

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

TESE DE DOUTORADO

**PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO DE SISTEMAS DE
TELECOMUNICAÇÕES:
AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA ORIENTADA À RECEITA**

Autor : **Marcos Antônio de Sousa**

Orientadores : **Prof. Dr. Carlos Magnus Carlson Filho (IBILCE/UNESP)**
Prof. Dr. Raul Vinhas Ribeiro (DENSIS/FEEC/UNICAMP)

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Cristiano Lyra Filho (DENSIS/FEEC/UNICAMP)

Prof. Dr. Hélio Waldman (DECOM/FEEC/UNICAMP)

Profa. Dra. Maria Silvina Medrano (Fundação CPqD)

Profa. Dra. Maria do Socorro Nogueira Rangel (UNESP/S.J. Rio Preto)

Prof. Dr. Takaaki Ohishi (DENSIS/FEEC/UNICAMP)

Prof. Dr. Vinícius Amaral Armentano (DENSIS/FEEC/UNICAMP)

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP - como requisito parcial
para obtenção do título de **DOUTOR EM ENGENHARIA ELÉTRICA.**

Campinas, julho de 2004

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

So85p Sousa, Marcos Antônio de
Planejamento estratégico de sistemas de
telecomunicações: avaliação técnico-econômica
orientada à receita / Marcos Antônio de Sousa .--
Campinas, SP: [s.n.], 2004.

Orientador: Carlos Magnus Carlson Filho, Raul
Vinhas Ribeiro.

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

1.Sistemas de telecomunicações. 2. Engenharia
econômica. 3. Lógica difusa. 4. Otimização
combinatória. 5. Otimização matemática. 6. Inovações
tecnológicas. I. Carlson Filho, Carlos Magnus. II.
Ribeiro, Raul Vinhas. III. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e da
Computação. IV. Título.

RESUMO

As telecomunicações experimentam acelerada evolução. Novos serviços e tecnologias são continuamente disponibilizados. O ambiente é muito competitivo, e o volume de recursos financeiros envolvidos é significativo. O segmento de acesso constitui um foco importante destas transformações. A busca de uma plataforma capaz de disponibilizar serviços diversificados, de qualidade e lucrativos é uma tendência a ser seguida pelas empresas operadoras do setor. Para esta conjuntura, este trabalho estabelece uma metodologia de planejamento para ser utilizada tanto no sistema de acesso fixo cabeado quanto no acesso móvel celular. Para este fim, são propostos modelos matemáticos de otimização que tratam da etapa de dimensionamento de equipamentos. Especificamente, são apresentados modelos de programação linear inteira mista que tratam a expansão da rede como um problema de otimização de fluxo em rede com restrições adicionais e variáveis binárias. São formalizados tanto cenários “exatos” quanto aqueles cujos dados são imprecisos. A análise técnico-econômica é orientada à maximização de receita. Métodos de resolução de problemas envolvendo números *fuzzy* também são avaliados. Como característica marcante, os modelos permitem um alto grau de interação com o planejador, flexibilidade que possibilita analisar variados aspectos do compromisso entre serviço e tecnologia, receita e custo. Resultados de experimentos computacionais são apresentados e suas implicações são discutidas.

ABSTRACT

Telecommunications are significantly changing. New services and technologies are continuously rising. The field is very competitive, and the amount of involved financial resources is important. The customer access portion is a major focus of transformations. The goal of the operating companies is to get a network structure which is able to offer several good-quality, lucrative services. Under this setting, this work establishes a methodology to be used in the strategical planning of access systems, either fixed-wire or cellular mobile networks. Optimization mathematical models for equipment allocation and sizing are also presented for some technologies. The mixed integer linear models deal with the planning question as a network flow problem with additional constraints and binary decision variables. “Exact” as well as imprecise (fuzzy) data scenarios are addressed. The techno-economic analysis is driven by max-revenue criterion. Solving methods for problems containing fuzzy numbers are also proposed and evaluated. As a remarkable feature, the methodology’s interactiveness allows analyses of services, technologies, and cost/revenue trade-offs. The results of computational experiments are fully reported and discussed.

à Flávia,
com amor.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho não seria possível, não fosse o incentivo e a colaboração de inúmeras pessoas. Por conseguinte, gostaria de fazer um agradecimento a todos aqueles que me apoiaram durante esta jornada, em especial a:

- Carlos Magnus e Raul Vinhas, pela orientação e amizade, além das lições de coerência e dedicação ao trabalho;
- Christiano Lyra, Hélio Waldman, Maria Silvina, Maria do Socorro, Takaaki Ohishi e Vinícius Armentano, pela disponibilidade e sugestões valiosas;
- Joana, Bergamaschi, Márcia, Noemia e demais amigos do DENSIS e da UNICAMP;
- Reynaldo, Basseto e demais amigos da Fundação CPqD, pelo auxílio no início das atividades;
- José Alves, Charles e demais amigos do ENG e da UCG, pela confiança e incentivo;
- Ghunter, pela paciência e suporte computacional em vários momentos importantes;
- Minha esposa Flávia, minha mãe Terezinha, e meus irmãos Mauro, Mônica e Márcia, que sempre trocaram as dificuldades da ausência por manifestações de apoio e carinho. Esta conquista é nossa !

ÍNDICE

Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xvii
Lista de Termos Técnicos	xix
CAPÍTULO 1 – APRESENTAÇÃO	1
1.1 – O Contexto Atual do Setor de Telecomunicações	1
1.2 – Proposta da Tese	3
1.3 – Organização do Trabalho	4
<hr/>	
PARTE I – O PROBLEMA E A METODOLOGIA	
CAPÍTULO 2 – SISTEMAS DE TELECOMUNICAÇÕES: DEFINIÇÕES E TENDÊNCIAS	9
2.1 – Introdução	9
2.2 – Sistema de Telecomunicações	10
2.3 – Principais Componentes do Sistema de Acesso	11
2.3.1 – Sistema de Acesso Fixo Cabeado – SFC	12
2.3.2 – Sistema de Acesso Móvel Celular – SMC	13
2.4 – Serviços	14
2.5 – Necessidade de Evolução Contínua dos Sistemas de Acesso	18
CAPÍTULO 3 – SOLUÇÕES TECNOLÓGICAS PARA O SISTEMA DE ACESSO	19
3.1 – Introdução	19
3.2 – Soluções Tecnológicas para o SFC	19
3.2.1 – Linha Digital de Assinante – xDSL	19
3.2.2 – Rede Óptica Passiva Faixa-Larga Baseada em ATM – APON	21
3.3 – Soluções Tecnológicas para a Infra-estrutura do SMC	25
3.3.1 – <i>Modem</i> HDSL	26
3.3.2 – <i>Modem</i> Óptico	27
3.3.3 – Enlace via Rádio Microondas	28
CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA DE PLANEJAMENTO DE SISTEMAS DE ACESSO	31
4.1 – Introdução	31
4.2 – Definição do Horizonte de Planejamento	31
4.3 – Definição dos Serviços	32
4.4 – Definição da Rede	33
4.5 – Escolha das Soluções Tecnológicas	33

4.6 – Atualização dos Dados Gerais	35
4.7 – Definição do Critério de Otimização	37
4.7.1 – Atender Toda a Demanda Prevista a um Custo Mínimo	37
4.7.2 – Maximização da Folga	37
4.7.3 – Maximização da Demanda Protegida	37
4.7.4 – Maximização de Receita	38
4.8 – Realização dos Estudos de Caso	40
4.9 – Análise Econômica	42

PARTE II – MODELAGEM TÉCNICO-ECONÔMICA PARA O PROBLEMA COM DADOS “EXATOS”

CAPÍTULO 5 – MODELO GERAL DE MAXIMIZAÇÃO DE RECEITA	47
5.1 – Introdução	47
5.2 – Premissas de Modelagem	47
5.3 – Representação Gráfica do Sistema de Acesso	49
5.4 – Formulação do Modelo Matemático	52
5.5 – Adaptações para a Abordagem de Minimização de Custo	59
5.6 – Comentários Adicionais	60
CAPÍTULO 6 – EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DO MODELO “EXATO” DE MAXIMIZAÇÃO DE RECEITA	63
6.1 – Introdução	63
6.2 – Exemplo de Aplicação: Sistema de Acesso Fixo Cabeado – SFC	64
6.2.1 – Premissas para o Planejamento com xDSL	64
6.2.2 – Premissas para o Planejamento com APON-FTTC	65
6.2.3 – Adaptações no Modelo C5-ME1 para xDSL <i>versus</i> APON-FTTC	66
6.2.3.1 – <i>Representação em Grafos</i>	66
6.2.3.2 – <i>O Modelo Matemático</i>	67
6.2.4 – Dados de Entrada para o Modelo C6-ME1	72
6.2.4.1 – <i>Dados de Rede</i>	72
6.2.4.2 – <i>Dados de Serviços e de Soluções Tecnológicas</i>	73
6.2.5 – Aplicação do Modelo C6-ME1	74
6.3 – Exemplo de Aplicação: Infra-estrutura do SMC	79
6.3.1 – Premissas para o Planejamento	79
6.3.2 – Adaptações no Modelo C5-ME1 para HDSL <i>versus</i> Modem Óptico <i>versus</i> Rádio Microondas	80
6.3.2.1 – <i>Representação em Grafos</i>	80

6.3.2.2 – O Modelo Matemático	81
6.3.3 – Dados de Entrada para o Modelo C6-ME2	85
6.3.3.1 – Dados de Rede	85
6.3.3.2 – Dados de Serviços e de Soluções Tecnológicas	85
6.3.4 – Aplicação do Modelo C6-ME2	86
6.3.4.1 – Análise Técnico-Econômica pelo Controle de Demanda por Nó de Acesso	87
6.3.4.2 – Análise Técnico-Econômica pelo Controle de Demanda por Serviço	89
6.4 – Comentários Adicionais	91

**PARTE III – MODELAGEM TÉCNICO-ECONÔMICA PARA O PROBLEMA COM
DADOS IMPRECISOS**

CAPÍTULO 7 – INCORPORAÇÃO DE DEMANDA IMPRECISA – ABORDAGEM <i>FUZZY</i>	95
7.1 – Introdução	95
7.2 – Modelo Matemático com Demanda Imprecisa	97
7.3 – Conceitos Básicos de Números <i>Fuzzy</i>	99
7.4 – Reformulação do Problema com Demanda Imprecisa	100
7.5 – Resolução do Problema com Demanda <i>Fuzzy</i>	102
7.6 – Comentários Adicionais	107
CAPÍTULO 8 – EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DO MODELO <i>FUZZY</i> – PLIM	109
8.1 – Introdução	109
8.2 – Sistema de Acesso Fixo Cabeado – SFC	109
8.2.1 – Dados Gerais	110
8.2.1.1 – Dados de Rede	110
8.2.1.2 – Dados de Soluções Tecnológicas e de Serviços	110
8.2.2 – Avaliação Técnico-Econômica devido à Demanda Imprecisa	111
8.2.2.1 – Baixa Penetração dos Novos Serviços (cenário <i>Low-P</i>)	112
8.2.2.2 – Alta Penetração dos Novos Serviços (cenário <i>High-P</i>)	112
8.2.3 – Análise dos Resultados	113
8.2.3.1 – Cenário <i>Low-P</i>	113
8.2.3.2 – Cenário <i>High-P</i>	119
8.3 – Infra-estrutura do Sistema de Acesso Móvel Celular – SMC	124
8.3.1 – Dados Gerais	124
8.3.1.1 – Dados de Rede	124
8.3.1.2 – Dados de Soluções Tecnológicas	124

8.3.2 – Impacto da Demanda Imprecisa	125
8.3.3 – Análise dos Resultados	126
8.3.3.1 – <i>Impacto sobre o Controle de Demanda por Nó de Acesso</i>	126
8.3.3.2 – <i>Impacto sobre o Controle de Demanda por Serviço</i>	130
8.4 – Comentários Adicionais	133

PARTE IV – SOLUÇÃO COMPLETA DO PROBLEMA COM DADOS

IMPRECISOS: UMA ABORDAGEM HEURÍSTICA

CAPÍTULO 9 – MÉTODO HEURÍSTICO PARA A RESOLUÇÃO DO MODELO <i>FUZZY</i> – PLIM	137
9.1 – Introdução	137
9.2 – Utilizando-se da Estrutura do PLIM	138
9.3 – Definições	139
9.4 – O Método Heurístico (Algoritmo)	141
9.4.1 – Funcionamento do <i>Algoritmo 1</i>	142
9.5 – Procedimento Utilizado para Realizar a PLP	145
9.6 – Incorporando Receita Unitária Variável	147
9.6.1 – Novo Procedimento de Resolução do PLIM-Paramétrico	148
9.7 – Comentários Adicionais	150
CAPÍTULO 10 – AVALIAÇÃO TÉCNICO – ECONÔMICA: MÉTODO HEURÍSTICO	153
10.1 – Introdução	153
10.2 – Dados Gerais	154
10.3 – Cenários de Demanda Imprecisa Avaliados	155
10.3.1 – Cenário 1: Análise Técnico-Econômica – 5 ERBs “Imprecisas”	155
10.3.2 – Cenário 2: Avaliação de Desempenho do Método Heurístico – 15 ERBs “Imprecisas”	156
10.4 – Análise dos Resultados	158
10.4.1 – Cenário 1: 5 ERBs “Imprecisas”	158
10.4.2 – Cenário 2: 15 ERBs “Imprecisas”	166
10.5 – Comentários Finais	170
CAPÍTULO 11 – CONCLUSÃO	173
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	179
Anexo 1 – PLANILHA DE CUSTOS: SISTEMA DE ACESSO FIXO CABEADO	187
Anexo 2 – EXEMPLO DE PLIM-PARAMÉTRICO	189

LISTA DE FIGURAS

2.1 - Principais componentes de um sistema de telecomunicações	10
2.2 - Sistema de telecomunicações, destacando o SFC	12
2.3 - Sistema de telecomunicações, destacando o SMC	13
3.1 - Equipamentos considerados na solução xDSL	20
3.2 - Arquitetura de uma rede APON	22
3.3 - Principais componentes de uma ONU	24
3.4 - Representação de um <i>splitter</i>	25
3.5 - Infra-estrutura do SMC, interligação de ERBs utilizando <i>modems HDSL</i>	27
3.6 - Infra-estrutura do SMC, interligação de ERBs utilizando <i>modems ópticos</i> ..	28
3.7 - Infra-estrutura do SMC, interligação de ERBs utilizando <i>rádio microondas</i>	29
4.1 - Etapas da metodologia de planejamento de sistemas de acesso	32
4.2 - Área de atendimento, destacando alguns dados de rede	36
4.3 - Possibilidades de utilização de fibra óptica na rede	41
5.1 - Representação gráfica do sistema de acesso	50
5.2 - Controle de demanda por nó de acesso	56
5.3 - Controle de demanda por serviço	57
6.1 - Representação gráfica do modelo xDSL <i>versus</i> APON-FTTC para o SFC	67
6.2 - Rede utilizada no planejamento do SFC	73
6.3a - Configuração de atendimento para a instância A	77
6.3c - Configuração de atendimento para a instância C	77
6.3e - Configuração de atendimento para a instância E	78
6.4 - Representação gráfica do modelo HDSL <i>versus</i> <i>modem</i> óptico <i>versus</i> rádio microondas	81
6.5 - Sistema de acesso móvel celular analisado	85
6.6 - Configuração da rede para atendimento de toda a demanda	87
6.7 - Configuração da rede para o cenário com controle de demanda por nó de acesso, admitindo-se 80% do orçamento-base	89
6.8 - Configuração da rede para o cenário com controle de demanda por serviço, admitindo-se 80% do orçamento-base	90

7.1 - Representação da demanda (imprecisa) através de um número <i>fuzzy</i> triangular	101
7.2 - Representação da penetração (imprecisa) dos serviços através de um número <i>fuzzy</i> triangular	102
7.3 - Equivalente de Adamo para um número <i>fuzzy</i> triangular, representando a demanda imprecisa	105
8.1 - Rede para aplicação, SFC, contendo 17 nós de acesso	110
8.2 - Configuração de atendimento para a penetração mínima (cenário <i>Low-P</i>) ..	115
8.3 - Configuração de atendimento para a penetração esperada (cenário <i>Low-P</i>)	115
8.4 - Configuração de atendimento para a penetração máxima (cenário <i>Low-P</i>) ..	116
8.5 - Orçamentos necessários (cenário <i>Low-P</i>)	117
8.6 - Receitas geradas (cenário <i>Low-P</i>)	117
8.7 - Distribuição da receita entre os serviços (cenário <i>Low-P</i>)	118
8.8 - Quantidade de nós de acesso atendidos por cada tecnologia (cenário <i>Low-P</i>)	118
8.9 - Relação número de assinantes atendidos/assinantes previstos (cenário <i>Low-P</i>)	119
8.10 - Orçamentos necessários (cenário <i>High-P</i>)	120
8.11 - Receitas geradas (cenário <i>High-P</i>)	120
8.12 - Quantidade de nós de acesso atendidos por cada tecnologia (cenário <i>High-P</i>)	121
8.13 - Relação número de assinantes atendidos/assinantes previstos (cenário <i>High-P</i>)	121
8.14 - Configuração de atendimento para a penetração mínima (cenário <i>High-P</i>)	122
8.15 - Configuração de atendimento para a penetração esperada (cenário <i>High-P</i>)	122
8.16 - Configuração de atendimento para a penetração máxima (cenário <i>High-P</i>)	123
8.17 - Rede para aplicação, SMC, contendo 15 ERBs	124
8.18 - Configuração da rede para \underline{d}_{si} (controle por nó de acesso), solução de mínimo custo	127
8.19 - Configuração da rede para D_{si} (controle por nó de acesso), admitindo-se uma queda de 15% no orçamento	128
8.20 - Configuração da rede para \bar{d}_{si} (controle por nó de acesso), admitindo-se uma queda de 15% no orçamento	

uma queda de 15% no orçamento	128
8.21 - Receitas geradas (<i>controle por nó de acesso</i>)	129
8.22 - Distribuição da receita (<i>controle por nó de acesso</i>)	130
8.23 - Configuração da rede para \underline{d}_{si} (<i>controle por serviço</i>), admitindo-se uma queda de 15% no orçamento	131
8.24 - Configuração da rede para D_{si} (<i>controle por serviço</i>), admitindo-se uma queda de 15% no orçamento	131
8.25 - Configuração da rede para \bar{d}_{si} (<i>controle por serviço</i>), admitindo-se uma queda de 15% no orçamento	132
8.26 - Receitas geradas (<i>controle por serviço</i>)	132
8.27 - Distribuição da receita (<i>controle por serviço</i>)	133
9.1 - Definição dos elementos de $\{\alpha_{nA}\}$ a partir da PLP	142
9.2 - <i>Algoritmo 1</i> , utilizado para fazer a análise paramétrica do PLIM	142
9.3 - Determinação da função solução limite inferior $g_{\underline{x}, \underline{x}^2}(\alpha)$	143
9.4 - Seqüência de avaliação dos subintervalos de α	144
9.5 - Receita unitária do serviço s no nó de acesso i (constante)	147
9.6 - Receita unitária do serviço s no nó de acesso i (variável)	148
9.7 - Nova função $Z(\alpha, \underline{\mathbf{X}}(0))$	149
9.8 - <i>Algoritmo 3</i> , adaptado para aceitar receita unitária variável	150
10.1 - Rede com previsão de 15 ERBs, para aplicação do método heurístico	154
10.2 - Rede mínima para atender 10 ERBs, com indicação de localização de outras 5	159
10.3 - Configuração da rede para $\alpha \in [1,000; 0,653]$ - maior possibilidade de ocorrência	161
10.4 - Configuração da rede para $\alpha \in [0,653; 0,306]$	162
10.5 - Configuração da rede para $\alpha \in [0,306; 0,227]$	162
10.6 - Configuração da rede para $\alpha \in [0,227; 0,000]$ –menor possibilidade de ocorrência	163
10.7 - Comportamento da receita x Nível de confiança	165
10.8 - “Função de pertinência” para a receita gerada no intervalo $[D_{si}, \bar{d}_{si}]$	165
A2.1 - Exemplo de PLIM-paramétrico gerado automaticamente	190

LISTA DE TABELAS

2.1 - Velocidade de transmissão exigida pelos serviços	16
2.2 - Usuários por canal E1	17
6.1 - Equipamentos exigidos pela solução xDSL	64
6.2 - Equipamentos exigidos pela solução APON-FTTC	65
6.3 - Dados de equipamentos das soluções xDSL e APON-FTTC	73
6.4 - Especificações técnicas dos serviços	74
6.5 - Instâncias analisadas	75
6.6 - Receita e configuração de atendimento	76
6.7 - Informações sobre as tecnologias	86
6.8 - Informações sobre os serviços	86
6.9 - Soluções para o cenário com controle de demanda por nó de acesso	88
6.10 - Soluções para o cenário com controle de demanda por serviço	90
8.1 - Principais equipamentos das soluções xDSL e APON-FTTC	111
8.2 - Informações sobre os serviços	111
8.3 - Cenário <i>Low-P</i> para os serviços	112
8.4 - Cenário <i>High-P</i> para os serviços	112
8.5 - Resultados para o cenário <i>Low-P</i>	114
8.6 - Resultados para o cenário <i>High-P</i>	119
8.7 - Informações sobre as tecnologias	125
8.8 - Informações sobre os serviços	125
8.9 - Principais resultados da seção 8.3.3.1	126
8.10 - Principais resultados da seção 8.3.3.2	130
10.1 - Informações sobre as tecnologias	155
10.2 - ERBs com demandas precisas	156
10.3 - ERBs com demandas imprecisas	156
10.4 - Dados de demanda imprecisa em todas as ERBs	157
10.5 - Soluções de rede para o cenário 10.4.1 (5 ERBs imprecisas)	160
10.6 - Impacto do número de ERBs com demanda imprecisa	167
10.7a - Desempenho computacional sem o uso de “ <i>limite inferior</i> ”	168
10.7b - Decisões realizadas sem o uso de “ <i>limite inferior</i> ”	168

10.8a - Desempenho computacional com o uso de “ <i>limite inferior</i> ”	168
10.8b - Decisões realizadas com o uso de “ <i>limite inferior</i> ”	168

LISTA DE TERMOS TÉCNICOS

AA	– Área de Atendimento
ADSL	– <i>Asymmetric Digital Subscriber Line</i> (Linha Digital de Assinante Assimétrica)
AE	– Área de Estação
AMPL	– <i>A Modeling Language for Mathematical Programming</i> (Linguagem de Modelagem para Programação Matemática)
ApF	– APON-FTTC
APON	– <i>ATM-based Broadband Passive Optical Network</i> (Rede Óptica Faixa-Larga baseada em ATM)
ATM	– <i>Asynchronous Transfer Mode</i> (Modo de Transferência Assíncrono)
CATV	– <i>Community Antenna TV</i> (TV a cabo)
CC	– Central de Comutação
CCC	– Central de Controle e Comutação do SMC (=BSC/MSC – <i>Base Station Controller / Mobile Switching Center</i>)
CDMA	– <i>Code Division Multiple Access</i> (Acesso Múltiplo por Divisão de Código – Padrão de Interface Aérea para o SMC)
C_N-ME_M	– Capítulo N – Modelo Exato M
C_N-MI_M	– Capítulo N – Modelo Impreciso M
ERB	– Estação Rádio Base (=BTS – <i>Base Transceiver Station</i>)
ET	– Estação Telefônica
EM	– Estação Móvel – Usuário do SMC
E1	– Especificação de Taxa de Transmissão = 2,048 Mbps
fam	– fator de atendimento mínimo obrigatório
fc_s	– fator de conversão de taxa de transmissão do serviço s
fdd	– fator de disponibilidade de duto
FITL	– <i>Fiber-in-the-Loop</i>
FLC	– Faixa-Larga Comercial
FLR	– Faixa-Larga Residencial
F-PLIM	– <i>Fuzzy</i> – PLIM
FSAN	– <i>Full Services Access Networks</i> (Rede de Acesso para Todos os Serviços)

FTTC	– <i>Fiber-to-the-Curb</i> (Fibra até a Calçada)
FTTH	– <i>Fiber-to-the-Home</i> (Fibra até o Usuário)
GHz	– <i>GigaHertz</i>
GSM	– <i>Global System for Mobile Communications</i> (Sistema Global para Comunicações Móveis – Padrão de Interface Aérea para o SMC)
HDSL	– <i>High-data-rate Digital Subscriber Line</i> (Linha Digital de Assinante com Alta Taxa de Dados – Transmissão Simétrica)
IFC	– <i>Installed First Cost</i> (Custo de Instalação)
IU	– Central de Comutação Interurbana
Kbps	– <i>Kilobits</i> por segundo
LAN	– <i>Local Area Networking</i> (Rede Local)
Mbps	– <i>Megabits</i> por segundo
MET	– Solução Metálica
MHz	– <i>MegaHertz</i>
NPV	– <i>Net Present Value</i> (Valor Presente)
NT	– <i>Network Termination</i> (Terminador de Rede)
ODNI	– <i>Optical Distribution Network Interface</i> (Interface de Rede para Distribuição Óptica da Rede APON)
OLT	– <i>Optical Line Terminal</i> (Terminal de Linha Óptico da Rede APON)
ONU	– <i>Optical Network Unit</i> (Unidade de Rede Óptica da Rede APON)
PABX	– <i>Private Automatic Branch Exchange</i> (Central Privada de Comutação Automática)
PL	– Problema Linear
PLIM	– Problema de Programação Linear Inteira Mista
PLP	– <i>Parametric Linear Programming</i> (Programação Linear Paramétrica)
PMO	– Programação com Múltiplos Objetivos
PO	– Pesquisa Operacional
PON	– <i>Passive Optical Networks</i> (Rede Óptica Passiva)
QoS	– <i>Quality of Service</i> (Qualidade do Serviço)
RDSI	– Rede Digital de Serviços Integrados
rhs	– <i>right-hand-side</i>
RNT	– Rede Nacional de Telefonia
SFC	– Sistema de Acesso Fixo Cabeado
SDH	– <i>Synchronous Digital Hierarchy</i> (Hierarquia Digital Síncrona)

SMC	– Sistema de Acesso Móvel Celular
SNI	– <i>Service Network Interface</i>
SP-J	– Subproblema - J
SS	– Seção de Serviço
ST	– Solução Tecnológica
STM - N	– <i>Synchronous Transport Module - Level N</i> (Módulo de Transporte Síncrono -Nível N)
SV _N	– Serviço N
Teles	– Empresas Operadoras de Sistema de Telecomunicações
T _N	– Tarefa N
VoD	– <i>Video on Demand</i> (Vídeo sob Demanda)
xDSL	– <i>Digital Subscriber Line</i> (Linha Digital de Assinante)
WWW	– <i>Wide World Web</i>
3G	– Terceira Geração do Sistema de Acesso Móvel Celular

Capítulo 1

APRESENTAÇÃO

1.1 – O Contexto Atual do Setor de Telecomunicações

Os sistemas de telecomunicações estão atualmente em fase de grande transformação e expansão com o desenvolvimento de novos tipos de serviços, principalmente os de multimídia e de faixa-larga.

O ambiente competitivo obriga as empresas operadoras (as “Teles”) a investirem continuamente, tanto na evolução tecnológica quanto nos serviços oferecidos. A expansão do sistema fica condicionada à análise das estratégias de mercado, as quais exigem o levantamento das demandas dos serviços e o estudo sobre as diferentes possibilidades tecnológicas a adotar. Grandes velocidades de comutação e transmissão, baixas taxas de erro e atrasos aceitáveis são alguns dos atrativos imprescindíveis para se conquistar e estimular a fidelidade de um cliente em potencial.

Tomem-se por exemplo os sistemas de acesso, porta de entrada do usuário ao sistema de telecomunicações. Eles foram desenvolvidos, a princípio, para o provimento do serviço de VOZ. Atualmente, eles encontram-se em contínua transformação objetivando uma plataforma faixa-larga multimídia.

No caso do acesso fixo cabeado, os sistemas de transmissão são um alvo direto destas transformações. Por um lado, o amadurecimento da tecnologia óptica digital, que combina a utilização de fibras ópticas com novos padrões em equipamentos, possibilita o dimensionamento de sistemas com altas taxas de transmissão e enorme grau de compartilhamento nos enlaces, cenário ideal para o oferecimento dos novos serviços. Por outro, a infra-estrutura existente para a rede metálica é um patrimônio que ainda justifica investimentos em tecnologias capazes de prolongar a sua vida útil e criar condições para superar algumas de suas limitações quanto à comunicação de dados em alta velocidade.

No caso do acesso móvel celular, criar condições para o sistema prover serviços com qualidade comparável àquela do sistema fixo cabeado é uma meta em constante avaliação. Além da mobilidade do usuário, inerente ao sistema, a tarefa de agregar novos serviços orienta duas frentes de estudo: uma é responsável pelo planejamento da área de cobertura (interface aérea) e a outra pelo dimensionamento da infraestrutura. Comumente, a primeira precede a segunda. A escolha da localização e altura das antenas gera os parâmetros necessários (por exemplo, demanda a ser atendida) para o dimensionamento dos equipamentos de transmissão e comutação. Atualmente, o sistema como um todo está sofrendo grandes transformações, prometidas pela chamada *Terceira Geração* (3G) do sistema. A oferta de serviços faixa-estreita e faixa-larga com qualidade estimulam a implantação de infra-estruturas com alta capacidade e que sejam ao mesmo tempo robustas e flexíveis.

O planejamento dos sistemas fica, portanto, condicionado a estas transformações. Por um lado, é possível haver seletividade no atendimento da demanda, o que significa dizer que as demandas potencialmente mais lucrativas serão prioritárias. Por outro lado, existe a variedade de serviços a oferecer, cada qual gerando receita diferenciada e eventualmente exigindo equipamentos, topologias e meios de transmissão específicos.

A limitação orçamentária, naturalmente, é outro fator a ser previsto, pois nem sempre é possível implantar todos os sistemas necessários ao atendimento pleno da demanda. O dimensionamento dos sistemas precisa, portanto, contemplar fatores técnicos e econômicos que vão além da tarefa de planejar a rede objetivando o custo mínimo, seja de implantação, aluguel, manutenção e/ou operação. Implantar soluções que signifiquem garantia de participação no mercado e receitas compensadoras é uma questão de sobrevivência.

Assim, a expansão dos sistemas de acesso requer intensa atividade de planejamento. Onde, quando, quanto e como investir são questões para as quais o planejamento deve encontrar respostas. A enorme quantidade de opções técnico-mercado-lógicas a analisar requer de antemão escolhas por si mesmas difíceis. Além disso, o porte dos problemas e a velocidade das transformações exigem metodologias de planejamento consistentes, flexíveis (capazes de suportar diferentes cenários) e apoiadas em ferramentas computacionais. Os valores significativos geralmente envolvidos neste tipo de situação tornam desejável o uso de sistemas de apoio à decisão, baseados em modelos matemáticos.

Uma característica bastante comum entre as metodologias de planejamento de sistemas de acesso é o fato de que o dimensionamento da rede depende da precisão com que os dados de entrada são apresentados aos modelos. Assim, os dados, como por exemplo a penetração (aceitação) de um determinado serviço, são elementos fundamentais que precisam ser fornecidos ao planejador. Porém, estas informações “precisas” nem sempre estão disponíveis durante a etapa de planejamento, o que é natural num contexto de rápido desenvolvimento tecnológico e surgimento de novos serviços. O resultado do planejamento, portanto, pode ser sensível à variação destes dados de entrada. A ferramenta computacional desenvolvida para este fim também precisa estar preparada para absorver estas “imprecisões” existentes nos dados do planejamento.

1.2 – Proposta da Tese

Tendo em vista a conjuntura delineada acima, este trabalho tem como objetivo propor uma metodologia e modelos de otimização que auxiliem na etapa de planejamento de sistemas de telecomunicações. O sistema de acesso fixo cabeado e a infra-estrutura do sistema de acesso móvel celular são os objetos de estudo. Procura-se planejar a transformação destes sistemas no sentido de permitir a prestação de novos serviços através da implantação de novas tecnologias. Os modelos procuram refletir o ambiente de competição entre as soluções tecnológicas e os serviços. São abordados dois critérios de otimização durante a busca de soluções: minimização de custo e maximização de receita, com maior atenção ao último. Problemas de programação linear inteira mista (PLIM), com variáveis 0-1, representam o padrão de modelos propostos e exaustivamente avaliados.

Para atender o requisito de flexibilidade, os modelos são implementados de forma a admitirem dados imprecisos. A imprecisão nos dados de demanda é tomada como exemplo. A técnica explorada e aplicada é a de conjuntos nebulosos (*fuzzy sets*). São discutidas maneiras de resolver o problema contendo tais imprecisões. O procedimento de resolução que obteve maior atenção resulta da análise paramétrica para os problemas de programação linear inteira mista desenvolvidos.

Os modelos são seguidamente reformulados, de maneira a avaliar cenários de planejamento tanto para os sistemas de acesso fixo cabeado quanto para a infra-estrutura de sistemas de acesso móvel celular. Eles permitem gerar, analisar e

interpretar um amplo espectro de soluções diante da confiabilidade do planejador sobre os dados de entrada.

1.3 – Organização do Trabalho

Para atingir aquilo a que se propõe, esta tese está organizada em quatro partes.

A primeira parte contextualiza o problema e formaliza uma metodologia para o planejamento de sistemas de acesso. Ela está dividida em três capítulos:

Capítulo 2 – descreve o sistema de telecomunicações. Atenção maior é dada às formas de acesso do usuário. Adicionalmente, os serviços são caracterizados e a necessidade de expansão dos sistemas é estabelecida. A descrição não pretende ser completa, mas é suficiente para o nível de detalhe seguido no restante do trabalho.

Capítulo 3 – descreve quais as soluções tecnológicas que podem (ou poderão!) ser utilizadas na expansão dos dois sistemas de acesso, fixo cabeado ou móvel celular. Os diferentes meios de transmissão (cabo metálico, cabo de fibras, sistemas rádio) são apresentados. São especificadas topologias, configurações de nós e equipamentos.

Capítulo 4 – discute o problema do planejamento de sistemas de acesso e propõe uma metodologia para realizá-lo. Apresenta os procedimentos mínimos necessários a serem realizados pelo planejador para desenvolver os estudos de evolução da rede. Um dos destaques fica por conta da escolha do critério de otimização. O planejamento orientado à maximização de receita é o mais explorado.

