

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE SISTEMAS

**SISTEMAS DE TELECOMUNICAÇÕES :
PLANEJAMENTO DA REDE EXTERNA
EM SITUAÇÕES DE INCERTEZA**

Autor: Carlos Magnus Carlson Filho
Orientador: Prof. Dr. Hermano M. F. Tavares

Este exemplar correto por da redação final da tese
defendida por Carlos Magnus Carlson
Filho e aprovada pela Comissão
Julgada em 30 / 11 / 1998
Hermano M. F. Tavares
Orientador

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Campinas, novembro de 1998.



7904053

UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	UNICAMP
V.	Ex.
TELEF. BC/	36488
PROJ.	229/99
0	0 <input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	05/02/99
N.º CPD	

CM-00120772-3

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

C197s

Carlson Filho, Carlos Magnus

Sistemas de telecomunicações: planejamento da rede externa em situações de incerteza / Carlos Magnus Carlson Filho.--Campinas, SP: [s.n.], 1998.

Orientador: Hermano M. F. Tavares.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Telecomunicações - Planejamento. 2. Conjuntos difusos. 3. Programação linear. 4. Análise de intervalos. I. Tavares, Hermano M. F. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

À Magda e ao Pedro,
com amor.

AGRADECIMENTOS

Dentre as inúmeras pessoas que de alguma maneira participaram da elaboração deste trabalho, gostaria de agradecer especialmente a:

- Hermano, que além da amizade e da orientação segura, criou todas as condições para que o trabalho pudesse se realizar;
- Débora, de quem muitos domingos de convivência familiar foram subtraídos;
- Paulo Valente, pelo apoio logístico e, principalmente, fraterno;
- Reynaldo, pela colaboração constante e pelas sugestões sempre úteis;
- Akebo e Fernando Gomide, pela ajuda em (vários) momentos importantes;
- professores Anilton e Otto, pela disponibilidade e comentários valiosos;
- Valéria Volpe, Luís Paulo, Profa. Cória, Dr. Halim e a todos das FIRP/UNIRP, pela confiança, incentivo, redistribuição de tarefas e paciência;
- Pedro Peres, pelo bom humor e conversas tranquilas;
- Márcia, Raul, Secundino, Paulo França, Cristiano, Bergamaschi, Marcos, Walcyr, Mazé e demais amigos da UNICAMP;
- Jerônimo, Nakamura, Argemiro e demais amigos do CPqD;
- A minha família, em boa parte a razão de tudo isso, e que sempre trocou as dificuldades da ausência por manifestações de carinho.

A todos vocês e àqueles porventura não citados, agradeço sinceramente !

RESUMO

As Telecomunicações experimentam acelerada evolução. Novos serviços e tecnologias são continuamente disponibilizados. O meio é muito competitivo, e o volume de recursos financeiros envolvidos é significativo. Portanto, é desejável a existência de metodologias e modelos de planejamento do sistema. Em particular, a rede externa de assinantes constitui um importante objeto de estudo. Nela se concentra a maior parcela dos custos; ela passa por um processo de opticalização, iniciado pelos grandes assinantes e que pode atingir a todos os usuários. São fatores relevantes a considerar: equipamentos que aumentam a capacidade de transmissão dos fios de cobre, grande variedade de tecnologias e topologias ópticas, incerteza a respeito dos exatos valores de custos e demandas. Para esta conjuntura, o presente trabalho estabelece um elenco de modelos de planejamento. São formalizados tanto cenários “exatos” quanto aqueles cujos dados são imprecisos. Intervalos e conjuntos nebulosos são usados para representar incerteza. Os modelos de otimização desenvolvidos são do tipo linear misto. Métodos de resolução de problemas envolvendo intervalos e conjuntos nebulosos são também apresentados. É possível concluir que os modelos aqui estabelecidos são efetivamente úteis na atividade de planejamento. Diferentes topologias, bem como competições entre tecnologias, são representadas; a existência de dados imprecisos pode ser convenientemente tratada; o impacto das variações dos dados sobre o resultado do planejamento pode ser avaliado. O planejador conta assim com maiores subsídios para a etapa de decisão.

ABSTRACT

Telecommunications business is significantly changing. The rise of new services and technologies as well as the very competitive environment increase the importance of planning the expansion of the telecommunications system. It is worthy to study the access network, because it concentrates the major part of costs. Besides, the access network opticalization is in course, from key customers (business subscribers) to eventually all of users. Some aspects of the planning problem have to be taken into consideration: equipment that increase the transmission capacity of copper wire cables; diversity of optical technologies and topologies; uncertainty with respect to costs and demand values. To this setting, this work establishes a class of planning models. "Exact" as well as imprecise-data scenarios are addressed. Uncertainty is represented by using intervals and fuzzy sets. Mixed linear optimization models are developed. Solving methods for problems containing intervals and fuzzy numbers are also discussed. It is possible to conclude that the models are quite useful in the planning process. Several topologies and competition among technologies are represented. Imprecise data can be effectively dealt with. The impact of varying data onto planning results can be evaluated, and the planner has greater support at the decision step.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1

APRESENTAÇÃO	1
1. Contexto	2
2. Proposta de Trabalho	4
3. Organização do Texto	5

CAPÍTULO 2

SISTEMAS DE TELECOMUNICAÇÕES	7
1. A Rede Nacional de Telefonia	8
2. Serviços	10
3. Opticalização da Rede de Telecomunicações	12
3.1. <i>Rede de troncos</i>	12
3.2. <i>Rede externa</i>	12
3.3. <i>Máxima utilização do cobre</i>	13
4. Principais Tecnologias	13
4.1. <i>PDH (Plesiochronous Digital Hierarchy)</i>	13
4.2. <i>SDH (Synchronous Digital Hierarchy)</i>	15
4.3. <i>TDM/TDMA (Time-Division Multiplexing / Time-Division Multiple Access)</i>	15
5. Uso da Rede Metálica para Serviços em Altas Velocidades	16
6. Comentários	17

CAPÍTULO 3

MODELOS EXATOS PARA O PLANEJAMENTO DA REDE EXTERNA	18
1. Caracterização da Rede Externa	19
2. Literatura	19
3. Premissas da Modelagem	21
3.1. <i>Rede e Área de Estação</i>	21
3.2. <i>Demanda</i>	21
3.3. <i>Equipamentos</i>	21
3.4. <i>Consideração da Rede Existente</i>	22
3.5. <i>Estrutura de Custos</i>	22
3.6. <i>Critérios Possíveis</i>	23
3.7. <i>Abordagem do Problema por Etapas</i>	23

4. Modelos para Grandes Assinantes	24
4.1. <i>Formas de Atendimento</i>	24
4.2. <i>Modelo para Rotas Estratégicas</i>	26
4.3. <i>Incorporação de Equipamentos HDSL</i>	28
4.4. <i>Outros Critérios de Otimização</i>	28
4.5. <i>Exemplos</i>	31
5. Modelos para Opticalização da Rede Externa	37
5.1. <i>Considerações</i>	37
5.2. <i>Modelagem</i>	37
5.3. <i>Comentários</i>	42
6. Conclusões	43

CAPÍTULO 4

INCORPORAÇÃO DE CUSTOS INCERTOS	45
1. Motivação	46
2. Literatura	47
3. Modelo com Custos Incertos	48
4. Representação usando Intervalos	49
4.1. <i>Reformulação do problema</i>	49
4.2. <i>Resolução</i>	50
4.3. <i>Exemplo de aplicação</i>	51
5. Representação usando Números Fuzzy	54
5.1. <i>Conceitos</i>	54
5.2. <i>Reformulação do problema</i>	56
5.3. <i>Resolução</i>	56
5.4. <i>Exemplos de aplicação</i>	60
6. Conclusão	68

CAPÍTULO 5

INCORPORAÇÃO DE DEMANDA INCERTA	69
1. Motivação	70
2. Literatura	71
3. Modelo com Demandas Incertas	71
4. Representação usando Intervalos	73
4.1. <i>Reformulação do problema</i>	73
4.2. <i>Comentários</i>	74

5. Representação usando Números Fuzzy	76
5.1. <i>Reformulação do problema</i>	76
5.2. <i>Resolução</i>	78
5.3. <i>Exemplos de aplicação</i>	81
6. Conclusão	103
CAPÍTULO 6	
MÚLTIPLOS CRITÉRIOS, SOB INCERTEZA	105
1. Motivação	106
2. Literatura	107
3. Múltiplos Objetivos no Atendimento de Grandes Assinantes	108
3.1. <i>Tratamento fuzzy para problemas com múltiplos objetivos</i>	108
3.2. <i>Modelo para atendimento de grandes assinantes</i>	109
3.3. <i>Aplicação</i>	114
3.4. <i>Melhorias</i>	118
4. Incertezas a Respeito de Custos e/ou Demandas	122
4.1. <i>Tratamento fuzzy</i>	122
4.2. <i>Modelagem</i>	123
4.3. <i>Comentários</i>	124
5. Conclusão	124
CAPÍTULO 7	
CONCLUSÃO	126
REFERÊNCIAS	131

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1.	Componentes da Rede Nacional de Telefonia.....	8
Figura 2-2.	Componentes da rede externa.....	9
Figura 2-3.	Esquema da PDH européia.....	14
Figura 3-1.	Exemplo de economia de escala em custos de equipamentos.....	22
Figura 3-2.	Exemplos de topologias para Rotas Estratégicas.....	25
Figura 3-3.	Representação de anel unidirecional SDH.....	27
Figura 3-4.	Modelo de grafo para cálculo da receita.....	30
Figura 3-5.	Rede para aplicação.....	32
Figura 3-6.	Resultado usando o modelo 3-M1.....	33
Figura 3-7.	Resultado para maximização da receita com custo máximo de 12.00.....	35
Figura 3-8.	Resultado para maximização da receita com custo máximo de 9.00.....	36
Figura 3-9.	Resultado para maximização da receita com custo máximo de 6.02.....	36
Figura 3-10.	Modelo para opticalização com rede HFC.....	38
Figura 3-11.	Modelo para opticalização com FTTC.....	40
Figura 3-12.	Modelo para opticalização com ROP.....	41
Figura 4-1.	Rede com 18 nós para aplicação.....	51
Figura 4-2.	Rede para $p_E=1$	53
Figura 4-3.	Rede para $p_E=0$	54
Figura 4-4.	Número fuzzy triangular.....	56
Figura 4-5.	Equivalente de Adamo.....	59
Figura 4-6.	Resultado do cenário A-A.....	62
Figura 4-7.	Resultado do cenário C-C.....	62
Figura 4-8.	Rede com 40 nós para aplicação.....	64
Figura 4-9.	Resultado do cenário C-C.....	66
Figura 5-1.	Modelo de grafos para representação usando intervalos.....	74
Figura 5-2.	Número fuzzy triangular.....	77
Figura 5-3.	Equivalente de Adamo.....	79
Figura 5-4.	Rede para aplicação.....	82
Figura 5-5.	Resultado do cenário com demanda mínima.....	84
Figura 5-6.	Resultado do cenário com demanda máxima.....	84
Figura 5-7.	Resultado do cenário com demanda média.....	85
Figura 5-8.	Função de pertinência com efeito de truncamento.....	88
Figura 5-9.	Varição de custo com α	90
Figura 5-10.	Evolução da demanda sob truncamento e sob arredondamento.....	90

Figura 5-11.	Topologia para $0 \leq \lambda \leq 0.368$.	92
Figura 5-12.	Varição da demanda com λ .	94
Figura 5-13.	Topologia para $0.368 \leq \lambda \leq 0.600$.	96
Figura 5-14.	Topologia para $0.600 \leq \lambda \leq 0.690$.	97
Figura 5-15.	Topologia para $0.690 \leq \lambda \leq 0.732$.	98
Figura 5-16.	Topologia para $0.732 \leq \lambda \leq 0.782$.	99
Figura 5-17.	Topologia para $0.782 \leq \lambda \leq 0.800$.	100
Figura 5-18.	Topologia para $0.800 \leq \lambda \leq 0.968$.	100
Figura 5-19.	Topologia para $0.968 \leq \lambda \leq 1$.	101
Figura 5-20.	Varição de custo $Z(\lambda)$ com o parâmetro λ .	102
Figura 6-1.	Conceito de satisfação.	109
Figura 6-2.	Funções de pertinência para inequações do tipo $Z \lesseqgtr V$ e do tipo $R \gtrless 0$.	111
Figura 6-3.	Rede-exemplo e sistemas candidatos.	115
Figura 6-4.	Solução para o cenário-referência.	115
Figura 6-5.	Resultados com topologia estrela simples.	117
Figura 6-6.	Varição da satisfação com o orçamento.	117
Figura 6-7.	Varição da satisfação com o orçamento (caso 2).	119
Figura 6-8.	Cenário-referência para o estudo com topologia anel-estrela.	120
Figura 6-9.	Varição da satisfação com o orçamento.	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1.	Velocidades de transmissão necessárias.....	11
Tabela 2-2.	Padrão europeu para PDH.....	14
Tabela 2-3.	Padrão SDH.....	15
Tabela 3-1.	Dados dos equipamentos.....	32
Tabela 3-2.	Anéis SDH candidatos.....	33
Tabela 3-3.	Características dos serviços.....	34
Tabela 3-4.	Resultados para diferentes limitantes de custo.....	35
Tabela 4-1.	Dados dos equipamentos.....	51
Tabela 4-2.	Anéis SDH candidatos.....	52
Tabela 4-3.	Intervalos para os custos dos equipamentos SDH e HDSL.....	52
Tabela 4-4.	Triângulos de custos para SDH e HDSL.....	61
Tabela 4-5.	Resultados dos cenários.....	61
Tabela 4-6.	Triângulos de custos para SDH e HDSL.....	65
Tabela 4-7.	Anéis SDH candidatos.....	65
Tabela 4-8.	Resultados dos cenários.....	66
Tabela 4-9.	Impacto individual de cada tecnologia.....	67
Tabela 5-1.	Demandas consideradas.....	82
Tabela 5-2.	Dados dos equipamentos.....	83
Tabela 5-3.	Anéis SDH candidatos.....	83
Tabela 5-4.	Resultados dos cenários.....	85
Tabela 5-5.	Transições.....	87
Tabela 5-6.	Resultados com truncamento.....	89
Tabela 5-7.	Resultados com arredondamento.....	89
Tabela 5-8.	Nós de demanda e respectivas tolerâncias.....	91
Tabela 5-9.	Resumo da solução com $\lambda=0$	93
Tabela 5-10.	Transições devidas a λ	101
Tabela 5-11.	Participação de cada tecnologia.....	102
Tabela 5-12.	Demanda total atendida <i>versus</i> soma das capacidades dos equipamentos.....	103
Tabela 6-1.	Dados dos equipamentos.....	114
Tabela 6-2.	Resultados devidos à variação de orçamento.....	116
Tabela 6-3.	Resultados devidos à variação de orçamento (caso 2).....	118
Tabela 6-4.	Anéis SDH candidatos.....	120
Tabela 6-5.	Resultados devidos à variação de orçamento (anel-estrela).....	121

CAPÍTULO 1

APRESENTAÇÃO

1. Contexto

O negócio de telecomunicações atravessa um momento de extrema importância. A necessidade de transmissão de informações entre locais distantes é crescente. Na maior parte das vezes, o valor da informação transmitida ou o valor do serviço de comunicação prestado obriga o sistema a apresentar alta qualidade, traduzida pela baixa taxa de erros, grandes velocidades e por atrasos aceitáveis, por exemplo. O ambiente competitivo também estimula as empresas operadoras da área (as Teles) a investirem continuamente na evolução da tecnologia utilizada e dos serviços oferecidos.

Por seu lado, os fornecedores de equipamentos e infra-estrutura para as Teles têm diante de si um vasto porém disputadíssimo mercado. Assim, eles também encaram o desenvolvimento tecnológico como fator de sobrevivência. Embora em alguns casos as soluções devam obedecer a padrões estabelecidos, em outros há espaço para o surgimento de tecnologias proprietárias, as quais muitas vezes se mostram extremamente competitivas e compensadoras.

Nesse ambiente, a expansão do sistema de telecomunicações é, portanto, condicionada à análise das estratégias de mercado que levam a empresa operadora a cumprir sua missão, ao levantamento das demandas por serviços e à reflexão sobre as diferentes possibilidades tecnológicas a adotar, seus custos e benefícios. As decisões não devem ser imediatistas; ao contrário, o sistema de telecomunicações tem natureza tal que as soluções implantadas podem permanecer em funcionamento durante anos.

Assim, a expansão do sistema requer intensa atividade de planejamento. Onde, quando e quanto investir são questões para as quais o planejamento deve encontrar respostas. O principal objetivo é a prestação de serviços lucrativos e de qualidade.

O planejamento pode ser uma tarefa bastante complexa. Tome-se como exemplo a rede de acesso, que liga os assinantes (usuários do sistema) às suas respectivas centrais telefônicas (de comutação). A busca do objetivo acima requer de antemão escolhas por si mesmas difíceis. Sabe-se que a rede metálica atualmente usada como ligação entre centrais e assinantes está perto do limite de sua vida útil, no sentido de que não é fácil aproveitar essa rede para os novos serviços. De fato, estes serviços são beneficiados com transmissão digital, em alguns casos sob altas velocidades. Assim, o meio físico ideal é a fibra óptica. Mesmo a rede metálica, porém, pode receber equipamentos que a ajudam a superar algumas de suas limitações quanto à comunicação de dados.

Se as fibras ópticas podem aproveitar a infra-estrutura existente para a rede metálica (dutos), o custo da implantação de um sistema óptico de telecomunicações fica concentrado nos equipamentos responsáveis pela conversão e agregação/separação de sinais. Esse custo pode ser bastante elevado. Entretanto, o grande número de fornecedores força a análise de várias alternativas, não apenas do ponto de vista do custo, mas também de critérios como qualidade, capacidade de expansão, padronização e outros.

A enorme quantidade de opções a analisar e o valor do objeto de planejamento indicam que sistemas de apoio à decisão baseados em modelos matemáticos de otimização precisam ser utilizados. Nesses modelos, situações envolvendo variáveis de decisão (alocação e dimensionamento de equipamentos), restrições (tecnologia, topologia, etc.) e critérios (custo, lucro, etc.) podem ser representadas. O avanço da informática viabiliza a resolução de modelos de grande porte, como costuma ser o caso em telecomunicações.

Uma crítica comum ao uso de modelos em planejamento é sustentada pelo argumento de que expressões matemáticas são por demais “exatas” e fornecem resultados que dependem fortemente dos dados de entrada do modelo. Em outras palavras, os modelos são rígidos e falham (ou não podem ser totalmente aproveitados) quando aplicados a conjunturas mais flexíveis.

O planejamento de sistemas de telecomunicações certamente exige modelos assim flexíveis. Dados importantes necessários aos planejadores podem mudar de valor entre o instante da confecção do plano e a sua efetiva implantação. A falta de dados sobre a penetração dos serviços oferecidos e a possibilidade de haver novos serviços significam, no planejamento, incerteza a respeito da demanda. Os equipamentos considerados, vindos de vários fornecedores, têm custos que se pode apenas estimar, mas cujo valor real dependerá de fatores por vezes alheios. Até mesmo tecnologias e padrões podem nascer ou perder mercado ao longo do tempo. Outro complicador é a existência de muitos critérios conflitantes, que levam a diferentes resultados, dependendo da importância e da interpretação que se faz de cada critério.

Portanto, para essas tarefas de planejamento são necessários modelos que acomodem também incertezas a respeito dos dados. Os resultados, porém, devem ser precisos, apoiando efetivamente o processo de decisão. Idealmente, esses resultados permitirão ao planejador antever diferentes configurações devidas a eventuais variações nos valores dos dados utilizados como entrada.

2. Proposta de Trabalho

Neste trabalho são apresentados modelos de planejamento de telecomunicações que procuram atingir o perfil delineado acima. A rede de acesso dos assinantes às centrais é o objeto de estudo. Procura-se então planejar a transformação dessa rede no sentido de permitir a prestação de novos serviços através da implantação de fibras ópticas e demais equipamentos necessários. Assume-se que a opticalização é realizada de acordo com a divisão natural da rede: sistemas dedicados para grandes assinantes, rede primária (que liga as centrais a pontos de alimentação mais próximos dos assinantes) e rede secundária (que liga cada assinante, individualmente, ao respectivo ponto de alimentação). São desenvolvidos modelos que abordam estas três partes do problema. Naturalmente, as duas primeiras partes, mais relevantes do ponto de vista do planejamento, são mais enfatizadas. Os modelos procuram refletir o ambiente de competição entre tecnologias ópticas, oferecendo ainda a opção do uso mais prolongado da rede metálica. Além disso, propõem-se outros critérios de planejamento que não o custo, tais como a maximização da receita ou da folga de equipamentos.

Para atender o requisito de flexibilidade, os modelos devem suportar dados incertos. O problema do atendimento de grandes assinantes é tomado como exemplo. Seu modelo de planejamento é seguidamente reformulado, de maneira a incorporar imprecisões quanto aos custos dos equipamentos e quanto à expectativa de demanda. Discutem-se as maneiras de resolver o problema contendo tais imprecisões. Duas técnicas são intensamente exploradas e aplicadas: o uso de intervalos e o de conjuntos nebulosos (*fuzzy sets*). Com isto, obtém-se uma classe inteira de modelos, que cobre desde casos simples (nos quais os modelos praticamente não diferem do caso convencional) até situações bastante complexas (em que os modelos são paramétricos e permitem gerar, analisar e interpretar um amplo espectro de soluções de acordo com a confiança a respeito dos dados utilizados).

Ainda visando flexibilidade, o problema do atendimento de grandes assinantes ganha um tratamento com múltiplos objetivos. Incertezas de outro tipo são consideradas. Ao invés de imprecisões sobre valores individuais de custo ou demanda, admite-se dúvida sobre o orçamento a ser respeitado, ou sobre o total de demanda que se deve obrigatoriamente atender. O compromisso orçamento *versus* atendimento é explorado a partir de uma formulação também baseada em conjuntos nebulosos. A busca por soluções, neste caso, é guiada por um critério de máxima satisfação, medida a partir do afastamento em relação às metas estabelecidas. As medidas de satisfação podem ser manipuladas pelo planejador para contemplar situações

específicas. Como resultado da abordagem, diretrizes de planejamento e perspectivas da rede para diversas conjunturas são obtidas.

3. Organização do Texto

Devido à grande variedade de problemas e respectivas abordagens, optou-se pela apresentação em capítulos separados, objetivando maior clareza.

Uma descrição genérica do sistema de telecomunicações é o assunto do capítulo 2. A descrição não pretende ser completa, mas é suficiente para o nível de detalhe seguido no trabalho. Ao lado da rede, também os serviços são caracterizados. A necessidade de opticalização é esclarecida, e a maneira pela qual isto pode acontecer é apresentada. Discutem-se também as principais tecnologias ópticas envolvidas e a possibilidade de aproveitamento da rede de cobre para prestação de serviços digitais.

No capítulo 3, são formulados modelos de auxílio ao planejamento da opticalização dos diversos segmentos da rede de acesso dos assinantes às centrais. Esses modelos são chamados “exatos”, pois não assumem a existência de nenhum tipo de imprecisão nos dados. Critérios alternativos à minimização de custo são colocados. Duas aplicações de modelos relativos a grandes assinantes são realizadas: uma segue o critério de custo, enquanto a outra visa maximizar a receita. Assim, como em todas as aplicações mostradas ao longo do trabalho, são efetuadas análises sobre a competição entre tecnologias e seu impacto no resultado.

O capítulo 4 discute a transformação dos modelos no sentido de incorporar incerteza sobre os dados de custo dos equipamentos. Em particular, é usado o modelo para grandes assinantes. Técnicas baseadas em intervalos e em conjuntos nebulosos são adotadas; discute-se seu impacto no modelo e suas semelhanças e diferenças. Aplicações a redes de médio e grande porte são relatadas.

A incorporação da incerteza sobre a demanda é o assunto do capítulo 5. Também neste caso o modelo para grandes assinantes é reformulado, de acordo com o uso de intervalos ou de conjuntos nebulosos. São enfatizados os modelos paramétricos obtidos, que permitem analisar inúmeras possibilidades. Aplicações também são documentadas.

No capítulo 6, outros tipos de incerteza, mais genéricos, são discutidos. Sua incorporação pelo modelo leva a um problema com múltiplos objetivos. Uma abordagem baseada na maximização de satisfações é desenvolvida, de acordo com conceitos de conjuntos nebulosos. A

medida de satisfação geral é subjetiva e pode ser manipulada pelo planejador. Pela aplicação do modelo, diretrizes de planejamento são obtidas.

Assim, os capítulos 3 a 6 encerram as principais contribuições deste trabalho. Inicialmente, o problema de planejamento é formalizado e são propostos modelos adequados a variadas situações (capítulo 3). A seguir, é efetuado um abrangente estudo da competição entre tecnologias, temperado pela presença de dados cujos valores não são precisamente conhecidos no instante do planejamento (capítulos 4 e 5). Finalmente, ainda considerando um ambiente de incertezas, são apresentadas maneiras de auxiliar o planejador a realizar a difícil escolha entre o respeito ao orçamento e o atendimento da demanda (capítulo 6).

Os resultados descritos nesses capítulos ensejaram publicações e participações em congressos científicos das áreas de Conjuntos Nebulosos e de Telecomunicações, conforme se pode perceber pela análise das referências bibliográficas listadas.

Por fim, além de uma visão geral do trabalho e de seus principais resultados, são apresentadas perspectivas de continuidade.

CAPÍTULO 2

SISTEMAS DE TELECOMUNICAÇÕES

1. A Rede Nacional de Telefonia

Um sistema de telecomunicações é composto por diversos tipos de redes e equipamentos, de variadas tecnologias e abrangências. A finalidade geral é a de transmitir informações de um ponto a outro do sistema. Em geral, o tipo de informação a ser transmitida impõe exigências sobre alguns aspectos das redes, levando-as a serem especializadas, e não independentes dos serviços que oferecem.

O texto e as figuras deste Capítulo baseiam-se principalmente nos trabalhos de Schwartz (1988), Formigoni (1995), Mendes et alii (1996) e dePrycker (1991), assim como em relatórios e recomendações de planejamento e projeto de redes emitidas pela Telebrás (1979, 1994a, 1994b).

Segue-se uma descrição concisa do sistema de telecomunicações. A rede aqui tratada é aquela resultante da evolução da Rede Nacional de Telefonia (RNT) no sentido de habilitar-se à prestação de novos serviços. Tal como se entende hoje, a evolução passa pela opticalização parcial ou total da rede.

A Figura 2-1 apresenta de forma esquemática os principais componentes da RNT.

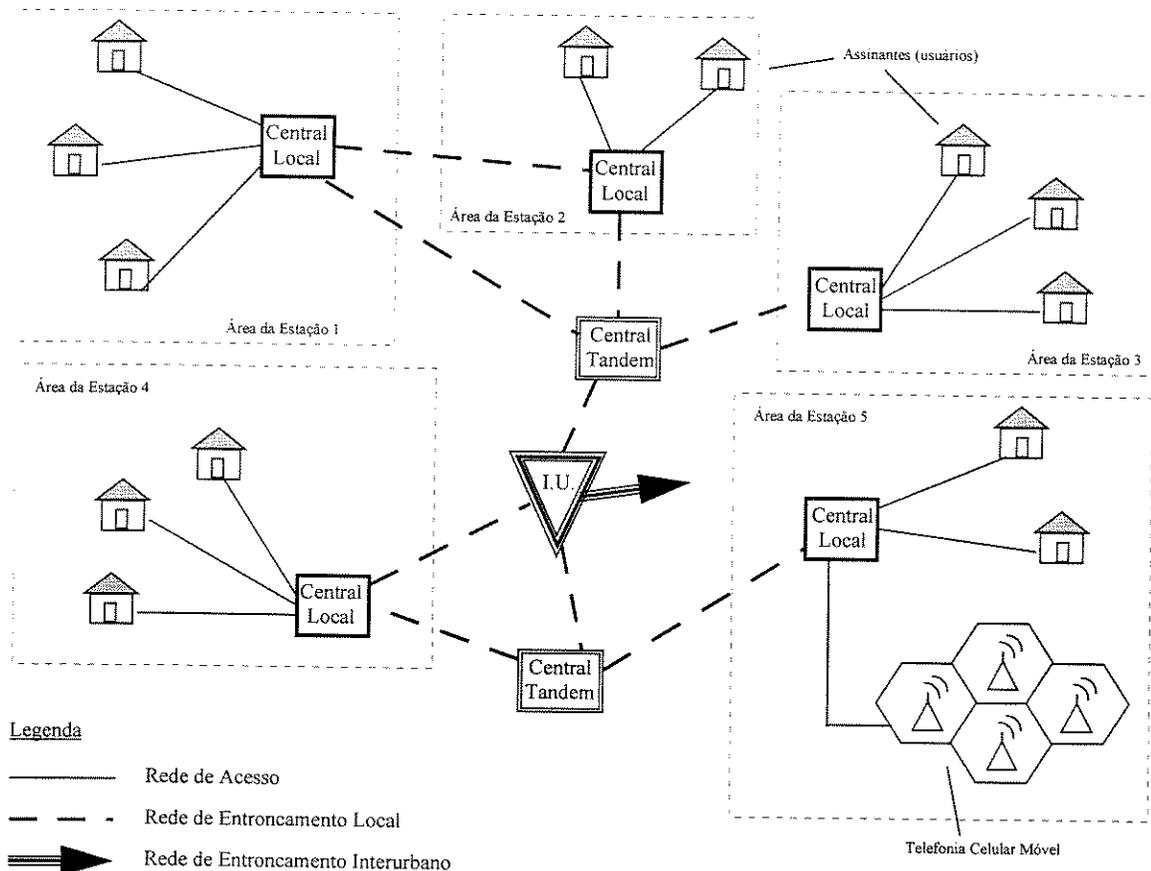


Figura 2-1. Componentes da Rede Nacional de Telefonia.

Seguem-se comentários a respeito dos principais componentes.

Sistema de Comutação

É constituído pelas centrais de comutação (de circuitos) que são instaladas nas estações telefônicas (ETs). Cada ET pode abrigar mais de uma central. A finalidade da comutação é realizar a conexão entre os assinantes (usuários do sistema). Cada assinante é atendido por uma central.

Rede de Acesso

É a rede que liga os assinantes às respectivas centrais de comutação. Atualmente, é composta pela *rede externa* e pelos sistemas de *telefonia celular móvel*. Prevê-se também o uso de telefonia celular fixa.

A Figura 2-2 apresenta a rede externa de uma área de estação. A área é dividida em seções de serviço (SS) as quais são atendidas por um ponto de alimentação. Cada SS atende em média 400 assinantes. A interligação dos assinantes ao ponto de alimentação, chamada rede de distribuição (ou rede secundária) é geralmente aérea, usando cabos de cobre. Por sua vez, a ligação dos pontos de atendimento da SS à ET constitui a rede alimentadora (primária), que utiliza em sua maior parte cabos de cobre instalados em dutos subterrâneos.

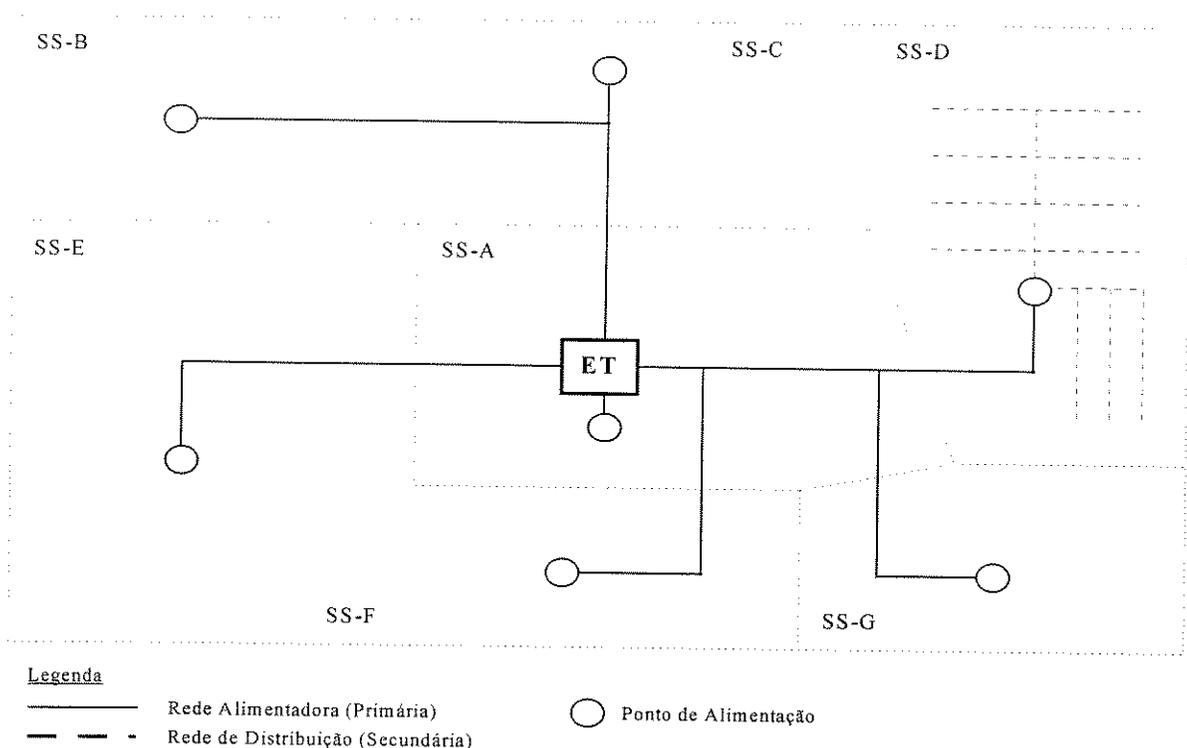


Figura 2-2. Componentes da rede externa.

Rede de Entroncamento Local

Promove a interligação de centrais em uma área local (conjunto de áreas de estação, como por exemplo uma cidade) para permitir a conexão entre assinantes atendidos por centrais diferentes. As centrais são ligadas diretamente entre si ou através de centrais-tandem. Atualmente, as fibras ópticas são usadas na rede de entroncamento, substituindo as ligações baseadas em cabos de cobre.

Rede de Entroncamento Interurbano

Interliga centrais de diferentes áreas locais. Diversos sistemas de transmissão podem ser usados, dependendo das distâncias e do tráfego existente. Podem ser usadas fibras ópticas, enlaces de microondas e até mesmo conexões por satélite.

2. Serviços

São os seguintes os principais serviços, já oferecidos ou ainda previstos, que utilizam a rede de telecomunicações:

- a) voz: é o serviço clássico, que exige apenas fios de cobre. Os sinais transmitidos são analógicos.
- b) transmissão de dados em baixa velocidade: o telex, o fax e a Internet são bons exemplos dessa categoria. Mesmo que os dados sejam originalmente digitais, um processo de modulação permite o aproveitamento da rede de cobre.
- c) transmissão de dados em alta velocidade: nesta categoria incluem-se principalmente os serviços envolvendo imagem e som de alta qualidade, tais como:
 - . CATV (TV a cabo), em que vários canais de imagem e som são oferecidos ao usuário simultaneamente;
 - . VOD (Vídeo sob demanda), em que o sinal é transmitido num horário pré-definido;
 - . videofone, em que se transmitem imagens e sons da conversação, além de canais para dados;
 - . videoconferência, em que o serviço de videofone é oferecido simultaneamente a diversos usuários;
 - . TV interativa, uma extensão da CATV em que o usuário se comunica com a ET ou (através dela) com o provedor (uso em jogos, educação, e outros);

- . comunicação de dados em redes de computadores;
- . acesso a bancos de informações, como por exemplo a movimentação de conta bancária, ou a recuperação de arquivos de imagem/som;
- . correio eletrônico em faixa larga, em que podem ser também transmitidos voz e imagem;
- . monitorização e controle remoto, como proteção residencial/comercial, telemedicina, etc.

Uma característica importante dos serviços é a velocidade de transmissão exigida no sentido ET-usuário (*downstream*) e no sentido usuário-ET (*upstream*). A velocidade é usualmente expressa em kilo-bits por segundo (kbps) ou em Mega-bits por segundo (Mbps). A Tabela 2-1 relaciona as velocidades para alguns dos serviços.

Tabela 2-1. Velocidades de transmissão necessárias.

Serviço	Downstream	Upstream
CATV	3 a 6 Mbps	zero
VOD	1.5 a 3 Mbps	16 a 64 kbps
Jogos interativos	1.5 a 6 Mbps	16 kbps
Transferência de imagem	A maior possível	Zero
Videoconferência	384 kbps	384 kbps
Dados em geral	A maior possível	A maior possível

Na prática, existem redes independentes para a prestação desses serviços. Assim, é possível encontrar:

- . rede de telefonia;
- . rede de telex;
- . redes privadas que usam cabos coaxiais ou ópticos para CATV;
- . uso de satélites para CATV;
- . redes públicas e privadas para comunicação de dados.

Essa multiplicidade de redes poderia ser evitada aproveitando-se a rede de telefonia, quase onipresente, como meio de veiculação de todos os serviços. Entretanto, devido às velocidades necessárias aos serviços (de 100 kbps a 100 Mbps), a transmissão analógica é praticamente inviável, devendo-se apelar para as tecnologias digitais. Além disso, o meio físico de transmissão tradicional, o cobre, deve ser substituído pela fibra óptica, mais adequada a essas velocidades e que oferece maior qualidade com peso e volume menores, dentre outras vantagens.

3. Opticalização da Rede de Telecomunicações

A evolução para uma rede totalmente (ou predominantemente) óptica é condicionada por diversos fatores, dentre os quais as análises de custos e benefícios associados à opticalização. De fato, o custo da fibra óptica já compete com o do cobre, mas os equipamentos necessários à conversão dos sinais elétricos para ópticos, e vice-versa, ainda são caros.

Assim, não é possível promover a opticalização “imediate” de toda a rede. Prioridades devem ser estabelecidas. No Brasil, a seqüência de opticalização coloca em primeiro lugar a rede de troncos, vindo depois a rede externa.

3.1. Rede de troncos

Por concentrar grandes quantidades de tráfego, a rede de troncos foi a primeira a utilizar enlaces ópticos. Atualmente, quase toda a rede de troncos do Brasil é óptica.

Existem diversos trabalhos relativos ao planejamento da rede óptica de troncos brasileira. Garcia e Tavares (1988) anteciparam o problema e propuseram-lhe soluções heurísticas. Mais recentemente, Quaglia et alii (1995), Garcia e Zanandrea (1996a), bem como Bortolon et alii (1996a, 1996b), também estudaram o uso de tecnologias ópticas de transmissão. Garcia e Zanandrea (1996b) tratam, adicionalmente, do problema da segurança (ou sobrevivencialidade). Mello (1996) também pode ser citado.

3.2. Rede externa

Devido à sua abrangência e às incertezas quanto a tecnologias e serviços, a rede externa teve sua opticalização dividida em etapas. As etapas, descritas a seguir, serão retomadas em detalhe no Capítulo 3 deste trabalho.

Grandes assinantes

Os assinantes que demandam imediatamente altas taxas são os primeiros a receber fibras ópticas dedicadas. Formigoni (1995) e Formigoni et alii (1995) descrevem com detalhe a questão e propõem uma metodologia de planejamento para esta parte da rede, denominada Rota Estratégica (RE).

Rede de alimentação

A rede de cobre será gradualmente substituída por fibras, constituindo a Rede Óptica Primária (ROP). Pode haver várias maneiras de chegar à ROP.

Rede de distribuição

Mais à frente, a rede secundária pode dar lugar à Rede Óptica de Assinantes (ROA). Várias topologias e tecnologias podem estar presentes na ROA.

3.3. Máxima utilização do cobre

Uma alternativa de evolução consiste na aplicação de equipamentos que usam o próprio cobre para transmissão em velocidades mais elevadas. A vida útil da rede convencional é assim prolongada. Genericamente, os equipamentos que tornam isso possível são “modems” especiais, detalhados na seção 5 deste capítulo. A convivência desses equipamentos com as redes ópticas acima mencionadas é uma das preocupações do capítulo 3.

4. Principais Tecnologias

Como as fibras ópticas permitem o tráfego simultâneo de enorme quantidade de sinais em altas velocidades, são necessários equipamentos específicos para controlar (introduzir, retirar, repetir, etc.) o fluxo de bits, tanto nas centrais e nas dependências dos assinantes, como nas eventuais etapas intermediárias dos enlaces. Genericamente, os equipamentos devem providenciar a conversão eletro-óptica dos sinais. Em alguns casos, precisam também se ligar a equipamentos analógicos.

Os equipamentos baseiam sua operação em algumas tecnologias de transmissão de sinais em alta velocidade. Algumas dessas tecnologias são proprietárias, obrigando todo o enlace a conter equipamentos de um único fornecedor. Quanto às tecnologias padronizadas (ou a caminho de uma padronização), as principais são discutidas a seguir.

