações do método heurístico “Rodaut”.

CAPÍTULO 7. CONCLUSÕES

A fase Enfeixamento, do planejamento em redes de telecomunicações, define o conjunto de equipamentos de transmissão a ser instalado na rede; determina também que demandas serão transmitidas através de cada equipamento. Nesta tese, usando enlaces ponto-a-ponto, anéis e cadeias, apresentamos o desenvolvimento de um metodologia computacional de otimização visando definir a “melhor” topologia lógica para a rede, objetivando a minimização do custo total.

Neste trabalho, para realizar a etapa Enfeixamento, desenvolvemos um modelo matemático na forma de “Programação Linear Inteira Mista”, onde as variáveis de decisão são binárias e indicam a instalação ou não de equipamentos na rede de transmissão. Este modelo utiliza também variáveis reais que indicam o caminho por onde escoar a demanda entre cada par de centro de fios da rede. A técnica utilizada para resolução do problema foi o branch-and-bound.

Desenvolvemos também uma ferramenta computacional para elaboração do modelo; tal ferramenta (a) cria caminhos para o escoamento de cada demanda e (b) escreve as fórmulas matemáticas que descrevem a função objetivo (custo), as exigências de demanda por troncos e as restrições de capacidade dos equipamentos. Este trabalho de elaboração foi de fundamental importância para o sucesso das idéias aqui apresentadas. A máquina é a responsável por todo o trabalho de cálculo, processamento dos dados e preparação dos resultados. Também fornece material satisfatório para a realização da tarefa mais nobre, destinada ao planejador, que seria pensar nos detalhes da pós-otimização e ponderar custo e benefícios na busca de soluções mais adequadas.

O modelo é prático e racionaliza a tomada de decisão. Cabe ao pacote de otimização (por exemplo CPLEX) fazer a busca da melhor solução, liberando o planejador desta carga, que não é leve. As soluções alcançadas são de boa qualidade.

As soluções são alcançadas em tempos animadores. São necessários dias ou semanas para se obter um número reduzido de topologias de rede, da forma mais tradicional, isto é, manualmente. Por outro lado, em minutos, ou poucas horas para redes de grande porte, são alcançadas várias soluções de boa qualidade, quando da utilização das ferramentas criadas neste trabalho.

Tempos atrás as redes em todo o mundo contentavam-se com a utilização de equipamentos da tecnologia PDH, incapaz de fornecer eficiência quanto à: (a) interligação de equipamentos de diferentes fabricantes, (b) automatização na derivação/inserção de sinais de baixa hierarquia, e (c) gerência de rede. Com o advento da SDH, que permite a convivência de vários fornecedores de equipamento em uma mesma rede, as redes de telecomunicações se tornaram mais maleáveis e melhor gerenciáveis. Isto ocorre pela montagem de novas estruturas, tais como anéis e cadeias. Em geral, os países estão substituindo os equipamentos de transmissão em suas cidades, para contar com os benefícios desta nova tecnologia e aumentar suas possibilidades, por exemplo, na utilização da Internet. Este modelo é oportuno, pois permite um planejamento adequado à situação atual.

O trabalho nasceu de um contrato firmado entre a FEEC-Unicamp e a TELESP-Telecomunicações do Estado de São Paulo. Por este motivo, o modelo foi aplicado a uma série de dados reais. A TELESP gentilmente cedeu informações das cidades de Campinas, Santos e litoral, área metropolitana de São Paulo e interior do Estado de São Paulo, acreditando na importância desta forma de planejamento. Podemos afirmar que o êxito nos resultados depende, quase que na totalidade, da qualidade dos dados fornecidos. Alguns resultados já foram aproveitados pela empresa, provando o êxito do trabalho realizado.

O modelo não está fechado. Novas idéias tem aparecido, sendo que algumas já estão sendo colocadas em prática. Como exemplos, (a) geração automática de anéis candidatos, importante ferramenta de auxílio ao planejador, deve estar concluída em breve; (b) consideração de aspectos de modularidade para os enlaces lógicos e equipamentos de transmissão [Garcia & Zanandrea]. Estuda-se também a inclusão de facilidades com equipamentos SDxC, adequação do modelo a serviços ATM e também a técnicas WDM.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [Aarts & Laarhoven 87] Aarts, E. H. L.; Laarhoven, P. J. M.; **“Simulated Annealing: Theory and Applications”**, D. Reidel Publishing Company, 1987.
- [Aubry et alii 95] Aubry, N.; Ribeiro, R.; Tavares, H.; **“A Two-Step Clustering Method Applied to Telecommunications Network Planning.”**, 3rd International Conference on Telecommunications System, Nashville, TN, USA, March 1995, pp. 264-272.
- [Balas 65] Balas, E.; **“An Additive Algorithm for Solving Linear Programs with Zero-One Variables”**, Operations Research 13, 517-546.
- [Bazaraa et alii 90] Bazaraa, M. S.; Jarvis, J. J.; Sherali H. D.; **“Linear Programming and Network Flows.”**, 2nd Edition, Wiley, 1990.
- [Bergamaschi 96] Bergamaschi, Marco A.; **“Um Método Heurístico de Enfeixamento Aplicado a Rede de Transmissão de Grande Porte.”**, Tese de Mestrado, julho de 1996, FEEC-UNICAMP.
- [Bortolon 96] Bortolon, Saulo; **“Planejamento Otimizado de Redes de Transporte na Hierarquia Digital Síncrona.”**, Tese de Doutorado, setembro de 1996, FEEC-UNICAMP.
- [Bortolon et alii 96-1] Bortolon, Saulo; Ribeiro, Raul; Tavares, Hermano; Bergamaschi, Marco; Quaglia, Eduardo; **“Planejamento Otimizado de Redes SDH em Telecomunicações.”**, XI Simpósio Brasileiro de Automática, São Paulo/SP, pp.251-256, setembro de 1996.

- [Bortolon et alii 96-2] Bortolon, Saulo; Ribeiro, Raul; Tavares, Hermano; Bergamaschi, Marco; Quaglia, Eduardo; **“A Methodology to SDH Networks Design using Optimization Tools.”**, IEEE Global Telecommunications Conference, pp. 1867-1871, November, 1996, London – UK.
- [Budri et alii 96] Budri, A., Yamakami, A., Quaglia, E. J., Tavares, H., Bonatti, I., Ribeiro, R., Figueiredo, R.; **“Planejamento Integrado da Comutação e da Transmissão: Estudo de Caso”**, Revista Telebrás, vol. 19, nº 63, pp. 22-30, julho de 1996.
- [Coy 92] Coy, P; **“Dialling for Dollars.”**, Business Week, nº. 13, 1992, p.13.
- [CPLEX 89] CPLEX Optimization, Inc.; **“Using the CPLEX Callable Library.”**, version 3.0, 1989-1994.
- [Ferrari 91] Ferrari, Antonio; **“Telecomunicações: Evolução e Revolução.”**, Editora Érica, São Paulo/SP, 1991.
- [Formigoni 95] Formigoni Filho, J. R.; **“Rede Externa: Planejamento de Rotas Estratégicas.”**, Tese de Mestrado, setembro de 1995, FEEC-UNICAMP.
- [Garcia & Zanandrea] Garcia, Anilton S.; Zanandrea, Gustavo B.; **“A Decision Support System for SDH Network Planning Considering Equipment Modularity Aspects.”**, Revista da Sociedade Brasileira de Telecomunicações, vol 11, nº 1, pp.5-12, dezembro de 1996.
- [IEEE Communications 96] _____, **“Undersea Communication Networks.”**, IEEE Communications Magazine, February 1996, vol. 34, n. 2, pp. 24 – 57.
- [Magnanti et alii 93] Magnanti, Thomas L.; Ahuja, Ravindra K.; Orlin, James B.; **Network Flows. Theory, Algorithms, and Applications.”**, Prentice Hall, 1993.

- [Mello 96] Mello, Oderson D.; **“Sobrevivenciabilidade e Indisponibilidade no Planejamento de Redes de Telecomunicações.”**, Tese de Mestrado, novembro de 1996, FEEC-UNICAMP.
- [Mendes et alii 95] Mendes, J. L.; Souza Filho, A.; Nakamura, R.; **“Hierarquia Digital Síncrona (SDH): A Evolução das Redes de Transporte.”**, XIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, pp. 470-475, Águas de Lindóia/SP, setembro de 1995.
- [Nemhauser & Wolsey 88] Nemhauser, G. L.; Wolsey L. A.; **“Integer and Combinatorial Optimization.”**, Wiley, 1988.
- [Nemhauser & Garfinkel 72] Nemhauser, G.L.; Garfinkel, R. S.; **“Integer Programming.”**, Wiley, 1972.
- [Nortel 95] _____; **“Synchronous Transmission Systems.”**, Nortel Limited 1995
- [OSL 91] _____; **“Optimization Subroutine Library – Guide and Reference.”**, Publication N^o SC23-0519-02, IBM, 3rd Edition, 1991, USA.
- [Phillips et alii 76] Phillips, D.T.; Ravindran, A.; Solberg, J. J.; **“Operations Research Principles and Practice.”**, Wiley, 1976
- [Quaglia et alii 95-1] Quaglia, Eduardo; Tavares, Hermano; Ribeiro, Raul; **“O Enfeixamento no Planejamento da Transmissão: Um Estudo de Caso.”**, Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, Águas de Lindóia/SP, pp.458-463, 1995.
- [Quaglia et alii 95-2] Quaglia, E.; Tavares, H.; Ribeiro, R.; **“Uma Heurística para a Fase de Enfeixamento do Planejamento da Transmissão”**, XXVII SBPO, Vitória, novembro de 1995.

- [RNT 97] RNT – Revista Nacional de Telecomunicações; **“SDH – Hierarquia Digital Síncrona – Conceito, Aplicação e Futuro.”**, Número 213 A – Maio/97.
- [Siqueira 96] Siqueira, E.; **“Um Plano de 75 Bilhões.”**, Revista Brasileira de Telecomunicações, pp.16-26, janeiro/1996.
- [Trindade 95] Trindade, Marcos B.; Nakamura, Roberto Y.; Souza F^o, Argemiro O.; **“Planejamento de Anéis Síncronos Unidirecionais: Modelo de Otimização e um Estudo de Caso.”**, Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, Águas de Lindois/SP, pp.452-457, 1995.
- [Wu 92] Wu, T.; **“Fiber Network Service Survivability.”**, Artech House, 1992.
- [Zanandrea & Garcia 96] Zanandrea, Gustavo; Garcia, Anilton S.; **“An Heuristic Approach for SDH Transmission Network Evolution.”**, 4th International Conference on Communications Systems Modelling and Analysis, pp. 620-626, March, 1996, Nashville, TN-USA.

ANEXOS

Anexo 1 – Arquivo Rede7.lp

DADOS

Demandas

$dAB = 23$,
 $dAC = 40$, $dBC = 34$,
 $dAD = 25$, $dBD = 7$, $dCD = 4$,
 $dAE = 11$, $dBE = 5$, $dCE = 2$, $dDE = 9$,
 $dAF = 5$, $dBf = 14$, $dCF = 4$, $dDF = 2$, $dEF = 5$,
 $dAG = 4$, $dBG = 4$, $dCG = 25$, $dDG = 6$, $dEG = 0$, $dFG = 0$

Capacidades 34 Mbps 16, 155 Mbps 63

Custos

OLTM 34 Mbps custo 6
OLTM 155 Mbps custo 14

Facilidades

XAB34p, XAC34p, XAD34p, XAE34p, XAF34p, XAG34p, XBC34p, XBD34p, XBE34p, XBF34p, XBG34p, XCD34p, XCF34p, XCG34p, XDE34p, XDG34p, XEF34p = 0/1 com custo 12
XAB34s, XAC34s, XAD34s, XAE34s, XBC34s, XBF34s, XCG34s, XDE34s = 0/1 com custo 24
XAB155p, XAC155p, XAD155p, XAE155p, XBC155p, XBF155p, XCG155p = 0/1 com custo 28
XAC155s, XBC155s = 0/1 com custo 56

Agrupamento

cluster 1: A, D, E com hub A
cluster 2: B, F com hub B
cluster 3: C, G com hub C

OBJETIVO

Minimizar

$12.00 \text{ XAB34p} + 24.00 \text{ XAB34s} + 28.00 \text{ XAB155p}$
 $+ 12.00 \text{ XAC34p} + 24.00 \text{ XAC34s} + 28.00 \text{ XAC155p} + 56.00 \text{ XAC155s}$
 $+ 12.00 \text{ XAD34p} + 24.00 \text{ XAD34s} + 28.00 \text{ XAD155p}$
 $+ 12.00 \text{ XAE34p} + 24.00 \text{ XAE34s} + 28.00 \text{ XAE155p}$
 $+ 12.00 \text{ XAF34p}$
 $+ 12.00 \text{ XAG34p}$
 $+ 12.00 \text{ XBC34p} + 24.00 \text{ XBC34s} + 28.00 \text{ XBC155p} + 56.00 \text{ XBC155s}$
 $+ 12.00 \text{ XBD34p}$
 $+ 12.00 \text{ XBE34p}$
 $+ 12.00 \text{ XBF34p} + 24.00 \text{ XBF34s} + 28.00 \text{ XBF155p}$
 $+ 12.00 \text{ XBG34p}$
 $+ 12.00 \text{ XCD34p}$
 $+ 12.00 \text{ XCF34p}$
 $+ 12.00 \text{ XCG34p} + 24.00 \text{ XCG34s} + 28.00 \text{ XCG155p}$
 $+ 12.00 \text{ XDE34p} + 24.00 \text{ XDE34s}$
 $+ 12.00 \text{ XDG34p}$
 $+ 12.00 \text{ XEF34p}$

SUJEITO A

Satisfação de demanda

$YABd = 23$
 $YACd = 40$
 $YADd = 25$
 $YAEd = 11$
 $YAFd + YFAh = 5$
 $YAGd + YGAh = 4$
 $YBCd = 34$
 $YBDd + YDBh = 7$
 $YBED + YEBh = 5$

$YBFd = 14$
 $YBGd + YGBh = 4$
 $YCDd + YDCh = 4$
 $YECd = 2$
 $YCFd + YFCh = 4$
 $YCGd = 25$
 $YDEd + YDEh = 9$
 $YFDh + YDFh + YDFb = 2$
 $YDGd + YGDh + YDGh + YDGB = 6$
 $YEFd + YFEh + YEFh + YEFb = 5$

Restrições de capacidade

$16 XAB34p + 32 XAB34s + 63 XAB155p \geq YDFb + YDBh + YEFb + YEBh + YFAh + YABd$
 $16 XAC34p + 32 XAC34s + 63 XAC155p + 126 XAC155s \geq YDGB + YDCh + YECd + YGAh + YACd$
 $16 XAD34p + 32 XAD34s + 63 XAD155p \geq YDEh + YDFh + YDFb + YDBh + YDGh + YDGB + YDCh + YADD$
 $16 XAE34p + 32 XAE34s + 63 XAE155p \geq YDEh + YEFh + YEFb + YEBh + YECd + YAEd$
 $16 XAF34p \geq YDFh + YEFh + YAFd$
 $16 XAG34p \geq YDGh + YAGd$
 $16 XBC34p + 32 XBC34s + 63 XBC155p + 126 XBC155s \geq YFCh + YGBh + YBCd$
 $16 XBD34p \geq YFDh + YBD$
 $16 XBE34p \geq YFEh + YBEd$
 $16 XBF34p + 32 XBF34s + 63 XBF155p \geq YFDh + YDFb + YFEh + YEFb + YFAh + YFCh + YBFd$
 $16 XBG34p \geq YBGd$
 $16 XCD34p \geq YGDh + YCD$
 $16 XCF34p \geq YCFd$
 $16 XCG34p + 32 XCG34s + 63 XCG155p \geq YGDh + YDGB + YGAh + YGBh + YCGd$
 $16 XDE34p + 32 XDE34s \geq YDEd$
 $16 XDG34p \geq YDGd$
 $16 XEF34p \geq YEFd$

Anexo 2 – Arquivo Rede7anel.lp

DADOS

Demandas

$dAB = 23,$
 $dAC = 40, dBC = 34,$
 $dAD = 25, dBD = 7, dCD = 4,$
 $dAE = 11, dBE = 5, dCE = 2, dDE = 9,$
 $dAF = 5, dBF = 14, dCF = 4, dDF = 2, dEF = 5,$
 $dAG = 4, dBG = 4, dCG = 25, dDG = 6, dEG = 0, dFG = 0$

Capacidades 34 Mbps 16, 155 Mbps 63

Custos

OLTM 34 Mbps	custo 6 \$
OLTM 155 Mbps	custo 14 \$
ADM Bidirecional 155 Mbps	custo 25 \$
ADM Unidirecional 155 Mbps	custo 22 \$

Facilidades

$XAB34p, XAC34p, XAD34p, XAE34p, XAF34p, XAG34p,$
 $XBC34p, XBD34p, XBE34p, XBF34p, XBG34p, XCD34p, XCF34p,$
 $XCG34p, XDE34p, XDG34p, XEF34p = 0/1$ com custo 12 \$
 $XAB34s, XAC34s, XAD34s, XAE34s, XBC34s, XBF34s, XCG34s,$
 $XDE34s = 0/1$ com custo 24 \$
 $XAB155p, XAC155p, XAD155p, XAE155p, XBC155p, XBF155p,$
 $XCG155p = 0/1$ com custo 28 \$
 $XAC155s, XBC155s = 0/1$ com custo 56 \$

Anéis Bidirecionais

$ZABC155p = 0/1$ com custo 75 \$
 $ZABC155s = 0/1$ com custo 150 \$
 $ZABFE155p = 0/1$ com custo 100 \$

Cadeias

$WDACG155p = 0/1$ com custo 78 \$
 $WBCG155p = 0/1$ com custo 53 \$

Anéis Unidirecionais

$UABC155p = 0/1$ com custo 66 \$

Agrupamento

cluster 1: A, D, E com hub A
 cluster 2: B, F com hub B
 cluster 3: C, G com hub C

OBJETIVO

Minimizar

$+ 12.00 XAB34p + 24.00 XAB34s + 28.00 XAB155p$
 $+ 12.00 XAC34p + 24.00 XAC34s + 28.00 XAC155p + 56.00 XAC155s$

+ 12.00 XAD34p + 24.00 XAD34s + 28.00 XAD155p
 + 12.00 XAE34p + 24.00 XAE34s + 28.00 XAE155p
 + 12.00 XAF34p
 + 12.00 XAG34p
 + 12.00 XBC34p + 24.00 XBC34s + 28.00 XBC155p + 56.00 XBC155s
 + 12.00 XBD34p
 + 12.00 XBE34p
 + 12.00 XBF34p + 24.00 XBF34s + 28.00 XBF155p
 + 12.00 XBG34p
 + 12.00 XCD34p
 + 12.00 XCF34p
 + 12.00 XCG34p + 24.00 XCG34s + 28.00 XCG155p
 + 12.00 XDE34p + 24.00 XDE34s
 + 12.00 XDG34p
 + 12.00 XEF34p
 + 75.00 ZABC155p + 150.00 ZABC155s
 + 100.00 ZABFE155p
 + 78.00 WDACG155p
 + 53.00 WBCG155p
 + 66.00 UABC155p