A segunda parte formaliza o modelo geral de maximização de receita, bem como as suas adaptações e aplicações. Ela está dividida em 2 capítulos:

Capítulo 5 – propõe um modelo de programação linear inteira mista, com variáveis 0-1, para ser aplicado no dimensionamento dos diversos segmentos do sistema de acesso do usuário. Esse modelo é chamado de “exato”, pois não supõe a existência de nenhum tipo de imprecisão nos dados.

Capítulo 6 – são discutidas duas aplicações do modelo de maximização de receita. Uma para o sistema de acesso fixo cabeado, onde são consideradas duas

opções tecnológicas (metálica e óptica) capazes de prover quatro tipos de serviço. Outra para a infra-estrutura do sistema de acesso móvel celular, sendo avaliadas três opções tecnológicas (metálica, óptica e rádio) capazes de oferecer dois perfis de serviço.

A terceira parte apresenta as formalizações necessárias para se incorporar dados de demanda imprecisa ao modelo de maximização de receita. Ela está dividida em dois capítulos:

Capítulo 7 – discute a transformação do modelo PLIM no sentido de incorporar imprecisão sobre os dados de demanda dos serviços. Técnicas baseadas em conjuntos nebulosos são adotadas; discute-se seu impacto no modelo e apresentam-se propostas de resolução.

Capítulo 8 – relata as aplicações do modelo com dados imprecisos para os dois sistemas de acesso: fixo cabeado e móvel celular. Diversos cenários de demanda e preferências de atendimento são avaliados.

A quarta parte descreve um método heurístico implementado para resolver o problema paramétrico resultante da modelagem *fuzzy* para os dados imprecisos. Ela está dividida em dois capítulos:

Capítulo 9 – apresenta regras heurísticas e procedimentos computacionais para desempenhar a análise paramétrica do PLIM proposto. O método propõe resolver o PLIM em valores fixados para o parâmetro de controle dos dados de demanda e, posteriormente, juntar estas soluções através de análise paramétrica linear.

Capítulo 10 – discute a aplicação completa da metodologia no planejamento da infra-estrutura do sistema de acesso móvel celular. O estudo é dirigido segundo alguns critérios de atendimento da demanda, que permitem analisar inúmeras possibilidades. Diretrizes de planejamento são obtidas, segundo a “*classificação de soluções de rede*”, a qual é orientada pela confiança atribuída aos dados de demanda.

Os Capítulos de 4 a 10 demonstram bem a validade, o mérito e a relevância desta tese. Primeiro, o problema de planejamento de sistemas de acesso é formalizado e é proposto um modelo PLIM adaptável a variados cenários (Capítulos 4, 5 e 6). Segundo, um estudo da competição entre soluções tecnológicas e serviços é

desenvolvido em uma plataforma bastante flexível, capaz de acomodar dados de demanda cujos valores não são precisamente conhecidos no instante do planejamento (Capítulos 7, 8, 9 e 10).

Vale ressaltar que a mudança de paradigma em relação ao critério de otimização (orientado a receita) e a maneira como ele foi resolvido podem ajudar na concepção de abordagens semelhantes para os problemas enfrentados pelas Teles. A maneira como a metodologia foi formalizada e implementada em computador conferem-lhe um certo caráter genérico, permitindo que a mesma seja especializada para resolver problemas de projeto com características semelhantes às aqui avaliadas.

Os resultados obtidos deste trabalho também resultaram em publicações e participações em congressos científicos (nacionais e internacionais) das áreas de Telecomunicações, Pesquisa Operacional e *Fuzzy Sets*, conforme se pode perceber pela análise das referências bibliográficas listadas.

Parte I

O PROBLEMA E A METODOLOGIA

Capítulo 2

SISTEMAS DE TELECOMUNICAÇÕES DEFINIÇÕES E TENDÊNCIAS

2.1 – Introdução

Um sistema de telecomunicações pode ser definido como um conjunto organizado de equipamentos e meios de transmissão, que permite a coleta, o endereçamento, o transporte e a entrega de informação, a partir de uma fonte, para um ou mais destinatários distantes e especificados, mantida a privacidade e integridade da informação (Barradas, 1995). Existem muitas maneiras pelas quais os usuários de telecomunicações podem ser interligados. Entretanto, o tipo de informação a ser transmitida (vídeo, dados, telefonia convencional, etc.) impõe exigências sobre alguns aspectos das redes, levando-as a serem, na maioria das vezes, especializadas, e não totalmente independentes dos serviços que oferecem. Até há pouco tempo as funções eram divididas, por exemplo, entre Operadoras de *TV a Cabo* (CATV), Provedores de Internet e Operadoras de Telefonia. Atualmente, agregar outros serviços aos já oferecidos chega a ser até uma questão de sobrevivência.

A rede de telefonia é a que apresenta maior apelo popular, sendo altamente capilarizada, o que possibilita às empresas operadoras do sistema a disponibilização do serviço de VOZ a milhões de usuários. O maior desafio destas Teles é adaptar suas redes para o fornecimento de novos serviços, os quais exigem taxas de transmissão bem mais elevadas que aquela dispendida para o serviço de VOZ. Dentro do sistema de telefonia, o *Sistema de Acesso* é o segmento que sofre as maiores transformações.

A seguir é feita uma descrição geral do sistema de telecomunicações, com ênfase no segmento de acesso. Os principais parâmetros que definem um serviço são apresentados e a necessidade de se dimensionar um sistema de acesso multi-serviço faixa-larga é justificada.

2.2 – Sistema de Telecomunicações

O sistema de telecomunicações aqui tratado é baseado na *Rede Nacional de Telefonia* (RNT), a qual encontra-se em constante evolução, no sentido de habilitar-se à prestação de novos serviços, além daquele de VOZ. A Figura 2.1 apresenta os principais componentes deste sistema (DeSousa, 1999a; Carlson, 1998a; Formigoni, 1995a).

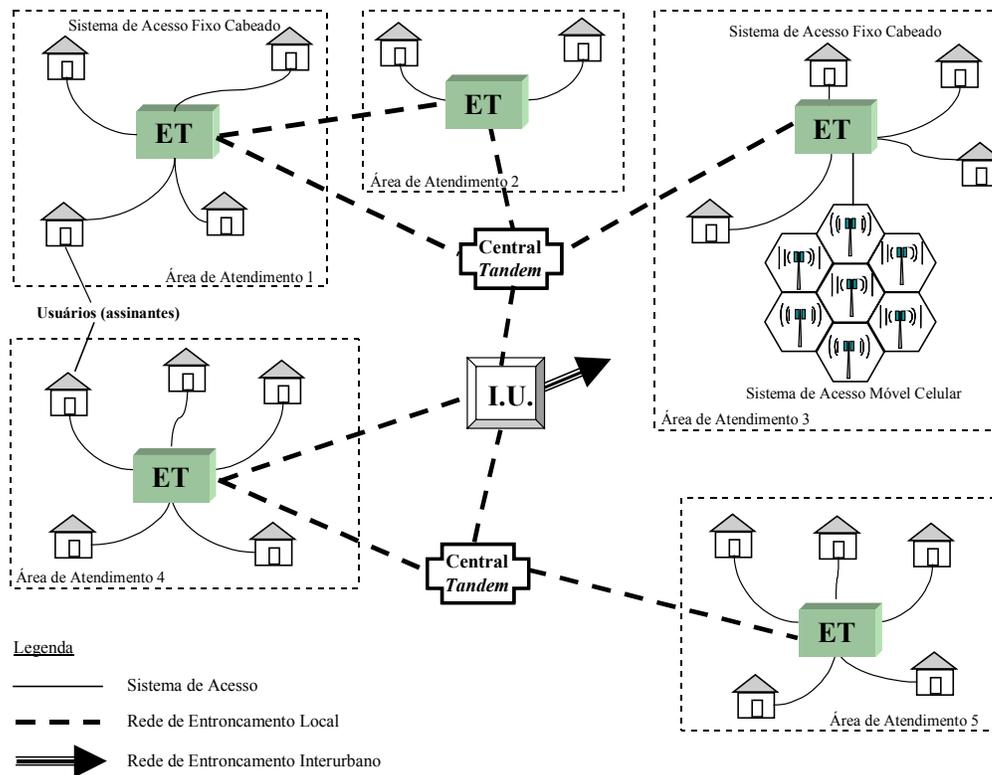


Figura 2.1 - Principais componentes de um sistema de telecomunicações.

Neste sistema cada usuário (denominado *assinante*) é ligado a uma *Estação Telefônica* (ET). Na ET, equipamentos de comutação (as *Centrais Locais de Comutação - CC*) permitem que cada assinante possa se comunicar com os demais. Em função da capacidade de processamento, tecnologia empregada e critérios de planejamento, o sistema pode ser dividido em três níveis hierárquicos: *Sistema de Acesso*, *Rede de Entroncamento Local* e *Rede de Entroncamento Interurbano*. A seguir descrevemos cada um destes segmentos.

Sistema de Acesso

É a coleção de equipamentos e infra-estrutura necessária para realizar a interligação dos assinantes às suas respectivas estações telefônicas. Cada ET pode atender um determinado número de assinantes cobrindo uma *Área de Estação* ou *Área de Atendimento*. O sistema de acesso pode ser dimensionado em várias topologias: ponto-a-ponto, ponto-multi-ponto ou barramento compartilhado.

O planejamento desta parcela do sistema de telecomunicações é o objeto de interesse deste trabalho. Na Seção 2.3, a seguir, ela é descrita com maiores detalhes.

Rede de Entroncamento Local

Esta parcela do sistema de telecomunicações é comumente chamada de *Rede de Transporte*. Ela promove a interligação de ETs de uma mesma área local, como por exemplo uma cidade, para permitir a conexão entre assinantes de diferentes áreas de atendimento. As ETs são ligadas diretamente entre si ou através de *Centrais-Tandem*. Atualmente, a fibra óptica é o meio de transmissão mais utilizado na rede de entroncamento local, o que possibilita o tráfego de informações em altas velocidades.

Rede de Entroncamento Interurbano

A interligação entre as diferentes áreas locais é feita através de *Centrais de Comutação Interurbana* (IU). Diversos sistemas de transmissão podem ser usados, dependendo das distâncias e do tráfego existente. Podem ser usadas fibras ópticas, enlaces via rádio microondas e até mesmo conexões por satélite.

Metodologias de planejamento para o entroncamento local e interurbano podem ser encontradas em Bergamaschi (2001).

2.3 – Principais Componentes do Sistema de Acesso

Atualmente, as duas principais opções de acesso para o usuário do sistema de telecomunicações, descrito anteriormente, são: utilizar uma rede cabeada (*Sistema de Acesso Fixo Cabeado* - SFC) ou o *Sistema de Acesso Móvel Celular* (SMC).

2.3.1 – Sistema de Acesso Fixo Cabeado - SFC

O sistema de acesso fixo cabeado, tal como se encontra hoje, utiliza, principalmente linhas dedicadas para conectar cada usuário à ET. Fisicamente, o enlace do usuário consiste de um cabo metálico (de cobre) segmentado ao longo do percurso usuário-ET (Figura 2.2). A exceção fica por conta dos chamados “grandes clientes” (bancos, condomínios, entre outros), que por necessitarem de altas taxas de transmissão e maior confiabilidade, podem ter sua demanda atendida também através de cabos ópticos.

A área de atendimento é dividida em *Seções de Serviço* (SS), as quais são atendidas por um ponto de flexibilização de rede, o chamado *Nó de Acesso*. A rede de cabos metálicos, em geral aérea, responsável pela ligação dos assinantes ao nó de acesso, recebe o nome de *Rede de Distribuição* (ou *Rede Secundária*). As ligações dos nós de acesso das SSs à ET constituem a *Rede de Alimentação* (ou *Rede Primária*), que utiliza, em sua maior parte, cabos de cobre ou cabos ópticos instalados em dutos subterrâneos.

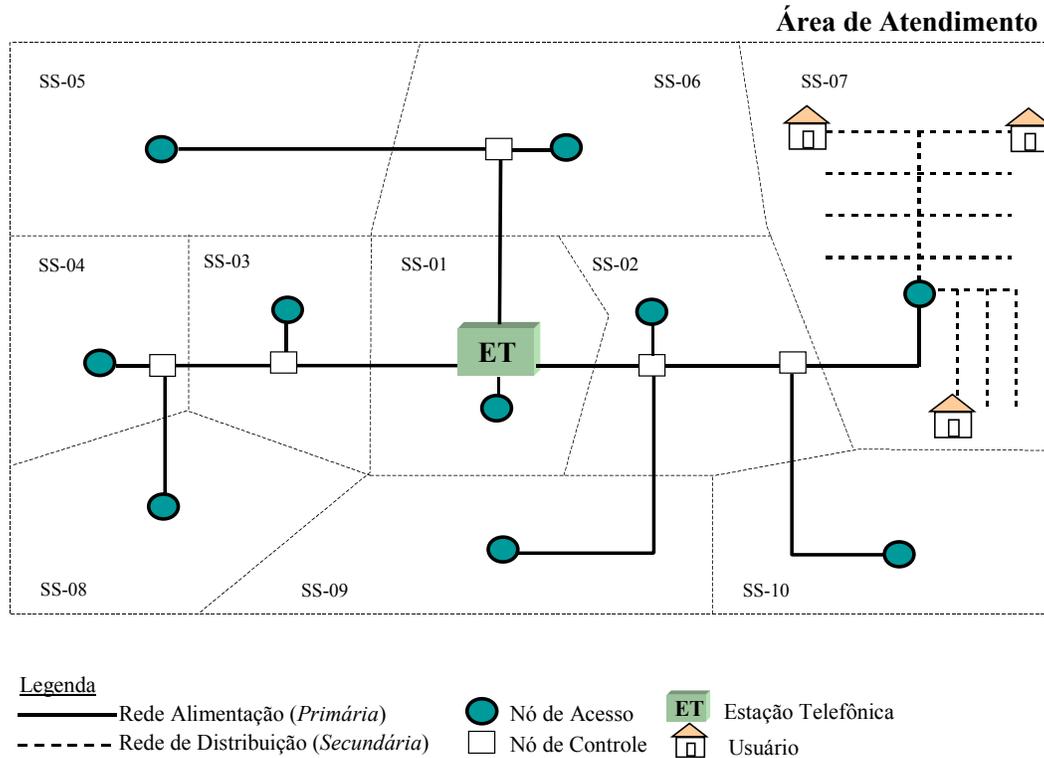


Figura 2.2 - Sistema de telecomunicações, destacando o SFC.

2.3.2 – Sistema de Acesso Móvel Celular - SMC

Devido às suas características de flexibilidade de projeto, grande velocidade de implantação e baixo custo de infra-estrutura, as redes sem fio surgem como opções atraentes para os sistemas de acesso objetivando um rápido atendimento de demandas. Estas características possibilitam a entrada de competidores na rede local, bem como o atendimento de assinantes em tempos cada vez menores, tanto por exigência de concorrência como por exigência de regulamentação.

A Figura 2.3 mostra o sistema de acesso móvel celular padrão. Ele pode ser dividido em dois segmentos, o *Usuário* (fixo ou móvel) e a *Infra-estrutura* do sistema (fixa).

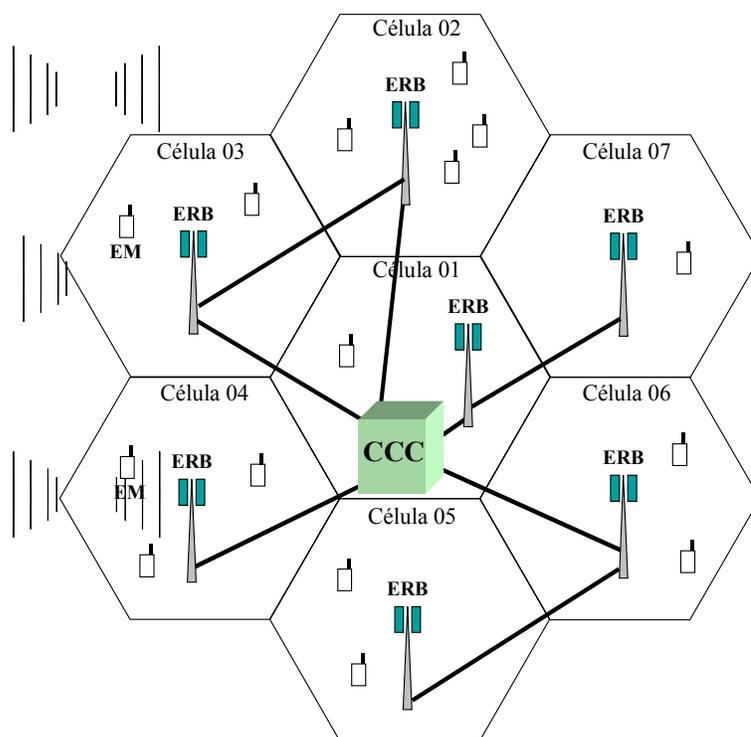


Figura 2.3 - Sistema de telecomunicações, destacando o SMC.

A Conexão do Usuário

A área de atendimento é dividida em células. Cada célula possui uma *Estação Rádio Base* (ERB) onde são alocados os equipamentos que permitem o acesso do usuário (*Estação Móvel* – EM) ao sistema. Cada conexão do usuário é feita através de canais de rádio. O sistema pode ser ajustado para permitir (ou não) a mobilidade do usuário através das células.

Infra-estrutura de Interligação de Nós de Acesso (ERBs)

Esta é a parcela fixa do sistema. As principais tarefas de gerenciamento, tais como comutação, controle e tarifação, são de responsabilidade da *Central de Comutação e Controle* (CCC). Ela é responsável também pela conexão do SMC com outros sistemas.

A interligação ERB – CCC pode ser feita utilizando-se cabo metálico, fibra óptica ou rádio microondas, cada qual com diferentes taxas de transmissão e multiplexação.

A infra-estrutura fixa do sistema de acesso móvel celular também é objeto de estudo desta tese e será retomada mais adiante.

2.4 – Serviços

Um serviço de telecomunicações pode ser definido como: "um conjunto de funções oferecidas a um usuário por um fornecedor, para satisfazer uma necessidade específica de telecomunicações" (Sexton e Reid, 1997). O surgimento de novas tecnologias de transmissão e comutação habilita o sistema de acesso a suportar vários tipos de serviços. Entre os já oferecidos ou ainda previstos podemos citar:

- *VOZ*: é o serviço clássico. Os sinais transmitidos podem ser analógicos ou digitais;
- *Dados em Baixa Velocidade*: o telex, o fax e a Internet discada são bons exemplos dessa categoria. Mesmo que os dados sejam originalmente digitais, um processo de modulação permite o aproveitamento da rede metálica;
- *Vídeo-Fone*: além da transmissão de voz, no vídeo-fone ocorre a transmissão da imagem dos dois usuários envolvidos na conexão. A comunicação é ponto-a-ponto, bidirecional e em tempo real;
- *Vídeo-Conferência*: o serviço de vídeo-fone é oferecido simultaneamente a diversos usuários;
- *CATV*: serviço de difusão de sinais de TV via cabo. Vários canais de imagem e som são oferecidos ao usuário simultaneamente;

- *VoD* (Vídeo sob Demanda): neste serviço o sinal é transmitido num horário pré-definido pelo usuário, ou seja, é um serviço de CATV cuja programação é controlada pelo assinante;
- *Tele-Educação*: possibilita o ensino à distância. A rede deve ser de alta velocidade, capaz de transmitir texto, figuras, animação interativa, vídeo clips e *World Wide Web* (WWW);
- *Teleworking*: é uma forma flexível de trabalho que pode atender a um leque enorme de atividades, principalmente aquelas que possam apresentar um vínculo remoto do empregado com o empregador ou com o tradicional lugar de trabalho. *Desktops on-line* seriam instalados na residência do empregado disponibilizando telefonia, fax, e-mail, vídeo-conferência, etc.;
- *Tele-Jogos*: atualmente, é possível encontrar vários *sites* na Internet que oferecem a prática de jogos em rede. Porém a qualidade do serviço ainda é inferior às expectativas do usuário. As previsões são de redes mais velozes, capazes de suportar animações em 3D com alta definição;
- *Acesso a Banco de Dados*: possibilita a recuperação de informações e acesso interativo. O usuário pode, por exemplo, fazer compras em *shopping centers* (*Homeshopping*), movimentação de conta bancária (*Homebanking*), reservas em um restaurante, etc.;
- *Dados em Alta Velocidade*: permite a interconexão de redes de computadores. Exige transmissão bidirecional em altas velocidades;
- *Monitoração e Controle Remotos*: possibilita várias aplicações, tais como: monitoração de processos industriais, proteção residencial/comercial, telemedicina, etc.

Para a disponibilização destes serviços (ou outros, que por ventura venham a ser oferecidos) as Teles precisam estar atentas as seguintes informações, tanto de serviço quanto de rede:

- *velocidade (ou taxa) de transmissão downstream (sentido CC → usuário) e upstream (sentido usuário → CC)*: é o principal atributo do serviço. Num planejamento, este parâmetro define as especificações mínimas de velocidade de transmissão exigidas da rede. É medida em *Kilobits por segundo* (Kbps) ou

Megabits por segundo (Mbps). A Tabela 2.1 apresenta estes valores para alguns serviços;

- *simetria/assimetria*: se a taxa de transmissão *downstream* é igual (ou não) à taxa de transmissão *upstream*;
- *tipo de tráfego*: se a transmissão é constante ou variável (em rajadas, por exemplo);
- *tolerância a erros*: se o serviço permite (e em quanto) taxa de erro de dados;
- *exigências quanto ao atraso* : se a transmissão é em tempo real ou não;
- *tipo de comutação* : se o serviço permite comutação por circuito ou por pacote (Waldman e Yacoub, 1997).

Tabela 2.1 - Velocidade de transmissão exigida pelos serviços.

Serviço	Velocidade de transmissão			
	<i>Downstream</i> mínima (Mbps)	<i>Upstream</i> mínima (Mbps)	<i>Downstream</i> adequada (Mbps)	<i>Upstream</i> adequada (Mbps)
Telefonia	0,064	0,064	0,064	0,064
Vídeo-fone	0,064	0,064	0,128	0,128
Vídeo-conferência	0,128	0,128	0,512	0,512
VoD	1 - 2	0,028	4 - 6	0,128
Tele-educação	0,144	0,064	4 - 6	0,512 - 1
<i>Teleworking</i>	0,128	0,128	4 - 6	1 - 2
Tele-jogos	0,028	0,028	0,512	0,512
<i>Homebanking</i>	0,028	0,028	0,256	0,128
<i>Homeshopping</i>	0,028	0,028	4 - 6	0,128
Telemedicina	0,128	0,064	4 - 6	1 - 2

Na prática, para contornar esta multiplicidade de especificações referentes aos serviços, grande parte das metodologias de planejamento procuram agrupar os serviços, colocando-os em conjuntos bem definidos, os quais exigem diferentes tipos de conexão. A seguir listamos os adotados neste trabalho (Ims et alii, 1997).

Serviços Faixa-Estreta (*narrowband*)

- *Canal de acesso básico em 64 Kbps simétricos*: a *Telefonia Convencional* (VOZ), sem a utilização de processos de compactação, é um exemplo deste tipo de serviço;

- *Canal de acesso básico em 144 Kbps simétricos*: serviço com as mesmas características daquele oferecido pela *Rede Digital de Serviços Integrados (RDSI)*, demandando dois canais de dados de 64 Kbps e um de 16 Kbps para sinalização (2B + D). Daqui em diante este serviço será referenciado apenas como “serviço RDSI”.

Serviços Faixa-Larga (*broadband*)

- *Faixa-Larga Residencial (FLR) de 2 Mbps e 8 Mbps*: para atendimento de demanda de serviços residenciais de 2 Mbps assimétricos e 8 Mbps assimétricos, respectivamente;

- *Faixa-Larga Comercial (FLC) de 2 Mbps*: para o atendimento de demanda de serviços comerciais com transmissão a 2 Mbps simétricos;

- *CATV*: distribuição de sinais de vídeo analógico em *broadcasting*, com largura de faixa de 6 MHz. Este serviço não é considerado neste trabalho.

Como as taxas de transmissão são diferenciadas para cada serviço, se o dimensionamento utiliza canais E1 (especificação de capacidade mais praticada entre os fabricantes de equipamentos = taxa de transmissão de 2,048 Mbps) como unidade de medida para as demandas, por exemplo, haverá a necessidade de se converter todas as demandas para esta unidade. A Tabela 2.2 apresenta esta conversão, indicando o número de usuários de cada serviço que podem ser agregados em um canal E1. O serviço de VOZ considerado é aquele sem a utilização de processos de compactação.

Tabela 2.2 - Usuários por canal E1.

Serviço	Número de usuários
VOZ	30
RDSI	13
FLR	1
FLC	1
CATV	Dependente do padrão de compactação

Outra consequência imediata deste agrupamento refere-se à própria disponibilização dos serviços. É natural admitir que os serviços RDSI, FLR e FLC incorporam o canal de VOZ.

2.5 – Necessidade de Evolução Contínua dos Sistemas de Acesso

Os sistemas de acesso foram desenvolvidos, a princípio, para oferecer o serviço de VOZ, e no caso particular do acesso fixo cabeado, ainda são baseados em pares metálicos. A capacidade de transmissão ainda é considerada baixa frente às velocidades exigidas pela maioria dos serviços. Assim, a obtenção de um sistema (fixo ou móvel) multi-serviço, capaz de disponibilizar várias informações simultaneamente, exige profundas modificações nestes sistemas.

Esta evolução não é um processo imediato. Os valores orçamentários envolvidos são enormes. O que se espera (e já está acontecendo) é uma migração em etapas para uma *Sistema de Acesso Multi-Serviço Faixa-Larga*, no qual possam conviver, harmoniosamente, diferentes tecnologias. As possíveis soluções tecnológicas que podem (ou poderão) ser utilizadas nesta evolução constituem o assunto do próximo capítulo.

Capítulo 3

SOLUÇÕES TECNOLÓGICAS PARA O SISTEMA DE ACESSO

3.1 – Introdução

A evolução dos sistemas de acesso, no sentido de transformá-los em sistemas multi-serviço, exige grandes investimentos por parte das empresas operadoras. A escolha de qual tecnologia adotar não é uma tarefa simples e muito menos um processo imediato. As previsões são de que a curto e médio prazo a tecnologia a ser adotada seja capaz de oferecer serviços faixa-estreita com alta penetração e serviços faixa-larga com baixa penetração. A longo prazo o sistema deve suportar também os serviços faixa-larga com alta penetração. Assim, a escolha deve ser criteriosa, de forma que uma decisão não venha gerar grandes restrições sobre expansões futuras.

São muitas as tecnologias a serem avaliadas, cada qual com suas nuances próprias. Aqui são apresentadas algumas delas: *Linha Digital de Assinante (xDSL)*, *Rede Óptica Passiva baseada em ATM-Asynchronous Transfer Mode (APON)*, *Modems Ópticos* e os *Sistemas via Rádio Microondas*. O objetivo não é prover uma visão completa das arquiteturas e tecnologias, e sim apresentar seus principais componentes em nível de detalhamento considerado suficiente para os propósitos dos capítulos subsequentes. Outras soluções tecnológicas podem ser encontradas em Toledo (2001).

3.2 – Soluções Tecnológicas para o SFC

3.2.1 – Linha Digital de Assinante - xDSL

Esta tecnologia é a que provoca as menores mudanças no sistema de acesso, sendo por isso também chamada de “solução conservadora”.

A parte metálica da rede permanece inalterada, considerando-se, inclusive, uma expansão em cabos metálicos para o atendimento de novos serviços. A grande mudança fica por conta de *modems* de alta velocidade que são colocados nas duas extremidades da rede (central de comutação e usuário).

A Figura 3.1 especifica os equipamentos exigidos por esta solução: na CC, nó de acesso e instalações do usuário. Maiores detalhes poderão ser encontrados em Toledo (2001) e Humphrey e Freeman (1997).

O armário de distribuição colocado no nó de acesso representa um ponto de flexibilidade onde, geralmente, ocorre a transição da rede subterrânea para aérea. Para o atendimento da telefonia (serviço VOZ), a rede não requer novos equipamentos. Para suportar os outros serviços (RDSI, FLR, FLC) são necessários diferentes tipos de equipamentos, descritos a seguir.

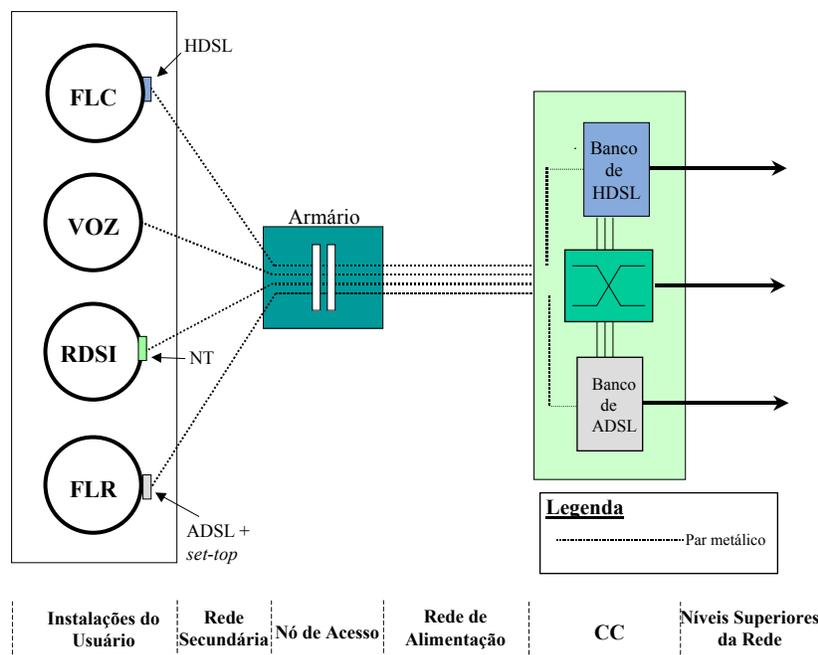


Figura 3.1 - Equipamentos considerados na solução xDSL.

Serviço RDSI

Para suportar o serviço RDSI, faz-se necessária a implementação desta funcionalidade na central de comutação e a utilização da interface RDSI nas dependências do usuário. Para cada usuário que demandar o serviço faz-se necessária a instalação de uma interface RDSI denominada *Terminador de Rede* (NT).

Serviço FLC

Para suportar esse serviço é necessário o uso de *modems High-data-rate Digital Subscriber Line* (HDSL), tanto na estação como no usuário. Tais equipamentos suportam uma transmissão de 2 Mbps simétrica em distâncias de até 4 Km, dependendo das condições em que se encontra a rede metálica. A utilização deste equipamento exige a disponibilidade de 2 pares de fios para a sua conexão.

Serviço FLR

Para atender este serviço serão utilizados *modems Asymmetric Digital Subscriber Line* (ADSL), na estação e no usuário. Além de viabilizar a transmissão de sinais de vídeo em 2 Mbps, utilizando um par de fios, o equipamento também suporta canal para transmitir o sinal de VOZ. Adicionalmente, considera-se a utilização de *set-top* nas dependências do usuário. O *set-top* é um equipamento que, juntamente com o controle remoto e a televisão, permitirá ao usuário conectar-se a um servidor de vídeo, escolher um filme e assisti-lo, podendo fazer uso das funções básicas que estão disponíveis no aparelho de videocassete (pausa, avanço e retrocesso lento ou rápido, etc.).

Para suportar este serviço na estação teremos, além dos *modems* ADSL, um comutador ATM, equipamentos de supervisão e gerência e, dependendo do tráfego demandado, um provedor de serviço local. O comutador ATM poderá estar instalado em outra localidade. Neste caso, ele será substituído por um multiplexador ligado a uma rede de transporte de alta velocidade (rede *backbone*). Neste trabalho estes componentes (menos o ADSL) serão considerados como integrantes do sistema de comutação da CC, e não do sistema de acesso, motivo pelo qual não estão representados na Figura 3.1.

3.2.2 – Rede Óptica Passiva Faixa-Larga Baseada em ATM - APON

A viabilidade de se utilizar a fibra óptica no sistema de acesso fixo cabeado surge com a perspectiva de demandas cada vez maiores por serviços faixa-larga, aliada à queda nos preços dos conversores eletro-ópticos. O objetivo é instalar cabos ópticos nos enlaces que ligam a CC aos nós de acesso, permitindo o compartilhamento do sistema por vários usuários. A longo prazo, prevê-se a fibra chegando também às dependências de cada usuário em particular.

Telecomunicações sobre *Redes Ópticas Passivas* (PON) constituem uma das primeiras opções de sistemas *Fiber-in-the-loop* (FITL). Nestes sistemas mais antigos utilizava-se uma infra-estrutura de fibra compartilhada por um conjunto de usuários para prover serviços de VOZ e RDSI.

A segunda geração (mais recente) de PONs, as chamadas APONs, é formada por sistemas que possibilitam altas taxas de transmissão, o que permite o oferecimento dos serviços faixa-larga. A arquitetura geral de uma APON pode ser representada conforme a Figura 3.2. Suas especificações técnicas são resultado das pesquisas do grupo *Full Services Access Networks* (FSAN), e podem ser encontradas em G.983 (1998). Seguem-se comentários a respeito dos principais componentes: *Optical Line Terminal* (OLT), *Optical Network Unit* (ONU), *Network Termination* (NT) e o *Splitter*.

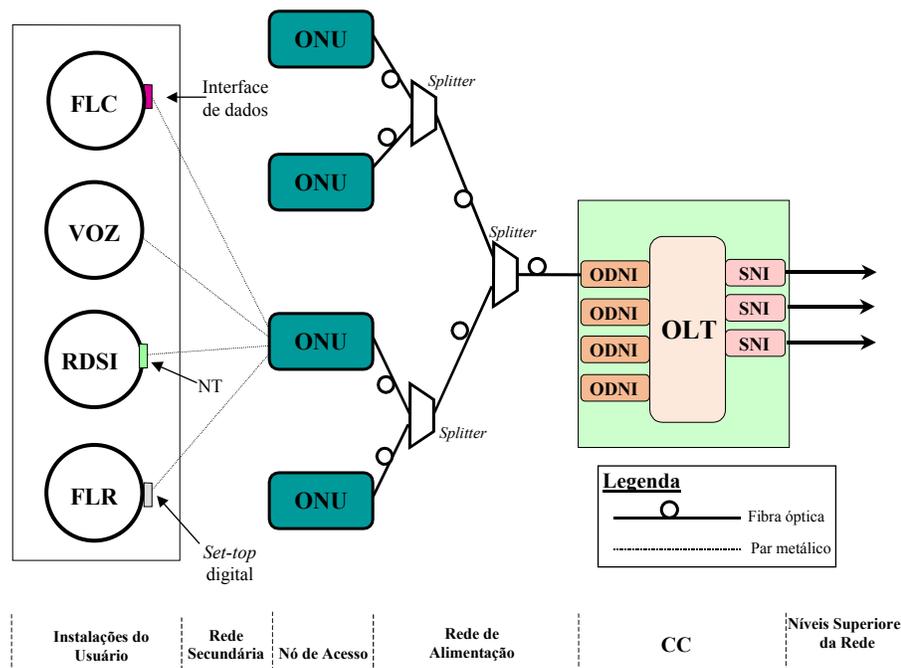


Figura 3.2 - Arquitetura de uma rede APON.