4.1. PDH (Plesiochronous Digital Hierarchy)

Quando tomadas individualmente, as taxas de velocidade requeridas pelos usuários (os *tributários*) não são muito elevadas. Para aproveitar ao máximo a capacidade dos enlaces

ópticos, os canais de baixa velocidade são *agregados*. As escalas de agregação constituem o que se chama de *hierarquia*.

PDH é uma das hierarquias padronizadas que encontra bastante aplicação em enlaces ponto-a-ponto. A padronização, no entanto, é parcial. No Brasil utiliza-se o padrão europeu (Tabela 2-2 e Figura 2-3), além de algumas variantes não-padronizadas.

Tabela 2-2. Padrão europeu para PDH.

Hierarquia	Capacidade (canais de 64 kbps)	Taxa de Transmissão (kbps)
E1	30	2048
E2	120	8448
E3	480	34368
E4	1920	139264

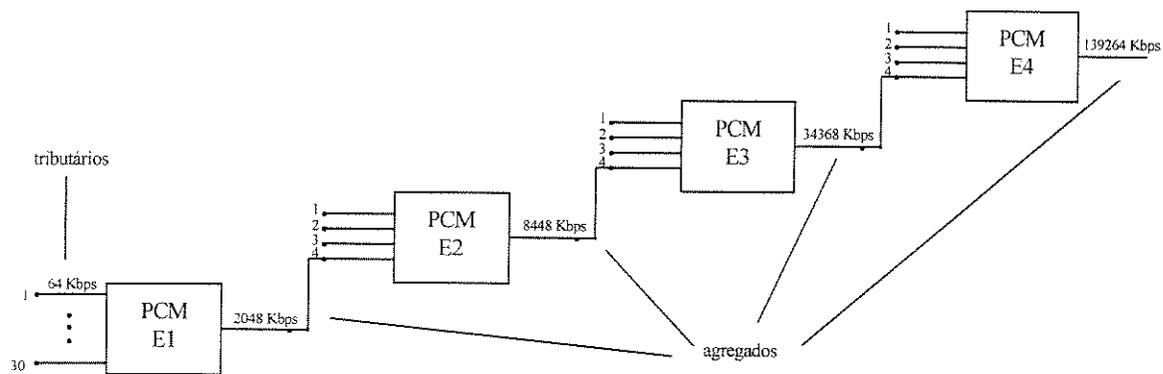


Figura 2-3. Esquema da PDH europeia.

Essencialmente, dois tipos de equipamentos são utilizados:

- terminais multiplexadores (PCMs), que realizam agregação/desagregação;
- equipamentos de linha ópticos (ELOs), que fazem a conversão eletro-óptica dos sinais.

Algumas limitações da PDH devem ser notadas:

- padronização parcial, que leva à existência de interfaces de linha e funcionalidades de gerência proprietárias;
- inflexibilidade quanto à inserção/derivação de tributários, pois é necessário percorrer toda a cadeia hierárquica para tal;
- gerência de rede deficiente, devido ao pequeno número de bits reservados para a função.

4.2. SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*)

Padronizada pela ITU-T (International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector), a SDH busca viabilizar um ambiente multi-fornecedor, tanto para os equipamentos de transmissão, como para os de gerência da rede. Além disso, torna possível o acesso direto aos tributários de menor velocidade (sem passar por etapas intermediárias).

A Tabela 2-3 apresenta as hierarquias do padrão SDH e seu equivalente americano, a SONET (*Synchronous Optical Network*).

Tabela 2-3. Padrão SDH.

Hierarquia SONET	Hierarquia SDH	Taxa de Transmissão (kbps)	Capacidade (x 2 Mbps)
OC-1		51840	21
OC-3	STM-1	155520	63
OC-9		466560	199
OC-12	STM-4	622080	252
OC-18		933120	378
OC-24		1244160	504
OC-36		1866240	756
OC-48	STM-16	2488320	1008

Os equipamentos para uso com SDH são:

- . Optical Line Terminal Multiplexer (OLTM), que pode ser usado tanto em ligações ponto-a-ponto como em cadeia;
- . Add-Drop Multiplexer (ADM), que adiciona e extrai canais digitais individuais de um sinal SDH de hierarquia mais alta, sendo por este motivo interessante para ligações em anéis;
- . roteador síncrono (SDxC), utilizável onde é necessária alta flexibilidade no roteamento do tráfego.

A SDH pode conviver com a PDH. Assim, são possíveis soluções mistas, nas quais os enlaces de menor velocidade utilizam PDH e os de maior velocidade utilizam SDH. Além disso, SDH é compatível com ATM (*Asynchronous Transfer Mode*).

4.3. TDM/TDMA (*Time-Division Multiplexing / Time-Division Multiple Access*)

Ao contrário das anteriores, não se trata de hierarquia, mas sim de uma técnica de repartição do tempo entre diversos usuários. Os sinais provenientes da central são multiplexados no tempo e enviados, em quadros TDM, a todos os assinantes do trecho considerado. O sinal proveniente de

cada assinante é multiplexado e colocado numa posição específica de um quadro TDMA. Este quadro é compartilhado entre todos os assinantes. A taxa de transmissão (isto é, a quantidade de bits), da ordem de algumas dezenas de Mega-bits por segundo, é a mesma em ambos os sentidos. Assim, quanto maior o número de assinantes, menor a capacidade média de transmissão por assinante. É necessário também que os equipamentos localizados na central e nos assinantes estejam sincronizados.

Os equipamentos que devem ser usados são:

- . head-end, localizado na central, que faz a interface entre essa central e a rede externa;
- . terminal remoto, instalado no assinante, que realiza conversão eletro-óptica, lê quadros TDM e escreve quadros TDMA;
- . acoplador óptico passivo, que divide/agrupa sinais ópticos.

TDM/TDMA é uma tecnologia apropriada para serviços unidirecionais (aqueles em que a necessidade de faixa no sentido central-assinante, ou *downstream*, é muito maior que no sentido contrário). Isto porque a central tem acesso para escrita em todo o quadro TDM (e portanto a maior faixa), enquanto cada assinante só escreve uma porção limitada do quadro TDMA.

5. Uso da Rede Metálica para Serviços em Altas Velocidades

As limitações inerentes à transmissão de sinais através de fios de cobre são intensificadas a altas velocidades. Essas limitações têm a ver com o comprimento do enlace e com a possibilidade de que os sinais incorporem ruído ao longo da transmissão. Tais problemas não existem quando se usam fibras ópticas.

Entretanto, alguns fatores estimulam o aproveitamento do cobre para os novos serviços:

- . a rede metálica é muito abrangente e atinge, individualmente, todos os assinantes;
- . o uso de fibras só é compensador quando a adesão é grande (isto é, a demanda individual ou agregada é suficiente);
- . as técnicas de compressão de sinais evoluem constantemente.

Com base nestes fatores, já na primeira metade da década de 1980 se estudava uma maneira de transmitir altas taxas usando cobre. Com isso, criou-se uma família de tecnologias conhecida por xDSL (Digital Subscriber Line, ou Linha Digital de Assinante). Os equipamentos baseados nesta tecnologia, dos quais os principais são o HDSL e o ADSL, funcionam na prática

como “supermodems”. Algumas referências para o assunto são Manchester (1991), Karpinski (1994), e Ahamed et alii (1995).

HDSL (High bit-rate Digital Subscriber Line)

Foi o primeiro conceito pesquisado. Sua idéia é viabilizar a transmissão bidirecional (simétrica) de taxas até 2 Mbps usando dois pares de cobre. O limite de distância entre a ET e o usuário é de 4 Km. Os serviços que exigem simetria de taxas são tipicamente de usuários comerciais (Tabela 2-1).

ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line)

Estes equipamentos utilizam apenas um par de fios de cobre e conseguem transmitir a variadas taxas, dependendo da distância. Por exemplo, 6 Mbps podem ser levados a até 2 Km, enquanto 1.5 Mbps podem atingir 6 Km. Todavia, a transmissão é assimétrica, isto é, as velocidades no sentido usuário-ET são bem menores. Isto torna o ADSL adequado à prestação de serviços para assinantes isolados. O mesmo par de fios pode ser compartilhado entre o tradicional serviço de voz e o ADSL.

A aplicação efetiva de equipamentos xDSL é sempre objeto de discussão, devido à exigência de um equipamento completo na ET para cada usuário atendido, à concorrência de outras tecnologias (como a rede híbrida fibra/cabo coaxial, descrita no capítulo 3) e ao barateamento dos sistemas ópticos. Por outro lado, como viabilizam rapidamente serviços lucrativos para assinantes individuais, e como estendem a vida útil do cobre, os sistemas xDSL sempre devem ser considerados como participantes do processo de planejamento da evolução da rede de telecomunicações.

6. Comentários

Neste Capítulo definiu-se a rede externa, que é a parcela do sistema de telecomunicações que interessa ao trabalho. Justificou-se a necessidade de opticalização da rede externa pela possibilidade de prestação de novos serviços. Discutiram-se as etapas a serem percorridas para a implantação de fibras em toda a rede. Tecnologias e equipamentos aplicáveis foram apresentados.

CAPÍTULO 3

MODELOS EXATOS

PARA O

PLANEJAMENTO DA REDE EXTERNA

1. Caracterização da Rede Externa

A *rede externa* é a parcela da rede de acesso que utiliza cabos (tradicionalmente, de cobre) para ligar os assinantes às suas respectivas centrais de comutação. A rede externa é composta da rede alimentadora (primária) e da rede de distribuição (secundária), conforme já explicado no capítulo 2.

Genericamente, cada assinante requer para sua ligação um conjunto de equipamentos instalados em suas dependências (casa, escritório), outro conjunto na central e um meio físico de transporte de sinal. Os equipamentos são interligados de acordo com determinadas topologias. Assim, o problema de planejamento da evolução da rede externa é o de escolher e dimensionar equipamentos (tecnologias), meios físicos e topologias adequados às necessidades dos assinantes. Dependendo da tecnologia/topologia, a localização dos equipamentos deve também ser determinada no planejamento.

A rede externa evoluirá no sentido de adotar fibras ópticas como meio físico dominante. Dada a abrangência da rede externa, entretanto, é comum dividir o problema de planejamento dessa evolução segundo a delimitação rede primária - rede de distribuição. Mesmo assim, a necessidade imediata de opticalização para prestação de novos serviços a assinantes importantes gera mais uma etapa, a do atendimento dedicado a esses grandes assinantes. Convém ressaltar que, independente da etapa de planejamento (grandes assinantes, rede primária, rede de distribuição), o uso de modelos matemáticos é meritório. De fato, os custos envolvidos são altos e as possibilidades tecnológicas são muitas. Assim, o problema exige uma solução otimizada.

Neste capítulo são apresentados modelos para auxiliar o planejamento da opticalização da rede externa de acordo com a divisão em etapas mencionada acima. A seção 2 contém uma revisão bibliográfica, enquanto a seção 3 é usada para estabelecer premissas necessárias à modelagem. O atendimento de grandes assinantes é abordado na seção 4: possibilidades tecnológicas, modelos matemáticos e exemplos. Na seção 5 são discutidos modelos para a opticalização da rede primária e (num dos casos) da rede de distribuição com base nas alternativas atualmente disponíveis.

2. Literatura

O planejamento da rede externa mereceu vários estudos, principalmente a partir da introdução de tecnologia digital nos sistemas de telecomunicações.

França et alii (1984) apresentam um modelo e procedimentos computacionais para a evolução e o corte de áreas da rede, enquanto Ribeiro (1985) propõe um modelo para planejar a instalação de concentradores e unidades remotas. Também abordam o mesmo tema Cesiélka e Douglas (1980).

Uma excelente visão do estado-da-arte no planejamento da rede de acesso ao final dos anos 80 é encontrada em Balakrishnan et alii (1991). Nesse trabalho são discutidos modelos para ampliação da rede, alívio de pares e instalação de equipamentos remotos. O surgimento de novos serviços e a aplicação de fibras ópticas são também abordados. Os modelos apresentados visam atender toda a demanda a mínimo custo, embora a idéia de seletivamente satisfazer a demanda objetivando máximo lucro seja também levantada. Propostas para tratamento de equipamentos capacitados e demandas por diferentes serviços (isto é, que exigem diferentes velocidades de transmissão) são formuladas.

O desenvolvimento de software de apoio ao planejamento de sistemas de telecomunicações por laboratórios de pesquisa mantidos por empresas operadoras também ganhou importância. Por exemplo, Jack et alii (1992) descrevem o NETCAP (Network Computer-Aided Planning), usado para decidir qual a melhor estratégia de expansão da rede (aumentar a capacidade das ligações atuais ou instalar multiplexadores na rede) e quando empregá-la. Nesse trabalho, entretanto, não são previstos cenários de opticalização da rede. Um avanço nesta direção é o trabalho de Freitas (1994), que aplica as idéias do NETCAP ao planejamento da introdução de fibras ópticas na rede.

Por sua vez, o trabalho de Eiger e Harrington (1991) antecipa o que viria a ser a ferramenta OPTIACCESS, do Bellcore, disponibilizada em 1994 e destinada a auxiliar o planejamento da rede óptica de acesso, assim como de situações mistas, sem entretanto utilizar modelos otimizantes.

Tendo em vista o atendimento óptico de grandes assinantes, Formigoni (1995) apresenta uma metodologia de planejamento e o modelo matemático a utilizar nessa tarefa. Tal modelo será adiante descrito com detalhes. Formigoni et alii (1995, 1997) relatam, também, experiências com a ferramenta PREST (Planejamento de Rotas Estratégicas), desenvolvida no CPqD-Telebrás.

Artigos que baseiam a evolução da rede de acesso em análises econômicas também são encontrados. Por exemplo, Olsen et alii (1994) descrevem o TITAN (Tool for Introduction

Scenario and Technological Evaluation of Access Network), ferramenta computacional desenvolvida sob o consórcio RACE (Research and Development in Advanced Communications Technologies in Europe). Iwashita (1996), assim como Malley e Tonguz (1992), discutem cenários de evolução com caracterização de aspectos técnicos e econômicos. Pugh e Boyer (1995) apresentam resultados indicando que, com a progressiva instalação de equipamentos inteligentes nas “pontas” do sistema, a maior parte dos custos recai sobre a rede de acesso.

Atualmente, com a efetiva operacionalização do Sistema Celular Móvel e com a perspectiva de aplicação do Sistema Celular Fixo, ambos integrantes da rede de acesso, novos problemas de planejamento se apresentam. Alguns autores, como por exemplo Webb (1998), abordam o assunto, que entretanto foge ao escopo deste trabalho.

3. Premissas da Modelagem

3.1. Rede e Área de Estação

A disposição física das redes (Figuras 2-1 e 2-2) sugere o uso de grafos para sua representação. Uma vez que não se está interessado em realizar cortes de área, cada assinante é ligado a uma só estação telefônica (ET) e portanto cada área de estação pode ser tratada independente das demais. No grafo, os pontos de demanda são representados por nós-fontes (entrada de fluxo na rede), enquanto a estação é representada por um único nó-sumidouro (saída de fluxo). Quando necessário, os pontos de controle são representados também por nós. Os arcos de grafo, orientados, indicam as ligações físicas entre dois pontos de demanda ou entre um ponto de demanda e a estação. A capacidade de um arco diz quantas unidades de demanda podem usar aquela ligação. Uma boa referência sobre modelos baseados em grafos é Ahuja et alii (1993).

3.2. Demanda

No grafo, os valores de demanda aparecem como o fluxo injetado nos nós-fontes. Demanda não é variável de decisão, mas sim um dado do problema. É assumido que os valores de demanda são expressos sempre na mesma unidade.

3.3. Equipamentos

Independente da tecnologia adotada, serão necessários equipamentos, instalados em nós e na ET, para compatibilizar eletricamente os sinais. Ao lado do meio físico, a capacidade de cada equipamento determina o montante de unidades de demanda que ele pode atender. Num modelo

baseado em grafos, isto significa impor capacidades sobre os arcos. Como o problema de planejamento visa alocar e dimensionar equipamentos na rede, as variáveis de decisão, binárias, devem indicar a instalação (ou não) de equipamentos em cada ligação (arco). Equipamentos que compõem o sistema de comutação não fazem parte do problema.

3.4. Consideração da Rede Existente

No planejamento da rede externa pode-se assumir que não existem ainda fibras ópticas já instaladas. Isto significa que elas terão de ser colocadas na rede, qualquer que seja a tecnologia óptica escolhida, e assim seu custo será aproximadamente o mesmo em qualquer plano adotado. Mais ainda, o custo de equipamentos costuma ser muito superior ao do meio físico. Assim sendo, o custo da fibra é desprezado no planejamento.

Quanto ao cobre, pode-se assumir que ele já está instalado e que não deve, a princípio, ser retirado. Pode-se especular a respeito de uma competição cobre *versus* fibra, mas o argumento de proporção de custo equipamento/meio físico continua válido. Deste modo, o custo de cobre é também desprezado.

3.5. Estrutura de Custos

Desprezados os custos do meio físico, a estrutura fica mais simples: cada equipamento tem seu custo fixo, independente do grau de ocupação. Equipamentos de mesma tecnologia, porém de maior capacidade, podem naturalmente apresentar economia de escala. A Figura 3-1 exemplifica a situação, usando valores (relativos) para dois equipamentos de tecnologia PDH cujas capacidades são, respectivamente, 16 e 32 canais de 2 Mbps.

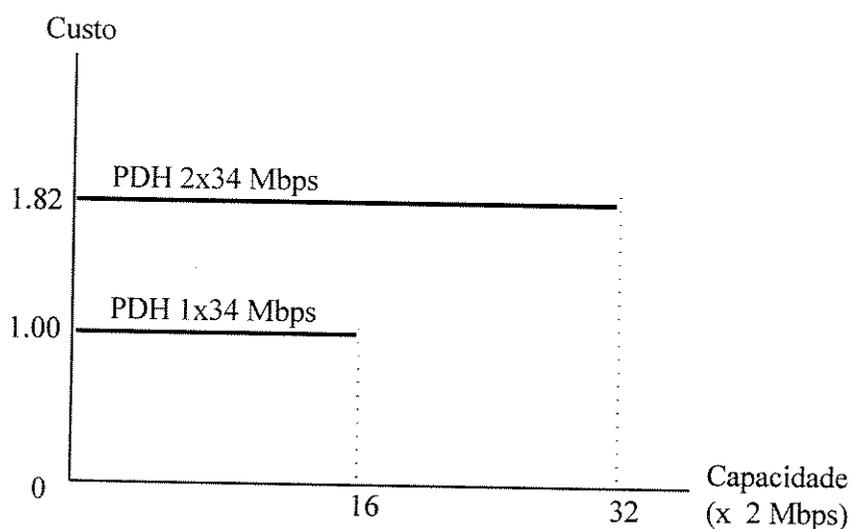


Figura 3-1. Exemplo de economia de escala em custos de equipamentos.

Da figura, depreende-se que para demandas até 16 x 2 Mbps, o equipamento PDH 1 x 34 Mbps será o mais barato dentre os dois, devendo o outro equipamento ser aplicado somente quando a demanda ultrapassar 16 x 2 Mbps.

A estrutura de custos poderia ser mais complexa caso fossem usados adicionalmente custos de operação e manutenção, ao invés de considerar somente o custo de implantação.

3.6. Critérios Possíveis

Os mais significativos são:

- a) minimização de custos associados ao plano: é o critério mais comum.
- b) maximização da receita: para adotar este critério faz-se necessário estabelecer o valor de receita associado a cada unidade de demanda atendida. A receita pode variar conforme o serviço. Além disto, ela não se apresenta na mesma base que o custo de implantação; ao contrário, só faz sentido falar em receita “mensal” ou “anual”. Portanto, uma compatibilização de unidades de medida é necessária se a comparação custo-receita é visada.
- c) maximização da folga: este critério privilegia a adoção de equipamentos com capacidade de sobra, visando preparar a rede para a evolução da demanda. Na prática, existe um orçamento a ser respeitado, o que impede alternativas irrealizáveis. O orçamento corresponde a um limitante de custo (os termos serão usados doravante como sinônimos).
- d) maximização da demanda protegida: algumas tecnologias garantem pelo menos duas maneiras alternativas de escoar a demanda até sua ET. Sob este critério, são conferidos privilégios a essas tecnologias quando em competição com outras.

3.7. Abordagem do Problema por Etapas

Os problemas associados ao planejamento da rede externa não são da mesma natureza. O atendimento de grandes assinantes é prioritário a curto prazo, mas constitui, em princípio, uma solução dedicada (embora sejam utilizados recursos da rede externa tais como dutos e eventualmente, pares de fios de cobre). A opticalização da rede primária, por seu lado, é uma etapa mais abrangente, mas não atinge necessariamente cada assinante de maneira individual. Esta tarefa cabe à rede de distribuição, a qual, pela sua característica, gera um problema mais próximo da engenharia e operação que propriamente de planejamento.

Em outras palavras, não é necessário elaborar um único modelo de planejamento para toda a rede externa. Ao contrário, diversos modelos menores, um para cada tipo de problema, podem ser formulados.

Assim, nos itens que se seguem serão apresentados separadamente modelos para o planejamento do atendimento de grandes assinantes e para o planejamento da opticalização da rede primária. A rede de distribuição não será considerada neste trabalho, mas uma das alternativas analisadas para a rede primária leva a fibra até os assinantes.

4. Modelos para Grandes Assinantes

4.1. Formas de Atendimento

Para fins de planejamento, grandes assinantes são aqueles que, individualmente ou reunidos em um mesmo nó de demanda, exigem serviços a uma velocidade mínima de 2 Mbps. Assim, a demanda pode ser expressa nesta unidade. A exigência de velocidade é bidirecional, isto é, tanto do assinante para a ET como no sentido contrário. O grande assinante tem geralmente perfil comercial.

Rota Estratégica

Uma das maneiras de atender o grande assinante é usar uma rede de acesso óptica específica, denominada Rota Estratégica (RE) e prevista pela Telebrás (1993a,1993b). A RE pode utilizar várias tecnologias e topologias, embora sempre sob o conceito Fiber-to-the-Office (FTTO). Isto é, a fibra óptica chega às dependências do grande assinante, garantindo variedade e qualidade de serviços.

As tecnologias de transmissão que podem ser adotadas são PDH, SDH, TDM/TDMA e ATM, com destaque para as duas primeiras, conhecidas e padronizadas internacionalmente.

As topologias associadas são (Figura 3-2):

- a) estrela simples: cada assinante é diretamente ligado à ET por meio de fibras dedicadas;
- b) dupla estrela ativa ou passiva: utiliza uma (ou mais de uma) unidade remota (UR) entre o assinante e a ET. A UR pode ser ativa (isto é, ser constituída de um multiplexador, um concentrador ou até um comutador local) ou passiva (quando apenas distribui e agrega sinais ópticos);

- c) anel (unidirecional): os assinantes são ligados por um anel, o qual tem como nó principal a ET;
- d) anel-estrela: variante da topologia acima, em que os assinantes se ligam a UR's e estas, por sua vez, são conectadas à ET por um anel;
- e) barramento-estrela: utiliza acopladores ópticos passivos 1:2 (que separam o sinal em dois, e vice-versa) para ligar assinantes à ET.

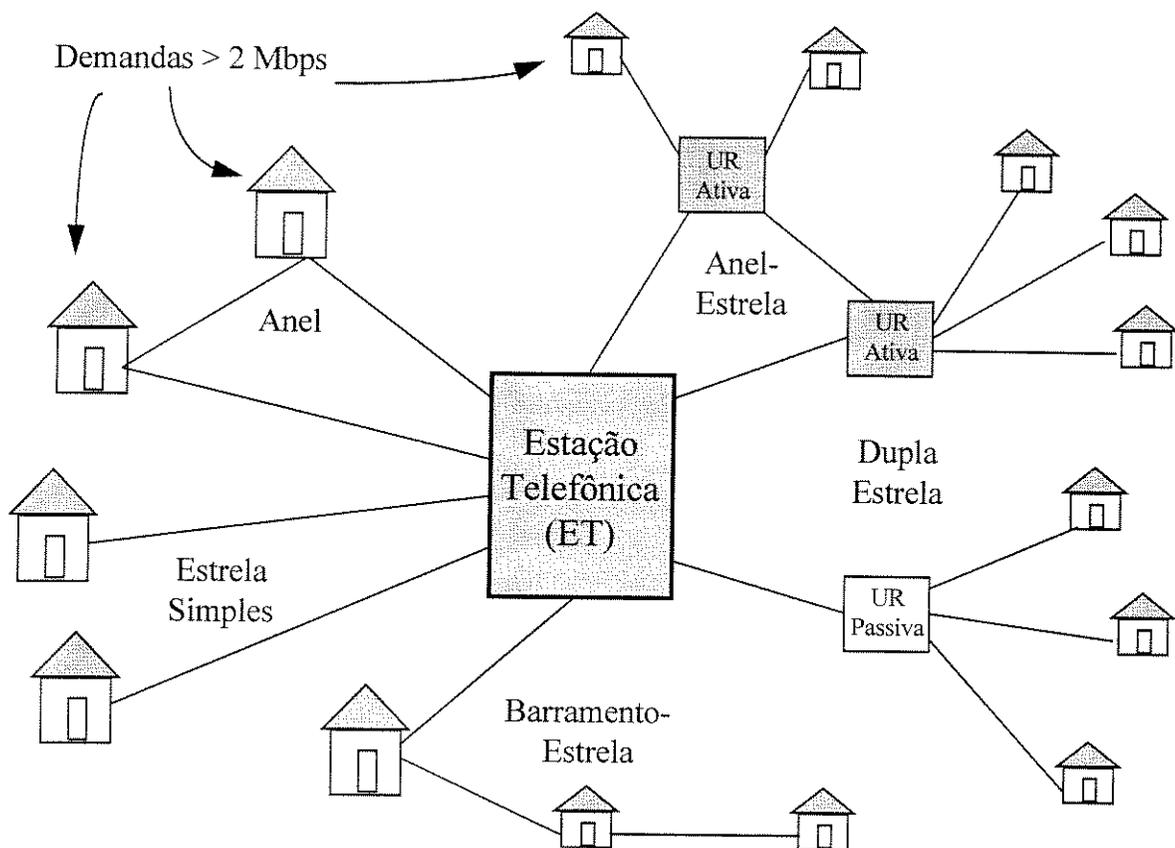


Figura 3-2. Exemplos de topologias para Rotas Estratégicas.

HDSL

Outra forma de atendimento é aproveitar os fios de cobre, instalando equipamentos HDSL tanto nas dependências do grande assinante como na ET. Vale lembrar que neste caso a tecnologia é proprietária e a aplicabilidade depende da distância do assinante à ET. Cada HDSL atende somente um canal de 2 Mbps. A ligação é do tipo estrela simples (Figura 3-2).

4.2. Modelo para Rotas Estratégicas

Formigoni (1995) e Formigoni et alii (1995,1997) desenvolveram um modelo e uma ferramenta computacional (PREST) para o planejamento de Rotas Estratégicas. A rede é representada por um grafo. O modelo é formulado como um programa linear misto no qual as variáveis binárias correspondem à decisão de instalar ou não equipamentos ópticos.

Esse modelo, denominado 3-M0, é:

Minimizar

$$Z(\mathbf{x}, \mathbf{w}) = \sum_{(i,j) \in A} \sum_{n \in N_{ij}} c_{ijn} x_{ijn} + \sum_{m \in M} c_m w_m \quad (3-1)$$

sujeito a:

$$\sum_{j \in J1} y_{ij} - \sum_{j \in J2} y_{ji} = d_i, \quad \forall i \in I \quad (3-2)$$

$$\sum_{n \in N_{ij}} \text{Cap}_n x_{ijn} \geq y_{ij} \geq 0, \quad \forall (i,j) \in A \quad (3-3)$$

$$w_m - x_{imn} \geq 0, \quad \forall n \in N_{im}, \quad \forall i \in J2 \quad (3-4)$$

onde

Z - custo total

\mathbf{x} - vetor de variáveis binárias x_{ijn}

\mathbf{w} - vetor de variáveis binárias w_m

A - conjunto dos arcos do grafo

N_{ij} - conjunto de sistemas ópticos de transmissão candidatos no arco ij

c_{ijn} - custo do sistema óptico de tipo n , quando candidato no arco ij

x_{ijn} - variável inteira binária que indica se o sistema óptico de tipo n é utilizado no arco ij ou não

M - conjunto de nós que podem receber unidades ópticas remotas

c_m - custo de infra-estrutura para instalação de unidade remota no nó $m \in M$

w_m - variável inteira binária que indica se uma unidade remota é instalada no nó m ou não

I - conjunto dos nós do grafo (por definição, o nó 0 é o nó de estação)

J1 - conjunto dos nós j diretamente conectados ao nó i por arcos emanando do nó i para j

J2 - conjunto dos nós j diretamente conectados ao nó i por arcos emanando dos nós j para i

y_{ij} - variável real que representa o fluxo (em canais de 2 Mbps) através do arco ij

d_i - demanda no nó i , em canais de 2 Mbps

Cap_n - capacidade do sistema óptico do tipo n

No modelo 3-M0, a função objetivo (3-1) é o custo total dos equipamentos. As equações (3-2) fornecem o balanço de fluxo em cada nó. As restrições (3-3) obrigam o fluxo em cada arco a respeitar a capacidade de transmissão desse arco. Estas são “restrições de feixe” (*bundle*

constraints), uma vez que amarram o atendimento de diversos assinantes a uma limitação de equipamento compartilhado. Já as restrições (3-4) dizem respeito ao uso de unidades remotas.

Tal como apresentado, o modelo contempla as topologias estrela simples e dupla estrela. Com uso de restrições adicionais é possível aceitar outras topologias. Por exemplo, o modelo permite a representação de anéis SDH unidirecionais através da criação de um nó artificial para cada anel, que recolhe as demandas dos nós e as envia para a estação através de um arco (também artificial) de capacidade igual à do anel. Esse recurso permite considerar tanto os custos fixos do anel na estação (aplicados sobre o arco artificial) como aqueles em cada nó participante do anel (aplicados sobre as ligações nós de demanda - nó artificial). A Figura 3-3 exemplifica uma situação envolvendo anel SDH.

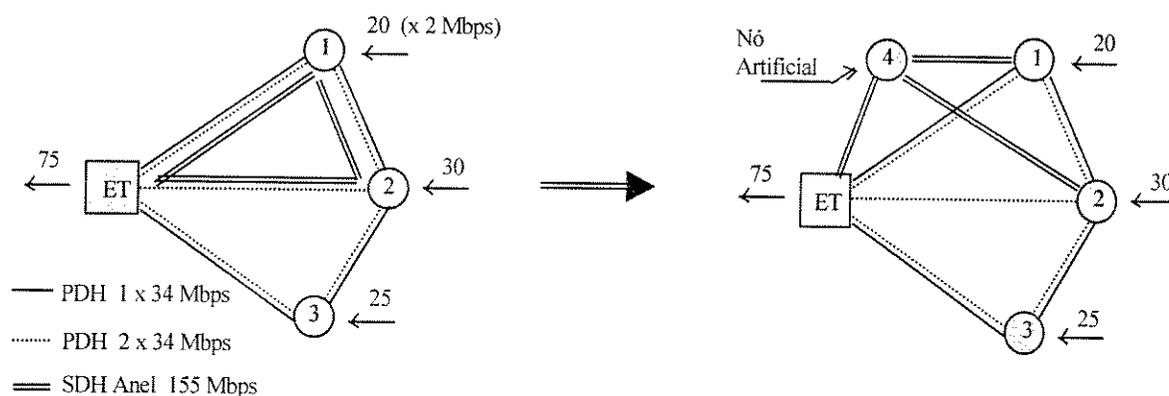


Figura 3-3. Representação de anel unidirecional SDH.

O modelo permite também a representação de sistemas de transmissão TDM/TDMA sob topologias dupla estrela passiva ou barramento-estrela. Tal representação é semelhante à utilizada para o anel SDH. Cada sistema TDM/TDMA é associado a um nó artificial que representa o equipamento *head-end* do sistema; todos os nós candidatos a serem atendidos pelo sistema são conectados a ele.

Quando se adota a topologia anel-estrela, a instalação dos equipamentos que caracterizam a “estrela” está condicionada à existência do anel. Esta é uma situação que também pode ser facilmente representada. Além disto, outras exigências podem ser incorporadas, levando em conta aspectos de custo, uso privilegiado de alguma tecnologia/topologia e, sobretudo, requisitos de segurança.

O modelo 3-M0 será o ponto de partida do presente trabalho.

4.3. Incorporação de Equipamentos HDSL

Para considerar também equipamentos HDSL, o modelo 3-M0 precisa ser modificado. Ao contrário dos sistemas ópticos, os equipamentos HDSL são capazes de atender somente um canal de 2 Mbps. Ou seja, cada canal a ser atendido por HDSL requer um equipamento. Embora isto sugira a princípio o uso de variáveis inteiras (não binárias) no modelo, o fato de se usar um grafo garante que, se as demandas apresentadas são inteiras, então o fluxo nos arcos também o será, devido à *unimodularidade* da matriz de incidência. Como consequência, arcos representando equipamentos HDSL podem ser adicionados ao modelo, sendo o próprio fluxo nesses arcos o indicador de quantos equipamentos devem ser instalados.

O modelo modificado 3-M1 é:

Minimizar

$$Z(\mathbf{x}, \mathbf{w}, \mathbf{s}) = \sum_{(i,j) \in A} \sum_{n \in N_{ij}} c_{ijn} x_{ijn} + \sum_{m \in M} c_m w_m + \sum_{h \in H} c_h s_h \quad (3-5)$$

sujeito a:

$$\sum_{j \in J1} y_{ij} - \sum_{j \in J2} y_{ji} = d_i, \quad \forall i \in I \quad (3-6)$$

$$\sum_{n \in N_{ij}} \text{Cap}_n x_{ijn} \geq y_{ij} \geq 0, \quad \forall (i,j) \in A-D \quad (3-7)$$

$$w_m - x_{lmn} \geq 0, \quad \forall n \in N_{lm}, \quad \forall l \in J2 \quad (3-8)$$

$$\sum_{n \in N_{h0}} \text{Cap}_n x_{h0n} + s_h \geq y_{h0} \geq 0, \quad \forall h \in H \quad (3-9)$$

onde, além do que já foi definido em 3-M0, tem-se:

H - nós de demanda que podem receber equipamentos HDSL ($H \subseteq I$)

c_h - custo unitário de equipamento HDSL quando candidato a instalação no nó $h \in H$

s_h - variável real que indica a quantidade de equipamentos HDSL instalados no nó h

D - arcos do grafo que ligam diretamente nós $h \in H$ ao nó de estação ($D \subseteq A$)

O modelo 3-M1 foi inicialmente apresentado por Carlson et alii (1997b).

4.4. Outros Critérios de Otimização

A adoção de critérios diferentes da minimização de custos exige mudança da função objetivo. No que se segue, o modelo 3-M1 é usado como base.

Folga

Maximizar a folga equivale a maximizar a instalação de equipamentos, excetuado o HDSL, o qual não acrescenta folga alguma. A expressão que deve substituir o objetivo em 3-M1 é, portanto:

Maximizar

$$\text{Folga} = \sum_{(i,j) \in A} \left(\sum_{n \in N_{ij}} \text{Cap}_n x_{ijn} - y_{ij} \right) . \quad (3-10)$$

Entretanto, numa situação real existe sempre um orçamento (limitante de custo) a ser respeitado (caso contrário, o objetivo seria atingido através da instalação de todos os equipamentos candidatos !). Esse limitante aparecerá no modelo como uma restrição adicional:

$$\sum_{(i,j) \in A} \sum_{n \in N_{ij}} c_{ijn} x_{ijn} + \sum_{m \in M} c_m w_m + \sum_{h \in H} c_h s_h \leq L \quad (3-11)$$

onde, além do que já foi definido em 3-M1, tem-se:

L - limitante para o custo total do plano

Demanda protegida

Maximizar a demanda protegida equivale a maximizar a demanda atendida por anéis SDH, pois esta é a única dentre as possibilidades listadas que garante duas alternativas de encaminhar a demanda à ET. Para expressar esse objetivo, pode-se escrever:

Maximizar

$$\text{Protegida} = \sum_{f \in F} y_{f0} \quad (3-12)$$

onde, além do que já foi definido em 3-M1, tem-se:

F - nós artificiais correspondentes aos anéis SDH

y_{f0} - variável real que representa o fluxo através do arco que liga algum nó $f \in F$ à estação (nó 0)

Também neste caso podem ser consideradas restrições adicionais.

Receita

A maximização da receita exige algumas considerações. Os valores unitários de receita variam conforme o serviço prestado, o que o modelo desenvolvido ainda não prevê. Adicionalmente, a receita é expressa em valores mensais ou anuais, enquanto o custo até agora tratado refere-se à

implantação de equipamentos (um desembolso único, portanto). O problema tem diferentes interpretações. Vamos analisar três delas:

a) maximização de receita sujeito a um limitante de orçamento

Trata-se de atender seletivamente a demanda (ou seja, não se garante que toda a demanda será atendida). Não há necessidade de compatibilizar as unidades de medida de custo e receita. O limitante de custo pode ser expresso por (3-11). Para o cálculo da receita, assume-se que as demandas por cada serviço são perfeitamente conhecidas em cada nó. As demandas são ainda expressas em canais de 2 Mbps. Para separar os serviços, são usados nós artificiais de entrada de fluxo na rede (um para cada serviço). Cada nó artificial é ligado a todos os nós de demanda através de arcos caracterizados por um valor de receita unitária proporcionada pelo serviço. O fluxo nestes arcos deve ser maximizado. A limitação de custos, entretanto, exige um tratamento para a demanda não atendida: um arco que leve toda essa demanda diretamente para a ET e cuja utilização não se reverta em receita. A Figura 3-4 ilustra esta idéia.

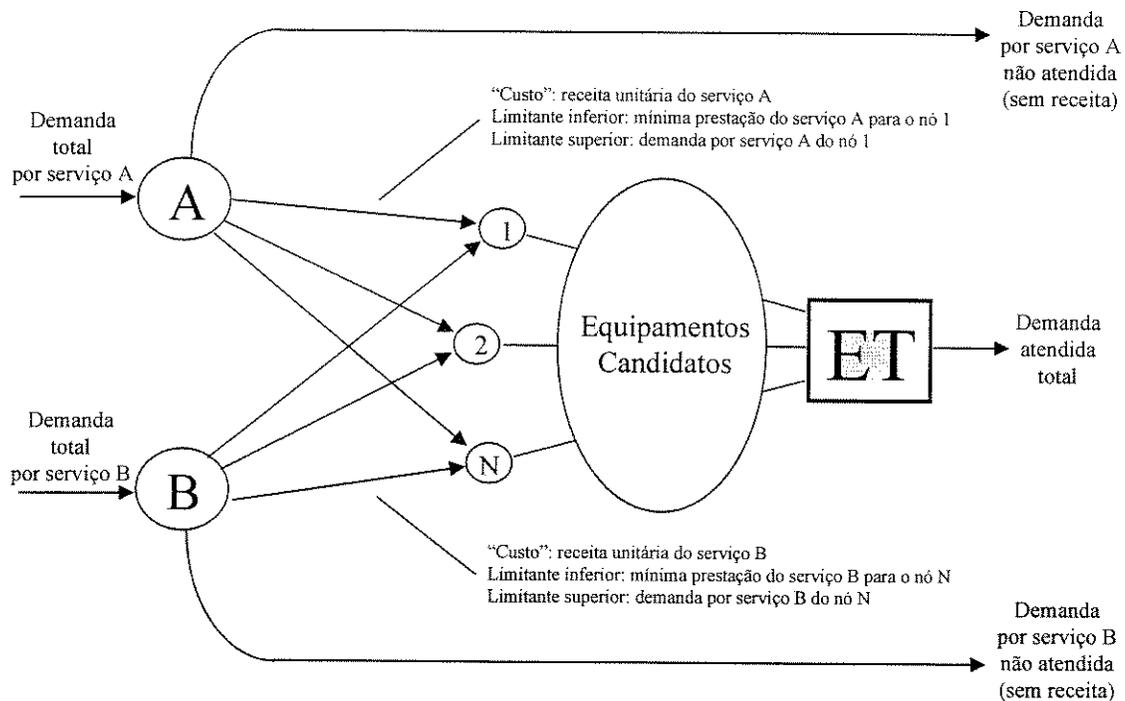


Figura 3-4. Modelo de grafo para cálculo da receita.

O objetivo será expresso por:

Maximizar

$$\text{Receita} = \sum_{i \in I} \sum_{v \in V} r_{vi} y_{vi} \quad (3-13)$$

onde, além do que já foi definido em 3-M1, tem-se:

V - elenco de serviços oferecidos (a cada um corresponde um nó artificial)

r_{vi} - receita unitária do serviço $v \in V$ para o nó i , $\forall i \in I$

y_{vi} - variável real que representa o fluxo através do arco que liga algum nó $v \in V$ a um nó $i \in I$

Deve ser observado que ainda um aspecto do cálculo de receita está sendo desprezado. De fato, o comportamento das tarifas costuma ser tal que o preço cai com o aumento do uso, em geral devido ao fato de que os equipamentos instalados estão em processo de amortização do investimento. Isto caracteriza uma estrutura de preços côncava, cuja representação complicaria consideravelmente o modelo.

b) maximização de lucro

Sendo o lucro definido pela diferença entre receita e custo, faz-se necessário compatibilizar as respectivas unidades de medida. Uma idéia é trazer o custo para seu valor presente anual, conforme por exemplo Siegel et alii (1995). O cálculo da receita pode ser abordado pelo procedimento descrito anteriormente.

c) maximização de receita a custo mínimo

Assumindo-se que o custo de implantação é usado, tem-se dois objetivos distintos: aquele expresso por (3-13) e aquele expresso por (3-5). A abordagem multiobjetivos parece ser adequada nesta situação. O modelo pode ser resolvido por qualquer das técnicas de Programação com Múltiplos Objetivos. Uma boa referência é Steuer (1986).