SUJEITO A

Satisfação de demanda

+ YABd + YABu + YAB1 + YAB2 = 23
 + YACd + YACu + YAC1 = 40
 + YADd + YADu1 + YADu2 + YAD1 + YAD2 + YAD3 + YAD4 = 25
 + YAEd + YAEu + YAE1 + YAE2 + YAE3 = 11
 + YAFd + YFAh + YAFu1 + YAFu2 + YAF1 + YAF2 + YAF3 = 5
 + YAGd + YGAh + YAGu1 + YAGu2 + YAG1 = 4
 + YBCd + YBCu + YBC1 = 34
 + YBDd + YDBh + YBDu1 + YBDu2 + YBD1 = 7
 + YBED + YEBh + YBEu + YBE1 + YBE2 + YBE3 + YBE4 = 5
 + YBFd + YBFu1 + YBFu2 + YBF1 + YBF2 + YBF3 + YBF4 = 14
 + YBGd + YGBh + YBGu1 + YBGu2 + YBG1 = 4
 + YCDd + YDCh + YCDu1 + YCDu2 + YCD1 = 4
 + YECd + YCEu1 + YCEu2 + YCE1 = 2
 + YCFd + YFCh + YCFu1 + YCFu2 + YCF1 = 4
 + YCGd + YCGu1 + YCGu2 + YCG1 + YCG2 = 25
 + YDEd + YDEh + YDEu1 + YDEu2 + YDEu3 + YDEu4 + YDE1 + YDE2 + YDE3 + YDE4 = 9
 + YFDh + YDFh + YDFb + YDFu1 + YDFu2 + YDFu3
 + YDFu4 + YDFu5 + YDFu6 + YDF1 + YDF2 + YDF3 + YDF4 = 2
 + YDGD + YGDh + YGDh + YDGB + YDGu1 + YDGu2 + YDGu3 + YDGu4 + YDGu5 + YDGu6 + YDG1 + YDG2 +
 YDG3 + YDG4 + YDG5 + YDG6 = 6
 + YEFd + YFEh + YEFh + YEFb + YEFu1 + YEFu2 + YEFu3 + YEFu4 + YEF1 + YEF2 + YEF3 = 5

Restrições de capacidade

Capacidades de cada anel bidirecional (capZ)

+ 63 ZABC155p + 126 ZABC155s - capZABC = 0
 + 63 ZABFE155p - capZABFE = 0

Capacidades de cada anel cadeia (capW)

+ 63 WDACG155p - capWDACG = 0
 + 63 WBCG155p - capWBCG = 0

Capacidades de cada arco (CF a CF)

- 16 XAB34p - 32 XAB34s - 63 XAB155p - capZABC - capZABFE + ABT + folgaABT = 0
 16 XAC34p - 32 XAC34s - 63 XAC155p - 126 XAC155s - capZABC - capWDACG + ACT + folgaACT = 0
 16 XAD34p - 32 XAD34s - 63 XAD155p - capWDACG + ADT + folgaADT = 0
 16 XAE34p - 32 XAE34s - 63 XAE155p - capZABFE + AET + folgaAET = 0
 - 16 XAF34p + AFT + folgaAFT = 0
 - 16 XAG34p + AGT + folgaAGT = 0
 - 16 XBC34p - 32 XBC34s - 63 XBC155p - 126 XBC155s - capZABC
 - capWBCG + BCT + folgaBCT = 0
 - 16 XBD34p + BDT + folgaBDT = 0
 - 16 XBE34p + BET + folgaBET = 0
 - 16 XBF34p - 32 XBF34s - 63 XBF155p - capZABFE + BFT + folgaBFT = 0
 - 16 XBG34p + BGT + folgaBGT = 0
 - 16 XCD34p + CDT + folgaCDT = 0
 - 16 XCF34p + CFT + folgaCFT = 0
 - 16 XCG34p - 32 XCG34s - 63 XCG155p - capWDACG - capWBCG + CGT + folgaCGT = 0
 - 16 XDE34p - 32 XDE34s + DET + folgaDET = 0
 - 16 XDG34p + DGT + folgaDGT = 0
 - 16 XEF34p - capZABFE + EFT + folgaEFT = 0

Capacidades de cada anel unidirecional
- 63 UABC155p + UABC_T + folgaUABC_T = 0

Caminhos que passam por cada arco

+ YABd + YFAh + YDBh + YEBh + YDFb + YEFb + YACi + YADi + YAEi + YAGi + YBCi + YBFi + YBGi + YDEi + YDE2 + YDGi + YDG2 + YEF2 + YAD3 + YAF2 + YBE4 + YBF3 - ABT = 0
+ YACd + YGAh + YDCh + YECb + YDGB + YAB1 + YAD2 + YAF1 + YBC1 + YCF1 + YCG1 + YDE3 + YDG4 + YEF1 + YAD4 + YAE3 + YAF3 + YBE2 + YBF3 + YBF4 + YDF2 - ACT = 0
+ YADd + YDBh + YDCh + YDEh + YDFh + YDFb + YDGH + YDGB + YBDu1 + YCDu1 + YDEu1 + YDFu1 + YDFu2 + YDGu1 + YDGu2 + YDE1 + YDG1 + YAE2 + YBE3 + YBE4 + YDF2 - ADT = 0
+ YAEd + YEBh + YECb + YDEh + YEFh + YEFb + YBEu + YCEu1 + YDEu2 + YDEu3 + YEFu1 + YEFu2 + YDE2 + YDE3 + YEF1 + YBE2 + YBE3 - AET = 0
+ YAFd + YDFh + YEFh + YBFu1 + YCFu1 + YDFu3 + YDFu5 + YEFu3 + YBF1 + YCF1 + YEF2 + YBF4 - AFT = 0
+ YAGd + YDGH + YBGu1 + YCGu1 + YDGu3 + YDGu5 + YBG1 + YCG1 + YDG2 + YDG4 + YAB2 - AGT = 0
+ YBCd + YGBh + YFCh + YAB1 + YAC1 + YBD1 + YBF2 + YCD1 + YCE1 + YCG2 + YDE4 + YDG3 + YDG5 + YEF3 + YAD3 + YAD4 + YAE3 + YAF2 + YAF3 + YBE2 + YBF4 + YDF3 + YDF4 - BCT = 0
+ YBDd + YFDh + YADu1 + YCDu2 + YDEu2 + YDFu3 + YDFu4 + YDGu3 + YDGu4 + YAD1 + YCD1 + YDE2 + YDG2 + YDG3 + YAD4 + YBE3 + YDF3 + YDG6 - BDT = 0
+ YBED + YFEh + YAEu + YCEu2 + YDEu1 + YDEu4 + YEFu3 + YEFu4 + YAE1 + YCE1 + YDE1 + YDE4 + YEF2 + YEF3 + YAE3 - BET = 0
+ YFAh + YBFd + YFCh + YFDh + YDFb + YFEh + YEFb + YAFu1 + YCFu2 + YDFu1 + YDFu6 + YEFu1 + YBE1 + YAF3 + YDF4 - BFT = 0
+ YBGd + YAGu1 + YCGu2 + YDGu1 + YDGu6 + YAG1 + YCG2 + YDG1 + YDG5 + YAB2 + YDG6 - BGT = 0
+ YCDd + YGDh + YADu2 + YBDu2 + YDEu3 + YDEu4 + YDFu5 + YDFu6 + YDGu5 + YDGu6 + YAD2 + YBD1 + YDE3 + YDE4 + YDG4 + YDG5 + YAD3 + YDF4 - CDT = 0
+ YCFd + YAFu2 + YBFu2 + YDFu2 + YDFu4 + YEFu2 + YEFu4 + YAF1 + YBF2 + YEF1 + YEF3 + YAF2 + YBF3 + YDF2 + YDF3 - CFT = 0
+ YGAh + YGBh + YCGd + YGDh + YDGB + YAGu2 + YBGu2 + YDGu2 + YDGu4 + YDG3 - CGT = 0
+ YDEd + YDF1 + YAE2 + YBE4 - DET = 0
+ YDGD - DGT = 0
+ YEFd + YBE1 + YDF1 - EFT = 0

Caminhos que passam por anel unidirecional

+ YABu + YACu + YADu1 + YAEu + YAFu1 + YAFu2 + YAGu1 + YAGu2 + YBCu + YBDu1 + YBDu2 + YBEu + YBFu1 + YBFu2 + YBGu1 + YBGu2 + YCDu1 + YCDu2 + YCEu1 + YCEu2 + YCFu1 + YCFu2 + YCGu1 + YCGu2 + YDEu1 + YDEu2 + YDEu3 + YDEu4 + YDFu1 + YDFu2 + YDFu3 + YDFu4 + YDFu5 + YDFu6 + YDGu1 + YDGu2 + YDGu3 + YDGu4 + YDGu5 + YDGu6 + YEFu1 + YEFu2 + YEFu3 + YEFu4 - UABC_T = 0

Anexo 3 – Santos

\ ARQUIVO_COM_MERGE_DE_CAMINHOS
min

\ CUSTO EQUIPAMENTOS PONTO A PONTO FUNCAO OBJETIVO
+ 0 INICIAL
+ 22 XWLJM1pi + 44 XWLJM1si + 60 XWLJM2pi + 120 XWLJM3pi
+ 22 XWLPP1pi + 44 XWLPP1si + 60 XWLPP2pi + 120 XWLPP3pi
+ 22 XWLTO1pi + 44 XWLTO1si + 60 XWLTO2pi + 120 XWLTO3pi
+ 22 XWLPT1pi + 44 XWLPT1si + 60 XWLPT2pi + 120 XWLPT3pi
+ 22 XWLAB1pi + 44 XWLAB1si + 60 XWLAB2pi + 120 XWLAB3pi
+ 22 XWLF1pi + 44 XWLF1si + 60 XWLF2pi
+ 22 XWLVC1pi + 44 XWLVC1si + 60 XWLVC2pi + 120 XWLVC3pi
+ 22 XJMPP1pi + 44 XJMPP1si
+ 22 XJMT01pi
+ 22 XJMPT1pi
+ 22 XJMAB1pi + 44 XJMAB1si
+ 22 XJMF1pi
+ 22 XJMVC1pi + 44 XJMVC1si + 60 XJMVC2pi + 120 XJMVC3pi
+ 22 XPPT01pi
+ 22 XPPPT1pi
+ 22 XPPAB1pi
+ 22 XPPFB1pi + 44 XPPFB1si
+ 22 XPPVC1pi
\ CUSTO EQUIPAMENTOS ANEL BIDIRECIONAL FUNCAO OBJETIVO
+ 250 ZB1_2pi + 450 ZB1_3pi
+ 150 ZB2_2pi + 270 ZB2_3pi
\ CUSTO EQUIPAMENTOS CADEIA FUNCAO OBJETIVO
+ 210 WA1_2pi + 390 WA1_3pi
\ CUSTO EQUIPAMENTOS ANEL UNIDIRECIONAL FUNCAO OBJETIVO
+ 105 UC1_2pi + 195 UC1_3pi
\ FINAL DA FUNCAO OBJETIVO

```

+ 0 FINALEQUIPO
SUBJECT TO
\ CAMINHOS DE CADA DEMANDA EQUACOES DE DEMANDA
+ YWLJM_direto + YWLJM_porPP + YWLJM_porPT + YWLJM_porAB + YWLJM_porVC + YWLJM_portO +
YWLJM_porFB + YWLJM_porPPPT + YWLJM_porPPAB + YWLJM_porPPVC + YWLJM_porPTPP +
YWLJM_porPTAB + YWLJM_porABPP + YWLJM_porABPT + YWLJM_porABVC + YWLJM_porVCPP +
YWLJM_porVCAB + YWLJM_uWLUC1JM + YWLJMaEWLZB1JM = 74

+ YWLPP_direto + YWLPP_porJM + YWLPP_porPT + YWLPP_porAB + YWLPP_porVC + YWLPP_portO +
YWLPP_porFB + YWLPP_porJMPT + YWLPP_porJMAB + YWLPP_porJMVC + YWLPP_porPTJM +
YWLPP_porABJM + YWLPP_porVCJM + YWLPP_uWLUC1PP + YWLPPaEWLZB1AB + YWLPPadWLZB1AB +
YWLPPaEWLZB1VC + YWLPPaEWLZB1JM + YWLPPadWLZB1PT = 96

+ YWLTO_direto + YWLTO_porJM + YWLTO_porPP + YWLTO_porJMPP + YWLTO_porPPJM +
YWLTO_porPTJM + YWLTO_porABJM + YWLTO_porVCJM + YWLTO_porPTPP + YWLTO_porABPP +
YWLTO_porFBJM + YWLTO_porVCPP + YWLTO_uWLUC1JM + YWLTO_uWLUC1PP + YWLTOaEWLZB1JM = 94

+ YWLPT_direto + YWLPT_porJM + YWLPT_porPP + YWLPT_porAB + YWLPT_porJMPP +
YWLPT_porJMAB + YWLPT_porPPJM + YWLPT_porABJM + YWLPT_porVCJM + YWLPT_porPPAB +
YWLPT_portOJM + YWLPT_porABPP + YWLPT_porFBJM + YWLPT_porVCPP + YWLPT_porVCAB +
YWLPT_uWLUC1JM + YWLPT_uWLUC1PP + YWLPTadWLZB1PT = 100

+ YWLAB_direto + YWLAB_porJM + YWLAB_porPP + YWLAB_porPT + YWLAB_porVC + YWLAB_porJMPP
+ YWLAB_porJMPT + YWLAB_porJMVC + YWLAB_porPPJM + YWLAB_porPTJM + YWLAB_porVCJM +
YWLAB_uWLUC1JM + YWLAB_uWLUC1PP = 138

+ YWLFB_direto + YWLFB_porJM + YWLFB_porPP + YWLFB_porJMPP + YWLFB_porPPJM +
YWLFB_porPTJM + YWLFB_porABJM + YWLFB_porVCJM + YWLFB_uWLUC1JM + YWLFB_uWLUC1PP +
YWLFBaEWLZB1JM = 17

+ YWLVC_direto + YWLVC_porJM + YWLVC_porPP + YWLVC_porAB + YWLVC_porJMPP +
YWLVC_porJMAB + YWLVC_porPPJM + YWLVC_porPTJM + YWLVC_porABJM + YWLVC_porPPAB +
YWLVC_portOJM + YWLVC_porPTPP + YWLVC_porPTAB + YWLVC_porABPP + YWLVC_porFBJM +
YWLVC_uWLUC1JM + YWLVC_uWLUC1PP = 106

+ YJMPP_direto + YJMPP_porWL + YJMPP_porPT + YJMPP_porAB + YJMPP_porVC + YJMPP_portO +
YJMPP_porFB + YJMPP_uJMUC1PP + YJMPPaEJMZB1PT + YJMPPadJMZB1AB + YJMPPaEJMZB1AB +
YJMPPcdJMWA1PT = 12

+ YJMTO_direto + YJMTO_porWL + YJMTO_porPP + YJMTO_porWLPP + YJMTO_porPPWL +
YJMTO_porPTWL + YJMTO_porABWL + YJMTO_porVCWL + YJMTO_uJMUC1WL + YJMTO_uJMUC1PP +
YJMTOadJMZB1WL = 13

+ YJMPT_direto + YJMPT_porWL + YJMPT_porPP + YJMPT_porAB + YJMPT_porWLPP +
YJMPT_porWLAB + YJMPT_porPPWL + YJMPT_porABWL + YJMPT_porVCWL + YJMPT_uJMUC1WL +
YJMPT_uJMUC1PP + YJMPTadJMZB1PT = 8

+ YJMAB_direto + YJMAB_porWL + YJMAB_porPP + YJMAB_porPT + YJMAB_porVC + YJMAB_porWLPP
+ YJMAB_porWLPT + YJMAB_porWLVC + YJMAB_porPPWL + YJMAB_porPTWL + YJMAB_porVCWL +
YJMAB_uJMUC1WL + YJMAB_uJMUC1PP = 28

+ YJMFB_direto + YJMFB_porWL + YJMFB_porPP + YJMFB_porWLPP + YJMFB_porPPWL +
YJMFB_porPTWL + YJMFB_porABWL + YJMFB_porVCWL + YJMFB_uJMUC1WL + YJMFB_uJMUC1PP +
YJMFBadJMZB1WL = 3

+ YJMVC_direto + YJMVC_porWL + YJMVC_porPP + YJMVC_porAB + YJMVC_porWLPP +
YJMVC_porWLAB + YJMVC_porPPWL + YJMVC_porPTWL + YJMVC_porABWL + YJMVC_uJMUC1WL +
YJMVC_uJMUC1PP + YJMVCaEJMZB1VC = 4

+ YPPTO_direto + YPPTO_porWL + YPPTO_porJM + YPPTO_porWLJM + YPPTO_porJMWL +
YPPTO_porPTWL + YPPTO_porPTJM + YPPTO_porABWL + YPPTO_porABJM + YPPTO_porVCWL +
YPPTO_porVCJM + YPPTO_uPPUC1WL + YPPTO_uPPUC1JM + YPPTOceVCWA1WL + YPPTOcdPTWA1JM = 15

+ YPPPT_direto + YPPPT_porWL + YPPPT_porJM + YPPPT_porAB + YPPPT_porWLJM +
YPPPT_porJMWL + YPPPT_uPPUC1WL + YPPPT_uPPUC1JM + YPPPTadVCZB1PT + YPPPTceVCWA1PT +
YPPPTcdJMWA1PT = 10

+ YPPAB_direto + YPPAB_porWL + YPPAB_porJM + YPPAB_porPT + YPPAB_porVC + YPPAB_porWLJM
+ YPPAB_porJMWL + YPPAB_uPPUC1WL + YPPAB_uPPUC1JM + YPPABcdJMWA1AB + YPPABceWLWA1AB +
YPPABceJMWA1AB + YPPABcdWLWA1AB = 4

+ YPPFB_direto + YPPFB_porWL + YPPFB_porJM + YPPFB_porWLJM + YPPFB_porJMWL +
YPPFB_porPTWL + YPPFB_porPTJM + YPPFB_porABWL + YPPFB_porABJM + YPPFB_porVCWL +
YPPFB_porVCJM + YPPFB_uPPUC1WL + YPPFB_uPPUC1JM + YPPFBaEVCZB1WL + YPPFBadPTZB1JM +
YPPFBceABWA1JM + YPPFBcdABWA1WL = 16