Optical Line Terminal (OLT)

Como mostra a Figura 3.2, o OLT é localizado na central de comutação e é considerado o principal equipamento da solução APON. Ele concentra diversas funções, trabalhando com serviços faixa-larga (FLR e FLC, por exemplo) e os serviços faixa-estrita (VOZ e RDSI, por exemplo). Sua capacidade varia com a distribuição de serviços a ser suportada.

Uma das principais funções do OLT é a conversão eletro-óptica, através de um transmissor (laser) e um receptor (fotodiodo), convertendo o formato ATM presente na rede PON em um formato ATM encapsulado em um quadro SDH STM-1 (*Hierarquia Digital Síncrona - Módulo de Transporte Síncrono – nível 1*) (Sexton e Reid, 1997). No sentido *downstream* o OLT recebe informações no formato SDH STM-1, converte para o formato APON (fluxo de células ATM) e as transmite, através da rede óptica, para as ONUs (*Unidade de Rede Óptica*). No sentido *upstream* o OLT recebe as informações multiplexadas no tempo em formato APON, converte este formato para SDH STM-1, e as envia para os níveis superiores da rede.

São apresentadas a seguir suas principais interfaces.

- *Optical Distribution Network Interface (ODNI)*: permite a conexão do OLT com as ONUs. A transmissão na fibra óptica no percurso OLT-ONU é em banda-base, limitada pela capacidade de cada ODNI, e depende de especificações do fabricante. Uma possível configuração seria 622 Mbps *downstream* e 155 Mbps *upstream*, permitindo aos usuários uma banda livre em torno de 600 Mbps e 150 Mbps, respectivamente.
- *Service Network Interface (SNI)*: são interfaces STM-1 que possibilitam a conexão do OLT a uma hierarquia superior da rede. Cada interface disponibiliza um tráfego de 155 Mbps (ambos os sentidos) para o OLT.

Optical Network Unit (ONU)

A ONU é o equipamento de conversão eletro-óptica responsável pela conexão entre os segmentos óptico e metálico da rede. Ela possui interfaces individualizadas para cada um dos serviços faixa-estreita e faixa-larga. A distância entre a ONU e o usuário pode variar de algumas dezenas de metros até 1.500m, dependendo da densidade de assinantes da área considerada. Portanto, os usuários que demandam mais largura de banda deverão estar mais próximos da ONU. Este aspecto poderá ser restritivo no procedimento de localização das ONUs.

A Figura 3.3 apresenta os principais componentes de uma ONU:

- Módulo comum: composto por um gabinete, um multiplexador ATM e sistema de alimentação e baterias;
- Uma ODNI: conversor eletro-óptico que fará comunicação com o OLT;

- Diferentes placas de assinante para diferentes serviços (VOZ, RDSI, FLR, FLC, por exemplo). A ONU também pode ser capacitada para a alocação dinâmica de banda.

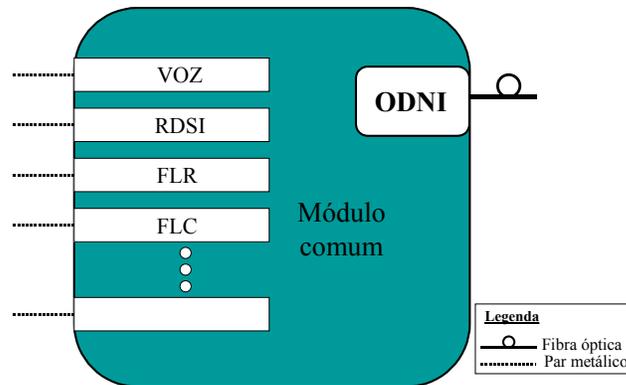


Figura 3.3 - Principais componentes de uma ONU.

Equipamentos no Usuário (NT – Network Termination)

É escolhida a configuração de rede em que todos os serviços serão transportados através de par metálico no trecho ONU-usuário. Os equipamentos terminais são diferenciados por serviço conforme a seguir:

- Interface RDSI (NT): para os serviços RDSI;
- *Set-top* digital: para o serviços FLR;
- Interface de dados: para os serviços FLC.

Splitter

Splitters são acopladores passivos utilizados na rede óptica permitindo ramificar as fibras que irão alimentar as ONUs (Figura 3.4), distribuindo o sinal óptico λ através de várias fibras. A quantidade de *splitters* é obtida em função da capacidade de cada ODNI e da topologia da rede (estrela simples, dupla-estrela passiva). Sua utilização pode se dar logo na saída da ODNI (na ET) e/ou ao longo do percurso ODNI-ONU.

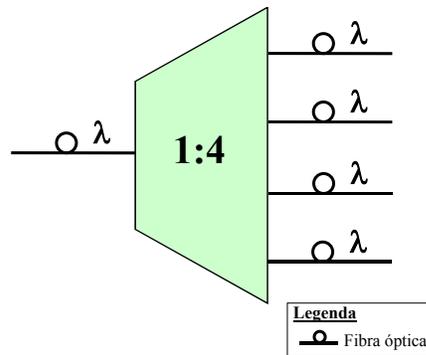


Figura 3.4 - Representação de um *splitter*.

Configurações de Atendimento para uma APON

A localização das ONUs é um parâmetro importante a ser considerado no dimensionamento das redes APONs. A sua proximidade do usuário, e conseqüentemente da fibra, caracteriza as seguintes configurações de atendimento:

- *Fiber-To-The-Curb (FTTC)*: nesta configuração a fibra chega até um armário de pedestal ou poste. A conversão eletro-óptica (na ONU) ocorre praticamente na quadra do usuário.
- *Fiber-To-The-Home (FTTH)*: nesta configuração uma ONU é dedicada a cada usuário. O enlace entre o OLT e as dependências do usuário é totalmente óptico.

Em termos econômicos a configuração FTTC atualmente é mais viável que a FTTH. Isto ocorre porque naquela configuração existe o compartilhamento da ONU entre vários usuários, reduzindo os custos de implantação do sistema.

3.3 – Soluções Tecnológicas para a Infra-estrutura do SMC

Conforme dito anteriormente, o planejamento do sistema SMC é feito em duas etapas:

Localização/Dimensionamento das ERBs

A conexão do usuário ao sistema é de responsabilidade da ERB. Ela é composta por uma interface para a terminação da rede de interconexão fixa, funções de modulação e demodulação, equipamentos rádio de transmissão e recepção. Pode ser alocada em torres, postes ou até mesmo sobre um telhado.

Nesta etapa do dimensionamento são definidas a altura das antenas, a área de cobertura, a alocação de frequências (que pode ser um procedimento estático ou dinâmico), e conseqüentemente a demanda a ser atendida em cada ERB. Vale salientar que este não é um procedimento trivial, uma vez que se deve analisar um espectro de frequências que em sua maioria é bem restrito, bem como as interferências inerentes aos sistemas rádio.

Atualmente, as tecnologias mais adotadas neste segmento da rede são a *Global System for Mobile communications* (GSM) e a *Code Division Multiple Access* (CDMA) (Yacoub, 2001). Este planejamento não faz parte do escopo deste trabalho.

Dimensionamento da Infra-estrutura

Esta etapa é realizada, geralmente, de forma seqüencial à anterior. Os dados referentes à localização/dimensionamento das ERBs são usados como dados de entrada para o planejamento da infra-estrutura, que, por sua vez, deve ser capaz de escoar o tráfego dos usuários, levando-se em conta as diversas opções tecnológicas disponíveis, escolhendo-se aquela (s) com melhor relação custo/benefício.

Nesta etapa do planejamento são definidos quais os sistemas de transmissão que deverão ser utilizados para fazer a interconexão entre as ERBs e a CCC. Este procedimento é semelhante ao realizado para as soluções cabeadas apresentadas anteriormente. Dentre as soluções tecnológicas que podem ser utilizadas destacam-se o *modem* HDSL, o *modem* óptico e o enlace via rádio microondas, descritos a seguir.

3.3.1 – Modem HDSL

A tecnologia HDSL, apresentada anteriormente, também pode ser aplicada ao dimensionamento da infra-estrutura do sistema de acesso móvel celular. A interconexão entre a ERB (que pode estar localizada, por exemplo, na posição de um armário) e a CCC é feita através de canais E1. Estes canais são formados a partir da multiplexação dos canais rádio previstos para atender a demanda em cada ERB. A Figura 3.5 destaca esta configuração de atendimento. Por apresentar hierarquia única, as conexões utilizando *modems* HDSL precisam ser do tipo ponto-a-ponto, o que configura uma topologia de rede do tipo estrela simples.

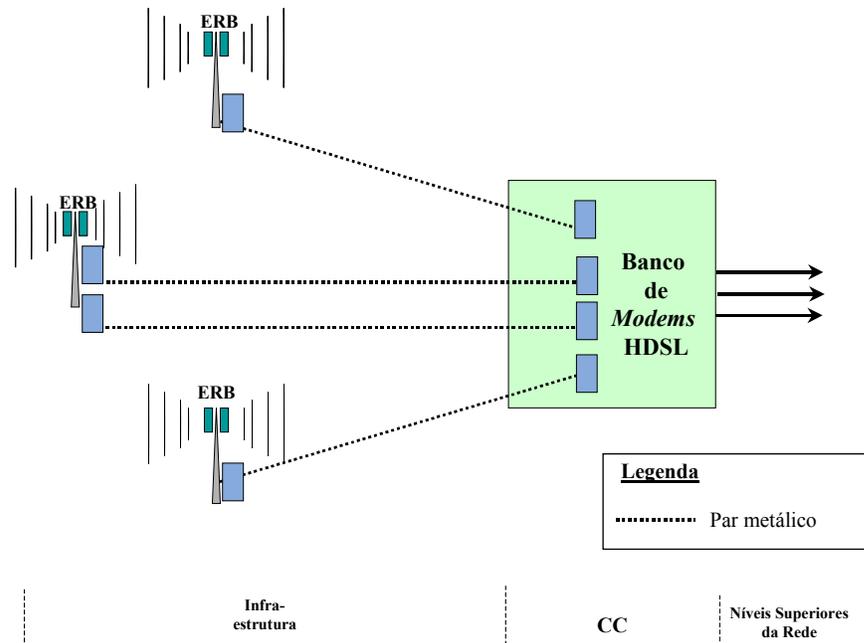


Figura 3.5 - Infra-estrutura do SMC, interligação de ERBs utilizando *modems HDSL*.

3.3.2 – Modem Óptico

É uma solução ponto-a-ponto que permite a transmissão de dados sobre fibras ópticas, tanto monomodo como multimodo, com emissão a laser, permitindo maior alcance e imunidade a interferências no sinal que os *modems* convencionais. Dentre as suas aplicações destacam-se:

- Interconexão de estações rádio base à CCC;
- Acesso a centrais privadas de comutação automática (PABX) de grande porte;
- Acesso a grandes clientes (taxa de transmissão $\geq 1 \times E1$);
- Acesso a provedores de internet;
- Acesso a *backbone* SDH.

Os *modems* ópticos, devido à sua constituição modular e ao seu sistema de gerenciamento, podem ser adquiridos em várias versões de capacidade, tais como $1 \times E1$, $2 \times E1$, $4 \times E1$, $8 \times E1$, $12 \times E1$ ou $16 \times E1$, nas configurações 1+0 (sem reserva de *link*) e 1+1 (com reserva de *link*). Sua capacidade pode ser ampliada pela adição de novos módulos, mesmo com o equipamento em operação. Alguns modelos e especificações técnicas mais detalhadas podem ser encontradas em AsGa (2004).

A Figura 3.6 apresenta a utilização dos *modems* ópticos na interconexão de ERBs-CCC. Podem ser adotadas ligações ponto-a-ponto nas topologias: estrela simples, dupla estrela e rota.

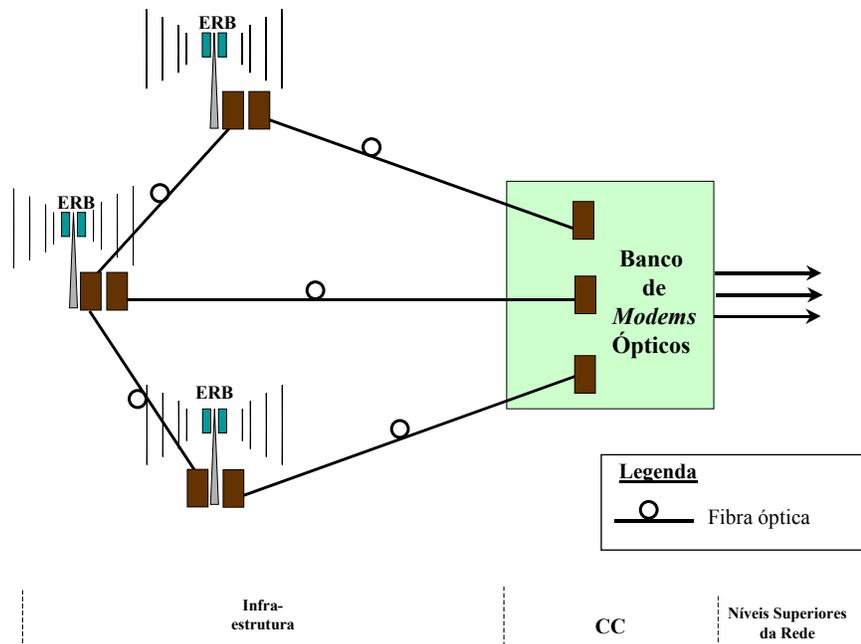


Figura 3.6 - Infra-estrutura do SMC, interligação de ERBs utilizando *modems* ópticos.

3.3.3 – Enlace via Rádio Microondas

As informações prestadas a seguir são baseadas nos sistemas PDH-SRAL, da Siemens (Siemens, 2004), e MINI-LINK E, da Ericsson (Ericsson, 2004).

A rápida instalação e alta flexibilidade de configuração são, sem dúvida, os principais fatores que fazem com que os equipamentos de rádio digital sejam bastante utilizados como forma de acesso. Entre suas aplicações destacam-se:

- Interconexões de ERBs com a CCC no SMC;
- Interconexão de redes corporativas, sendo indicados para realizar ligações entre PABXs e entre redes locais (LANs);
- Enlaces temporários e emergenciais;
- Derivações de *backbones* ou de rotas existentes.

A Figura 3.7 apresenta a utilização de rádios microondas nos enlaces de interconexão entre ERBs e a CCC. Estes sistemas operam na faixa de frequências que vai de 7 a 38 GHz (*Gigahertz*) e oferecem opções de topologia e de velocidade de

transmissão compatíveis com aquelas dos *modems* ópticos (1xE1, 2xE1, 4xE1, 8xE1, 16xE1, outras superiores).

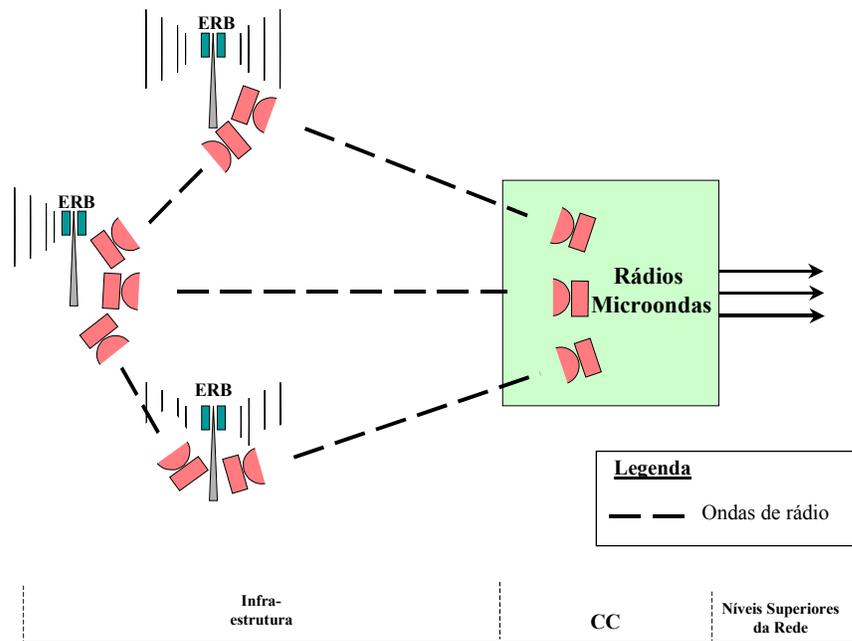


Figura 3.7 - Infra-estrutura do SMC, interligação de ERBs utilizando *rádio microondas*.

Capítulo 4

METODOLOGIA DE PLANEJAMENTO DE SISTEMAS DE ACESSO

4.1 – Introdução

Os sistemas de acesso vêm experimentando uma significativa transformação nos últimos anos. A evolução tecnológica possibilita a prestação de novos serviços, cada vez mais baratos e de melhor qualidade. As metodologias de planejamento a serem desenvolvidas (e aplicadas) precisam ser flexíveis o suficiente para contemplar essa diversidade de cenários, de maneira mais atual e realista.

A seguir é proposta uma metodologia de planejamento para os sistemas de acesso fixo ou móvel. Ela refere-se aos procedimentos mínimos necessários a serem realizados pelo planejador para efetuar os estudos de evolução da rede. Por ser uma atividade complexa, que envolve uma quantidade muito grande de informação, ela foi dividida em etapas, as quais são mostradas na Figura 4.1. As Seções a seguir descrevem quais são os procedimentos gerais relacionados com cada etapa.

4.2 – Definição do Horizonte de Planejamento

O planejamento poderá ser feito para um único período ou de modo estagiado, no qual são definidos um horizonte de planejamento (habitualmente de 3 a 5 anos) e vários estágios (de 1 em 1 ano, por exemplo).

A decisão de se considerar o planejamento de modo estagiado tem reflexos diretos na estrutura dos dados a ser utilizada. Como a demanda dos serviços e o preço de vários equipamentos modificam-se ao longo do horizonte de planejamento, para cada período considerado esses valores deverão ser atualizados. Conseqüentemente, a base de dados utilizada deverá contemplar essas variações.

O planejamento considerando-se somente um estágio acontece com frequência quando a Tele deseja um atendimento imediato de demanda reprimida (em um ano qualquer, por exemplo). Nestas condições, ele será mais simples e a quantidade de dados a ser manipulada também diminuirá sensivelmente.

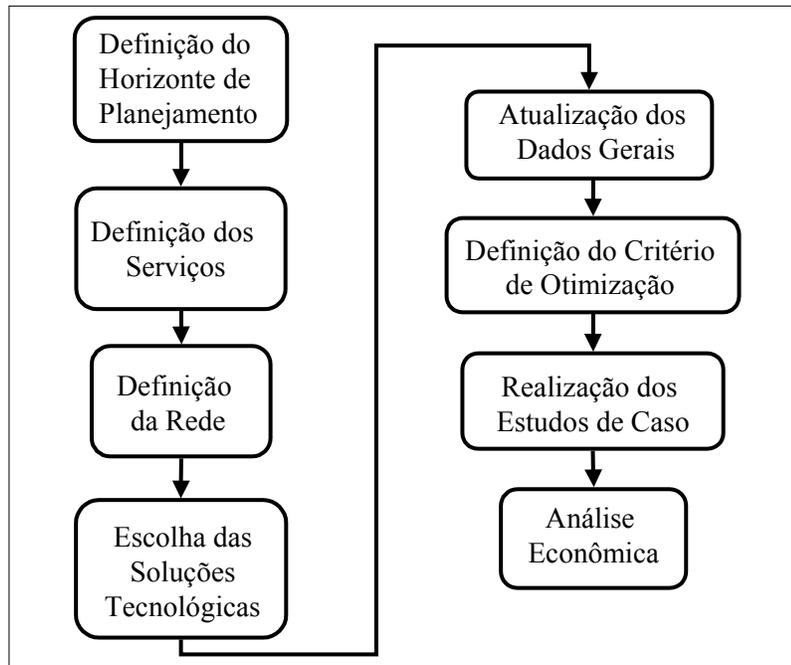


Figura 4.1 - Etapas da metodologia de planejamento de sistemas de acesso.

4.3 – Definição dos Serviços

O planejador só tem condições de escolher as soluções tecnológicas de acesso que serão consideradas em um estudo após definir o cardápio de serviços a ser oferecido. Isso porque só após a escolha dos serviços é possível verificar quais tipos de rede terão condições de suportá-los.

Para cada serviço selecionado (Seção 2.4), o planejador deverá definir o seu perfil (*Qualidade do Serviço* – QoS exigida), sua taxa de penetração (aceitação) na área em estudo e a sua receita (mensal ou anual) estimada por canal, para cada estágio do horizonte de planejamento considerado.

Num eventual estudo de caso a ser realizado para uma Tele, os dados de penetração de serviços poderão ser oferecidos pela própria empresa.

As projeções de demanda variam de região para região, ou mesmo de bairro para bairro numa mesma cidade. No caso particular do Brasil, algumas regiões ainda

apresentam altos índices de demanda reprimida para o serviço de VOZ, tanto para o fixo quanto para o móvel. Portanto, a variação desta demanda ao longo do horizonte de planejamento também precisa ser acompanhada.

Quanto às estimativas de receita, os dados variam de país para país e, assim como para a penetração, as projeções de tarifa também irão se modificar ao longo do tempo. Existe uma tendência de queda destes valores em função de um ambiente de maior concorrência e maturidade tecnológica.

4.4 – Definição da Rede

Conforme discutido no Capítulo 2, a área de atendimento de um sistema de acesso é aquela delimitada por uma central de comutação. A rede pode ser representada por um grafo, composto por arcos e nós. Cada trecho da rede (arco do grafo) representa as conexões físicas entre os nós e possui como atributos, por exemplo, quantidade de pares metálicos e dutos disponíveis.

Existem basicamente três tipos de nós:

- *Nó de CC*: corresponde ao prédio onde está localizada a central (ou centrais) de comutação – ET no SFC ou a CCC no SMC;
- *Nó de Acesso*: é um ponto intermediário entre a CC e o usuário (por exemplo, armário de distribuição no SFC e ERB no SMC), onde estão localizados alguns equipamentos ativos da rede;
- *Nó de Usuário*: é um ponto terminal no sistema, onde se localiza (ou se encontra) o assinante.

Para simplificar o planejamento e diminuir a quantidade de dados a ser usada, pode-se considerar como ponto de concentração de demanda o nó de acesso, ou seja, em cada nó de acesso deve ser conhecida a demanda de todos os serviços considerados, para cada estágio de planejamento (se for o caso).

4.5 – Escolha das Soluções Tecnológicas

Conhecendo o cardápio de serviços a ser oferecido e o tipo de rede a ser dimensionada, o planejador pode escolher quais são as soluções tecnológicas que

participarão do estudo de caso. A escolha de uma solução traz implicações práticas imediatas, tais como:

- Saber quais são todos os dispositivos de rede (equipamentos, cabos, infraestrutura, etc.) a serem considerados para efeito de planejamento;
- Saber como são dimensionados os equipamentos nos nós da rede (nó de CC, nó de acesso e nó de usuário);
- Estimar o custo de cada dispositivo considerado para cada período de planejamento.

O levantamento dessas informações requer muito trabalho, principalmente se as soluções tecnológicas forem recentes. Para algumas situações, a falta de dados pode inviabilizar o uso de determinada solução tecnológica em um estudo de caso.

Um estudo de caso é composto por vários *cenários*. Um cenário pode utilizar uma ou mais soluções tecnológicas. Por exemplo:

- *Cenário Modems xDSL + APON-FTTC*: aplicável ao sistema de acesso fixo cabeado. Avalia-se a competitividade entre estas duas tecnologias, de forma a escolher aquela que ofereça os maiores benefícios, como por exemplo melhor QoS, menor custo ou ainda maior receita;
- *Cenário Modems HDSL + Modems Ópticos + Rádio Microondas*: semelhante ao cenário anterior, porém mais aplicável ao planejamento da infra-estrutura do SMC. Neste cenário a demanda de serviços apresentada aos nós de acesso pode ser atendida por rede metálica e *modems* HDSL, por fibra óptica e *modems* ópticos ou ainda por enlaces via rádio microondas.

Como se observa, pode-se utilizar uma ou mais soluções tecnológicas em um mesmo cenário. Essa mistura pode ocorrer em diferentes estágios do planejamento ou no mesmo estágio. Tecnicamente, a quantidade de combinações possíveis é enorme. Na prática, o planejador deve analisar quais são os cenários que mais se aproximam da realidade da sua Tele e, a partir daí, buscar os dados para poder realizar o estudo de caso.

4.6 – Atualização dos Dados Gerais

Os dados necessários para realização de um estudo de caso são divididos em duas classes: os dados gerais de planejamento, que não possuem relação com a rede a ser estudada, e os dados de rede propriamente ditos.

Dados Gerais de Planejamento

Estes dados são agrupados da seguinte forma:

- *Dados de equipamentos* – para cada equipamento a ser utilizado na rede, o planejador deverá levantar os dados de custo e de dimensionamento;
- *Dados de cabos* – custo (por unidade de distância) do cabo, tanto para os cabos metálicos como para os cabos de fibras ópticas;
- *Dados de infra-estrutura* – o planejador deverá ter o custo dos seguintes dispositivos:
 - Canalização de dutos (custo por unidade de distância);
 - Subdutos (custo por unidade de distância);
 - Ampliação no centro de fios (obras civis);
 - Armários de distribuição com diferentes capacidades, para soluções de rede metálica;
 - Abrigo para equipamentos;
 - Armários ópticos;
- *Miscelânea da rede*:
 - Custo médio da emenda do cabo de fibra óptica;
 - Custo médio de emenda de cabo metálico;
 - *Splitters* 1:n com diferentes valores de n;
 - Custo (por unidade de distância) da capa do cabo óptico.

Quando o planejamento envolve vários estágios, uma questão importante é a definição da evolução dos custos dos elementos de rede (equipamentos, cabos e infra-estrutura) que serão utilizados (Ims et alii, 1997; Olsen et alii, 1996). O planejador

deverá levar em consideração o barateamento desses componentes (não necessariamente todos) ao longo do tempo devido ao aumento da escala de produção.

Dados de Rede

Para realizar o planejamento do sistema de acesso, o planejador deverá levantar os seguintes dados de rede:

- Rede de dutos da área considerada, informando a quantidade de dutos disponíveis em cada arco. A rede de dutos é formada pelos arcos (canalização subterrânea) e os nós de controle ou flexibilidade;
- Quantidade de pares metálicos disponíveis em cada arco;
- Quantidade de fibras disponíveis em cada arco;
- Demanda dos serviços considerados concentradas em cada nó de acesso. Se o planejamento for estagiado, essa informação deverá ser fornecida para cada estágio do planejamento. Para cada serviço deverá ser conhecido o número de canais demandados em cada nó de acesso;
- Localização da CC e dos nós de acesso.

A Figura 4.2 mostra uma área de atendimento com alguns dados de rede associados, para um estágio de planejamento. O nó de controle representa um ponto de flexibilidade na malha de dutos. As possíveis emendas de cabos são realizadas neste nó.

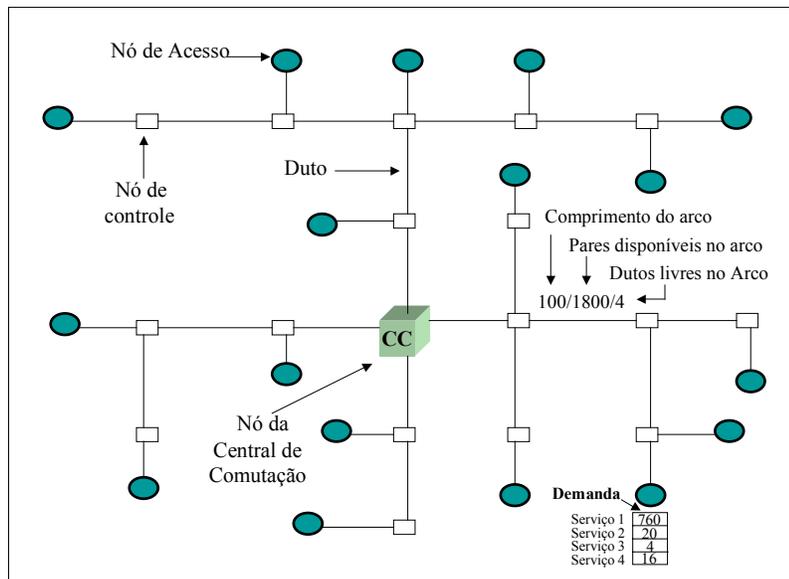


Figura 4.2 - Área de atendimento, destacando alguns dados de rede.

4.7 – Definição do Critério de Otimização

Os problemas de planejamento são majoritariamente problemas nos quais vários critérios ou objetivos conflitantes e distintos concorrem entre si. Os objetivos a serem alcançados podem, portanto, variar de uma empresa para outra diante das incertezas tecnológicas e de mercado. Mas em qualquer caso o planejamento da rede pode ser realizado de forma otimizada, utilizando-se modelos matemáticos. Os critérios mais significativos e prováveis de serem adotados pela empresas operadoras estão descritos a seguir.

4.7.1 – Atender Toda a Demanda Prevista a um Custo Mínimo

No planejamento de sistemas de acesso os valores envolvidos (principalmente custo de equipamentos) são bastante significativos. Nesta abordagem a rede é dimensionada de forma a oferecer o menor custo, seja de aluguel, de implantação e/ou de operação e manutenção.

Toda a demanda prevista deverá ser atendida, respeitando as especificações técnicas dos equipamentos alocados. Este foi o critério adotado pelas empresas operadoras brasileiras durante o cenário monopolista (antes das privatizações) e que, atualmente, tende a perder importância, uma vez que as empresas privadas, além de contarem com a possibilidade de redes mais baratas, têm como prioridade a rentabilidade do investimento.

4.7.2 – Maximização da Folga

Este critério privilegia a adoção de equipamentos com capacidade de sobra, visando preparar a rede para a evolução da demanda segundo um horizonte de planejamento. Na prática, existe também a necessidade de se respeitar um orçamento, o que impede a escolha de alternativas irrealizáveis.

4.7.3 – Maximização da Demanda Protegida

Algumas tecnologias permitem um dimensionamento capaz de oferecer pelo menos duas maneiras alternativas de escoar a demanda do usuário até a sua central de comutação. Sob este critério, são conferidos privilégios a essas tecnologias quanto em competição com outras.

4.7.4 – Maximização de Receita

Nesta abordagem a rede é dimensionada para oferecer a maior receita possível. Porém, quando se pensa em maximização de receita, algumas considerações são necessárias. Inicialmente, é preciso lembrar que a diferentes serviços associam-se distintos valores. A tarifação pode ser baseada em um valor fixo (mensal, por exemplo, como uma assinatura) ou então depender do tempo efetivo de utilização do serviço. Às vezes, uma combinação das duas formas é usada.

Por outro lado, a receita pode ser distribuída ao longo do período de tempo analisado. Neste caso, comparações com o custo (de implantação de equipamentos, de operação e manutenção, etc.) fazem mais sentido quando colocadas em uma mesma unidade de medida, como por exemplo o “valor presente” ou algum tipo de “fluxo de caixa”.

Um problema que envolve maximização de receita tem portanto diferentes interpretações. Por ser o critério de maior interesse desta tese, vamos a seguir analisar três dentre elas.

Maximização de Receita Respeitando um Limitante de Orçamento

Para maximizar a receita advinda da exploração dos serviços, é natural pensar que o atendimento pleno da demanda garante a máxima receita. Entretanto, isto em geral não é sempre possível. A pressão orçamentária não permite que sejam implantados equipamentos e rede suficientes para todos. Em outras palavras, parte da demanda pode ser sacrificada. Trata-se de atender seletivamente a demanda, visando a configuração que proporciona melhor receita nessas condições. Não se tenta mais garantir que toda a demanda seja atendida.

Nesta abordagem, o custo corresponde ao investimento realizado na rede, também chamado de *Custo de Implantação* (IFC). A receita pode ser totalizada em base mensal ou anual. Os valores de receita e custo não são comparáveis entre si; não há portanto necessidade de compatibilizar as unidades de medida de custo e receita.

Um modelo matemático desenvolvido a partir destas premissas deve ser capaz de contabilizar o custo e forçá-lo a obedecer o orçamento (valor máximo permitido). Para o cálculo da receita, supõe-se que as demandas por cada serviço são perfeitamente conhecidas (ou pelo menos estimadas) em cada nó da rede. Como parte

da demanda apresentada pode não ser atendida, é preciso lembrar que essa parcela não se reverte em receita.

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.

Maximização de Receita a Custo Mínimo

Outra abordagem prevê que receita e custo são dois objetivos distintos. Tanto o custo como a receita podem ser calculados de forma estática, como na abordagem descrita acima. Entretanto, neste caso ambos os objetivos são perseguidos. Existe uma fundamental diferença com respeito ao custo, que não precisa respeitar um limite, mas sim ser minimizado.

Esta situação requer um tratamento multi-objetivos. O modelo é bastante similar àquele que será apresentado nos próximos capítulos. Entretanto, a presença de dois objetivos simultâneos requer outro método de resolução do problema matemático. Deve ser usada alguma das técnicas de *Programação com Múltiplos Objetivos* (PMO). Uma boa referência é Steuer (1986).

Embora exista um certo apelo no fato de se tentar paralelamente minimizar o custo e maximizar a receita, na prática a complexidade do método exigido não costuma compensar o esforço dispendido. Os resultados obtidos com a abordagem anterior têm caráter bastante prático e parecem suficientes para a atividade de planejamento.