4.5. Exemplos

Dados gerais

A rede-exemplo é a da Figura 3-5, contendo uma estação e 18 nós, com demanda total de 191 canais de 2 Mbps.

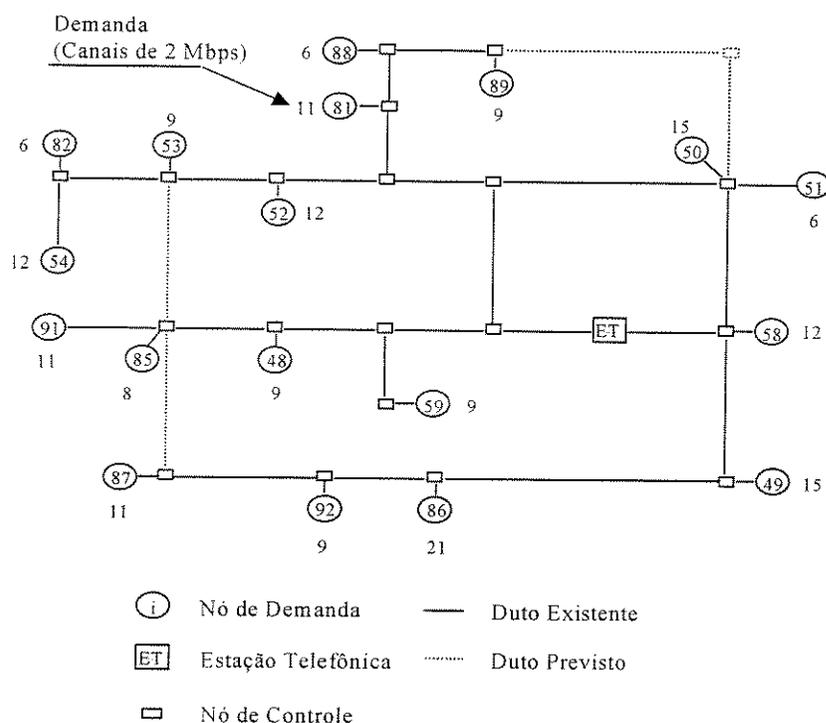


Figura 3-5. Rede para aplicação.

No exemplo, a demanda pode ser atendida tanto por equipamentos ópticos de tecnologias PDH e SDH, como por equipamentos HDSL, que usam cobre. As capacidades dos equipamentos, em canais de 2 Mbps, bem como seus respectivos custos, estão na Tabela 3-1. Em cada nó, as capacidades dos equipamentos precisam ser compatíveis com as demandas apresentadas na Figura 3-5. O custo do equipamento PDH 1 x 34 Mbps é adotado como referência (valor 1.00). Os custos dos equipamentos PDH e HDSL correspondem às duas pontas do enlace. Os equipamentos SDH são utilizados nos anéis unidirecionais de 155 Mbps (equivalentes a 63 canais de 2 Mbps), sendo obrigatório instalar na estação um equipamento ADM-63 para cada anel constituído.

Tabela 3-1. Dados dos equipamentos.

Equipamento/Tecnologia	Capacidade	Custo
1 x 34 Mbps (PDH)	16	1.00
2 x 34 Mbps (PDH)	32	1.82
ADM 21 portas (SDH)	21	0.65
ADM 42 portas (SDH)	42	0.74
ADM 63 portas (SDH)	63	0.82
HDSL	1	0.12

Se o uso de HDSL não é previsto, o modelo 3-M0 permite encontrar a solução inteiramente óptica. No exemplo, o nó 82 seria atendido por equipamento PDH 1 x 34 Mbps, e o custo total da solução aumentaria para 15.56.

Solução de máxima receita com limitante de custo de implantação

A Tabela 3-3 mostra os valores assumidos como receita, taxa de penetração (demandas) e obrigatoriedade de atendimento mínimo dos 2 tipos de serviços utilizados no exemplo. Por simplicidade, a relação entre as taxas de penetração total (aproximadamente 2 para 1 a favor do serviço A) é assumida como sendo idêntica em todos os nós. Os custos dos equipamentos e os anéis candidatos são os mesmos do exemplo anterior.

Tabela 3-3. Características dos serviços.

Serviço	Receita unitária	Demanda Total	Atendimento Mínimo
A	0.01	126	61
B	0.02	65	28

Em problemas deste tipo, pode-se garantir ou não que cada nó, individualmente, tenha um mínimo de sua demanda obrigatoriamente atendido. No exemplo aqui mostrado, a obrigatoriedade refere-se à demanda total, e não à demanda em cada nó. Assim, é possível que algum nó seja (seletivamente) preterido na decisão de atendimento.

Quando não há limitante para o custo de implantação, a solução é aquela do exemplo anterior (custo 15.28). À medida que um limitante é imposto, a solução se modifica, objetivando receita máxima. A obrigatoriedade de atendimento mínimo mostrada na Tabela 3-3 exige um orçamento de 6.02, pelo menos.

A Tabela 3-4 indica a participação de cada tecnologia nas soluções encontradas para diversos limitantes de custo. A participação de SDH em relação ao atendimento total mantém-se acima de 75%. A partir de um certo limitante de custo, os sistemas PDH são rapidamente eliminados da solução, o que é esperado, considerando-se as proporções entre os custos. Os nós anteriormente atendidos por PDH passam a usar HDSL, ou deixam de ser atendidos. A tecnologia HDSL encontra boa aplicação nas demandas de serviço B (pequenas em quantidade, porém lucrativas).

Tabela 3-4. Resultados para diferentes limitantes de custo.

Limitante de custo	Atendimento serviço A	Atendimento serviço B	Atendimento Total	Receita Total	Uso de PDH	Uso de SDH	Uso de HDSL
15.28	126.0	65.0	191.0	2.560	32	153	6.0
15.00	123.7	65.0	188.7	2.537	32	153	3.7
14.00	114.2	65.0	179.2	2.442	32	141	6.2
13.00	105.1	65.0	170.1	2.351	34	126	10.1
12.00	94.0	64.5	158.5	2.230	23	120	15.5
11.00	83.0	62.9	145.9	2.088	12	113	20.9
10.00	75.0	58.9	133.9	1.928	-	113	20.9
9.00	75.0	50.6	125.6	1.762	-	113	12.6
8.00	75.0	42.3	117.3	1.596	-	113	4.3
7.00	69.0	36.3	105.3	1.416	-	104	1.3
6.02	61.0	29.0	90.0	1.190	-	86	4.0

As Figuras 3-7, 3-8 e 3-9 apresentam os planos para limitantes de custo de 12.00, 9.00 e 6.02, respectivamente, anotando em cada nó a quantidade de demanda de cada tipo que é atendida (o primeiro número refere-se à demanda A; o segundo, à demanda B). Um dos anéis SDH é desfeito, devido ao seu alto custo. Ainda em nome da economia, os anéis remanescentes perdem seus nós de menor demanda. Os sistemas PDH são também gradativamente suprimidos.

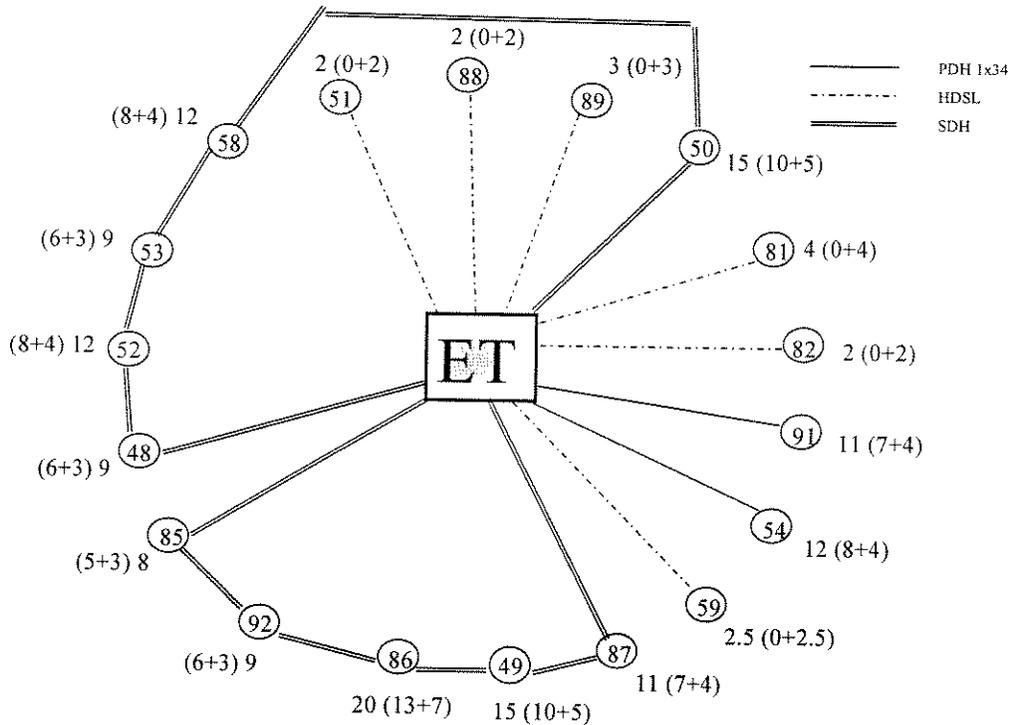


Figura 3-7. Resultado para maximização da receita com custo máximo de 12.00.

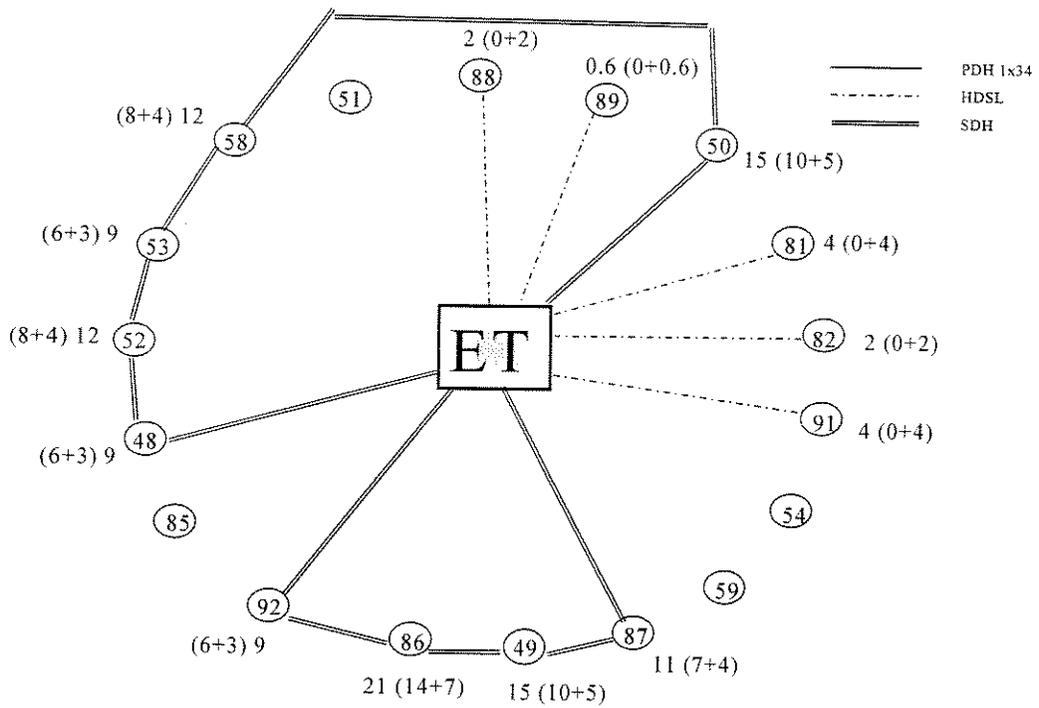


Figura 3-8. Resultado para maximização da receita com custo máximo de 9.00.

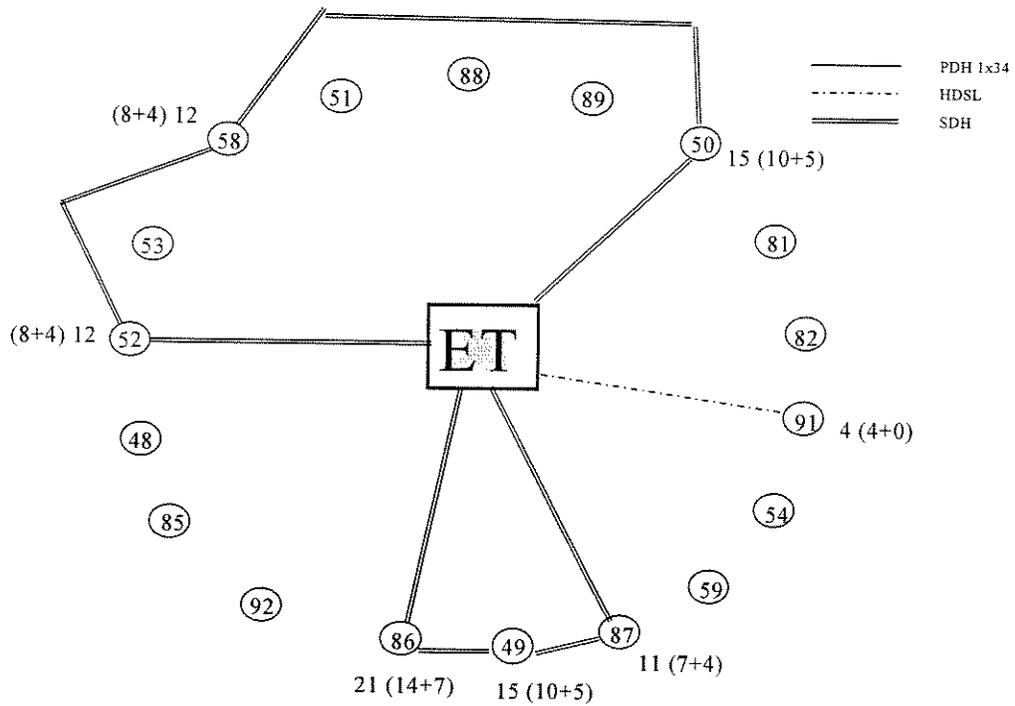


Figura 3-9. Resultado para maximização da receita com custo máximo de 6.02.

5. Modelos para Opticalização da Rede Externa

5.1. Considerações

Ao passo que o atendimento de grandes assinantes pode ser realizado de maneira dedicada, a opticalização de toda a rede externa constitui uma empreitada de porte muito maior. Todos os assinantes podem estar envolvidos na questão, e toda a rede deve ser analisada. O prazo para a opticalização é maior, certamente, e ao longo desse período soluções tecnológicas podem surgir, visando por exemplo a prestação de novos serviços de telecomunicações. Algumas das tecnologias não são padronizadas, o que acrescenta riscos à sua adoção. Por outro lado, é preciso decidir se a rede de distribuição também será opticalizada, ou se apenas a rede primária (alimentadora) será beneficiada.

Para fins de planejamento, os serviços oferecidos (ou a demanda) podem pertencer às seguintes categorias:

- a) voz;
- b) transmissão de imagens (Faixa Larga Residencial, ou FLR, de alta velocidade);
- c) transmissão de dados (Internet comercial).

5.2. Modelagem

São discutidas a seguir quatro possibilidades de opticalização da rede externa. Para cada uma delas, além de uma breve caracterização, é apresentada uma proposta de modelagem.

Rede Híbrida Fibra/Coaxial (HFC)

Com HFC, fibras ópticas são estendidas da ET até um ponto qualquer da área de estação, o chamado nó óptico, a partir do qual os sinais usam cabos coaxiais (um por assinante). Dependendo dos serviços prestados, cada nó óptico (ou célula óptica) pode atender de 150 a 500 assinantes. Cada assinante não deve, em princípio, estar localizado a mais de 800 metros do nó óptico. Adicionalmente, cada assinante pode precisar de equipamentos específicos, de acordo com o serviço demandado.

Portanto, uma rede HFC apresenta topologia dupla estrela ativa. São os seguintes os custos existentes, que influem na decisão do planejador:

- a) equipamento na ET: custo fixo, contabilizado a cada nó óptico, que diz respeito aos equipamentos necessários na ET. Todavia, o equipamento exigido para a demanda de dados pode não ser o mesmo que aquele para os outros serviços;
- b) equipamento no nó óptico: custo fixo, contabilizado a cada nó óptico;
- c) fibra óptica: necessária à ligação do nó óptico à ET, é custo fixo e não otimizante se se despreza a possibilidade de compartilhamento de fibras entre diferentes nós ópticos. A distância do nó óptico à ET deve ser conhecida;
- d) rede coaxial: a rigor, depende da distância do assinante ao nó óptico. Entretanto, devido à falta de dados a respeito, é razoável adotar um custo médio, que incide sobre cada assinante (não é otimizante, portanto);
- e) equipamento terminal: contabilizado a cada assinante (custo variável), refere-se aos equipamentos necessários para que o assinante receba os serviços contratados.

O modelo de grafo para cada nó óptico será então o da Figura 3-10. No grafo, os custos fixos sobre o arco que liga o nó óptico à ET são aplicados se o nó óptico é escolhido para instalação. O limitante desse arco indica a capacidade de atendimento total. O nó artificial é necessário para representar os custos fixos do equipamento na ET que serve a demanda de dados. É preciso criar uma restrição adicional que vincule a existência deste equipamento à existência do nó óptico. Os custos variáveis são aplicados por tipo de serviço. Esta parte do grafo é simplificada se não se permitir a nenhum assinante da célula óptica ser atendido por outras tecnologias; neste caso, os custos dependem diretamente da demanda e não são otimizantes.

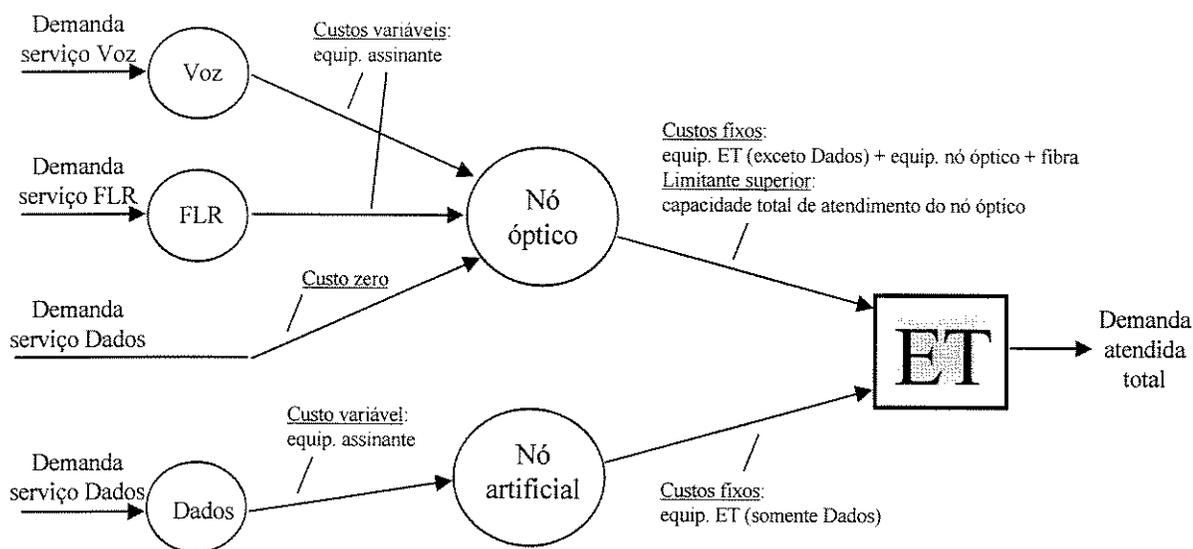


Figura 3-10. Modelo para otimização com rede HFC.

Fiber-to-the-Curb (FTTC)

Com FTTC, vários cabos de fibras ópticas são estendidos da ET até um ponto da área de estação que seja próximo dos assinantes, o armário de distribuição (ARD). No ARD, um distribuidor óptico lança cabos de 4 fibras até o chamado *curb* (máximo de 100 metros do assinante), a partir do qual os sinais usam cabos metálicos comuns ou, eventualmente, coaxiais. No *curb* (meio-fio, ao pé da letra) são instaladas Unidades Ópticas de Rede (ONU's). Cada ONU pode atender até 36 assinantes. De acordo com o serviço demandado, o assinante pode precisar de equipamentos específicos. A tecnologia usada na transmissão ET - ONU é proprietária, sendo baseada em TDMA.

Portanto, a alternativa FTTC apresenta topologia dupla estrela passiva. São os seguintes os custos existentes:

- a) equipamento na ET: custo fixo, compartilhado entre diversos ARD's, que diz respeito aos equipamentos necessários na ET (por simplicidade, pode-se assumir que a ET é digital; caso contrário, pode haver custos variáveis por grupos de assinantes associados a equipamentos de digitalização);
- b) equipamento no ARD: custo fixo, contabilizado a cada ARD;
- c) equipamento na ONU: custo fixo, contabilizado a cada ONU;
- d) fibra óptica para a ligação do ARD à ET: um cabo de 4 fibras para cada 4 ONU's, é custo fixo e não otimizante se se despreza a possibilidade de compartilhamento de fibras entre diferentes ARD's. A distância do ARD à ET deve ser conhecida;
- e) fibra óptica para a ligação do ARD à ONU: um cabo de 4 fibras para cada ONU, é custo fixo quando se considera a distância média;
- f) rede secundária: pode ser assumida como existente, isto é, sem custo;
- g) equipamento terminal: contabilizado a cada assinante (custo variável), refere-se aos equipamentos necessários para que o assinante receba os serviços contratados.

O modelo de grafo para a alternativa FTTC será então o da Figura 3-11. No grafo, o nó artificial é usado para reunir os diversos ARD's da área da ET. Vários arcos capacitados podem ligar esse nó à ET, um para cada equipamento necessário na ET; sobre estes arcos incidem custos fixos. A ligação de cada ARD ao nó artificial também é representada por um arco capacitado e com custo fixo. É preciso criar restrições adicionais que condicionem a existência da ONU à

existência do ARD. Os custos variáveis são aplicados por tipo de serviço. Esta parte do grafo é simplificada se não se permitir a nenhum assinante do ARD ser atendido por mais de uma tecnologia; neste caso, os custos tornam-se fixos e dependem diretamente da demanda.

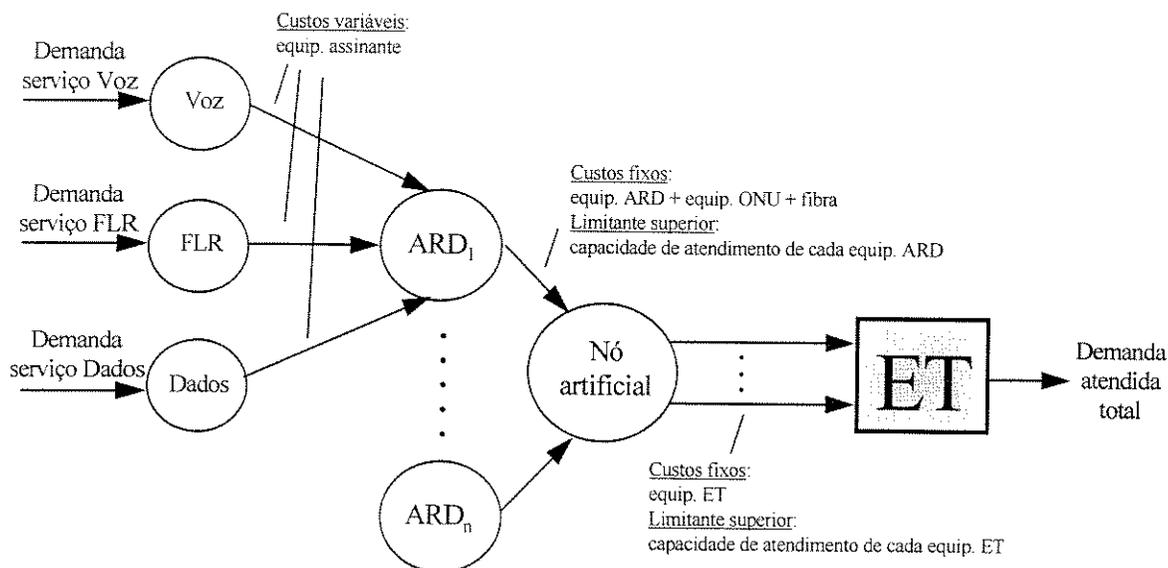


Figura 3-11. Modelo para opticalização com FTTC.

Rede Óptica Primária (ROP)

Com ROP, é providenciada ligação óptica da ET até um ponto da área de estação onde se instala um estágio remoto (ER), capaz de atender até 480 assinantes. A partir do ER, são usados cabos metálicos comuns. Para viabilizar serviços que exigem maiores velocidades, equipamentos ADSL são instalados na parte metálica da rede.

Em princípio, qualquer das tecnologias já apresentadas para Rotas Estratégicas pode ser usada na ligação ET - ER. Portanto, há múltiplas possibilidades de topologia neste trecho (estrela simples, anel, etc.). Do ER até o assinante, a ligação é ponto-a-ponto. São os seguintes os custos existentes:

- a) equipamento na ET: custo fixo, contabilizado a cada ER, depende da tecnologia/topologia adotada na ligação ET - ER. Pode ser necessário mais de um equipamento para cada ER;
- b) equipamento no ER: os equipamentos correspondentes àqueles instalados na ET apresentam custo fixo, enquanto os equipamentos correspondentes aos instalados no assinante significam custo variável;
- c) infra-estrutura no ER: custo fixo, contabilizado a cada ER, diz respeito ao abrigo físico;

- d) fibra óptica para a ligação do ER à ET: um cabo de 6 fibras para cada ER, é custo fixo que depende da topologia adotada no trecho óptico. No caso mais simples (ligação ponto-a-ponto), depende somente da distância entre ER e ET;
- e) rede secundária: pode ser assumida como existente, isto é, sem custo;
- f) equipamento terminal: contabilizado a cada assinante (custo variável), refere-se aos equipamentos necessários para que o assinante receba os serviços contratados.

O modelo de grafo para cada ER na alternativa ROP será então o da Figura 3-12. No grafo, o nó do ER coleta a demanda pelos diversos serviços. Vários arcos capacitados podem ligar esse nó à ET, um para cada equipamento necessário na ET; sobre estes arcos incidem custos fixos. Sobre o nó do ER incide o custo fixo de infra-estrutura. Os custos variáveis são aplicados por tipo de serviço. Esta parte do grafo é simplificada se não se permitir a nenhum assinante do ER ser atendido por mais de uma tecnologia; neste caso, os custos tornam-se fixos e dependem diretamente da demanda.

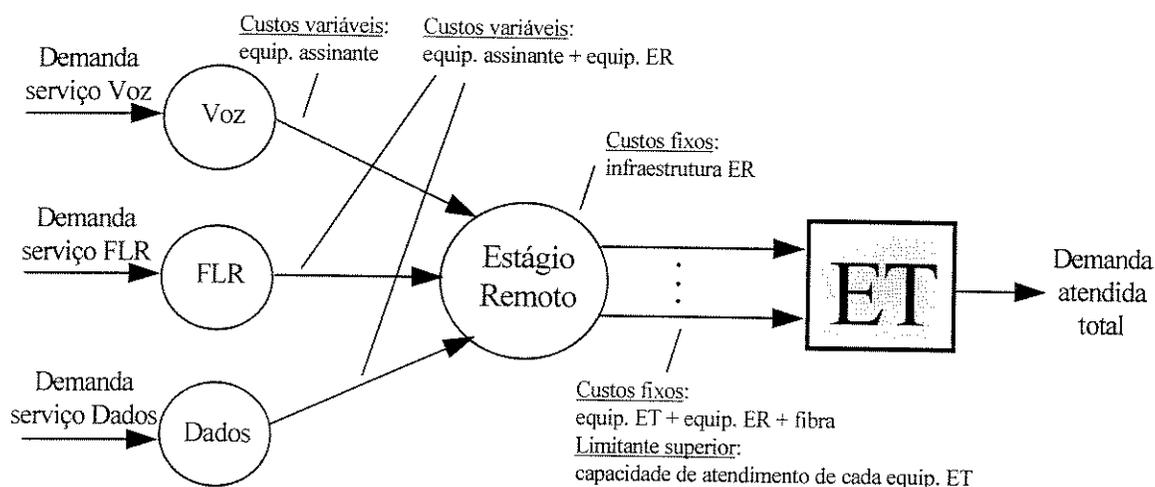


Figura 3-12. Modelo para opticalização com ROP.

Fiber-to-the-Home (FTTH)

Com FTTH, a fibra óptica é levada até as dependências do assinante. Trata-se da mesma idéia contida nas Rotas Estratégicas (as quais constituem soluções FTTO – fiber-to-the-office); entretanto, neste caso todos os assinantes (e não apenas os grandes) serão beneficiados. Deve ser observado que esta alternativa difere das anteriores, que promovem opticalização apenas até um certo ponto da rede (em alguns casos, somente a rede primária).

Assim como nas RE's, várias tecnologias e topologias são possíveis. A topologia mais improvável é a estrela simples, que leva fibras individualmente aos assinantes: trata-se apenas de uma substituição do cobre, constituindo uma alternativa muito cara. Topologias como dupla estrela ativa, dupla estrela passiva (aqui denominada Rede Óptica Passiva, PON) ou anel-estrela ativa são mais prováveis.

O modelo para a FTTH é o mesmo já apresentado para as Rotas Estratégicas, quando se assume que o custo das fibras não interfere no processo de otimização.

5.3. *Comentários*

Competição entre alternativas

Embora tenham sido apresentadas quatro alternativas de opticalização e seus modelos possam ser reunidos para permitir competição entre elas, este cenário é pouco provável. De fato, verifica-se a tendência de evitar a adoção de mais de uma solução para a mesma ET, com a finalidade de minimizar problemas de operação da rede. A decisão, neste caso, reside em um nível superior (qual alternativa escolher). Longe de perderem sua finalidade, os modelos apresentados podem ser usados como simuladores e avaliadores das alternativas.

Outros critérios

De uma maneira geral, os mesmos critérios sugeridos para o planejamento do atendimento de grandes assinantes são válidos também para a rede externa. Todavia, alguns cuidados são necessários. Por exemplo, é provável que um critério de maximização da receita impeça ou adie o processo de opticalização do assinante de serviços de voz se não há imposição de atendimento. Por outro lado, nem todas as alternativas acima apresentadas possibilitam proteção da demanda de maneira simples.

Aproveitamento do cobre

Algumas das alternativas apresentadas (ou suas variantes) utilizam cabos de cobre na parte da rede não opticalizada. Os modelos propostos desprezam esse custo, assumindo que o cobre já existe ou seria instalado, independente da opticalização. Entretanto, esta parcela de custo poderia interferir, por exemplo, no processo de localização do Estágio Remoto. Os modelos entendem que a localização é decidida numa etapa anterior.

Aspecto dinâmico do problema

A opticalização da rede externa é uma tarefa de grande porte, e portanto impossível de ser realizada em pouco tempo. Por este motivo, alguns fatores não considerados nos modelos podem ganhar importância. O ritmo de evolução dos serviços, por exemplo, é capaz de influir no valor presente de cada alternativa (os modelos baseiam-se em custos de implantação). O custo de operação e manutenção da rede em cada alternativa pode também ser importante. Entretanto, a escolha da alternativa precisa acontecer no início do processo de opticalização e, em princípio, manter-se a mesma ao longo do tempo. Uma estrutura de custos mais refinada e uma melhor previsão de serviços e receitas são desejáveis, e devem ser incorporadas pelos modelos.

6. Conclusões

A opticalização da rede externa é uma tarefa complicada e importante. A multiplicidade de escolha e os custos associados fazem necessário o uso de ferramentas de planejamento baseadas em modelos matemáticos. A dimensão da tarefa, por sua vez, leva à decomposição do problema.

Para a etapa prioritária, qual seja o atendimento de grandes assinantes através de redes dedicadas, foram desenvolvidos modelos capazes de promover a competição entre as mais variadas tecnologias, ópticas ou não, dispostas nas topologias exigidas pelos equipamentos. Critérios de minimização de custos e de maximização de receita, além de outros, foram discutidos e formulados. Uma rede de uma área de estação de porte médio foi usada como exemplo de aplicação dos modelos. No caso de minimização de custos, os resultados evidenciam a importância da tecnologia SDH, empregada em anéis unidirecionais. Equipamentos HDSL, que aproveitam a rede metálica, são usados apenas quando a demanda é pequena, pois apresentam custo unitário elevado e trabalham sem folga. Sob critério de maximização da receita, sujeito a um desembolso máximo para implantação de equipamentos, os resultados mostram que a tecnologia SDH continua importante. Se a restrição de custo é forte, as folgas são indesejáveis. Assim, equipamentos HDSL são usados para escoar demandas pequenas porém lucrativas.

Para a etapa posterior de opticalização, que visa abranger toda a rede, quatro alternativas foram estudadas, com comentários sobre a possibilidade de confecção dos respectivos modelos, baseados em grafos. Em geral, tais modelos guardariam semelhança com aqueles desenvolvidos para os grandes assinantes. Algumas hipóteses simplificadoras deveriam ser adotadas, sem prejuízo da aplicabilidade. Mesmo em situações nas quais não se prevê competição entre tecnologias numa mesma área de estação, os modelos poderiam funcionar como simuladores.

Entretanto, pode ser necessário adaptá-los a estruturas de custos mais complexas e a melhores previsões de receita e de oferta de serviços.

CAPÍTULO 4

INCORPORAÇÃO DE CUSTOS INCERTOS

1. Motivação

No setor de telecomunicações, adotar um plano de evolução da rede sempre significa investir grandes volumes de recursos financeiros e, naturalmente, correr riscos. O intervalo decorrido entre o instante do planejamento e a realização efetiva do plano põe à prova as estimativas de custo, o comportamento esperado da demanda e as previsões de receita. Os avanços tecnológicos, por sua vez, podem ensejar ou exigir alterações no que foi originalmente planejado.

Dada a previsão de que maior parte do custo do sistema seja devido à rede de acesso, planejar a implantação de equipamentos nesta rede é uma tarefa relevante. Os modelos matemáticos que podem ser desenvolvidos para o planejamento são fortemente dependentes de dados de custos. Entretanto, muitos desses dados não são precisamente conhecidos no momento da confecção do plano. Isto acontece não somente com os custos, mas também com outros dados necessários aos modelos. Naturalmente, esta incerteza influencia a maneira pela qual o plano é obtido. Não obstante, espera-se do plano que ele seja robusto (isto é, o plano deve continuar sendo barato, ou rentável, mesmo que as previsões de custos sejam imprecisas). Portanto, o planejador precisa de sistemas de apoio à decisão que sejam capazes de lidar com incerteza.

Como primeira consequência dos dados incertos, os coeficientes dos modelos baseados nesses dados não são mais fixos, e a maneira de resolver o problema matemático pode mudar consideravelmente. A idéia natural é tentar manter o problema passível de solução, incorporando ao mesmo tempo aspectos da incerteza no sentido de flexibilizar o modelo e torná-lo mais fiel ao ambiente que ele procura retratar.

É importante caracterizar corretamente a incerteza que paira sobre os dados, identificando sua natureza e escolhendo a melhor maneira de representá-la. Para isto, deve ser observado o modo pelo qual os valores para os dados aparecem no mundo real e qual o impacto sobre o modelo quando se adota esta ou aquela representação para a incerteza. As técnicas mais usadas são a programação estocástica e a aplicação de conceitos de conjuntos nebulosos. Outra alternativa, simples porém eficiente, é utilizar intervalos para representar valores imprecisos.

Uma abordagem por programação estocástica pressupõe aleatoriedade com respeito aos valores dos dados que se pretende usar. Claramente este não é o caso dos problemas de planejamento aqui tratados. A evolução tecnológica, apesar de exercer enorme influência sobre os custos dos equipamentos utilizados, é previsível no horizonte de tempo compreendido pelo planejamento. O efeito sobre os custos também é previsível: em geral, tecnologias dominadas

tendem à estabilidade, enquanto novas tecnologias, caras inicialmente, experimentam franco barateamento ao longo do tempo. Outro aspecto importante para o planejamento é a interferência (ou interdependência) entre custos, cuja representação por conceitos estocásticos pode não ser simples. Além disso, obter funções de distribuição de probabilidade geralmente é um processo caro do ponto de vista computacional.

Por sua vez, o uso de intervalos é talvez a maneira que mantém maior incerteza. Não há qualquer ordem de importância dentre os valores do intervalo; qualquer um deles pode ser aquele realmente utilizado. É muito fácil especificar intervalos, o que é um aspecto positivo dessa abordagem.

Já conceitos de conjuntos nebulosos (conjuntos *fuzzy*) e números nebulosos (números *fuzzy*) têm sido bastante utilizados em situações de incerteza. De fato, os conjuntos nebulosos parecem oferecer a simplicidade dos intervalos e, ao mesmo tempo, incorporar aspectos possibilísticos. Em outras palavras, permitem expressar preferências (maior expectativa de efetivação) sobre alguns dos valores em relação a outros. Especificar estas preferências pode ser fácil ou não, dependendo do contexto. Nos problemas aqui tratados, isto não parece difícil.

Neste capítulo são apresentados modelos para auxiliar o planejamento da opticalização da rede quando existe incerteza a respeito dos dados de custo. A etapa de opticalização considerada é a do atendimento de grandes assinantes. A incerteza é incorporada através do uso de intervalos e também através do uso de conjuntos nebulosos. A seção 2 contém uma revisão bibliográfica sobre o tratamento de incerteza de custos em modelos de planejamento. Na seção 3, o modelo anteriormente desenvolvido é refeito de maneira a evidenciar a incerteza presente. O uso de intervalos para abordar a questão é documentado na seção 4. Na seção 5, a aplicação de conjuntos nebulosos é discutida.

2. Literatura

A utilização de técnicas de programação estocástica em problemas de decisão não é recente. De fato, já se pode encontrá-las em Charnes e Cooper (1959), bem como em Dantzig (1963). Um bom resumo dessas técnicas é fornecido por Hillier e Lieberman (1990). Recentemente, Infanger (1994) explorou o assunto do ponto de vista computacional, mostrando algoritmos para processamento paralelo. Muitos outros autores poderiam ser citados. Embora não seja o caso do trabalho aqui desenvolvido, algumas tarefas de planejamento em telecomunicações empregam

largamente métodos probabilísticos, como por exemplo o dimensionamento de equipamentos de comutação e o entroncamento entre centrais, explanados em Cooper (1981).

O tratamento de problemas com coeficientes expressos por intervalos é também assunto de várias referências, dentre elas Bitran (1980), Steuer (1981), e Ishibuchi e Tanaka (1990), sendo este último usado em parte do que se segue.

Conjuntos nebulosos apresentam também farta bibliografia. Em particular, quando a incerteza reside nos valores dos coeficientes do modelo empregado, as primeiras boas referências são Dubois e Prade (1980) e Tanaka et alii (1984). Mais recentemente, Delgado et alii (1989) apresentaram uma abordagem geral para a questão. Ainda Delgado et alii (1990) trataram de problemas com custos incertos. Seu trabalho teve continuidade em Herrera e Verdegay (1996), que exploraram problemas contendo variáveis 0-1 e custos incertos. Este último trabalho é também aproveitado aqui. Rommelfanger et alii (1989) constituem mais uma referência importante. Outros trabalhos serão relacionados à medida que forem necessários.