```

```

+ YPPVC_direto + YPPVC_porWL + YPPVC_porJM + YPPVC_porAB + YPPVC_porWLJM +
YPPVC_porJMWL + YPPVC_uPPUC1WL + YPPVC_uPPUC1JM + YPPVCaePTZB1VC + YPPVCcdPTWA1VC +
YPPVCceWLWA1VC = 5

\ CAPACIDADES DE CADA ANEL BIDIRECIONAL (CAPZ)
+ 63 ZB1_2pi + 252 ZB1_3pi - CAPZB1 = 0
+ 63 ZB2_2pi + 252 ZB2_3pi - CAPZB2 = 0
\ CAPACIDADES DE CADA CADEIA (CAPW)
+ 63 WA1_2pi + 252 WA1_3pi - CAPWA1 = 0
\ CAPACIDADES DO ARCO (CF A CF) EQUACAO CAPACIDADE EQUIPAMENTOS
\ ANEL BIDIRECIONAL CADEIA PONTO A PONTO
- 16 XWLJMIpi - 32 XWLJMI1si - 63 XWLJM2pi - 252 XWLJM3pi - CAPZB1 - CAPZB2 - CAPWA1 +
WLJMT + folgaWLJMT = 0
- 16 XWLPP1pi - 32 XWLPP1si - 63 XWLPP2pi - 252 XWLPP3pi - CAPZB2 + WLPPT + folgaWLPPT =
0
- 16 XWLT01pi - 32 XWLT01si - 63 XWLT02pi - 252 XWLT03pi + WLTOT + folgaWLTOT = 0
- 16 XWLPT1pi - 32 XWLPT1si - 63 XWLPT2pi - 252 XWLPT3pi - CAPZB1 - CAPWA1 + WLPPT +
folgaWLPPT = 0
- 16 XWLAB1pi - 32 XWLAB1si - 63 XWLAB2pi - 252 XWLAB3pi + WLABT + folgaWLABT = 0
- 16 XWLFB1pi - 32 XWLFB1si - 63 XWLFB2pi + WLFBT + folgaWLFBT = 0
- 16 XWLVC1pi - 32 XWLVC1si - 63 XWLVC2pi - 252 XWLVC3pi + WLVCCT + folgaWLVCCT = 0
- 16 XJMPP1pi - 32 XJMPP1si - CAPZB2 + JMPPT + folgaJMPPT = 0
- 16 XJMT01pi + JMTOT + folgaJMTOT = 0
- 16 XJMPT1pi + JMPTT + folgaJMPTT = 0
- 16 XJMAB1pi - 32 XJMAB1si + JMABT + folgaJMABT = 0
- 16 XJMFB1pi + JMFBT + folgaJMFBT = 0
- 16 XJMVC1pi - 32 XJMVC1si - 63 XJMVC2pi - 252 XJMVC3pi - CAPZB1 - CAPWA1 + JMVCT +
folgaJMVCT = 0
- 16 XPPT01pi + PPTOT + folgaPPTOT = 0
- 16 XPPPT1pi + PPPTT + folgaPPPTT = 0
- 16 XPPAB1pi + PPABT + folgaPPABT = 0
- 16 XPPFB1pi - 32 XPPFB1si + PPFBT + folgaPPFBT = 0
- 16 XPPVC1pi + PPVCT + folgaPPVCT = 0
- CAPZB1 - CAPWA1 + PTABT + folgaPTABT = 0
- CAPZB1 + ABVCT + folgaABVCT = 0
\ CAPACIDADES DE ANEL UNIDIRECIONAL EQUACAO CAPACIDADE EQUIPAMENTOS
- 63 UC1_2pi - 252 UC1_3pi + UC1_T + folgaUC1_T = 0
\ CAMINHOS QUE PASSAM POR CADA ARCO EQUACAO CAPACIDADE CAMINHOS

+ YWLJM_direto + YWLPP_porJM + YWLPP_porJMPT + YWLPP_porJMAB + YWLPP_porJMVC +
YWLPPadWLZB1AB + YWLPPadWLZB1PT + YWLT0_porJM + YWLT0_porJMPP + YWLPT_porJM +
YWLPT_porJMPP + YWLPT_porJMAB + YWLPTadWLZB1PT + YWLAB_porJM + YWLAB_porJMPP +
YWLAB_porJMPT + YWLAB_porJMVC + YWLFB_porJM + YWLFB_porJMPP + YWLVC_porJM +
YWLVC_porJMPP + YWLVC_porJMAB + YJMPP_porWL + YJMPPaeJMZB1PT + YJMPPaeJMZB1AB +
YJMT0_porWL + YJMT0_porWLPP + YJMPT_porWL + YJMPT_porWLPP + YJMPT_porWLAB + YJMAB_porWL +
YJMAB_porWLPP + YJMAB_porWLPT + YJMAB_porWLVC + YJMFB_porWL + YJMFB_porWLPP +
YJMVC_porWL + YJMVC_porWLPP + YJMVC_porWLAB + YJMVCaeJMZB1VC + YPPT0_porWLJM +
YPPT0_porJMWL + YPPT0ceVCWA1WL + YPPT0cdPTWA1JM + YPPPT_porWLJM + YPPPT_porJMWL +
YPPPTceVCWA1PT + YPPAB_porWLJM + YPPAB_porJMWL + YPPABceJMWAB + YPPABcdWLWA1AB +
YPPFB_porWLJM + YPPFB_porJMWL + YPPFbaeVCZB1WL + YPPFBadPTZB1JM + YPPVC_porWLJM +
YPPVC_porJMWL + YPPVCcdPTWA1VC - WLJMT = 0

+ YWLJM_porPP + YWLJM_porPPPT + YWLJM_porPPAB + YWLJM_porPPVC + YWLPP_direto +
YWLTO_porPP + YWLTO_porPPJM + YWLPT_porPP + YWLPT_porPPJM + YWLPT_porPPAB + YWLAB_porPP +
YWLAB_porPPJM + YWLFB_porPP + YWLFB_porPPJM + YWLVC_porPP + YWLVC_porPPJM +
YWLVC_porPPAB + YJMPP_porWL + YJMT0_porWLPP + YJMT0_porPPWL + YJMPT_porWLPP +
YJMPT_porPPWL + YJMAB_porWLPP + YJMAB_porPPWL + YJMFB_porWLPP + YJMFB_porPPWL +
YJMVC_porWLPP + YJMVC_porPPWL + YPPT0_porWL + YPPT0_porWLJM + YPPPT_porWL +
YPPPT_porWLJM + YPPAB_porWL + YPPAB_porWLJM + YPPABceWLWA1AB + YPPABcdWLWA1AB +
YPPFB_porWL + YPPFB_porWLJM + YPPVC_porWL + YPPVC_porWLJM + YPPVCceWLWA1VC - WLPPT = 0

+ YWLJM_portO + YWLPP_portO + YWLT0_direto + YWLPT_portOJM + YWLVC_portOJM +
YJMT0_porWL + YJMT0_porPPWL + YJMT0_porPTWL + YJMT0_porABWL + YJMT0_porVCWL +
YJMT0_uJMUC1WL + YJMT0adJMZB1WL + YPPT0_porWL + YPPT0_porJMWL + YPPT0_porPTWL +
YPPT0_porABWL + YPPT0_porVCWL + YPPT0_uPPUC1WL + YPPT0ceVCWA1WL - WLTOT = 0

+ YWLJM_porPT + YWLJM_porPTPP + YWLJM_porPTAB + YWLJMaewLZB1JM + YWLPP_porPT +
YWLPP_porPTJM + YWLPPaeWLZB1AB + YWLPPaeWLZB1VC + YWLPPaeWLZB1JM + YWLT0_porPTJM +
YWLT0_porPTPP + YWLT0aeWLZB1JM + YWLPT_direto + YWLAB_porPT + YWLAB_porPTJM +
YWLFB_porPTJM + YWLFBaeWLZB1JM + YWLVC_porPTJM + YWLVC_porPTPP + YWLVC_porPTAB +
YJMPPaeJMZB1PT + YJMPPaeJMZB1AB + YJMT0_porPTWL + YJMT0adJMZB1WL + YJMPT_porWL +
YJMPT_porPPWL + YJMPT_porABWL + YJMPT_porVCWL + YJMPT_uJMUC1WL + YJMAB_porWLPT +
YJMAB_porPTWL + YJMFB_porPTWL + YJMFBadJMZB1WL + YJMVC_porPTWL + YJMVCaeJMZB1VC +
YPPT0_porPTWL + YPPT0cdPTWA1JM + YPPPT_porWL + YPPPT_porJMWL + YPPPT_uPPUC1WL +
YPPPTceVCWA1PT + YPPABceWLWA1AB + YPPABceJMWAB + YPPFB_porPTWL + YPPFBadPTZB1JM +
YPPFBcdABWA1WL + YPPVCcdPTWA1VC + YPPVCceWLWA1VC - WLPPT = 0

```

+ YWLJM_porAB + YWLJM_porABPP + YWLJM_porABPT + YWLJM_porABVC + YWLPP_porAB +
 YWLPP_porABJM + YWLTO_porABJM + YWLTO_porABPP + YWLPT_porAB + YWLPT_porABJM +
 YWLPT_porABPP + YWLAB_direto + YWLFB_porABJM + YWLVC_porAB + YWLVC_porABJM +
 YWLVC_porABPP + YJMTO_porABWL + YJMPT_porWLAB + YJMPT_porABWL + YJMAB_porWL +
 YJMAB_porPPWL + YJMAB_porPTWL + YJMAB_porVCWL + YJMAB_uJMUC1WL + YJMFB_porABWL +
 YJMVC_porWLAB + YJMVC_porABWL + YPPTO_porABWL + YPPAB_porWL + YPPAB_porJMWL +
 YPPAB_uPPUC1WL + YPPFB_porABWL - WLABT = 0

+ YWLJM_porFB + YWLPP_porFB + YWLTO_porFBJM + YWLPT_porFBJM + YWLFB_direto +
 YWLVC_porFBJM + YJMFB_porWL + YJMFB_porPPWL + YJMFB_porPTWL + YJMFB_porABWL +
 YJMFB_porVCWL + YJMFB_uJMUC1WL + YJMFBadJMB1WL + YPPFB_porWL + YPPFB_porJMWL +
 YPPFB_porPTWL + YPPFB_porABWL + YPPFB_porVCWL + YPPFB_uPPUC1WL + YPPFBaeVCZB1WL +
 YPPFBcdABW1WL - WLFBT = 0

+ YWLJM_porVC + YWLJM_porVCP + YWLJM_porVCAB + YWLPP_porVC + YWLPP_porVCJM +
 YWLTO_porVCJM + YWLTO_porVCP + YWLPT_porVCJM + YWLPT_porVCP + YWLPT_porVCAB +
 YWLAB_porVC + YWLAB_porVCJM + YWLFB_porVCJM + YWLVC_direto + YJMTO_porVCWL +
 YJMPT_porVCWL + YJMAB_porWLAB + YJMAB_porVCWL + YJMFB_porVCWL + YJMVC_porWL +
 YJMVC_porPPWL + YJMVC_porPTWL + YJMVC_porABWL + YJMVC_uJMUC1WL + YPPTO_porVCWL +
 YPPFB_porVCWL + YPPVC_porWL + YPPVC_porJMWL + YPPVC_uPPUC1WL - WLVCT = 0

+ YWLJM_porPP + YWLJM_porPTPP + YWLJM_porABPP + YWLJM_porVCP + YWLPP_porJM +
 YWLPP_porPTJM + YWLPP_porABJM + YWLPP_porVCJM + YWLPPaeWLZB1JM + YWLTO_porJMPP +
 YWLTO_porPPJM + YWLPT_porJMPP + YWLPT_porPPJM + YWLAB_porJMPP + YWLAB_porPPJM +
 YWLFB_porJMPP + YWLFB_porPPJM + YWLVC_porJMPP + YWLVC_porPPJM + YJMPP_direto +
 YJMTO_porPP + YJMTO_porPPWL + YJMPT_porPP + YJMPT_porPPWL + YJMAB_porPP + YJMAB_porPPWL +
 YJMFB_porPP + YJMFB_porPPWL + YJMVC_porPP + YJMVC_porPPWL + YPPTO_porJM +
 YPPTO_porJMWL + YPPPT_porJM + YPPPT_porJMWL + YPPPTcdJMW1PT + YPPAB_porJM +
 YPPAB_porJMWL + YPPABcdJMW1AB + YPPABcdJMW1AB + YPPFB_porJM + YPPFB_porJMWL +
 YPPVC_porJM + YPPVC_porJMWL - JMPPT = 0

+ YWLJM_porTO + YWLTO_porJM + YWLTO_porPPJM + YWLTO_porPTJM + YWLTO_porABJM +
 YWLTO_porVCJM + YWLTO_porFBJM + YWLTO_uWLUC1JM + YWLTOaeWLZB1JM + YWLPT_porTOJM +
 YWLVC_porTOJM + YJMPP_porTO + YJMTO_direto + YPPTO_porJM + YPPTO_porWLAB + YPPTO_porPTJM +
 YPPTO_porABJM + YPPTO_porVCJM + YPPTO_uPPUC1JM + YPPTOcdPTW1JM - JMTOT = 0

+ YWLJM_porPT + YWLJM_porPPPT + YWLJM_porABPT + YWLPP_porJMPT + YWLPP_porPTJM +
 YWLTO_porPTJM + YWLPT_porJM + YWLPT_porPPJM + YWLPT_porABJM + YWLPT_porVCJM +
 YWLPT_porTOJM + YWLPT_porFBJM + YWLPT_uWLUC1JM + YWLAB_porJMPT + YWLAB_porPTJM +
 YWLFB_porPTJM + YWLVC_porPTJM + YJMPP_porPT + YJMTO_porPTWL + YJMPT_direto + YJMAB_porPT +
 YJMAB_porPTWL + YJMFB_porPTWL + YJMVC_porPTWL + YPPTO_porPTJM + YPPPT_porJM +
 YPPPT_porWLAB + YPPPT_uPPUC1JM + YPPFB_porPTJM - JMPTT = 0

+ YWLJM_porAB + YWLJM_porPPAB + YWLJM_porPTAB + YWLJM_porVCAB + YWLPP_porJMAB +
 YWLPP_porABJM + YWLTO_porABJM + YWLPT_porJMAB + YWLPT_porABJM + YWLAB_porJM +
 YWLAB_porPPJM + YWLAB_porPTJM + YWLAB_porVCJM + YWLAB_uWLUC1JM + YWLFB_porABJM +
 YWLVC_porJMAB + YWLVC_porABJM + YJMPP_porAB + YJMTO_porABWL + YJMPT_porAB +
 YJMPT_porABWL + YJMAB_direto + YJMFB_porABWL + YJMVC_porAB + YJMVC_porABWL +
 YPPTO_porABJM + YPPAB_porJM + YPPAB_porWLAB + YPPAB_uPPUC1JM + YPPFB_porABJM - JMABT = 0

+ YWLJM_porFB + YWLTO_porFBJM + YWLPT_porFBJM + YWLFB_porJM + YWLFB_porPPJM +
 YWLFB_porPTJM + YWLFB_porABJM + YWLFB_porVCJM + YWLFB_uWLUC1JM + YWLFBaeWLZB1JM +
 YWLVC_porFBJM + YJMPP_porFB + YJMFB_direto + YPPFB_porJM + YPPFB_porWLAB + YPPFB_porPTJM +
 YPPFB_porABJM + YPPFB_porVCJM + YPPFB_uPPUC1JM + YPPFBadPTZB1JM + YPPFBceABW1JM -
 JMFBT = 0

+ YWLJM_porVC + YWLJM_porPPVC + YWLJM_porABVC + YWLJMaeWLZB1JM + YWLPP_porJMVC +
 YWLPP_porVCJM + YWLPPadWLZB1AB + YWLPPaeWLZB1JM + YWLPPadWLZB1PT + YWLTO_porVCJM +
 YWLTOaeWLZB1JM + YWLPT_porVCJM + YWLPTadWLZB1PT + YWLAB_porJMVC + YWLAB_porVCJM +
 YWLFB_porVCJM + YWLFBaeWLZB1JM + YWLVC_porJM + YWLVC_porPPJM + YWLVC_porPTJM +
 YWLVC_porABJM + YWLVC_porTOJM + YWLVC_porFBJM + YWLVC_uWLUC1JM + YJMPP_porVC +
 YJMPPadJMB1AB + YJMPPcdJMW1PT + YJMTO_porVCWL + YJMTOadJMB1WL + YJMPT_porVCWL +
 YJMPTadJMB1PT + YJMAB_porVC + YJMAB_porVCWL + YJMFB_porVCWL + YJMFBadJMB1WL +
 YJMVC_direto + YPPTO_porVCJM + YPPTOceVCW1WL + YPPPTceVCW1PT + YPPPTcdJMW1PT +
 YPPABcdJMW1AB + YPPABcdJMW1AB + YPPFB_porVCJM + YPPFBaeVCZB1WL + YPPFBceABW1JM +
 YPPVC_porJM + YPPVC_porWLAB + YPPVC_uPPUC1JM + YPPVCcdPTW1VC - JMVCT = 0

+ YWLPP_porTO + YWLTO_porPP + YWLTO_porJMPP + YWLTO_porPTPP + YWLTO_porABPP +
 YWLTO_porVCP + YWLTO_uWLUC1PP + YJMPP_porTO + YJMTO_porPP + YJMTO_porWLAB +
 YJMTO_uJMUC1PP + YPPTO_direto - PPTOT = 0

+ YWLJM_porPPPT + YWLJM_porPTPP + YWLPP_porPT + YWLPP_porJMPT + YWLPPadWLZB1PT +
 YWLTO_porPTPP + YWLPT_porPP + YWLPT_porJMPP + YWLPT_porABPP + YWLPT_porVCP +
 YWLPT_uWLUC1PP + YWLVC_porPTPP + YJMPP_porPT + YJMPPaeJMB1PT + YJMPPcdJMW1PT +
 YJMPT_porPP + YJMPT_porWLAB + YJMPT_uJMUC1PP + YPPTO_porPTWL + YPPTO_porPTJM +

```

YPPTOcdPTWA1JM + YPPPT_direto + YPPAB_porPT + YPPFB_porPTWL + YPPFB_porPTJM +
YPPFBadPTZB1JM + YPPVCaePTZB1VC + YPPVCcdPTWA1VC - PPPTT = 0

+ YWLJM_porPPAB + YWLJM_porABPP + YWLPP_porAB + YWLPP_porJMAB + YWLPPaeWLZB1AB +
YWLPPadWLZB1AB + YWLTO_porABPP + YWLPT_porPPAB + YWLPT_porABPP + YWLAB_porPP +
YWLAB_porJMPP + YWLAB_uWLUC1PP + YWLVC_porPPAB + YWLVC_porABPP + YJMPP_porAB +
YJMPPadJMZB1AB + YJMPPaeJMZB1AB + YJMAB_porPP + YJMAB_porWLPP + YJMAB_uJMUC1PP +
YPPTO_porABWL + YPPTO_porABJM + YPPPT_porAB + YPPAB_direto + YPPFB_porABWL +
YPPFB_porABJM + YPPFBceABWA1JM + YPPFBcdABWA1WL + YPPVC_porAB - PPABT = 0

+ YWLPP_porFB + YWLFB_porPP + YWLFB_porJMPP + YWLFB_uWLUC1PP + YJMPP_porFB +
YJMFb_porPP + YJMFb_porWLPP + YJMFb_uJMUC1PP + YPPFB_direto - PPFBT = 0

+ YWLJM_porPPVC + YWLJM_porVCPP + YWLPP_porVC + YWLPP_porJMVC + YWLPPaeWLZB1VC +
YWLTO_porVCPP + YWLPT_porVCPP + YWLVC_porPP + YWLVC_porJMPP + YWLVC_porPTPP +
YWLVC_porABPP + YWLVC_uWLUC1PP + YJMPP_porVC + YJMVC_porPP + YJMVC_porWLPP +
YJMVC_uJMUC1PP + YPPTO_porVCWL + YPPTO_porVCJM + YPPTOceVCWA1WL + YPPPTadVCZB1PT +
YPPPTceVCWA1PT + YPPAB_porVC + YPPFB_porVCWL + YPPFB_porVCJM + YPPFBaeVCZB1WL +
YPPVC_direto - PPVCT = 0

+ YWLJM_porPTAB + YWLJM_porABPT + YWLJMaewLZB1JM + YWLPPaeWLZB1AB + YWLPPaeWLZB1VC +
YWLPPaeWLZB1JM + YWLPPadWLZB1PT + YWLTOaeWLZB1JM + YWLPT_porAB + YWLPT_porJMAB +
YWLPT_porPPAB + YWLPT_porVCAB + YWLPTadWLZB1PT + YWLAB_porPT + YWLAB_porJMPT +
YWLFBaeWLZB1JM + YWLVC_porPTAB + YJMPPaeJMZB1AB + YJMPPcdJMWAlPT + YJMTOadJMZB1WL +
YJMPT_porAB + YJMPT_porWLAB + YJMPTadJMZB1PT + YJMAB_porPT + YJMAB_porWLPT +
YJMFbadJMZB1WL + YJMVCaeJMZB1VC + YPPPT_porAB + YPPPTadVCZB1PT + YPPPTcdJMWAlPT +
YPPAB_porPT + YPPABceWLWA1AB + YPPABceJMWAlAB + YPPFBcdABWA1WL + YPPVCaePTZB1VC +
YPPVCceWLWA1VC - PTABT = 0

+ YWLJM_porABVC + YWLJM_porVCAB + YWLJMaewLZB1JM + YWLPPadWLZB1AB + YWLPPaeWLZB1VC +
YWLPPaeWLZB1JM + YWLPPadWLZB1PT + YWLTOaeWLZB1JM + YWLPT_porVCAB + YWLPTadWLZB1PT +
YWLAB_porVC + YWLAB_porJMVC + YWLFBaeWLZB1JM + YWLVC_porAB + YWLVC_porJMAB +
YWLVC_porPPAB + YWLVC_porPTAB + YJMPPadJMZB1AB + YJMPPcdJMWAlPT + YJMTOadJMZB1WL +
YJMPTadJMZB1PT + YJMAB_porVC + YJMAB_porWLVC + YJMFbadJMZB1WL + YJMVC_porAB +
YJMVC_porWLAB + YJMVCaeJMZB1VC + YPPPTadVCZB1PT + YPPPTcdJMWAlPT + YPPAB_porVC +
YPPABcdJMWAlAB + YPPABcdWLWA1AB + YPPFBceABWA1JM + YPPVC_porAB + YPPVCaePTZB1VC +
YPPVCceWLWA1VC - ABVCT = 0
\ CAMINHOS QUE PASSAM POR ANEL UNIDIRECIONAL EQUACAO CAPACIDADE CAMINHOS
+ YWLJM_uWLUC1JM + YWLPP_uWLUC1PP + YWLTO_uWLUC1JM + YWLTO_uWLUC1PP + YWLPT_uWLUC1JM +
YWLPT_uWLUC1PP + YWLAB_uWLUC1JM + YWLAB_uWLUC1PP + YWLFB_uWLUC1JM + YWLFB_uWLUC1PP +
YWLVC_uWLUC1JM + YWLVC_uWLUC1PP + YJMPP_uJMUC1PP + YJMTO_uJMUC1WL + YJMTO_uJMUC1PP +
YJMPT_uJMUC1WL + YJMPT_uJMUC1PP + YJMAB_uJMUC1WL + YJMAB_uJMUC1PP + YJMFb_uJMUC1WL +
YJMFb_uJMUC1PP + YJMVC_uJMUC1WL + YJMVC_uJMUC1PP + YPPTO_uPPUC1WL + YPPTO_uPPUC1JM +
YPPPT_uPPUC1WL + YPPPT_uPPUC1JM + YPPAB_uPPUC1WL + YPPAB_uPPUC1JM + YPPFB_uPPUC1WL +
YPPFB_uPPUC1JM + YPPVC_uPPUC1WL + YPPVC_uPPUC1JM - UC1_T = 0