Maximização de Lucro

Neste caso, é preciso calcular a diferença entre receita e custo, a qual define o lucro. Assim, faz-se necessário compatibilizar as respectivas unidades de medida. Como uma possibilidade, pode-se trazer o custo para seu valor presente, usando métodos de matemática financeira. A receita também precisa ser calculada na mesma base.

Dependendo da quantidade disponível de informações, o modelo torna-se bastante complexo. É possível trabalhar com diversos estágios de planejamento (anos, semestres, meses). Os valores de custo e receita podem apresentar variações ao longo do tempo, devido ao barateamento da tecnologia, à redução de tarifas devido à maior

penetração e/ou envelhecimento de um serviço, e assim por diante. Ao contrário da abordagem anterior, a maximização de lucro tem caráter dinâmico e, como tal, exige mais dados e maior tempo de processamento e análise.

Apesar de esta ser a abordagem mais realista para a questão da maximização de receita, a elevada complexidade torna-a menos atraente para implementação.

4.8 – Realização dos Estudos de Caso

Esta é a etapa mais trabalhosa do planejamento. Ela é composta de três grandes atividades, que consistem em levantar a necessidade de:

- Lançamento de cabos (fibra ou par metálico) nos arcos;
- Ampliação de canalização e lançamento de subdutos na rede;
- Alocação e dimensionamento de equipamentos nos nós de comutação, de acesso e de usuário.

Esses procedimentos deverão ser realizados para todos os cenários considerados e para cada estágio de planejamento. Se um estudo de caso considera 3 estágios de planejamento e 5 cenários, esses procedimentos serão realizados 15 vezes. A ordem em que estas atividades são realizadas dependerá da solução tecnológica considerada, porém para a maioria das soluções vale a ordem acima colocada. Seguem-se algumas observações sobre cada atividade.

Lançamento de Cabos na Rede

O lançamento de cabos metálicos só ocorre na solução de rede metálica + *modems* xDSL. O planejador deverá calcular a demanda de pares em cada arco. Além disso deverá verificar se a capacidade do nó de acesso atende a demanda. Se não atender, o mesmo deverá ter sua capacidade expandida, ou até mesmo substituído.

Para as demais soluções cabeadas prevê-se o lançamento de cabos de fibras ópticas. Para cada arco deverá ser calculada a quantidade de fibras necessárias. O planejador deverá analisar a viabilidade de se utilizar dois ou mais cabos em um arco ou reunir as fibras em um único cabo de maior capacidade. Para isso ele deverá comparar o custo da emenda mais o custo do cabo de maior capacidade com o custo dos cabos sem realizar a emenda. Em geral, quanto maior o arco, maior a

possibilidade de se viabilizar a solução utilizando emenda. A Figura 4.3 ilustra esta situação.

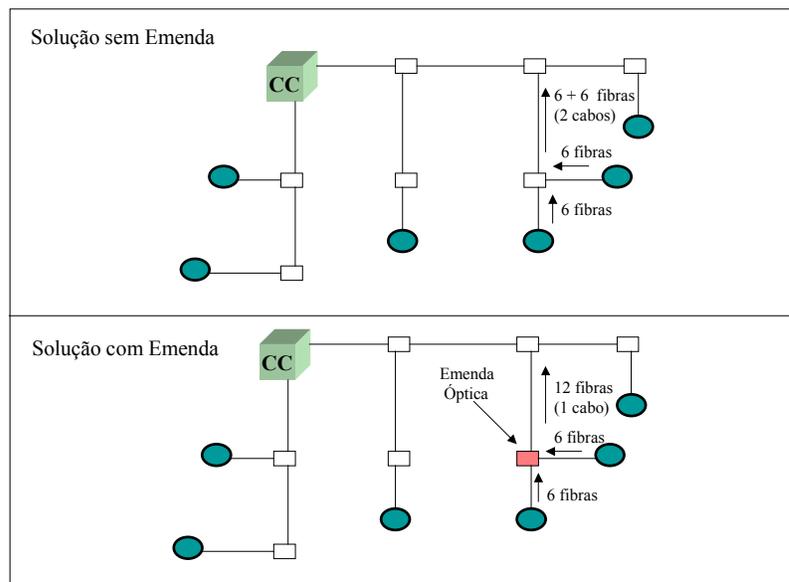


Figura 4.3 - Possibilidades de utilização de fibra óptica na rede.

Reforço de Canalização e Lançamento de Subdutos

Uma vez definida a quantidade de cabos a serem lançados em cada arco, o planejador deverá verificar se existem dutos vagos para abrigar o(s) cabo(s). Se não existirem dutos disponíveis, deverá ser feito então um reforço de canalização.

No caso de lançamento de pares metálicos será necessário um duto para cada cabo lançado. Esta relação muda para cabos ópticos, uma vez que este tipo de cabo é lançado com subduto. Quando um cabo óptico é lançado em um arco, o planejador deverá lançar também um subduto (se não existir algum vago no arco).

Alocação e Dimensionamento de Equipamentos

A alocação e o dimensionamento de equipamentos é uma tarefa bastante complexa. Em planejamento de redes essa atividade pode ser realizada de três formas distintas:

- *Alocação sem uso de algoritmos heurísticos ou modelos matemáticos de otimização:* neste caso o planejador deverá alocar e dimensionar os equipamentos em cada nó da rede. Para isso ele poderá utilizar uma ferramenta tipo calculadora que somente irá computar o custo dos equipamentos alocados nos nós. O planejador deverá conhecer as

características técnicas de todos os equipamentos utilizados para cada solução tecnológica considerada. Deverão ser alocados/dimensionados equipamentos para o nó de estação, nó de acesso e nó de assinante.

- *Alocação automatizada*: depois de realizar o procedimento de alocação/dimensionamento várias vezes, o planejador poderá automatizar alguns ou todos os procedimentos necessários, utilizando algoritmos heurísticos. Tais algoritmos estarão totalmente ligados às características técnicas e funcionais de cada solução tecnológica considerada. Qualquer modificação nessas características poderá afetar diretamente o funcionamento dos algoritmos, gerando portanto a necessidade de atualizações, o que muitas vezes não é um procedimento trivial.
- *Alocação utilizando modelos de otimização*: esta é a forma mais sofisticada de resolver o problema. A principal tarefa do planejador é candidatar várias soluções tecnológicas. O modelo matemático irá procurar a solução que melhor atende os objetivos esperados pela empresa operadora. O procedimento de candidatar os equipamentos deve ser feito de forma manual ou automatizada. Neste último caso, algoritmos utilizando processos heurísticos também podem ser adotados.

4.9 – Análise Econômica

Quando se realiza um planejamento, o estudo de caso traz duas informações básicas:

- *Receita gerada pelos serviços oferecidos*: a receita total gerada em cada estágio e também a receita por serviço;
- *Custo das redes*: em cada estágio do planejamento haverá um custo de implantação para cada solução tecnológica considerada, representando o investimento em equipamentos, cabos e infra-estrutura.

Para realizar uma análise mais criteriosa sobre a viabilidade econômica de uma determinada tecnologia, deve-se considerar também os gastos com operação e manutenção do sistema ao longo do horizonte de planejamento. Porém, quanto mais recente a solução tecnológica, mais difícil será levantar estas informações. Uma

maneira de simplificar o problema é supor que o custo de manutenção representa uma parcela do custo de implantação da rede (Olsen et alii, 1996).

De posse dos custos de implantação, operação e manutenção, da receita gerada em cada estágio de planejamento e ainda da taxa de retorno média anual mínima admitida é possível fazer uma análise econômica comparando as diferentes alternativas de investimento. Essa análise pode ser feita utilizando diferentes métodos, tais como (Hirschfeld, 1998):

- *Valor presente (NPV)*: a característica essencial deste método é a análise das diferentes alternativas de investimento usando, para efeito de comparação, o valor presente equivalente a cada um dos fluxos de caixa representativos de cada alternativa considerada;
- *Taxa de retorno*: a taxa de retorno de uma proposta de investimento é a taxa de juros para a qual o valor presente dos recebimentos resultantes do projeto é exatamente igual ao valor presente dos desembolsos;
- *Tempo de Retorno do Investimento (Payback)*: por este método é possível calcular o tempo mínimo necessário para a recuperação do investimento (tempo mínimo para a rede “se pagar”).

Deve ser observado que a análise econômica não é um procedimento estático, ou seja, para a realização deste estudo deve-se, primeiramente, estipular um intervalo de vigência para o planejamento e contabilizar todos os "custos" ao longo deste período.

Parte II

**MODELAGEM TÉCNICO-ECONÔMICA
PARA O PROBLEMA COM DADOS “EXATOS”**

Capítulo 5

MODELO GERAL DE MAXIMIZAÇÃO DE RECEITA

5.1 – Introdução

Este capítulo apresenta o modelo de programação linear inteira mista desenvolvido para ser aplicado no planejamento estratégico de sistemas de acesso cabeado ou na infra-estrutura de sistemas de acesso móvel celular. A exposição é feita de forma geral, desconsiderando as especificidades de tecnologias e serviços. O critério de otimização adotado é o de maximização de receita. O orçamento a ser respeitado é um parâmetro que deve ser fornecido pelo planejador. Esse limitante aparecerá no modelo como uma restrição adicional. Com esta abordagem, o modelo trata de atender seletivamente os serviços, ou seja, não garante que toda a demanda será atendida a menos que o limitante de orçamento seja inócuo (sem efeito).

O objetivo principal é alocar e dimensionar os equipamentos na rede, de forma a maximizar a receita, permitindo a competição entre os serviços e as soluções tecnológicas candidatas. O modelo descrito a seguir ainda não permite previsão imprecisa de dados. Portanto, é chamado de “modelo exato”. Sua versão preliminar, aplicável apenas ao sistema de acesso fixo cabeado, pode ser encontrada em DeSousa (1999a). A tarefa de incorporar dados imprecisos de demanda é o assunto do Capítulo 7.

5.2 – Premissas de Modelagem

A fim de caracterizar o ambiente de aplicabilidade do modelo, são discriminadas a seguir algumas premissas gerais a serem obedecidas quando da sua utilização.

Estagiamento

Embora a metodologia proposta no capítulo anterior preveja também os procedimentos para um planejamento estagiado, o modelo aqui apresentado considera

somente o planejamento estático, ou seja, aquele direcionado ao atendimento de uma determinada demanda. O objetivo é buscar um compromisso entre receita e orçamento, analisando a implantação (ou aluguel) de diversas tecnologias em função das previsões de demandas dos serviços a oferecer em um único período.

Cenário de Planejamento

Para cada enlace a ser dimensionado na rede, para atendimento da demanda, é possível associar um custo fixo e um custo variável. Tal flexibilidade permite a aplicação do modelo para dois padrões de cenários:

Implantação de rede: são examinados custos de implantação de uma nova rede ou da expansão de uma rede existente. Neste caso são considerados os custos de equipamentos alocados (custos fixos) e custos de cabos e dutos utilizados (custos variáveis com a distância).

Aluguel de rede: os enlaces ponto-a-ponto são alugados pelas Teles utilizando duas componentes de custo. A primeira é uma parte fixa, com valor proporcional à capacidade do canal oferecido (geralmente múltiplos de canal E1) e a segunda é uma parte variável com a distância do enlace.

Embora não seja feito neste trabalho, através de um pré-processamento dos dados de custo, é possível construir cenários comparando a opção “aluguel de rede” com “implantação de rede”. Para isto é necessário utilizar os conceitos básicos de engenharia econômica (ver Seção 4.9) e converter o gasto com o aluguel para o valor presente ou converter o custo de implantação, operação, administração e manutenção em valor uniforme líquido.

Cobertura da rede

Compreende a área geográfica atendida por uma *central de comutação*. Uma vez que não se está interessado em realizar cortes de área, cada assinante é ligado a uma única CC. Portanto, cada *área de atendimento* pode ser tratada independentemente das outras.

Serviços

Para cada serviço, a demanda a ser atendida (e a receita a ser gerada) é variável de decisão para o modelo. Porém, algumas informações, tais como estimativa de

demanda prevista, taxa de transmissão exigida e receita unitária precisam fazer parte do banco de dados de entrada.

Rede Existente

A base de dados para o modelo permite (se for pertinente) reconhecer uma rede metálica já instalada, apoiada em uma infra-estrutura que possibilita expansões também em outras tecnologias. Dados como capacidade de cabos metálicos disponíveis e dutos ociosos devem ser fornecidos pelo planejador.

Equipamentos

Independente da tecnologia estudada, haverá a necessidade de equipamentos na rede para o provimento dos serviços. Dados como capacidade e custos de alocação devem ser fornecidos pelo planejador. No modelo, isto significa impor restrições técnicas de capacidade sobre os arcos e controlar o orçamento disponível. A estrutura adotada considera apenas os custos de escolha (para implantação ou aluguel) da tecnologia, desconsiderando os custos com operação e manutenção. Equipamentos que compõem o sistema de comutação não fazem parte do problema.

Ao longo deste trabalho, sempre que necessário, estas premissas serão retomadas a fim de caracterizar especificidades de cada solução tecnológica candidata a fazer parte do sistema de acesso.

5.3 – Representação Gráfica do Sistema de Acesso

Conforme informado anteriormente, não são previstas ligações diretas entre os assinantes, ou seja, toda a demanda apresentada ao sistema, através dos seus nós de acesso, e que é efetivamente atendida, é encaminhada à CC. Esse comportamento da demanda e a disposição física da rede sugerem o uso de grafos para a sua representação.

Para o planejamento em que se considera a presença de uma rede metálica instalada, esta representação para cada *nó de acesso* i pode ser conforme a Figura 5.1. O *nó de acesso* i pode ser conectado diretamente à CC ou apresentar rotas alternativas através dos *nós de acesso* k . Os arcos do grafo, orientados, indicam as ligações físicas entre dois nós. 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).

A modelagem é flexível o suficiente para permitir ao planejador escolher os seus candidatos. Nesta representação são considerados os elementos listados a seguir.

Nós Artificiais de Serviço

Para o cálculo da receita, supõe-se que as demandas previstas para cada serviço (d_1-d_n) são perfeitamente conhecidas. Para cada serviço existe um nó-fonte associado (SV_1-SV_n), que é ligado a todos os *nós de acesso i* através de *arcos de escoamento* das demandas por esse serviço. Existe a necessidade de que as demandas apresentadas aos *nós artificiais de serviço* tenham a mesma unidade de medida, por exemplo: número de assinantes ou número de canais E1.

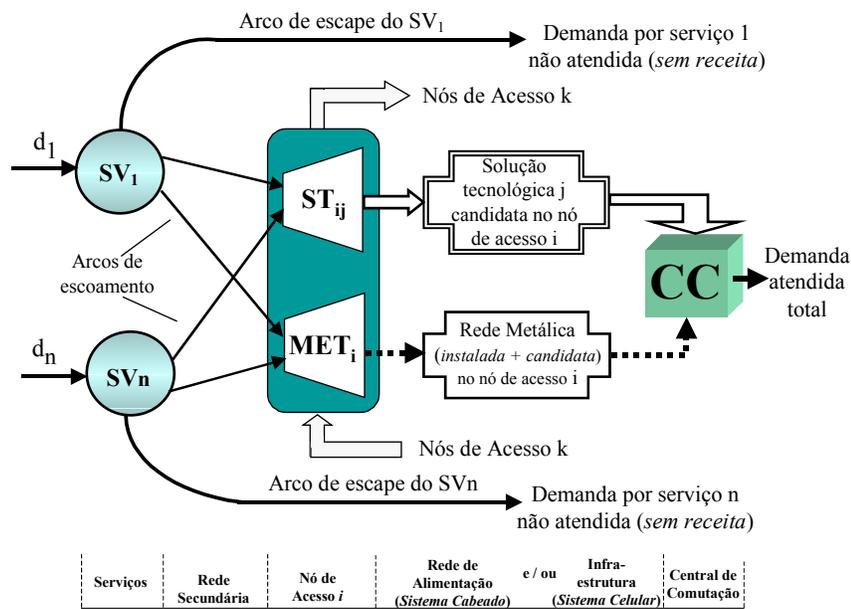


Figura 5.1 - Representação gráfica do sistema de acesso.

Nós de Acesso

Representam pontos intermediários entre o usuário do sistema e a CC. O armário de distribuição no sistema de acesso fixo cabeado e a ERB no sistema de acesso móvel celular são alguns exemplos. Eles funcionam como pontos de concentração, reunindo a demanda proveniente dos *nós artificiais de serviço*. Cada *nó de acesso i* pode ser dividido em dois, um representando o acesso através da *rede metálica* (Met_i) e outro o acesso através da *solução tecnológica candidata j* (ST_{ij}). Assim,

é possível "enxergar" uma eventual rede metálica instalada e incluí-la no processo de avaliação. No grafo, o *nó de acesso* i também pode ser conectado a outros *nós de acesso* k . Isto configura a possibilidade de atendimento da demanda através de rotas alternativas. Os *nós de acesso* funcionam como nós de passagem.

Nó de Comutação

Este nó está fisicamente associado à central de comutação do sistema (ou CC). É o único nó-sumidouro (saída de fluxo) da rede; toda a demanda efetivamente atendida pelo sistema é encaminhada a esse nó.

Demanda Atendida Total

Representa a demanda efetivamente atendida pelo sistema. Devido ao limite de orçamento, ela pode ser inferior à soma das demandas oferecidas aos *nós artificiais de serviço*.

Como consequência da variedade de serviços que o sistema de acesso pode oferecer, e também devido às especificidades dos equipamentos que podem ser alocados ao longo do percurso nó de acesso – CC, é possível que a demanda atendida total (saindo do grafo pelo nó CC) possua unidade de medida de demanda diferente daquela apresentada inicialmente aos *nós artificiais de serviço*.

Arcos de Escoamento

Representam os arcos que ligam todos os *nós artificiais de serviço* (SV_1-SV_n) a todos os *nós de acesso* i ($Met_i + ST_{ij}$). O fluxo de demanda escoado por estes arcos é utilizado tanto para contabilizar a receita gerada por cada um dos serviços oferecidos, quanto para controlar (se necessário) os gastos com a implantação da *rede secundária*, dimensionada em função do serviço demandado. A maximização do fluxo nestes arcos para todos os serviços é o principal objetivo do modelo de otimização. O controle no atendimento das demandas exige que os *arcos de escoamento* sejam capacitados.

Arcos de Escape

Em função de um limite de orçamento, algumas demandas de certos serviços podem não ser atendidas. Por isso, *arcos de escape* são previstos para contabilizar esta demanda não atendida e garantir o balanço de fluxo nos *nós artificiais de serviço*. Estes arcos também são utilizados para gerenciar os níveis de atendimento dos

serviços, principalmente na abordagem de minimização de custo (Seção 5.5). A demanda escoada por estes arcos não é revertida em receita.

Rede Metálica

Este segmento do grafo é utilizado para representar tanto a rede metálica já *instalada* quanto a *candidata*. A *instalada* garante o reconhecimento da infraestrutura disponível no sistema, tais como cabos e dutos; a *candidata* representa os componentes necessários para a expansão em rede metálica. A fim de suportar também os serviços faixa-larga, este dimensionamento é feito utilizando-se os *modems* da tecnologia xDSL.

Solução Tecnológica Candidata

Representa as diversas soluções tecnológicas possíveis de serem utilizadas no planejamento do sistema, exceto a solução xDSL, quando candidatada em conjunto com a rede metálica já existente. Na aplicação do modelo, haverá a necessidade de se adaptá-la às características próprias de cada tecnologia. Esta adaptação pode significar a utilização de nós e arcos artificiais, bem como variáveis de decisão específicas para a alocação e dimensionamento de equipamentos.

Rede Secundária

Permite o cálculo do custo associado aos equipamentos a serem disponibilizados nas instalações do usuário. Seu dimensionamento é realizado em função da demanda individual de cada serviço e da *solução tecnológica candidata*, o que em certas tecnologias exige considerações quanto ao dimensionamento dos equipamentos a serem alocados no *nó de acesso*. No sistema de acesso fixo cabeado, a rede secundária física (cabos) pode ser considerada como existente (sem custo) ou ter seu custo calculado a partir de valores médios. No acesso móvel celular, a rede secundária pode ser associada à interface aérea do sistema.

5.4 – Formulação do Modelo Matemático

O modelo matemático formulado é um problema de *programação linear inteira mista* (PLIM), com variáveis 0-1, que utiliza a abordagem nó-arco (Bazaraa et alii, 1990). As variáveis de decisão do problema referem-se a:

- (1) valor do fluxo de demanda nos arcos – variáveis reais;
- (2) alocação (ou não) e dimensionamento de facilidades (equipamentos de transmissão, cabos ópticos e metálicos, infra-estrutura) instaláveis em cada arco (ou nó) para o atendimento dos serviços – variáveis binárias.

O modelo de otimização geral para o dimensionamento de sistemas de acesso apresenta a formulação a seguir. Daqui em diante ele será referenciado como modelo C5-ME1 (*Capítulo 5 – Modelo Exato 1*).

Maximizar Receita = *Receita Total dos Serviços Oferecidos*

Sujeito a:

- *Restrição de Limite de Orçamento*
- *Restrições de Balanço de Fluxo*
- *Restrições Técnicas de Capacidade*
- *Restrições de Atendimento*
- *Restrições Adicionais*

As expressões matemáticas podem ser caracterizadas da seguinte forma:

Função Objetivo

Considera-se que existe um valor de receita unitária mensal (ou anual) para cada um dos serviços. A receita precisa ser maximizada, mas a pressão orçamentária pode não permitir que sejam dimensionados equipamentos e rede suficientes para todos. Trata-se de atender seletivamente a demanda. A receita total é calculada somando-se a receita dos serviços escolhidos, através dos *arcos de escoamento*.

$$\text{Maximizar } R(\mathbf{y}) = \sum_{(s,i) \in A_E} r_{si} Y_{si} \quad (5-1)$$

onde :

$R(\mathbf{y})$: receita total dos serviços oferecidos;

A_E : conjunto dos arcos de escoamento que conectam os nós artificiais de serviço aos nós de acesso;

Y_{si} : variável real não-negativa associada ao fluxo de demanda escoado pelo arco de escoamento que liga o nó artificial de serviço s ao nó de acesso i ;

r_{si} : receita unitária do serviço s oferecido ao nó de acesso i .

Restrição de Limite de Orçamento

É a garantia de que o custo total de alocação e dimensionamento dos equipamentos e infra-estrutura não vai ultrapassar o orçamento previsto. A primeira parcela da inequação refere-se ao custo da solução tecnológica X , a segunda ao custo com expansão em rede metálica e a última ao custo da rede secundária para a oferta dos serviços. Na aplicação do modelo, seja para o sistema de acesso cabeado ou para a infra-estrutura do sistema de acesso móvel celular, as parcelas são constituídas pelos custos de equipamentos e infra-estrutura candidatados pelo planejador.

$$\sum_{(i,j) \in A_{ST}} \sum_{n \in N_{STij}} (\varphi_{ij}^{X_{eq},n} + \varphi_{ij}^{X_{r},n} \cdot l_{ij}) X_{ijn} + \sum_{(i,j) \in A_M} \sum_{p \in C_M} (\varphi_{ij}^{M_{eq},p} + \varphi_{ij}^{M_{r},p} \cdot l_{ij}) M_{ijp} + \sum_{(s,i) \in A_E} \varphi_{si} \cdot Y_{si} \leq L \quad (5-2)$$

onde:

A_{ST} : conjunto de arcos que podem receber como candidata a solução tecnológica X ;

N_{STij} : conjunto de soluções tecnológicas candidatas no arco $(i, j) \in A_{ST}$;

X_{ijn} : variável binária associada à escolha da solução tecnológica X , do tipo n , candidata no arco $(i, j) \in A_{ST}$;

$\varphi_{ij}^{X_{eq},n}$: custo associado à escolha dos equipamentos da solução tecnológica X , do tipo n , candidata no arco $(i, j) \in A_{ST}$;

$\varphi_{ij}^{X_{r},n}$: custo (por unidade de comprimento) associado à escolha da infra-estrutura (cabos e dutos) da solução tecnológica X , do tipo n , candidata no arco $(i, j) \in A_{ST}$;

l_{ij} : comprimento do arco $(i, j) \in A_{ST}$;

A_M : conjunto de arcos que podem receber cabos metálicos;

C_M : conjunto de modularidades de cabos metálicos (novos);

M_{ijp} : variável binária associada à escolha do cabo metálico M , de modularidade p , candidato no arco $(i, j) \in A_M$;

$\varphi_{ij}^{M_{eq},p}$: custo associado à escolha dos equipamentos relacionados com o cabo metálico M , de modularidade p , no arco $(i, j) \in A_M$;

$\varphi_{ij}^{M_{r},p}$: custo (por unidade de comprimento) associado à escolha da infra-estrutura do cabo metálico M , de modularidade p , no arco $(i, j) \in A_M$;

φ_{si} : custo da rede secundária para a disponibilização do serviço do tipo s para o nó de acesso i , usando o arco $(s, i) \in A_E$;

L : orçamento.

Restrições de Balanço de Fluxo

São necessárias para garantir o balanço de fluxo em todos os nós do grafo, exceto para o nó da CC, por ser uma equação redundante. A restrição sobre o orçamento significa que parte da demanda pode não ser atendida. Por isso, são utilizados os *arcos de escape* nos *nós artificiais de serviço* (Restrições 5-3). Devido à diversidade encontrada nas taxas de transmissão dos serviços, pode ser necessário utilizar alguns *coeficientes de conversão* (fc_s) na matriz de incidência, naquelas equações referentes aos *nós de acesso* (Restrições 5-4).

$$\sum_{i \in I-I_s} Y_{si} + Yesc_s = d_s, \quad \forall s \in I_s \quad (5-3)$$

$$\sum_{j \in J_1} Y_{ij} - \sum_{j \in J_2-I_s} Y_{ji} - \sum_{s \in I_s} fc_s \cdot Y_{si} = 0, \quad \forall i \in I-I_s \quad (5-4)$$

onde:

I : conjunto de todos os nós do grafo, exceto o nó da CC;

I_s : conjunto dos nós artificiais de serviço;

$Yesc_s$: variável real não-negativa associada à demanda não atendida do serviço s (fluxo de demanda através de um arco de escape);

d_s : demanda total do serviço s , entrando na rede pelo nó $s \in I_s$;

J_1 : conjunto de nós j diretamente conectados ao nó i , por arcos orientados de i para j (fluxo saindo do nó i);

J_2 : conjunto de nós j diretamente conectados ao nó i , por arcos orientados de j para i (fluxo entrando no nó i);

Y_{ij} : variável real não-negativa associada ao fluxo de demanda escoado pelo arco (i, j) ;

fc_s : fator de conversão de taxa de transmissão do serviço s .

Restrições Técnicas de Capacidade

Ocorrem em cada arco do grafo responsável pelo atendimento da demanda prevista nos nós de acesso, assegurando que a soma das capacidades dos equipamentos implantados (ou alugados) seja superior ao fluxo escoado pelo arco. As especificações dos equipamentos candidatos dependem do tipo de sistema de acesso em que se efetua a aplicação do modelo.

$$\sum_{n \in N_{STij}} \text{cap}_{ij}^{X,n} \cdot X_{ijn} - Y_{ij} \geq 0, \forall (i,j) \in A_{ST} \quad (5-5)$$

$$\sum_{p \in C_M} \text{cap}_{ij}^{M,p} \cdot M_{ijp} - Y_{ij} \geq 0, \forall (i,j) \in A_M \quad (5-6)$$

onde:

$\text{cap}_{ij}^{X,n}$: capacidade da solução tecnológica X , do tipo n , candidata no arco $(i, j) \in A_{ST}$;

$\text{cap}_{ij}^{M,p}$: capacidade do cabo metálico M , de modularidade p , candidato (ou instalado) no arco $(i, j) \in A_M$.

Restrições de Atendimento

Foi mencionada anteriormente (Seção 5.2) a necessidade de se conhecer a demanda prevista de cada serviço a ser oferecido pelo sistema de acesso. Para representar esta demanda foram criados os *nós artificiais de serviço* (Figura 5.1). Esta demanda pode ser distribuída a todos os *nós de acesso* através dos *arcos de escoamento*. A fim de assegurar preferências de atendimento, bem como conseguir um melhor controle da demanda a ser atendida, há a necessidade de colocar limites para os fluxos a serem escoados pelos arcos do grafo. Este controle pode ser feito de duas maneiras (DeSousa et alii, 2003a), conforme a seguir.

- Controle de Demanda por Nó de Acesso: este procedimento é útil quando se deseja controlar a demanda a ser atendida em cada *nó de acesso*, individualmente. Este controle é possível atribuindo-se limites aos *arcos de escoamento*. A Figura 5.2 e as Restrições (5-7) e (5-8) apresentam esta configuração de atendimento para um serviço s em um *nó de acesso* i .

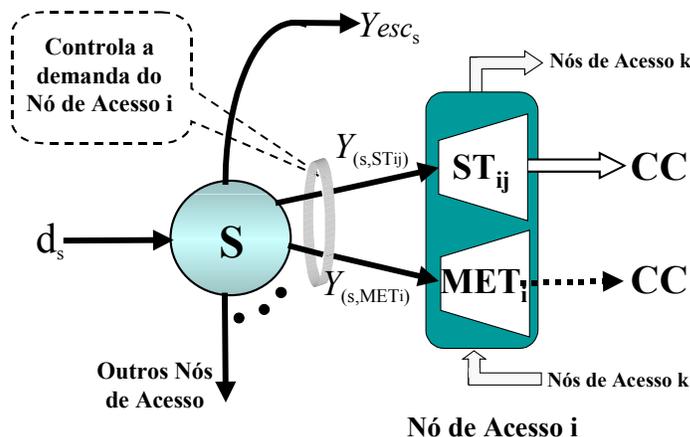


Figura 5.2 - Controle de demanda por nó de acesso.

$$Y_{(s,STij)} + Y_{(s,METi)} \geq dmin_{si}, \forall s \in I_S, \forall i \in I-I_S \quad (5-7)$$

$$Y_{(s,STij)} + Y_{(s,METi)} \leq dmax_{si}, \forall s \in I_S, \forall i \in I-I_S \quad (5-8)$$

onde:

$dmin_{si}$: demanda mínima prevista para o serviço s no nó de acesso $i \in I-I_S$;

$dmax_{si}$: demanda máxima prevista para o serviço s no nó de acesso $i \in I-I_S$.

O atendimento deve ser mantido entre a demanda mínima ($dmin_{si}$) e máxima ($dmax_{si}$) em cada *nó de acesso* i . Isto é feito limitando-se a soma das demandas atendidas pela rede metálica (Met_i) e solução tecnológica (ST_{ij}) nos arcos de escoamento. Nesta configuração, mesmo que um serviço não seja "rentável", garante-se, obrigatoriamente, o seu atendimento mínimo em cada região da rede atendida por um *nó de acesso*. Este controle torna-se interessante diante de contratos administrativos que exigem garantias de atendimento para uma determinada área ou um cliente em especial.

- Controle de Demanda por Serviço: este procedimento é utilizado quando se deseja garantir o atendimento do serviço, independente do *nó de acesso*. A demanda máxima prevista para cada *nó de acesso* ($dmax_{si}$) continua sendo controlada através dos *arcos de escoamento*. Já o atendimento mínimo deixa de ser gerenciado por *nó de acesso* e passa a ser assegurado apenas por serviço ($dmin_s$), através da adoção de limites no *arco de escape*. A Figura 5.3 e as Restrições (5-9), (5-10) e (5-11) mostram este controle para um serviço s , bem como a forma de atendimento deste serviço em um *nó de acesso* i .

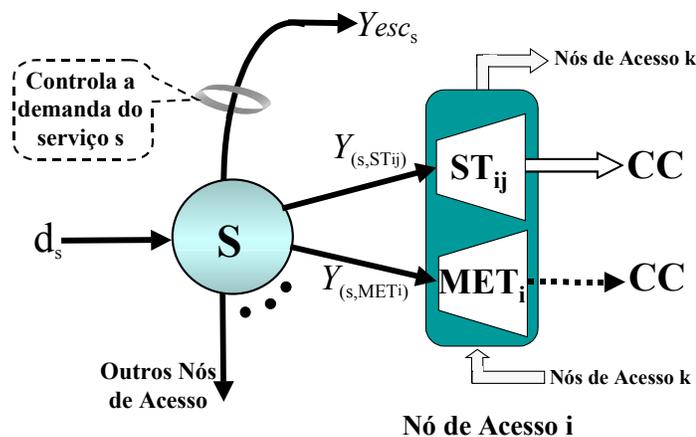


Figura 5.3 - Controle de demanda por serviço.

$$Y_{(s,STij)} + Y_{(s,METi)} \geq 0, \forall s \in I_s, \forall i \in I-I_s \quad (5-9)$$

$$Y_{(s,STij)} + Y_{(s,METi)} \leq dmax_{si}, \forall s \in I_s, \forall i \in I-I_s \quad (5-10)$$

$$Yesc_s \leq (d_s - dmin_s), \forall s \in I_s \quad (5-11)$$

onde:

$dmin_s$: demanda mínima do serviço s , a ser atendida pela rede, entrando pelo nó $s \in I_s$.

A restrição no *arco de escape* define os limites para a demanda não atendida ($Yesc_s$), a qual atingirá no máximo a diferença entre a demanda total prevista (d_s) e a demanda mínima a ser atendida ($dmin_s$), garantindo o atendimento da demanda mínima para o serviço s . Neste contexto, como o objetivo do modelo é maximizar a receita gerada pelos serviços oferecidos, continua havendo a possibilidade de se escolher os *nós de acesso* mais "rentáveis", porém com a liberdade de, inclusive, excluir (deixar de atender totalmente) os *nós de acesso* menos "rentáveis", o que não se consegue no *Controle de Demanda por Nó de Acesso*.