3. Modelo com Custos Incertos

Custos incertos no planejamento da opticalização de sistemas de telecomunicações podem ser modelados de acordo com as técnicas acima apontadas. É adotado para o desenvolvimento do trabalho o modelo 3-M1, construído no capítulo anterior e voltado ao atendimento dos grandes assinantes. O modelo permite competição entre equipamentos ópticos e outros baseados no uso da rede metálica e, tal como apresentado, visa a minimização de custos. Para maior facilidade de acompanhamento, o modelo é reescrito a seguir, com o cuidado de indicar a existência de imprecisão quanto aos coeficientes da função objetivo. Esse modelo será chamado 4-M1:

Minimizar

$$Z(\mathbf{x}, \mathbf{w}, \mathbf{s}) = \sum_{(i,j) \in A} \sum_{n \in N_{ij}} c_{ijn} x_{ijn} + \sum_{m \in M} c_m w_m + \sum_{h \in H} c_h s_h \quad (4-1)$$

sujeito a:

$$\sum_{j \in J1} y_{ij} - \sum_{j \in J2} y_{ji} = d_i, \quad \forall i \in I \quad (4-2)$$

$$\sum_{n \in N_{ij}} \text{Cap}_n x_{ijn} \geq y_{ij} \geq 0, \quad \forall (i,j) \in A-D \quad (4-3)$$

$$w_m - x_{lmn} \geq 0, \quad \forall n \in N_{lm}, \quad \forall l \in J2 \quad (4-4)$$

$$\sum_{n \in N_{h0}} \text{Cap}_n x_{h0n} + s_h \geq y_{h0} \geq 0, \quad \forall h \in H \quad (4-5)$$

onde:

A - conjunto dos arcos do grafo

N_{ij} - conjunto de sistemas ópticos de transmissão candidatos no arco ij

c_{ijn} - custo (incerto) do sistema óptico de tipo n , quando candidato no arco ij

\mathbf{x} - vetor de variáveis de decisão x_{ijn}

x_{ijn} - variável inteira binária que indica se o sistema óptico de tipo n é utilizado no arco ij ou não

M - conjunto de nós que podem receber unidades ópticas remotas

c_m - custo (incerto) de infra-estrutura para instalação de unidade remota no nó $m \in M$

\mathbf{w} - vetor de variáveis de decisão w_m

w_m - variável inteira binária que indica se uma unidade remota é instalada no nó m ou não

I - conjunto dos nós do grafo (por definição, o nó 0 é o nó de estação)

H - nós de demanda que podem receber equipamentos HDSL ($H \subseteq I$)

c_h - custo unitário (incerto) de equipamento HDSL quando candidato a instalação no nó $h \in H$

\mathbf{s} - vetor de variáveis de decisão s_h

s_h - variável real que indica a quantidade de equipamentos HDSL instalados no nó h

J1 - conjunto dos nós j diretamente conectados ao nó i por arcos emanando do nó i para j

J2 - conjunto dos nós j diretamente conectados ao nó i por arcos emanando dos nós j para i

y_{ij} - variável real que representa o fluxo (em canais de 2 Mbps) através do arco ij

d_i - demanda no nó i , em canais de 2 Mbps

D - arcos do grafo que ligam diretamente nós $h \in H$ ao nó de estação ($D \subseteq A$)

Cap_n - capacidade do sistema óptico do tipo n

Nesta formulação, a função objetivo (4-1), que representa o custo total dos equipamentos, é formada a partir de valores incertos. É importante ressaltar que a incerteza está nos coeficientes, e não na decisão, a qual é representada pelas variáveis binárias e reais.

4. Representação usando Intervalos

4.1. Reformulação do problema

Custos incertos podem ser vistos pelo planejador como sendo intervalos fechados. Se são usados os limites à esquerda e à direita, um valor de custo c pode ser escrito como:

$$\mathbf{c} = [c_L, c_R] = \{ c : c_L \leq c \leq c_R, c \in \mathbb{R} \} \quad (4-6)$$

Alternativamente, pode-se escrever:

$$\mathbf{c} = \langle c_E, c_F \rangle = \{ c : c_E - c_F \leq c \leq c_E + c_F, c \in \mathbb{R} \}, \quad (4-7)$$

quando se usa o centro e o *spread*. \mathbb{R} é o conjunto dos números reais.

Uma propriedade importante de intervalos é que a sua soma continua sendo um intervalo. Este e outros detalhes a respeito de intervalos e sua aritmética podem ser encontrados em Alefeld e Herzberger (1983).

Portanto, com o uso de intervalos de custo o objetivo torna-se uma soma de intervalos sob um critério de minimização. Ishibuchi e Tanaka (1990) transformam o problema de encontrar o intervalo (resultado da soma de intervalos) num outro, bi-objetivo. Dito em breves palavras, esses autores partem de duas relações de ordem para caracterizar a “melhor” alternativa (intervalo) num problema de minimização:

- a) o planejador pode preferir a alternativa com menor custo mínimo e menor custo máximo. Por exemplo, usando a notação proposta em (4-6), [5,10] é melhor que [8,12];
- b) o planejador pode preferir a alternativa com menor custo esperado (médio) e menor incerteza. Por exemplo, [7,9] é melhor que [6,11].

Entretanto, estas relações são parciais. Por exemplo, não se pode afirmar que o intervalo [5,10] é melhor que [7,9], ou vice-versa.

Ishibuchi e Tanaka (1990) propõem um critério unificador: o “melhor” intervalo tem o menor custo esperado e o menor custo máximo. Na verdade, tem-se dois objetivos: minimizar o custo médio e minimizar o custo máximo.

No modelo 4-M1, o objetivo (4-1) é reescrito como:

$$Z'(\mathbf{x}, \mathbf{w}, \mathbf{s}) = \text{Min} (Z_R(\mathbf{x}, \mathbf{w}, \mathbf{s}), Z_E(\mathbf{x}, \mathbf{w}, \mathbf{s})) \quad (4-8)$$

Usando (4-6) e (4-7), tem-se:

$$Z_R(\mathbf{x}, \mathbf{w}, \mathbf{s}) = \sum_{(i,j) \in A} \sum_{n \in N_{ij}} (C_{Eij} + C_{Fij}) X_{ijn} + \sum_{m \in M} (C_{Em} + C_{Fm}) W_m + \sum_{h \in H} (C_{Eh} + C_{Fh}) S_h \quad (4-9)$$

$$e \quad Z_E(\mathbf{x}, \mathbf{w}, \mathbf{s}) = \sum_{(i,j) \in A} \sum_{n \in N_{ij}} C_{Eij} X_{ijn} + \sum_{m \in M} C_{Em} W_m + \sum_{h \in H} C_{Eh} S_h \quad (4-10)$$

4.2. Resolução

O problema linear misto com dois objetivos pode ser resolvido por qualquer das técnicas de Programação com Múltiplos Objetivos. Uma boa referência para o assunto é Steuer (1986). Se é usado o “método dos pesos”, que se baseia na soma ponderada dos objetivos, tem-se:

$$Z(\mathbf{x}, \mathbf{w}, \mathbf{s}) = \text{Min} (p_R Z_R(\mathbf{x}, \mathbf{w}, \mathbf{s}) + p_E Z_E(\mathbf{x}, \mathbf{w}, \mathbf{s})) \quad (4-11)$$

com $p_R + p_E = 1$, $0 \leq p_R \leq 1$, e $0 \leq p_E \leq 1$.

Para indicar a preferência de um critério sobre o outro, o planejador manipula os pesos p_E e p_R . Uma análise completa das possibilidades para p_E e p_R torna possível descobrir o conjunto de soluções não-dominadas para o problema.

4.3. Exemplo de aplicação

O exemplo é baseado no trabalho desenvolvido por Carlson et alii (1998b).

Dados gerais

A rede é a mesma utilizada para ilustrar o modelo 3-M1. A Figura 4-1 reapresenta essa rede, que contém uma estação telefônica (ET) e 18 nós, com demanda total de 191 canais de 2 Mbps.

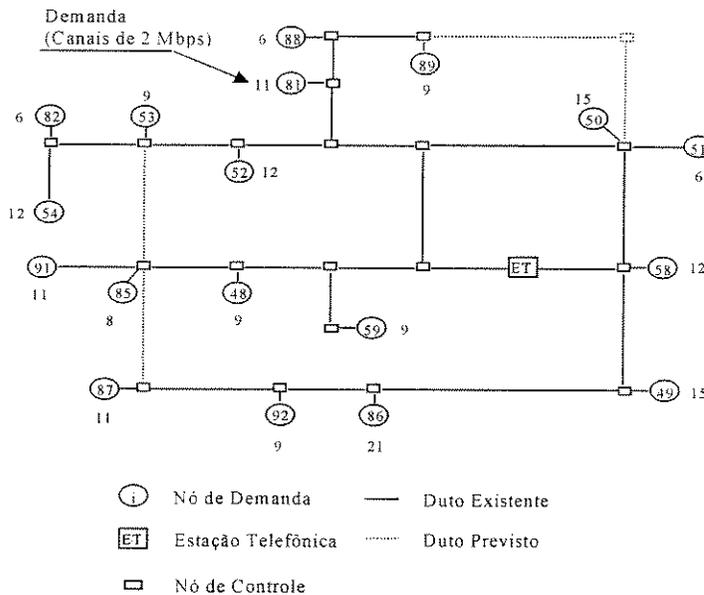


Figura 4-1. Rede com 18 nós para aplicação.

A Tabela 4-1 traz os equipamentos considerados e suas capacidades em canais de 2 Mbps.

Tabela 4-1. Dados dos equipamentos.

Equipamento/Tecnologia	Capacidade
1 x 34 Mbps (PDH)	16
2 x 34 Mbps (PDH)	32
ADM 21 portas (SDH)	21
ADM 42 portas (SDH)	42
ADM 63 portas (SDH)	63
HDSL	1

Os mesmos 3 anéis SDH são oferecidos como candidatos (Tabela 4-2).

Tabela 4-2. Anéis SDH candidatos.

Anel	Nós candidatos
1	85,48,87,92,86,49
2	85,48,53,52,50,51,58
3	81,88,89,50,51,58

São adotados os mesmos custos para os equipamentos PDH 1 x 34 Mbps (referência, valor 1.00) e PDH 2 x 34 Mbps (valor 1.82). Os demais custos (equipamentos SDH e HDSL) são indicados na Tabela 4-3 como intervalos, de acordo com (4-6) e (4-7).

Tabela 4-3. Intervalos para os custos dos equipamentos SDH e HDSL.

Equipamento	$[C_L; C_R]$	$\langle C_E; C_F \rangle$
ADM 21	[0.40;1.10]	$\langle 0.75; 0.35 \rangle$
ADM 42	[0.45;1.25]	$\langle 0.85; 0.40 \rangle$
ADM 63	[0.50;1.40]	$\langle 0.95; 0.45 \rangle$
HDSL	[0.05;0.25]	$\langle 0.15; 0.10 \rangle$

Resolução

O método dos pesos é o escolhido para resolver o problema, conforme (4-11). No início, tem-se $p_E=1$ e $p_R=0$. Neste caso, o custo é c_E . A Figura 4-2 (modificada em relação à Figura 4-1 para facilitar a representação) mostra a solução para este ponto (custo 17.05). A rede contém dois anéis SDH e vários sistemas PDH. A demanda do nó 82 é atendida por HDSL.

A partir daí, o custo total permanece fixo até $p_E=0$ porque há somente equipamentos PDH na rede. A Figura 4-3 apresenta esta solução.

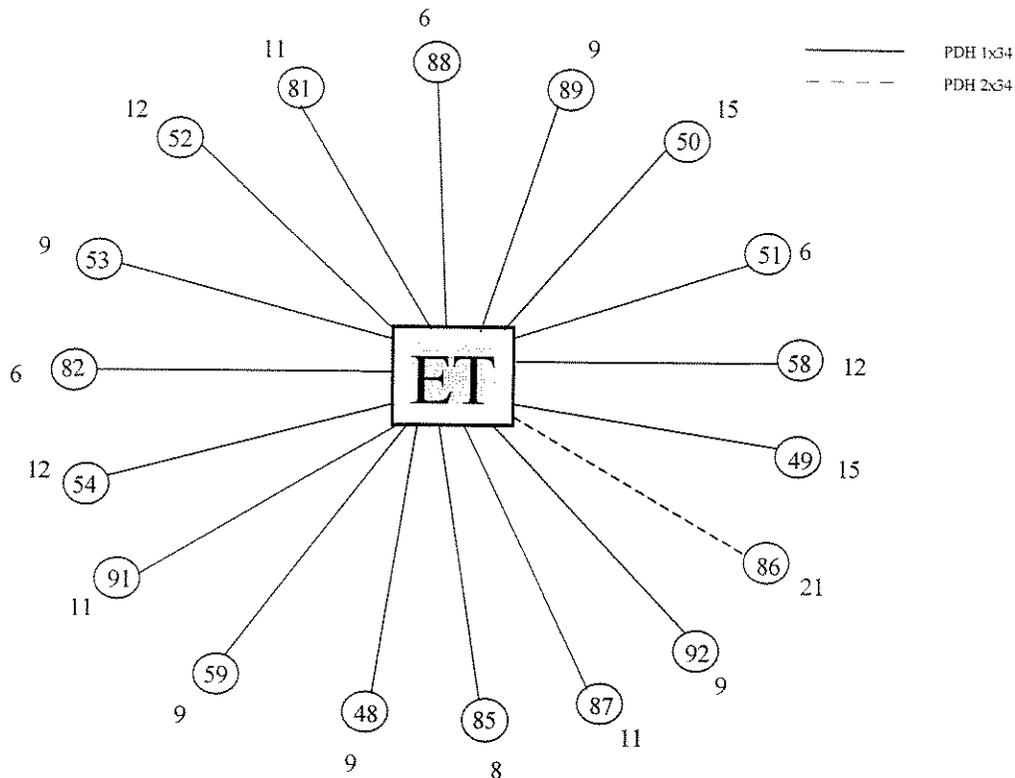


Figura 4-3. Rede para $p_E=0$.

Para os intervalos adotados, verifica-se que, quando os custos são os esperados ($p_E=1$), SDH é a tecnologia principal. Equipamentos PDH dominam os cenários mais caros. O HDSL não desempenha um papel importante: ele trabalha sem folga e atende apenas uma pequena porção da demanda, pois seu custo unitário não é atraente.

5. Representação usando Números Fuzzy

5.1. Conceitos

Para modelagem de incerteza pode ser usado o conceito de conjuntos fuzzy (conjuntos nebulosos) e de números fuzzy. Para fins de clareza, estes conceitos serão apresentados rapidamente. Além de Dubois e Prade (1980), também Klir e Folger (1992) e, mais recentemente, Pedrycz e Gomide (1998), constituem excelentes referências sobre o assunto.

Um conjunto (*ordinário*) pode ser caracterizado pela sua função de pertinência. Por exemplo, o “conjunto A dos números reais estritamente maiores que zero” pode ser expresso por:

$$\mu_A(a) = \begin{cases} 0, & \text{se } a \leq 0 \\ 1, & \text{se } a > 0 \end{cases}, \quad (4-12)$$

com $a \in \mathbb{R}$.

Um conjunto é *fuzzy* quando sua função de pertinência não apresenta, necessariamente, somente valores 0 ou 1. Por exemplo, o “conjunto \tilde{A} dos números reais muito maiores que zero” pode ser expresso por:

$$\mu_{\tilde{A}}(a) = \begin{cases} 0, & \text{se } a \leq 0 \\ \frac{a}{10}, & \text{se } 0 < a \leq 10 \\ 1, & \text{se } a > 10 \end{cases}, \quad (4-13)$$

com $a \in \mathbb{R}$. Esta função não é a única para o conjunto \tilde{A} ; ela depende do contexto e pode ser subjetiva.

Conjuntos fuzzy são propícios para representar situações em que é possível (ou necessário) distinguir valores com maior ou menor possibilidade de ocorrência. Um conjunto fuzzy é *normalizado* quando pelo menos um de seus elementos possui o máximo valor de pertinência (este valor máximo é 1). Um α -corte de um conjunto fuzzy \tilde{A} é um conjunto ordinário A_α que contém todos os elementos de \tilde{A} com valor de pertinência igual ou superior ao valor α .

Números fuzzy são conjuntos fuzzy com significado numérico (por exemplo, “conjunto dos números próximos de 8”) e que apresentam as seguintes propriedades:

- sua função de pertinência é contínua;
- seu maior valor de pertinência é 1 (isto é, o conjunto é normalizado);
- seus α -cortes são, todos, convexos.

5.2. Reformulação do problema

Para representar os custos incertos, podem ser usados números fuzzy triangulares (aqueles cuja função de pertinência tem a forma de um triângulo). Para isso, é associado a cada custo c um conjunto fuzzy $\tilde{c} = (\underline{c}, C, \bar{c})$, definido como “conjunto dos valores para o custo”. \tilde{c} é um número fuzzy triangular e C é o custo com maior valor de função de pertinência (Figura 4-4).

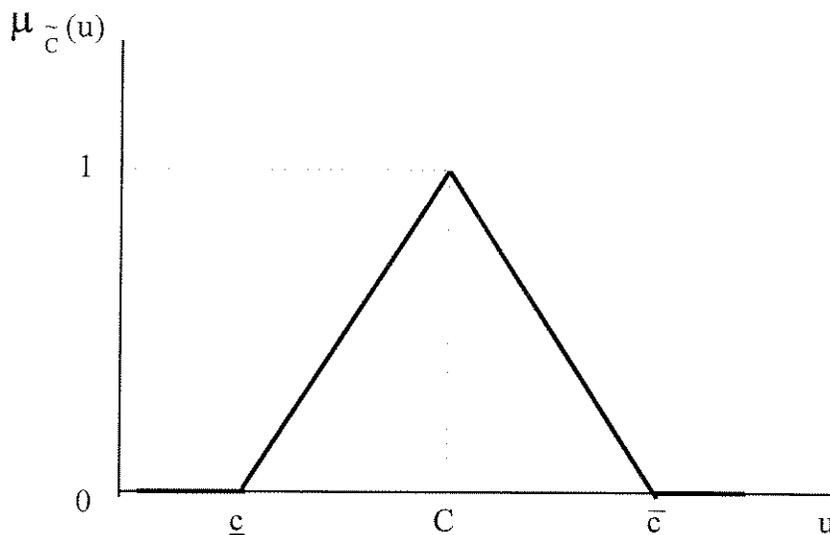


Figura 4-4. Número fuzzy triangular.

No modelo 4-M1, o objetivo (4-1) é reescrito como:

Minimizar

$$\tilde{Z}(\mathbf{x}, \mathbf{w}, \mathbf{s}) = \sum_{(i,j) \in A} \sum_{n \in N_{ij}} \tilde{c}_{ijn} x_{ijn} + \sum_{m \in M} \tilde{c}_m w_m + \sum_{h \in H} \tilde{c}_h s_h \quad (4-14)$$

5.3. Resolução

A função-objetivo (4-14) é uma soma ponderada de números fuzzy, o que por sua vez constitui também um número fuzzy. Assim, escolher a melhor solução requer comparações entre diferentes números fuzzy. Para que isto seja viável, é preciso transformar os números fuzzy de maneira a permitir seu tratamento. Este processo é denominado “defuzzyficação”, e consiste em encontrar um “valor de trabalho” para o número fuzzy tratado. A defuzzyficação pode ser usada,

dentre outras coisas, para ordenar números fuzzy. Existem vários métodos disponíveis. Bortolan e Degani (1985) fornecem a referência clássica para o tema, embora muitos outros trabalhos tenham sido posteriormente publicados.

São adotadas aqui as “funções de ranking”, que transformam números fuzzy em números reais (os quais são passíveis de ordenação). Sob esta idéia, resolver um problema “fuzzy” de otimização:

$$\text{Min } \tilde{c}x \quad , \quad (4-15)$$

com $x \in X$, é o mesmo que resolver o problema não-fuzzy (*crisp*):

$$\text{Min } f(\tilde{c}x) \quad , \quad (4-16)$$

com $x \in X$, sendo $f: \tilde{Z} \rightarrow \bar{Z}$ e \tilde{Z} o conjunto dos números fuzzy $\tilde{c}x$.

Herrera e Verdegay (1996) discutem detalhadamente a questão quando o problema de otimização contém somente variáveis binárias, isto é, $x \in X = \{0,1\}$ e são usados números fuzzy triangulares ($\tilde{c}x$ são números fuzzy triangulares). Segue-se uma lista de algumas das funções de ranking para o caso particular dos números fuzzy triangulares. Os vetores d e d' são tais que $d = (\bar{c} - c)$ e $d' = (c - \underline{c})$, tomando por base a Figura 4-4.

. *Chang*: $f(\tilde{c}x) = (dx+d'x)(3Cx+dx-d'x)/6$

. *Yager-1*: $f(\tilde{c}x) = (C+(1/3)(d-d'))x$

. *Yager-2*: $f(\tilde{c}x) = (Cx+dx)/(dx+1)$

. *Yager-3*: $f(\tilde{c}x) = (C+(1/4)(d-d'))x$

. *Adamo*: $f(\tilde{c}x) = Cx + dx(1-\alpha)$, com $\alpha \in [0,1]$

. *Average*: $f(\tilde{c}x) = Cx + d'x/(t+1) + \lambda(Rx-Lx)/(t+1)$, com λ e t definidos *a priori*.

Pode-se ver que diferentes funções de ranking têm efeitos distintos sobre os problemas. Num tipo de abordagem (métodos *Yager-1*, *Yager-3*, *Average*), a característica linear é mantida, pois os números fuzzy são substituídos por valores reais (não-fuzzy) que lhes são equivalentes com base naqueles métodos. Outro tipo de abordagem (método *Adamo*) requer solução paramétrica. Por sua vez, os métodos *Chang* e *Yager-2* transformam o objetivo em expressões quadrática e fracionária, respectivamente. As duas primeiras abordagens são aqui consideradas.

Substituição por valor real (não-fuzzy)

Seja como exemplo uma das funções devidas a Yager (1981), conhecida como “terceira função de Yager” (ou Yager-3), que é definida para o número fuzzy triangular \tilde{C} como:

$$f_Y(\tilde{C}) = C_{eq} = C + \frac{1}{4}(\bar{c} + \underline{c} - 2C) = \frac{1}{4}(\bar{c} + \underline{c} + 2C) \quad (4-17)$$

Isto significa, na prática, substituir em (4-14) cada custo fuzzy \tilde{C} por seu equivalente C_{eq} , que é um valor exato (não-fuzzy). A linearidade do problema original é mantida, o que é interessante.

Substituição por valor parametrizado

Esta abordagem visa tornar o problema tratável sem prescindir da incerteza sobre os dados usados. A idéia é parametrizar os substitutos dos números fuzzy, trazendo o problema para um domínio de resolução mais simples sem perder as características de incerteza originais. A variação do parâmetro permite analisar diferentes possibilidades de valor assumido como custo. Uma vantagem evidente reside no fato de a solução do problema também depender do parâmetro: ela pode ser interpretada, em cada caso, a partir do significado desse parâmetro.

Adamo (1980) apresenta uma função paramétrica de determinação de equivalente do número fuzzy:

$$f_{\alpha}(\tilde{C}) = \max \{u \mid \mu_{\tilde{C}}(u) \geq \alpha\} \quad (4-18)$$

com $0 \leq \alpha \leq 1$.

O parâmetro α significa, para Adamo, o grau de confiança do planejador nos valores de custo utilizados. A Figura 4-5 mostra como funciona o equivalente de Adamo para um número fuzzy triangular.

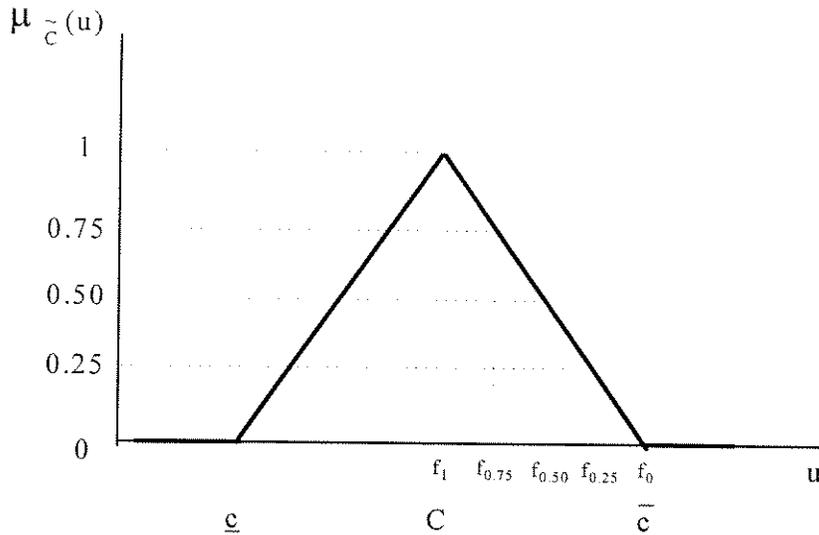


Figura 4-5. Equivalente de Adamo.

No caso triangular:

$$f_\alpha(\tilde{C}) = C + (\bar{c} - C)(1 - \alpha) \quad (4-19)$$

No modelo 4-M1, o objetivo (4-1) é reescrito como:

$$Z(\mathbf{x}, \mathbf{w}, \mathbf{s}) = \sum_{(i,j) \in A} \sum_{n \in N_{ij}} [C_{ijn} + (1 - \alpha)(\bar{C}_{ijn} - C_{ijn})] x_{ijn} + \sum_{m \in M} [C_m + (1 - \alpha)(\bar{C}_m - C_m)] w_m + \sum_{h \in H} [C_h + (1 - \alpha)(\bar{C}_h - C_h)] s_h \quad (4-20)$$

com $0 \leq \alpha \leq 1$.

O modelo com o objetivo (4-20) é paramétrico. A solução é α -dependente. Agora, é possível analisar a variação do resultado do planejamento (equipamentos e capacidades instaladas) com a variação parametrizada do custo (ou: com diferentes graus de confiança a respeito dos custos adotados).

Existem outras maneiras baseadas na adoção de parâmetros para lidar com números fuzzy; uma boa visão do assunto é apresentada por Delgado et alii (1990) e por Campos e Verdegay (1989).

Relação entre intervalos e substitutos parametrizados

Sob algumas condições, a abordagem usando intervalos para os custos com resolução pelo método dos pesos e aquela baseada no equivalente paramétrico de Adamo são similares. Carlson et alii (1998e) mostram que, se o triângulo correspondente ao custo fuzzy \tilde{C} é simétrico e se é adotado:

$$\underline{c} = c_E - c_F \tag{4-21}$$

e

$$C = c_E \quad , \tag{4-22}$$

tem-se:

$$c_F = \bar{c} - C. \tag{4-23}$$

Com (4-21), (4-22) e (4-23), não é difícil mostrar que (4-20) pode ser escrito como:

$$Z(\mathbf{x}, \mathbf{w}, \mathbf{s}) = \sum_{(i,j) \in A} \sum_{n \in N_{ij}} [C_{ijn} + (1 - p_E)(\bar{C}_{ijn} - C_{ijn})] x_{ijn} + \sum_{m \in M} [C_m + (1 - p_E)(\bar{C}_m - C_m)] w_m + \sum_{h \in H} [C_h + (1 - p_E)(\bar{C}_h - C_h)] s_h \tag{4-24}$$

Assim, quando $\alpha = p_E$, (4-11) e (4-24) são a mesma função objetivo, e o significado de α (grau de confiança do planejador com respeito aos dados) pode ser relacionado com o significado de p_E e p_R (preferência do planejador por algum contexto de custo). Entretanto, deve ser lembrado que números fuzzy não são intervalos; na verdade, estes são casos particulares de números fuzzy.

5.4. Exemplos de aplicação

Os exemplos que se seguem são baseados em Carlson et alii (1997b, 1998a, 1998b, 1998e).

Equivalente Yager-3 aplicado à rede com 18 nós

Trata-se da mesma rede utilizada no item 4.3 acima. O custo do equipamento PDH 1 x 34 Mbps é usado como referência (valor 1.00). O custo do equipamento PDH 2 x 34 Mbps também é perfeitamente conhecido (valor 1.82). Os demais custos (equipamentos SDH e HDSL) são incertos. Os custos dos equipamentos PDH e HDSL correspondem às duas pontas do enlace.

Para os equipamentos SDH e HDSL, são usados três triângulos de custos fuzzy diferentes. A Tabela 4-4 detalha os dados dos triângulos e o respectivo valor equivalente obtido pela aplicação da função Yager-3. A cada triângulo se associa um cenário: os triângulos A correspondem a cenários com custos menores, enquanto os triângulos C correspondem a cenários com custos maiores. Os cenários B utilizam triângulos simétricos, e portanto o equivalente Yager-3 resulta nos custos médios.

Tabela 4-4. Triângulos de custos para SDH e HDSL.

Equipamento	Triângulo	(\underline{c} , C , \bar{c})	Yager-3
SDH (ADM-21)	A	(0.40;0.56;1.10)	0.65
	B	(0.40;0.75;1.10)	0.75
	C	(0.40;0.94;1.10)	0.85
SDH (ADM-42)	A	(0.45;0.63;1.25)	0.74
	B	(0.45;0.85;1.25)	0.85
	C	(0.45;1.07;1.25)	0.96
SDH (ADM-63)	A	(0.50;0.70;1.40)	0.82
	B	(0.50;0.95;1.40)	0.95
	C	(0.50;1.20;1.40)	1.08
HDSL	A	(0.05;0.09;0.25)	0.12
	B	(0.05;0.15;0.25)	0.15
	C	(0.05;0.21;0.25)	0.18

São estudados 9 cenários, correspondentes às 9 maneiras de combinar os triângulos de custos dos equipamentos SDH e HDSL. A Tabela 4-5 resume os resultados dos cenários. Cada cenário é anotado por duas letras: a primeira remete aos triângulos SDH, enquanto a segunda se refere aos triângulos HDSL. O cenário A-A usa os custos menores, tanto para o SDH como para o HDSL. O cenário C-C, ao contrário, usa os custos maiores para ambas as tecnologias.

Tabela 4-5. Resultados dos cenários.

Cenário	A-A	A-B	A-C	B-A	B-B	B-C	C-A	C-B	C-C
Sist.PDH 1x34Mbps	3	3	4	6	6	7	11	11	13
Sist.PDH 2x34Mbps	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Anéis SDH	3	3	3	2	2	2	1	1	1
Sist. HDSL	6	6	-	12	6	-	12	12	-
Demanda PDH	32	32	38	64	64	70	117	117	129
Demanda SDH	153	153	153	115	121	121	62	62	62
Demanda HDSL	6	6	-	12	6	-	12	12	-
Valor da F.O.	15.28	15.46	15.56	16.84	17.05	17.15	17.77	18.13	18.33

A Figura 4-6 apresenta a disposição dos equipamentos para o cenário A-A. O resultado do cenário C-C está na Figura 4-7.

custo de HDSL e o SDH se mantém inalterado (e caro), mostra que a participação de sistemas HDSL na solução é irrisória. De fato, no caso C-A, o mais favorável ao HDSL, são atendidos 12 canais, ou menos que 7% da demanda. Como o SDH é caro nestes cenários, a tecnologia dominante é o PDH, tanto assim que, com o encarecimento do HDSL (cenário C-C), sua demanda é transferida para PDH.

Por outro lado, se são comparados os cenários A-* e C-*, pode-se observar uma queda acentuada no uso de PDH quando o SDH é mais barato. O HDSL mostra comportamento estável. Conclui-se daí que, com o barateamento da tecnologia SDH, ela será dominante, independente do HDSL. Deve-se observar também que nos cenários A-* os custos são substancialmente menores que aqueles dos cenários C-*.

Equivalente de Adamo aplicado à rede com 18 nós

Neste caso, a solução é exatamente a mesma obtida no item 4.3 acima, ressaltado o fato de que o parâmetro α desempenha o mesmo papel que o peso p_E (o que é válido somente para os triângulos simétricos, isto é, o cenário B-B). Assim, a Figura 4-2 corresponde à solução em que $\alpha=1$, enquanto a Figura 4-3 vale para $\alpha=0$. O parâmetro α tem a interpretação de grau de confiança nos valores adotados como custos. Por exemplo, $\alpha=1$ significa máxima confiança (note que $p_E=1$ significa usar custos esperados).

Equivalente Yager-3 aplicado à rede com 40 nós

Nesta rede (Figura 4-8) a demanda total é de 511 canais de 2 Mbps.

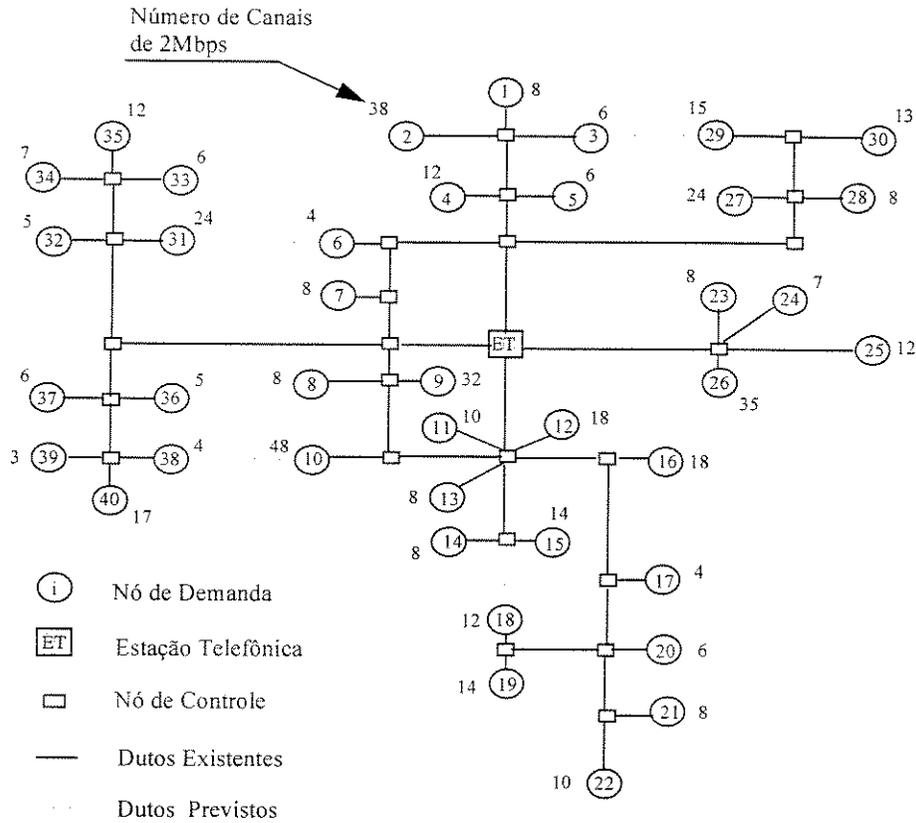


Figura 4-8. Rede com 40 nós para aplicação.

As características dos equipamentos são as mesmas apresentadas na Tabela 4-1. O custo do equipamento PDH 1 x 34 Mbps é a referência. Para os equipamentos SDH, são assumidos cinco triângulos de custos fuzzy diferentes. A Tabela 4-6 detalha os dados dos triângulos e o respectivo valor equivalente obtido pela aplicação da função Yager-3. A cada triângulo é associado um cenário: os triângulos A correspondem a cenários com custos menores, enquanto os triângulos E correspondem a cenários com custos maiores. Para os equipamentos HDSL, também são usados cinco cenários de custos fuzzy, do mais barato (A) ao mais caro (E).

A cada nó são oferecidas alternativas de atendimento por sistemas PDH de capacidades compatíveis com as demandas. Também os equipamentos HDSL podem ser aplicados a todos os nós da rede. Além disso, existem no exemplo 9 anéis unidirecionais SDH candidatos (ver Tabela 4-7).

Tabela 4-6. Triângulos de custos para SDH e HDSL.

Equipamento	Triângulo	(c , C , \bar{c})	Yager-3
SDH (ADM-21)	A	(0.49;0.74;0.98)	0.74
	B	(0.49;0.86;1.11)	0.83
	C	(0.49;0.98;1.23)	0.92
	D	(0.49;1.11;1.23)	0.98
	E	(0.49;1.23;1.23)	1.05
SDH (ADM-42)	A	(0.54;0.82;1.09)	0.82
	B	(0.54;0.95;1.22)	0.92
	C	(0.54;1.09;1.36)	1.02
	D	(0.54;1.22;1.36)	1.09
	E	(0.54;1.36;1.36)	1.16
SDH (ADM-63)	A	(0.60;0.90;1.20)	0.90
	B	(0.60;1.05;1.35)	1.01
	C	(0.60;1.20;1.50)	1.13
	D	(0.60;1.35;1.50)	1.20
	E	(0.60;1.50;1.50)	1.28
HDSL	A	(0.05;0.05;0.35)	0.125
	B	(0.05;0.12;0.35)	0.16
	C	(0.05;0.20;0.35)	0.20
	D	(0.05;0.28;0.35)	0.24
	E	(0.05;0.35;0.35)	0.275

Tabela 4-7. Anéis SDH candidatos.

Anel	Nós candidatos	Demanda total
1	27,28,29,30	60
2	1,2,3,5,6	62
3	7,31,32,33,34,35	62
4	8,10,37	62
5	9,36,38,39,40	61
6	23,24,25,26	62
7	14,17,18,19,20,21,22	62
8	11,12,13,15,16	68
9	4,11,12,13	48

Para examinar a influência dos custos na topologia, são estudados 25 cenários, correspondentes às 25 maneiras de combinar os triângulos de custos dos equipamentos SDH e HDSL. A Tabela 4-8 resume os resultados dos cenários mais expressivos. O cenário A-A usa os custos mais baixos para ambas as tecnologias. O cenário E-E, ao contrário, usa os custos mais altos, tanto para os equipamentos ópticos como para o HDSL. O cenário E-A é o que mais favorece o uso de HDSL (óptico mais caro, metálico mais barato). Os demais são situações intermediárias.

Tabela 4-8. Resultados dos cenários.

Cenário	A-A	C-C	E-A	E-C	E-E
Sist.PDH 1x34Mbps	2	15	21	30	33
Sist.PDH 2x34Mbps	-	1	4	4	3
Anéis SDH	8	5	2	2	3
Sist. HDSL	25	19	77	23	8
Valor da F.O.	36.565	45.280	42.905	46.880	48.100

A Figura 4-9 (modificada em relação à Figura 4-8 para facilitar a representação) apresenta a disposição dos equipamentos para o cenário C-C. Verifica-se que os nós 6, 17, 38 e 39 usam somente equipamentos HDSL. Os nós 12 e 16 têm atendimento PDH até o limite do equipamento (16 canais), sendo o restante da demanda ligado por HDSL. O nó 27 precisa de PDH 2 x 34 Mbps. Os demais nós são atendidos por anéis SDH ou por ligações PDH 1 x 34 Mbps.

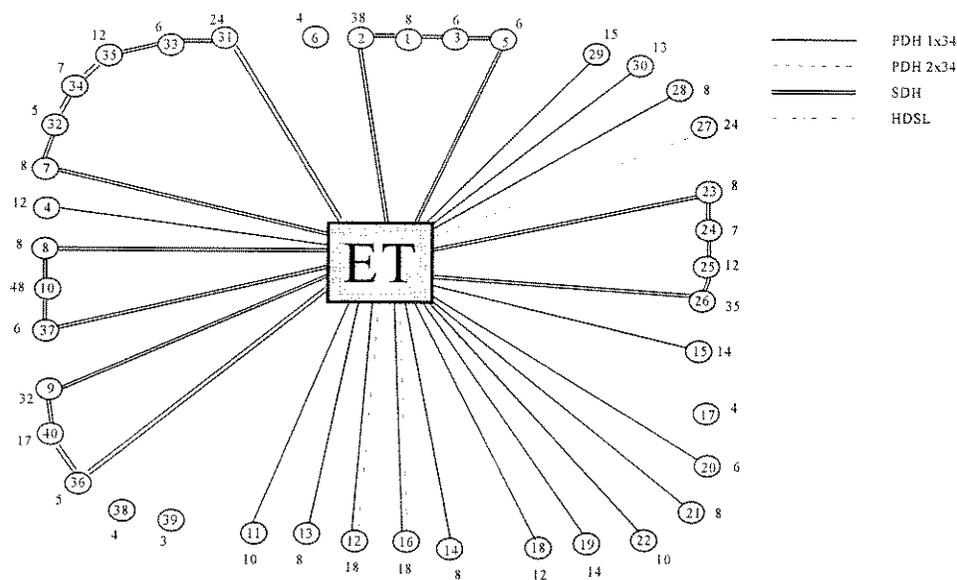


Figura 4-9. Resultado do cenário C-C.

Uma comparação envolvendo os cenários E-E, E-C e E-A, onde há barateamento da tecnologia metálica sem barateamento de SDH, mostra que os sistemas HDSL são usados principalmente pelos nós de demanda pequena (no exemplo, entre 3 e 8 canais). Quando é mais barato, o HDSL atende 15% (77/511) da demanda. Aliado à tecnologia PDH (dominante nestes cenários), o HDSL dificulta a utilização de anéis SDH enquanto estes ainda são caros.

Por outro lado, comparando os cenários E-C e C-C e os cenários E-A e A-A, observa-se uma queda acentuada no uso de PDH. Conclui-se daí que a tecnologia PDH cede lugar à tecnologia SDH com o gradativo barateamento desta última. O HDSL também mostra o mesmo comportamento: no cenário mais barato, o HDSL é responsável pelo atendimento de somente 5% (25/511) da demanda. Portanto, os anéis SDH tendem a dominar os cenários em que esta tecnologia seja barata, independente do barateamento do HDSL.

É possível também comparar o impacto de cada tecnologia, individualmente, sobre o custo. Para isso, são reproduzidos na Tabela 4-9 os resultados (custos) de alguns dos cenários explorados em Carlson et alii (1998a). Promove-se uma comparação entre situações em que somente equipamentos PDH podem ser usados, em que PDH e SDH podem ser usados (soluções puramente ópticas) e em que PDH e HDSL podem ser usados. As soluções que utilizam as três tecnologias já foram apresentadas na Tabela 4-8.