```

Anexo 4 – Belo Horizonte

```

\ ARQUIVO_COM_MERGE_DE_CAMINHOS
min

```

```

\ CUSTO EQUIPAMENTOS PONTO A PONTO FUNCAO OBJETIVO

```

```

+ 0 INICIAL
+ 22 XHGMP1pi + 44 XHGMP1si + 60 XHGMP2pi + 120 XHGMP3pi + 240 XHGMP3si
+ 22 XHGG01pi + 44 XHGG01si + 60 XHGG02pi + 120 XHGG03pi + 240 XHGG03si
+ 22 XHGBG1pi + 44 XHGBG1si + 60 XHGBG2pi + 120 XHGBG3pi + 240 XHGBG3si
+ 22 XHGC11pi + 44 XHGC11si + 60 XHGC12pi + 120 XHGC13pi
+ 22 XHGPA1pi + 44 XHGPA1si + 60 XHGPA2pi + 120 XHGPA3pi
+ 22 XHGBT1pi + 44 XHGBT1si + 60 XHGBT2pi + 120 XHGBT3pi
+ 22 XHGCP1pi + 44 XHGCP1si + 60 XHGCP2pi + 120 XHGCP3pi
+ 22 XHGBA1pi + 44 XHGBA1si + 60 XHGBA2pi + 120 XHGBA3pi
+ 22 XMPG01pi + 44 XMPG01si + 60 XMPG02pi + 120 XMPG03pi
+ 22 XMPBG1pi + 44 XMPBG1si + 60 XMPBG2pi
+ 22 XMPC11pi + 44 XMPC11si + 60 XMPC12pi
+ 22 XMPPA1pi + 44 XMPPA1si + 60 XMPPA2pi
+ 22 XMPBT1pi + 44 XMPBT1si + 60 XMPBT2pi
+ 22 XMPCP1pi
+ 22 XMPBA1pi
+ 22 XGOBG1pi + 44 XGOBG1si + 60 XGOBG2pi
+ 22 XGOC11pi + 44 XGOC11si
+ 22 XGOPA1pi + 44 XGOPA1si
+ 22 XGOBT1pi + 44 XGOBT1si + 60 XGOBT2pi
+ 22 XGOC1pi

```

```

+ 22 XGOBA1pi
+ 22 XBGC11pi + 44 XBGC11si + 60 XBGC12pi
+ 22 XBGP11pi + 44 XBGP11si
+ 22 XBGBT1pi + 44 XBGBT1si
+ 22 XBGC11pi
+ 22 XBGBA1pi
+ 22 XCIP11pi + 44 XCIP11si + 60 XCIP12pi
+ 22 XCIB11pi + 44 XCIB11si
+ 22 XCIC11pi
+ 22 XCIBA1pi
+ 22 XPAB11pi + 44 XPAB11si
+ 22 XPAC11pi
\ CUSTO EQUIPAMENTOS ANEL BIDIRECIONAL FUNCAO OBJETIVO
+ 150 ZB1_2pi + 270 ZB1_3pi
+ 200 ZB2_2pi + 360 ZB2_3pi
+ 150 ZB3_2pi + 270 ZB3_3pi
+ 150 ZB4_2pi + 270 ZB4_3pi
+ 200 ZB5_2pi + 360 ZB5_3pi + 720 ZB5_3si
+ 150 ZB6_2pi + 270 ZB6_3pi + 540 ZB6_3si
\ CUSTO EQUIPAMENTOS CADEIA FUNCAO OBJETIVO
+ 110 WA1_2pi + 210 WA1_3pi + 420 WA1_3si
+ 110 WA2_2pi + 210 WA2_3pi + 420 WA2_3si
\ CUSTO EQUIPAMENTOS ANEL UNIDIRECIONAL FUNCAO OBJETIVO
+ 140 UC1_2pi + 260 UC1_3pi + 520 UC1_3si
\ FINAL DA FUNCAO OBJETIVO
+ 0 FINALEQUIPO
SUBJECT TO
\ CAMINHOS DE CADA DEMANDA EQUACOES DE DEMANDA
+ YHGMP_direto + YHGMP_porBG + YHGMP_porCI + YHGMP_porPA + YHGMP_porCP + YHGMP_porGO +
YHGMP_porBT + YHGMP_porBA + YHGMP_porBGCI + YHGMP_porBGPA + YHGMP_porCIBG +
YHGMP_porCIPA + YHGMP_porPABG + YHGMP_porPACI + YHGMP_uHGUC1MP + YHGMPaeHGZB2CP +
YHGMPadHGZB2CP + YHGMPaeHGZB3PA + YHGMPadHGZB4CI = 190

+ YHGGO_direto + YHGGO_porMP + YHGGO_porBG + YHGGO_porCI + YHGGO_porPA + YHGGO_porCP +
YHGGO_porBT + YHGGO_porBA + YHGGO_porMPBG + YHGGO_porMPCI + YHGGO_porMPPA +
YHGGO_porBGMP + YHGGO_porBGCI + YHGGO_porBGPA + YHGGO_porCIMP + YHGGO_porCIBG +
YHGGO_porCIPA + YHGGO_porPAMP + YHGGO_porPABG + YHGGO_porPACI + YHGGO_uHGUC1GO +
YHGGOaeHGZB2CP + YHGGOadHGZB2CP + YHGGOaeHGZB3PA + YHGGOadHGZB4CI = 140

+ YHGBG_direto + YHGBG_porMP + YHGBG_porCI + YHGBG_porPA + YHGBG_porCP + YHGBG_porGO +
YHGBG_porBT + YHGBG_porBA + YHGBG_porMPCI + YHGBG_porMPPA + YHGBG_porCIMP +
YHGBG_porCIPA + YHGBG_porPAMP + YHGBG_porPABG + YHGBG_porPACI + YHGBG_uHGUC1BG + YHGBGaeHGZB2CP +
YHGBGadHGZB2CP + YHGBGaeHGZB3PA + YHGBGadHGZB4CI = 130

+ YHGC1_direto + YHGC1_porMP + YHGC1_porBG + YHGC1_porPA + YHGC1_porCP + YHGC1_porGO +
YHGC1_porBT + YHGC1_porBA + YHGC1_porMPBG + YHGC1_porMPPA + YHGC1_porBGMP +
YHGC1_porBGPA + YHGC1_porPAMP + YHGC1_porPABG + YHGC1_uHGUC1MP + YHGC1_uHGUC1BG +
YHGC1_uHGUC1GO + YHGC1adHGZB2CI + YHGC1aeHGZB3PA + YHGC1aeHGZB5GO + YHGC1adHGZB5GO = 90

+ YHGPA_direto + YHGPA_porMP + YHGPA_porBG + YHGPA_porCI + YHGPA_porCP + YHGPA_porGO +
YHGPA_porBT + YHGPA_porMPBG + YHGPA_porMPCI + YHGPA_porBGMP + YHGPA_porBGCI +
YHGPA_porCIMP + YHGPA_porCIBG + YHGPA_uHGUC1MP + YHGPA_uHGUC1BG + YHGPA_uHGUC1GO +
YHGPAaeHGZB2PA + YHGPAadHGZB4CI + YHGPAaeHGZB5GO + YHGPAadHGZB5GO = 95

+ YHGBT_direto + YHGBT_porMP + YHGBT_porBG + YHGBT_porCI + YHGBT_porPA + YHGBT_porGO +
YHGBT_porMPBG + YHGBT_porMPCI + YHGBT_porMPPA + YHGBT_porBGMP + YHGBT_porBGCI +
YHGBT_porBGPA + YHGBT_porCIMP + YHGBT_porCIBG + YHGBT_porCIPA + YHGBT_porPAMP +
YHGBT_porPABG + YHGBT_porPACI + YHGBT_uHGUC1MP + YHGBT_uHGUC1BG + YHGBT_uHGUC1GO +
YHGBTaeHGZB3PA + YHGBTadHGZB4CI = 70

+ YHGCP_direto + YHGCP_porMP + YHGCP_porBG + YHGCP_porCI + YHGCP_porPA + YHGCP_porGO +
YHGCP_porMPBG + YHGCP_porMPCI + YHGCP_porMPPA + YHGCP_porBGMP + YHGCP_porBGCI +
YHGCP_porBGPA + YHGCP_porCIMP + YHGCP_porCIBG + YHGCP_porCIPA + YHGCP_porPAMP +
YHGCP_porPABG + YHGCP_porPACI + YHGCP_uHGUC1MP + YHGCP_uHGUC1BG + YHGCP_uHGUC1GO +
YHGCPaeHGZB5GO + YHGCPadHGZB5GO = 100

+ YHGBA_direto + YHGBA_porMP + YHGBA_porBG + YHGBA_porCI + YHGBA_porGO + YHGBA_porMPBG
+ YHGBA_porMPCI + YHGBA_porBGMP + YHGBA_porBGCI + YHGBA_porCIMP + YHGBA_porCIBG +
YHGBA_porPAMP + YHGBA_porPABG + YHGBA_porPACI + YHGBA_uHGUC1MP + YHGBA_uHGUC1BG +
YHGBA_uHGUC1GO + YHGBAadHGZB4CI + YHGBAaeHGZB5GO + YHGBAadHGZB5GO + YHGBAadHGZB2CI = 90

+ YMPGO_direto + YMPGO_porHG + YMPGO_porBG + YMPGO_porCI + YMPGO_porPA + YMPGO_porCP +
YMPGO_porBT + YMPGO_porBA + YMPGO_porHBG + YMPGO_porHGCI + YMPGO_porHGPA +
YMPGO_porBGHG + YMPGO_porCIHG + YMPGO_porPAHG + YMPGO_uMPUC1GO + YMPGOadCPZB3HG +
YMPGOaeHGZB3CP + YMPGOcdCIWA2BG + YMPGOceBGWA2CI = 130

```

+ YMPBG_direto + YMPBG_porHG + YMPBG_porCI + YMPBG_porPA + YMPBG_porCP + YMPBG_porGO +
 YMPBG_porBT + YMPBG_porBA + YMPBG_porHGCI + YMPBG_porHGPA + YMPBG_porCIHG +
 YMPBG_porPAHG + YMPBG_uMPUC1BG + YMPBGadCPZB3HG + YMPBGaeHGZB3CP + YMPBGaeCIZB1PA +
 YMPBGadPAZB1CI = 80

+ YMPCI_direto + YMPCI_porHG + YMPCI_porBG + YMPCI_porPA + YMPCI_porCP + YMPCI_porGO +
 YMPCI_porBT + YMPCI_porBA + YMPCI_porHGBG + YMPCI_porHGPA + YMPCI_porBGHG +
 YMPCI_porPAHG + YMPCI_uMPUC1HG + YMPCI_uMPUC1BG + YMPCI_uMPUC1GO + YMPCIadCPZB3HG +
 YMPCIaeHGZB3CP = 70

+ YMPPA_direto + YMPPA_porHG + YMPPA_porBG + YMPPA_porCI + YMPPA_porCP + YMPPA_porGO +
 YMPPA_porBT + YMPPA_porHGBG + YMPPA_porHGCI + YMPPA_porBGHG + YMPPA_porCIHG +
 YMPPA_uMPUC1HG + YMPPA_uMPUC1BG + YMPPA_uMPUC1GO + YMPPAadCPZB3PA + YMPPAaeHGZB3PA +
 YMPPAacdCIWA2BG + YMPPAaceBGWA2CI + YMPPAacdCIWA2HG + YMPPAaceCIWA2BG + YMPPAaceHGWA2CI +
 YMPPAacdHGWA2BG + YMPPAacdBGWA2CI + YMPPAaceBGWA2HG = 70

+ YMPBT_direto + YMPBT_porHG + YMPBT_porBG + YMPBT_porCI + YMPBT_porPA + YMPBT_porGO +
 YMPBT_porHGBG + YMPBT_porHGCI + YMPBT_porHGPA + YMPBT_porBGHG + YMPBT_porCIHG +
 YMPBT_porPAHG + YMPBT_uMPUC1HG + YMPBT_uMPUC1BG + YMPBT_uMPUC1GO + YMPBTadCPZB3HG +
 YMPBTcdCIWA2BG + YMPBTceBGWA2CI = 80

+ YMPCP_direto + YMPCP_porHG + YMPCP_porBG + YMPCP_porCI + YMPCP_porPA + YMPCP_porGO +
 YMPCP_uMPUC1HG + YMPCP_uMPUC1BG + YMPCP_uMPUC1GO + YMPCPadCIZB1HG + YMPCPaePAZB1HG +
 YMPCPaeHGZB1CI + YMPCPadHGZB1PA + YMPCPadMPZB5BG + YMPCPaeMPZB6HG = 15

+ YMPBA_direto + YMPBA_porHG + YMPBA_porBG + YMPBA_porCI + YMPBA_porGO + YMPBA_porHGBG +
 YMPBA_porHGCI + YMPBA_porBGHG + YMPBA_porCIHG + YMPBA_porPAHG + YMPBA_uMPUC1HG +
 YMPBA_uMPUC1BG + YMPBA_uMPUC1GO = 10

+ YGOBG_direto + YGOBG_porHG + YGOBG_porMP + YGOBG_porCI + YGOBG_porPA + YGOBG_porCP +
 YGOBG_porBT + YGOBG_porBA + YGOBG_porHGMP + YGOBG_porHGCI + YGOBG_porHGPA +
 YGOBG_porMPHG + YGOBG_porCIHG + YGOBG_porPAHG + YGOBG_uGOUC1BG + YGOBGadCPZB3HG +
 YGOBGaeHGZB3CP + YGOBGcdPAWA1MP + YGOBGceMPWA1PA = 60

+ YGOCI_direto + YGOCI_porHG + YGOCI_porMP + YGOCI_porBG + YGOCI_porPA + YGOCI_porCP +
 YGOCI_porBT + YGOCI_porBA + YGOCI_uGOUC1HG + YGOCI_uGOUC1MP + YGOCI_uGOUC1BG +
 YGOCIaePAZB1CI + YGOCIadHGZB1CI + YGOCIaeGOZB5HG + YGOCIadGOZB5HG + YGOCIaeHGZB6MP +
 YGOCIadHGZB6BG = 30

+ YGOPA_direto + YGOPA_porHG + YGOPA_porMP + YGOPA_porBG + YGOPA_porCI + YGOPA_porCP +
 YGOPA_porBT + YGOPA_porHGMP + YGOPA_porHGBG + YGOPA_porHGCI + YGOPA_porMPHG +
 YGOPA_porBGHG + YGOPA_porCIHG + YGOPA_uGOUC1HG + YGOPA_uGOUC1MP + YGOPA_uGOUC1BG = 20

+ YGOBT_direto + YGOBT_porHG + YGOBT_porMP + YGOBT_porBG + YGOBT_porCI + YGOBT_porPA +
 YGOBT_porHGMP + YGOBT_porHGBG + YGOBT_porHGCI + YGOBT_porHGPA + YGOBT_porMPHG +
 YGOBT_porBGHG + YGOBT_porCIHG + YGOBT_porPAHG + YGOBT_uGOUC1HG + YGOBT_uGOUC1MP +
 YGOBT_uGOUC1BG + YGOBTcdPAWA1MP + YGOBTceMPWA1PA + YGOBTcdCIWA2BG + YGOBTceBGWA2CI = 35

+ YGOCP_direto + YGOCP_porHG + YGOCP_porMP + YGOCP_porBG + YGOCP_porCI + YGOCP_porPA +
 YGOCP_uGOUC1HG + YGOCP_uGOUC1MP + YGOCP_uGOUC1BG + YGOCPadCIZB1HG + YGOCPaePAZB1HG +
 YGOCPaeHGZB1CI + YGOCPadHGZB1PA + YGOCPaeGOZB5HG + YGOCPadGOZB5HG + YGOCPaeHGZB6MP +
 YGOCPadHGZB6BG = 10

+ YGOBA_direto + YGOBA_porHG + YGOBA_porMP + YGOBA_porBG + YGOBA_porCI + YGOBA_porHGMP +
 YGOBA_porHGBG + YGOBA_porHGCI + YGOBA_porMPHG + YGOBA_porBGHG + YGOBA_porCIHG +
 YGOBA_porPAHG + YGOBA_uGOUC1HG + YGOBA_uGOUC1MP + YGOBA_uGOUC1BG = 5

+ YBGCI_direto + YBGCI_porHG + YBGCI_porMP + YBGCI_porPA + YBGCI_porCP + YBGCI_porGO +
 YBGCI_porBT + YBGCI_porBA + YBGCI_porHGMP + YBGCI_porHGPA + YBGCI_porMPHG +
 YBGCI_porPAHG + YBGCI_uBGUC1HG + YBGCI_uBGUC1MP + YBGCI_uBGUC1GO + YBGCIadCPZB3HG +
 YBGCIaeHGZB3CP + YBGCIcdPAWA1MP + YBGCIceMPWA1PA + YBGCIcdPAWA1HG + YBGCIcePAWA1MP +
 YBGCIceHGWA1PA + YBGCIcdHGWA1MP + YBGCIcdMPWA1PA + YBGCIceMPWA1HG = 32