Podem existir situações em que o planejador não tenha condições de estipular, em valores absolutos, a demanda prevista para cada um dos serviços, seja em cada nó de acesso ($dmin_{si}$ e $dmax_{si}$) ou no nó artificial de serviço (d_s e $dmin_s$). Uma forma de contornar este problema é utilizar um parâmetro para representar a aceitação (penetração) do serviço pelos usuários da área de atendimento. Nestas condições, o número total de usuários (independente do serviço) previstos para serem atendidos em cada nó de acesso é mantido fixo e a partir do grau de aceitação determina-se a quantidade de clientes que vão demandar este ou aquele serviço. Este procedimento é bastante atraente no planejamento de sistemas de acesso que já apresentam alguma saturação no atendimento de um determinado serviço e pretende-se analisar diferentes condições de migração destes usuários para outros, como por exemplo, para os serviços faixa-larga. Adotado-se o serviço de VOZ como o serviço de referência ($s=1$), a demanda a ser atendida pode ser obtida de:

$$dmax_{si} = p_{si} \cdot dt_i, \forall s \in I_s \text{ e } s \neq 1, \forall i \in I-I_s \quad (5-12)$$

$$dmax_{si} = dt_i - \sum_{k=2}^m dmax_{ki}, s \in I_s \text{ e } s = 1, \forall i \in I-I_s \quad (5-13)$$

$$dmin_{si} = fam_{si} \cdot dmax_{si}, \forall s \in I_s, \forall i \in I-I_s \quad (5-14)$$

$$d_s = \sum_{i \in I-I_s} dmax_{si}, \forall s \in I_s \quad (5-15)$$

$$dmin_s = \sum_{i \in I-I_s} dmin_{si}, \quad \forall s \in I_s \quad (5-16)$$

onde:

dt_i : número total de usuários previsto para o nó de acesso $i \in I-I_s$;

p_{si} : nível de penetração prevista (porcentagem de aceitação) do serviço s no nó de acesso $i \in I-I_s$;

m : número total de serviços previstos;

fam_{si} : fator de atendimento mínimo obrigatório do serviço s no nó de acesso $i \in I-I_s$.

Deve-se observar que a demanda total do nó de acesso i (dt_i) representa a soma total das demandas previstas de todos os serviços ($dmax_{si}$) no nó; enquanto a demanda em cada nó de serviço s equivale à soma total das demandas daquele serviço previstas para serem atendidas em todos os nós de acesso da rede.

Restrições Adicionais

Outras exigências podem ser incorporadas ao modelo, levando em conta aspectos de custo, uso privilegiado de alguma tecnologia/topologia e, sobretudo, especificidades de equipamentos e requisitos de segurança na rede.

5.5 – Adaptações para a Abordagem de Minimização de Custo

Na abordagem de minimização de custo tem-se como objetivo principal dimensionar a rede da forma mais barata possível para atender uma demanda fixa pré-estabelecida. São inúmeros os trabalhos que adotam a minimização de custo no dimensionamento de suas redes. Uma boa referência é Olsen et alii (1996). No Brasil, este critério de otimização foi bastante difundido nos anos 80 e 90, antes do processo de privatização do setor. Os trabalhos de Carlson et alii (1998b) e Formigoni et alii (1997, 1995b) são exemplos dessa vertente.

Para que o modelo de maximização de receitas seja capaz de realizar o dimensionamento nestas circunstâncias são necessárias pequenas adaptações, mais precisamente na função objetivo e no controle de atendimento dos serviços.

O custo pode ser calculado pelo lado esquerdo da Restrição (5-2):

Função Objetivo de Minimização

$$\text{Min } C(\mathbf{x}, \mathbf{m}, \mathbf{y}) = \sum_{(i,j) \in A_{ST}} \sum_{n \in N_{STij}} (\varphi_{ij}^{X_{eq},n} + \varphi_{ij}^{X_{r},n} \cdot I_{ij}) X_{ijn} + \sum_{(i,j) \in A_M} \sum_{p \in C_M} (\varphi_{ij}^{M_{eq},p} + \varphi_{ij}^{M_{r},p} \cdot I_{ij}) M_{ijp} + \sum_{(s,i) \in A_E} \varphi_{si} \cdot Y_{si} \quad (5-17)$$

Onde $C(\mathbf{x}, \mathbf{m}, \mathbf{y})$ continua contabilizando os custos com a rede a ser alocada, porém com o objetivo de escolher a mais barata, e não mais aquela que respeite um orçamento. Os termos da expressão são os mesmos definidos na Seção 5.4.

As restrições técnicas de capacidade de equipamentos e de satisfação de demanda continuam as mesmas da Seção 5.4, sem nenhuma modificação.

As adaptações a serem feitas quanto ao atendimento dos serviços são muito simples. Uma vez que toda a demanda apresentada aos *nós artificiais de serviço* deve ser atendida, basta proibir o fluxo desta demanda nos *arcos de escape* de cada serviço:

$$Y_{esc_s} = 0, \quad \forall s \in I_s \quad (5-18)$$

Entretanto, se o objetivo é atender a demanda mínima, basta obrigar os *arcos de escape* a transportar a demanda resultante da diferença entre a demanda máxima prevista e a demanda mínima a ser atendida, o que assegura o atendimento igual à demanda mínima:

$$Y_{esc_s} = (d_s - d_{min_s}), \quad \forall s \in I_s \quad (5-19)$$

O mesmo pode ser feito para qualquer outro nível de atendimento de demanda.

5.6 – Comentários Adicionais

O planejamento dos sistemas de acesso é uma tarefa de grande porte, e portanto impossível de ser realizada em pouco tempo. Por este motivo, alguns fatores não considerados no modelo C5-ME1 podem ganhar importância. O ritmo de evolução dos serviços, por exemplo, é capaz de influir no valor presente de cada alternativa; afinal, o modelo baseia-se em custos de implantação (ou aluguel). O custo de operação e manutenção do sistema em cada alternativa pode também ser importante. Entretanto, neste modelo a escolha da alternativa precisa acontecer no início do processo e, em princípio, manter-se a mesma ao longo do tempo.

Adicionalmente, embora tenham sido apresentadas várias alternativas de evolução para os sistemas de acesso (Capítulo 3), e o modelo desenvolvido seja capaz de contemplá-las simultaneamente, este cenário é pouco provável. Por um lado, temos restrições técnicas: as Teles procuram evitar a adoção de várias soluções tecnológicas para uma mesma área de atendimento, com a finalidade de minimizar problemas de operação no sistema. Por outro lado, deve-se estar atento à complexidade computacional do modelo: o número de variáveis binárias de decisão aumenta proporcionalmente à quantidade de soluções tecnológicas candidatas.

Um modelo que seja capaz de contemplar o planejamento estagiado parece ser a solução mais adequada a esta problemática. Porém, dependendo do número de etapas e do tamanho das instâncias a serem analisadas, o número de variáveis de decisão pode fazer com que a sua aplicação a cenários realistas se torne computacionalmente impraticável. Uma alternativa para contornar este problema pode ser vista em Basseto et alii (2000, 1999). Estrategicamente, para limitar o universo de alternativas a serem avaliadas e ao mesmo tempo respeitar as características de cada tipo de decisão, Basseto et alii (2000, 1999) sugerem dividir o planejamento do sistema de acesso em duas etapas:

a) **1ª etapa:** várias tecnologias são avaliadas isoladamente. Nesta etapa é extremamente recomendável a utilização de algum tipo de ferramenta computacional que auxilie o planejador na obtenção de resultados financeiros, os quais, de alguma forma, levem a uma conclusão sobre: quais serviços devem ser suportados pelo novo sistema, em que momento tais serviços tornam-se disponíveis ao usuário e quais tecnologias adotar. O primeiro passo nessa etapa é a escolha do horizonte de planejamento. Em seguida, os indicadores econômicos mais relevantes a serem obtidos são *valor presente líquido, taxa interna de retorno, retorno sobre o investimento, prazo de retorno e investimento por usuário*. Uma vez que os indicadores econômicos estejam disponíveis, o planejador deve escolher as soluções tecnológicas mais interessantes (sob algum aspecto) para que sejam levadas à próxima etapa do planejamento;

b) **2ª etapa:** uma vez conhecido o horizonte de planejamento, o elenco de serviços a serem oferecidos e as tecnologias mais adequadas para suportar tais serviços, o planejador deve elaborar um estudo de maneira a determinar qual (ou quais) delas será (ão) implementada (s). É neste momento que se aplica o modelo de

maximização de receita C5-ME1, inclusive com a possibilidade de análise técnico-econômica em cada etapa ao longo do horizonte de planejamento.

Esse procedimento permite racionalizar o planejamento: evita a modelagem estagiada e ao mesmo tempo assegura que tecnologias inviáveis economicamente sejam exaustivamente dimensionadas através do modelo C5-ME1.

O escopo do nosso trabalho está na etapa 2. Admite-se que a etapa 1 é um pré-processamento cujo resultado o planejador já conhece.

Capítulo 6

EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DO MODELO “EXATO” DE MAXIMIZAÇÃO DE RECEITA

6.1 – Introdução

Neste capítulo são feitas algumas pequenas adaptações no modelo C5-ME1 de forma a permitir a representação das especificidades das soluções tecnológicas, bem como dos serviços a serem oferecidos.

O modelo é adaptado e aplicado aos dois tipos de sistemas de acesso. Para o sistema fixo cabeado (Seção 6.2) são confrontadas duas soluções tecnológicas: xDSL e APON-FTTC. Primeiramente, são apresentadas as premissas adotadas quanto ao dimensionamento de equipamentos e infra-estrutura de cada tecnologia, no sentido de preparar a rede para oferecer quatro perfis de serviço: VOZ, RDSI, FLR e FLC. Em seguida, são descritas as adaptações a serem feitas no modelo C5-ME1. Elas ocorrem principalmente nas equações que modelam o custo e a capacidade dos equipamentos a serem alocados e dimensionados. Finalmente, o modelo é aplicado em cenários que procuram refletir dados reais, tanto quanto possível.

A Seção 6.3 indica as adaptações necessárias no modelo C5-ME1 para ser aplicado no planejamento da infra-estrutura do sistema de acesso móvel celular. Segue-se o mesmo roteiro feito para o sistema fixo cabeado. São confrontadas três soluções tecnológicas: *modems* HDSL, *modems* ópticos e enlaces via rádio microondas. O sistema é dimensionado para prover dois perfis (hipotéticos) de serviço.

Em ambas as análises (Seções 6.2 e 6.3) as redes avaliadas representam sistemas de acesso de médio a grande porte (em torno de 20 nós). Sistemas com um número maior de nós também poderiam ser avaliados pelos modelos. Porém, na prática, a limitação operacional restringe a aplicação a números que dificilmente superam 30 nós de acesso por *Central de Comutação* (ET ou CCC).

6.2 – Exemplo de Aplicação: Sistema de Acesso Fixo Cabeado - SFC

O modelo xDSL *versus* APON-FTTC utiliza o modelo C5-ME1 como ponto de partida e foi inicialmente apresentado por DeSousa et alii (2001a). Para maior facilidade de acompanhamento, o modelo é reescrito a seguir, com o cuidado de indicar as suas principais adaptações.

6.2.1 – Premissas para o Planejamento com xDSL

Equipamentos

Os equipamentos exigidos para o oferecimento dos quatro serviços estão indicados na Tabela 6.1, e encontram-se detalhados no Capítulo 3. Vale lembrar que o serviço de VOZ não exige equipamentos adicionais.

Tabela 6.1 - Equipamentos exigidos pela solução xDSL.

Equipamento	Local	Serviço
Interface RDSI	Usuário	RDSI
ADSL	Usuário e ET	FLR
<i>Set Top</i>	Usuário	FLR
HDSL	Usuário e ET	FLC

Infra-estrutura

Substituição de Armários

Inicialmente, considera-se que os armários de distribuição existentes em cada nó de acesso estão operando na sua capacidade máxima. Sempre que houver necessidade de se lançar um cabo metálico novo, o armário deverá ser substituído por outro de capacidade maior. Por ser um dado de entrada, esta premissa pode ser alterada a qualquer momento.

Lançamento de Cabos

É feito para cada arco entre o nó de acesso e a ET, com o objetivo de escoar a demanda atendida pelo armário. O planejador precisa candidatar um cabo que atenda (em conjunto com o cabo metálico já instalado) a demanda do nó de acesso com uma folga já estabelecida. O par metálico obrigatório ao atendimento individual de cada usuário na rede secundária é considerado como existente.

Para efeito de simplificação no modelo, não são avaliadas as situações de emendas de cabos. Estas podem ser consideradas numa etapa de pós-otimização, que não será tratada neste trabalho.

Reforço de Canalização

Este cálculo é feito de forma aproximada, utilizando um *fator de disponibilidade de dutos* (fdd) para cada arco ligando o nó de acesso à ET. Na verdade, o fdd representa qual a porcentagem do percurso nó de acesso-ET que possui dutos ociosos, permitindo o lançamento de cabos sem a necessidade de reforço de canalização. Para cada nó de acesso é associado o custo de implantação de um único duto.

6.2.2 – Premissas para o Planejamento com APON-FTTC

Equipamentos

A estrutura geral de uma rede APON-FTTC é descrita no Capítulo 3. A Tabela 6.2 apresenta os principais equipamentos exigidos por esta solução.

Tabela 6.2 - Equipamentos exigidos pela solução APON-FTTC.

Equipamento	Local	Serviço
OLT	ET	Compartilhado
ODNI	ET	Compartilhado
ONU	SS	Compartilhado
<i>Splitter</i>	<i>Link OLT-ONU</i>	Compartilhado
Interface RDSI	Usuário	RDSI
<i>Set Top Digital</i>	Usuário	FLR
Interface de Dados	Usuário	FLC

Infra-estrutura

Lançamento da Rede Óptica

Para cada nó de acesso atendido pela rede APON-FTTC é contabilizado o custo de um cabo de 6 fibras, dimensionado em função da distância nó de acesso-ET. Para o segmento nó de acesso-ONU são adotados cabos aéreos, e a metragem necessária é obtida através de uma estimativa de distância média entre eles.

Rede Secundária

Como os usuários de diferentes serviços podem compartilhar uma mesma ONU, o custo dos equipamentos a serem alocados neste segmento da rede é composto pelo

custo do equipamento individual instalado nas dependências do usuário, adicionado do custo da sua interface na ONU.

Lançamento de Subdutos

São considerados subdutos que possibilitam o lançamento de até 4 cabos ópticos por duto. O cálculo da metragem necessária é feito para cada nó de acesso. O custo adotado é um valor compartilhado, ou seja, é igual ao custo de lançamento do subduto no arco dividido por 4. Uma vez que o lançamento de subdutos e a possibilidade de considerar emendas de cabos ópticos em uma etapa de pós-otimização aumentam consideravelmente a capacidade dos dutos, admitimos que a infra-estrutura da rede instalada é capaz de suportar toda a rede óptica sem a necessidade de reforço de canalização. Assim como na solução metálica, são desconsideradas as situações de emendas.

Alocação de Splitters

O número de *splitters* por APON-FTTC, bem como a sua localização, deve ser fornecido pelo planejador. Maiores detalhes deste procedimento podem ser vistos em DeSousa (1999a).

6.2.3 – Adaptações no Modelo C5-ME1 para xDSL versus APON-FTTC

São poucas as adaptações feitas em relação ao grafo do modelo geral, descrito no capítulo anterior. Elas ocorrem basicamente no segmento de representação da solução tecnológica candidata, aqui adaptada para a solução APON-FTTC.

6.2.3.1 – Representação em Grafos

Cada nó de acesso i pode ser atendido tanto por APON-FTTC (ApF_i) quanto pela tecnologia xDSL (Met_i), ou ambas. Esta situação pode ser representada conforme a Figura 6.1.

Apesar das ONUs estarem espalhadas pela SS, o dimensionamento pode ser feito como se estivessem concentradas no nó de acesso. Isto é possível porque toda a demanda atendida por um grupo de ONUs pertencentes a uma mesma SS, obrigatoriamente, será encaminhada ao único nó de acesso que alimenta esta SS. Na verdade, mesmo que os dados estivessem disponíveis, informá-los um a um seria

trabalhos. Portanto, consideraremos uma distância média entre o nó de acesso e as ONUs.

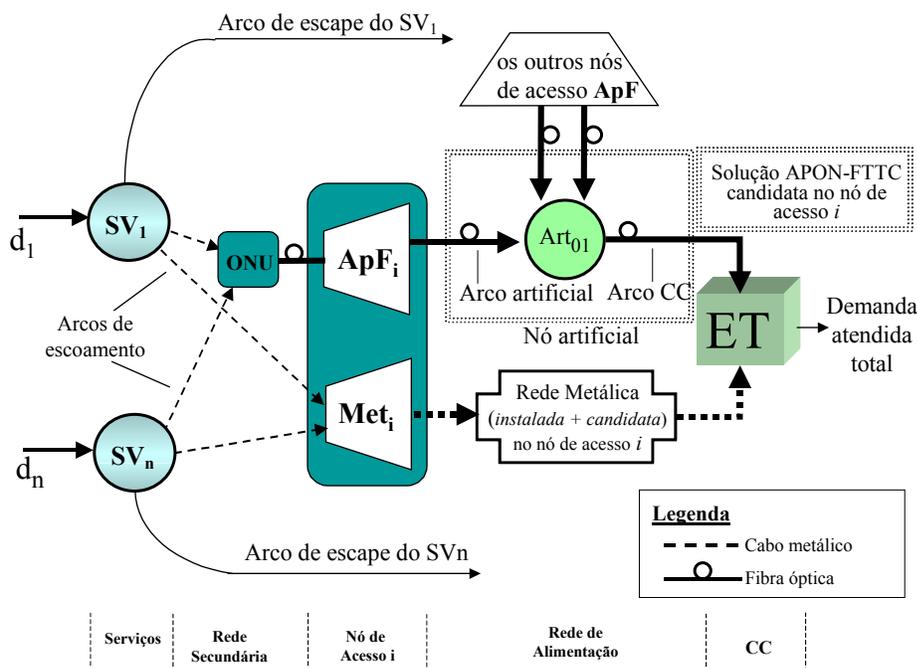


Figura 6.1 - Representação gráfica do modelo xDSL versus APON-FTTC para o SFC.

Para possibilitar o dimensionamento dos equipamentos a serem alocados na ET é criado um único *nó artificial* (Art_{01}). Toda a demanda atendida pelos nós de acesso da rede APON-FTTC (nó ApF_i) será encaminhada a este nó. O dimensionamento das ONUs, cabos ópticos e infra-estrutura é realizado através do *arco artificial* (ApF_i-Art_{01}). O *arco CC* ($Art_{01}-ET$) é utilizado para dimensionar os equipamentos na ET, especificamente os OLTs e as interfaces ODNIs.

Como os *modems* xDSL são dedicados a cada serviço individualmente, eles são contabilizados através da rede secundária. O fluxo nos arcos de escoamento para a rede metálica é o indicador de quantos equipamentos devem ser alocados.

As demandas nos *nós artificiais de serviço* – SV_1 (VOZ), SV_2 (RDSI), SV_3 (FLR) e SV_4 (FLC) – devem ser apresentadas em uma mesma unidade, como por exemplo número de assinantes previstos para cada serviço.

6.2.3.2 – O Modelo Matemático

O modelo é formulado como um programa de programação linear inteira mista, com variáveis 0-1. As variáveis inteiras, que correspondem à decisão de escolher

alguns equipamentos da tecnologia APON-FTTC (OLT, ODNI e ONU), embora sejam indicadas como tal, foram todas convertidas em variáveis inteiras binárias durante o processo de implementação. Esta transformação pode ser conferida em DeSousa (1999a). O modelo xDSL *versus* APON-FTTC, denominado C6-ME1, é:

Função objetivo: é a mesma do modelo geral C5-ME1.

Maximizar

$$R(\mathbf{y}) = \sum_{(s,i) \in A_E} r_{si} Y_{si} \quad (6-1)$$

onde :

$R(\mathbf{y})$: receita total dos serviços oferecidos;

A_E : conjunto dos arcos de escoamento que conectam os nós artificiais de serviço aos nós de acesso;

Y_{si} : variável real não-negativa associada ao fluxo de demanda escoado pelo arco de escoamento que liga o nó artificial de serviço s ao nó de acesso i ;

r_{si} : receita unitária do serviço s oferecido ao nó de acesso i .

A maximização está sujeita às seguintes restrições:

Restrição de limite de orçamento: As quatro primeiras parcelas referem-se aos custos da solução APON-FTTC (OLT, ODNI, ONU, *splitter*, cabo óptico, duto, etc). A quinta parcela contabiliza o custo de expansão em rede metálica (cabo metálico, duto, etc). A sexta e sétima parcela refere-se ao custo dos equipamentos dimensionados pela rede secundária (equipamentos do usuário, inclusive *modems* xDSL, e interfaces de usuário em cada nó de acesso).

$$\begin{aligned} & \sum_{n \in N1} \varphi^{X,n} \cdot X_n + \sum_{n \in N2} \varphi^{Z,n} \cdot Z_n + \sum_{(i,j) \in A_A} \sum_{n \in N3_{ij}} \varphi_{ij}^{O,n} \cdot O_{ijn} + \sum_{i \in I_F} \varphi_i^W \cdot W_i + \\ & \sum_{(i,j) \in A_M} \sum_{p \in C_M} \varphi_{ij}^{M,p} \cdot M_{ijp} + \sum_{(s,i) \in A_{EF}} \varphi_{si} \cdot Y_{si} + \sum_{(s,i) \in A_{EM}} \varphi_{si} \cdot Y_{si} \leq L \end{aligned} \quad (6-2)$$

onde:

$N1$: conjunto de sistemas OLT candidatos na ET (isto é, no arco CC);

X_n : variável inteira associada à escolha do sistema OLT, do tipo n , candidato na ET;

$\varphi^{X,n}$: custo associado à escolha do sistema OLT, do tipo n , candidato na ET;

$N2$: conjunto de ODNI's candidatas na ET (isto é, no arco CC);

- Z_n : variável inteira associada à escolha da ODNI, do tipo n , candidata na ET;
- $\varphi^{Z,n}$: custo associado à escolha da ODNI, do tipo n , candidata na ET;
- A_A : conjunto de arcos artificiais (arcos que podem receber a tecnologia APON-FTTC como candidata). É um subconjunto de A_{ST} (definido na Seção 5.4);
- N_{3ij} : conjunto de ONUs candidatas no arco $(i, j) \in A_A$;
- O_{ijn} : variável inteira associada à escolha da ONU, do tipo n , candidata no arco $(i, j) \in A_A$;
- $\varphi_{ij}^{O,n}$: custo associado à escolha da ONU do tipo n , candidata no arco $(i, j) \in A_A$;
- I_F : conjunto de nós de acesso atendidos pela rede APON-FTTC (nós ApF_i);
- W_i : variável binária associada à escolha da tecnologia APON-FTTC nó de acesso $i \in I_F$;
- φ_i^W : custo associado à escolha da tecnologia APON-FTTC (infra-estrutura) no nó de acesso $i \in I_F$;
- A_M : conjunto de arcos que podem receber cabos metálicos;
- C_M : conjunto de modularidades de cabos metálicos (novos);
- M_{ijp} : variável binária associada à escolha do cabo metálico M , de modularidade p , candidato no arco $(i, j) \in A_M$;
- $\varphi_{ij}^{M,p}$: custo associado à escolha do cabo metálico M (equipamentos e infra-estrutura), de modularidade p , candidato no arco $(i, j) \in A_M$;
- A_{EF} : conjunto de arcos artificiais de serviço (arcos de escoamento) que conectam os nós artificiais de serviço aos nós de acesso pela tecnologia APON-FTTC (subconjunto de A_E);
- A_{EM} : conjunto de arcos artificiais de serviço (arcos de escoamento) que conectam os nós artificiais de serviço aos nós de acesso pela tecnologia metálica (subconjunto de A_E);
- φ_{si} : custo da rede secundária para a disponibilização do serviço do tipo s para o nó de acesso i , usando o arco $(s, i) \in A_E = A_{EF} \cup A_{EM}$;
- L : orçamento.

Restrições de balanço de fluxo: em (6-4) foi considerado que o serviço FLC requer dois pares de cobre na conexão HDSL.

$$\sum_{i \in (I_F \cup I_M)} Y_{si} + Yesc_s = d_s \quad , \quad \forall s \in I_S \quad (6-3)$$

$$\sum_{j \in J_1} Y_{ij} - (Y_{(S_1,i)} + Y_{(S_2,i)} + Y_{(S_3,i)} + 2.Y_{(S_4,i)}) = 0 \quad , \quad \forall i \in I_M \quad (6-4)$$

$$\sum_{j \in J_1} Y_{ij} - \sum_{j \in J_2} Y_{ji} = 0 \quad , \quad \forall i \in I - (I_S \cup I_M) \quad (6-5)$$

onde:

I : conjunto de todos os nós do grafo, exceto o nó da CC;

I_S : conjunto dos nós artificiais de serviço;

I_M : conjunto de nós de acesso atendidos pela rede metálica (nós Met_i);

Y_{esc_s} : variável real não-negativa associada à demanda não atendida do serviço s (fluxo de demanda através de um arco de escape);

d_s : demanda total do serviço s , entrando na rede pelo nó $s \in I_S$;

J_1 : conjunto de nós j diretamente conectados ao nó i , por arcos orientados de i para j (fluxo saindo do nó i);

J_2 : conjunto de nós j diretamente conectados ao nó i , por arcos orientados de j para i (fluxo entrando no nó i);

Y_{ij} : variável real não-negativa associada ao fluxo de demanda escoado pelo arco (i, j) .

Restrições técnicas de capacidade: as Restrições (6-6) e (6-7) referem-se à capacidade da ONU (em número de assinantes *narrowband* e *broadband*, respectivamente) em cada nó de acesso. As Restrições (6-8) e (6-9) indicam a capacidade da ODNI (em taxa de transmissão *downstream* e *upstream*, respectivamente). As Restrições (6-10) e (6-11) padronizam o dimensionamento do OLT (em número de assinantes *narrowband* e *broadband*, respectivamente). A Restrição (6-12) limita o número de ODNI's que podem ser gerenciadas pelo OLT. Finalmente, o dimensionamento da rede metálica (*modems* xDSL, cabos, dutos, etc) é dada pela Restrição (6-13).

$$\sum_{n \in N_{3ij}} \text{cap}_{nb}^{o,n} \cdot O_{ijn} - \sum_{(s,i) \in A_{EFnb}} Y_{si} \geq 0 \quad , \quad \forall (i, j) \in A_A \quad (6-6)$$

$$\sum_{n \in N_{3ij}} \text{cap}_{bb}^{o,n} \cdot O_{ijn} - \sum_{(s,i) \in A_{EFbb}} Y_{si} \geq 0 \quad , \quad \forall (i, j) \in A_A \quad (6-7)$$

$$\sum_{n \in N_2} \text{cap}_{ds}^{z,n} \cdot Z_n - \left(\sum_{(s,i) \in A_{EF}} \text{bd}_s \cdot Y_{si} + \sum_{(s,i) \in A_{EFbb}} \text{bd}_{s_1} \cdot Y_{si} \right) \geq 0 \quad (6-8)$$

$$\sum_{n \in N_2} \text{cap}_{us}^{z,n} \cdot Z_n - \left(\sum_{(s,i) \in A_{EF}} \text{bu}_s \cdot Y_{si} + \sum_{(s,i) \in A_{EFbb}} \text{bu}_{s_1} \cdot Y_{si} \right) \geq 0 \quad (6-9)$$

$$\sum_{n \in N1} \text{cap}_{nb}^{X,n} \cdot X_n - \sum_{(s,i) \in A_{EF}} Y_{si} \geq 0 \quad (6-10)$$

$$\sum_{n \in N1} \text{cap}_{bb}^{X,n} \cdot X_n - \sum_{(s,i) \in A_{EFbb}} Y_{si} \geq 0 \quad (6-11)$$

$$\sum_{n \in N1} \text{cap}_{odni}^{X,n} \cdot X_n - \sum_{n \in N2} Z_n \geq 0 \quad (6-12)$$

$$\left(p_{ij} + \sum_{p \in C_M} [\text{cap}_{ij}^{M,p} \cdot M_{ijp}] \right) (1 - \text{fdc}_{ij}) - Y_{ij} \geq 0, \quad \forall (i, j) \in A_M \quad (6-13)$$

onde:

$\text{cap}_{nb}^{O,n}$: capacidade da ONU, do tipo n, expressa em número de assinantes para os serviços faixa-estreita (*narrowband*);

A_{EFnb} : subconjunto de A_{EF} constituído pelos arcos que transportam fluxo de demanda dos serviços faixa-estreita;

$\text{cap}_{bb}^{O,n}$: capacidade da ONU, do tipo n, expressa em número de assinantes para os serviços faixa-larga (*broadband*);

A_{EFbb} : subconjunto de A_{EF} constituído pelos arcos que transportam fluxo de demanda dos serviços faixa-larga;

$\text{cap}_{ds}^{Z,n}$: capacidade de transmissão (em Mbps) da ODNI, do tipo n, no sentido *downstream*;

bd_s : banda exigida pelo serviço s no sentido *downstream*;

bd_{s1} : banda exigida pelo serviço s_1 (VOZ) no sentido *downstream*;

$\text{cap}_{us}^{Z,n}$: capacidade de transmissão (em Mbps) da ODNI, do tipo n, no sentido *upstream*;

bu_s : banda exigida pelo serviço s no sentido *upstream*;

bu_{s1} : banda exigida pelo serviço s_1 no sentido *upstream*;

$\text{cap}_{nb}^{X,n}$: capacidade do OLT, do tipo n, expressa em número de assinantes para os serviços faixa-estreita;

$\text{cap}_{bb}^{X,n}$: capacidade do OLT do tipo n, expressa em número de assinantes para os serviços faixa-larga;

$\text{cap}_{odni}^{X,n}$: capacidade do OLT do tipo n, expressa em número de ODNI's a serem gerenciadas;

p_{ij} : número de pares metálicos instalados no arco $(i, j) \in A_M$ (capacidade existente no arco);

$cap_{ij}^{M,p}$: capacidade (em pares metálicos) disponível no cabo M , de modularidade p , candidato no arco $(i, j) \in A_M$;

fdc_{ij} : (fator de disponibilidade de cabos) parâmetro que representa a folga desejada (pares metálicos não utilizados) no arco $(i, j) \in A_M$.

Restrições de interdependência: garantia de que uma ONU só é alocada para um nó de acesso se e somente se a tecnologia APON-FTTC é adotada no nó.

$$B W_i - O_{ijn} \geq 0, \forall i \in I_F, \forall j \in J_i, \forall n \in N3_{ij} \quad (6-14)$$

onde :

B : número inteiro muito grande (número máximo de ONUs que podem ser alocadas em um nó de acesso);

Restrições de atendimento: são as mesmas do modelo geral. Vamos considerar o atendimento guiado pelo *controle de demanda por nó de acesso*.

$$Y_{(s,ApF_i)} + Y_{(s,Met_i)} \geq dmin_{si}, \forall s \in I_S, \forall i \in I - (I_S \cup I_{Art_{01}}) \quad (6-15)$$

$$Y_{(s,ApF_i)} + Y_{(s,Met_i)} \leq dmax_{si}, \forall s \in I_S, \forall i \in I - (I_S \cup I_{Art_{01}}) \quad (6-16)$$

onde:

$I_{Art_{01}}$: nó artificial Art_{01} ;

$dmin_{si}$:demanda mínima prevista, para o serviço s , no nó de acesso $i \in I - (I_S \cup I_{Art_{01}})$;

$dmax_{si}$:demanda máxima prevista, para o serviço s , no nó de acesso $i \in I - (I_S \cup I_{Art_{01}})$.

6.2.4 – Dados de Entrada para o Modelo C6-ME1

6.2.4.1 – Dados de Rede

São utilizados os dados de uma área de estação que atende um bairro residencial de classe média, com baixa atividade comercial. Na Figura 6.2 são apresentados os 17 nós de acesso que compõem esta rede. São indicados também a demanda total (dt_i), o comprimento dos arcos e a quantidade de pares metálicos disponíveis em cada nó de acesso. Existem 11.900 assinantes em potencial. A capacidade da rede instalada (apenas cabos metálicos) é de 8.100 usuários.

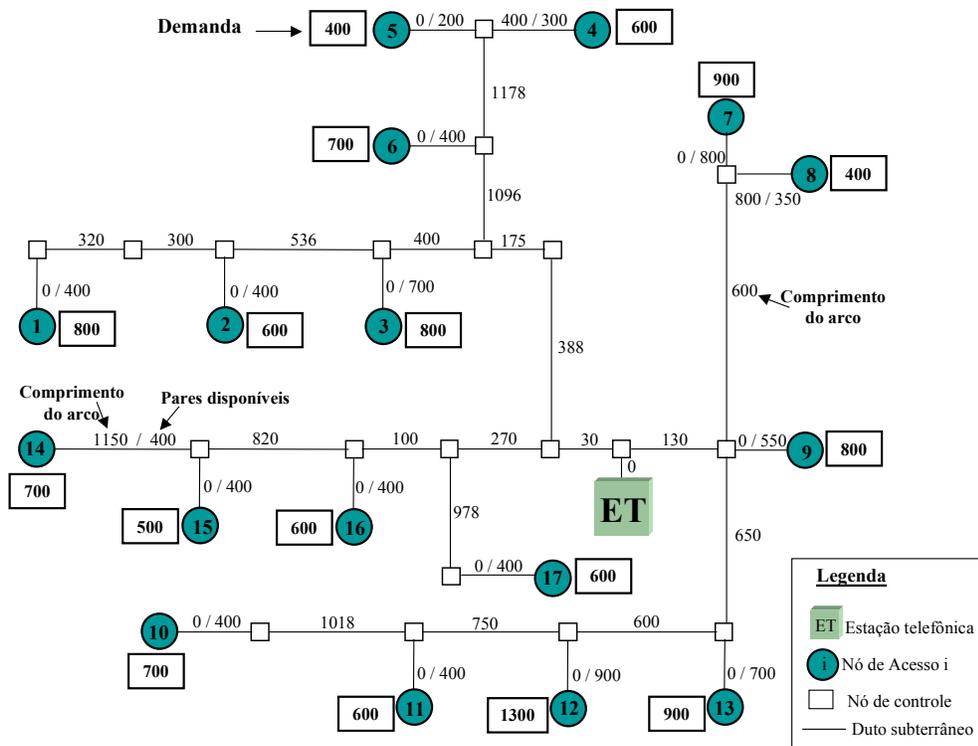


Figura 6.2 - Rede utilizada no planejamento do SFC.

6.2.4.2 – Dados de Serviços e de Soluções Tecnológicas

Dados dos principais equipamentos das soluções xDSL e APON-FTTC, tais como serviço suportado, capacidade de equipamentos (modularidades) e custos (valores relativos), estão na Tabela 6.3. O custo do *modem* ADSL (unidade) é adotado como referência (valor 1,000). A planilha de custos completa encontra-se no Anexo 1.