Tabela 4-9. Impacto individual de cada tecnologia.

Cenário	A	C	E
PDH, somente	50.38	50.38	50.38
PDH e SDH	37.88	46.05	48.95
PDH e HDSL	43.30	47.52	48.95

Analisando a Tabela 4-9, verifica-se que tanto equipamentos SDH como HDSL aliam-se aos equipamentos PDH no sentido de diminuir o custo total da rede. Uma comparação envolvendo as Tabelas 4-8 e 4-9 também produz conclusões interessantes. Nota-se que o custo é sistematicamente menor quando se combinam as três tecnologias. De fato, a Tabela 4-9 mostra que a tecnologia SDH tem bom poder de barateamento. Entretanto, o uso intensivo de anéis SDH depende das candidaturas estabelecidas (isto é, se há oferta ou não desses equipamentos aos nós de demanda). Uma quantidade abrangente de anéis candidatos tende a produzir soluções mais baratas, mas costuma dificultar o processo de resolução do problema (mais candidaturas significam mais variáveis 0-1). O planejador tem papel importante no momento de definir os anéis e nós que podem receber equipamentos SDH. Na situação (usual em redes de maior porte) em que as candidaturas não esgotam as possibilidades, os equipamentos HDSL atuam como compensadores, absorvendo as demandas pequenas ou os excessos de demanda em relação às capacidades dos equipamentos ópticos modulares. Portanto, os sistemas HDSL liberam esses nós, podendo otimizar a constituição dos anéis SDH e colaborar para um custo global menor.

6. Conclusão

Neste capítulo foram discutidas maneiras de incorporar incerteza sobre os custos dos equipamentos nos modelos de planejamento de redes de telecomunicações. O problema do atendimento de grandes assinantes foi tomado como ponto de partida. O modelo (“exato”) anteriormente desenvolvido para esse problema foi seguidamente modificado, de acordo com as estratégias usadas para representar custos incertos.

Foram apresentados três métodos para tratamento da incerteza. No primeiro método, o custo é expresso por um intervalo fechado. Nos outros dois métodos é utilizado o conceito de números fuzzy; o que muda é a maneira pela qual o problema é efetivamente resolvido quando apresenta números fuzzy na função objetivo. Em uma abordagem, os custos fuzzy são substituídos por valores não-fuzzy, sendo o problema então resolvido normalmente. Na outra, o substituto do número fuzzy é parametrizado. Mostrou-se que, sob algumas condições, o método que usa intervalos é similar àquele que usa equivalentes parametrizados como substitutos de números fuzzy.

Aplicações dos métodos foram relatadas. O uso de intervalos (similar ao equivalente parametrizado), permitiu associar diferentes soluções a distintos níveis de certeza sobre os dados. Assim, foi possível entender o impacto causado pela variação de custos sobre a rede planejada, e calcular os valores de custo em que as mudanças ocorreriam. Por outro lado, quando foram adotados substitutos não-fuzzy para os números fuzzy triangulares, vários triângulos foram especificados para simular situações e combinações de custos diferentes.

Como resultado de planejamento, as tecnologias PDH, SDH e HDSL foram combinadas no atendimento de grandes assinantes. Nos estudos, o custo dos equipamentos PDH manteve-se fixo, enquanto os custos (imprecisos) dos equipamentos SDH e HDSL variaram de baratos para caros. Nos cenários em que estes eram mais caros, a tecnologia PDH foi naturalmente dominante; nos cenários em que SDH e HDSL eram mais baratos, a tecnologia SDH dominou. O uso de HDSL não foi muito expressivo, ficando restrito a nós com pequena demanda.

CAPÍTULO 5

INCORPORAÇÃO DE DEMANDA INCERTA

1. Motivação

O setor de telecomunicações vem experimentando uma significativa transformação. A evolução tecnológica torna possível a prestação de novos serviços, baratos e de qualidade. Paralelamente, em alguns dos serviços que já utilizam a rede de telecomunicações verifica-se uma explosão de demanda (por exemplo, o acesso à Internet por assinantes residenciais). À medida que aumenta a variedade de serviços, aumenta também a indefinição sobre a quantidade de usuários que os serviços podem atingir. O ambiente é muito competitivo, e as empresas operadoras (Teles), bem como as provedoras de outros serviços, deflagram uma guerra baseada em tarifas, pacote de serviços e qualidade para cativar sua clientela.

As fibras ópticas como meio de transmissão podem constituir uma solução unificadora, no sentido de permitir a prestação de praticamente qualquer tipo de serviço. Soluções sem fio (*wireless*) também estão em estudo. Entretanto, além do meio de transmissão é preciso especificar os equipamentos (tecnologia, topologia) que serão adequados a cada tipo de serviço. Existe diferença entre eles, pois as necessidades de taxa de transmissão podem ser muito diferentes quando se comparam dois serviços distintos. Além disto, alguns serviços requerem a mesma velocidade em ambos os sentidos de transmissão (simétricos), enquanto outros são essencialmente veiculados no sentido estação-assinante (assimétricos). Assim, a demanda pelos diversos serviços é um elemento fundamental no planejamento das futuras redes.

As demandas por serviços tradicionais (voz) são estimadas através do “pingamento”, isto é, a análise de cada local de prestação do serviço. Esta análise é baseada em dados como características da região onde estão os potenciais assinantes, poder aquisitivo aparente, histórico, etc., fornecendo como resultado a quantidade de canais (de voz) necessários. Para serviços de transmissão de dados e linhas privativas, em geral o atendimento é feito sob solicitação. Todavia, num ambiente em que pode haver multiplicidade de serviços oferecidos a um mesmo assinante, estas técnicas são insuficientes. Estimar a demanda torna-se uma tarefa complexa e de resultados nem sempre satisfatórios. Assim, o planejador deve entender que existe incerteza sobre os valores utilizados. O resultado do planejamento pode ser sensível a variações nesses valores.

Dada a importância da tarefa de planejamento, os modelos e sistemas utilizados como apoio à decisão precisam ser flexíveis, incorporando também a incerteza que há com respeito à demanda. Modelos capazes de antecipar soluções para diferentes contextos de demanda se fazem necessários.

Para auxiliar o planejamento do atendimento de grandes assinantes, e admitindo incerteza sobre os valores de demanda, novos modelos são aqui elaborados. A incerteza pode ser representada por meio de intervalos ou de números fuzzy. A mesma argumentação anteriormente utilizada para os custos descarta a aplicação de modelos estocásticos. A seção 2 contém uma revisão bibliográfica sobre o tratamento de incerteza de demandas (ou recursos) em modelos de planejamento. Na seção 3, o modelo (“exato”) anteriormente desenvolvido é escrito de maneira a evidenciar a incerteza. A seção 4 documenta o uso de intervalos para abordar a questão. Na seção 5, são discutidos tanto o conceito de números fuzzy como alternativas de resolução dos respectivos problemas matemáticos.

2. Literatura

Uma abordagem construída em bases estocásticas e diretamente relacionada ao planejamento de sistemas de telecomunicações pode ser encontrada em Carpenter et alii (1998). Nesse trabalho, os autores enfocam a rede de troncos ATM, dimensionando as ligações a partir de valores nominais de demanda ponto-a-ponto e, posteriormente, gerando variações randômicas da demanda e estudando seu efeito sobre o custo da rede previamente planejada.

Assim como no caso do objetivo, o uso de conjuntos fuzzy para representar imprecisão nos demais coeficientes do problema é também bastante documentado. Novamente Dubois e Prade (1980), Tanaka et alii (1984), bem como Delgado et alii (1989) podem ser citados por terem apresentado tratamentos genéricos para o problema. Este último trabalho teve uma seqüência importante em Campos e Verdegay (1989). Este trabalho é usado em parte do que se segue e será detalhado quando necessário.

3. Modelo com Demandas Incertas

Demandas incertas no planejamento da opticalização de sistemas de telecomunicações podem ser modeladas de acordo com as técnicas acima apontadas. É adotado para o desenvolvimento do trabalho o modelo 3-M1, voltado ao atendimento dos grandes assinantes. O modelo, tal como apresentado, visa a minimização de custos. Assume-se que os custos são precisamente conhecidos. Para maior facilidade de acompanhamento, o modelo é reescrito a seguir, com o cuidado de indicar a existência de imprecisão quanto aos valores de demanda. Esse modelo será chamado 5-M1:

Minimizar

$$Z(\mathbf{x}, \mathbf{w}, \mathbf{s}) = \sum_{(i,j) \in A} \sum_{n \in N_{ij}} c_{ijn} x_{ijn} + \sum_{m \in M} c_m w_m + \sum_{h \in H} c_h s_h \quad (5-1)$$

sujeito a:

$$\sum_{j \in J1} y_{ij} - \sum_{j \in J2} y_{ji} = \tilde{d}_i, \quad \forall i \in I \quad (5-2)$$

$$\sum_{n \in N_{ij}} \text{Cap}_n x_{ijn} \geq y_{ij} \geq 0, \quad \forall (i, j) \in A - D \quad (5-3)$$

$$w_m - x_{lmn} \geq 0, \quad \forall n \in N_{lm}, \quad \forall l \in J2 \quad (5-4)$$

$$\sum_{n \in N_{h0}} \text{Cap}_n x_{h0n} + s_h \geq y_{h0} \geq 0, \quad \forall h \in H \quad (5-5)$$

onde

A - conjunto dos arcos do grafo

N_{ij} - conjunto de sistemas ópticos de transmissão candidatos no arco ij

c_{ijn} - custo do sistema óptico de tipo n , quando candidato no arco ij

\mathbf{x} -vetor de variáveis de decisão x_{ijn}

x_{ijn} -variável inteira binária que indica se o sistema óptico de tipo n é utilizado no arco ij ou não

M - conjunto de nós que podem receber unidades ópticas remotas

c_m -custo de infra-estrutura para instalação de unidade remota no nó $m \in M$

\mathbf{w} - vetor de variáveis de decisão w_m

w_m - variável inteira binária que indica se uma unidade remota é instalada no nó m ou não

I - conjunto dos nós do grafo (por definição, o nó 0 é o nó de estação)

H - nós de demanda que podem receber equipamentos HDSL ($H \subseteq I$)

c_h - custo unitário de equipamento HDSL quando candidato a instalação no nó $h \in H$

\mathbf{s} - vetor de variáveis de decisão s_h

s_h - variável real que indica a quantidade de equipamentos HDSL instalados no nó h

J1 - conjunto dos nós j diretamente conectados ao nó i por arcos emanando do nó i para j

J2 - conjunto dos nós j diretamente conectados ao nó i por arcos emanando dos nós j para i

y_{ij} - variável real que representa o fluxo (em canais de 2 Mbps) através do arco ij

\tilde{d}_i - demanda (incerta) no nó i , em canais de 2 Mbps

D - arcos do grafo que ligam diretamente nós $h \in H$ ao nó de estação ($D \subseteq A$)

Cap_n - capacidade do sistema óptico do tipo n

Em relação ao modelo original 3-M1, a modificação está nas equações (5-2), que fornecem o balanço de fluxo em cada nó. Nestas equações, os valores de demanda são agora incertos e devem ser tratados de alguma forma na resolução do problema. O restante do modelo não é modificado.

4. Representação usando Intervalos

4.1. Reformulação do problema

Quando o planejador não é capaz de distinguir mais do que uma faixa de valores possíveis para a demanda em cada nó, pode-se admitir que o valor efetivo dessa demanda residirá num certo intervalo:

$$d_i \in [\underline{d}_i, \bar{d}_i], \quad \forall i \in I \quad (5-6)$$

(ou $\underline{d}_i \leq d_i \leq \bar{d}_i, \quad \forall i \in I$).

Isto significa que cada equação (5-2) de balanço de fluxo no modelo 5-M1 deve ser modificada, gerando o seguinte par de desigualdades:

$$\sum_{j \in J1} y_{ij} - \sum_{j \in J2} y_{ji} \geq \underline{d}_i, \quad \forall i \in I \quad (5-7)$$

$$\sum_{j \in J1} y_{ij} - \sum_{j \in J2} y_{ji} \leq \bar{d}_i, \quad \forall i \in I \quad (5-8)$$

Usando um grafo, o problema pode ser tratado através da criação de um nó artificial fornecedor de toda a (maior) demanda possível. Para garantir o atendimento da demanda mínima, os arcos que ligam o nó artificial aos nós i são limitados inferiormente (Figura 5-1).

Isto equivale a usar as seguintes equações para substituir (5-2):

$$\sum_{j \in J1} y_{ij} - \sum_{j \in J2} y_{ji} - y_{I+1,i} = 0, \quad \forall i \in I \quad (5-9)$$

Para o nó artificial:

$$\sum_{i \in I} (y_{(I+1), i} + y_{(I+1), 0}) = \sum_{i \in I} \bar{d}_i \quad (5-10)$$

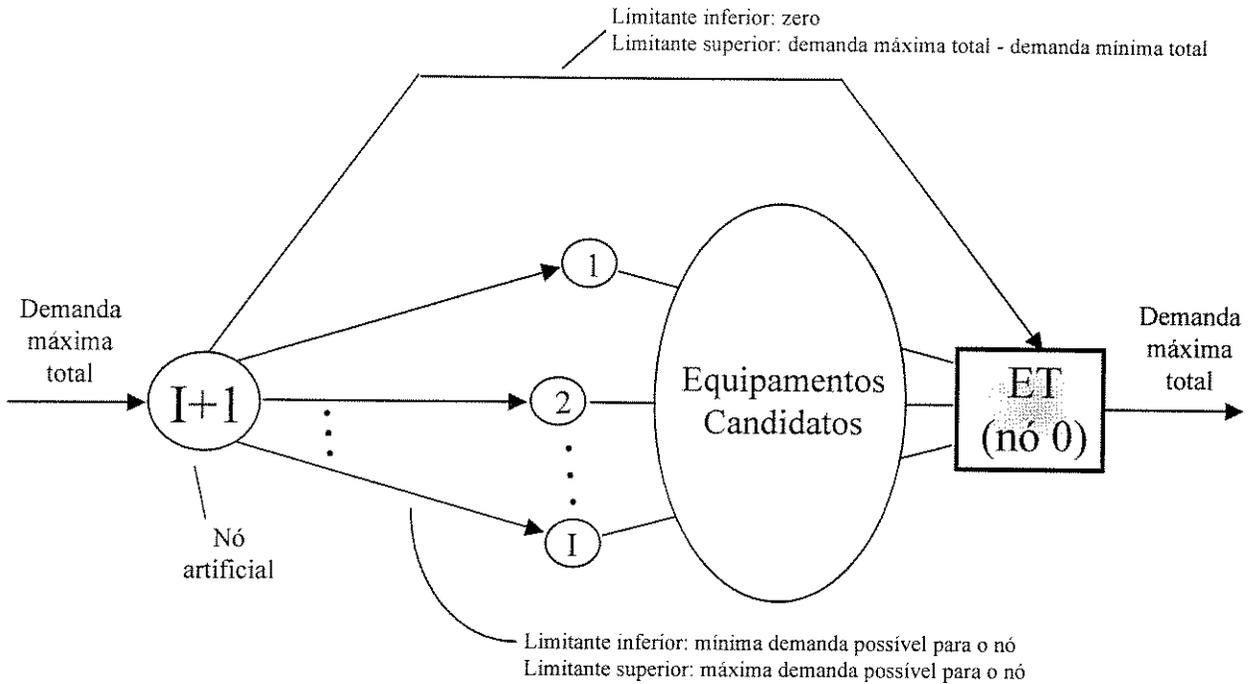


Figura 5-1. Modelo de grafos para representação usando intervalos.

A equação de balanço de fluxo para o nó-estação (0) é redundante e, tal como em 5-M1, não é necessário escrevê-la. O arco ligando o nó artificial (I+1) ao nó-estação carregará a parcela de demanda que não usa os recursos da rede.

4.2. Comentários

O uso de intervalos no problema tratado leva a situações que merecem comentários. Segue-se a descrição de algumas destas situações.

Perda de receita

Um modelo que objetiva custo mínimo tenderá, neste caso, a encontrar soluções que atendam demandas em valores iguais aos mínimos de seus intervalos. Para evitar este efeito, pode-se (genericamente falando) transformar a função-objetivo no sentido de premiar o atendimento além do mínimo. Usando mais uma vez o grafo, isto implica em adotar custos adequados para os arcos que ligam o nó artificial (I+1) tanto ao nó-estação (0) como aos nós de demanda (i). De fato, o uso do primeiro arco poderia ser penalizado, isto é, demandas “pagariam” por não utilizar recursos da rede. Intuitivamente, o valor a ser “pago” seria um equivalente à “perda de receita”

proporcionada por unidade de demanda não atendida. Alternativamente, o uso dos arcos que ligam $(I+1)$ aos nós de demanda (i) seria estimulado através de seu “barateamento”. Deve-se notar que “barateamentos” distintos para os nós podem ser usados para priorizar atendimentos de certas demandas em detrimento de outras. (O mesmo pode ser feito, depois de algumas modificações, com respeito ao arco penalizado. Ou seja, é possível penalizar diferentemente o não-atendimento de demandas; entretanto, isto pode ser obtido por nó, mas não por serviço, a menos que se criem nós artificiais para isso.).

Modularidade de equipamentos e folga da rede

Outro aspecto do modelo decorre do fato de as capacidades de alguns equipamentos serem modulares. Com isto, um plano de implantação pode talvez atender mais usuários do que indica o fluxo nos arcos para esta solução (ótima sob o ponto de vista do custo). Assim, é interessante avaliar o plano também sob o seguinte critério: “qual é a máxima demanda que pode ser atendida?”. Este critério, indicador da folga de capacidade existente, é importante como desempate qualitativo entre planos de custos semelhantes.

Limitantes para o orçamento

É interessante observar, por outro lado, que os extremos dos intervalos usados para os valores de demanda fornecem informações importantes para o planejador. Considerando primeiramente que o problema é resolvido com $d_i = \underline{d}_i, \forall i \in I$, isto é, em todos os nós as demandas são as menores possíveis, a solução do problema (custo \underline{Z}) dirá qual o menor orçamento necessário para a execução do plano. Isto é, se o orçamento disponível é menor que \underline{Z} , o planejador sabe de antemão que com certeza alguma demanda será reprimida. Se, ao contrário, o problema é resolvido assumindo que $d_i = \bar{d}_i, \forall i \in I$, a solução (custo \bar{Z}) dirá qual o orçamento necessário para garantir o atendimento da demanda nos maiores valores imaginados pelo planejador. Conhecidas as margens de trabalho do orçamento, o custo pode se tornar uma restrição do problema, o qual apresentará como objetivo minimizar a demanda não atendida ou maximizar a receita, por exemplo.

Robustez da solução

Cabe ainda ressaltar que, em alguns casos, pode ser conveniente aferir a robustez da solução, isto é, verificar o seu comportamento face a alterações nos valores de demanda. Dois tipos de análise, pelo menos, são pertinentes.

Uma primeira análise consiste em estabelecer a função demanda atendida *versus* custo. Uma das maneiras de se obter tal função é resolver o problema parametricamente. Para isso, a equação (5-10) é modificada:

$$\sum_{i \in I} (y_{(i+1),i} + y_{(i+1),0}) = \alpha \sum_{i \in I} \underline{d}_i + (1 - \alpha) \sum_{i \in I} \bar{d}_i \quad , \quad (5-11)$$

com $\alpha \in [0,1]$. Com isto, é possível acompanhar as mudanças nos equipamentos (alocação e dimensionamento) e na topologia devidas à variação da demanda.

Como segunda análise, é conveniente examinar o comportamento do plano à medida que os intervalos especificados para as demandas diminuam. Isto é, com o refinamento das informações, o plano obtido permanecerá o mesmo ou deve mudar? A atenção do planejador, neste caso, está principalmente nos equipamentos e na topologia; o custo está, em princípio, sob controle (ao menos seus limitantes são conhecidos). A questão aqui é definir o que significa “refinamento de informações” em termos dos intervalos adotados. A maneira mais simplista é pensar que o refinamento é um parâmetro $\beta \in [0,1]$. Quando $\beta = 0$, o problema utiliza o intervalo todo. À medida que β aumenta, o intervalo se estreita simetricamente; quando $\beta = 1$, os valores de demanda em cada nó são os centros dos respectivos intervalos. O parâmetro β tem a conotação de “grau de confiança nas informações”. Assim, em cada nó de demanda i :

$$\beta \left(\frac{\underline{d}_i + \bar{d}_i}{2} \right) + (1 - \beta) \underline{d}_i \leq d_i \leq \beta \left(\frac{\underline{d}_i + \bar{d}_i}{2} \right) + (1 - \beta) \bar{d}_i \quad . \quad (5-12)$$

Novamente um problema paramétrico é obtido. O valor de β pode ser individualizado por nó de demanda, mas as considerações acima continuam válidas.

5. Representação usando Números Fuzzy

5.1. Reformulação do problema

Numa situação típica, o planejador possui uma boa idéia a respeito da faixa de valores prováveis. Ao passo que adotar um valor exato (único) significa em geral estreitar a visão do problema e de suas variantes, usar intervalos implica não estabelecer nenhum tipo de prioridade sobre os valores. Se o planejador consegue distinguir valores com maior ou menor preferência, o conceito de números fuzzy pode ser usado.

Lembrando que números fuzzy são conjuntos fuzzy, pode-se associar a cada nó de demanda i um conjunto fuzzy $\tilde{D}_i = (\underline{d}_i, D_i, \bar{d}_i)$ definido como “conjunto dos valores possíveis para a demanda do nó”. Para este conjunto, uma função de pertinência triangular é (ver Figura 5-2):

$$\mu_{\tilde{D}_i}(u) = \begin{cases} 0, & \text{se } d_i < \underline{d}_i \\ \frac{d_i - \underline{d}_i}{D_i - \underline{d}_i}, & \text{se } \underline{d}_i \leq d_i \leq D_i \\ \frac{\bar{d}_i - d_i}{\bar{d}_i - D_i}, & \text{se } D_i \leq d_i \leq \bar{d}_i \\ 0, & \text{se } \bar{d}_i < d_i \end{cases} \quad (5-13)$$

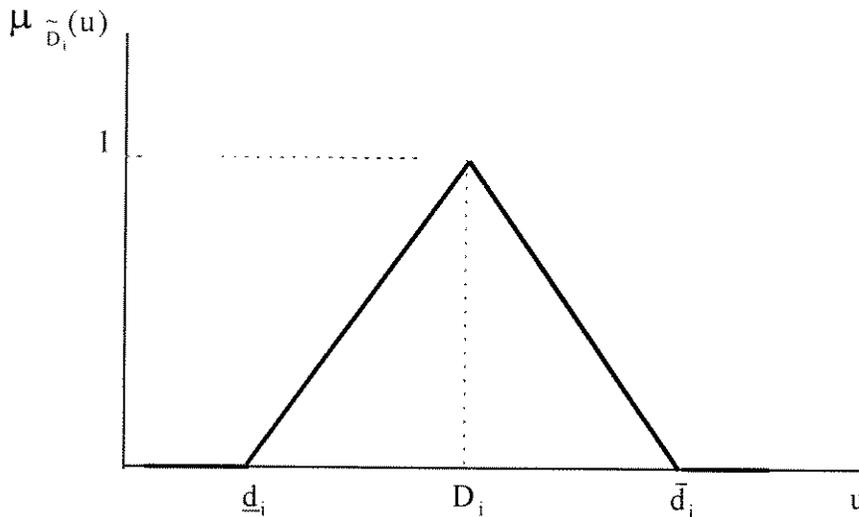


Figura 5-2. Número fuzzy triangular.

Definido desta maneira, \tilde{D}_i é um número fuzzy triangular cujo valor de maior grau de pertinência é D_i (não é obrigatório que o triângulo seja simétrico). A definição poderia ser alterada para traduzir um número fuzzy trapezoidal, por exemplo. Neste trabalho são adotados números fuzzy triangulares.

Se a demanda é agora expressa por um número fuzzy, a equação (5-2) de balanço de fluxo em cada nó é reescrita como:

$$\sum_{j \in J1} y_{ij} - \sum_{j \in J2} y_{ji} = \tilde{D}_i, \quad \forall i \in I \quad (5-14)$$

5.2. Resolução

A presença de números fuzzy em equações pode alterar substancialmente a sistemática de resolução. Assim como no caso dos custos, são detalhadas duas abordagens de defuzzyficação:

- a) a substituição do número fuzzy por um valor de trabalho não-fuzzy;
- b) a substituição do número fuzzy por um parâmetro.

Substituição por valor não-fuzzy

Seja como exemplo uma das funções devidas a Yager (1981), aquela anteriormente designada por “Yager-3”, que é definida como:

$$f_Y(\tilde{D}_i) = \int_0^1 M(\alpha) d\alpha \quad (5-15)$$

onde $M(\alpha)$ é o valor médio dos elementos para todos os α -cortes possíveis. Se o número fuzzy é triangular, então:

$$f_Y(\tilde{D}_i) = D_{ieq} = D_i + \frac{1}{4}(\bar{d}_i + \underline{d}_i - 2D_i) \quad (5-16)$$

Isto significa, na prática, trabalhar com equações de balanço de fluxo tais como:

$$\sum_{j \in J1} y_{ij} - \sum_{j \in J2} y_{ji} = D_{ieq}, \quad \forall i \in I \quad (5-17)$$

Sendo os D_{ieq} valores exatos (não-fuzzy), o modelo, após a substituição de (5-14) por (5-17), é idêntico ao modelo 3-M1; as incertezas são eliminadas pelo uso de um valor equivalente. É uma saída simplificadora para a questão, mas tem o inconveniente de apresentar uma única solução exata (*crisp*) para um problema com dados fuzzy.

Além disso, os valores de D_{ieq} não são necessariamente inteiros, o que pode parecer estranho para a demanda. Embora claramente seja possível forçar os valores de D_{ieq} a serem inteiros, isto significa um tratamento mais pesado para o problema, talvez desnecessário neste nível de planejamento.

Substituição por valor parametrizado

Como já se viu no capítulo 4, parametrizar o substituto do número fuzzy torna o problema tratável sem prescindir da incerteza sobre os dados usados. No caso, a variação do parâmetro permite analisar diferentes possibilidades de valor assumido como demanda.

Adamo (1980) apresenta uma função paramétrica de determinação de equivalente do número fuzzy:

$$f_{\alpha}(\tilde{D}_i) = \max\{d_i \mid \mu_{\tilde{D}_i}(d_i) \geq \alpha\}, \quad (5-18)$$

com $\alpha \in [0,1]$.

A Figura 5-3 demonstra o funcionamento do equivalente de Adamo para um número fuzzy triangular (também comentado no capítulo 4, para o caso de custos).

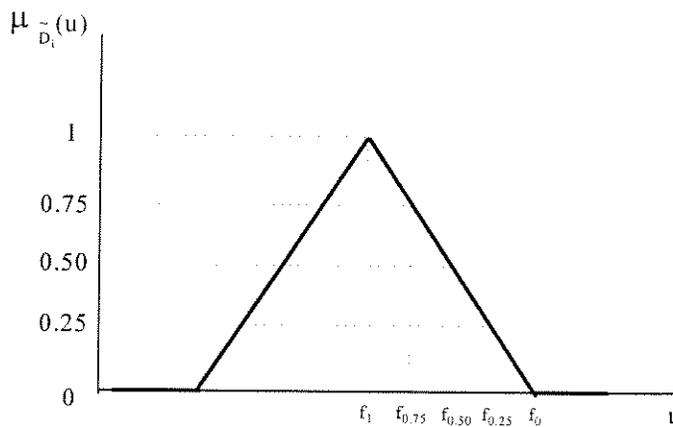


Figura 5-3. Equivalente de Adamo.

No caso triangular:

$$f_{\alpha}(\tilde{D}_i) = D_i + (\bar{d}_i - D_i)(1 - \alpha) \quad (5-19)$$

O parâmetro α indica para Adamo o grau de confiança nos valores a adotar.

As equações (5-14) tornam-se:

$$\sum_{j \in J1} y_{ij} - \sum_{j \in J2} y_{ji} = D_i + (1 - \alpha)(\bar{d}_i - D_i), \quad \forall i \in I \quad (5-20)$$

com $\alpha \in [0,1]$.

O modelo, com as equações (5-20), é paramétrico. Agora, é possível analisar a variação do resultado do planejamento (equipamentos, capacidades instaladas, etc. e respectivo custo) com a variação parametrizada da demanda.

Uso de parâmetros e de tolerâncias

Ainda com base na adoção de parâmetros, outra visão do assunto é apresentada por Delgado et alii (1989) e por Campos e Verdegay (1989). O ponto de partida dessa abordagem é considerar que numa equação ou inequação onde existem números fuzzy (ou seja, numa comparação de números fuzzy) é sempre permitida alguma violação da restrição, isto é, a comparação é feita admitindo-se uma certa tolerância (esta, também, um número fuzzy). Assim, uma comparação qualquer (representada por \prec) entre dois números fuzzy triangulares $\tilde{A} = (\underline{a}, A, \bar{a})$ e $\tilde{B} = (\underline{b}, B, \bar{b})$ é escrita como:

$$\tilde{A} \prec \tilde{B} + \tilde{T}(1 - \lambda), \tag{5-21}$$

com $\lambda \in (0,1]$, onde $\tilde{T} = (\underline{t}, T, \bar{t})$ é também um número fuzzy triangular correspondente à tolerância quanto à obediência da relação \prec entre os números fuzzy \tilde{A} e \tilde{B} .

Na prática, \prec é substituído por qualquer método de comparação entre números fuzzy. Assim, tomando como exemplo a função Yager-3, já apresentada, e supondo inequação do tipo \leq , (5-21) é equivalente a:

$$\frac{1}{4}(\bar{a} + \underline{a} + 2A) \leq \frac{1}{4}(\bar{b} + \underline{b} + 2B) + \frac{1}{4}(\bar{t} + \underline{t} + 2T)(1 - \lambda), \tag{5-22}$$

com $\lambda \in (0,1]$.

Se o método de comparação é o de Adamo, então para um certo $\alpha \in [0,1]$ pré-fixado tem-se:

$$[(1 - \alpha)\bar{a} + \alpha A] \leq [(1 - \alpha)\bar{b} + \alpha B] + [(1 - \alpha)\bar{t} + \alpha T](1 - \lambda), \tag{5-23}$$

com $\lambda \in (0,1]$.

Ou seja, de maneira geral:

$$f(\tilde{A}) \leq f(\tilde{B}) + f(\tilde{T})(1 - \lambda), \tag{5-24}$$

com $\lambda \in (0,1]$.

Quando se tem uma equação (igualdade) envolvendo números fuzzy, duas inequações podem substituí-la:

$$\begin{cases} f(\tilde{A}) \leq f(\tilde{B}) + f(\tilde{T})(1 - \lambda) \\ f(\tilde{A}) \geq f(\tilde{B}) - f(\tilde{T})(1 - \lambda) \end{cases}, \quad (5-25)$$

com $\lambda \in (0,1]$.

No caso aqui tratado, as equações (5-14) apresentam números fuzzy somente no lado direito (demandas). Não obstante, os números não-fuzzy do lado esquerdo podem ser encarados como casos particulares de números fuzzy:

$$\sum_{j \in J_1} \tilde{T}_i y_{ij} - \sum_{j \in J_2} \tilde{T}_i y_{ji} \approx \tilde{D}_i, \quad \forall i \in I \quad (5-26)$$

Assumindo \tilde{T}_i como sendo a tolerância quanto à obediência de cada equação (\tilde{T}_i é um número fuzzy triangular semelhante a \tilde{D}_i), as equações (5-14) tornam-se, com a função de comparação Yager-3:

$$\begin{cases} \sum_{j \in J_1} 1 y_{ij} - \sum_{j \in J_2} 1 y_{ji} \leq \frac{1}{4} (\bar{d}_i + \underline{d}_i + 2 D_i) + \frac{1}{4} (\bar{t}_i + \underline{t}_i + 2 T_i)(1 - \lambda) \\ \sum_{j \in J_1} 1 y_{ij} - \sum_{j \in J_2} 1 y_{ji} \geq \frac{1}{4} (\bar{d}_i + \underline{d}_i + 2 D_i) - \frac{1}{4} (\bar{t}_i + \underline{t}_i + 2 T_i)(1 - \lambda) \end{cases} \quad (5-27)$$

com $\lambda \in (0,1]$.

Se a função de comparação é a de Adamo, as equações (5-14) tornam-se:

$$\begin{cases} \sum_{j \in J_1} 1 y_{ij} - \sum_{j \in J_2} 1 y_{ji} \leq [(1 - \alpha) \bar{d}_i + \alpha D_i] + [(1 - \alpha) \bar{t}_i + \alpha T_i](1 - \lambda) \\ \sum_{j \in J_1} 1 y_{ij} - \sum_{j \in J_2} 1 y_{ji} \geq [(1 - \alpha) \bar{d}_i + \alpha D_i] - [(1 - \alpha) \bar{t}_i + \alpha T_i](1 - \lambda) \end{cases} \quad (5-28)$$

com $\lambda \in (0,1]$ e $\alpha \in [0,1]$ pré-fixado pelo planejador.

Ambos os métodos apresentam como característica desejável a manutenção da linearidade do problema original. Evidentemente, podem ser usados outros métodos de comparação, como por exemplo aqueles citados em Bortolan e Degani (1985) e Campos e Verdegay (1989).

5.3. Exemplos de aplicação

Alguns dos resultados aqui apresentados provêm de Carlson et alii (1998c, 1998d).

Dados Gerais

É utilizada como exemplo a rede da Figura 5-4, contendo uma estação e 16 nós de demanda.

No estudo, o atendimento pode ser realizado por equipamentos das tecnologias PDH e SDH (sistemas ópticos sob topologia estrela simples ou anel/estrela), além de equipamentos HDSL (que usam cobre em ligações ponto-a-ponto). As capacidades, também expressas em canais de 2 Mbps, e demais características desses equipamentos estão na Tabela 5-2. A referência de custo (1.00) é o equipamento PDH 1x34 Mbps.

Tabela 5-2. Dados dos equipamentos.

Equipamento/Tecnologia	Meio Físico	Capacidade	Custo
1 x 34 Mbps (PDH)	fibra óptica	16	1.000
2 x 34 Mbps (PDH)	fibra óptica	32	1.820
ADM 21 portas (SDH)	fibra óptica	21	0.740
ADM 42 portas (SDH)	fibra óptica	42	0.820
ADM 63 portas (SDH)	fibra óptica	63	0.900
HDSL	cobre	1	0.125

Cada um dos nós pode ser atendido tanto por equipamentos PDH, SDH ou HDSL. Considerando a demanda máxima possível (245), 4 anéis SDH podem ser suficientes para atendê-la ($4 \times 63 = 252 > 245$), embora isso dependa bastante das candidaturas (possíveis alocações nó-anel). Tendo em vista o valor de maior pertinência esperado para a demanda total (185), são oferecidos 4 anéis como candidatos (Tabela 5-3). Todos os equipamentos oferecidos em cada nó têm capacidades compatíveis com os níveis de demanda mostrados na Tabela 5-1.

Tabela 5-3. Anéis SDH candidatos.

Anel	Nós candidatos
1	9,36,38,39,40
2	14,17,18,19,20,21,22
3	23,24,25,26
4	14,24,26,36,38

Análise dos orçamentos ótimos para demandas mínima e máxima

Se o valor adotado como demanda em cada nó é o menor possível indicado por sua respectiva função de pertinência, o resultado fornecerá o mínimo custo de atendimento. Ou seja, se não se dispender ao menos essa quantia, certamente haverá repressão de demanda, independente de seu valor efetivo. A Figura 5-5 (na qual a rede aparece em formato que facilita a visualização) apresenta a solução sob estas condições.

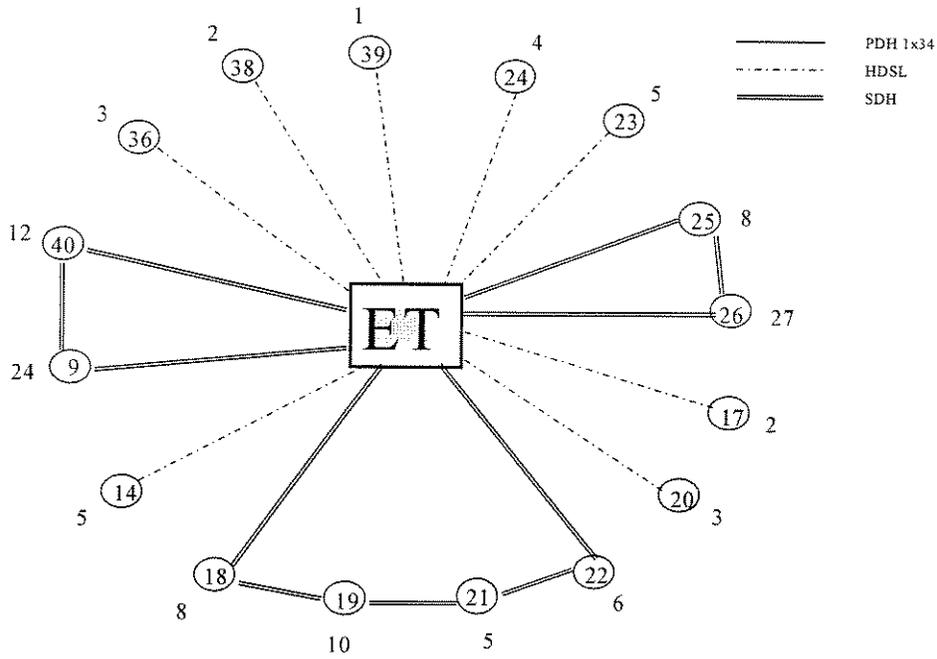


Figura 5-5. Resultado do cenário de demanda mínima.

Por outro lado, se é adotado o máximo valor possível para as demandas em cada nó, obtém-se como resultado um limitante superior para o orçamento, significando que não é necessário dispendir mais para atender essa demanda. A Figura 5-6 apresenta a solução para este caso.

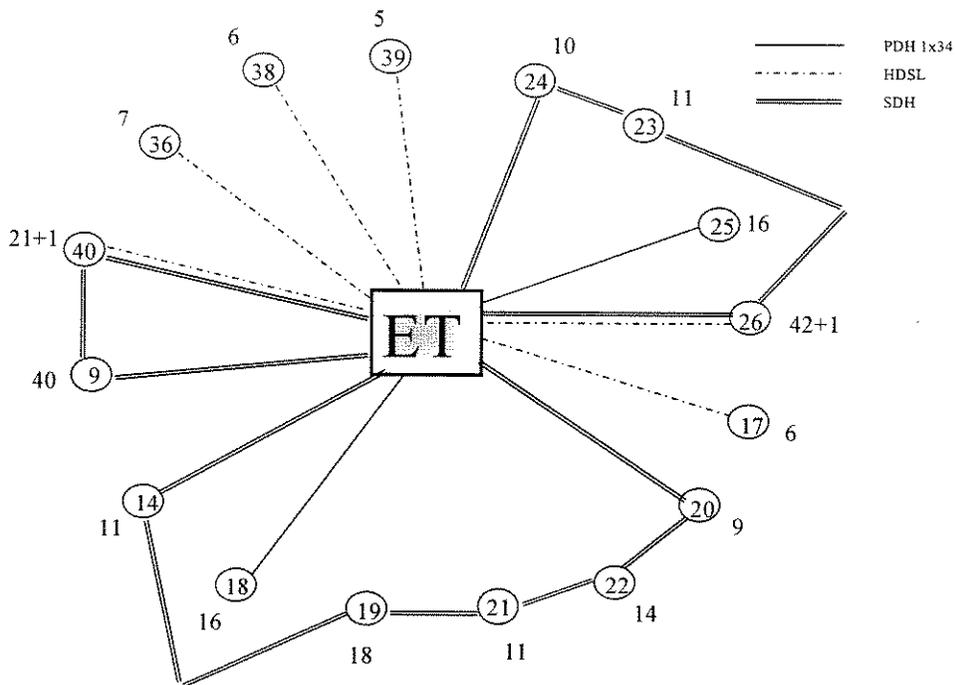


Figura 5-6. Resultado do cenário de demanda máxima.

Para fins de comparação, é apresentado também o resultado considerando a demanda fixa e igual, em cada nó, ao valor de maior pertinência (D_i). Como os números fuzzy são representados como triângulos simétricos, esta demanda corresponde ao valor médio. A Figura 5-7 mostra a solução para este caso.