+ YBGPA_direto + YBGPA_porHG + YBGPA_porMP + YBGPA_porCI + YBGPA_porCP + YBGPA_porGO +
 YBGPA_porBT + YBGPA_porHGMP + YBGPA_porHGCI + YBGPA_porMPHG + YBGPA_porCIHG +
 YBGPA_uBGUC1HG + YBGPA_uBGUC1MP + YBGPA_uBGUC1GO = 28

+ YBGBT_direto + YBGBT_porHG + YBGBT_porMP + YBGBT_porCI + YBGBT_porPA + YBGBT_porGO +
 YBGBT_porHGMP + YBGBT_porHGCI + YBGBT_porHGPA + YBGBT_porMPHG + YBGBT_porCIHG +
 YBGBT_porPAHG + YBGBT_uBGUC1HG + YBGBT_uBGUC1MP + YBGBT_uBGUC1GO = 30

+ YBGCP_direto + YBGCP_porHG + YBGCP_porMP + YBGCP_porCI + YBGCP_porPA + YBGCP_porGO +
 YBGCP_uBGUC1HG + YBGCP_uBGUC1MP + YBGCP_uBGUC1GO + YBGCPadCIZB1HG + YBGCPaePAZB1HG +
 YBGCPaeHGZB1CI + YBGCPadHGZB1PA + YBGCPaeBGZB5MP + YBGCPadBGZB6HG = 10

+ YGBA_direto + YGBA_porHG + YGBA_porMP + YGBA_porCI + YGBA_porGO + YGBA_porHGMP + YGBA_porHGCI + YGBA_porMPHG + YGBA_porCIHG + YGBA_porPAHG + YGBA_uBGUC1HG + YGBA_uBGUC1MP + YGBA_uBGUC1GO = 10

+ YCIPA_direto + YCIPA_porHG + YCIPA_porMP + YCIPA_porBG + YCIPA_porCP + YCIPA_porGO + YCIPA_porBT + YCIPA_porHGMP + YCIPA_porHGBG + YCIPA_porMPHG + YCIPA_porBGHG + YCIPA_uHGUC1MP + YCIPA_uHGUC1BG + YCIPA_uMPUC1HG + YCIPA_uBGUC1HG + YCIPA_uHGUC1GO + YCIPA_uGOUC1HG + YCIPA_uMPUC1BG + YCIPA_uBGUC1MP + YCIPA_uMPUC1GO + YCIPA_uGOUC1MP + YCIPA_uGOUC1BG + YCIPA_uBGUC1GO + YCIPAadCPZB3PA + YCIPAaeHGZB3PA + YCIPAaeMPZB6BG + YCIPAadBGZB6MP = 32

+ YCIBT_direto + YCIBT_porHG + YCIBT_porMP + YCIBT_porBG + YCIBT_porPA + YCIBT_porGO + YCIBT_porHGMP + YCIBT_porHGBG + YCIBT_porHGPA + YCIBT_porMPHG + YCIBT_porBGHG + YCIBT_porPAHG + YCIBT_uHGUC1MP + YCIBT_uHGUC1BG + YCIBT_uMPUC1HG + YCIBT_uBGUC1HG + YCIBT_uHGUC1GO + YCIBT_uGOUC1HG + YCIBT_uMPUC1BG + YCIBT_uBGUC1MP = 18

+ YCICP_direto + YCICP_porHG + YCICP_porMP + YCICP_porBG + YCICP_porPA + YCICP_porGO + YCICP_uHGUC1MP + YCICP_uHGUC1BG + YCICP_uMPUC1HG + YCICP_uBGUC1HG + YCICP_uHGUC1GO + YCICP_uGOUC1HG + YCICPadCIZB1PA + YCICPaeCIZB1HG + YCICPaeHGZB5MP + YCICPadHGZB5BG + YCICPadMPZB5HG + YCICPaeBGZB5HG = 8

+ YCIBA_direto + YCIBA_porHG + YCIBA_porMP + YCIBA_porBG + YCIBA_porGO + YCIBA_porHGMP + YCIBA_porHGBG + YCIBA_porMPHG + YCIBA_porBGHG + YCIBA_porPAHG + YCIBA_uHGUC1MP + YCIBA_uHGUC1BG + YCIBA_uMPUC1HG + YCIBA_uBGUC1HG + YCIBA_uHGUC1GO + YCIBA_uGOUC1HG = 5

+ YPABT_direto + YPABT_porHG + YPABT_porMP + YPABT_porBG + YPABT_porCI + YPABT_porGO + YPABT_porHGMP + YPABT_porHGBG + YPABT_porHGCI + YPABT_porMPHG + YPABT_porBGHG + YPABT_porCIHG + YPABT_uHGUC1MP + YPABT_uHGUC1BG + YPABT_uMPUC1HG + YPABT_uBGUC1HG + YPABT_uHGUC1GO + YPABT_uGOUC1HG + YPABT_uMPUC1BG + YPABT_uBGUC1MP = 16

+ YPACP_direto + YPACP_porHG + YPACP_porMP + YPACP_porBG + YPACP_porCI + YPACP_porGO + YPACP_uHGUC1MP + YPACP_uHGUC1BG + YPACP_uMPUC1HG + YPACP_uBGUC1HG + YPACP_uHGUC1GO + YPACP_uGOUC1HG + YPACPaePAZB1CI + YPACPadPAZB1HG + YPACPaeHGZB5MP + YPACPadHGZB5BG + YPACPadMPZB5HG + YPACPaeBGZB5HG = 12

\ CAPACIDADES DE CADA ANEL BIDIRECIONAL (CAPZ)

+ 63 ZB1_2pi + 252 ZB1_3pi - CAPZB1 = 0
+ 63 ZB2_2pi + 252 ZB2_3pi - CAPZB2 = 0
+ 63 ZB3_2pi + 252 ZB3_3pi - CAPZB3 = 0
+ 63 ZB4_2pi + 252 ZB4_3pi - CAPZB4 = 0
+ 63 ZB5_2pi + 252 ZB5_3pi + 504 ZB5_3si - CAPZB5 = 0
+ 63 ZB6_2pi + 252 ZB6_3pi + 504 ZB6_3si - CAPZB6 = 0

\ CAPACIDADES DE CADA CADEIA (CAPW)

+ 63 WA1_2pi + 252 WA1_3pi + 504 WA1_3si - CAPWA1 = 0
+ 63 WA2_2pi + 252 WA2_3pi + 504 WA2_3si - CAPWA2 = 0

\ CAPACIDADES DO ARCO (CF A CF) EQUACAO CAPACIDADE EQUIPAMENTOS

\ ANEL BIDIRECIONAL CADEIA PONTO A PONTO

- 16 XHGMP1pi - 32 XHGMP1si - 63 XHGMP2pi - 252 XHGMP3pi - 504 XHGMP3si - CAPZB5 - CAPZB6 - CAPWA1 + HGMP + folgaHGMP = 0
- 16 XHGG01pi - 32 XHGG01si - 63 XHGG02pi - 252 XHGG03pi - 504 XHGG03si + HGGOT + folgaHGGOT = 0
- 16 XHGBG1pi - 32 XHGBG1si - 63 XHGBG2pi - 252 XHGBG3pi - 504 XHGBG3si - CAPZB5 - CAPZB6 - CAPWA2 + HGBGT + folgaHGBGT = 0
- 16 XHGCI1pi - 32 XHGCI1si - 63 XHGCI2pi - 252 XHGCI3pi - CAPZB1 - CAPZB2 - CAPZB4 - CAPWA2 + HGCIT + folgaHGCIT = 0
- 16 XHGPA1pi - 32 XHGPA1si - 63 XHGPA2pi - 252 XHGPA3pi - CAPZB1 - CAPZB2 - CAPZB3 - CAPWA1 + HGPAT + folgaHGPAT = 0
- 16 XHGBT1pi - 32 XHGBT1si - 63 XHGBT2pi - 252 XHGBT3pi + HGBTT + folgaHGBTT = 0
- 16 XHGCP1pi - 32 XHGCP1si - 63 XHGCP2pi - 252 XHGCP3pi - CAPZB3 - CAPZB4 + HGCPT + folgaHGCPT = 0
- 16 XHGBA1pi - 32 XHGBA1si - 63 XHGBA2pi - 252 XHGBA3pi + HGBAT + folgaHGBAT = 0
- 16 XMPG01pi - 32 XMPG01si - 63 XMPG02pi - 252 XMPG03pi - CAPZB5 + MPGOT + folgaMPGOT = 0
- 16 XMPBG1pi - 32 XMPBG1si - 63 XMPBG2pi - CAPZB6 + MPBGT + folgaMPBGT = 0
- 16 XMPCI1pi - 32 XMPCI1si - 63 XMPCI2pi + MPCIT + folgaMPCIT = 0
- 16 XMPPA1pi - 32 XMPPA1si - 63 XMPPA2pi + MPPAT + folgaMPPAT = 0
- 16 XMPBT1pi - 32 XMPBT1si - 63 XMPBT2pi + MPBTT + folgaMPBTT = 0
- 16 XMPCP1pi + MPCPT + folgaMPCPT = 0
- 16 XMPBA1pi + MPBAT + folgaMPBAT = 0
- 16 XGOBG1pi - 32 XGOBG1si - 63 XGOBG2pi - CAPZB5 + GOBGT + folgaGOBGT = 0
- 16 XGOC1pi - 32 XGOC1si + GOCIT + folgaGOCIT = 0
- 16 XGOPA1pi - 32 XGOPA1si + GOPAT + folgaGOPAT = 0
- 16 XGOBT1pi - 32 XGOBT1si - 63 XGOBT2pi + GOBTT + folgaGOBTT = 0
- 16 XGOCP1pi + GOCPT + folgaGOCPT = 0
- 16 XGOBA1pi + GOBAT + folgaGOBAT = 0
- 16 XBGC1pi - 32 XBGC1si - 63 XBGC2pi + BGCIT + folgaBGCIT = 0

- 16 XBGPAlpi - 32 XBGPAlsi + BGPAT + folgaBGPAT = 0
 - 16 XBGBTlpi - 32 XBGBTlsi + BGBTT + folgaBGBTT = 0
 - 16 XBGCPlpi + BGCPT + folgaBGCPT = 0
 - 16 XBGBAlpi + BGBAT + folgaBGBAT = 0
 - 16 XCIPAlpi - 32 XCIPAlsi - 63 XCIPA2pi - CAPZB1 + CIPAT + folgaCIPAT = 0
 - 16 XCIBTlpi - 32 XCIBTlsi + CIBTT + folgaCIBTT = 0
 - 16 XCICPlpi - CAPZB2 - CAPZB4 + CICPT + folgaCICPT = 0
 - 16 XCIBAlpi + CIBAT + folgaCIBAT = 0
 - 16 XPABTlpi - 32 XPABTlsi + PABTT + folgaPABTT = 0
 - 16 XPACPlpi - CAPZB2 - CAPZB3 + PACPT + folgaPACPT = 0
 \ CAPACIDADES DE ANEL UNIDIRECIONAL EQUACAO CAPACIDADE EQUIPAMENTOS
 - 63 UC1_2pi - 252 UC1_3pi - 504 UC1_3si + UC1_T + folgaUC1_T = 0
 \ CAMINHOS QUE PASSAM POR CADA ARCO EQUACAO CAPACIDADE CAMINHOS

+ YHGMP_direto + YHGGO_porMP + YHGGO_porMPBG + YHGGO_porMPCI + YHGGO_porMPPA +
 YHGBG_porMP + YHGBG_porMPCI + YHGBG_porMPPA + YHGCi_porMP + YHGCi_porMPBG +
 YHGCi_porMPPA + YHGCi_aeHGZB5GO + YHGPA_porMP + YHGPA_porMPBG + YHGPA_porMPCI +
 YHGPA_aeHGZB5GO + YHGBT_porMP + YHGBT_porMPBG + YHGBT_porMPCI + YHGBT_porMPPA +
 YHGCP_porMP + YHGCP_porMPBG + YHGCP_porMPCI + YHGCP_porMPPA + YHGCP_aeHGZB5GO +
 YHGBA_porMP + YHGBA_porMPBG + YHGBA_porMPCI + YHGBA_aeHGZB5GO + YMPGO_porHG +
 YMPGO_porHGBG + YMPGO_porHGCi + YMPGO_porHGPA + YMPGO_aeHGZB3CP + YMPBG_porHG +
 YMPBG_porHGCi + YMPBG_porHGPA + YMPBG_aeHGZB3CP + YMPCI_porHG + YMPCI_porHGBG +
 YMPCI_porHGPA + YMPCi_aeHGZB3CP + YMPPA_porHG + YMPPA_porHGBG + YMPPA_porHGCi +
 YMPPA_aeHGZB3PA + YMPPA_eHGWA2CI + YMPPA_dHGWA2BG + YMPBT_porHG + YMPBT_porHGBG +
 YMPBT_porHGCi + YMPBT_porHGPA + YMPCP_porHG + YMPCP_aeHGZB1CI + YMPCP_dHGZB1PA +
 YMPCP_dMPZB5BG + YMPBA_porHG + YMPBA_porHGBG + YMPBA_porHGCi + YGOBG_porHGMP +
 YGOBG_porMPHG + YGOBG_dHGZB5HG + YGOBG_aeHGZB6MP + YGOPA_porHGMP + YGOPA_porMPHG +
 YGOBT_porHGMP + YGOBT_porMPHG + YGOBT_dHGZB5HG + YGOBT_aeHGZB6MP + YGOBA_porHGMP +
 YGOBA_porMPHG + YBGCI_porHGMP + YBGCI_porMPHG + YBGCI_dPAWA1HG + YBGCI_ePAWA1MP +
 YBGCI_eHGWA1PA + YBGCI_dMPWA1PA + YBGPA_porHGMP + YBGPA_porMPHG + YGBT_porHGMP +
 YGBT_porMPHG + YBGCP_aeBGZB5MP + YBGCP_dBGZB6HG + YGBA_porHGMP + YGBA_porMPHG +
 YCIPA_porHGMP + YCIPA_porMPHG + YCIBT_porHGMP + YCIBT_porMPHG + YCIP_aeHGZB5MP +
 YCIP_dMPZB5HG + YCIBA_porHGMP + YCIBA_porMPHG + YPABT_porHGMP + YPABT_porMPHG +
 YPAC_aeHGZB5MP + YPAC_dMPZB5HG - HGMP = 0

+ YHGMP_porGO + YHGGO_direto + YHGBG_porGO + YHGCi_porGO + YHGPA_porGO + YHGBT_porGO +
 YHGCP_porGO + YHGBA_porGO + YMPGO_porHG + YMPGO_porBGHG + YMPGO_porCIHG + YMPGO_porPAHG +
 YMPGO_dCPZB3HG + YGOBG_porHG + YGOBG_porHGMP + YGOBG_porHGCi + YGOBG_porHGPA +
 YGOBG_aeHGZB3CP + YGOBG_dHGZB1CI + YGOBG_aeHGZB6MP + YGOBG_dHGZB6BG +
 YGOPA_porHG + YGOPA_porHGMP + YGOPA_porHGBG + YGOPA_porHGCi + YGOBT_porHG +
 YGOBT_porHGMP + YGOBT_porHGBG + YGOBT_porHGCi + YGOBT_porHGPA + YGOCP_porHG +
 YGOCP_aeHGZB1CI + YGOCP_dHGZB1PA + YGOCP_aeHGZB6MP + YGOCP_dHGZB6BG + YGOBA_porHG +
 YGOBA_porHGMP + YGOBA_porHGBG + YGOBA_porHGCi - HGGOT = 0

+ YHGMP_porBG + YHGMP_porBGCI + YHGMP_porBGPA + YHGGO_porBG + YHGGO_porBGMP +
 YHGGO_porBGCI + YHGGO_porBGPA + YHGBG_direto + YHGCi_porBG + YHGCi_porBGMP +
 YHGCi_porBGPA + YHGCi_aeHGZB5GO + YHGPA_porBG + YHGPA_porBGMP + YHGPA_porBGCI +
 YHGPA_aeHGZB5GO + YHGBT_porBG + YHGBT_porBGMP + YHGBT_porBGCI + YHGBT_porBGPA +
 YHGCP_porBG + YHGCP_porBGMP + YHGCP_porBGCI + YHGCP_porBGPA + YHGCP_dHGZB5GO +
 YHGBA_porBG + YHGBA_porBGMP + YHGBA_porBGCI + YHGBA_aeHGZB5GO + YMPGO_porHGBG +
 YMPGO_porBGHG + YMPBG_porHG + YMPBG_porCIHG + YMPBG_porPAHG + YMPBG_dCPZB3HG +
 YMPCI_porHGBG + YMPCI_porBGHG + YMPPA_porHGBG + YMPPA_porBGHG + YMPPA_dCIWA2HG +
 YMPPA_eCIWA2BG + YMPPA_eHGWA2CI + YMPPA_dBGWA2CI + YMPBT_porHGBG + YMPBT_porBGHG +
 YMPCP_dMPZB5BG + YMPCP_aeMPZB6HG + YMPBA_porHGBG + YMPBA_porBGHG + YGOBG_porHG +
 YGOBG_porMPHG + YGOBG_porCIHG + YGOBG_porPAHG + YGOBG_dCPZB3HG + YGOBG_aeGOZB5HG +
 YGOBG_dHGZB6BG + YGOPA_porHGBG + YGOPA_porBGHG + YGOBT_porHGBG + YGOBT_porBGHG +
 YGOCP_aeGOZB5HG + YGOCP_dHGZB6BG + YGOBA_porHGBG + YGOBA_porBGHG + YBGCI_porHG +
 YBGCI_porHGMP + YBGCI_porHGPA + YBGCI_aeHGZB3CP + YBGCI_eHGWA1PA + YBGCI_dHGWA1MP +
 YBGPA_porHG + YBGPA_porHGMP + YBGPA_porHGCi + YGBT_porHG + YGBT_porHGMP +
 YGBT_porHGCi + YGBT_porHGPA + YBGCP_porHG + YBGCP_aeHGZB1CI + YBGCP_dHGZB1PA +
 YBGCP_aeBGZB5MP + YGBA_porHG + YGBA_porHGMP + YGBA_porHGCi + YCIPA_porHGBG +
 YCIPA_porBGHG + YCIBT_porHGBG + YCIBT_porBGHG + YCIP_dHGZB5BG + YCIP_aeBGZB5HG +
 YCIBA_porHGBG + YCIBA_porBGHG + YPABT_porHGBG + YPABT_porBGHG + YPAC_dHGZB5BG +
 YPAC_aeBGZB5HG - HGBGT = 0

+ YHGMP_porCI + YHGMP_porCIBG + YHGMP_porCIPA + YHGMP_aeHGZB2CP + YHGGO_porCI +
 YHGGO_porCIBG + YHGGO_porCIPA + YHGGO_aeHGZB2CP + YHGBG_porCI +
 YHGBG_porCIBG + YHGBG_porCIPA + YHGBG_aeHGZB2CP + YHGCi_direto + YHGPA_porCI +
 YHGPA_porCIBG + YHGPA_porCIPA + YHGPA_aeHGZB2PA + YHGBT_porCI + YHGBT_porCIBG +
 YHGBT_porCIBG + YHGBT_porCIPA + YHGCP_porCI + YHGCP_porCIBG + YHGCP_porCIBG +
 YHGCP_porCIPA + YHGBA_porCI + YHGBA_porCIBG + YHGBA_porCIBG + YMPGO_porHGCi +
 YMPGO_porCIHG + YMPBG_porHGCi + YMPBG_porCIHG + YMPCI_porHG + YMPCI_porBGHG +
 YMPCI_porPAHG + YMPCI_uMPUCLHG + YMPCi_aeCPZB3HG + YMPPA_porHGCi + YMPPA_porCIHG +
 YMPPA_eCIWA2BG + YMPPA_dHGWA2BG + YMPPA_dBGWA2CI + YMPPA_eBGWA2HG + YMPBT_porHGCi +
 YMPBT_porCIHG + YMPCP_dCIZB1HG + YMPCP_aeHGZB1CI + YMPBA_porHGCi + YMPBA_porCIHG +
 YGOBG_porHGCi + YGOBG_porCIHG + YGOBG_dHGZB1CI + YGOBG_uGOUC1HG + YGOBG_aePAZB1CI +