Tabela 6.3 - Dados de equipamentos das soluções xDSL e APON-FTTC.

Equipamento	Serviço suportado	Capacidade	Custo
ADSL	FLR	1 x 2 Mbps (assimétrico)	1,000
HDSL	FLC	1 x 2 Mbps (simétrico)	1,000
Interface RDSI	RDSI	1 x 144 Kbps (simétrico)	0,400
OLT	Todos	Assinantes: 10.000 faixa-estreita + 2.500 faixa-larga;	231,250
ODNI (no OLT)	Todos	Gerenciamento: até 16 ODNI's. Banda livre: 600 Mbps <i>downstream</i> ; 150 Mbps <i>upstream</i> .	4,000
ONU	Todos	Assinantes: 128 faixa-estreita + 32 faixa-larga.	1,025

A Tabela 6.4 mostra a taxa de transmissão e a receita unitária (valor relativo), para os quatro serviços considerados. O atendimento mínimo obrigatório (fam) deve ser respeitado em cada um dos nós de acesso.

Tabela 6.4 - Especificações técnicas dos serviços.

Serviços	Taxa de transmissão		fam %	Receita (por usuário)
	<i>downstream</i>	<i>upstream</i>		
VOZ	64 Kbps	64 Kbps	60	0,120
RDSI	144 Kbps	144 Kbps	55	0,344
FLR	2 Mbps	64 Kbps	50	0,800
FLC	2 Mbps	2 Mbps	65	1,800

6.2.5 – Aplicação do Modelo C6-ME1

O cenário de implantação de rede é avaliado. O dimensionamento da rede é feito em diferentes situações de estrutura de custos para os equipamentos das duas tecnologias. Para satisfazer as previsões de mercado de maneira mais realista, é admitido que a variação de custo pode ocorrer para todos os componentes, exceto para a infra-estrutura da rede metálica: cabos, dutos e armários de distribuição. Conseqüentemente, para cada nova situação de planejamento, têm-se dois grupos de equipamentos:

Grupo 1 - aqueles que não sofreram queda de preço (cabos, dutos e armários de distribuição da rede metálica), e

Grupo 2 - aqueles que sofreram queda de preço (todos os elementos de rede, exceto os do *Grupo 1*). A redução de custo é definida como sendo uma porcentagem do valor base de implantação do equipamento.

Paralelamente com a redução nos custos dos equipamentos, varia-se também a penetração dos serviços RDSI, FLR e FLC. São avaliadas várias configurações de atendimento e custo; a Tabela 6.5 lista os dados de entrada para 5 instâncias.

A variação acontece para um único ano base, e não ao longo de um horizonte de planejamento. Assim, algumas premissas quanto à variação na penetração dos serviços precisam ser obedecidas:

- As demandas dos serviços RDSI, FLR e FLC de cada nó de acesso são calculadas como uma porcentagem da demanda total do nó; o restante dos assinantes continua demandando apenas o serviço de VOZ. Exemplo, instância A: são previstos 400 assinantes para o nó de acesso 5; assim,

teremos 10 usuários para o serviço RDSI com uma penetração de 2,5%, 2 usuários para o serviço FLR com uma penetração de 0,5%, 8 usuários para o serviço FLC com uma penetração de 2,0% e o restante (380 usuários) demandará apenas o serviço de VOZ. Nas situações em que o resultado não é um número inteiro, efetua-se o arredondamento "para cima".

Tabela 6.5 - Instâncias analisadas.

	Instâncias				
	A	B	C	D	E
Nível de penetração do serviço (%)					
VOZ	95,0	93,4	84,6	76,6	67,5
RDSI	2,5	2,8	6,0	9,8	13,3
FLR	0,5	0,8	1,9	3,1	5,2
FLC	2,0	3,0	7,5	10,5	14,0
Queda de preço de equipamento (%)					
	0	10	20	25	30
Orçamento previsto (unidade monetária)					
	1.000,0	1.150,0	1.500,0	1.800,0	2.100,0

- Os serviços RDSI, FLR e FLC continuam incluindo o serviço de VOZ.
- A soma das demandas dos 4 serviços para cada nó de acesso, em cada instância, é sempre constante e igual aos valores apresentados na Figura 6.2.

Como resultado dessas premissas, à medida em que se aumenta a penetração dos serviços RDSI, FLR e FLC, a demanda (exclusiva) do serviço de VOZ diminui.

Consideramos uma disponibilidade de 50% ($fdd_{ij}=0,5$) nos dutos instalados e que a rede metálica deve assegurar uma folga mínima de 20% ($fdc_{ij}=0,2$) em cada arco a ser dimensionado.

Análise dos Resultados

Para a modelagem utilizou-se a linguagem de programação matemática AMPL (*A Modeling Language for Mathematical Programming*) (Fourer et alii, 1993). O problema, assim como todos os demais neste trabalho, é resolvido por meio do *solver* CPLEX® (CPLEX, 1999), que implementa o método de resolução *branch-and-bound* (Guerreiro et alii, 1985).

Para cada instância foi estipulado um orçamento (Tabela 6.5). Na busca da receita máxima, obtivemos as configurações de atendimento mostradas na Tabela 6.6. A receita gerada cresce consideravelmente com aumento da penetração dos serviços,

mesmo em situações onde o orçamento é “apertado” e o número total de usuários efetivamente atendidos é reduzido. A partir da instância C, a receita oriunda dos serviços faixa-larga supera a dos serviços faixa-estreita.

Tabela 6.6 - Receita e configuração de atendimento.

Inst.	Receita	Usuários (total)	Rede Metálica + xDSL				Rede APON-FTTC			
			VOZ	RDSI	FLR	FLC	VOZ	RDSI	FLR	FLC
A	1.771,8	11.578	11.179	173	36	190	0	0	0	0
B	2.014,3	10.874	9.358	195	0	0	867	0	97	357
C	3.023,0	10.591	7.941	410	0	0	1.116	0	228	896
D	3.683,0	9.543	6.739	809	0	125	372	0	370	1.128
E	4.572,0	9.703	5.888	878	0	0	665	0	606	1.666

Para a instância A, em que a solução é totalmente metálica, os serviços mais penalizados são o RDSI e o FLR. Estes serviços estão em seu nível de atendimento mínimo, seguidos de perto pelo serviço FLC.

A partir do momento em que a tecnologia APON-FTTC passa a ser escolhida (instância B), os serviços faixa-larga tornam-se os mais interessantes. O atendimento destes serviços fica próximo do máximo em quase todas as instâncias. Por outro lado, os serviços faixa-estreita passam a ter as suas demandas penalizadas: o serviço RDSI é oferecido somente por rede metálica, e obteve atendimento mínimo em quase todas as instâncias, evidenciando a sua pouca rentabilidade para este cenário; o serviço de VOZ tem a sua hegemonia comprometida a medida que se aumenta a penetração, a demanda não atendida cresce consideravelmente, e o atendimento é garantido principalmente pela rede metálica já instalada.

É possível observar que a rede APON-FTTC atende todos os usuários dos serviços faixa-larga. As exceções são a instância A (rede totalmente metálica) e a instância D, onde encontramos 125 assinantes servidos por HDSL. Este último caso representa uma transição entre optarmos por 1 ou 2 OLTs na ET, decisão altamente influenciada pela modularidade deste equipamento em número de ODNIs a serem gerenciadas: 16 (Tabela 6.3). Como esta transição representa um investimento muito alto, a opção mais apropriada foi a de atender parte dos serviços FLC por *modems* HDSL e esperar mais um aumento na penetração dos serviços faixa-larga (instância E, onde já são escolhidos dois OLTs).

A Figura 6.3a, modificada em relação à Figura 6.2 para uma melhor visualização, apresenta a configuração da rede (somente a nova) para a instância A. Ela indica a demanda a ser atendida (total de usuários), o cabo a ser instalado em

cada nó de acesso e a participação dos serviços faixa-estreita e faixa-larga na receita gerada. Devido ao orçamento limitado, o nó de acesso 8 não recebeu cabo novo. A demanda indicada para este nó é atendida pelo cabo já existente, respeitada a folga de 20%.

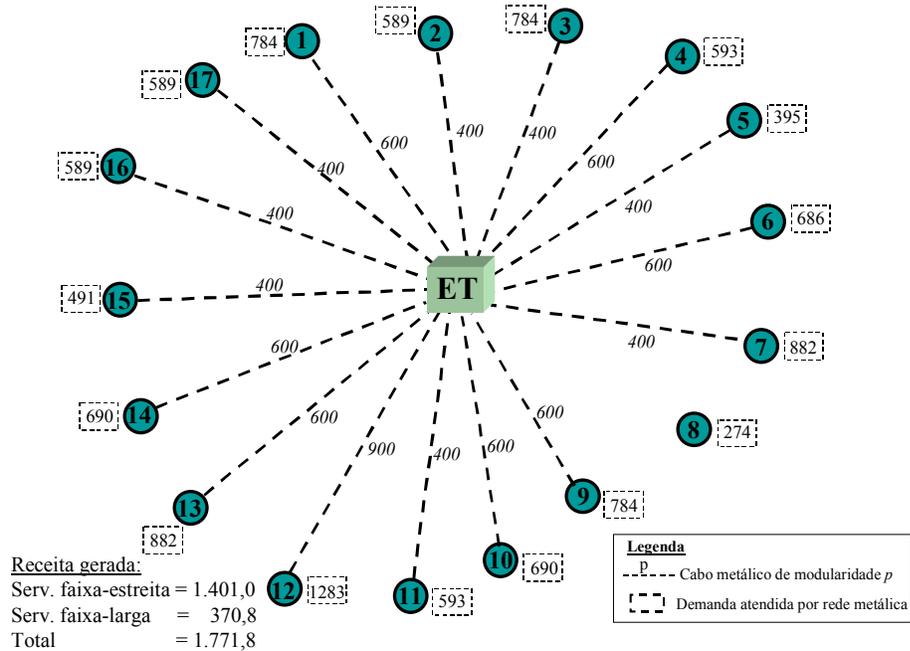


Figura 6.3a - Configuração de atendimento para a instância A.

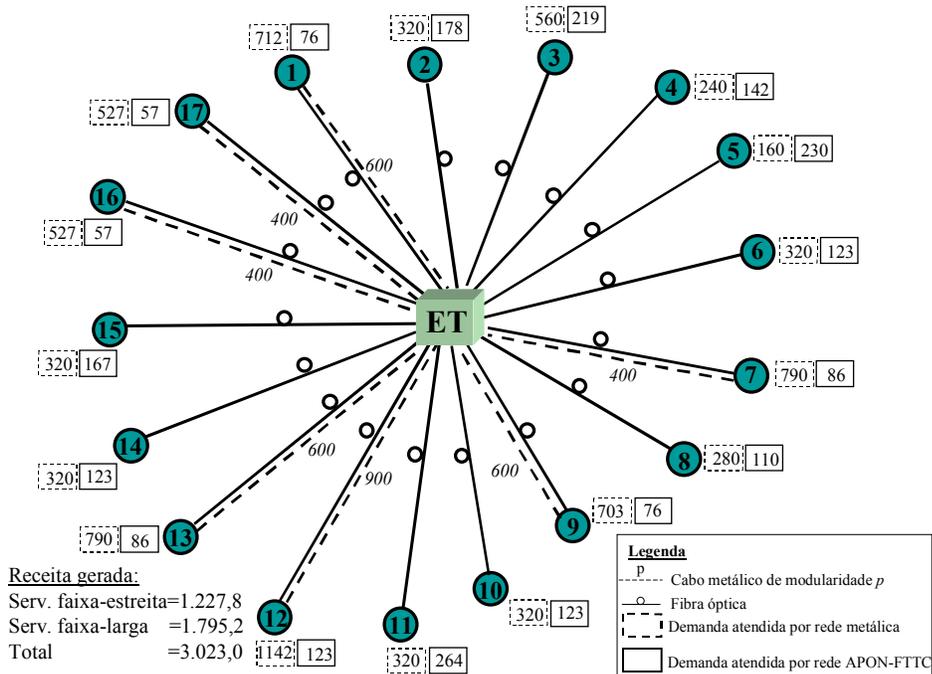


Figura 6.3c - Configuração de atendimento para a instância C.

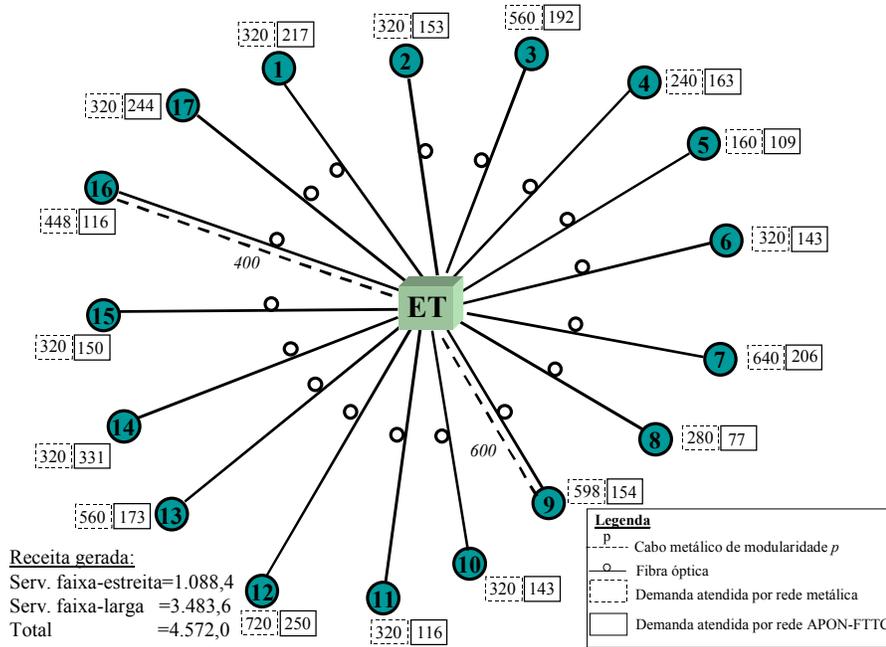


Figura 6.3e - Configuração de atendimento para a instância E.

A Figura 6.3e mostra o resultado para a instância E. Para cada nó de acesso, ela apresenta os cabos a serem instalados e a demanda a ser atendida por cada uma das tecnologias.

Em situações com alta penetração dos serviços faixa-larga, nós podemos observar a predominância da rede óptica. Pode ser visto também que a migração da rede metálica para a óptica inicia a partir dos nós mais distantes da ET (veja também as Figuras 6.2 e 6.3c).

Uma outra aplicação da metodologia ao sistema de acesso fixo cabeado pode ser encontrada em DeSousa et alii (1999b), onde os autores avaliam (comparam) as tecnologias xDSL e SDH (Sexton e Reid, 1997), para três topologias de atendimento: estrela simples, dupla-estrela e anel.

6.3 – Exemplo de Aplicação: Infra-estrutura do SMC

O sistema de acesso móvel celular, apresentado no Capítulo 2, é composto por estações móveis (EM) e componentes fixos (ERB e CCC). Os componentes da parte fixa, também chamada de infra-estrutura do sistema, são interconectados por linhas privadas suportadas por rede de cobre, redes ópticas ou, ainda, enlaces via rádio microondas (Capítulo 3).

O planejamento da infra-estrutura deve ser feito respeitando, obviamente, os requisitos mínimos de performance e também as restrições técnicas de capacidade dos equipamentos. Mais especificamente, o planejamento da parte fixa contempla as seguintes atividades:

- Localização e dimensionamento das ERBs;
- Localização e dimensionamento da CCC ;
- Interconexão otimizada das ERBs às CCCs;
- Dimensionamento da rede de sinalização necessária para suportar os serviços oferecidos pelo sistema.

6.3.1 – Premissas para o Planejamento

Cada CCC tem sua própria rede independente (definida em um estágio de planejamento anterior). Portanto, a cada momento pode-se avaliar apenas uma CCC. A interface aérea não é considerada no estudo. Os usuários são agregados de acordo com o tipo de serviço que eles requerem. Adicionalmente, o modelo é focalizado na alocação de equipamentos que realizam a interconexão otimizada das ERBs com a CCC.

Equipamentos

Três soluções tecnológicas são confrontadas: *modems* HDSL, *modems* ópticos e rádio microondas. Os equipamentos são dimensionados em conformidade com sua capacidade de transportar canais de 2 Mbps (canais E1). Desta forma, as três soluções são capazes de suportar qualquer tipo de serviço, desde que sejam convertidos (ou agregados) em canais E1. Através de conexões que utilizam equipamentos na ERB e na CCC, são configuradas topologias estrela simples, dupla estrela e rota.

Infra-estrutura

As condições de infra-estrutura existente (ou não) são agregadas ao modelo partindo-se de um pré-processamento onde os custos são escolhidos em conformidade com o cenário que se deseja avaliar. Por exemplo, os sistemas de rádio microondas, para pequenas distâncias, possuem custo zero de infra-estrutura por não necessitarem de cabos e dutos para realizar a sua conexão entre dois transmissores/receptores. Agora, para garantir a qualidade da conexão quando o enlace é bastante longo torna-se indispensável a utilização de sistemas repetidores/amplificadores. Nestes casos, deve-se computar os custos destes equipamentos como gasto com infra-estrutura.

Uma outra preocupação deve-se à limitação física da rede metálica, que tem sua capacidade de transmissão fortemente afetada pela distância. Para garantir a qualidade da transmissão de um canal E1, admitimos que a distância máxima aceitável para um *link* usando HDSL é de 4 km. Esta limitação, juntamente com a inexistência de modularidade superior a um canal E1, impede a utilização do *modem* HDSL para aqueles enlaces que agregam demanda das topologias dupla-estrela e rota.

6.3.2 – Adaptações no Modelo C5-ME1 para HDSL *versus* Modem Óptico *versus* Rádio Microondas

São poucas as adaptações feitas em relação ao grafo do modelo geral C5-ME1, descrito no Capítulo 5. Elas ocorrem basicamente no segmento de representação das soluções tecnológicas candidatas. O modelo HDSL *versus* Modem Óptico *versus* Rádio Microondas foi inicialmente apresentado por DeSousa et alii (2000). Novamente, para maior facilidade de acompanhamento, o modelo é reescrito a seguir.

6.3.2.1 – Representação em Grafos

Um grafo orientado é usado para representar a rede (Figura 6.4). Um nó do grafo corresponde à CCC, enquanto os outros estão associados aos pontos de demanda (ERBs). Os nós artificiais de serviço (SV_1 - SV_n) são os nós-fonte que recebem a demanda total de cada serviço e a distribuem pelas ERBs através dos arcos de escoamento. Supõe-se que a conversão da demanda em canais E1 é feita quando o fluxo entra no nó de ERB. Portanto, existe a necessidade de que a unidade de demanda apresentada aos nós artificiais de serviço seja única. O planejador deve

oferecer também os fatores de conversão de taxa de transmissão para cada serviço previsto.

Os arcos de interligação entre ERBs e a CCC representam as possíveis conexões onde o planejador realiza a candidatura dos sistemas de transmissão, atribuindo custos e restrições técnicas de capacidade. Diferentemente do apresentado para o sistema de acesso fixo cabeado, o nó de acesso não é dividido em dois. A existência (ou não) de cabos e dutos é reconhecida pelo modelo através da estrutura de custos adotada.

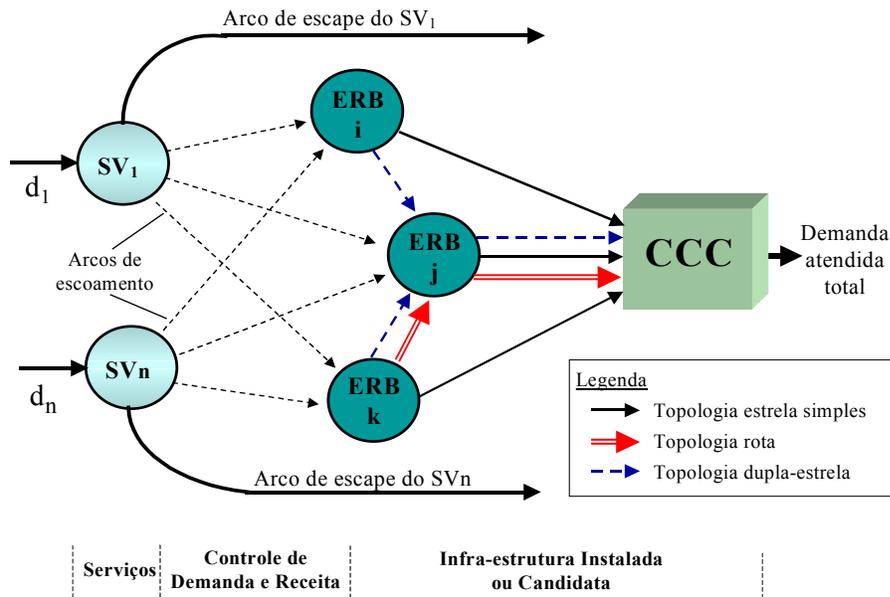


Figura 6.4 - Representação gráfica do modelo HDSL *versus* modem óptico *versus* rádio microondas.

6.3.2.2 – O Modelo Matemático

O modelo matemático é um problema de programação linear inteira mista com variáveis 0-1 e utiliza a abordagem nó-arco. As variáveis de decisão referem-se ao valor do fluxo nos arcos (reais) e à alocação e dimensionamento dos sistemas de transmissão (binárias) em cada arco para o atendimento da demanda.

O modelo HDSL *versus* Modem Óptico *versus* Rádio Microondas, denominado C6-ME2, é:

Função objetivo: é a mesma do modelo geral C5-ME1.

$$\text{Maximizar } R(\mathbf{y}) = \sum_{(s,i) \in A_E} r_{si} Y_{si} \tag{6-17}$$

onde :

- $R(y)$: receita total dos serviços oferecidos;
- A_E : conjunto dos arcos de escoamento que conectam os nós artificiais de serviço aos nós de acesso;
- Y_{si} : variável real não-negativa associada ao fluxo de demanda escoado pelo arco de escoamento que liga o nó artificial de serviço s ao nó de acesso i ;
- r_{si} : receita unitária do serviço s oferecido ao nó de acesso i .

A maximização está sujeita às seguintes restrições:

Restrição de limite de orçamento: A primeira parcela refere-se aos custos da solução HDSL. A segunda parcela contabiliza o custo com os sistemas de *modems* ópticos. A terceira parcela refere-se ao custo dos rádios microondas.

$$\sum_{(i,j) \in A} \sum_{n \in H_{ij}} (\varphi_{ij}^{X_{eq,n}} + \varphi_{ij}^{X_{r,n}} \cdot l_{ij}) \cdot X_{ijn} + \sum_{(i,j) \in A} \sum_{n \in O_{ij}} (\varphi_{ij}^{Z_{eq,n}} + \varphi_{ij}^{Z_{r,n}} \cdot l_{ij}) \cdot Z_{ijn} + \sum_{(s,i) \in A} \sum_{n \in R_{ij}} (\varphi_{ij}^{W_{eq,n}} + \varphi_{ij}^{W_{r,n}} \cdot l_{ij}) \cdot W_{ijn} \leq L \quad (6-18)$$

onde:

- A : conjunto de arcos conectando nós ERB-ERB ou nós ERB-CCC;
- H_{ij} : conjunto de sistemas de *modems* HDSL candidatos no arco $(i, j) \in A$;
- X_{ijn} : variável inteira associada à escolha do sistema de *modems* HDSL, tipo n , candidato no arco $(i, j) \in A$. A exemplo do modelo C6-ME1 (Seção 6.2.3.2), esta variável também foi convertida para variável binária, conforme processo descrito em DeSousa (1999a);
- $\varphi_{ij}^{X_{eq,n}}$: custo associado à escolha do sistema de *modems* HDSL (equipamentos), tipo n , candidato no arco $(i, j) \in A$;
- $\varphi_{ij}^{X_{r,n}}$: custo associado à escolha do sistema de *modems* HDSL (cabos e dutos), tipo n , candidato no arco $(i, j) \in A$;
- l_{ij} : comprimento do arco $(i, j) \in A$;
- O_{ij} : conjunto dos sistemas de *modems* ópticos candidatos no arco $(i, j) \in A$;
- Z_{ijn} : variável binária associada à escolha do sistema de *modems* ópticos, tipo n , candidato no arco $(i, j) \in A$;
- $\varphi_{ij}^{Z_{eq,n}}$: custo associado à escolha do sistema de *modems* ópticos (equipamentos), tipo n , candidato no arco $(i, j) \in A$;
- $\varphi_{ij}^{Z_{r,n}}$: custo associado à escolha do sistema de *modems* ópticos (cabos e dutos), tipo n , candidato no arco $(i, j) \in A$;

- R_{ij} : conjunto dos sistemas rádio microondas candidatos no arco $(i, j) \in A$;
- W_{ijn} : variável binária associada à escolha do sistema rádio microondas, tipo n , candidato no arco $(i, j) \in A$;
- $\varphi_{ij}^{W_{eq},n}$: custo associado à escolha do sistema rádio microondas (equipamentos), tipo n , candidato no arco $(i, j) \in A$;
- $\varphi_{ij}^{W_{r},n}$: custo associado à escolha do sistema rádio microondas (repetidores e amplificadores), tipo n , candidato no arco $(i, j) \in A$;
- L : orçamento.

Restrições de balanço de fluxo: são as mesmas do modelo geral C5-ME1.

$$\sum_{i \in I-I_s} Y_{si} + Y_{esc_s} = d_s, \quad \forall s \in I_s \quad (6-19)$$

$$\sum_{j \in J_1} Y_{ij} - \sum_{j \in J_2-I_s} Y_{ji} - \sum_{s \in I_s} fc_s \cdot Y_{si} = 0, \quad \forall i \in I-I_s \quad (6-20)$$

onde:

- I : conjunto de todos os nós do grafo, exceto o nó da CCC;
- I_s : conjunto dos nós artificiais de serviço;
- Y_{esc_s} : variável real não-negativa associada à demanda não atendida do serviço s (fluxo de demanda através de um arco de escape);
- d_s : demanda total do serviço s , entrando na rede pelo nó $s \in I_s$;
- J_1 : conjunto de nós j diretamente conectados ao nó i , por arcos orientados de i para j (fluxo saindo do nó i);
- J_2 : conjunto de nós j diretamente conectados ao nó i , por arcos orientados de j para i (fluxo entrando no nó i);
- Y_{ij} : variável real não-negativa associada ao fluxo de demanda escoado pelo arco (i, j) ;
- fc_s : fator de conversão de taxa de transmissão do serviço s .

Restrições técnicas de capacidade: é preciso substituir as Restrições (5-5) e (5-6) pela Restrição (6-21). É a garantia de que a capacidade total dos sistemas de *modems* HDSL + *modems* ópticos + rádio microondas escolhidos seja superior ao fluxo escoado pelo arco.

$$\sum_{n \in H_{ij}} \text{cap}_{ij}^{X,n} \cdot X_{ijn} + \sum_{n \in O_{ij}} \text{cap}_{ij}^{Z,n} \cdot Z_{ijn} + \sum_{n \in R_{ij}} \text{cap}_{ij}^{W,n} \cdot W_{ijn} - Y_{ij} \geq 0, \forall (i, j) \in A \quad (6-21)$$

onde:

$\text{cap}_{ij}^{X,n}$: capacidade do sistema de *modems* HDSL, tipo n, candidato no arco $(i, j) \in A$;

$\text{cap}_{ij}^{Z,n}$: capacidade do sistema de *modems* ópticos, tipo n, candidato no arco $(i, j) \in A$;

$\text{cap}_{ij}^{W,n}$: capacidade do sistema rádio microondas, tipo n, candidato no arco $(i, j) \in A$.

Restrições de distância para o sistema HDSL: a Restrição (6-22) garante que a escolha da tecnologia HDSL só aconteça para aqueles enlaces com comprimento no máximo igual ao permitido.

$$X_{ijn} = 0, \quad \forall l_{ij} > l_{\max} \quad (6-22)$$

onde:

l_{\max} : comprimento máximo permitido para um enlace HDSL.

Restrições de topologia para o sistema HDSL: a Restrição (6-23) proíbe a formação de rotas alternativas onde se tenha o compartilhamento de demandas, oriundas de ERBs distintas, em um enlace utilizando apenas sistemas HDSL.

$$\sum_{j \in I_1} \sum_{n \in H_{ij}} \text{cap}_{ij}^{X,n} \cdot X_{ijn} - \sum_{s \in I_s} f c_s \cdot Y_{si} \leq 0, \forall i \in I - I_s \quad (6-23)$$

Restrições de atendimento: são as mesmas do modelo geral C5-ME1. A única diferença é que aqui não temos os arcos de escoamento para o nó da rede metálica. As duas possibilidades de atendimento são:

- *controle de demanda por nó de acesso*

$$Y_{si} \geq \text{dmin}_{si}, \quad \forall s \in I_s, \forall i \in I - I_s \quad (6-24)$$

$$Y_{si} \leq \text{dmax}_{si}, \quad \forall s \in I_s, \forall i \in I - I_s \quad (6-25)$$

- *controle de demanda por serviço*

$$Y_{si} \leq \text{dmax}_{si}, \quad \forall s \in I_s, \forall i \in I - I_s \quad (6-26)$$

$$Y_{esc_s} \leq (d_s - \text{dmin}_s), \quad \forall s \in I_s \quad (6-27)$$

onde:

dmin_{si} : demanda mínima prevista para o serviço s no nó de acesso $i \in I - I_s$;

$d_{\max_{si}}$: demanda máxima prevista para o serviço s no nó de acesso $i \in I-I_s$;

d_{\min_s} : demanda mínima do serviço s , a ser atendida pela rede, entrando pelo nó $i \in I_s$.

6.3.3 – Dados de Entrada para o Modelo C6-ME2

6.3.3.1 – Dados de Rede

A rede exemplo é a da Figura 6.5, contendo 1 CCC e 15 ERBs. Ela indica os 28 arcos candidatos e seus respectivos comprimentos. A demanda em cada nó pode ser atendida através de um arco direto (15 arcos ERB-CCC, numerados de 1 a 15) e/ou utilizar uma (ou mais) rota alternativa (13 arcos ERB-ERB, numerados de 16 a 28).

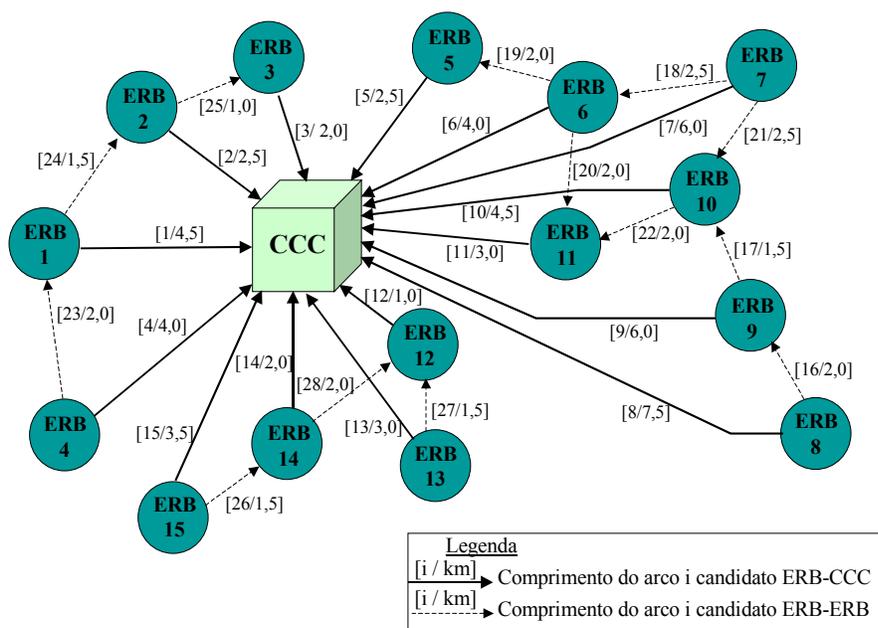


Figura 6.5 - Sistema de acesso móvel celular analisado.

6.3.3.2 – Dados de Serviços e de Soluções Tecnológicas

Três tecnologias de transmissão foram consideradas como candidatas: *modem* HDSL, *modem* óptico e rádio microondas. As três apresentam taxa de transmissão simétrica. A Tabela 6.7 lista as capacidades (em canais E1) e os custos de equipamentos/infra-estrutura para cada tecnologia. O custo do sistema HDSL é adotado como referência (valor 1,00). O custo dos equipamentos corresponde às duas pontas do enlace.

Tabela 6.7 - Informações sobre as tecnologias.

Sistema candidato	Custos					
	Equipamentos				Infra-estrutura (/km)	
	1xE1	2xE1	4xE1	8xE1	Dutos	Cabos
HDSL	1,00	-	-	-	4,17	4,30
Óptico	1,00	1,50	1,75	2,00	5,00	3,80
Rádio	-	8,50	13,50	20,00	0	0

Supõe-se que a rede, utilizando as três tecnologias candidatas, é capaz de oferecer dois perfis de serviço (hipotéticos), um que exige canais de transmissão a 64 Kbps e outro a 144 Kbps, ambos simétricos e com comutação por circuito. Os dados de serviço, tais como demanda prevista em cada ERB, atendimento mínimo obrigatório (fam) e receita unitária (valor relativo), estão na Tabela 6.8. A previsão de demanda total é:

- serviço 1 = 387 canais de 64 Kbps;
- serviço 2 = 237 canais de 144 Kbps.

Tabela 6.8 - Informações sobre os serviços.

Serviço	Demanda (em número de canais) em cada ERB															Receita unitária	fam (%)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
1	25	32	20	24	24	30	34	19	27	30	29	23	25	25	20	0,1	50
2	19	16	13	17	20	20	14	13	15	15	14	17	15	12	17	0,2	50

6.3.4 – Aplicação do Modelo C6-ME2

Todos os experimentos computacionais foram realizados em uma máquina *Sun Workstation Ultra-1* com sistema operacional SunOS 5.7. As instâncias foram geradas em linguagem C e resolvidas com o *solver* CPLEX[®]. Uma aplicação preliminar da metodologia, com a abordagem de minimização de custo para um único serviço, pode ser conferida em DeSousa et alii (2000).

As soluções são fortemente dependentes da estrutura de custos adotada (DeSousa et alii, 2001b). Para a rede da Figura 6.5, supomos que apenas os dutos dos sistemas HDSL e dos *modems* ópticos já estavam instalados.