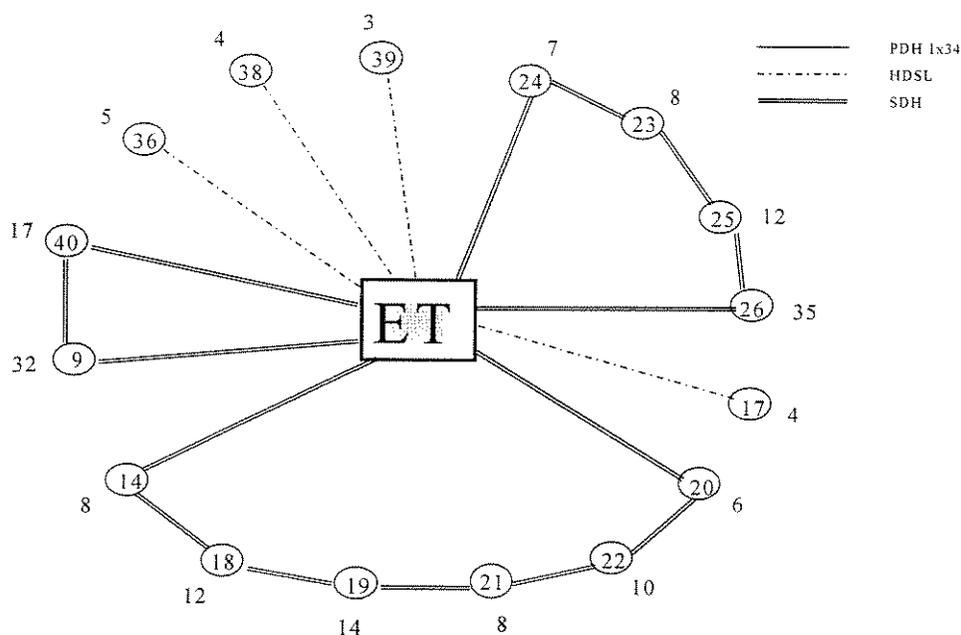


Figura 5-7. Resultado do cenário com demanda média.

A Tabela 5-4 contém a utilização de cada equipamento, os custos das soluções em cada caso e também um cálculo simplificado do custo por unidade de demanda. Deste modo, o planejador passa a conhecer os limitantes de seu orçamento e tem uma idéia geral do quão importante pode ser (ou não) aumentar o investimento. No exemplo, para suportar um aumento de praticamente 100% da demanda (245/125) o investimento é 30% maior (15.51/11.905). É interessante também observar as diferenças nas topologias resultantes em cada cenário. Nota-se que a participação de sistemas HDSL é maior quando as demandas em cada nó são pequenas, e que sua participação no custo é em geral superior à sua participação no atendimento da demanda.

Tabela 5-4. Resultados dos cenários.

Cenário	Dem.Mínima	Dem.Máxima	Dem.Média
Demanda Total	125	245	185
Sist.PDH 1x34Mbps	-	32	-
Sist.PDH 2x34Mbps	-	-	-
Anéis SDH	100	187	169
Sist. HDSL	25	26	16
Custo total	11.905	15.510	13.740
Custo/unidade	0.095	0.063	0.074

Equivalente Yager-3

O uso deste equivalente estabelece um valor (único) de trabalho para cada demanda e esse valor, no caso dos triângulos simétricos assumidos, é o valor de maior pertinência (D_i). Assim, não é preciso realizar o estudo, pois resultado é o mesmo já apresentado acima para as demandas médias. O equivalente Yager-3 torna-se atraente, porém, quando se quer examinar diferentes combinações de funções de pertinência para as demandas dos nós da rede.

Equivalente paramétrico de Adamo

Partindo do modelo com as equações (5-20), pode-se examinar o efeito da variação de α , começando com $\alpha=1$ (em que a demanda é igual ao valor de maior pertinência, D_i). A Figura 5-7 mostra a solução (custo 13.74). A rede é constituída de 3 anéis SDH e vários sistemas HDSL. Detalhando:

- . anel R1: nós 09 e 40;
- . anel R2: nós 14, 18, 19, 20, 21 e 22;
- . anel R3: nós 23, 24, 25 e 26;
- . HDSL : nós 17, 36, 38 e 39.

Para até qual valor de α esta topologia se mantém, isto é, a solução permanece ótima ? Trata-se de um problema de programação paramétrica, agravado pela presença de variáveis binárias. Uma referência para o estudo de problemas paramétricos deste tipo pode ser Bank et alii (1983). É preciso lembrar que:

- a) com $\alpha=1$, o equivalente $f_\alpha(\tilde{D}_i)$ é mínimo;
- b) com $\alpha=0$, o equivalente $f_\alpha(\tilde{D}_i)$ é máximo;
- c) à medida que α decresce, o equivalente aumenta.

O crescimento da demanda devido à redução de α pode ser absorvido de três maneiras:

- a) usando a folga dos equipamentos, sem mudança de custo ou topologia;
- b) instalando HDSL: estes sistemas têm apenas custo variável, o que implica em mudança no custo mas não necessariamente na topologia;
- c) instalando algum equipamento novo e/ou retirando de operação equipamento com custo fixo: tanto o custo da solução como a topologia são alterados.

É importante determinar quais valores de α causam transições de topologia (adição de equipamento, retirada ou troca). Para isto, informações importantes podem ser obtidas a partir da estrutura de custos. Por exemplo:

a) proporção (PDH 1x34 / HDSL) = $(1.0/0.125) = 8.0$

b) proporção (ADM-21 / HDSL) = $(0.74/0.125) = 5.92$

Assim, para valores de demanda inferiores a 5.92, usar HDSL é sempre mais barato. Se a demanda de algum nó atingir esse valor e o nó puder se ligar a um anel SDH já existente, o equipamento ADM-21 torna-se o mais atrativo. Se o nó não puder ser ligado a um anel SDH, o sistema HDSL permanece o mais barato até que a demanda atinja 8 unidades; neste momento, o PDH 1x34 fica compensador (se candidato).

No exemplo, é possível detectar quatro tipos de transição de topologia. Mais um é possível, como será visto posteriormente. São eles:

- a) transição A(i,r): nó i, o qual já pertence ao anel Rr, começa a usar também HDSL;
- b) transição B(i,r): nó i deixa de usar HDSL, e se liga ao anel Rr;
- c) transição C(i,r): nó i desliga-se do anel Rr e começa a usar somente PDH;
- d) transição D(i,r): nó i desliga-se do anel Rr e começa a usar somente HDSL;
- e) transição E(i): nó i deixa de usar HDSL, e começa a usar somente PDH.

À medida que o valor de α vai de 1 para 0 (ou: varia o grau de confiança nos dados de demanda), são encontradas nove mudanças na topologia. Tais mudanças ocorrem para valores de α plenamente calculáveis (Tabela 5-5).

Tabela 5-5. Transições.

Faixa para α	Transição	Custo para o maior α
1.000 — 0.944	-	13.7400
0.944 — 0.829	A(25,3)	13.7956
0.829 — 0.762	C(25,3)	14.1711
0.762 — 0.663	A(18,2)	14.2381
0.663 — 0.540	C(18,2)	14.5971
0.540 — 0.400	B(36,1)	14.7200
0.400 — 0.379	A(36,1)	14.8250
0.379 — 0.200	D(36,1)	14.8815
0.200 — 0.125	A(40,1)	15.0600
0.125 — 0.000	A(26,3)	15.1819

Com $\alpha=0$, são adotados os maiores valores possíveis para a demanda em cada nó, e a solução é aquela já apresentada na Figura 5-6 (custo 15.51).

Naturalmente, assumir variação linear da demanda com o parâmetro α leva em alguns casos ao uso de valores não inteiros de demanda. Isto não é um problema sério, visto que se está na etapa de planejamento e existem muitas incertezas. Não obstante, pode-se adotar algumas medidas, tais como truncamento ou arredondamento para cima, a fim de garantir que as demandas assumam sempre valores inteiros. São técnicas mais simples do que usar variáveis inteiras no problema de otimização, mas que conseguem revelar limitantes para o custo e a demanda em situações que podem realmente acontecer.

Com o equivalente de Adamo, a demanda aumenta à medida que α diminui. Usando truncamento, o valor adotado como demanda é sempre inteiro (é o maior valor inteiro de demanda possível para cada α). A Figura 5-8 mostra um exemplo de função de pertinência que reflete esta situação.

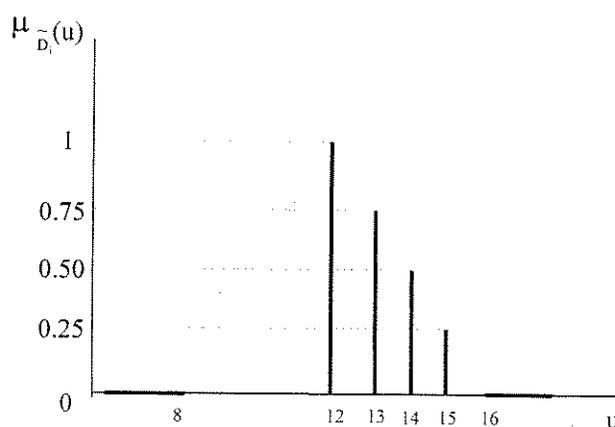


Figura 5-8. Função de pertinência com efeito de truncamento.

Em outras palavras, nem todos os valores de α são interessantes, mas apenas alguns deles (no caso acima: $\alpha=1$, $\alpha=0.75$, $\alpha=0.5$, $\alpha=0.25$ e $\alpha=0$). Por outro lado, as condições para mudança de solução também são afetadas. Por exemplo, HDSL é atraente enquanto a demanda é menor ou igual a 5; se a demanda atinge 6 (o próximo valor inteiro), é mais barato tentar um anel SDH (pois $6 > 5.92$).

No problema examinado, o uso de truncamento leva aos resultados da Tabela 5-6:

Tabela 5-6. Resultados com truncamento.

Valores de α	Custo
1.0; 0.875; 0.8	13.740
0.75	13.875
0.667; 0.625; 0.6	14.125
0.5; 0.4; 0.375	14.625
0.33	14.750
0.25; 0.2; 0.125	14.760
0	15.510

Já quando se usa o arredondamento para cima, tem-se os custos mostrados na Tabela 5-7:

Tabela 5-7. Resultados com arredondamento.

Valores de α	Custo
1.0	13.740
0.875; 0.8; 0.75	14.615
0.667	14.625
0.625; 0.6; 0.5	14.750
0.4	15.250
0.375; 0.33; 0.25; 0.2	15.260
0.125	15.385
0	15.510

A Figura 5-9 apresenta a variação de custo com α , comparando o caso linearizado com o truncamento e com o arredondamento. Como se podia esperar, os custos associados ao caso linear estão sempre acima daqueles obtidos usando truncamento, e sempre abaixo daqueles advindos do arredondamento.

A Figura 5-10 mostra a evolução da demanda de acordo com as abordagens de truncamento e de arredondamento. Com isto, é possível explicar alguns aumentos acentuados dos custos associados às duas abordagens para determinados valores de α . Deve-se observar que as duas curvas são paralelas, distantes uma da outra em 16 unidades (uma unidade por nó da rede).

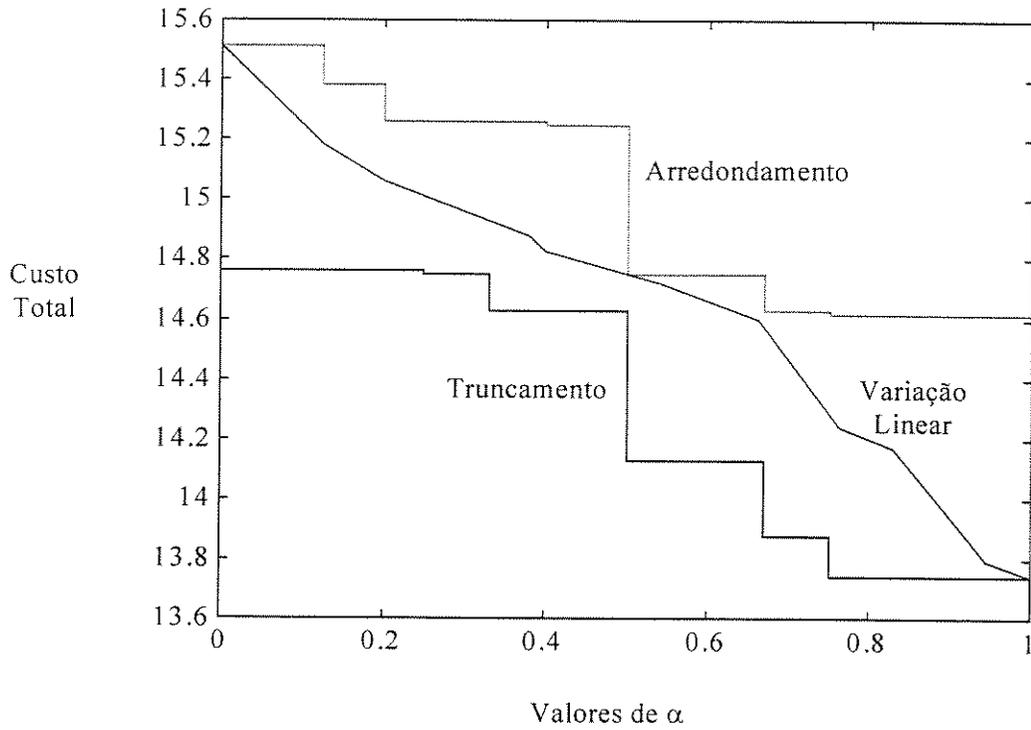


Figura 5-9. Variação de custo com α .

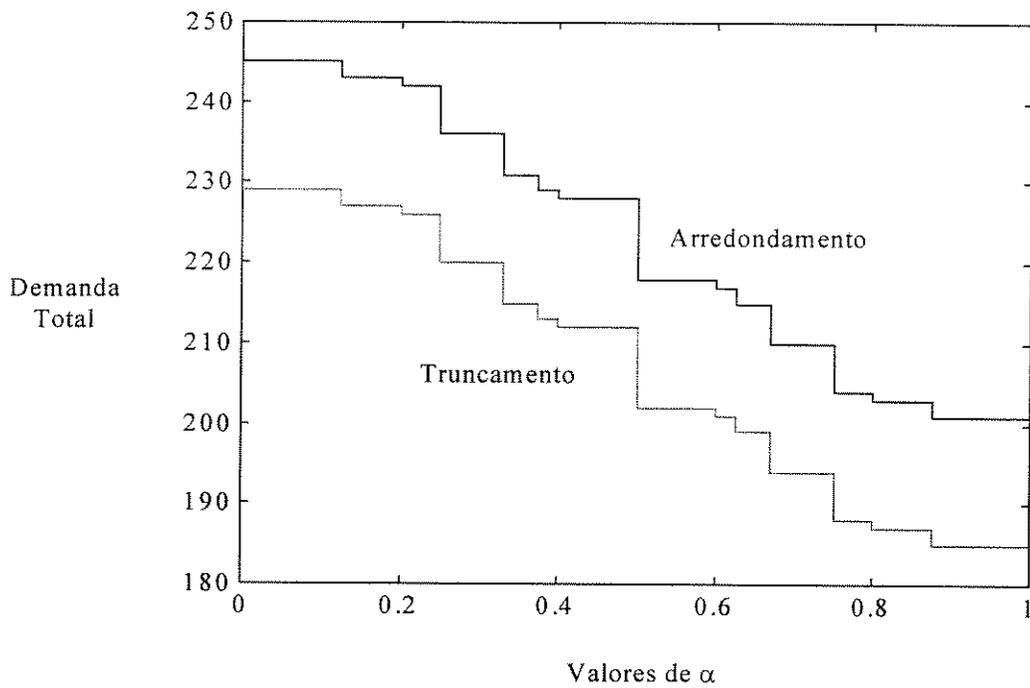


Figura 5-10. Evolução da demanda sob truncamento e sob arredondamento.

Uso de parâmetros e tolerâncias

Esta sistemática exige a definição de tolerâncias (também elas números fuzzy triangulares) para cada nó de demanda. Estas tolerâncias são apresentadas na Tabela 5-8, bem como os respectivos equivalentes de Adamo, denotados por T_{Ad} (pré-fixando o grau de confiança $\alpha=0.5$). Para maior clareza são rerepresentados os dados dos triângulos de demanda e seu equivalente (D_{Ad}).

Tabela 5-8. Nós de demanda e respectivas tolerâncias.

Nó de Demanda	\underline{d}_i	D_i	\bar{d}_i	D_{Ad}	\underline{t}_i	T_i	\bar{t}_i	T_{Ad}
09	24	32	40	36.0	5	8	11	9.5
14	5	8	11	9.5	1	2	3	2.5
17	2	4	6	5.0	0	1	2	1.5
18	8	12	16	14.0	1	3	5	4.0
19	10	14	18	16.0	2	4	6	5.0
20	3	6	9	7.5	1	2	3	2.5
21	5	8	11	9.5	1	2	3	2.5
22	6	10	14	12.0	1	3	5	4.0
23	5	8	11	9.5	1	2	3	2.5
24	4	7	10	8.5	1	2	3	2.5
25	8	12	16	14.0	1	3	5	4.0
26	27	35	43	39.0	5	9	13	11.0
36	3	5	7	6.0	1	2	3	2.5
38	2	4	6	5.0	0	1	2	1.5
39	1	3	5	4.0	0	1	2	1.5
40	12	17	22	19.5	3	5	7	6.0

Somente o equivalente de Adamo é utilizado neste estudo. Outros equivalentes, como o de Yager-3, podem ser utilizados, com resultados conceitualmente semelhantes. No entanto, para simplificar o processo de resolução e análise, é sempre desejável que o equivalente usado mantenha a característica linear do problema.

Tomando como exemplo o nó 23, pode-se ver o que significa usar números fuzzy para representar sua demanda. Assumindo o nó 0 como o da estação e considerando os equipamentos candidatos no nó 23, sua equação de balanço de fluxo é, de acordo com (5-14):

$$Y_{23,0}(PDH) + Y_{23,0}(HDSL) + Y_{23, Ane13}(SDH) + Y_{23, Ane14}(SDH) = \tilde{8} \quad (5-29)$$

Substituindo esta equação por aquelas obtidas com o equivalente de Adamo (5-28), tem-se, considerados os valores da Tabela 5-8:

$$\begin{cases} Y_{23,0}(PDH) + Y_{23,0}(HDSL) + Y_{23, Ane13}(SDH) + Y_{23, Ane14}(SDH) \leq 9.5 + (1 - \lambda)2.5 \\ Y_{23,0}(PDH) + Y_{23,0}(HDSL) + Y_{23, Ane13}(SDH) + Y_{23, Ane14}(SDH) \geq 9.5 - (1 - \lambda)2.5 \end{cases} \quad (5-30)$$

com $\lambda \in (0,1]$. Tal modificação deve ser aplicada a todas as equações de balanço de fluxo dos nós de demanda. O problema torna-se paramétrico em λ . Diferentes valores de λ podem significar soluções (custos e topologias) distintas.

A idéia é acompanhar o efeito da variação de λ na solução, partindo de $\lambda=0$. Como já se observou anteriormente, será desprezado o fato de que as demandas assumem sempre, na realidade, valores inteiros. Para $\lambda=0$ a topologia de mínimo custo (13.25) é apresentada na Figura 5-11. Uma vez que os valores de demanda residem dentro de intervalos, são associados aos nós valores tais que o total atendido pelos equipamentos instalados seja o máximo possível, respeitados aqueles intervalos.

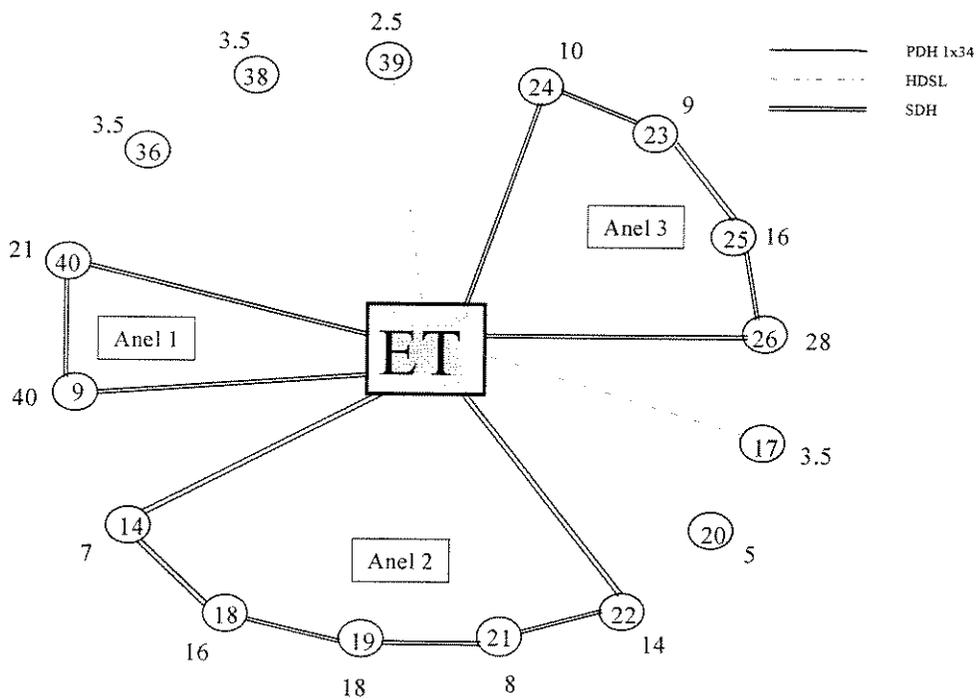


Figura 5-11. Topologia para $0 \leq \lambda \leq 0.368$.

A Tabela 5-9 mostra, para cada nó, o intervalo permitido para a demanda e o(s) equipamento(s) instalado(s).

Tabela 5-9. Resumo da solução com $\lambda=0$.

Nó de Demanda	$[D_{Ad}-T_{Ad}; D_{Ad}+T_{Ad}]$	PDH 1x34	PDH 2x34	ADM-21	ADM-42	ADM-63	HDSL
09	[26.5;45.5]	-	-	-	1 (anel 1)	-	-
14	[7.0;12.0]	-	-	1 (anel 2)	-	-	-
17	[3.5;6.5]	-	-	-	-	-	3.5
18	[10.0;18.0]	-	-	1 (anel 2)	-	-	-
19	[11.0;21.0]	-	-	1 (anel 2)	-	-	-
20	[5.0;10.0]	-	-	-	-	-	5.0
21	[7.0;12.0]	-	-	1 (anel 2)	-	-	-
22	[8.0;16.0]	-	-	1 (anel 2)	-	-	-
23	[7.0;12.0]	-	-	1 (anel 3)	-	-	-
24	[6.0;11.0]	-	-	1 (anel 3)	-	-	-
25	[10.0;18.0]	-	-	1 (anel 3)	-	-	-
26	[28.0;50.0]	-	-	-	1 (anel 3)	-	-
36	[3.5;8.5]	-	-	-	-	-	3.5
38	[3.5;6.5]	-	-	-	-	-	3.5
39	[2.5;5.5]	-	-	-	-	-	2.5
40	[13.5; 25.5]	-	-	1 (anel 1)	-	-	-
Anel 1	-	-	-	-	-	1	-
Anel 2	-	-	-	-	-	1	-
Anel 3	-	-	-	-	-	1	-
Anel 4	-	-	-	-	-	-	-
Custo=13.25	-	-	-	9x0.74	2x0.82	3x0.90	18x0.125

Para até qual valor de λ esta solução (topologia) se mantém inalterada ? Trata-se também de uma questão de programação paramétrica, agravada pelo fato de os valores de demanda serem variáveis dentro de um intervalo. Assim como no caso anteriormente descrito, o crescimento da demanda pode ser absorvido de três maneiras:

- aproveitando a capacidade ociosa dos equipamentos: sem variação de custo ou topologia;
- instalando equipamentos HDSL: como não têm custo fixo, mas somente variável, representam mudança de custo mas não, necessariamente, de topologia;
- instalando um novo equipamento e/ou retirando equipamento com custo fixo: neste caso variam o custo e a topologia da solução.

A variação da demanda pode ser, também, no sentido da diminuição, uma vez que a representação usa um intervalo. O raciocínio é o mesmo.

A variação da demanda com o parâmetro λ deve ser estudada com detalhe. Com base no equivalente de Adamo e nas equações (5-28) que descrevem os intervalos para a demanda em cada nó, verifica-se que (Figura 5-12):

- a) quando $\lambda=0$ tem-se o intervalo máximo, estando a demanda livre para assumir qualquer valor dentro deste intervalo. O valor central do intervalo é o próprio valor do equivalente (D_{Ad}), enquanto o *spread* é dado pelo equivalente do número fuzzy correspondente à tolerância (T_{Ad});
- b) à medida que λ cresce, o intervalo diminui, porém o valor central é constante (D_{Ad});
- c) quando $\lambda=1$, o intervalo é na verdade constituído de um único ponto: o valor D_{Ad} dado pelo equivalente para a demanda do nó (a tolerância é anulada).

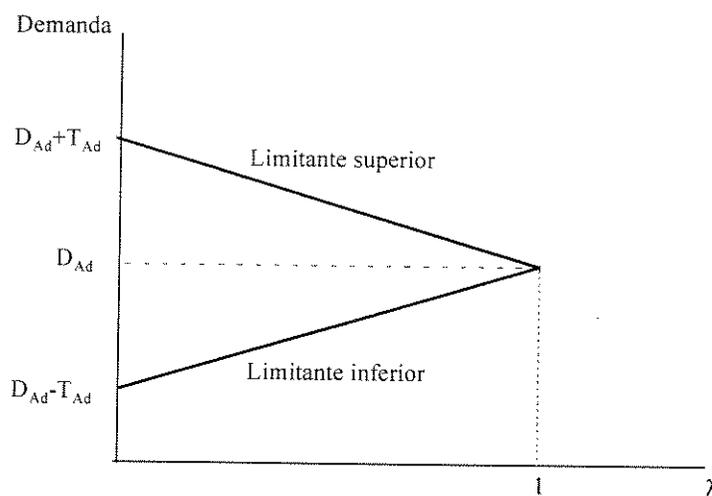


Figura 5-12. Variação da demanda com λ .

À medida que os intervalos diminuem, o problema de otimização fica mais restrito e o custo da solução pode aumentar (pois o limitante inferior para as demandas está aumentando). É possível que ocorram acomodações nos valores atendidos de demanda no sentido de encontrar soluções de mínimo custo. As tolerâncias, é claro, desempenham papel importante neste momento.

Ocorrerá mudança significativa na solução quando, em qualquer dos nós, a variação de demanda devida a λ causar a adição, retirada ou troca de tecnologia. É desejável saber para qual valor de λ isto acontece. Para tal, uma análise caso a caso deve ser realizada, tomando por base fatos como os seguintes (já mostrados anteriormente), deduzidos da estrutura de custos:

- a) relação (PDH 1x34 / HDSL) = $(1.0/0.125) = 8.0$
- b) relação (ADM-21 / HDSL) = $(0.74/0.125) = 5.92$

Isto significa que, para demanda inferiores a 5.92, o atendimento por HDSL é sempre mais barato. Se a demanda atinge este valor e já existe anel instalado, o equipamento ADM-21 passa a ser o mais interessante. Se não existe anel instalado, o HDSL continua mais barato até que a demanda chegue a 8 unidades, quando então o equipamento PDH 1x34 (se oferecido) torna-se compensador. O raciocínio no sentido inverso (diminuição de demanda) é análogo.

A solução com $\lambda=0$ é analisada sob este prisma. Estudando novamente a Figura 5-11 e a Tabela 5-9 verifica-se que, inicialmente, as demandas atendidas por HDSL (nós 17, 20, 36, 38 e 39) se mantêm no limitante inferior de seus intervalos, pois o objetivo é minimizar custos, que para este equipamento aumentam linearmente com a demanda. Isto é, será instalado HDSL somente no nível mínimo necessário. Esta regra é válida, independente de λ . Pode-se concluir que, se dentre estes nós houver algum cujo limitante inferior do intervalo não atinja 5.92 unidades nem mesmo quando $\lambda=1$, então esse nó será sempre atendido por HDSL, independente de λ . Para o presente exemplo, isso acontece com os nós 17, 38 e 39.

Os nós 20 e 36 vivem outra situação. Observando os limitantes inferiores de seus intervalos quando $\lambda=0$ (5.0 e 3.5, respectivamente) e quando $\lambda=1$ (7.5 e 6.0), percebe-se que para algum λ , $0 < \lambda \leq 1$, o valor-limite de 5.92 é atingido:

- a) nó 20: a linearidade do intervalo com λ permite concluir que, no caminho de crescimento entre 5.0 e 7.5, o valor-limite é atingido quando $\lambda=0.368$. Isto é, enquanto $\lambda < 0.368$, a solução se mantém igual (a menos do custo de adição de HDSL ao nó para suportar o aumento de demanda), pelo menos do ponto de vista deste nó;
- b) nó 36: analogamente, obtém-se $\lambda=0.968$.

Todos os demais nós, na solução com $\lambda=0$, são atendidos por anéis SDH. Neste caso, a análise é diferente. A seguinte questão deve ser respondida para cada anel: existe algum valor de λ para o qual a soma dos limitantes inferiores para as demandas dos nós do anel exceda a capacidade desse anel? Em caso afirmativo, o que acontece quando λ atinge esse valor?

Novamente a análise será baseada nos limitantes inferiores dos intervalos. Se para $\lambda=1$ (máximos limitantes inferiores) a capacidade do anel é insuficiente para atender os nós, então o anel verá sua capacidade esgotada em algum λ , $0 < \lambda \leq 1$. Considerando que no exemplo a capacidade de cada anel SDH é de 63 canais de 2 Mbps, tem-se:

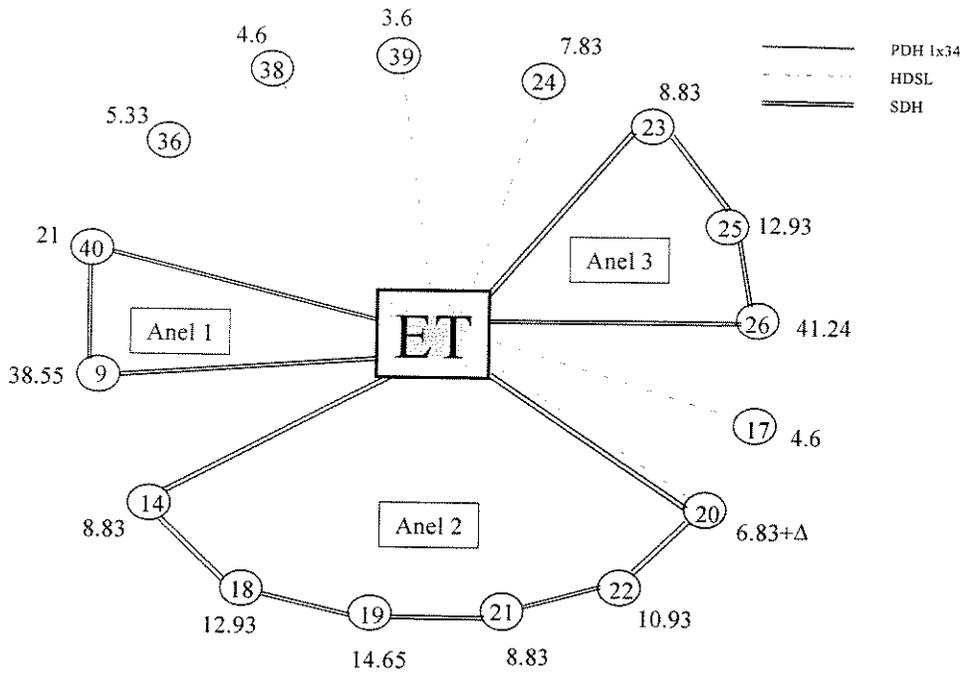


Figura 5-16. Topologia para $0.732 \leq \lambda \leq 0.782$.

Assim como no caso anterior, pode acontecer de um dos nós ficar “caro” no anel 2, isto é, com o aumento de λ , a soma dos limitantes inferiores para as demandas dos demais nós atingir $63 - 5.92 = 57.08$. Analisando as combinações possíveis, verifica-se que para $\lambda = 0.782$ o nó 20 é “expulso” do anel. Como não há outro anel que possa atendê-lo, ele passa a ser totalmente servido por equipamentos HDSL.

Novas transições, então, acontecem para $\lambda = 0.782$ (custo 14.4333), $\lambda = 0.800$ (custo 14.46) e $\lambda = 0.968$ (custo 14.6595), conforme calculado (Figura 5-17, Figura 5-18 e Figura 5-19, respectivamente).

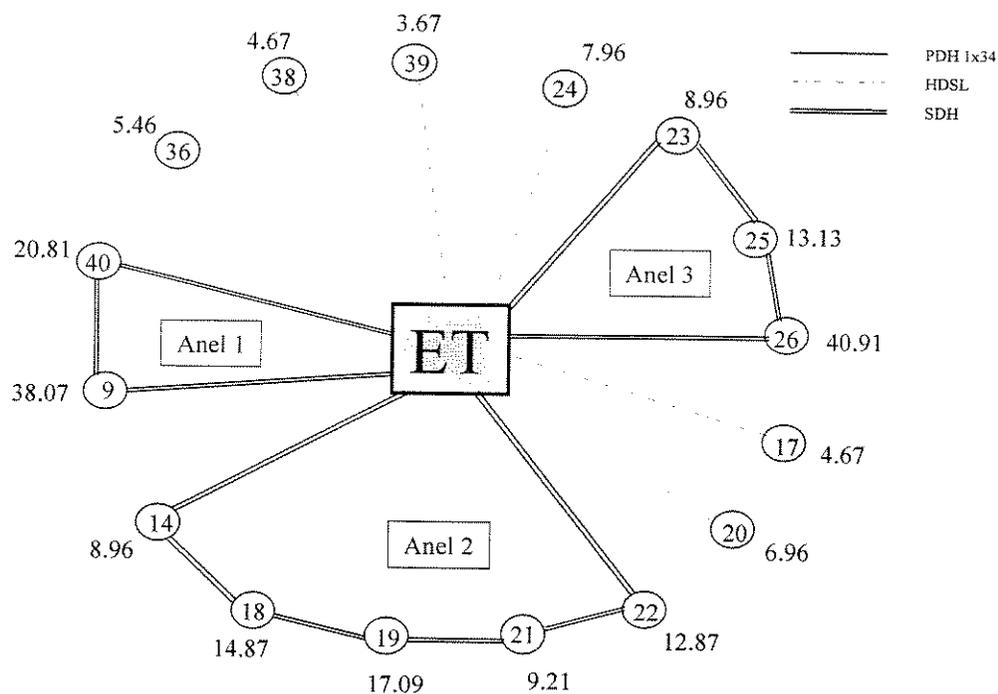


Figura 5-17. Topologia para $0.782 \leq \lambda \leq 0.800$.

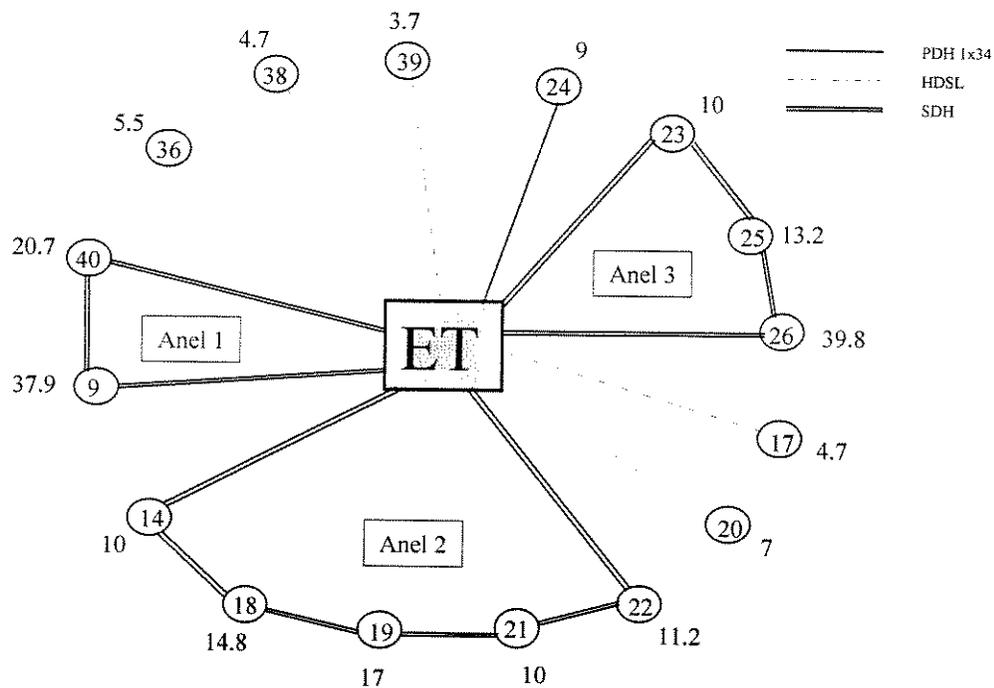


Figura 5-18. Topologia para $0.800 \leq \lambda \leq 0.968$.

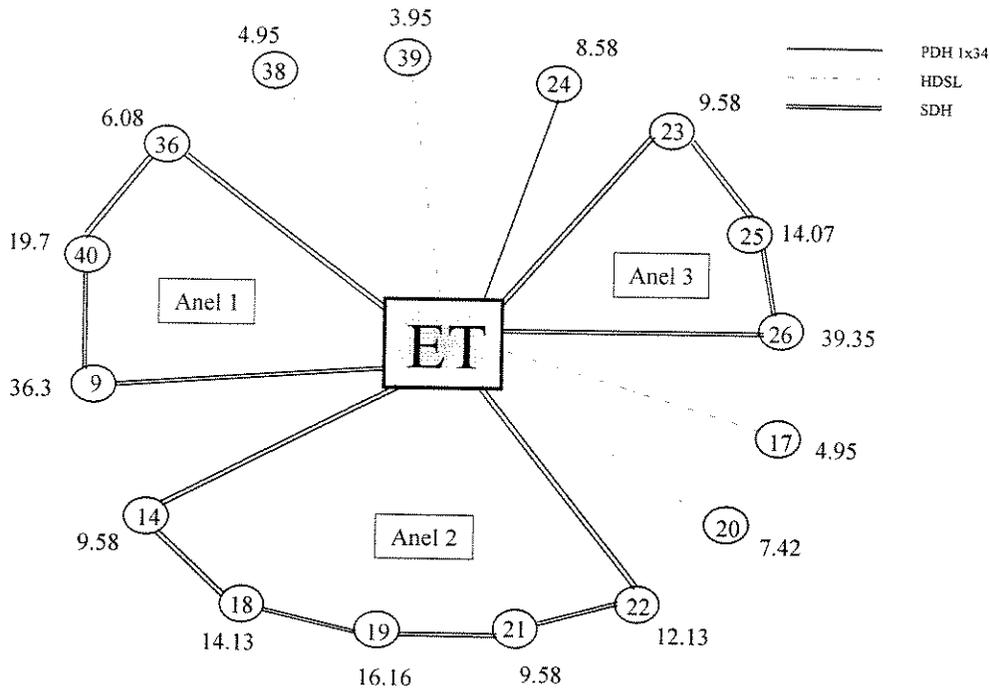


Figura 5-19. Topologia para $0.968 \leq \lambda \leq 1$.

Finalmente, a solução para $\lambda=1$ tem custo 14.6875, com a mesma topologia da Figura 5-19 acima.

Assim como no exemplo anterior (equivalente paramétrico de Adamo), a variação de λ levou a transições na topologia da rede. Usando a notação estabelecida naquele exemplo, é possível anotar de forma sistemática as mudanças ocorridas, conforme demonstra a Tabela 5-10.

Tabela 5-10. Transições devidas a λ .

Faixa para λ	Transição	Custo para o menor λ
0.000 — 0.368	-	13.2500
0.368 — 0.600	B(20,2)	13.6870
0.600 — 0.690	A(24,3)	13.8900
0.690 — 0.732	D(24,3)	14.1947
0.732 — 0.782	A(20,2)	14.2439
0.782 — 0.800	D(20,2)	14.4333
0.800 — 0.968	E(24)	14.4600
0.968 — 1.000	B(36,1)	14.6595

Através desta análise obtém-se a evolução do custo em função de λ (Figura 5-20). Como esperado, o custo é crescente, devido à adição (incremental e proporcional à demanda) de equipamentos HDSL.

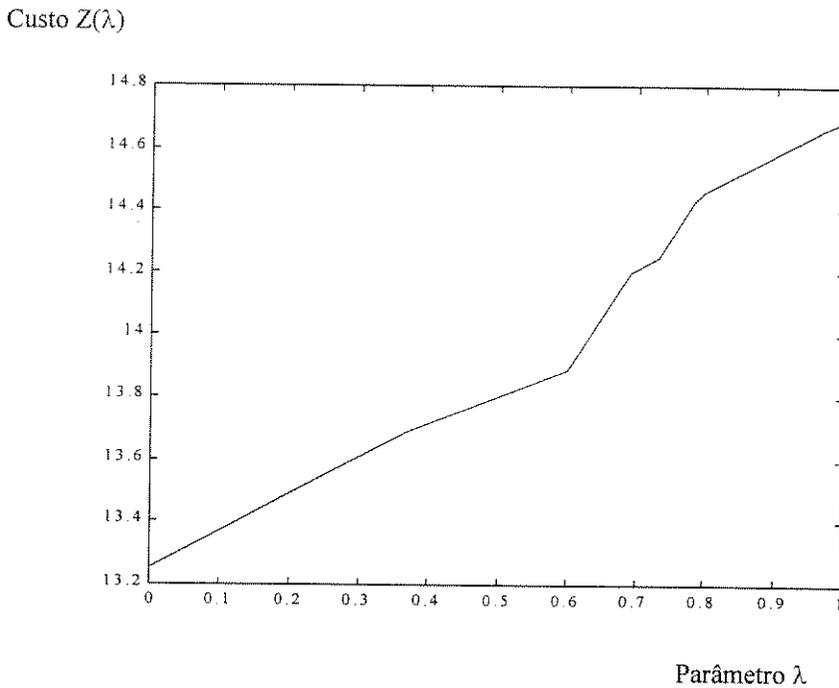


Figura 5-20. Variação de custo $Z(\lambda)$ com o parâmetro λ .