YGOCiaeGOZB5HG + YGOCiadGOZB5HG + YGOPA_porHGCI + YGOPA_porCIHG + YGOBT_porHGCI + YGOBT_porCIHG + YGOCpadCIZB1HG + YGOCpaeHGZB1CI + YGOBA_porHGCI + YGOBA_porCIHG + YBGCI_porHG + YBGCI_porMPHG + YBGCI_porPAHG + YBGCI_uBGUC1HG + YBGCIadCPZB3HG + YBGCIcdPAWA1HG + YBGCIceMPWA1HG + YBGPA_porHGCI + YBGPA_porCIHG + YGBGT_porHGCI + YGBGT_porCIHG + YBGCPadCIZB1HG + YBGCPaeHGZB1CI + YBGPA_porHGCI + YBGPA_porCIHG + YCIPA_porHG + YCIPA_porHGMP + YCIPA_porHGBG + YCIPA_uHGUC1MP + YCIPA_uHGUC1BG + YCIPA_uHGUC1GO + YCIPaaHGZB3PA + YCIBT_porHG + YCIBT_porHGMP + YCIBT_porHGBG + YCIBT_porHGPA + YCIBT_uHGUC1MP + YCIBT_uHGUC1BG + YCIBT_uHGUC1GO + YCIBT_porHG + YCICP_uHGUC1MP + YCICP_uHGUC1BG + YCICP_uHGUC1GO + YCICPadCIZB1PA + YCICPaeHGZB5MP + YCICPadHGZB5BG + YCIBA_porHG + YCIBA_porHGMP + YCIBA_porHGBG + YCIBA_uHGUC1MP + YCIBA_uHGUC1BG + YCIBA_uHGUC1GO + YPABT_porHGCI + YPABT_porCIHG + YPACpaePAZB1CI + YPACPadPAZB1HG - HGCIT = 0

+ YHGMMP_porPA + YHGMMP_porPABG + YHGMMP_porPACI + YHGMpadHGZB2CP + YHGGO_porPA + YHGGO_porPAMP + YHGGO_porPABG + YHGGO_porPACI + YHGGoadHGZB2CP + YHGBG_porPA + YHGBG_porPAMP + YHGBG_porPACI + YHGBGadHGZB2CP + YHGCi_porPA + YHGCi_porPAMP + YHGCi_porPABG + YHGCiadHGZB2CI + YHGA_direto + YHGBT_porPA + YHGBT_porPAMP + YHGBT_porPABG + YHGBT_porPACI + YHGCP_porPA + YHGCP_porPAMP + YHGCP_porPABG + YHGCP_porPACI + YHGBA_porPAMP + YHGBA_porPABG + YHGBA_porPACI + YHGBaadHGZB2CI + YMPGO_porHGPA + YMPGO_porPAHG + YMPBG_porHGPA + YMPBG_porPAHG + YMPCI_porHGPA + YMPCI_porPAHG + YMPPA_porHG + YMPPA_porBGH + YMPPA_porCIHG + YMPPA_uMPUC1HG + YMPPAadCPZB3PA + YMPPAcdCIWA2HG + YMPPAceBGWA2HG + YMPBT_porHGPA + YMPBT_porPAHG + YMPCPaePAZB1HG + YMPCPadHGZB1PA + YMPBA_porPAHG + YGOBG_porHGPA + YGOBG_porPAHG + YGOCiaepAZB1CI + YGOCiadHGZB1CI + YGOPA_porHG + YGOPA_porMPHG + YGOPA_porBGHG + YGOPA_porCIHG + YGOPA_uGOUClHG + YGOBT_porHGPA + YGOBT_porPAHG + YGOCpaePAZB1HG + YGOCpadHGZB1PA + YGOBA_porPAHG + YBGCI_porHGPA + YBGCI_porPAHG + YBGCIcePAWA1MP + YBGCIcdHGWA1MP + YBGCIcdMPWA1PA + YBGCIceMPWA1HG + YBGPA_porHG + YBGPA_porMPHG + YBGPA_porCIHG + YBGPA_uBGUC1HG + YGBGT_porHGPA + YGBGT_porPAHG + YBGCPaePAZB1HG + YBGCPadHGZB1PA + YGBA_porPAHG + YCIPA_porHG + YCIPA_porMPHG + YCIPA_porBGHG + YCIPA_uMPUC1HG + YCIPA_uBGUC1HG + YCIPA_uGOUClHG + YCIPAadCPZB3PA + YCIBT_porHGPA + YCIBT_porPAHG + YCICPadCIZB1PA + YCICPaeCIZB1HG + YCIBA_porPAHG + YPABT_porHG + YPABT_porHGMP + YPABT_porHGBG + YPABT_porHGCI + YPABT_uHGUC1MP + YPABT_uHGUC1BG + YPABT_uHGUC1GO + YPACP_porHG + YPACP_uHGUC1MP + YPACP_uHGUC1BG + YPACP_uHGUC1GO + YPACpaePAZB1CI + YPACpaeHGZB5MP + YPACPadHGZB5BG - HGPAT = 0

+ YHGMMP_porBT + YHGGO_porBT + YHGBG_porBT + YHGCi_porBT + YHGA_porBT + YHGBT_direto + YMPBT_porHG + YMPBT_porBGHG + YMPBT_porCIHG + YMPBT_porPAHG + YMPBT_uMPUC1HG + YMPBTadCPZB3HG + YGOBT_porHG + YGOBT_porMPHG + YGOBT_porBGHG + YGOBT_porCIHG + YGOBT_porPAHG + YGOBT_uGOUClHG + YGBGT_porHG + YGBGT_porMPHG + YGBGT_porCIHG + YGBGT_porPAHG + YGBGT_uBGUC1HG + YCIBT_porHG + YCIBT_porMPHG + YCIBT_porBGHG + YCIBT_porPAHG + YCIBT_uMPUC1HG + YCIBT_uBGUC1HG + YCIBT_uGOUClHG + YPABT_porHG + YPABT_porMPHG + YPABT_porBGHG + YPABT_porCIHG + YPABT_uMPUC1HG + YPABT_uBGUC1HG + YPABT_uGOUClHG - HGBTT = 0

+ YHGMMP_porCP + YHGMpaeHGZB3PA + YHGMpadHGZB4CI + YHGGO_porCP + YHGGOaeHGZB3PA + YHGGoadHGZB4CI + YHGBG_porCP + YHGBGaeHGZB3PA + YHGBGadHGZB4CI + YHGCi_porCP + YHGCiaehGZB3PA + YHGA_porCP + YHGAadHGZB4CI + YHGBTaeHGZB3PA + YHGBTadHGZB4CI + YHGCP_direto + YHGBaadHGZB4CI + YMPGOadCPZB3HG + YMPGOaeHGZB3CP + YMPBGadCPZB3HG + YMPBGaeHGZB3CP + YMPCIadCPZB3HG + YMPCIaeHGZB3CP + YMPPAadCPZB3PA + YMPPAaeHGZB3PA + YMPBTadCPZB3HG + YMPCP_porHG + YMPCP_uMPUC1HG + YMPCPadCIZB1HG + YMPCPaePAZB1HG + YMPCPaeMPZB6HG + YGOBGadCPZB3HG + YGOBGaeHGZB3CP + YGOC_porHG + YGOC_uGOUClHG + YGOCpadCIZB1HG + YGOCpaePAZB1HG + YGOCpaeGOZB5HG + YGOCpadGOZB5HG + YBGCIadCPZB3HG + YBGCIaeHGZB3CP + YBGCP_porHG + YBGCP_uBGUC1HG + YBGCPadCIZB1HG + YBGCPaePAZB1HG + YBGCPadBGZB6HG + YCIPAadCPZB3PA + YCIPaaHGZB3PA + YCICP_porHG + YCICP_uMPUC1HG + YCICP_uBGUC1HG + YCICP_uGOUClHG + YCICPaeCIZB1HG + YCICPadMPZB5HG + YCICPaeBGZB5HG + YPACP_porHG + YPACP_uMPUC1HG + YPACP_uBGUC1HG + YPACP_uGOUClHG + YPACPadPAZB1HG + YPACPadMPZB5HG + YPACpaeBGZB5HG - HGCPPT = 0

+ YHGMMP_porBA + YHGGO_porBA + YHGBG_porBA + YHGCi_porBA + YHGBA_direto + YMPBA_porHG + YMPBA_porBGHG + YMPBA_porCIHG + YMPBA_porPAHG + YMPBA_uMPUC1HG + YGOBA_porHG + YGOBA_porMPHG + YGOBA_porBGHG + YGOBA_porCIHG + YGOBA_porPAHG + YGOBA_uGOUClHG + YGBA_porHG + YGBA_porMPHG + YGBA_porCIHG + YGBA_porPAHG + YGBA_uBGUC1HG + YCIBA_porHG + YCIBA_porMPHG + YCIBA_porBGHG + YCIBA_porPAHG + YCIBA_uMPUC1HG + YCIBA_uBGUC1HG + YCIBA_uGOUClHG - HGBAT = 0

+ YHGMMP_porGO + YHGGO_porMP + YHGGO_porBGMP + YHGGO_porCIMP + YHGGO_porPAMP + YHGCiaehGZB5GO + YHGPaaHGZB5GO + YHGCPaeHGZB5GO + YHGBaaHGZB5GO + YMPGO_direto + YMPBG_porGO + YMPCI_porGO + YMPPA_porGO + YMPBT_porGO + YMPCP_porGO + YMPBA_porGO + YGOBG_porMP + YGOBG_porMPHG + YGOBGceMPWA1PA + YGOCi_porMP + YGOCiadGOZB5HG + YGOPA_porMP + YGOPA_porMPHG + YGOBT_porMP + YGOBT_porMPHG + YGOBTceMPWA1PA + YGOC_porMP + YGOCpadGOZB5HG + YGOBA_porMP + YGOBA_porMPHG - MPGOT = 0

+ YHGMMP_porBG + YHGMMP_porCIBG + YHGMMP_porPABG + YHGGO_porMPBG + YHGGO_porBGMP + YHGBG_porMP + YHGBG_porCIMP + YHGBG_porPAMP + YHGCi_porMPBG + YHGCi_porBGMP + YHGA_porMPBG + YHGA_porBGMP + YHGBT_porMPBG + YHGBT_porBGMP + YHGCP_porMPBG + YHGCP_porBGMP + YHGBA_porMPBG + YHGBA_porBGMP + YMPGO_porBG + YMPGO_porBGHG +

YMPGOceBGWA2CI + YMPBG_direto + YMPCI_porBG + YMPCI_porBGHG + YMPPA_porBG +
 YMPPA_porBGHG + YMPPAceBGWA2CI + YMPPAcdBGWA2CI + YMPPAceBGWA2HG + YMPBT_porBG +
 YMPBT_porBGHG + YMPBTceBGWA2CI + YMPCP_porBG + YMPCPaeMPZB6HG + YMPBA_porBG +
 YMPBA_porBGHG + YGOBG_porMP + YGOBG_porHGMP + YGOBGcdPAWA1MP + YBGCI_porMP +
 YBGCI_porMPHG + YBGCIceMPWA1PA + YBGCIcdMPWA1PA + YBGCIceMPWA1HG + YBGPA_porMP +
 YBGPA_porMPHG + YGBGT_porMP + YGBGT_porMPHG + YBGCP_porMP + YBGCPadBGZB6HG + YGBA_porMP
 + YGBA_porMPHG + YCIPAAeMPZB6BG + YCIPAdBGZB6MP - MPBGT = 0

+ YHGMP_porCI + YHGMP_porBGCI + YHGMP_porPACI + YHGMPadHGZB4CI + YHGGO_porMPCI +
 YHGGO_porCIMP + YHGBG_porMPCI + YHGBG_porCIMP + YHGCI_porMP + YHGCI_porBGMP +
 YHGCI_porPAMP + YHGCI_uHGUC1MP + YHGPA_porMPCI + YHGPA_porCIMP + YHGBT_porMPCI +
 YHGBT_porCIMP + YHGCP_porMPCI + YHGCP_porCIMP + YHGBA_porMPCI + YHGBA_porCIMP +
 YMPGO_porCI + YMPGO_porCIHG + YMPGOcdCIWA2BG + YMPBG_porCI + YMPBG_porCIHG +
 YMPBGaeCIWB1PA + YMPCI_direto + YMPPA_porCI + YMPPA_porCIHG + YMPPAcdCIWA2BG +
 YMPPAcdCIWA2HG + YMPPAceCIWA2BG + YMPBT_porCI + YMPBT_porCIHG + YMPBTcdCIWA2BG +
 YMPCP_porCI + YMPCPadCIWB1HG + YMPBA_porCI + YMPBA_porCIHG + YGOCI_porMP +
 YGOCI_uGUC1MP + YGOCIAeHGZB6MP + YBGCI_porMP + YBGCI_porHGMP + YBGCI_uBGUC1MP +
 YBGCIcdPAWA1MP + YBGCIcePAWA1MP + YBGCIcdHGWA1MP + YCIPA_porMP + YCIPA_porMPHG +
 YCIPA_uMPUC1HG + YCIPA_uMPUC1BG + YCIPA_uMPUC1GO + YCIPAAeMPZB6BG + YCIBT_porMP +
 YCIBT_porMPHG + YCIBT_uMPUC1HG + YCIBT_uMPUC1BG + YCICP_porMP + YCICP_uMPUC1HG +
 YCICPadMPZB5HG + YCIBA_porMP + YCIBA_porMPHG + YCIBA_uMPUC1HG - MPCIT = 0

+ YHGMP_porPA + YHGMP_porBGPA + YHGMP_porCIPA + YHGMPaeHGZB3PA + YHGGO_porMPPA +
 YHGGO_porPAMP + YHGBG_porMPPA + YHGBG_porPAMP + YHGCI_porMPPA + YHGCI_porPAMP +
 YHGPA_porMP + YHGPA_porBGMP + YHGPA_porCIMP + YHGPA_uHGUC1MP + YHGBT_porMPPA +
 YHGBT_porPAMP + YHGCP_porMPPA + YHGCP_porPAMP + YHGBA_porPAMP + YMPGO_porPA +
 YMPGO_porPAHG + YMPBG_porPA + YMPBG_porPAHG + YMPBGadPAZB1CI + YMPCI_porPA +
 YMPCI_porPAHG + YMPPA_direto + YMPBT_porPA + YMPBT_porPAHG + YMPCP_porPA +
 YMPCPaePAZB1HG + YMPBA_porPAHG + YGOBGcdPAWA1MP + YGOBGceMPWA1PA + YGOPA_porMP +
 YGOPA_porHGMP + YGOPA_uGUC1MP + YGOBTcdPAWA1MP + YGOBTceMPWA1PA + YBGCIcdPAWA1MP +
 YBGCIceMPWA1PA + YBGCIcdPAWA1HG + YBGCIceHGWA1PA + YBGCIcdHGWA1MP + YBGCIceMPWA1HG +
 YBGPA_porMP + YBGPA_porHGMP + YBGPA_uBGUC1MP + YCIPA_porMP + YCIPA_porHGMP +
 YCIPA_uHGUC1MP + YCIPA_uBGUC1MP + YCIPA_uGUC1MP + YCIPAdBGZB6MP + YPABT_porMP +
 YPABT_porMPHG + YPABT_uMPUC1HG + YPABT_uMPUC1BG + YPACP_porMP + YPACP_uMPUC1HG +
 YPACPadMPZB5HG - MPPAT = 0

+ YHGMP_porBT + YHGBT_porMP + YHGBT_porBGMP + YHGBT_porCIMP + YHGBT_porPAMP +
 YHGBT_uHGUC1MP + YMPGO_porBT + YMPBG_porBT + YMPCI_porBT + YMPPA_porBT + YMPBT_direto +
 YGOBT_porMP + YGOBT_porHGMP + YGOBT_uGUC1MP + YGOBTcdPAWA1MP + YGBGT_porMP +
 YGBGT_porHGMP + YGBGT_uBGUC1MP + YCIBT_porMP + YCIBT_porHGMP + YCIBT_uHGUC1MP +
 YCIBT_uBGUC1MP + YPABT_porMP + YPABT_porHGMP + YPABT_uHGUC1MP + YPABT_uBGUC1MP - MPBTT =
 0

+ YHGMP_porCP + YHGMPaeHGZB2CP + YHGMPadHGZB2CP + YHGCP_porMP + YHGCP_porBGMP +
 YHGCP_porCIMP + YHGCP_porPAMP + YHGCP_uHGUC1MP + YMPGO_porCP + YMPGOadCPZB3HG +
 YMPBG_porCP + YMPBGadCPZB3HG + YMPCI_porCP + YMPCIadCPZB3HG + YMPPA_porCP +
 YMPPAadCPZB3PA + YMPBTadCPZB3HG + YMPCP_direto + YGOCP_porMP + YGOCP_uGUC1MP +
 YGOCPaeHGZB6MP + YBGCP_porMP + YBGCP_uBGUC1MP + YBGCPaeBGZB5MP + YCICP_porMP +
 YCICP_uHGUC1MP + YCICPaeHGZB5MP + YPACP_porMP + YPACP_uHGUC1MP + YPACPaeHGZB5MP - MPCPT =
 0

+ YHGMP_porBA + YHGBA_porMP + YHGBA_porBGMP + YHGBA_porCIMP + YHGBA_porPAMP +
 YHGBA_uHGUC1MP + YMPGO_porBA + YMPBG_porBA + YMPCI_porBA + YMPBA_direto + YGOBA_porMP +
 YGOBA_porHGMP + YGOBA_uGUC1MP + YGBA_porMP + YGBA_porHGMP + YGBA_uBGUC1MP +
 YCIBA_porMP + YCIBA_porHGMP + YCIBA_uHGUC1MP - MPBAT = 0

+ YHGGO_porBG + YHGGO_porMPBG + YHGGO_porCIBG + YHGGO_porPABG + YHGBG_porGO +
 YHGCIadHGZB5GO + YHGPAadHGZB5GO + YHGCPadHGZB5GO + YHGBAadHGZB5GO + YMPGO_porBG +
 YMPGO_porHGBG + YMPGOcdCIWA2BG + YMPBG_porGO + YGOBG_direto + YGOCI_porBG +
 YGOCIAeGOZB5HG + YGOPA_porBG + YGOPA_porBGHG + YGOBT_porBG + YGOBT_porBGHG +
 YGOBTceBGWA2CI + YGOCP_porBG + YGOCPaeGOZB5HG + YGOBA_porBG + YGOBA_porBGHG +
 YBGCI_porGO + YBGPA_porGO + YGBGT_porGO + YBGCP_porGO + YGBA_porGO - GOBGT = 0

+ YHGGO_porCI + YHGGO_porMPCI + YHGGO_porBGCI + YHGGO_porPACI + YHGGOadHGZB4CI +
 YHGCI_porGO + YHGCI_uHGUC1GO + YHGCIaeHGZB5GO + YHGCIadHGZB5GO + YMPGO_porCI +
 YMPGO_porHGCI + YMPGOceBGWA2CI + YMPCI_porGO + YMPCI_uMPUC1GO + YGOBG_porCI +
 YGOBG_porCIHG + YGOCI_direto + YGOPA_porCI + YGOPA_porCIHG + YGOBT_porCI + YGOBT_porCIHG +
 YGOBTcdCIWA2BG + YGOCP_porCI + YGOCPadCIWB1HG + YGOBA_porCI + YGOBA_porCIHG +
 YBGCI_porGO + YBGCI_uBGUC1GO + YCIPA_porGO + YCIPA_uGUC1HG + YCIPA_uGUC1MP +
 YCIPA_uGUC1BG + YCIBT_porGO + YCIBT_uGUC1HG + YCICP_porGO + YCICP_uGUC1HG +
 YCIBA_porGO + YCIBA_uGUC1HG - GOCIT = 0