O planejamento do sistema foi feito, primeiramente, adotando-se o critério de minimização de custo. Nestas condições, é necessário um orçamento de 175,60 unidades de custo, capaz de implantar a rede mostrada na Figura 6.6, que atende

toda a demanda prevista. Essa demanda produz 86,10 unidades de receita (38,70 do serviço 1 e 47,40 do serviço 2). Esta solução não possui sistemas HDSL. As ERBs 2 e 7 são as únicas que têm a demanda atendida por dois caminhos distintos.

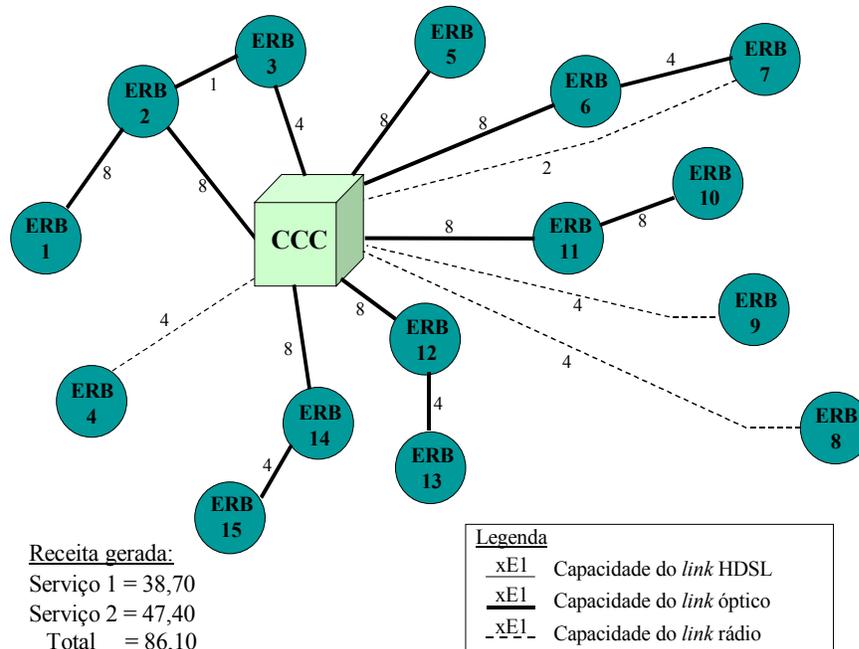


Figura 6.6 - Configuração da rede para atendimento de toda a demanda.

O objetivo é avaliar o impacto da variação de orçamento a partir desta configuração de rede. Diante da possibilidade do orçamento disponível ser inferior ao necessário para o atendimento de toda a demanda, o modelo de maximização é utilizado para obter configurações de rede que garantam as maiores receitas. As possíveis alterações de uma instância para outra são causadas, principalmente, pela forma de atendimento dos serviços e pela tecnologia/topologia adotada.

6.3.4.1 – Análise Técnico-Econômica pelo Controle de Demanda por Nó de Acesso

Aqui foi respeitado o atendimento mínimo (Tabela 6.8) em cada ERB, controlando os limites de demanda em cada célula do sistema de acesso móvel celular. Os resultados para diferentes condições de orçamento são apresentados na Tabela 6.9. As receitas geradas e as configurações de atendimento são apresentadas como valores gerais, mas podem ser facilmente detalhadas, como por exemplo receita por serviço, custo por tecnologia e tecnologia/hierarquia por enlace escolhido.

Tabela 6.9 - Soluções para o cenário com controle de demanda por nó de acesso.

	Previsão de orçamento				
	(porcentagem do total 175,60)				
	100%	95%	90%	85%	80%
Receita gerada	86,10	85,39	83,68	77,24	71,69
Receita / custo	0,49	0,51	0,53	0,52	0,51
Número de canais não atendidos					
<i>Serviço 1</i>	0	0	0	21,50	24,50
<i>Serviço 2</i>	0	3,55	12,11	33,56	59,78
Sistemas escolhidos (x E1)					
<i>HDSL</i>	0	0	0	0	0
<i>Óptico (1/ 2/ 4/ 8)</i>	1/0/4/8	0/0/3/9	0/0/2/8	0/0/5/5	0/0/3/9
<i>Rádio (2/ 4/ 8)</i>	1/3/ 0	0/3/ 0	0/5/ 0	3/2/ 0	1/2/ 0

Através de simulações verificou-se que um corte de 25% no orçamento-base de 175,60 torna inviável a obtenção de uma solução para o problema.

Para os dados considerados, podemos observar que os sistemas de *modems* ópticos foram predominantes em todas as instâncias. A hierarquia de equipamentos mais adotada foi aquela capaz de transportar 8 canais E1.

Em valores absolutos, o serviço 2 foi o mais penalizado. Embora tenhamos reduções de orçamento, a relação receita/custo mantém-se estável, ou seja, mesmo que não haja condição financeira de atender todos os usuários previstos, as redes projetadas garantem um retorno em torno de 50% do capital investido.

A configuração da rede para a previsão de investimento de 80% do orçamento-base pode ser vista na Figura 6.7. Ela apresenta a capacidade dos enlaces escolhidos e a demanda reprimida (não atendida) em cada ERB.

A topologia rota utilizando *modems* ópticos é predominante. Apenas seis ERBs (4, 6, 12, 13, 14 e 15) não apresentaram demanda reprimida. Também é possível observar que as maiores perdas de receita ocorreram nas ERBs 3 e 11. Embora o atendimento, para os dois serviços, tenha ficado próximo do mínimo nestas duas ERBs, elas possuem uma localização estratégica muito importante dentro da configuração escolhida, uma vez que elas agregam demandas oriundas de outras regiões da rede. A queda de receita, em relação à configuração de atendimento total, foi de 17%.

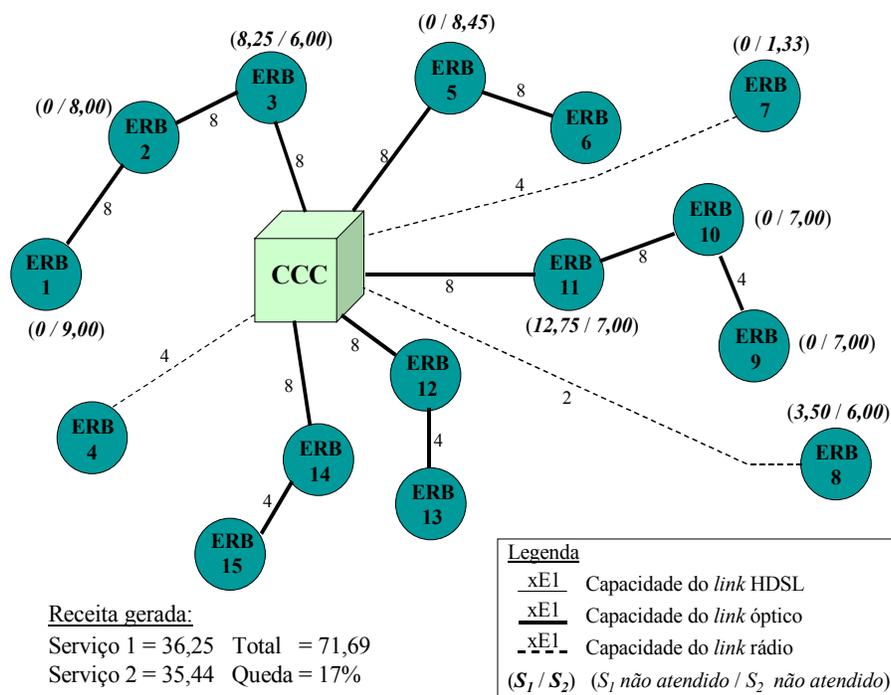


Figura 6.7 - Configuração da rede para o cenário com controle de demanda por nó de acesso, admitindo-se 80% do orçamento-base.

6.3.4.2 – Análise Técnico-Econômica pelo Controle de Demanda por Serviço

Aqui foi respeitado o atendimento mínimo (Tabela 6.8) por serviço, controlando os limites de demanda na área total atendida por uma CCC. São consideradas as mesmas condições de rede instalada e serviços previstos da Seção 6.3.4.1. O orçamento necessário para atender toda a demanda continua sendo 175,60. A rede também foi dimensionada para diferentes valores de orçamento. Os resultados são listados na Tabela 6.10. Para este cenário, a infactibilidade acontece a partir de uma queda de 61% no orçamento-base.

À medida que o orçamento fica mais enxuto, o serviço 1 é o que sofre as maiores perdas na demanda atendida. Para as previsões de orçamento mais pessimistas, temos, inclusive, a escolha de não alocar equipamentos em algumas ERBs. As ERBs 8 e 9 apresentam-se como as menos atrativas. Em termos econômicos, pode-se observar que, caso tenhamos uma redução de 50% no orçamento, a receita fica penalizada em 40%, enquanto a relação receita/custo tem um aumento de 20% (de 0,49 para 0,59). Em termos de receita, podemos observar também que a não-exigência de atendimento mínimo em determinados setores da rede possibilita um planejamento com maior retorno financeiro. Por exemplo: para uma

mesma previsão de orçamento (80%), temos que a exigência de demanda mínima em cada ERB (cenário da Seção 6.3.4.1) faz com que a receita caia de 76,58 (Tabela 6.10) para 71,69 (Tabela 6.9), uma perda de 6,4%.

Tabela 6.10 - Soluções para o cenário com controle de demanda por serviço.

	Previsão de Orçamento (porcentagem do total 175,60)				
	90%	80%	70%	60%	50%
Receita gerada	83,68	76,58	68,39	61,84	51,63
Receita / custo	0,53	0,54	0,56	0,59	0,59
Número de canais não atendidos					
Serviço 1	0	19,00	66,00	95,00	134,00
Serviço 2	12,11	38,11	55,56	73,78	105,33
ERBs não alocadas	-	8	3-8-9	1-7-8-9	4-7-8 9-10
Sistemas escolhidos (x E1)					
HDSL	0	0	0	0	0
Óptico (1/ 2/ 4/ 8)	0/0/2/8	0/0/3/10	0/0/3/7	0/0/3/7	0/0/3/7
Rádio (2/ 4/ 8)	0/5/ 0	1/1/ 0	0/2/ 0	0/1/ 0	0/0/ 0

A Figura 6.8 mostra a configuração da rede para a previsão de investimento de 80% do orçamento-base. Ela apresenta a capacidade dos enlaces escolhidos e a demanda reprimida em cada ERB.

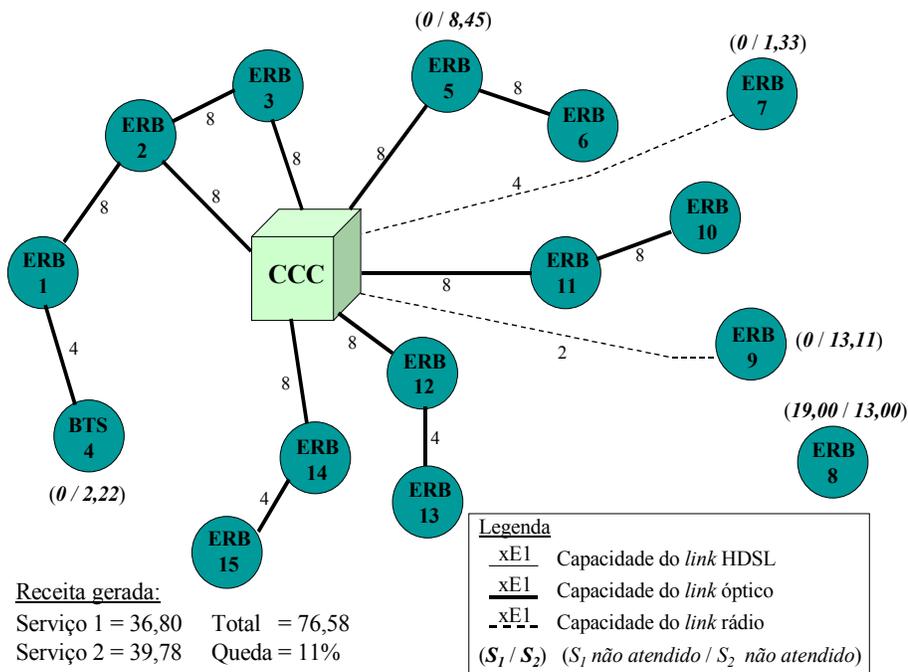


Figura 6.8 - Configuração da rede para o cenário com controle de demanda por serviço, admitindo-se 80% do orçamento-base.

A topologia rota utilizando *modems* ópticos também é predominante. Apenas cinco ERBs (4, 5, 7, 8 e 9) tiveram demanda reprimida. Podemos observar também que, na busca por obter a receita máxima, a ERB 8 nem teve equipamentos novos alocados. Toda a demanda reprimida do serviço 1 é oriunda deste nó.

6.4 – Comentários Adicionais

Neste capítulo pôde-se observar que as adaptações no modelo geral para contemplar uma nova tecnologia são quase que imediatas. Cada nova tecnologia é vista como um "objeto que pode ser encaixado" no modelo, abrindo a oportunidade de escoar a demanda por um outro caminho alternativo. A dificuldade de se habilitar o modelo a reconhecê-la está na implementação da própria tecnologia: quais equipamentos considerar, em que topologias estes equipamentos podem ser implantados, quais as especificações técnicas de capacidade, etc. Mesmo nas situações em que não se prevê competição entre tecnologias numa mesma área de atendimento, os modelos podem funcionar como simuladores e avaliadores das alternativas.

Para a inclusão de novos serviços precisamos estar atentos à metodologia adotada (Capítulo 4). As tecnologias candidatas a fazerem parte de um estudo de caso são escolhidas em função dos serviços que elas vão transportar. Assim, para cada novo serviço é necessário avaliar as suas condições de atendimento em cada uma das tecnologias. Nos modelos, as modificações mais substanciais ocorrem nas restrições de satisfação de demanda e de capacidade nos arcos.

Parte III

**MODELAGEM TÉCNICO-ECONÔMICA
PARA O PROBLEMA COM DADOS IMPRECISOS**

Capítulo 7

INCORPORAÇÃO DE DEMANDA IMPRECISA ABORDAGEM *FUZZY*

7.1 – Introdução

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

À medida que aumenta a variedade de serviços, aumenta também a indefinição sobre a quantidade de usuários que os serviços podem atingir. Como esta indefinição atinge principalmente a configuração de atendimento dos sistemas de acesso, dimensionar os equipamentos destes sistemas é uma tarefa relevante. Estimar a demanda é uma tarefa complexa e de resultados nem sempre satisfatórios.

Os modelos matemáticos que podem ser desenvolvidos para o planejamento de sistemas de acesso (incluindo os já apresentados neste trabalho) são fortemente dependentes de dados de demanda. Entretanto, muitos destes dados não são precisamente conhecidos no momento da confecção do plano. Isto acontece não somente com a demanda, mas também com outros dados necessários aos modelos. Naturalmente, esta incerteza pode influenciar a maneira pela qual o plano é obtido. Desta forma, espera-se do plano que ele seja robusto (isto é, o plano deve continuar rentável, mesmo que as previsões de demanda sejam imprecisas). Portanto, o planejador precisa de sistemas de apoio à decisão que sejam capazes de lidar com imprecisão.

Como primeira consequência dos dados imprecisos de demanda, os termos independentes (das restrições) dos modelos baseados nesses dados não são mais fixos.

A maneira de resolver o problema matemático, agora não mais “exato”, pode mudar consideravelmente. A idéia natural é tentar manter o problema passível de solução, incorporando ao mesmo tempo aspectos da imprecisão no sentido de flexibilizar o modelo e torná-lo mais fiel ao ambiente que pretende retratar. As técnicas mais usadas são a programação estocástica e a aplicação de conceitos de conjuntos nebulosos. Outra opção é utilizar intervalos para a representação de valores numéricos.

Algumas tarefas de planejamento em telecomunicações empregam largamente métodos probabilísticos, como por exemplo o dimensionamento de equipamentos de comutação, o entroncamento entre centrais e a predição da área de cobertura de ERBs (raio das células). Embora estas tarefas sejam complementares ou até mesmo precedentes à etapa de planejamento tratada aqui, elas não são partes integrantes deste trabalho.

Uma abordagem por programação estocástica pressupõe aleatoriedade com respeito aos valores dos dados de demanda que se pretende usar. Claramente este não é o caso dos problemas de planejamento aqui tratados. A evolução tecnológica é previsível no horizonte de tempo compreendido pelo planejamento. O efeito sobre a demanda também é previsível: em geral, os serviços faixa-estreita tendem à estabilidade (como por exemplo o serviço de VOZ), enquanto os serviços faixa-larga, com tarifas elevadas inicialmente, experimentam redução de custo ao mesmo tempo em que procuram “conquistar” usuários dos serviços faixa-estreita.

Outro aspecto importante para o planejamento é a interdependência entre os serviços, 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. Abordagens construídas em bases estocásticas e diretamente relacionadas ao planejamento de sistemas de telecomunicações podem ser vistas em Laguna (1998) e Ims et alii (1997).

Por não possuir qualquer ordem de importância dentre os seus valores, o uso de intervalos é talvez a abordagem que mantém a maior incerteza. O tratamento de problemas de telecomunicações com coeficientes expressos por intervalos é assunto de várias referências; dentre elas, podemos destacar Carlson (1998a). O autor avalia a opticalização do sistema de acesso para o atendimento de grandes assinantes (rotas estratégicas). O critério de otimização adotado é o de minimização de custo.

Já conceitos de conjuntos nebulosos (conjuntos *fuzzy*) e números nebulosos (números *fuzzy*) têm sido bastante utilizados em situações de incerteza. Recentemente, Sahinidis (2003) organizou um *survey* com vários trabalhos sobre o assunto. Para problemas não-lineares com parâmetros *fuzzy*, Cantão (2003) também é uma boa referência.

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.

Neste capítulo são apresentados modelos para auxiliar o planejamento de sistemas de acesso quando existe imprecisão a respeito dos dados de demanda. A imprecisão é incorporada através do uso de conjuntos nebulosos, conforme justificativa acima. Na Seção 7.2, o modelo “exato” (C5-ME1) é referido de maneira a evidenciar a imprecisão. A Seção 7.3 descreve alguns conceitos básicos de conjuntos (e números) *fuzzy*, suficientes para a modelagem que será proposta. A representação usando conjuntos nebulosos para abordar a questão é documentada na Seção 7.4. Finalmente, propostas de resolução para o modelo com números *fuzzy* são discutidas na Seção 7.5.

7.2 – Modelo Matemático com Demanda Imprecisa

É adotado para o desenvolvimento do trabalho o modelo C5-ME1 (*Capítulo 5 – Modelo Exato 1*). As demandas imprecisas são representadas pelos termos independentes de algumas restrições de serviço, sem influência na modelagem específica das soluções tecnológicas. O modelo, tal como apresentado no Capítulo 5, visa a maximização de receita. Supõe-se que os custos e a modularidade dos equipamentos 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 C7-MI1 (*Capítulo 7 – Modelo Impreciso 1*):

$$\text{Maximizar } R(\mathbf{y}) = \sum_{(s,i) \in A_E} r_{si} Y_{si} \quad (7-1)$$

sujeito a:

$$\sum_{(i,j) \in A_{ST}} \sum_{n \in N_{STij}} (\phi_{ij}^{X_{eq},n} + \phi_{ij}^{X_{r},n} \cdot I_{ij}) X_{ijn} + \sum_{(i,j) \in A_M} \sum_{p \in C_M} (\phi_{ij}^{M_{eq},p} + \phi_{ij}^{M_{r},p} \cdot I_{ij}) M_{ijp} + \sum_{(s,i) \in A_E} \phi_{si} \cdot Y_{si} \leq L \quad (7-2)$$

$$\sum_{i \in I-I_s} Y_{si} + Y_{esc_s} = \tilde{d}_s, \quad \forall s \in I_s \quad (7-3)$$

$$\sum_{j \in J_1} Y_{ij} - \sum_{j \in J_2-I_s} Y_{ji} - \sum_{s \in I_s} fc_s \cdot Y_{si} = 0, \quad \forall i \in I-I_s \quad (7-4)$$

$$\sum_{n \in N_{STij}} cap_{ij}^{X,n} \cdot X_{ijn} - Y_{ij} \geq 0, \quad \forall (i,j) \in A_{ST} \quad (7-5)$$

$$\sum_{p \in C_M} cap_{ij}^{M,p} \cdot M_{ijp} - Y_{ij} \geq 0, \quad \forall (i,j) \in A_M \quad (7-6)$$

controle de demanda por nó de acesso

$$Y_{(s,STij)} + Y_{(s,METi)} \geq \tilde{dmin}_{si}, \quad \forall s \in I_s, \forall i \in I-I_s \quad (7-7)$$

$$Y_{(s,STij)} + Y_{(s,METi)} \leq \tilde{dmax}_{si}, \quad \forall s \in I_s, \forall i \in I-I_s \quad (7-8)$$

controle de demanda por serviço

$$Y_{(s,STij)} + Y_{(s,METi)} \geq 0, \quad \forall s \in I_s, \forall i \in I-I_s \quad (7-9)$$

$$Y_{(s,STij)} + Y_{(s,METi)} \leq \tilde{dmax}_{si}, \quad \forall s \in I_s, \forall i \in I-I_s \quad (7-10)$$

$$Y_{esc_s} \leq (\tilde{d}_s - \tilde{dmin}_s), \quad \forall s \in I_s \quad (7-11)$$

onde:

\tilde{d}_s : demanda total (imprecisa) do serviço s , entrando na rede pelo nó $s \in I_s$;

\tilde{dmin}_{si} : demanda mínima prevista (imprecisa) para o serviço s , no nó de acesso $i \in I-I_s$;

\tilde{dmax}_{si} : demanda máxima prevista (imprecisa) para o serviço s , no nó de acesso $i \in I-I_s$;

\tilde{dmin}_s : demanda mínima (imprecisa) do serviço s , a ser atendida pela rede, entrando pelo nó $i \in I_s$.

Em relação ao modelo original C5-ME1, as modificações estão nas Equações (7-3), que fornecem o balanço de fluxo em cada nó artificial de serviço; nas Inequações (7-7) e (7-8), que gerenciam o *controle de demanda por nó de acesso*; e nas Inequações (7-10) e (7-11), que auxiliam no gerenciamento do *controle de demanda por serviço*. Nestas expressões, os valores de demanda são agora imprecisos e devem ser tratados de alguma forma (por exemplo, de acordo com as técnicas acima apontadas) na

resolução do problema. O restante do modelo não é modificado. Os demais elementos já foram especificados no Capítulo 5.

7.3 – Conceitos Básicos de Números *Fuzzy*

Para modelagem de imprecisão pode ser usado o conceito de conjuntos *fuzzy* (conjuntos nebulosos) e de números *fuzzy* (números nebulosos). Para fins de clareza, os conceitos básicos (mas suficientes) são apresentados a seguir. Klir e Folger (1992) e, mais recentemente, Pedrycs e Gomide (1998) constituem excelentes referências sobre o assunto.

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

$$\mu_A(a) = \begin{cases} 0, & \text{se } a \leq 0 \\ 1, & \text{se } a > 0 \end{cases} \quad (7-12)$$

com $a \in \mathbf{R}$, onde \mathbf{R} é o conjunto dos números reais.

Um conjunto é definido como *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:

$$\mu_{\tilde{A}}(a) = \begin{cases} 0, & \text{se } a \leq 0 \\ \frac{a}{10}, & \text{se } 0 < a \leq 10 \\ 1, & \text{se } a > 10 \end{cases} \quad (7-13)$$

com $a \in \mathbf{R}$. Esta função não é a única para o conjunto \tilde{A} ; sua definição é 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 (sendo este valor máximo igual a 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, “o conjunto dos números próximos de 5”) e que apresentam as seguintes propriedades:

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

7.4 – Reformulação do Problema com Demanda Imprecisa

A demanda é quantificada em termos do número de assinantes de um ou mais serviços, e representa um dado de entrada para o modelo C7-MI1. A penetração (aceitação) do serviço de VOZ já é um fato conhecido, o que garante uma certa maturidade sobre o planejamento do sistema. Porém, num ambiente com propostas de novos serviços esta informação nem sempre é precisa ou encontra-se disponível. Uma vez que a variação neste parâmetro afeta o dimensionamento dos equipamentos exigidos e, conseqüentemente, os custo de implantação (ou aluguel) do sistema, esta informação representa um ponto crítico no processo de decisão.

Numa situação típica, o planejador possui uma boa idéia a respeito do grau de penetração do serviço, ou seja, ele é capaz de definir, para o número total de usuários de uma área de atendimento, uma faixa de possíveis valores para a demanda deste ou daquele serviço, inclusive com discriminação de valores com maior ou menor possibilidade de ocorrência. Esta particularidade quanto aos dados de demanda sugere a adoção do conceito de número *fuzzy* para representá-los.

Lembrando que números *fuzzy* são conjuntos *fuzzy*, pode-se associar a cada nó de demanda i um conjunto *fuzzy* $\tilde{d}_{si} = (\underline{d}_{si}, D_{si}, \bar{d}_{si})$, definido como o “conjunto dos valores possíveis para a demanda do serviço $s \in I_S$ a ser atendida no nó de acesso $i \in I - I_S$ ”. Para este conjunto, uma função de pertinência triangular pode ser descrita conforme a Figura 7.1 e a Equação 7-14. Definido desta forma, \tilde{d}_{si} é um número *fuzzy* triangular cujo valor de maior grau de pertinência é D_{si} (não é obrigatório que o triângulo seja isósceles). Neste trabalho são adotados apenas números *fuzzy* triangulares, mas a definição poderia ser alterada para traduzir um número *fuzzy* trapezoidal, por exemplo.

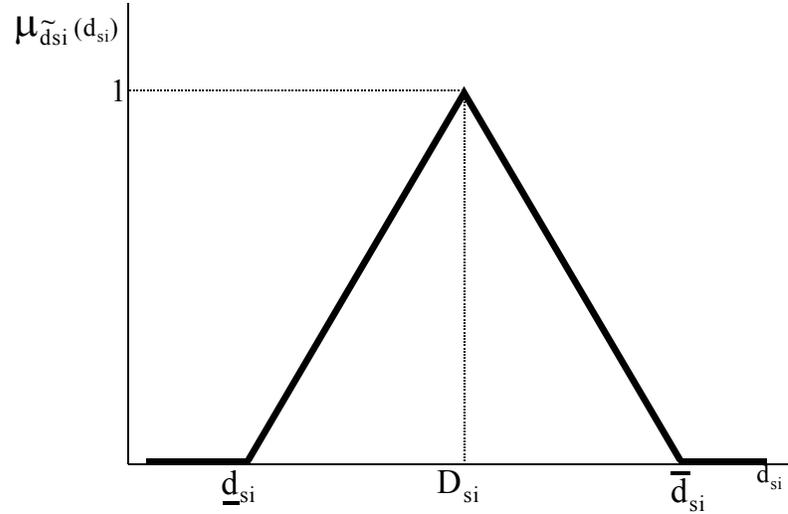


Figura 7.1 - Representação da demanda (imprecisa) através de um número *fuzzy* triangular.

$$\mu_{\tilde{d}_{si}}(d_{si}) = \begin{cases} 0, & \text{se } d_{si} < \underline{d}_{si} \\ \frac{d_{si} - \underline{d}_{si}}{D_{si} - \underline{d}_{si}}, & \text{se } \underline{d}_{si} \leq d_{si} \leq D_{si} \\ \frac{\overline{d}_{si} - d_{si}}{\overline{d}_{si} - D_{si}}, & \text{se } D_{si} \leq d_{si} \leq \overline{d}_{si} \\ 0, & \text{se } d_{si} > \overline{d}_{si} \end{cases} \quad (7-14)$$

Caso as demandas (imprecisas) sejam obtidas a partir da penetração de cada serviço na área de atendimento tem-se (adotando o serviço de VOZ como referência – serviço 1):

$$\tilde{d}_{\max_{si}} = \tilde{p}_{si} \cdot dt_i, \forall s \in I_s \text{ e } s \neq 1, \forall i \in I-I_s \quad (7-15)$$

$$\tilde{d}_{\max_{si}} = dt_i - \sum_{k=2}^m \tilde{d}_{\max_{ki}}, s \in I_s \text{ e } s = 1, \forall i \in I-I_s \quad (7-16)$$

$$\tilde{d}_{\min_{si}} = f_{am_{si}} \cdot \tilde{d}_{\max_{si}}, \forall s \in I_s, \forall i \in I-I_s \quad (7-17)$$

$$\tilde{d}_s = \sum_{i \in I-I_s} \tilde{d}_{\max_{si}}, \forall s \in I_s \quad (7-18)$$

$$\tilde{d}_{\min_s} = \sum_{i \in I-I_s} \tilde{d}_{\min_{si}}, \forall s \in I_s \quad (7-19)$$

onde:

dt_i : número total de usuários previsto para o nó de acesso $i \in I-I_s$;

\tilde{p}_{si} : nível de penetração prevista (impreciso) do serviço s no nó de acesso $i \in I-I_s$;

m : número total de serviços previstos;

fam_{si} : fator de atendimento mínimo obrigatório do serviço s no nó de acesso $i \in I-I_s$.

Admite-se que a demanda total no nó de acesso i (dt_i) e o fator de atendimento mínimo obrigatório (fam_{si}) são perfeitamente conhecidos. Nestas condições, o nível de penetração do serviço pode ser representado conforme a Figura 7.2 e a Equação (7-20).

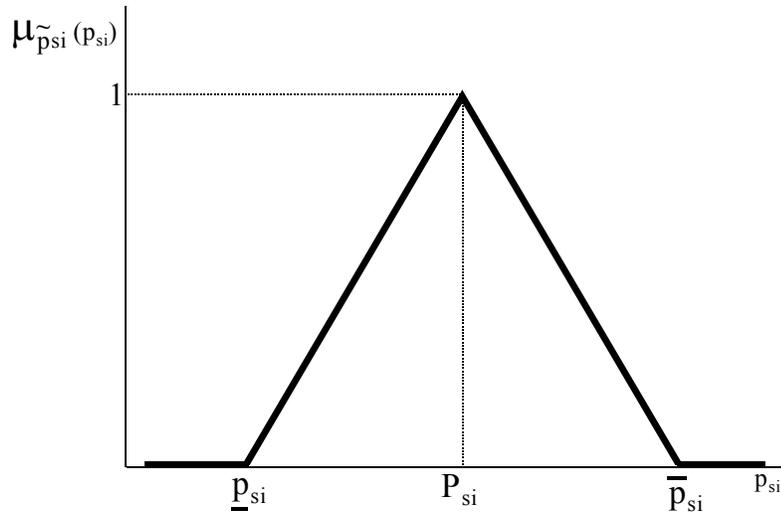


Figura 7.2 - Representação da penetração (imprecisa) dos serviços através de um número *fuzzy* triangular.

$$\mu_{\tilde{p}_{si}}(p_{si}) = \begin{cases} 0, & \text{se } p_{si} < \underline{p}_{si} \\ \frac{p_{si} - \underline{p}_{si}}{P_{si} - \underline{p}_{si}}, & \text{se } \underline{p}_{si} \leq p_{si} \leq P_{si} \\ \frac{\overline{p}_{si} - p_{si}}{\overline{p}_{si} - P_{si}}, & \text{se } P_{si} \leq p_{si} \leq \overline{p}_{si} \\ 0, & \text{se } p_{si} > \overline{p}_{si} \end{cases} \quad (7-20)$$

Portanto, a definição da demanda (imprecisa) em cada nó da rede (nós de serviço e nós de acesso) é obtida efetuando-se operações com números *fuzzy* (adição, subtração e multiplicação por escalar).

7.5 – Resolução do Problema com Demanda *Fuzzy*

A presença de números *fuzzy* nas restrições do modelo PLIM pode alterar substancialmente o procedimento de resolução. Há a necessidade de se transformar

os números *fuzzy* de maneira a permitir o seu tratamento. Este processo é denominado “defuzzificação”, e consiste em encontrar um “valor de trabalho” para o número *fuzzy* tratado. Existem vários métodos disponíveis. Bortolan e Degani (1985) fornecem a referência clássica para o tema. Outros estudos, mais recentes também podem ser citados, como por exemplo o trabalho de Kikuchi (2000), onde o autor utiliza programação linear *fuzzy* para realizar o processo de defuzzificação.

São adotadas aqui as chamadas “*funções de classificação*”, que transformam números *fuzzy* em números reais (os quais são passíveis de ordenação).

Sob esta idéia, resolver um problema “*Fuzzy-PLIM*” (F-PLIM), com variáveis 0-1, em relação aos termos independentes (C7-MI2):

C7-MI2:

$$\begin{aligned} \text{Max } \mathbf{cx} \\ \text{s.a. } \mathbf{Ax} \leq \tilde{\mathbf{b}}, \mathbf{x} \geq 0, \underline{\mathbf{x}} \in \{0,1\}^k \end{aligned} \tag{7-21}$$

onde:

$$\mathbf{c} \in \mathbf{R}^{1 \times n};$$

$$\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{m \times n};$$

$\tilde{\mathbf{b}} \in \tilde{\mathbf{Z}}$, sendo $\tilde{\mathbf{b}}$ um vetor com parâmetros (coeficientes) *fuzzy* e $\tilde{\mathbf{Z}}$ um conjunto *fuzzy* sobre \mathbf{R} ;

$\underline{\mathbf{x}} \in \{0,1\}^k$ (para algum k , tal que $1 \leq k \leq n-1$), sendo $\underline{\mathbf{x}}$ um sub-vetor de \mathbf{x} contendo aqueles elementos que precisam ser binários;

É o mesmo que resolver o problema não-*fuzzy* C7-MI3:

C7-MI3:

$$\begin{aligned} \text{Max } \mathbf{cx} \\ \text{s.a. } \mathbf{Ax} \leq f(\tilde{\mathbf{b}}), \mathbf{x} \geq 0, \underline{\mathbf{x}} \in \{0,1\}^k \end{aligned} \tag{7-22}$$

onde:

$$f: \tilde{\mathbf{Z}} \rightarrow \mathbf{R}.$$

Nos casos tratados aqui, \mathbf{x} representa todas as variáveis de fluxo (Y e Y_{esc}) e $\underline{\mathbf{x}}$ todas as variáveis responsáveis pela alocação e dimensionamento de equipamentos e infra-estrutura. As restrições com demanda imprecisa (7-3, 7-7, 7-8, 7-10 e 7-11) em C7-MI1 formam um subconjunto de restrições do modelo C7-MI3.