A Tabela 5-11 mostra, para cada transição, o papel das tecnologias tanto no atendimento à demanda quanto na composição do custo. Pode-se observar que os anéis SDH atendem a maioria da demanda, entre 84% (184.60/219.20) e 92% (187.00/202.57). O custo total devido aos sistemas SDH permanece entre 71% (10.26/14.46) e 86% (11.74/13.69), respectivamente. A quantidade de equipamentos HDSL também não é desprezível, variando de 8% (15.57/202.57) a 15% (33.39/218.27). Entretanto, esses equipamentos são proporcionalmente mais caros, com participação no custo total ficando entre 14% (1.95/13.69) e 29% (4.17/14.43).

Tabela 5-11. Participação de cada tecnologia.

		$\lambda = 0.000$	$\lambda = 0.368$	$\lambda = 0.600$	$\lambda = 0.690$	$\lambda = 0.732$	$\lambda = 0.782$	$\lambda = 0.800$	$\lambda = 0.968$	$\lambda = 1.000$
Custo	PDH	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00
	SDH	11.00	11.74	11.74	11.00	11.00	10.26	10.26	11.00	11.00
	HDSL	2.25	1.95	2.15	3.20	3.25	4.17	3.20	2.66	2.69
	Total	13.25	13.69	13.89	14.20	14.25	14.43	14.46	14.66	14.69
Demanda Atendida	PDH	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9.00	8.58	8.50
	SDH	187.00	187.00	186.80	185.94	185.55	184.88	184.60	186.66	185.00
	HDSL	18.00	15.57	17.20	25.58	25.96	33.39	25.60	21.27	21.50
	Total	205.00	202.57	204.00	211.52	211.51	218.27	219.20	216.51	215.00

Inspecionando simultaneamente a Figura 5-20 e a Tabela 5-11, verifica-se que o custo aumenta mais intensamente quando algum nó deixa um anel SDH e começa a usar apenas

equipamento HDSL (faixas $0.600 \leq \lambda \leq 0.690$ e $0.732 \leq \lambda \leq 0.782$). É possível concluir que, se houvesse outro anel SDH que pudesse atender aquele nó, então a evolução do custo seria mais suave. Portanto, em redes maiores, nas quais existem mais opções de instalação de anéis, o uso de HDSL pode ser menor, ficando restrito ao atendimento de pequenas demandas.

Pode ser também de interesse do planejador saber quanta demanda a solução (topologia) pode atender ao mesmo custo. A Tabela 5-12 apresenta, para cada topologia, a soma das capacidades dos equipamentos, ladeada pela demanda efetivamente atendida. Devido ao critério adotado de minimização de custo e à permissão de valores não-inteiros para as demandas, sempre há pouca folga, em torno de 1%. A folga somente aumenta para 5% quando equipamentos PDH são utilizados ($0.732 \leq \lambda \leq 1$).

Tabela 5-12. Demanda total atendida *versus* soma das capacidades dos equipamentos.

λ	Demanda Total Atendida	Capacidade Total dos Equipamentos
0.000	205.00	207.00
0.368	202.57	204.57
0.600	204.00	206.20
0.690	211.52	214.58
0.732	211.51	214.96
0.782	218.27	222.39
0.800	219.20	230.60
0.968	216.51	226.27
1.000	215.00	226.50

O estudo acima tomou por base o equivalente de Adamo. Outros equivalentes, como o de Yager-3, podem ser utilizados, com resultados conceitualmente semelhantes. No entanto, para simplificar o processo de resolução e análise, é sempre desejável que o equivalente usado mantenha a característica linear do problema.

6. Conclusão

Neste capítulo foram apresentados modelos para o planejamento de redes de telecomunicações em situações nas quais existe incerteza sobre os valores adotados como demanda. As redes de acesso de assinantes com demandas iguais ou superiores a 2 Mbps, que admitem grande variedade de equipamentos e serviços, foram focalizadas. Assim como os seus correspondentes

“exatos”, os modelos permitem a competição entre tecnologias ópticas (PDH, SDH, etc.) e metálica (HDSL) e levam em conta as topologias inerentes a cada tecnologia.

Os modelos não mais exigem que o planejador estime valores exatos para os dados de demanda. Duas abordagens principais para a incorporação deste tipo de incerteza foram desenvolvidas. Com a primeira, os valores de demanda são informados sob a forma de intervalos fechados. A segunda utiliza números fuzzy. Neste caso, são fornecidas funções de pertinência; para resolver o problema matemático, equivalentes não-fuzzy ou paramétricos são utilizados. Cada um dos diversos equivalentes aplicáveis modifica o problema original de maneira diferente, levando a modelos distintos.

O modelo usando usando números fuzzy foi aplicado ao planejamento de uma rede de médio porte. No exemplo, visou-se a minimização de custos, embora o modelo pudesse ser adaptado para admitir outros critérios. Mostrou-se que o uso de parâmetros permite análises importantes e torna possível prever variação de custos e mudanças de tecnologia e de topologia em função do comportamento da demanda. A análise paramétrica, embora complexa quando existem variáveis binárias no problema, é viável quando o planejador conhece a estrutura de custos e as características dos equipamentos a instalar.

Os resultados combinam as tecnologias PDH, SDH e HDSL. Com a estrutura de custos utilizada, a tecnologia SDH é dominante. O uso de HDSL, embora expressivo, é caro quando se considera sua participação no custo total.

CAPÍTULO 6

MÚLTIPLOS CRITÉRIOS, SOB INCERTEZA

1. Motivação

Os modelos até aqui apresentados têm, essencialmente, perseguido o planejamento otimizado da rede de acesso de acordo com um único objetivo, o custo mínimo. Entretanto, os sistemas de telecomunicações por vezes apresentam situações em que o custo não é o único fator de análise. Outros critérios podem ser usados em conjunto com o custo e, dependendo das circunstâncias, são até mais interessantes para o planejador. Como já se comentou, a receita auferida pelos serviços prestados é um critério relevante. O nível de atendimento (percentual da demanda que é efetivamente atendida) proporcionado pela solução de rede adotada é também um bom indicador da qualidade do plano. Podem ainda ser citados a demanda protegida e a folga total dos equipamentos.

Por sua vez, a existência de múltiplos critérios exige metodologias apropriadas para a resolução dos problemas matemáticos correspondentes. Além de metodologias clássicas, tais como o uso de pesos ou de funções de utilidade, pode-se recorrer a outras que se baseiam no conceito de conjuntos fuzzy. A opção pela metodologia a aplicar depende do planejador e das características dos objetivos perseguidos.

Deve-se considerar também a existência de incertezas a respeito dos objetivos. A imprecisão de custos à época do planejamento, já considerada em outra parte deste trabalho, é um tipo de incerteza sobre os coeficientes que compõem a função-objetivo. Entretanto, pode haver outros tipos de incerteza. Por exemplo, quer-se respeitar um limitante de custo para a solução, mas se aceitam soluções que violem esse limitante até um certo ponto. Ou se quer garantir um percentual mínimo de demanda atendida, mas se toleram soluções que não atinjam completamente esse desígnio. Nestes casos, ao invés de imprecisão nos coeficientes, existe a necessidade de flexibilizar o respeito às restrições impostas (orçamento máximo e demanda mínima, respectivamente). Esta flexibilização é um ponto fraco das abordagens convencionais, em que o respeito a equações e inequações é estrito. São situações em que certamente o uso de conjuntos fuzzy é propício.

No que se segue, tomando por base a tarefa de planejar o atendimento óptico de grandes assinantes, são formulados modelos contendo mais de um objetivo. Para conduzir a apresentação, especificamente, contrapõem-se o critério de respeitar um limitante de orçamento e o de atender ao máximo de demanda possível. Dada a necessidade de flexibilização, estas diretrizes são em princípio colocadas como objetivos a serem atingidos e não como restrições a serem respeitadas. Ao problema é dispensado um tratamento baseado em conjuntos fuzzy.

O texto é organizado da seguinte maneira: a seção 2 contém uma revisão bibliográfica sobre o tratamento de problemas com múltiplos objetivos, particularmente usando conceitos de conjuntos fuzzy. Na seção 3 são desenvolvidos modelos para o planejamento do atendimento de grandes assinantes em que há mais de um objetivo. A seção 4 discute a existência de valores imprecisos para os coeficientes das expressões que caracterizam os objetivos, generalizando a abordagem.

2. Literatura

Metodologias para tratamento de problemas contendo múltiplos objetivos estão presentes na literatura há bastante tempo. O assunto ganhou força à medida que a evolução da Informática viabilizou a criação e teste de vários métodos. O trabalho de Hwang e Massud (1979) é talvez a melhor síntese das metodologias apresentadas até então. Outros autores, tais como Cohon (1978), Zeleny (1982) e Steuer (1986), podem ser lembrados como ativos participantes desse processo.

Já a aplicabilidade dos conjuntos fuzzy a processos de decisão como aqueles aqui tratados foi verificada primeiramente por Bellman e Zadeh (1970), que propuseram um tratamento simétrico para objetivos e restrições. De um ponto de vista específico, Zimmermann (1978) e Dyson (1980) documentaram a aplicabilidade de conjuntos fuzzy à modelagem e resolução de problemas lineares com múltiplos objetivos. Seu trabalho foi estendido por Werners (1987), dentre outros. Especificamente, uma extensão a problemas lineares com variáveis 0-1 foi apresentada por Zimmermann e Pollatschek (1984). O mesmo Zimmermann (1987) documenta detalhadamente o uso de conjuntos fuzzy em processos de decisão.

Embora existam inúmeros métodos documentados, os relatos de aplicações baseadas nos métodos acima não são muito comuns. Alves et alii (1995), bem como Romero e Yamakami (1996), resolvem problemas que lembram aqueles aqui tratados, usando também técnicas baseadas em conjuntos fuzzy.

Uma técnica alternativa de resolver problemas com vários objetivos é denominada *Goal Programming* (GP). Uma boa referência para o assunto é o livro de Ignizio (1976). Alguns dos métodos aqui mencionados são bastante similares a esta técnica. Um trabalho que relaciona conjuntos fuzzy e GP é o de Narasimhan (1980).

3. Múltiplos Objetivos no Atendimento de Grandes Assinantes

3.1. Tratamento fuzzy para problemas com múltiplos objetivos

Seja o problema 6-M0 abaixo formulado, com múltiplos objetivos.

Minimizar

$$\mathbf{Z} = \mathbf{C} \mathbf{x} \quad (6-1)$$

sujeito a:

$$\mathbf{A} \mathbf{x} \leq \mathbf{0} \quad (6-2)$$

$$\mathbf{B} \mathbf{x} \lesseqgtr \mathbf{0} \quad (6-3)$$

$$\mathbf{x} \geq \mathbf{0} \quad (6-4)$$

onde:

\mathbf{Z} - vetor de objetivos

\mathbf{C} - matriz de coeficientes dos objetivos

\mathbf{x} - vetor de variáveis de decisão

\mathbf{A} - matriz de coeficientes das restrições fortes

\mathbf{B} - matriz de coeficientes das restrições fracas

Genericamente, pode-se assumir que cada objetivo C_k deve atingir um valor-alvo, de modo que a qualidade do resultado está associada à distância de cada objetivo em relação ao seu respectivo valor-alvo. É natural encarar esse valor como uma restrição imposta, a qual pode ou não ser completamente atendida. Por outro lado, restrições originais B_j do problema eventualmente permitem também esta flexibilidade. Costuma-se dizer, neste caso, que estas são *restrições fracas* (as fortes, é claro, precisam ser inteiramente respeitadas). As restrições fracas estão anotadas no modelo 6-M0 pelo símbolo \lesseqgtr .

Se o objetivo atinge o alvo (ou a restrição fraca é completamente atendida), a *satisfação* é plena. Entretanto, a satisfação decresce à medida que o objetivo se afasta do alvo (ou a restrição deixa de ser atendida). Neste sentido, objetivos e restrições fracas têm tratamento similar (ou *simétrico*). A Figura 6-1 ilustra a idéia de satisfação associada a uma restrição fraca do tipo $\lesseqgtr F$ (ou objetivo a ser minimizado com valor-alvo F). Na figura, o eixo horizontal mede a realização do objetivo ou restrição fraca, e o eixo vertical fornece a satisfação associada a essa realização. Estipula-se uma *tolerância* t para a realização da restrição fraca (ou objetivo). Qualquer valor entre F e $(F+t)$ é aceito, mas a satisfação decresce com o afastamento em relação a F . O decréscimo pode seguir qualquer regra (na figura, é linear).

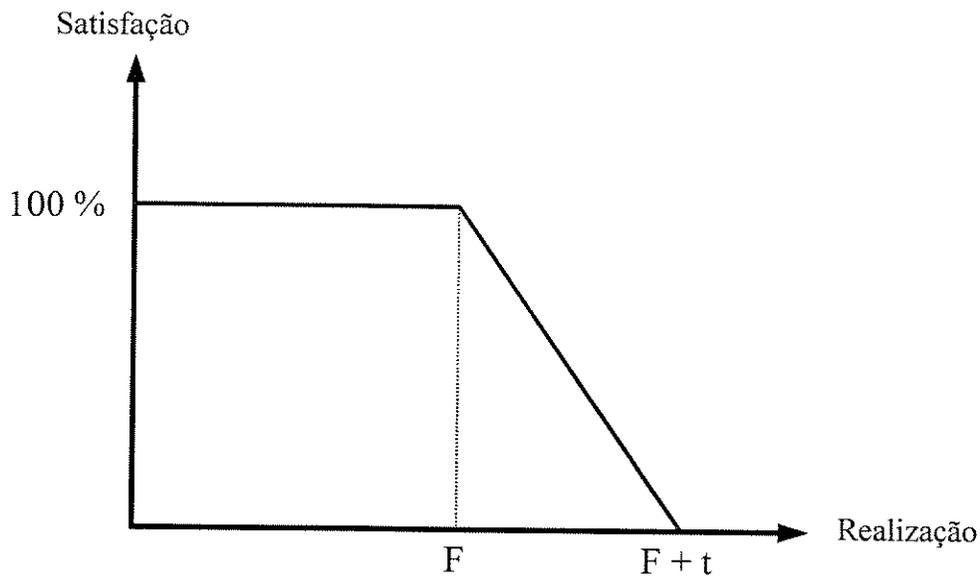


Figura 6-1. Conceito de satisfação.

Bellman e Zadeh (1970) usaram conjuntos fuzzy para modelar objetivos e restrições fracas. Tanto objetivos como restrições fracas foram tratados de maneira simétrica. Os valores assumidos pelo lado esquerdo de cada inequação constituíram um conjunto fuzzy cuja função de pertinência mensurava a satisfação associada à inequação. A medida da satisfação simultânea (todos os objetivos e restrições fracas) era a interseção entre todos os conjuntos fuzzy, obtida pela aplicação, por exemplo, do operador *min*. A satisfação simultânea tornava-se portanto o objetivo global do problema, a ser maximizado.

Zimmermann (1978) apresentou a mesma idéia, especializada a problemas lineares. Para isso, trabalhou com funções de pertinência como as da Figura 6-1, em que a satisfação decai linearmente com o afastamento do alvo.

3.2. Modelo para atendimento de grandes assinantes

O modelo 3-M1, já apresentado, busca minimizar o custo total dos equipamentos, considerando as restrições de demanda, de capacidade e tecnologia de transmissão dos equipamentos, assim como a topologia da rede. A existência de outros critérios de otimização do planejamento pode levar a modificações nesse modelo, como também já se discutiu. Incertezas sobre os valores de custos e de demanda oferecida foram também tratadas. Entretanto, outro tipo de situação pode ocorrer: a necessidade de uma decisão que envolva compromisso entre dois ou mais critérios

(conflitantes). Neste caso, não se pode exigir que todos os critérios sejam completamente realizados, o que leva a uma diminuição da satisfação geral. Adicionalmente, pode haver necessidade de flexibilizar algumas das restrições, para que o plano seja viável. Isto não significa ignorar tais restrições, mas sim permitir que elas não sejam completamente respeitadas.

Sob este tipo de situação, o modelo 3-M1 precisa ser modificado. Para simplificar a exposição, somente serão abordados dois aspectos de flexibilização: o atendimento à demanda e o respeito ao orçamento disponível para a instalação dos equipamentos. Em geral, o planejador tem diante de si uma difícil decisão: atender seus usuários da melhor forma possível sem violar o orçamento de que dispõe. Numa formulação convencional (“exata”), existe um limitante para o custo, que não pode ser ultrapassado; existem as restrições de atendimento da demanda, que devem ser respeitadas. O modelo é rígido, e nem sempre se encontram soluções viáveis.

Uma interpretação para a flexibilização aqui proposta pode ser a seguinte:

- a) existe um limite para o custo da solução, embora um excedente de t_{BUD} unidades monetárias seja tolerado; e
- b) garante-se um número mínimo de assinantes atendidos, mas permitem-se soluções que deixam de atender até t_{CHA} canais em cada nó da rede.

Sob esta interpretação, o problema apresenta um objetivo (o custo) com um valor-alvo (o orçamento), além de restrições fracas (o atendimento da demanda em cada nó). Tanto ao objetivo como às restrições fracas se associam tolerâncias (t_{BUD} e t_{CHA} , respectivamente). Já as restrições de capacidade instalada em cada arco da rede não são afetadas. Estas restrições devem ser respeitadas com rigor (são restrições fortes).

Quer-se agora obter uma solução que proporcione máxima satisfação. A satisfação está associada a:

- a) não violar as restrições ditas fracas (escoamento da demanda oferecida em cada nó): neste caso, o atendimento pleno da demanda corresponde a grau de satisfação igual a 1 (isto é, 100%). Quando a restrição é violada (atendimento incompleto), o grau de satisfação diminui, fazendo-se uso da tolerância t_{CHA} . Se toda a tolerância é esgotada (ou seja, chega-se ao limite mínimo de atendimento da demanda naquele nó), a satisfação é nula.
- b) respeitar o limitante da função objetivo do modelo “exato” 3-M1 (custo): por simetria, o objetivo é encarado como sendo mais uma restrição fraca. Quando o orçamento é completamente respeitado, a satisfação é plena. Caso contrário, faz-se uso da tolerância t_{BUD} , isto é, gasta-se mais do que pode. Quando a tolerância se esgota, a satisfação fica nula.

De qualquer forma, a violação nunca poderá exceder as tolerâncias estabelecidas.

Assim, o objetivo (custo) originalmente apresentado no modelo 3-M1 é agora representado pela restrição fraca:

$$\sum_{(i,j) \in A} \sum_{n \in N_{ij}} C_{ijn} X_{ijn} + \sum_{m \in M} C_m W_m + \sum_{h \in H} C_h S_h \lesssim V \quad (6-5)$$

onde, além do que já foi definido em 3-M1, tem-se:

V - limitante de orçamento (valor-alvo da função-objetivo).

Cada equação de escoamento da demanda torna-se:

$$\sum_{j \in J1} y_{ij} - \sum_{j \in J2} y_{ji} - d_i \gtrsim 0, \quad \forall i \in I \quad (6-6)$$

Todas as demais inequações componentes do modelo 3-M1 continuam as mesmas, pois são restrições fortes (capacidade dos equipamentos e instalação de unidades remotas).

Situações do tipo acima podem ser convenientemente modeladas através da criação de conjuntos fuzzy. Voltando à Figura 6-1, pode-se pensar da seguinte maneira: os valores associados à realização (isto é, ao lado esquerdo) da restrição fraca ou objetivo são elementos de um conjunto fuzzy cuja função de pertinência é expressa pela Figura 6-1. Os elementos de máxima pertinência (igual a 1) têm valor inferior ou igual a F. A pertinência diminui à medida que a realização é maior que F mas não supera (F+t). Evidentemente, neste contexto satisfação e pertinência são a mesma coisa.

A Figura 6-2 apresenta as funções de pertinência dos conjuntos fuzzy associados ao custo e às restrições de atendimento da demanda para o problema aqui tratado.

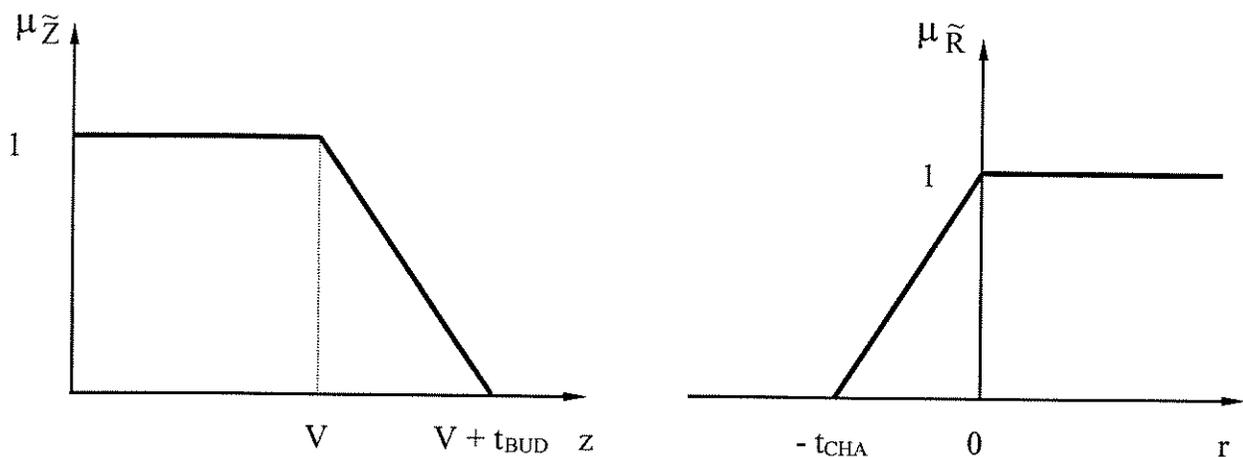


Figura 6-2. Funções de pertinência para inequações do tipo $Z \lesssim V$ e do tipo $R \gtrsim 0$.

Formalmente, estas funções de pertinência podem ser expressas por:

$$\mu_{\bar{z}}(z) = \begin{cases} 1, & \text{se } z < V \\ \frac{(V + t_{BUD}) - z}{t_{BUD}}, & \text{se } V \leq z \leq (V + t_{BUD}) \\ 0, & \text{se } z > (V + t_{BUD}) \end{cases} \quad (6-7)$$

e

$$\mu_{\bar{r}}(r) = \begin{cases} 0, & \text{se } r < (-t_{CHA}) \\ \frac{r + t_{CHA}}{t_{CHA}}, & \text{se } (-t_{CHA}) \leq r \leq 0 \\ 1, & \text{se } r > 0 \end{cases} \quad (6-8)$$

Seguindo a abordagem apresentada em Zimmermann (1978), e adotando as funções de pertinência da Figura 6-2 e expressões (6-7) e (6-8), obtém-se um modelo equivalente para o problema, denominado 6-M1, que é voltado a maximizar a satisfação f :

Maximizar

f

sujeito a:

$$f \leq 1 - \left(\sum_{(i,j) \in A} \sum_{n \in N_{ij}} c_{ijn} x_{ijn} + \sum_{m \in M} c_m w_m + \sum_{h \in H} c_h s_h - V \right) / t_{BUD} \quad (6-9)$$

$$f \leq 1 - \left(-\sum_{j \in J1} y_{ij} + \sum_{j \in J2} y_{ji} + d_i \right) / t_{CHA}, \quad \forall i \in I \quad (6-10)$$

$$\sum_{n \in N_{ij}} \text{Cap}_n x_{ijn} \geq y_{ij} \geq 0, \quad \forall (i,j) \in A-D \quad (6-11)$$

$$w_m - x_{lmn} \geq 0, \quad \forall n \in N_{lm}, \quad \forall l \in J2 \quad (6-12)$$

$$\sum_{n \in N_{h0}} \text{Cap}_n x_{h0n} + s_h \geq y_{h0} \geq 0, \quad \forall h \in H \quad (6-13)$$

$$0 \leq f \leq 1 \quad (6-14)$$

Essa formulação tem também a estrutura de um problema linear misto com variáveis 0-1. Deve-se observar que as restrições (6-11), (6-12) e (6-13) continuam as mesmas (são fortes).

Quando se trabalha com a repressão total da demanda e não com a repressão individualizada em cada nó, outro modelo pode ser obtido. Para tanto, define-se a variável y_{iR} (não-negativa) para representar a demanda reprimida em cada nó i :

$$\sum_{j \in J1} y_{ij} - \sum_{j \in J2} y_{ji} + y_{iR} = d_i \quad (6-15)$$

De acordo com esta interpretação, a satisfação do planejador é maior à medida que se minimiza a repressão total de demanda. Isto é, garante-se um total mínimo de assinantes atendidos, mas são permitidas soluções cuja demanda reprimida não exceda T_{CHA} , considerados todos os nós. O respeito ao orçamento, é claro, continua sendo desejado.

Neste novo modelo, denominado 6-M2, as restrições (6-10) são substituídas por:

$$f \leq 1 - (\sum_{i \in I} y_{iR}) / T_{CHA} \quad (6-16)$$

$$\sum_{j \in J1} y_{ij} - \sum_{j \in J2} y_{ji} + y_{iR} = d_i, \quad \forall i \in I \quad (6-17)$$

$$0 \leq y_{iR} \leq d_i, \quad \forall i \in I \quad (6-18)$$

O objetivo em 6-M2, assim como as demais restrições, continuam idênticas ao disposto no modelo 6-M1.

O objetivo do modelo 6-M2 pode ainda ser re-escrito para identificar explicitamente a fonte de satisfação (respeito ao orçamento ou atendimento da maior demanda possível). Essa modificação dá origem ao seguinte modelo, denominado 6-M3 e agora escrito na íntegra:

Maximizar [Mín (f_{BUD} , f_{CHA})]

sujeito a:

$$f_{BUD} \leq 1 - (\sum_{(i,j) \in A} \sum_{n \in N_{ij}} C_{ijn} X_{ijn} + \sum_{m \in M} C_m W_m + \sum_{h \in H} C_h S_h - V) / t_{BUD} \quad (6-19)$$

$$f_{CHA} \leq 1 - (\sum_{i \in I} y_{iR}) / T_{CHA} \quad (6-20)$$

$$\sum_{j \in J1} y_{ij} - \sum_{j \in J2} y_{ji} + y_{iR} = d_i, \quad \forall i \in I \quad (6-17)$$

$$\sum_{n \in N_{ij}} Cap_n x_{ijn} \geq y_{ij} \geq 0, \quad \forall (i,j) \in A-D \quad (6-11)$$

$$w_m - x_{lmn} \geq 0, \quad \forall n \in N_{lm}, \quad \forall l \in J2 \quad (6-12)$$

$$\sum_{n \in N_{h0}} Cap_n x_{h0n} + s_h \geq y_{h0} \geq 0, \quad \forall h \in H \quad (6-13)$$

$$0 \leq y_{iR} \leq d_i, \quad \forall i \in I \quad (6-18)$$

$$0 \leq f_{BUD} \leq 1 \quad (6-21)$$

$$0 \leq f_{CHA} \leq 1 \quad (6-22)$$

Essa mesma análise é aplicável ao modelo 6-M1. Deve-se enfatizar que esses modelos ficam mais atraentes quando as tolerâncias t_{CHA} são individualizadas, de maneira a poder variar de acordo com o nó. Assim torna-se possível representar situações em que existem usuários com maior ou menor prioridade de atendimento, sem esforço matemático adicional.

3.3. Aplicação

Carlson et alii (1996,1997a) apresentam uma aplicação dos modelos acima desenvolvidos.

Cenário-referência

A rede utilizada corresponde à área de uma estação com 22 nós (grandes assinantes), totalizando uma demanda de 150 canais de 2 Mbps. Somente as tecnologias SDH e PDH são consideradas. Adotando como referência o custo de um sistema PDH de 34 Mbps, a Tabela 6-1 apresenta os custos relativos e capacidades (em canais de 2 Mbps) de cada equipamento (OLTM significa *Optical Line Terminal Multiplexer*).

Tabela 6-1. Dados dos equipamentos.

Equipamento/Tecnologia	Capacidade	Custo Relativo
1 x 34 Mbps (PDH)	16	1.00
2 x 34 Mbps (PDH)	32	1.90
OLTM 21 (SDH)	21	2.18
OLTM 42 (SDH)	42	2.45
OLTM 63 (SDH)	63	2.73
ADM 21 portas (SDH)	21	1.23
ADM 42 portas (SDH)	42	1.36
ADM 63 portas (SDH)	63	1.50

A Figura 6-3 traz a rede lógica considerada, a demanda de cada nó em canais de 2 Mbps e exemplos de sistemas candidatos. Candidatos ponto-a-ponto (estrela simples) são oferecidos a todos os nós; entretanto, eles não são exibidos para não sobrecarregar a figura.

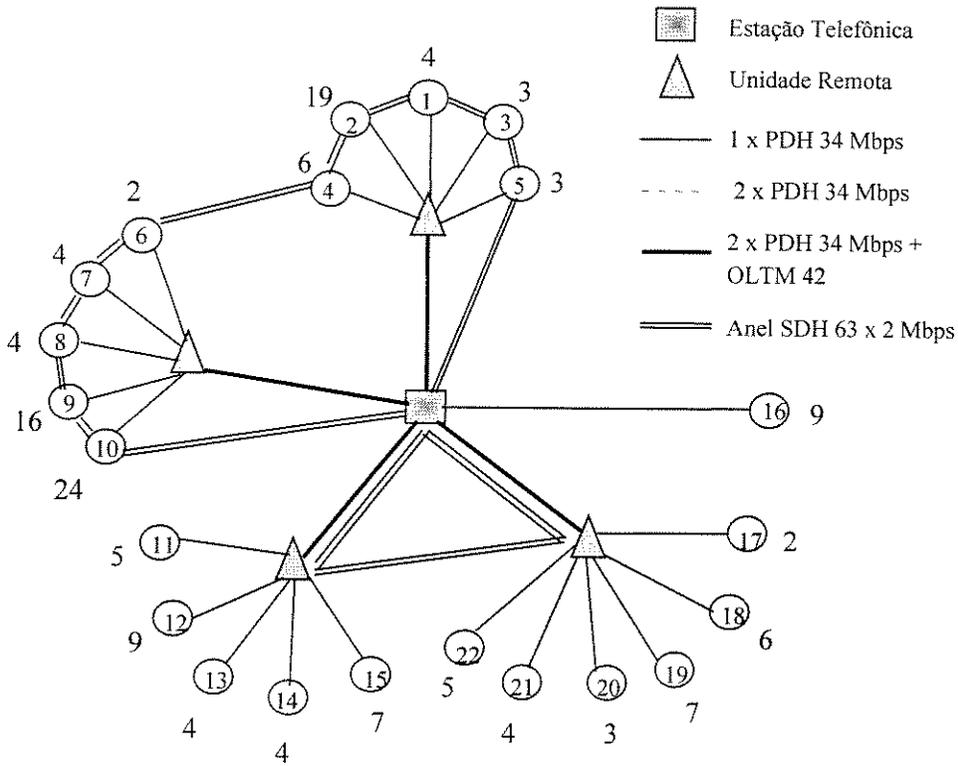


Figura 6-3. Rede-exemplo e sistemas candidatos.

A Figura 6-4 apresenta a solução para o cenário-referência, no qual se assumem orçamento livre e obrigação de atender toda a demanda. Esta solução, obtida pela aplicação do modelo “exato” (não-nebuloso) 3-M0, provém do trabalho de Formigoni (1995). Verifica-se que a estrutura de custos utilizada privilegia os sistemas PDH. O custo total da solução é de 23.80 unidades monetárias.

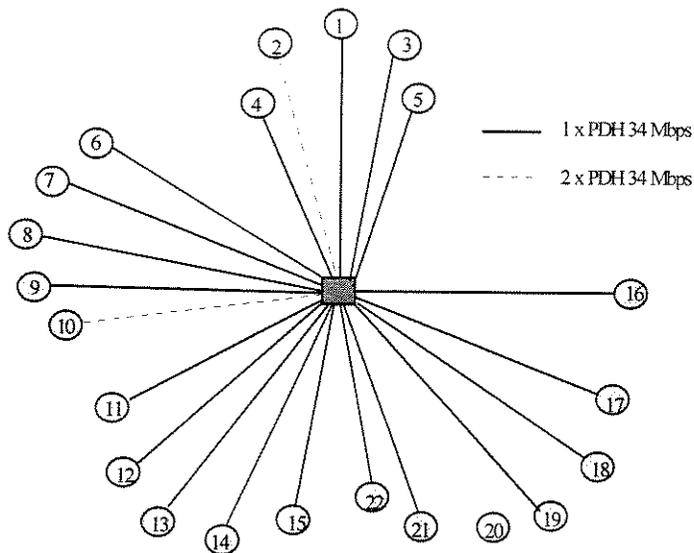


Figura 6-4. Solução para o cenário-referência.

Estudo com topologia estrela simples

Partindo do cenário-referência, o orçamento disponível é gradualmente restringido. São mostrados aqui os resultados devidos ao modelo 6-M3 com as seguintes tolerâncias: $t_{BUD} = 5.0$ e $T_{CHA} = 20$. Por simplicidade, o mesmo T_{CHA} é mantido sob qualquer orçamento, mas essa tolerância também pode mudar. A Tabela 6-2 apresenta o resultado da variação de orçamento de 23.00 unidades até 11.90 unidades (o limite de factibilidade com estes valores).

Tabela 6-2. Resultados devidos à variação de orçamento.

Orçamento	Custo	f_{BUD}	f_{CHA}	Atendimento
Livre	23.80	1.00	1.00	150
23.00	22.80	1.00	0.90	148
22.00	21.80	1.00	0.80	146
21.00	20.80	1.00	0.65	143
20.00	19.80	1.00	0.50	140
19.00	18.80	1.00	0.35	137
18.00	17.90	1.00	0.20	134
17.00	17.90	0.82	0.20	134
16.00	17.90	0.62	0.20	134
15.00	16.90	0.62	0.00	130
14.00	16.90	0.42	0.00	130
13.00	16.90	0.22	0.00	130
12.00	16.90	0.02	0.00	130
11.90	16.90	0.00	0.00	130

Na Figura 6-5, que documenta essa variação, os números entre parênteses indicam o orçamento em cada situação. Como se pode ver, alguns dos nós deixam de ser atendidos. Por exemplo, quando o orçamento é de 23.00 unidades, a demanda do nó 17 é reprimida. Acompanhando a diminuição do orçamento, deixam de ser atendidos os nós 6, 3, 5, 20, 2 (o qual tem seu equipamento trocado para um de menor capacidade) e 7.

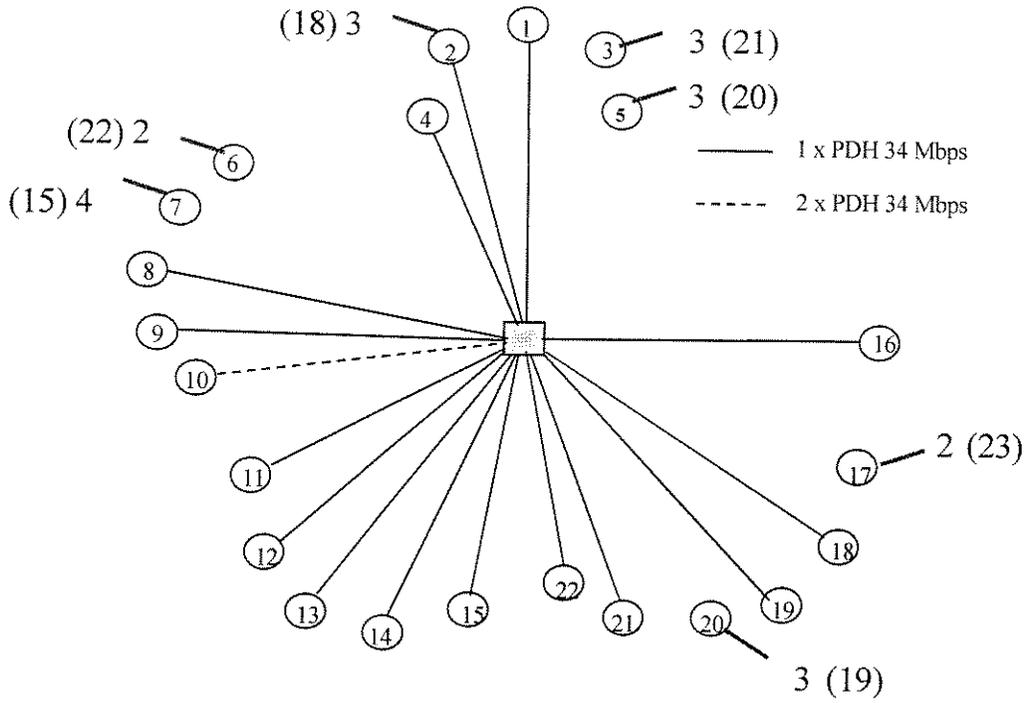


Figura 6-5. Resultados com topologia estrela simples.

A Figura 6-6 indica como a satisfação decresce com o aperto do orçamento.

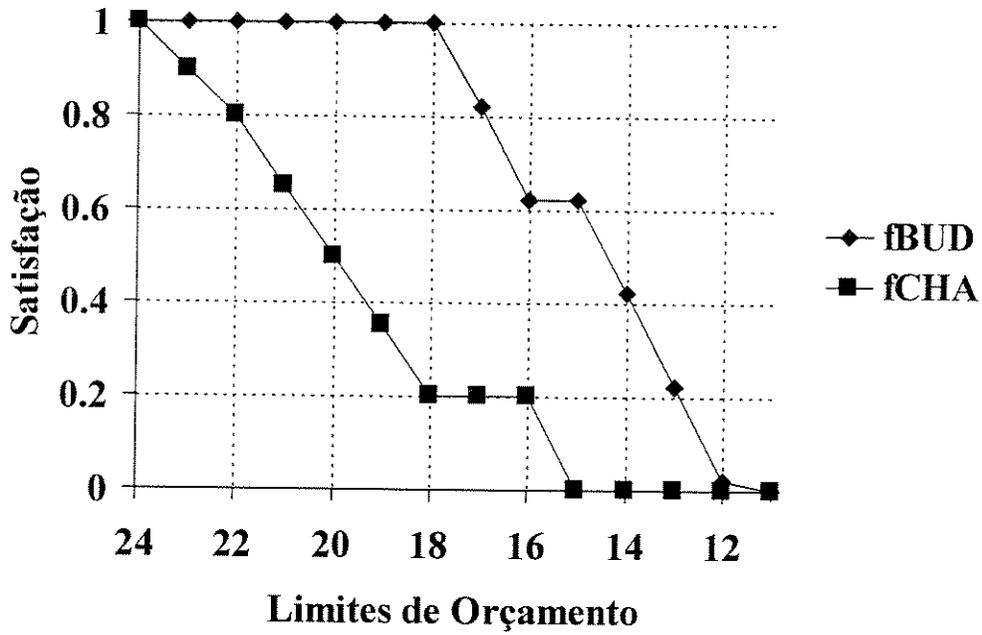


Figura 6-6. Variação da satisfação com o orçamento.

3.4. Melhorias

Verifica-se que a diminuição gradativa de orçamento forçou o não-atendimento de parte da demanda e que isso aconteceu de maneira controlada, procurando manter alto o nível de satisfação proporcionado. Devido à capacidade modular dos equipamentos, a retirada de um deles significa deixar de atender todo o nó (pois os valores de demanda são pequenos). Para atender 130 canais de demanda (corte de 13%, grau de satisfação $f_{CHA} = 0$) foi necessário gastar 16.90 unidades monetárias (corte de 29% em relação ao resultado do modelo “exato”).

Entretanto, deve-se observar que estes modelos, do tipo *max-min*, apresentam como característica o fato de que o resolvidor do problema linear pode ficar “preguiçoso”, no sentido de não tentar melhorar f_{BUD} (ou f_{CHA}) quando a satisfação é limitada por f_{CHA} (ou f_{BUD}). Isto é, pode haver soluções de mesma satisfação geral f que permitem melhorias em um ou mais de seus critérios individuais.

Esta característica pode ser contornada retirando-se o operador *min* e levando diretamente à função objetivo as satisfações individuais, possivelmente combinadas de acordo com a experiência ou o ambiente do planejador. Por exemplo, uma ponderação linear do tipo:

Maximizar

$$\alpha.f_{BUD} + \beta.f_{CHA} \quad (6-23)$$

No caso acima descrito, houve ponderação uniforme das satisfações, isto é, $\alpha = \beta$. Esta situação será chamada de *caso 1*.

Pode-se estudar outra situação, em que $\alpha = \beta/2$ (*caso 2*). A Tabela 6-3 e a Figura 6-7 apresentam os resultados para este caso.