+ YHGGO_porPA + YHGGO_porMPPA + YHGGO_porBGPA + YHGGO_porCIPA + YHGGOaeHGZB3PA +
 YHGPA_porGO + YHGPA_uHGUC1GO + YHGPAaeHGZB5GO + YHGPAadHGZB5GO + YMPGO_porPA +
 YMPGO_porHGPA + YMPPA_porGO + YMPPA_uMPUC1GO + YGOBG_porPA + YGOBG_porPAHG +
 YGOBGcdPAWA1MP + YGOCI_porPA + YGOCIAePAZB1CI + YGOPA_direto + YGOBT_porPA +

YGOBT_porPAHG + YGOBTcdPAWA1MP + YGOCP_porPA + YGOCPaePAZB1HG + YGOBA_porPAHG +
 YBGPA_porGO + YBGPA_uBGUC1GO + YCIPA_porGO + YCIPA_uHGUC1GO + YCIPA_uMPUC1GO +
 YCIPA_uBGUC1GO + YPABT_porGO + YPABT_uGOUC1HG + YPACP_porGO + YPACP_uGOUC1HG - GOPAT = 0

 + YHGGO_porBT + YHGBT_porGO + YHGBT_uHGUC1GO + YMPGO_porBT + YMPBT_porGO +
 YMPBT_uMPUC1GO + YGOBG_porBT + YGOBT_porBT + YGOBA_porBT + YGOBT_direto + YHGBT_porGO +
 YHGBT_uBGUC1GO + YCIBT_porGO + YCIBT_uHGUC1GO + YPABT_porGO + YPABT_uHGUC1GO - GOBTT = 0

 + YHGGO_porCP + YHGGOaeHGZB2CP + YHGGOadHGZB2CP + YHGPC_porGO + YHGPC_uHGUC1GO +
 YHGPCaeHGZB5GO + YHGPCadHGZB5GO + YMPGO_porCP + YMPGOaeHGZB3CP + YMPCP_porGO +
 YMPCP_uMPUC1GO + YGOBG_porCP + YGOBGadCPZB3HG + YGOBT_porCP + YGOBA_porCP + YGOCP_direto
 + YBGCP_porGO + YBGCP_uBGUC1GO + YCICP_porGO + YCICP_uHGUC1GO + YPACP_porGO +
 YPACP_uHGUC1GO - GOCPT = 0

 + YHGGO_porBA + YHGBA_porGO + YHGBA_uHGUC1GO + YHGBAaeHGZB5GO + YHGBAadHGZB5GO +
 YMPGO_porBA + YMPBA_porGO + YMPBA_uMPUC1GO + YGOBG_porBA + YGOBT_porBA + YGOBA_direto +
 YBGPA_porGO + YBGPA_uBGUC1GO + YCIBA_porGO + YCIBA_uHGUC1GO - GOBAT = 0

 + YHGMMP_porBGCI + YHGMMP_porCIBG + YHGGO_porBGCI + YHGGO_porCIBG + YHGBG_porCI +
 YHGBG_porMPCI + YHGBG_porPACI + YHGBGadHGZB4CI + YHGCi_porBG + YHGCi_porMPBG +
 YHGCi_porPABG + YHGCi_uHGUC1BG + YHGBA_porBGCI + YHGBA_porCIBG + YHGBT_porBGCI +
 YHGBT_porCIBG + YHGPC_porBGCI + YHGPC_porCIBG + YHGBA_porBGCI + YHGBA_porCIBG +
 YMPGocdCIWA2BG + YMPGocceBGWA2CI + YMPBG_porCI + YMPBG_porHGCI + YMPBGadPAZB1CI +
 YMPCI_porBG + YMPCI_porHGBG + YMPCI_uMPUC1BG + YMPPAcdCIWA2BG + YMPPAceBGWA2CI +
 YMPPAcdCIWA2HG + YMPPAceHGWA2CI + YMPPAcdHGWA2BG + YMPPAceBGWA2HG + YMPBTcdCIWA2BG +
 YMPBTceBGWA2CI + YGOBG_porCI + YGOBG_porHGCI + YGOBT_porBG + YGOBT_uGOUC1BG +
 YGOBTadHGZB6BG + YGOBTcdCIWA2BG + YGOBTceBGWA2CI + YBGCI_direto + YBGPA_porCI +
 YBGPA_porCIBG + YHGBT_porCI + YHGBT_porCIBG + YBGCP_porCI + YBGCPadCIZB1HG + YBGPA_porCI
 + YBGPA_porCIBG + YCIPA_porBG + YCIPA_porBGHG + YCIPA_uBGUC1HG + YCIPA_uBGUC1MP +
 YCIPA_uBGUC1GO + YCIPAadBGZB6MP + YCIBT_porBG + YCIBT_porBGHG + YCIBT_uBGUC1HG +
 YCIBT_uBGUC1MP + YCICP_porBG + YCICP_uBGUC1HG + YCICPaeBGZB5HG + YCIBA_porBG +
 YCIBA_porBGHG + YCIBA_uBGUC1HG - BGCIT = 0

 + YHGMMP_porBGPA + YHGMMP_porPABG + YHGGO_porBGPA + YHGGO_porPABG + YHGBG_porPA +
 YHGBG_porMPPA + YHGBG_porCIPA + YHGBGaeHGZB3PA + YHGCi_porBGPA + YHGCi_porPABG +
 YHGBA_porBG + YHGBA_porMPBG + YHGBA_porCIBG + YHGBA_uHGUC1BG + YHGBT_porBGPA +
 YHGBT_porPABG + YHGPC_porBGPA + YHGPC_porPABG + YHGBA_porPABG + YMPBG_porPA +
 YMPBG_porHGPA + YMPBGaeCIZB1PA + YMPPA_porBG + YMPPA_porHGBG + YMPPA_uMPUC1BG +
 YMPPAcdCIWA2BG + YMPPAceCIWA2BG + YMPPAcdHGWA2BG + YGOBG_porPA + YGOBG_porHGPA +
 YGOBGceMPWA1PA + YGOPA_porBG + YGOPA_porHGBG + YGOPA_uGOUC1BG + YBGCI_porPA +
 YBGCI_porPAHG + YBGCIcdPAWA1MP + YBGCIcdPAWA1HG + YBGCIcePAWA1MP + YBGPA_direto +
 YHGBT_porPA + YHGBT_porPAHG + YBGCP_porPA + YBGCPaePAZB1HG + YBGPA_porPAHG + YCIPA_porBG
 + YCIPA_porHGBG + YCIPA_uHGUC1BG + YCIPA_uMPUC1BG + YCIPA_uGOUC1BG + YCIPAAeMPZB6BG +
 YPABT_porBG + YPABT_porBGHG + YPABT_uBGUC1HG + YPABT_uBGUC1MP + YPACP_porBG +
 YPACP_uBGUC1HG + YPACPaeBGZB5HG - BGPAT = 0

 + YHGBG_porBT + YHGBT_porBG + YHGBT_porMPBG + YHGBT_porCIBG + YHGBT_porPABG +
 YHGBT_uHGUC1BG + YMPBG_porBT + YMPBT_porBG + YMPBT_porHGBG + YMPBT_uMPUC1BG +
 YMPBTcdCIWA2BG + YGOBG_porBT + YGOBT_porBG + YGOBT_porHGBG + YGOBT_uGOUC1BG +
 YGOBTcdCIWA2BG + YBGCI_porBT + YBGPA_porBT + YHGBT_direto + YCIBT_porBG + YCIBT_porHGBG
 + YCIBT_uHGUC1BG + YCIBT_uMPUC1BG + YPABT_porBG + YPABT_porHGBG + YPABT_uHGUC1BG +
 YPABT_uMPUC1BG - BGBTT = 0

 + YHGBG_porCP + YHGBGaeHGZB2CP + YHGBGadHGZB2CP + YHGPC_porBG + YHGPC_porMPBG +
 YHGPC_porCIBG + YHGPC_porPABG + YHGPC_uHGUC1BG + YMPBG_porCP + YMPBGaeHGZB3CP +
 YMPCP_porBG + YMPCP_uMPUC1BG + YMPCPadMPZB5BG + YGOBG_porCP + YGOBGaeHGZB3CP +
 YGOCP_porBG + YGOCP_uGOUC1BG + YGOCPadHGZB6BG + YBGCI_porCP + YBGCIadCPZB3HG +
 YBGPA_porCP + YBGCP_direto + YCICP_porBG + YCICP_uHGUC1BG + YCICPadHGZB5BG + YPACP_porBG
 + YPACP_uHGUC1BG + YPACPaeHGZB5BG - BGCPPT = 0

 + YHGBG_porBA + YHGBA_porBG + YHGBA_porMPBG + YHGBA_porCIBG + YHGBA_porPABG +
 YHGBA_uHGUC1BG + YMPBG_porBA + YMPBA_porBG + YMPBA_porHGBG + YMPBA_uMPUC1BG +
 YGOBG_porBA + YGOBA_porBG + YGOBA_porHGBG + YGOBA_uGOUC1BG + YBGCI_porBA + YBGPA_direto
 + YCIBA_porBG + YCIBA_porHGBG + YCIBA_uHGUC1BG - BGBAT = 0

 + YHGMMP_porCIPA + YHGMMP_porPACI + YHGGO_porCIPA + YHGGO_porPACI + YHGBG_porCIPA +
 YHGBG_porPACI + YHGCi_porPA + YHGCi_porMPPA + YHGCi_porBGPA + YHGCiaeHGZB3PA +
 YHGBA_porCI + YHGBA_porMPCI + YHGBA_porBGCI + YHGBAadHGZB4CI + YHGBT_porCIPA +
 YHGBT_porPACI + YHGPC_porCIPA + YHGPC_porPACI + YHGBA_porPACI + YMPBGaeCIZB1PA +
 YMPBGadPAZB1CI + YMPCI_porPA + YMPCI_porHGPA + YMPPA_porCI + YMPPA_porHGCI +
 YMPPAceBGWA2CI + YMPPAceHGWA2CI + YMPPAcdBGWA2CI + YGOBT_porPA + YGOBTadHGZB1CI +
 YGOPA_porCI + YGOPA_porHGCI + YBGCI_porPA + YBGCI_porHGPA + YBGCIceMPWA1PA +
 YBGCIceHGWA1PA + YBGCIcdMPWA1PA + YBGPA_porCI + YBGPA_porHGCI + YCIPA_direto +
 YCIBT_porPA + YCIBT_porPAHG + YCICP_porPA + YCICPaeCIZB1HG + YCIBA_porPAHG + YPABT_porCI
 + YPABT_porCIBG + YPACP_porCI + YPACPadPAZB1HG - CIPAT = 0

```

+ YHGCi_porBT + YHGBT_porCI + YHGBT_porMPCI + YHGBT_porBGCI + YHGBT_porPACI +
YHGBTadHGZB4CI + YMPCI_porBT + YMPBT_porCI + YMPBT_porHGCI + YMPBTceBGWA2CI +
YGOCI_porBT + YGOBT_porCI + YGOBT_porHGCI + YGOBTceBGWA2CI + YBGCI_porBT + YBGBT_porCI +
YBGBT_porHGCI + YCIPA_porBT + YCIBT_direto + YPABT_porCI + YPABT_porHGCI - CIBTT = 0

+ YHGMpaeHGZB2CP + YHGMpadHGZB4CI + YHGGOaeHGZB2CP + YHGGOadHGZB4CI + YHGBGaeHGZB2CP +
YHGBGadHGZB4CI + YHGCi_porCP + YHGCiadhGZB2CI + YHGPAaeHGZB2PA + YHGPAadHGZB4CI +
YHGBTadHGZB4CI + YHGCP_porCI + YHGCP_porMPCI + YHGCP_porBGCI + YHGCP_porPACI +
YHGBAadHGZB4CI + YHGBAadHGZB2CI + YMPCI_porCP + YMPCIaeHGZB3CP + YMPCP_porCI +
YMPCPaeHGZB1CI + YGOCP_porCP + YGOCP_porCI + YGOCPaeHGZB1CI + YBGCI_porCP +
YBGCIaeHGZB3CP + YBGCP_porCI + YBGCPaeHGZB1CI + YCIPA_porCP + YCIPAadCPZB3PA +
YCICP_direto + YPACP_porCI + YPACPaePAZB1CI - CICPT = 0

+ YHGCi_porBA + YHGBA_porCI + YHGBA_porMPCI + YHGBA_porBGCI + YHGBA_porPACI +
YHGBAadHGZB4CI + YHGBAadHGZB2CI + YMPCI_porBA + YMPBA_porCI + YMPBA_porHGCI +
YGOCI_porBA + YGOBA_porCI + YGOBA_porHGCI + YBGCI_porBA + YBGBA_porCI + YBGBA_porHGCI +
YCIBA_direto - CIBAT = 0

+ YHGPA_porBT + YHGBT_porPA + YHGBT_porMPPA + YHGBT_porBGPA + YHGBT_porCIPA +
YHGBTaeHGZB3PA + YMPPA_porBT + YMPBT_porPA + YMPBT_porHGPA + YGOPA_porBT + YGOBT_porPA +
YGOBT_porHGPA + YGOBTceMPWA1PA + YBGPA_porBT + YBGBT_porPA + YBGBT_porHGPA + YCIPA_porBT +
YCIBT_porPA + YCIBT_porHGPA + YPABT_direto - PABTT = 0

+ YHGMpadHGZB2CP + YHGMpaeHGZB3PA + YHGGOadHGZB2CP + YHGGOaeHGZB3PA + YHGBGadHGZB2CP +
YHGBGaeHGZB3PA + YHGCiadhGZB2CI + YHGCiadhGZB3PA + YHGPA_porCP + YHGPAaeHGZB2PA +
YHGBTaeHGZB3PA + YHGCP_porPA + YHGCP_porMPPA + YHGCP_porBGPA + YHGCP_porCIPA +
YHGBAadHGZB2CI + YMPPA_porCP + YMPPAaeHGZB3PA + YMPCP_porPA + YMPCPadHGZB1PA +
YGOPA_porCP + YGOCP_porPA + YGOCPadHGZB1PA + YBGPA_porCP + YBGCP_porPA + YBGCPadHGZB1PA +
YCIPA_porCP + YCIPAaeHGZB3PA + YCICP_porPA + YCICPadCIZB1PA + YPACP_direto - PACPT = 0

\ CAMINHOS QUE PASSAM POR ANEL UNIDIRECIONAL EQUACAO CAPACIDADE CAMINHOS
+ YHGMp_uHGUC1MP + YHGGO_uHGUC1GO + YHGBG_uHGUC1BG + YHGCi_uHGUC1MP + YHGCi_uHGUC1BG +
YHGCi_uHGUC1GO + YHGPA_uHGUC1MP + YHGPA_uHGUC1BG + YHGPA_uHGUC1GO + YHGBT_uHGUC1MP +
YHGBT_uHGUC1BG + YHGBT_uHGUC1GO + YHGCP_uHGUC1MP + YHGCP_uHGUC1BG + YHGCP_uHGUC1GO +
YHGBA_uHGUC1MP + YHGBA_uHGUC1BG + YHGBA_uHGUC1GO + YMPGO_uMPUC1GO + YMPBG_uMPUC1BG +
YMPCI_uMPUC1HG + YMPCI_uMPUC1BG + YMPCI_uMPUC1GO + YMPPA_uMPUC1HG + YMPPA_uMPUC1BG +
YMPPA_uMPUC1GO + YMPBT_uMPUC1HG + YMPBT_uMPUC1BG + YMPBT_uMPUC1GO + YMPCP_uMPUC1HG +
YMPCP_uMPUC1BG + YMPCP_uMPUC1GO + YMPBA_uMPUC1HG + YMPBA_uMPUC1BG + YMPBA_uMPUC1GO +
YGOBG_uGOUC1BG + YGOBI_uGOUC1HG + YGOBI_uGOUC1MP + YGOBI_uGOUC1BG + YGOPA_uGOUC1HG +
YGOPA_uGOUC1MP + YGOPA_uGOUC1BG + YGOBT_uGOUC1HG + YGOBT_uGOUC1MP + YGOBT_uGOUC1BG +
YGOCp_uGOUC1HG + YGOCp_uGOUC1MP + YGOCp_uGOUC1BG + YGOBA_uGOUC1HG + YGOBA_uGOUC1MP +
YGOBA_uGOUC1BG + YBGCI_uBGUC1HG + YBGCI_uBGUC1MP + YBGCI_uBGUC1GO + YBGPA_uBGUC1HG +
YBGPA_uBGUC1MP + YBGPA_uBGUC1GO + YBGBT_uBGUC1HG + YBGBT_uBGUC1MP + YBGBT_uBGUC1GO +
YBGCP_uBGUC1HG + YBGCP_uBGUC1MP + YBGCP_uBGUC1GO + YBGBA_uBGUC1HG + YBGBA_uBGUC1MP +
YBGBA_uBGUC1GO + YCIPA_uHGUC1MP + YCIPA_uHGUC1BG + YCIPA_uMPUC1HG + YCIPA_uBGUC1HG +
YCIPA_uHGUC1GO + YCIPA_uGOUC1HG + YCIPA_uMPUC1BG + YCIPA_uBGUC1MP + YCIPA_uMPUC1GO +
YCIPA_uGOUC1MP + YCIPA_uGOUC1BG + YCIPA_uBGUC1GO + YCIBT_uHGUC1MP + YCIBT_uHGUC1BG +
YCIBT_uMPUC1HG + YCIBT_uBGUC1HG + YCIBT_uHGUC1GO + YCIBT_uGOUC1HG + YCIBT_uMPUC1BG +
YCIBT_uBGUC1MP + YCICP_uHGUC1MP + YCICP_uHGUC1BG + YCICP_uMPUC1HG + YCICP_uBGUC1HG +
YCICP_uHGUC1GO + YCICP_uGOUC1HG + YCIBA_uHGUC1MP + YCIBA_uHGUC1BG + YCIBA_uMPUC1HG +
YCIBA_uBGUC1HG + YCIBA_uHGUC1GO + YCIBA_uGOUC1HG + YPABT_uHGUC1MP + YPABT_uHGUC1BG +
YPABT_uMPUC1HG + YPABT_uBGUC1HG + YPABT_uHGUC1GO + YPABT_uGOUC1HG + YPABT_uMPUC1BG +
YPABT_uBGUC1MP + YPACP_uHGUC1MP + YPACP_uHGUC1BG + YPACP_uMPUC1HG + YPACP_uBGUC1HG +
YPACP_uHGUC1GO + YPACP_uGOUC1HG - UC1_T = 0

```

Anexo 5 – Campinas

```

\ ARQUIVO_COM_MERGE_DE_CAMINHOS
min

\ CUSTO EQUIPAMENTOS PONTO A PONTO FUNCAO OBJETIVO
+ 0 INICIAL
+ 22 XCLCE1pi + 44 XCLCE1si + 60 XCLCE2pi + 120 XCLCE3pi
+ 22 XCLCB1pi + 44 XCLCB1si + 60 XCLCB2pi
+ 22 XCLCT1pi + 44 XCLCT1si + 60 XCLCT2pi + 120 XCLCT3pi
+ 22 XCLDL1pi + 44 XCLDL1si
+ 22 XCLOV1pi + 44 XCLOV1si
+ 22 XCLVC1pi + 44 XCLVC1si + 60 XCLVC2pi
+ 22 XCECB1pi + 44 XCECB1si + 60 XCECB2pi + 120 XCECB3pi
+ 22 XCECT1pi + 44 XCECT1si + 60 XCECT2pi + 120 XCECT3pi
+ 120 XCEJO3pf
+ 22 XCEVT1pi + 44 XCEVT1si + 60 XCEVT2pi
+ 22 XCBCT1pi + 44 XCBCT1si + 60 XCBCT2pi + 120 XCBCT3pi

```

```

+ 120 XCBBG3pf
+ 22 XCBBE1pi + 44 XCBBE1si
+ 22 XCBMD1pi
+ 22 XCBSS1pi + 44 XCBSS1si
+ 22 XCBJE1pi
+ 22 XCTVC1pi + 44 XCTVC1si
+ 22 XCTNA1pi + 44 XCTNA1si + 60 XCTNA2pi + 120 XCTNA3pi
+ 22 XCTAM1pi + 44 XCTAM1si + 60 XCTAM2pi
\ CUSTO EQUIPAMENTOS ANEL BIDIRECIONAL FUNCAO OBJETIVO
+ 200 ZB1_2pi + 360 ZB1_3pi
+ 150 ZB2_2pi + 270 ZB2_3pi
+ 150 ZB3_2pi + 270 ZB3_3pi
\ CUSTO EQUIPAMENTOS CADEIA FUNCAO OBJETIVO
+ 160 WA1_2pi + 300 WA1_3pi
\ CUSTO EQUIPAMENTOS ANEL UNIDIRECIONAL FUNCAO OBJETIVO
+ 105 UC1_2pi + 195 UC1_3pi
\ FINAL DA FUNCAO OBJETIVO
+ 0 FINALEQUIPO
SUBJECT TO
\ CAMINHOS DE CADA DEMANDA EQUACOES DE DEMANDA
+ YCLCE_direto + YCLCE_porCB + YCLCE_porCT + YCLCE_porCBCT + YCLCE_porCTCB +
YCLCE_porVCT + YCLCE_uCTUC1CE + YCLCE_uCBUC1CE = 80
+ YCLCB_direto + YCLCB_porCE + YCLCB_porCT + YCLCB_porCECT + YCLCB_porCTCE +
YCLCB_uCEUC1CB + YCLCB_uCTUC1CB = 62
+ YCLCT_direto + YCLCT_porCE + YCLCT_porCB + YCLCT_porVC + YCLCT_porCECB +
YCLCT_porCBCE + YCLCT_uCEUC1CT + YCLCT_uCBUC1CT = 102
+ YCLDL_direto = 18
+ YCLOV_direto = 22
+ YCLVC_direto + YCLVC_porCT + YCLVC_uCEUC1CT + YCLVCadCLZB2CT = 6
+ YCLJO_porCE + YCLJO_uCTUC1CE + YCLJO_uCBUC1CE + YCLJOaeCLZB2CE + YCLJOaeCBZB3CE = 6
+ YCLVT_porCE + YCLVT_porCBCE + YCLVT_porCTCE + YCLVT_uCTUC1CE + YCLVT_uCBUC1CE = 2
+ YCLBG_porCB + YCLBG_uCEUC1CB + YCLBGadCLZB1CB = 8
+ YCLNA_porCT + YCLNA_uCEUC1CT + YCLNAadCLZB2CT = 8
+ YCLAM_porCT + YCLAM_porCECT + YCLAM_uCEUC1CT = 2
+ YCECB_direto + YCECB_porCT + YCECB_porCL + YCECB_uCEUC1CB + YCECBaeCEZB1CB +
YCECBadCEZB2CL = 134
+ YCECT_direto + YCECT_porCB + YCECT_porCL + YCECT_uCEUC1CT = 220
+ YCEVC_porCT + YCEVC_porCL + YCEVC_uCEUC1CT + YCEVCadCEZB1CT = 12
+ YCEJO_direto = 18
+ YCEVT_direto = 6
+ YCEBG_porCB + YCEBG_porCTCB + YCEBG_porCLCB + YCEBG_uCEUC1CB + YCEBGaeCEZB1CB = 16
+ YCEBE_porCB + YCEBE_porCTCB + YCEBE_uCEUC1CB = 8
+ YCENA_porCT + YCENA_porCBCT + YCENA_porCLCT + YCENA_uCEUC1CT = 16
+ YCEAM_porCT + YCEAM_porCBCT + YCEAM_uCEUC1CT = 6
+ YCBCT_direto + YCBCT_porCE + YCBCT_porCL + YCBCT_uCBUC1CT + YCBCTaeCBZB1CT +
YCBCTadCLZB2CT = 154
+ YCBVC_porCT + YCBVC_porCL + YCBVC_uCBUC1CT + YCBVCadCEZB2CT + YCBVCadCBWA1CL = 12
+ YCBJO_porCE + YCBJO_porCTCE + YCBJO_porCLCE + YCBJO_uCBUC1CE = 18
+ YCBVT_porCE + YCBVT_porCTCE + YCBVT_uCBUC1CE = 10
+ YCBBG_direto = 30
+ YCBBE_direto = 2
+ YCBMD_direto = 14
+ YCBSS_direto = 18
+ YCBJE_direto = 6
+ YCBNA_porCT + YCBNA_porCECT + YCBNA_porCLCT + YCBNA_uCBUC1CT = 40
+ YCBAM_porCT + YCBAM_porCECT + YCBAM_uCBUC1CT = 12
+ YCTVC_direto + YCTVC_porCL + YCTVC_porCECL + YCTVCaeCTZB1CL = 16
+ YCTJO_porCE + YCTJO_porCBCE + YCTJO_porCLCE + YCTJO_uCTUC1CE = 40
+ YCTVT_porCE + YCTVT_porCBCE + YCTVT_uCTUC1CE + YCTVTceCLWA1CE = 14
+ YCTBG_porCB + YCTBG_porCECB + YCTBG_uCTUC1CB + YCTBGadCTZB1CB = 26
+ YCTBE_porCB + YCTBE_porCECB + YCTBE_uCTUC1CB + YCTBEceCLWA1CB = 10
+ YCTNA_direto = 34
+ YCTAM_direto = 14
+ YJONA_uCEUC1CT + YJONAadCEZB2CT = 2
\ CAPACIDADES DE CADA ANEL BIDIRECIONAL (CAPZ)
+ 63 ZB1_2pi + 252 ZB1_3pi - CAPZB1 = 0
+ 63 ZB2_2pi + 252 ZB2_3pi - CAPZB2 = 0
+ 63 ZB3_2pi + 252 ZB3_3pi - CAPZB3 = 0
\ CAPACIDADES DE CADA CADEIA (CAPW)
+ 63 WA1_2pi + 252 WA1_3pi - CAPWA1 = 0
\ CAPACIDADES DO ARCO (CF A CF) EQUACAO CAPACIDADE EQUIPAMENTOS
\ ANEL BIDIRECIONAL CADEIA PONTO A PONTO
- 16 XCLCE1pi - 32 XCLCE1si - 63 XCLCE2pi - 252 XCLCE3pi - CAPZB1 - CAPZB2 - CAPWA1 +
CLCET + folgaCLCET = 0
- 16 XCLCB1pi - 32 XCLCB1si - 63 XCLCB2pi + CLCBT + folgaCLCBT = 0

```

```

- 16 XCLCT1pi - 32 XCLCT1lsi - 63 XCLCT2pi - 252 XCLCT3pi - CAPZB1 - CAPZB2 + CLCTT +
folgaCLCTT = 0
- 16 XCLDL1pi - 32 XCLDL1lsi + CLDLT + folgaCLDLT = 0
- 16 XCLOV1pi - 32 XCLOV1lsi - CAPWA1 + CLOVT + folgaCLOVT = 0
- 16 XCLVC1pi - 32 XCLVC1lsi - 63 XCLVC2pi + CLVCT + folgaCLVCT = 0
- 16 XCECB1pi - 32 XCECB1lsi - 63 XCECB2pi - 252 XCECB3pi - CAPZB1 - CAPZB3 - CAPWA1 +
CECBT + folgaCECBT = 0
- 16 XCECT1pi - 32 XCECT1lsi - 63 XCECT2pi - 252 XCECT3pi - CAPZB2 - CAPZB3 + CECTT +
folgaCECTT = 0
- 252 XCEJO3pf + CEJOT + folgaCEJOT = 0
- 16 XCEVT1pi - 32 XCEVT1lsi - 63 XCEVT2pi + CEVTT + folgaCEVTT = 0
- 16 XCBCT1pi - 32 XCBCT1lsi - 63 XCBCT2pi - 252 XCBCT3pi - CAPZB1 - CAPZB3 + CBCTT +
folgaCBCTT = 0
- 252 XCBBG3pf + CBBGT + folgaCBBGT = 0
- 16 XCBBE1pi - 32 XCBBE1lsi + CBBET + folgaCBBET = 0
- 16 XCBMD1pi + CBMDT + folgaCBMDT = 0
- 16 XCBSS1pi - 32 XCBSS1lsi + CBSST + folgaCBSST = 0
- 16 XCBJE1pi + CBJET + folgaCBJET = 0
- 16 XCTVC1pi - 32 XCTVC1lsi + CTVCT + folgaCTVCT = 0
- 16 XCTNA1pi - 32 XCTNA1lsi - 63 XCTNA2pi - 252 XCTNA3pi + CTNAT + folgaCTNAT = 0
- 16 XCTAM1pi - 32 XCTAM1lsi - 63 XCTAM2pi + CTAMT + folgaCTAMT = 0
\ CAPACIDADES DE ANEL UNIDIRECIONAL EQUACAO CAPACIDADE EQUIPAMENTOS
- 63 UC1_2pi - 252 UC1_3pi + UC1_T + folgaUC1_T = 0
\ CAMINHOS QUE PASSAM POR CADA ARCO EQUACAO CAPACIDADE CAMINHOS

+ YCLCE_direto + YCLCB_porCE + YCLCB_porCECT + YCLCB_uCEUC1CB + YCLCT_porCE +
YCLCT_porCECB + YCLCT_uCEUC1CT + YCLVC_uCEUC1CT + YCLVCadCLZB2CT + YCLJO_porCE +
YCLVT_porCE + YCLBG_uCEUC1CB + YCLBGadCLZB1CB + YCLNA_uCEUC1CT + YCLNAadCLZB2CT +
YCLAM_porCECT + YCLAM_uCEUC1CT + YCECB_porCL + YCECBaeCEZB1CB + YCECT_porCL +
YCEVC_porCL + YCEBG_porCLCB + YCEBGaeCEZB1CB + YCENA_porCLCT + YCBCTaeCBZB1CT +
YCBCTadCLZB2CT + YCBVCcdCBWA1CL + YCBJO_porCLCE + YCTVC_porCECL + YCTVCaeCTZB1CL +
YCTJO_porCLCE + YCTVTceCLWA1CE + YCTBGadCTZB1CB + YCTBEceCLWA1CB - CLCET = 0

+ YCLCE_porCB + YCLCE_porCBCT + YCLCE_uCBUC1CE + YCLCB_direto + YCLCT_porCB +
YCLCT_porCBCE + YCLCT_uCBUC1CT + YCLJO_uCBUC1CE + YCLJOaeCBZB3CE + YCLVT_porCBCE +
YCLVT_uCBUC1CE + YCLBG_porCB + YCECB_porCL + YCECBadCEZB2CL + YCEBG_porCLCB +
YCBCT_porCL + YCBCTadCLZB2CT + YCBVC_porCL + YCBJO_porCLCE + YCBNA_porCLCT - CLCBT = 0

+ YCLCE_porCT + YCLCE_porCTCB + YCLCE_uCTUC1CE + YCLCB_porCT + YCLCB_porCTCE +
YCLCB_uCTUC1CB + YCLCT_direto + YCLVC_porCT + YCLJO_uCTUC1CE + YCLJOaeCLZB2CE +
YCLVT_porCTCE + YCLVT_uCTUC1CE + YCLNA_porCT + YCLAM_porCT + YCECBaeCEZB1CB +
YCECBadCEZB2CL + YCECT_porCL + YCEBGaeCEZB1CB + YCENA_porCLCT + YCBCT_porCL +
YCBCTaeCBZB1CT + YCBNA_porCLCT + YCTVC_porCL + YCTJO_porCLCE + YCTVTceCLWA1CE +
YCTBGadCTZB1CB + YCTBEceCLWA1CB - CLCTT = 0

+ YCLDL_direto - CLDLT = 0

+ XCLOV_direto - CLOVT = 0

+ YCLCE_porVCCT + YCLCT_porVC + YCLVC_direto + YCEVC_porCL + YCBVC_porCL +
YCBVCcdCBWA1CL + YCTVC_porCL + YCTVC_porCECL + YCTVCaeCTZB1CL - CLVCT = 0

+ YCLCE_porCB + YCLCE_porCTCB + YCLCB_porCE + YCLCB_porCTCE + YCLCT_porCECB +
YCLCT_porCBCE + YCLJOaeCBZB3CE + YCLVT_porCBCE + YCLBGadCLZB1CB + YCECB_direto +
YCECT_porCB + YCEVCadCEZB1CT + YCEBG_porCB + YCEBE_porCB + YCENA_porCBCT + YCEAM_porCBCT
+ YCBCT_porCE + YCBCTaeCBZB1CT + YCBVCadCEZB2CT + YCBVCcdCBWA1CL + YCBJO_porCE +
YCBVT_porCE + YCBNA_porCECT + YCBAM_porCECT + YCTVCaeCTZB1CL + YCTJO_porCBCE +
YCTVT_porCBCE + YCTBG_porCECB + YCTBGadCTZB1CB + YCTBE_porCECB + YCTBEceCLWA1CB - CECBT
= 0

+ YCLCE_porCT + YCLCE_porCBCT + YCLCE_porVCCT + YCLCB_porCECT + YCLCB_porCTCE +
YCLCT_porCE + YCLCT_porCBCE + YCLVCadCLZB2CT + YCLJOaeCLZB2CE + YCLVT_porCTCE +
YCLNAadCLZB2CT + YCLAM_porCECT + YCECB_porCT + YCECBadCEZB2CL + YCECT_direto +
YCEVC_porCT + YCEBG_porCTCB + YCEBE_porCTCB + YCENA_porCT + YCEAM_porCT + YCBCT_porCE +
YCBCTadCLZB2CT + YCBVCadCEZB2CT + YCBJO_porCTCE + YCBVT_porCTCE + YCBNA_porCECT +
YCBAM_porCECT + YCTVC_porCECL + YCTJO_porCE + YCTVT_porCE + YCTBG_porCECB +
YCTBE_porCECB + YJONAadCEZB2CT - CECTT = 0

+ YCLJO_porCE + YCLJO_uCTUC1CE + YCLJO_uCBUC1CE + YCLJOaeCLZB2CE + YCLJOaeCBZB3CE +
YCEJO_direto + YCBJO_porCE + YCBJO_porCTCE + YCBJO_porCLCE + YCBJO_uCBUC1CE +
YCTJO_porCE + YCTJO_porCBCE + YCTJO_porCLCE + YCTJO_uCTUC1CE + YJONA_uCEUC1CT +
YJONAadCEZB2CT - CEJOT = 0

+ YCLVT_porCE + YCLVT_porCBCE + YCLVT_porCTCE + YCLVT_uCTUC1CE + YCLVT_uCBUC1CE +
YCEVT_direto + YCBVT_porCE + YCBVT_porCTCE + YCBVT_uCBUC1CE + YCTVT_porCE +
YCTVT_porCBCE + YCTVT_uCTUC1CE + YCTVTceCLWA1CE - CEVTT = 0

```

+ YCLCE_porCBCT + YCLCE_porCTCB + YCLCB_porCT + YCLCB_porCECT + YCLCT_porCB +
YCLCT_porCECB + YCECB_porCT + YCECBaeCEZB1CB + YCECT_porCB + YCEVCadCEZB1CT +
YCEBG_porCTCB + YCEBGaeCEZB1CB + YCEBE_porCTCB + YCENA_porCBCT + YCEAM_porCBCT +
YCBCT_direto + YCBVC_porCT + YCBJO_porCTCE + YCBVT_porCTCE + YCBNA_porCT + YCBAM_porCT +
YCTVCaECTZB1CL + YCTJO_porCBCE + YCTVT_porCBCE + YCTBG_porCB + YCTBE_porCB - CBCTT = 0

+ YCLBG_porCB + YCLBG_uCEUC1CB + YCLBGadCLZB1CB + YCEBG_porCB + YCEBG_porCTCB +
YCEBG_porCLCB + YCEBG_uCEUC1CB + YCEBGaeCEZB1CB + YCBBG_direto + YCTBG_porCB +
YCTBG_porCECB + YCTBG_uCTUC1CB + YCTBGadCTZB1CB - CBBGT = 0

+ YCEBE_porCB + YCEBE_porCTCB + YCEBE_uCEUC1CB + YCBBE_direto + YCTBE_porCB +
YCTBE_porCECB + YCTBE_uCTUC1CB + YCTBEceCLWA1CB - CBBET = 0

+ YCBMD_direto - CBMDT = 0

+ YCBSS_direto - CBSST = 0

+ YCBJE_direto - CBJET = 0

+ YCLCE_porVCCT + YCLCT_porVC + YCLVC_porCT + YCLVC_uCEUC1CT + YCLVCadCLZB2CT +
YCEVC_porCT + YCEVC_uCEUC1CT + YCEVCadCEZB1CT + YCBVC_porCT + YCBVC_uCBUC1CT +
YCBVCadCEZB2CT + YCTVC_direto - CTVCT = 0

+ YCLNA_porCT + YCLNA_uCEUC1CT + YCLNAadCLZB2CT + YCENA_porCT + YCENA_porCBCT +
YCENA_porCLCT + YCENA_uCEUC1CT + YCBNA_porCT + YCBNA_porCECT + YCBNA_porCLCT +
YCBNA_uCBUC1CT + YCTNA_direto + YJONA_uCEUC1CT + YJONAadCEZB2CT - CTNAT = 0

+ YCLAM_porCT + YCLAM_porCECT + YCLAM_uCEUC1CT + YCEAM_porCT + YCEAM_porCBCT +
YCEAM_uCEUC1CT + YCBAM_porCT + YCBAM_porCECT + YCBAM_uCBUC1CT + YCTAM_direto - CTAMT = 0

\ CAMINHOS QUE PASSAM POR ANEL UNIDIRECIONAL EQUACAO CAPACIDADE CAMINHOS

+ YCLCE_uCTUC1CE + YCLCE_uCBUC1CE + YCLCB_uCEUC1CB + YCLCB_uCTUC1CB +
YCLCT_uCEUC1CT + YCLCT_uCBUC1CT + YCLVC_uCEUC1CT + YCLJO_uCTUC1CE +
YCLJO_uCBUC1CE + YCLVT_uCTUC1CE + YCLVT_uCBUC1CE + YCLBG_uCEUC1CB +
YCLNA_uCEUC1CT + YCLAM_uCEUC1CT + YCECB_uCEUC1CB + YCECT_uCEUC1CT +
YCEVC_uCEUC1CT + YCEBG_uCEUC1CB + YCEBE_uCEUC1CB + YCENA_uCEUC1CT +
YCEAM_uCEUC1CT + YCBCT_uCBUC1CT + YCBVC_uCBUC1CT + YCBJO_uCBUC1CE +
YCBVT_uCBUC1CE + YCBNA_uCBUC1CT + YCBAM_uCBUC1CT + YCTJO_uCTUC1CE +
YCTVT_uCTUC1CE + YCTBG_uCTUC1CB + YCTBE_uCTUC1CB + YJONA_uCEUC1CT -
UC1_T = 0