Tabela 6-3. Resultados devidos à variação de orçamento (caso 2).

Orçamento	Custo	f_{BUD}	f_{CHA}	Atendimento
Livre	23.80	1.00	1.00	150
23.00	23.80	0.84	1.00	150
22.00	23.80	0.64	1.00	150
21.00	23.80	0.44	1.00	150
20.00	23.80	0.24	1.00	150
19.00	23.80	0.04	1.00	150
18.00	22.80	0.04	0.90	148
17.00	21.80	0.04	0.80	146
16.00	20.80	0.04	0.65	143
15.00	19.80	0.04	0.50	140
14.00	18.80	0.04	0.35	137
13.00	17.90	0.02	0.20	134
12.00	16.90	0.02	0.00	130
11.90	16.90	0.00	0.00	130

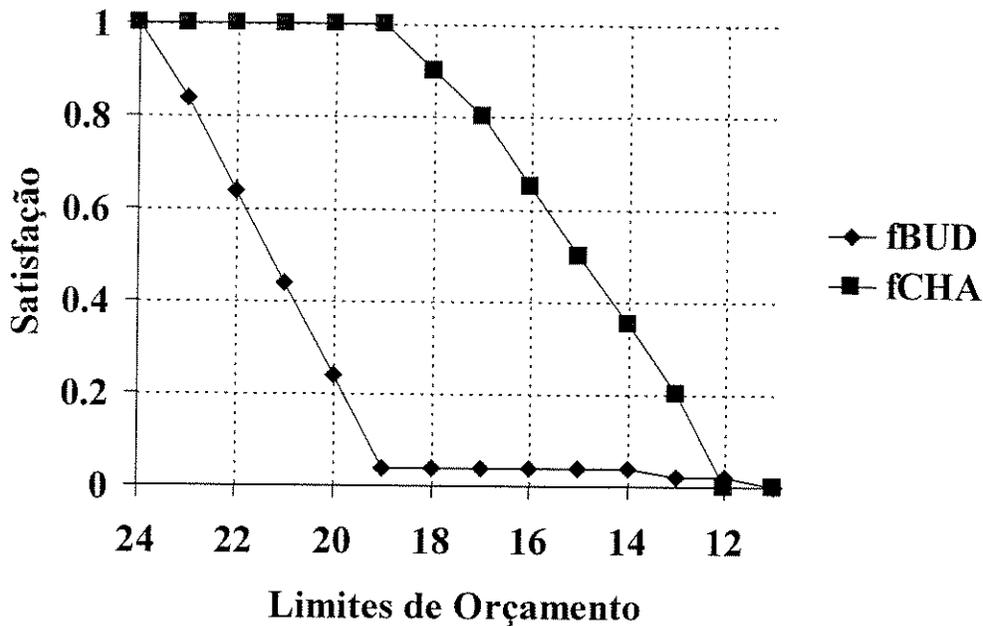


Figura 6-7. Variação da satisfação com o orçamento (caso 2).

Os resultados obtidos são coerentes e têm alto significado prático:

a) no caso 1, quando o objetivo é proporcional a

$$f_{BUD} + f_{CHA} ,$$

a diminuição gradativa do orçamento acarreta um corte de demanda bastante expressivo; isto é, em condições ótimas ocorre

$$f_{BUD} \geq f_{CHA} .$$

Além disto, no intervalo $15.00 \geq V \geq 11.90$ a solução é sempre a mesma: atender a demanda no mínimo (130 canais de 2 Mbps e satisfação $f_{CHA} = 0$) gastando 16.90 unidades monetárias. Na realidade a diminuição de V é compensada pelo uso crescente da tolerância de orçamento, o que acarreta queda em f_{BUD} . Em outras palavras, sacrifica-se o atendimento à demanda em nome da satisfação total.

b) no caso 2, aumentando a importância relativa do atendimento à demanda, usando o objetivo proporcional a

$$f_{BUD} + 2.f_{CHA} ,$$

verifica-se que

$$f_{CHA} (\text{caso 2}) \geq f_{CHA} (\text{caso 1}) \quad e$$

$$f_{BUD} (\text{caso 1}) \geq f_{BUD} (\text{caso 2}),$$

resultado facilmente interpretado à luz da importância relativa das parcelas da função objetivo. Neste caso 2 há também outro aspecto interessante a relatar. No intervalo $19.00 \geq V \geq 11.90$, a otimização permite depreender o seguinte *guideline*: gastar o máximo ($f_{BUD} \cong 0$) e cortar o mínimo em demanda.

Estudo com topologia anel-estrela

Como a tendência atualmente verificada para os equipamentos SDH é de queda nos preços, a ponto de competir com o dos equipamentos PDH e viabilizar o uso de anéis, é conduzido um estudo no qual os custos dos equipamentos SDH reduzem-se em 30% em relação àqueles da Tabela 6-1. Assim, os equipamentos ADM-21, ADM-42 e ADM-63 custam, respectivamente, 0.86, 0.95 e 1.05 unidades monetárias. Sob estas condições, muitos dos nós podem escolher entre escoar sua demanda por tecnologia PDH ou entregá-la a um anel unidirecional SDH.

A Tabela 6-4 apresenta os anéis candidatos à implantação.

Tabela 6-4. Anéis SDH candidatos.

Anel	Nós candidatos
1	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10
2	11,12,13,14,15,17,18,19,20,21,22

O cenário-referência para este caso (custo 21.53) é visto na Figura 6-8.

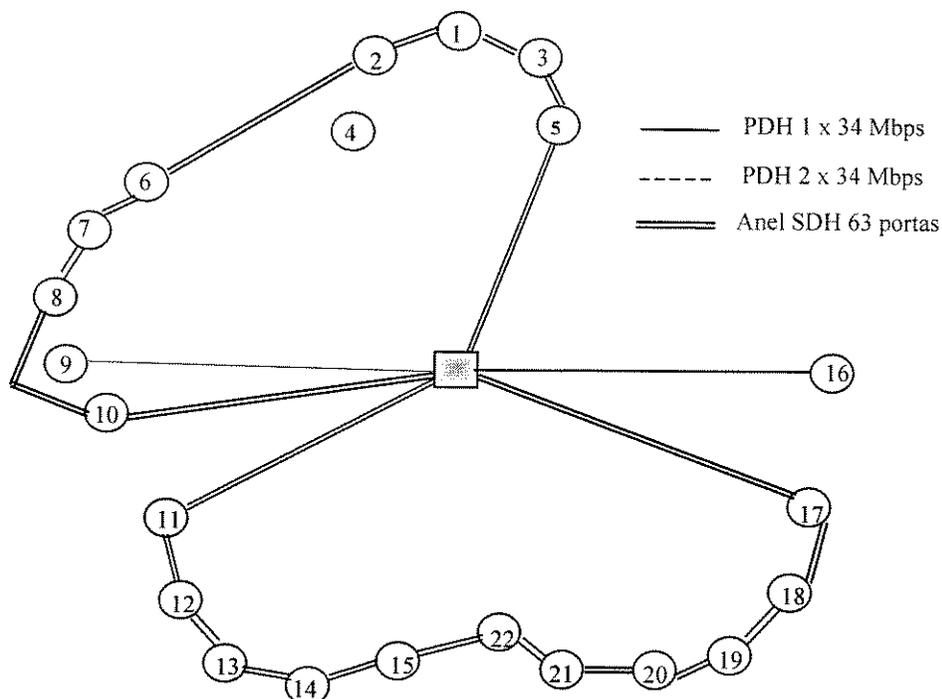


Figura 6-8. Cenário-referência para o estudo com topologia anel-estrela.

Assim como no caso anterior, o modelo 6-M3 é utilizado, submetendo o planejamento à restrição gradual de orçamento. A Tabela 6-5 apresenta o resultado para o aperto do orçamento. São indicados os nós que deixaram de ser atendidos para os diversos orçamentos intermediários. Deve-se observar que existem soluções múltiplas.

Tabela 6-5. Resultados devidos à variação de orçamento (anel-estrela).

Orçamento	Custo	f_{BUD}	f_{CHA}	Atendimento	Nó preterido
Livre	21.53	1.00	1.00	150	-
21.00	20.81	1.00	0.90	148	6
20.00	23.80	0.87	0.90	148	
19.00	23.80	0.84	0.80	146	17
18.00	22.80	0.81	0.65	143	20
17.00	21.80	0.61	0.65	143	
16.00	20.80	0.61	0.50	140	5
15.00	19.80	0.41	0.50	140	
14.00	18.80	0.38	0.35	137	3
13.00	17.90	0.18	0.35	137	
12.00	16.90	0.15	0.15	133	14
11.90	16.90	0.00	0.00	130	

A Figura 6-9 mostra os valores de satisfação para uma função objetivo alternativa que visa evitar a preponderância de f_{BUD} sobre f_{CHA} e vice-versa:

Maximizar

$$\alpha \cdot f_{BUD} + \beta \cdot f_{CHA} + 2 \cdot \min(f_{BUD}, f_{CHA}) \quad (6-24)$$

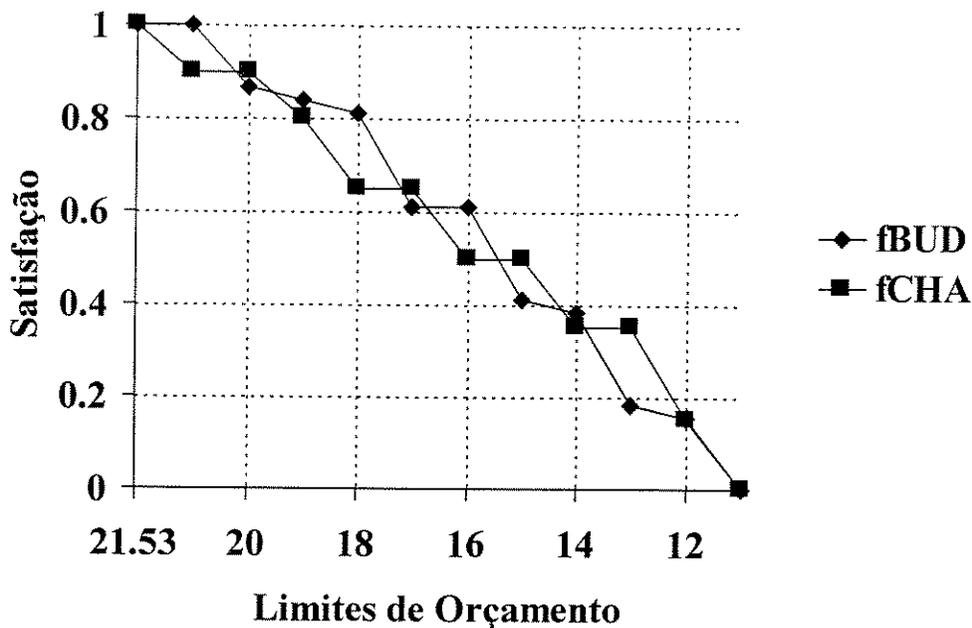


Figura 6-9. Variação da satisfação com o orçamento.

4. Incerteza a Respeito de Custos e/ou Demandas

O desenvolvimento anterior baseia-se na idéia de associar um conjunto fuzzy à restrição fraca (ou objetivo). Assume, também, que os coeficientes das expressões são todos precisamente conhecidos. Entretanto, isto nem sempre é verdadeiro. Como já se viu nos capítulos anteriores, pode haver incerteza a respeito dos valores utilizados para custos e/ou demandas.

4.1. Tratamento fuzzy

Delgado et alii (1989) abordam esta questão. Nesse trabalho, os autores propõem uma formulação e uma maneira genérica de resolver o problema de programação linear em que tanto os coeficientes como as (in)equações são fuzzy. Esta abordagem já foi aqui discutida (capítulo 5). Basicamente, consiste em eliminar a (in)equação fuzzy através do uso de uma tolerância. Assim, o problema reduz-se a uma comparação entre números fuzzy, tarefa para a qual existem diversos métodos documentados.

Genericamente, tem-se uma inequação qualquer:

$$\tilde{A}x < \tilde{B} + \tilde{T}(1 - \lambda) , \quad (6-25)$$

com $\lambda \in (0,1]$, onde $\tilde{A} = (\underline{a}, A, \bar{a})$, $\tilde{B} = (\underline{b}, B, \bar{b})$ e $\tilde{T} = (\underline{t}, T, \bar{t})$ são números fuzzy triangulares e $<$ é qualquer relação entre números fuzzy (que será, depois, substituído por qualquer método de comparação entre números fuzzy).

Esta inequação é substituída por métodos de comparação entre números fuzzy. Usando funções de ranking, por exemplo, tem-se:

$$f(\tilde{A})x \leq f(\tilde{B}) + f(\tilde{T})(1 - \lambda) , \quad (6-26)$$

com $\lambda \in (0,1]$.

Se no problema tratado os custos, bem como o orçamento, são números fuzzy triangulares, (6-5) é representado por:

$$\sum_{(i,j) \in A} \sum_{n \in N_{ij}} \tilde{c}_{ijn} X_{ijn} + \sum_{m \in M} \tilde{c}_m W_m + \sum_{h \in H} \tilde{c}_h S_h \leq \tilde{V} . \quad (6-27)$$

Se a demanda em um nó i é também um número fuzzy triangular, (6-6) torna-se:

$$\sum_{j \in J1} y_{ij} - \sum_{j \in J2} y_{ji} - \tilde{d}_i \geq 0 . \quad (6-28)$$

Tomando como método de comparação a função Yager-3, já apresentada, e assumindo tolerâncias convenientes para o orçamento e a demanda, as expressões (6-11) e (6-12) são substituídas respectivamente por:

$$\begin{aligned} & \sum_{(i,j) \in A} \sum_{n \in N_{ij}} (\underline{c}_{ijn} + \bar{c}_{ijn} + 2C_{ijn})x_{ijn} + \\ & \sum_{m \in M} (\underline{c}_m + \bar{c}_m + 2C_m)w_m + \\ & \sum_{h \in H} (\underline{c}_h + \bar{c}_h + 2C_h)s_h \leq (\underline{v} + \bar{v} + 2V) + (\underline{t}_v + \bar{t}_v + 2T_v)(1-\lambda) \end{aligned} \quad (6-29)$$

e

$$\sum_{j \in J1} y_{ij} - \sum_{j \in J2} y_{ji} - (\underline{d}_i + \bar{d}_i + 2D_i) \geq (\underline{t}_i + \bar{t}_i + 2T_i)(1-\lambda), \quad \forall i \in I \quad (6-30)$$

com $\lambda \in (0,1]$.

Outros métodos de comparação, como por exemplo o de Adamo, também podem ser usados. Campos e Verdegay (1989) listam as transformações aplicadas a problemas lineares quando se usam variados métodos de comparação entre números fuzzy. Cada método conduz a um problema equivalente, podendo assim fornecer visões diferenciadas a partir do modelo original.

4.2. Modelagem

De acordo com o exposto, um modelo denominado 6-M4, baseado em 6-M1 e usando o equivalente Yager-3, pode ser escrito da seguinte maneira:

Maximizar

f

sujeito a:

$$f \leq 1 - \left[\begin{aligned} & \sum_{(i,j) \in A} \sum_{n \in N_{ij}} (\underline{c}_{ijn} + \bar{c}_{ijn} + 2C_{ijn})x_{ijn} + \sum_{m \in M} (\underline{c}_m + \bar{c}_m + 2C_m)w_m + \\ & \sum_{h \in H} (\underline{c}_h + \bar{c}_h + 2C_h)s_h - \left((\underline{v} + \bar{v} + 2V) + (\underline{t}_v + \bar{t}_v + 2T_v)(1-\lambda) \right) \end{aligned} \right] / t_{BUD} \quad (6-31)$$

$$f \leq 1 - \left[- \sum_{j \in J1} y_{ij} + \sum_{j \in J2} y_{ji} + (\underline{d}_i + \bar{d}_i + 2D_i) - \left((\underline{t}_i + \bar{t}_i + 2T_i)(1-\lambda) \right) \right] / t_{CHA}, \quad \forall i \in I \quad (6-32)$$

$$\sum_{n \in N_{ij}} Cap_n x_{ijn} \geq y_{ij} \geq 0, \quad \forall (i,j) \in A-D \quad (6-11)$$

$$w_n - x_{l_{mn}} \geq 0, \quad \forall n \in N_{lm}, \quad \forall l \in J2 \quad (6-12)$$

$$\sum_{n \in N_{h0}} \text{Cap}_n x_{h0n} + s_h \geq y_{h0} \geq 0, \quad \forall h \in H \quad (6-13)$$

$$0 \leq f \leq 1 \quad (6-14)$$

$$0 < \lambda \leq 1 \quad (6-33)$$

4.3. Comentários

Nesta seção discutiu-se a flexibilização de objetivos e restrições fracas na presença de coeficientes imprecisos. A abordagem baseada em números nebulosos foi apresentada, derivando-se um modelo generalizado para o problema de planejamento tratado. Em outro contexto, Alves et alii (1995) desenvolvem tratamento similar àquele aqui mostrado.

A aplicação e resolução do modelo 6-M4 está todavia além do escopo deste trabalho. Entende-se que isto seria uma continuação, isto é, uma nova proposta voltada ao aperfeiçoamento da modelagem de problemas de planejamento em situações de incerteza. É importante ressaltar, contudo, que modelos assim obtidos são interessantes e dão margem a diferentes visões e interpretações do objeto sob estudo.

5. Conclusão

Neste capítulo foram apresentados modelos baseados em conjuntos fuzzy para auxiliar o planejador na tarefa de alocação e dimensionamento de equipamentos quando existem múltiplos objetivos e/ou é necessário flexibilizar restrições do problema devido a incertezas reinantes sobre alguns fatores. O tratamento dispensado aos objetivos e restrições flexibilizadas é simétrico; a meta global torna-se a de maximizar a satisfação proporcionada pelo resultado. A satisfação é medida pela realização daqueles objetivos e, simultaneamente, pelo respeito às restrições. No caso focalizado, existe um limitante para o custo que se pretende obedecer; existe também o desejo de atender a toda a demanda. O que se busca é o equilíbrio entre desembolso e capacidade de atendimento, numa solução de máxima satisfação. Mesmo assim, os modelos “flexíveis” podem ser resolvidos por técnicas convencionais, o que é interessante.

A aplicação dos modelos ao planejamento da rede para grandes assinantes mostrou que a abordagem é eficaz para lidar com este tipo de situação. Partindo de uma referência (orçamento livre e obrigatoriedade de atendimento total da demanda), a solução foi se modificando à medida

que a disponibilidade de recursos financeiros diminuía. Este processo, sempre buscando máxima satisfação geral, permitiu inferir diretrizes de planejamento para o caso tratado.

Num momento de expressivas mudanças tecnológicas, com imprevisibilidades marcantes em termos de demanda futura, custos e orçamentos, a abordagem nebulosa abre grandes perspectivas em planejamento. O papel do planejador é reforçado, sendo possível analisar em detalhe as variantes do problema e estabelecer diretrizes de grande importância para decisões futuras.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÃO

A possibilidade de oferecer novos serviços aos usuários e o surgimento de novas tecnologias são características do atual momento das telecomunicações. Além de voz (a telefonia tradicional), também dados precisam ser transmitidos. Dependendo de sua natureza, a transmissão de dados exige canais de altas velocidades. O uso de fibras ópticas vem se intensificando. Múltiplos fornecedores, com variados equipamentos, disputam esse mercado, oferecendo inúmeras soluções alternativas. Ao lado deste cenário, que em geral envolve um enorme volume de recursos financeiros, requer-se que o sistema evolua de maneira correta (do ponto de vista topológico e tecnológico) e barata (ou lucrativa). O planejamento dessa evolução é, portanto, justificável.

É neste contexto (ambiente competitivo, tendência de opticalização, necessidade de planejamento) que se insere o presente trabalho. É focalizado o problema da opticalização da rede externa. Pela sua abrangência, tal problema é naturalmente particionado em outros, menores. Face à variedade de soluções ópticas disponíveis e topologias a adotar, o planejamento de uma rede externa opticalizada é sempre uma tarefa complexa. Adicionalmente, não se conhecem com precisão os custos de todos os equipamentos que podem ser usados. Também não se sabe com certeza a penetração de cada serviço e, portanto, a demanda apresentada pelas redes em planejamento.

Adotando como ponto de partida um cenário em que todas as informações são precisas, modelos (ditos “exatos”) são elaborados para alguns casos de planejamento. O modelo mais explorado refere-se à etapa de atendimento de grandes assinantes a mínimo custo, prevendo tanto soluções puramente ópticas (primordialmente sistemas PDH e SDH) como aquelas que mesclam equipamentos ópticos com outros (sistemas HDSL) capazes de aproveitar os fios de cobre já existentes. Variantes deste modelo são discutidas, adequando-o a situações diversas de planejamento, particularmente aquelas que se referem a outras etapas da opticalização da rede externa e ao tratamento de outros critérios de desempenho que não o custo. Em qualquer caso, a rede é vista como um grafo e o modelo matemático é do tipo linear misto. As variáveis de decisão ajudam a alocar e dimensionar os equipamentos.

Pressupondo que há incerteza sobre os dados necessários ao planejamento, os modelos são modificados. Para o tipo de problema tratado, admite-se que os custos dos equipamentos candidatos à instalação e/ou as demandas estipuladas não têm seus valores precisamente conhecidos no instante do planejamento. O tratamento de cada tipo de incerteza é feito em separado, por razões didáticas. As imprecisões (tanto dos custos como da demanda) são

abordadas por meio de intervalos e também de conjuntos nebulosos (*fuzzy sets*). São discutidas, implementadas e relacionadas várias metodologias de resolução dos problemas matemáticos assim modificados. As metodologias apoiam-se principalmente no uso de equivalentes numéricos fixos ou paramétricos.

Por fim, uma interpretação alternativa da incerteza sobre os dados de planejamento é discutida. Ao invés de custos imprecisos, é assumido um orçamento flexível; ao invés de demandas imprecisas, é assumida dúvida com respeito à necessidade de atendimento total. Um novo modelo matemático, neste caso com múltiplos objetivos, é formulado. Também se recorre a conjuntos nebulosos, mas equivalentes não são usados. Neste caso, procuram-se soluções de máxima satisfação.

Todos os modelos desenvolvidos são aplicados a redes de médio ou grande porte, baseadas em dados reais. Nesses exemplos, sistemas ópticos PDH e SDH competem com sistemas “metálicos” HDSL pelo atendimento de grandes assinantes (demandas superiores a 2 Mbps). *Solvers* convencionais são usados para solucionar os problemas matemáticos.

Alguns resultados deste trabalho devem ser enfatizados. Considerado o ponto de vista da modelagem, cuja finalidade é auxiliar o planejador ao longo do processo de decisão, verifica-se que os modelos elaborados são capazes de refletir todas as principais situações encontráveis (topologias, tecnologias conhecidas, aspectos de competição e mesmo critérios diferentes do custo). A incerteza pode ser satisfatoriamente modelada e tratada. O planejador tem maior liberdade na definição dos valores dos dados a serem utilizados. Ele consegue acompanhar e aquilatar o impacto devido à eventual variação de sua estimativa de valores sobre a rede planejada.

Do ponto de vista tecnológico, considerada a competição promovida entre equipamentos PDH, SDH e HDSL para o atendimento de grandes assinantes, conclui-se que a tendência é de predominância dos sistemas ópticos instalados em anéis unidirecionais SDH, principalmente em redes de maior porte (isto é, com maior possibilidade de constituição de anéis). À medida que o custo desta tecnologia diminui em relação à tecnologia PDH, os anéis ficam mais viáveis. Por outro lado, anéis já constituídos têm facilidade em atrair mais nós de demanda, devido ao rateio de custos. Assim, os sistemas HDSL somente são compensadores quando aplicados a nós com pequenas demandas; se a demanda aumenta, o nó procura um anel SDH ou, na falta deste, um equipamento PDH para seu atendimento. Tais conclusões se aplicam aos casos aqui estudados e

ratificam a responsabilidade do planejador, que define equipamentos e topologias aplicáveis a cada situação.

Quanto à aplicabilidade dos modelos desenvolvidos no trabalho, as perspectivas são boas. De um lado, as empresas operadoras de serviços de telecomunicações estão interessadas em estabelecer diretrizes para a evolução da rede rumo a um cenário óptico. Incertezas quanto a demandas e custos são naturalmente parte do problema. De outro lado, os fabricantes de equipamentos e fornecedores de soluções querem estudar ambientes competitivos, avaliando limiares de custos e recolhendo informações para endossar suas propostas. Os modelos são capazes de contemplar as necessidades de ambos os lados.

O trabalho aqui iniciado pode ser estendido em várias direções. Por exemplo, a obtenção e resolução de um modelo com múltiplos objetivos, em que os coeficientes têm valores imprecisos, é um passo natural além do que já se fez. Isto corresponde a uma completa generalização dos modelos apresentados.

Os modelos podem ser modificados, também, no sentido de incorporar novas tecnologias e outros critérios de otimização além do custo. Espera-se que a maximização de receita, ou alguma de suas variantes, seja um critério importante na conjuntura de privatização que acaba de se formar.

O planejamento de outras etapas da opticalização da rede externa, além dos grandes assinantes, também merece um estudo mais detalhado. Neste caso, modelos que incorporam incertezas devem ser formalizados. Tais modelos podem colaborar em decisões importantes para a evolução óptica daquela rede. Muito embora não se espere que várias tecnologias coexistam numa mesma área de estação, há muitas alternativas para escolha, e mais estão surgindo (por exemplo, WLL, uma alternativa sem fio).

A possibilidade de maior interesse talvez seja o planejamento estagiado, que procura acompanhar a evolução da rede ao longo do tempo. Quando se busca otimização global, o planejamento por estágios é consideravelmente mais complicado. Métodos e heurísticas já existentes para problemas similares podem ser aproveitados em modelos que permitam o tratamento de incerteza. Desta forma, ferramentas poderosas são obtidas.

Embora os problemas matemáticos associados aos modelos tenham sido resolvidos por *solvers* convencionais usando métodos do tipo *branch-and-bound* (o que é interessante para os planejadores), não se pode desprezar o avanço de novas técnicas de resolução de problemas do

tipo aqui tratado. Assim, devem ser pesquisados algoritmos que fazem uso de metaheurísticas tais como *Simulated Annealing* ou Algoritmos Genéticos.

Finalmente, é preciso afirmar que este trabalho é fruto da convicção de que o planejamento de redes de telecomunicações é uma atividade possível e relevante. Não se pretende chegar a um planejamento completamente automatizado, mas sim dispor de modelos de apoio à decisão refinados e capazes de fornecer resultados úteis, mesmo quando o planejador não conta com todas as informações que lhe seriam necessárias. Considerada a inexistência até o momento, nos principais veículos da área, de literatura que trate do assunto aqui desenvolvido, pode-se concluir que esta é uma contribuição original e quiçá importante para futuros trabalhos de planejamento e pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Adamo, J.M. (1980). "Fuzzy decision trees". *Fuzzy Sets and Systems* 4, pp.207-209.
- Ahamed, S.V., P.L. Gruber e J.-J. Werner (1995). "Digital Subscriber Line (HDSL and ADSL) Capacity of the Outside Loop Plant". *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 13 (9).
- Ahuja, R.K., T.L. Magnanti e J.B. Orlin (1993). *Network flows: theory, algorithms, and applications*. Prentice Hall, Englewood Cliffs (NJ).
- Alefeld, G. e J. Herzberger (1983). *Introduction to Interval Computations*. Academic Press, New York.
- Alves, I.C., A. Yamakami e F. Gomide (1995). "An Approach for Fuzzy Linear Multicommodity Transportation Problems and Its Application". *Proc. Fuzz-IEEE/IFES'95*, Kyoto, pp.773-780.
- Balakrishnan, A., T.L. Magnanti, A. Shulman e R.T. Wong (1991). "Models for Planning Capacity Expansion in Local Access Telecommunication Networks". *Annals of Operations Research* 33, pp.239-284.
- Bank, B., J. Guddat, D. Klatte, B. Kummer e K. Tammer (1983). *Non-Linear Parametric Optimization*. Birkhäuser Verlag, Basel.
- Bellman, R.E. e L.A. Zadeh (1970). "Decision-Making in a Fuzzy Environment".. *Management Science* 17 (4), pp.B141-B164.
- Bitran, G.R. (1980). "Linear multiple objective problems with interval coefficients". *Management Science* 26, pp.694-706.
- Bortolan, G. e R. Degani (1985). "A review of some methods for ranking fuzzy subsets". *Fuzzy Sets and Systems* 15, pp.1-19.
- Bortolon, S., E. Quaglia, M. Bergamaschi, H. Tavares e R. Ribeiro (1996b). "Planejamento Otimizado de Redes SDH em Telecomunicações". *Anais do XI Congresso Brasileiro de Automática*, São Paulo, Vol. 1, pp. 251-256.
- Bortolon, S., H.M.F. Tavares e R.V. Ribeiro (1996a). "SONET Planning Using Optimization Tools in Large Networks: A Practical Case Study". *Proceedings of 4th International Conference on Telecommunications Systems - Modelling and Analysis*, Nashville, pp. 493-499.
- Campos, L. e J.L. Verdegay (1989). "Linear programming problems and ranking of fuzzy numbers". *Fuzzy Sets and Systems* 32, pp.1-11.
- Carlson, C.M.F., J.R.F. Formigoni e H.M.F. Tavares (1996). "Tratamento de Incertezas no Planejamento de Rotas Estratégicas através de Conjuntos Nebulosos". *Anais do VIII CLAIO (Latin-Iberian-American Congress on Operations Research and System Engineering / XXVIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, Rio de Janeiro, Vol.I, pp.334-339.
- Carlson, C.M.F., J.R.F. Formigoni e H.M.F. Tavares (1997a). "Planning of Optical Fiber Telecommunication Networks: An approach based on Fuzzy Sets". *Proceedings of 7th IFSA World Congress*, Prague, Vol.II, pp.543-549.

- Carlson, C.M.F., J.R.F. Formigoni e H.M.F. Tavares (1997b). "Atendimento de Grandes Assinantes em Situações de Incerteza de Custos: Sistemas Ópticos *versus* HDSL". *Anais do XV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, Recife, pp.40-44.
- Carlson, C.M.F., H.M.F. Tavares e J.R.F. Formigoni (1998a). "Dealing with Fuzzy Costs in Telecommunications Networks Design". *Proc. of the IEEE International Conference on Fuzzy Systems - FUZZ'IEEE'98*, Anchorage, Vol. I, pp.634-639.
- Carlson, C.M.F., H.M.F. Tavares e J.R.F. Formigoni (1998b). "Evolução Óptica da Rede de Telecomunicações sob Imprecisão de Custos". *Revista UNIVERSITAS* (aceito).
- Carlson, C.M.F., H.M.F. Tavares e J.R.F. Formigoni (1998c). "Parametric Mixed Linear Programming with Fuzzy Numbers and an Application to Telecommunications Networks Planning". *Proc. of the SBT / IEEE International Symposium on Telecommunications*, São Paulo, Vol. 1, pp.323-328.
- Carlson, C.M.F., H.M.F. Tavares e J.R.F. Formigoni (1998d). "Evolution of Telecommunications Networks under Imprecise Demands". *Revista da Sociedade Brasileira de Telecomunicações* (submetido).
- Carlson, C.M.F., H.M.F. Tavares e J.R.F. Formigoni (1998e). "Relating Fuzzy and Interval Approaches to the Access Network Planning under Uncertainty". *Proc. of the IEEE Global Conference on Communications - GLOBECOM'98*, Sydney, Vol. 2.
- Carpenter, T., D.P. Heyman e I. Saniee (1998). "Studies of Random Demands on Network Costs". *Por ser publicado*.
- Cesielka, A.J. e D.C. Douglas (1980). "Electronics in the suburban and light urban loop networks". *The Bell Systems Technology Journal* 59, pp.417-439.
- Charnes, A. e W.W. Cooper (1959). "Chance constrained programming". *Management Science* 6, pp.73-79.
- Cohon, J.L. (1978). *Multiobjective Programming and Planning*. Academic Press, New York.
- Cooper, R.B. (1981). *Introduction to Queueing Theory*, 2nd ed. Elsevier North-Holland, New York.
- Dantzig, G.B. (1963). *Linear Programming and Extensions*. Princeton University Press, Princeton (NJ).
- Delgado, M., J.L. Verdegay e M.A. Vila (1989). "A general model for fuzzy linear programming". *Fuzzy Sets and Systems* 29, pp.21-29.
- Delgado, M., J.L. Verdegay e M.A. Vila (1990). "Relating different approaches to solve linear programming problems with imprecise costs". *Fuzzy Sets and Systems* 37, pp.32-42.
- dePrycker, M. (1991). *Asynchronous transfer mode: Solution for broadband ISDN*. Ellis Horwood, Chichester.
- Dubois, D. e H. Prade (1980). *Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications*. Academic Press, New York.
- Dyson, R.G. (1980). "Maximin Programming, Fuzzy Linear Programming and Multi-Criteria Decision Making". *J.Opl.Res.Soc.* 31, pp.263-267, 1980.

- Eiger, M.I. e C.A. Harrington (1991). "Present Value of Expenditures for Phased Fiber-in-the-Loop Deployment". *Proceedings of IEEE GLOBECOM'91*, pp.1834-1839.
- Formigoni, J.R.F. (1995). *Rede Externa: Planejamento de Rotas Estratégicas*. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas.
- Formigoni, J.R.F. (1995). *Rede Externa: Planejamento de Rotas Estratégicas*. Tese de Mestrado, FEE/UNICAMP.
- Formigoni, J.R.F., H.M.F. Tavares e R.V. Ribeiro (1995). "A Software Planning Tool for a Business Oriented Optical Access Network - PREST". *Proceedings of IEEE GLOBECOM'95*, Singapura, pp.1920-1924.
- Formigoni, J.R.F., R.V. Ribeiro e H.M.F. Tavares (1997). "Optical Access Network: Optimal Deployment". *Proceedings of 5th International Conference on Telecommunications Systems - Modelling and Analysis*, Nashville, pp. 210-213.
- França, P., F. Fraislebem e H. Tavares (1984). "O Programa PEOR - Uma Metodologia para a Evolução Dinâmica de Cortes de Área". *Revista Telebrás* 29, pp.27-38.
- Freitas, J.L.S. (1994). *Planejamento da Rede Externa: Rumo à Rede Óptica de Assinantes*. Tese de Mestrado, FEE/UNICAMP.
- Garcia, A.S. e G.B. Zanandrea (1996a). "A Heuristic Approach for SDH Transmission Network Evolution". *Proceedings of 4th International Conference on Telecommunications Systems - Modelling and Analysis*, Nashville, pp. 620-626.
- Garcia, A.S. e G.B. Zanandrea (1996b). "A Decision Support System for SDH Network Planning Considering Equipment Modularity Aspects". *Journal of the Telecommunications Brazilian Society* 11 (1), pp.5-12.
- Garcia, A.S. e H.M.F. Tavares (1988). "A Heuristic Method for Digital Trunks Network Planning in Metropolitan Areas: The Use of Optical Fibers". *Journal of the Telecommunications Brazilian Society* 3 (1), pp.47-53.
- Herrera, F. e J.L. Verdegay (1996). "Fuzzy boolean programming problems with fuzzy costs: A general study". *Fuzzy Sets and Systems* 81, pp.57-76.
- Hillier, F.S. e G.J. Lieberman (1990). *Introduction to Operations Research*, 5th ed. McGraw-Hill, New York.
- Hwang, C.L. e A.S. Massud (1979). *Multiple Objective Decision Making: Methods and Applications*. Springer-Verlag, Heidelberg.
- Ignizio, J.P. (1976). *Goal Programming and Extensions*. Heath, Lexington (MA).
- Infanger, G. (1994). *Planning Under Uncertainty: Solving Large-Scale Stochastic Linear Programs*. Boyd and Fraser Publishing Company.
- Ishibuchi, H. e H. Tanaka (1990). "Multiobjective programming in optimization of the interval objective function". *European Journal of Operational Research* 48, pp.219-225.
- Iwashita, M. (1996). "A Study on Evaluation of Access Network Transition Scenarios". *IEICE Trans. Commun.* E79-B, pp.1101-1108.

- Jack, C., S.-R. Kai e A. Shulman (1992). "NETCAP - An Interactive Optimization System for GTE Telephone Network Planning". *Interfaces* 22 (1), pp.72-89.
- Karpinski, R. (1994). "ADSL: Alive and (seemingly) well". *Telephony* (March), pp.26-27.
- Klir, G.J. e T.A. Folger (1992). *Fuzzy Sets, Uncertainty, and Information*. Prentice Hall, Singapore.
- Malley, D.P. e O.K. Tonguz (1992). "Fiber in the Loop: Where and When is it Feasible ?". *IEEE JSAC* 10 (9), pp.1523-1544.
- Manchester, E.E. (1991). "New uses for residential copper". *Telephony* (June), pp.27-32.
- Mello, O.D. (1996). *Sobrevivencialidade e Indisponibilidade no Planejamento de Redes de Telecomunicações*. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas.
- Mendes, J.L.A., A.O. Sousa Filho e R.Y. Nakamura (1996). "Hierarquia Digital Síncrona (SDH): A Evolução das Redes de Transporte". *Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, Curitiba, pp.470-475.
- Narasinhram, R. (1980). "Goal Programming in a Fuzzy Environment". *Decision Science* 11, pp.325-336.
- Olsen, B.T., A. Zaganianis, S. Markatos, U. Ferrero, M. Tahkokorpi, I. Schjetne e T. Øverli (1994). "Access network alternatives from RACE 2087/TITAN". *Proceedings of 12th Annual Conference on European Fibre Optic Communications and Networks*, Heidelberg.
- Pedrycz, W. e F. Gomide (1998). *An introduction to fuzzy sets: analysis and design*. MIT Press, Cambridge (MA).
- Pugh, W. e G. Boyer (1995). "Broadband Access: Comparing Alternatives". *IEEE Communications Magazine*, August, pp.34-46.
- Quaglia, E.J., H.M.F. Tavares e R.V. Ribeiro (1995). "O Enfeixamento no Planejamento da Transmissão: Um Estudo de Caso". *Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, Águas de Lindóia, pp. 458-463.
- Ribeiro, C.M. (1985). *Planejamento de Redes Telefônicas: Alocação de Concentradores, Indicação de Centros de Fios e Localização de Estágios de Linha Remotos*. Tese de Mestrado, FEE/UNICAMP.
- Romero, P.R. e A. Yamakami (1996). "Programação Linear Fuzzy Aplicada ao Problema de Sequenciamento de Peças em Células Flexíveis de Manufatura com Incertezas". *Anais do XI Congresso Brasileiro de Automática*, São Paulo, Vol. 2, pp.659-664.
- Rommelfanger, H., R. Hanuscheck e J. Wolf (1989). "Linear programming with fuzzy objectives". *Fuzzy Sets and Systems* 29, pp.31-48.
- Schwartz, M. (1988). *Telecommunication Networks*. Addison-Wesley, Reading (MA).
- Siegel, J.G., J.K. Shim e D. Minars (1995). *The Complete Book of Business Math*. McGraw-Hill, New York.

- Steuer, R. (1981). "Algorithms for linear programming problems with interval objective function coefficients". *Math. Oper. Res.* 6, pp.333-348.
- Steuer, R. (1986). *Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation and Application*. Wiley, New York.
- Tanaka, H., H. Ichihashi e K. Asai (1984). "A Formulation of Fuzzy Linear Programming Problems based on Comparison of Fuzzy Numbers", *Control Cybernet.* 3, pp.185-194.
- Telebrás (1979). *Princípios Gerais de Planejamento e Projeto de Redes*. Prática SDT-235-300-600.
- Telebrás (1993a). *Planejamento de Rotas Estratégicas para Atendimento de Grandes Clientes*. Prática SDT-210-001-102.
- Telebrás (1993b). *Procedimento de Projeto para Rotas Estratégicas*. Prática SDT-210-001-601.
- Telebrás (1994a). *Conceitos de Rede Óptica Primária*. Prática SDT-210-120-1XX.
- Telebrás (1994b). *Topologia e Configurações Preferenciais da Rede Óptica de Assinantes*. Relatório PD.33.RS.EAA.00009A/RT-01-AA.
- Webb, W. (1998). *Introduction to Wireless Local Loop*. Artech House, Boston.
- Werners, B. (1987). "Interactive Multiple Objective Programming Subject to Flexible Coefficients". *European Journal of Operational Research* 31, pp.342-349.
- Yager, R.R. (1981). "A Procedure for Ordering Fuzzy Subsets of the Unit Interval". *Information Science* 24, pp.143-161.
- Zeleny, M. (1982). *Multiple Criteria Decision Making*. McGraw-Hill, New York.
- Zimmermann, H.-J. (1978). "Fuzzy programming and linear programming with several objective functions". *Fuzzy Sets and Systems* 1, pp.45-55.
- Zimmermann, H.-J. (1987). *Fuzzy Sets, Decision Making, and Expert Systems*. Kluwer, Boston.
- Zimmermann, H.-J. e M.A. Polattschek (1984). "Fuzzy 0-1 Linear Programs". *Studies in the Management Sciences* 20, pp.133-145.