O problema de “*classificação*” de números *fuzzy* foi extremamente estudado na literatura e uma grande coleção de métodos foi desenvolvida para resolvê-los (Campos e Verdegay, 1989; Bortolan e Degani, 1985). A seguir são listadas duas “*funções de classificação*” para o caso particular dos números *fuzzy* triangulares (Figura 7.1):

a) Equivalente de Yager:

$$f_Y(\tilde{d}_{si}) = D_{si(eq)} = D_{si} + \frac{1}{4}(\bar{d}_{si} + \underline{d}_{si} - 2D_{si}) \quad (7-23)$$

Consiste na definição de uma “*função de classificação*” que mapeia cada número *fuzzy* em um número real ($f: \tilde{\mathbf{Z}} \rightarrow \mathbf{R}$). A linearidade do PLIM é mantida, pois os números *fuzzy* são substituídos por valores reais (não-*fuzzy*) que lhes são equivalentes.

b) Equivalente de Adamo:

$$f_\alpha(\tilde{d}_{si}) = \max\{d_{si} \mid \mu_{\tilde{d}_{si}}(d_{si}) \geq \alpha\} \quad (7-24)$$

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

O número *fuzzy* é reduzido a um intervalo do qual se toma o limitante superior como valor de trabalho. Este tipo de abordagem requer solução paramétrica para o problema PLIM. A solução passa a ser α -dependente.

Pode-se observar que diferentes “*funções de classificação*” têm efeitos distintos sobre os problemas PLIM. No caso (a) os valores obtidos para as demandas são exatos. O modelo C7-MI1, após a aplicação da Equação (7-23) nas Restrições (7-3), (7-7), (7-8), (7-10) e (7-11), é idêntico ao modelo C5-ME1. É uma saída simplificadora para a questão, mas tem o inconveniente de apresentar uma solução exata (*crisp*) para um problema com dados *fuzzy*. Já o caso (b) torna o problema tratável sem prescindir da imprecisão sobre os dados usados. A parametrização traz o problema para um domínio de resolução mais simples sem perder todas as características de imprecisão originais. Uma outra vantagem evidente desta abordagem reside no fato da solução do problema também depender do parâmetro α . A solução pode ser interpretada, em cada caso, a partir do significado desse parâmetro. Na literatura podem ser encontrados ainda outros tipos de “*funções de classificação*”. Aqui, entretanto, a solução paramétrica é a considerada.

A Figura 7.3 e a Equação (7-25) mostram o funcionamento do equivalente de Adamo para um número *fuzzy* triangular. O parâmetro α indica, para Adamo, o grau de confiança do planejador nos valores dos dados utilizados. Nos problemas aqui tratados, a variação do parâmetro permite analisar diferentes possibilidades para o valor considerado como demanda dos serviços previstos.

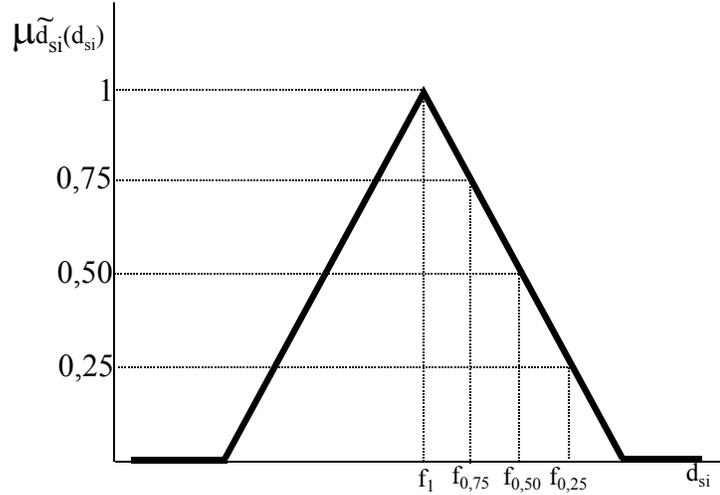


Figura 7.3 - Equivalente de Adamo para um número *fuzzy* triangular, representando a demanda imprecisa.

$$f_{\alpha}(\tilde{d}_{si}) = D_{si} + (\bar{d}_{si} - D_{si}) \cdot (1 - \alpha) \quad (7-25)$$

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

Obedecida a linearidade da função de Adamo para números *fuzzy* triangulares, as Restrições (7-3), (7-7), (7-8), que é idêntica à (7-10), e (7-11) do modelo C7-MI1, que modelam a demanda imprecisa, tornam-se, respectivamente:

$$\sum_{i \in I-s} Y_{si} + Y_{esc_s} = D_s + (\bar{d}_s - D_s) \cdot (1 - \alpha), \quad \forall s \in I_s \quad (7-26)$$

$$Y_{(s,STij)} + Y_{(s,METi)} \geq D_{min_{si}} + (\bar{d}_{min_{si}} - D_{min_{si}}) \cdot (1 - \alpha), \quad \forall s \in I_s, \forall i \in I - I_s \quad (7-27)$$

$$Y_{(s,STij)} + Y_{(s,METi)} \leq D_{max_{si}} + (\bar{d}_{max_{si}} - D_{max_{si}}) \cdot (1 - \alpha), \quad \forall s \in I_s, \forall i \in I - I_s \quad (7-28)$$

$$Y_{esc_s} \leq \{ [D_s + (\bar{d}_s - D_s) \cdot (1 - \alpha)] - [D_{min_s} + (\bar{d}_{min_s} - D_{min_s}) \cdot (1 - \alpha)] \}, \quad \forall s \in I_s \quad (7-29)$$

Agora, se a demanda é definida a partir do seu nível de penetração, tem-se:

Para a Restrição (7-3), usando (7-15), (7-16) e (7-18):

$$\sum_{i \in (I-I_s)} Y_{si} + Yesc_s = f_\alpha \left(\sum_{i \in I-I_s} \tilde{dmax}_{si} \right), \quad \forall s \in I_s \quad (7-30)$$

resultando:

$$\sum_{i \in (I-I_s)} Y_{si} + Yesc_s = \left[\sum_{i \in I-I_s} f_\alpha(\tilde{p}_{si}) \cdot dt_i \right], \quad \forall s \in I_s \text{ e } s \neq 1 \quad (7-31)$$

$$\sum_{i \in (I-I_s)} Y_{si} + Yesc_s = \left[\sum_{i \in I-I_s} \left(dt_i - \sum_{k=2}^m f_\alpha(\tilde{p}_{ki}) \cdot dt_i \right) \right], \quad s \in I_s \text{ e } s = 1 \quad (7-32)$$

Para a Restrição (7-7), usando (7-15), (7-16) e (7-17):

$$Y_{(s,STij)} + Y_{(s,METi)} \geq f_\alpha(\text{fam}_{si} \cdot (\tilde{p}_{si} \cdot dt_i)), \quad \forall s \in I_s \text{ e } s \neq 1, \forall i \in I-I_s \quad (7-33)$$

$$Y_{(s,STij)} + Y_{(s,METi)} \geq f_\alpha \left(\text{fam}_{si} \cdot \left(dt_i - \sum_{k=2}^m \tilde{dmax}_{ki} \right) \right), \quad s \in I_s \text{ e } s = 1, \forall i \in I-I_s \quad (7-34)$$

resultando:

$$Y_{(s,STij)} + Y_{(s,METi)} \geq \text{fam}_{si} \cdot (f_\alpha(\tilde{p}_{si}) \cdot dt_i), \quad \forall s \in I_s \text{ e } s \neq 1, \forall i \in I-I_s \quad (7-35)$$

$$Y_{(s,STij)} + Y_{(s,METi)} \geq \text{fam}_{si} \cdot \left(dt_i - \sum_{k=2}^m f_\alpha(\tilde{p}_{ki}) \cdot dt_i \right), \quad s \in I_s \text{ e } s = 1, \forall i \in I-I_s \quad (7-36)$$

Para a Restrição (7-8) e 7-10, usando (7-15) e (7-16):

$$Y_{(s,STij)} + Y_{(s,METi)} \leq f_\alpha(\tilde{p}_{si} \cdot dt_i), \quad \forall s \in I_s \text{ e } s \neq 1, \forall i \in I-I_s \quad (7-37)$$

$$Y_{(s,STij)} + Y_{(s,METi)} \leq f_\alpha \left(dt_i - \sum_{k=2}^m \tilde{dmax}_{ki} \right), \quad s \in I_s \text{ e } s = 1, \forall i \in I-I_s \quad (7-38)$$

resultando:

$$Y_{(s,STij)} + Y_{(s,METi)} \leq f_\alpha(\tilde{p}_{si}) \cdot dt_i, \quad \forall s \in I_s \text{ e } s \neq 1, \forall i \in I-I_s \quad (7-39)$$

$$Y_{(s,STij)} + Y_{(s,METi)} \leq dt_i - \sum_{k=2}^m f_\alpha(\tilde{p}_{ki}) \cdot dt_i, \quad s \in I_s \text{ e } s = 1, \forall i \in I-I_s \quad (7-40)$$

Para a Restrição (7-11), usando (7-15), (7-16), (7-17), (7-18) e (7-19):

$$Yesc_s \leq \left[\sum_{i \in I-I_s} f_\alpha(\tilde{p}_{si}) \cdot dt_i - \sum_{i \in I-I_s} \text{fam}_{si} \cdot (f_\alpha(\tilde{p}_{si}) \cdot dt_i) \right], \quad \forall s \in I_s \text{ e } s \neq 1 \quad (7-41)$$

$$Yesc_s \leq \left[\sum_{i \in I-I_s} \left(dt_i - \sum_{k=2}^m f_\alpha(\tilde{p}_{ki}) \cdot dt_i \right) - \sum_{i \in I-I_s} \text{fam}_{si} \cdot \left(dt_i - \sum_{k=2}^m f_\alpha(\tilde{p}_{ki}) \cdot dt_i \right) \right], \quad s \in I_s \text{ e } s = 1 \quad (7-42)$$

onde:

$$f_{\alpha}(\tilde{p}_{si}) = P_{si} + (\bar{p}_{si} - P_{si}) \cdot (1 - \alpha) \quad (7-43)$$

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

O modelo C7-MI1 com as *Restrições de Serviço* (7-3), (7-7), (7-8), (7-10) e (7-11) substituídas pelas Restrições (7-26) a (7-29), denominado C7-MI4, é paramétrico. Agora, é possível fazer uma análise técnico-econômica (configuração de atendimento dos serviços, dimensionamento de equipamentos, custo, receita, etc.) para diferentes possibilidades de valor de demanda prevista para cada serviço (ou, diferentes graus de confiança nesse valor), em cada nó de acesso. Outro fato a ser observado é que a demanda dos serviços nem sempre apresentará valores inteiros, o que pode parecer um pouco estranho. Embora seja possível forçar estes valores a serem inteiros, o que acarreta um processamento mais "pesado" para o problema, este procedimento é desnecessário neste nível de planejamento. Uma alternativa interessante, e também sem perda de generalidade, é adotar valores arredondados (ou truncados) para a demanda resultante da aplicação do parâmetro α .

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).

7.6 – Comentários Adicionais

Neste capítulo foram discutidas maneiras de incorporar imprecisão a respeito dos dados de demanda dos serviços no modelo de planejamento de sistemas de telecomunicações. O modelo geral de maximização de receitas foi tomado como ponto de partida. O modelo "exato" anteriormente desenvolvido para o planejamento de sistemas de acesso foi seguidamente modificado, de acordo com a estratégia usada para representar a demanda imprecisa.

Foram apresentados dois métodos para o tratamento da imprecisão, baseados na modelagem *fuzzy*. A diferença entre eles é a maneira pela qual o problema é efetivamente resolvido quando apresenta números *fuzzy* nos termos independentes das restrições. Em uma abordagem, as demandas *fuzzy* são substituídas por valores não-*fuzzy*. Na outra, o substituto do número *fuzzy* é parametrizado. Foi dada maior atenção a esta segunda abordagem.

Assim como o seu correspondente “exato”, o modelo usando números *fuzzy* permite a competição entre serviços e tecnologias e leva em conta as topologias inerentes a cada um dos dois tipos de sistemas de acesso considerados neste trabalho.

O modelo com as adaptações indicadas acima permite analisar o planejamento da rede de forma bastante flexível e realista. O ambiente multi-serviço, com a abordagem de maximização de receitas, acrescido do tratamento de imprecisão de dados quanto ao cenário mercadológico para os serviços, permite acompanhar a evolução do sistema em situações mais adequadas à competitividade existente no setor.

Uma ferramenta de planejamento desenvolvida de acordo com a metodologia discutida aqui pode ser útil sob duas perspectivas. Primeiro, ajudar fabricantes de equipamentos a prever o impacto geral de adicionar novos serviços e funções em seus produtos. Segundo, auxiliar empresas provedoras de serviço na busca de plantas de rede mais lucrativas. A ferramenta possibilita a seleção dos serviços mais rentáveis ao mesmo tempo em que respeita as condições financeiras de investimento da empresa.

Capítulo 8

EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DO MODELO *FUZZY* – PLIM

8.1 – Introdução

Este capítulo apresenta e discute os resultados computacionais oriundos da aplicação da metodologia de planejamento discutida no capítulo anterior, onde o modelo PLIM “exato” foi adaptado para incorporar a modelagem *fuzzy*, tornando-o capaz de permitir a adoção de dados imprecisos para a demanda dos serviços.

A Seção 8.2 é dedicada ao sistema de acesso fixo cabeado. Trata-se da aplicação do modelo C6-ME1, agora incorporando a modelagem *fuzzy* para a demanda imprecisa. O modelo, chamado C8-MI1, permite a competição entre as tecnologias xDSL e APON-FTTC e, tal como apresentado, visa a maximização de receita. A avaliação técnico-econômica para a implantação de novos equipamentos é realizada para diferentes configurações de migração de usuários do serviço de VOZ para outros três tipos de serviços: RDSI, FLR e FLC.

A aplicação da metodologia ao sistema de acesso móvel celular encontra-se na Seção 8.3. O modelo C8-MI2 é o resultado da modelagem de demanda imprecisa no modelo C6-ME2, de acordo com as restrições de atendimento dos serviços discutidas no Capítulo 7 (modelo C7-MI4). O planejamento da rede é feito em diferentes condições de oferta para dois tipos de serviço. São mantidas as mesmas tecnologias candidatas da Seção 6.3.3.

8.2 – Sistema de Acesso Fixo Cabeado - SFC

Os exemplos que se seguem são baseados em DeSousa et alii (2001c) e DeSousa e Carlson (2000). Novamente, utilizou-se a linguagem de programação

matemática AMPL para desenvolver o modelo e o *solver* CPLEX® para resolver cada uma das instâncias geradas.

8.2.1 – Dados Gerais

8.2.1.1 – Dados de Rede

Trata-se da mesma rede utilizada na Seção 6.2.4. A Figura 8.1 rerepresenta essa rede, que contém uma estação telefônica (ET) e 17 nós de acesso. A demanda indicada representa o número total de usuários do serviço de VOZ em cada nó.

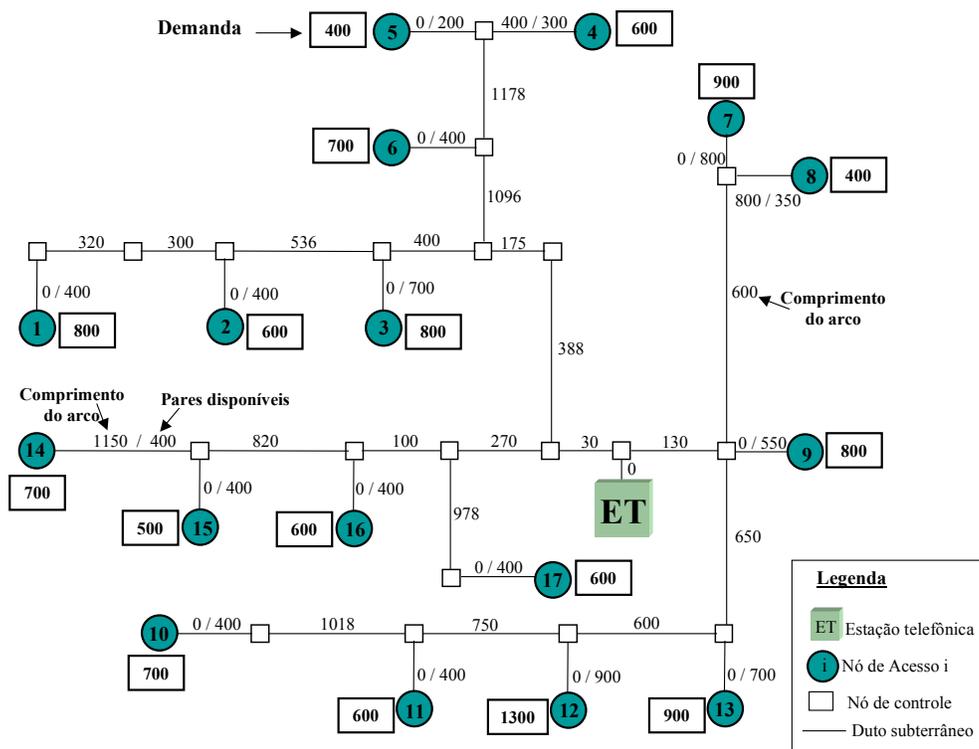


Figura 8.1 - Rede para aplicação, SFC, contendo 17 nós de acesso.

8.2.1.2 – Dados de Soluções Tecnológicas e de Serviços

Para facilitar o acompanhamento, os principais dados de entrada são listados novamente. O custo (valor relativo ao do ADSL), a capacidade e as demais características dos principais equipamentos candidatos são perfeitamente conhecidos e estão indicados na Tabela 8.1.

A Tabela 8.2 mostra a taxa de transmissão, o fator de atendimento mínimo obrigatório (fam) e a receita unitária (valor relativo), para os quatro serviços considerados. O fam deve ser respeitado em cada um dos nós de acesso (será avaliado

o controle de demanda por nó de acesso). A previsão de penetração dos serviços é admitida como sendo imprecisa e será relatada na próxima seção.

Tabela 8.1 – Principais equipamentos das soluções xDSL e APON-FTTC.

Equipamento	Serviço suportado	Capacidade	Custo
ADSL	FLR	1 x 2 Mbps (assimétrico)	1,000
HDSL	FLC	1 x 2 Mbps (simétrico)	1,000
Interface RDSI	RDSI	1 x 144 Kbps (simétrico)	0,400
OLT	Todos	Assinantes: 10.000 faixa-estreita + 2.500 faixa-larga; Gerenciamento: até 16 ODNIs.	231,250
ODNI (no OLT)	Todos	Banda livre: 600 Mbps <i>downstream</i> ; 150 Mbps <i>upstream</i> .	4,000
ONU	Todos	Assinantes: 128 faixa-estreita + 32 faixa-larga.	1,025

Tabela 8.2 - Informações sobre os serviços.

Serviços	Taxa de transmissão		fam (%)	Receita
	<i>downstream</i>	<i>upstream</i>		
VOZ	64 Kbps	64 Kbps	60	0,120
RDSI	144 Kbps	144 Kbps	55	0,344
FLR	2 Mbps	64 Kbps	50	0,800
FLC	2 Mbps	2 Mbps	65	1,800

As demais premissas de planejamento para lançamento de cabos, reforço de canalização, armários e alocação de *splitters* são as mesmas, indicadas na Seção 6.2.

8.2.2 – Avaliação Técnico-econômica devido à Demanda Imprecisa

O risco deve-se à imprecisão nos valores esperados para cada parâmetro crítico do modelo. A penetração (imprecisa) e, conseqüentemente, a demanda dos serviços, é representada por números *fuzzy* triangulares. Os triângulos são todos simétricos, embora isto não seja obrigatório. Admite-se também que o parâmetro que controla a penetração de cada serviço é o mesmo em todos os nós de acesso (α é único). Os valores são expressos em porcentagem do número total de assinantes do nó. Nestas condições, o assinante que não for atendido por nenhum dos três serviços RDSI, FLR e FLC será provido apenas com um canal de VOZ.

A análise técnico-econômica é realizada para dois perfis de cenário:

8.2.2.1 – Baixa Penetração dos Novos Serviços (cenário *Low-P*)

A adesão dos usuários do sistema (assinantes VOZ) aos novos serviços é baixa. Esta característica mercadológica pode significar, por exemplo, um dimensionamento da rede a curto prazo. A Tabela 8.3 apresenta os valores considerados.

Tabela 8.3 - Cenário *Low-P* para os serviços.

Serviço	Nível de penetração (%)		
	\underline{p}_{si}	P_{si}	\bar{p}_{si}
RDSI	2,5	3,5	4,5
FLR	0,5	1,0	1,5
FLC	2,0	3,5	5,0
VOZ	95,0	92,0	89,0

8.2.2.2 – Alta Penetração dos Novos Serviços (cenário *High-P*)

Ao contrário do cenário anterior, este pode afetar o planejamento a médio e longo prazo, onde se tem uma forte aceitação dos novos serviços por parte dos clientes. A Tabela 8.4 mostra os valores analisados.

Tabela 8.4 - Cenário *High-P* para os serviços.

Serviço	Nível de penetração (%)		
	\underline{p}_{si}	P_{si}	\bar{p}_{si}
RDSI	6,0	11,0	16,0
FLR	2,0	5,0	8,0
FLC	8,0	13,0	18,0
VOZ	84,0	71,0	58,0

É importante lembrar que os valores adotados como penetração dos serviços significam o seguinte: primeiro determina-se o número de usuários dos serviços RDSI, FLR e FLC, através de sua porcentagem de aceitação sobre o número total de usuários previstos para o nó (se este procedimento resultar em um valor não-inteiro efetua-se o arredondamento “para cima”). Os usuários que não demandarem nenhum desses serviços representam, para o modelo, a quantidade de clientes exclusivos de canais de VOZ.

Cenários com níveis de penetração individualizados para cada serviço em cada nó de acesso também poderiam ser avaliados sem comprometer a performance do modelo. Seriam apenas mais algumas informações a serem acrescentadas ao banco de dados utilizado como suporte.

8.2.3 – Análise dos Resultados

O objetivo é conferir a viabilidade técnico-econômica das tecnologias xDSL e APON-FTTC quando colocadas frente a frente. Diferentes valores de α podem significar soluções (e redes) distintas. As possíveis alterações na planta podem ser causadas, principalmente, pela forma de atendimento dos serviços e a topologia a ser adotada.

A aplicação do modelo se dá em duas etapas: num primeiro instante ele é executado de forma a determinar a melhor solução de mínimo custo (menor orçamento) que permita atender toda a demanda prevista. Na segunda parte estipula-se um orçamento menor que o da etapa anterior (25% menos), e analisa-se o comportamento da rede diante do objetivo de se obter a maior receita, escolhendo os serviços mais "rentáveis", com a liberdade de penalizar aqueles menos "rentáveis", até o limite de atendimento mínimo estipulado na Tabela 8.2. Conforme indicado na Seção 8.2.2, são analisados dois cenários: um com baixa e outro com alta penetração para os serviços RDSI, FLR e FLC. É admitida uma disponibilidade de 50% nos dutos da rede já instalada. As soluções precisam garantir também uma folga de pelo menos 20% nos cabos metálicos escolhidos.

8.2.3.1 – Cenário *Low-P*

Diante dos valores apresentados para a penetração dos serviços, duas situações, em particular, são muito importantes. Primeiro, se o valor adotado como penetração é o menor possível (uma condição que não está incluída no equivalente de Adamo), a solução resultante fornecerá a configuração mínima necessária para a rede a ser implantada. Segundo, se for escolhido o máximo valor para a penetração ($\alpha=0$), obtêm-se como resultado uma configuração de rede capaz de atender o cenário mais otimista possível (previsto pelo planejador), no sentido de que a receita unitária gerada pelos novos serviços é bem maior que aquela alcançada pelo serviço de VOZ. A Tabela 8.5 indica os resultados. Ela mostra o número de usuários atendidos de cada serviço, bem como os orçamentos necessários e as receitas geradas. Apresentamos também a solução correspondente à expectativa mais confiável para os valores de demanda (valor esperado, $\alpha=1$), que no caso de triângulos simétricos, corresponde ao valor médio. As informações referem-se tanto à aplicação do modelo para a solução de mínimo custo quanto para a de maximização de receita.

A partir destes resultados o planejador passa a conhecer os limitantes de seu orçamento e, com a meta de atingir um patamar de receita esperado, ele tem uma idéia geral da necessidade (ou não) de se aumentar (e em quanto) o investimento. Na solução de mínimo custo percebe-se que para se conseguir um aumento de 38% na receita (de 1.938,10 para 2.672,10) há a obrigatoriedade de se investir 34% a mais na rede (de 1.318,80 para 1.769,30).

Tabela 8.5 - Resultados para o cenário *Low-P*.

Resultados	Mínimo custo (Atendimento pleno da demanda)			Maximização de receita (Orçamento 25% menor)		
	\underline{p}_{si}	P_{si}	\bar{p}_{si}	\underline{p}_{si}	P_{si}	\bar{p}_{si}
VOZ	11.298	10.941	10.584	11.179	8.926	8.167
RDSI	301	420	539	173	238	301
FLR	63	119	182	36	63	96
FLC	238	420	595	184	408	595
Orçamento	1.318,80	1.546,98	1.769,30	989,10	1.160,20	1.327,00
Receita gerada	1.938,10	2.308,60	2.672,10	1.761,00	1.937,80	2.231,40

Vale também observar que na situação de penetração mínima (\underline{p}_{si}), uma redução de 25% no orçamento (de 1.318,80 para 989,10) causa uma perda de 9% na receita (de 1.938,10 para 1.761,00); nas mesmas condições de comparação, com penetração média e máxima, esta perda mantém-se em 16%.

Outro fato a ser ressaltado refere-se à configuração de atendimento dos serviços. De uma forma geral, sempre que há queda no orçamento, para um valor de penetração fixo (por exemplo, penetração média), alguns serviços são penalizados. O número de assinantes que deixam de ser atendidos, para cada serviço, pode variar de cenário para cenário. Isto se deve à tecnologia escolhida e à topologia adequada a cada situação. As Figuras 8.2, 8.3 e 8.4 indicam a planta da rede a ser implantada para cada uma das penetrações analisadas, ao admitir-se a redução de 25% no orçamento. São indicados os cabos a serem instalados, a demanda (número de assinantes) a ser atendida por cada uma das tecnologias, em cada nó de acesso, e a distribuição da receita gerada entre os serviços faixa-estreita e faixa-larga.

Para a situação de penetração mínima (Figura 8.2) a rede a ser implantada é totalmente metálica e a novidade fica por conta dos *modems* da tecnologia xDSL. Ela é quase idêntica àquela obtida para a instância A da Seção 6.2.5 (Figura 6.3a). A única diferença entre elas está no atendimento do serviço FLC. Na rede aqui obtida foram penalizados (a mais) 6 usuários deste serviço no nó de acesso 12, além de ser

realizada uma permuta de 4 usuários entre os nós 6 e 11. Nestas circunstâncias, a preferência pelo oferecimento do serviço de VOZ é clara.

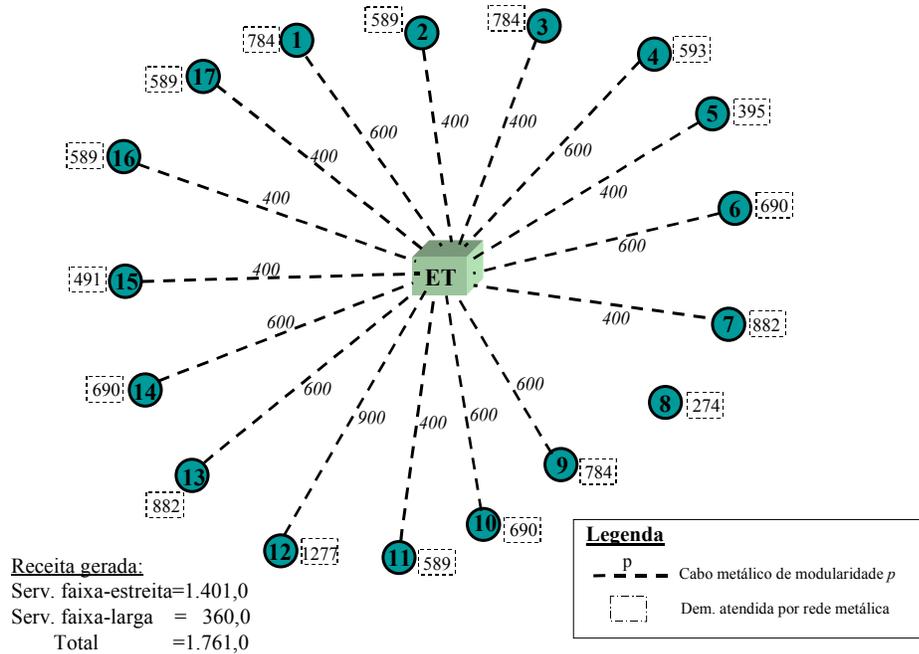


Figura 8.2 - Configuração de atendimento para a penetração mínima (cenário *Low-P*).

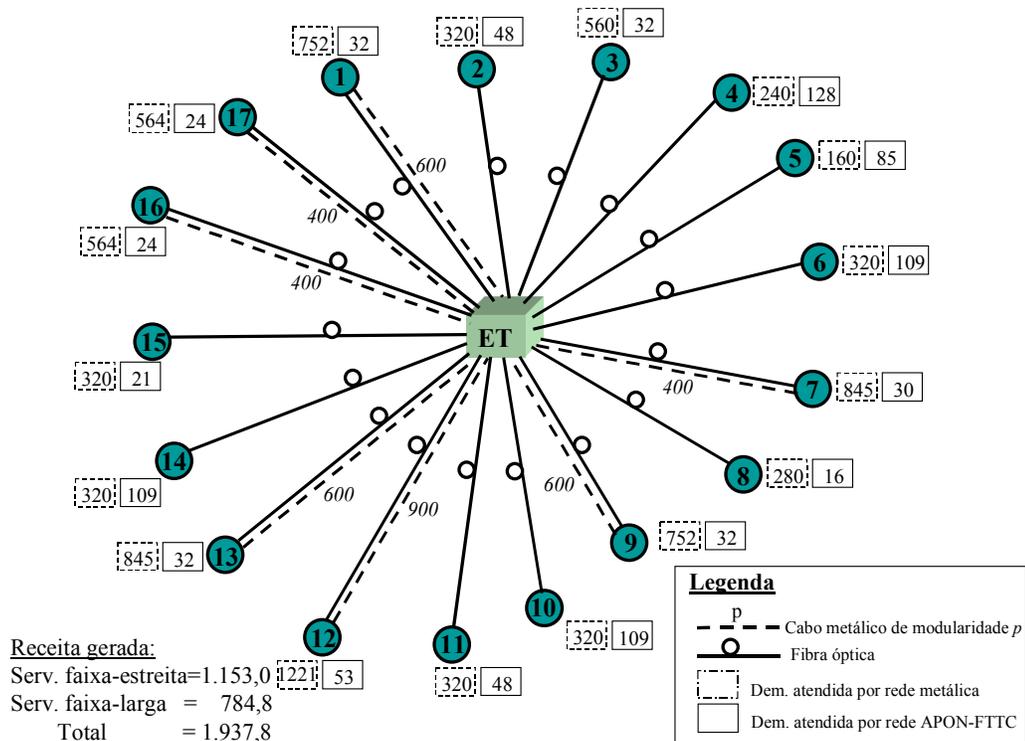


Figura 8.3 - Configuração de atendimento para a penetração esperada (cenário *Low-P*).

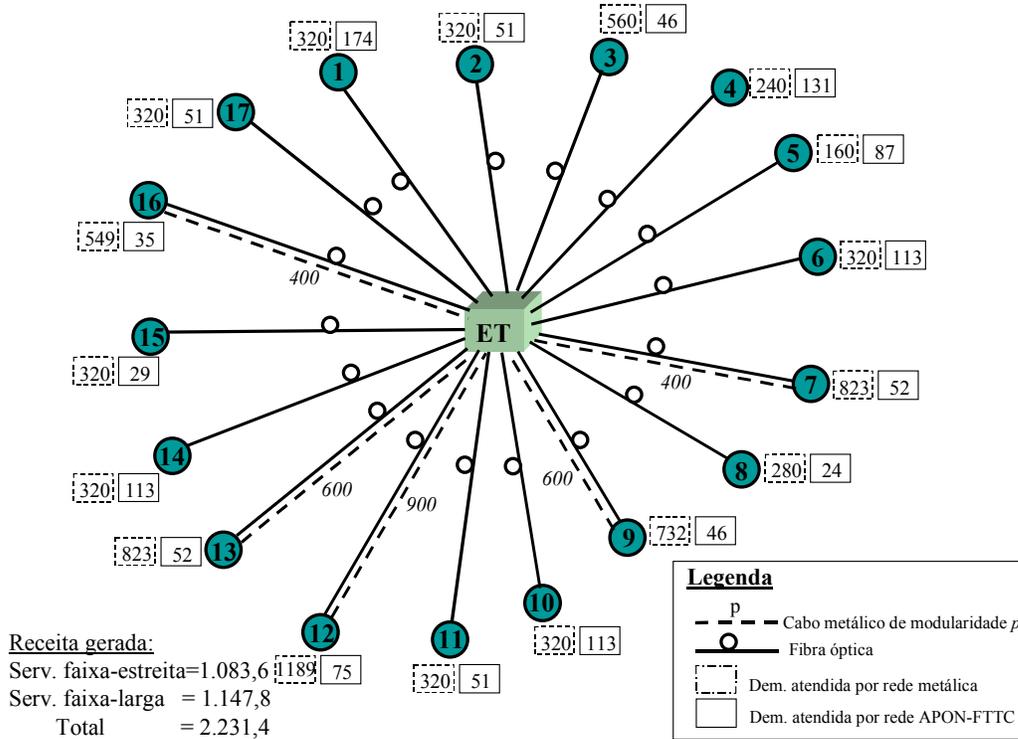


Figura 8.4 - Configuração de atendimento para a penetração máxima (cenário *Low-P*).

Nos cenários de média e máxima penetração (Figuras 8.3 e 8.4, respectivamente) a tecnologia APON-FTTC passa a ser competitiva com a tecnologia xDSL. Devido à alta modularidade do OLT (Tabela 8.1), a escolha da tecnologia APON-FTTC só é viável para o atendimento conjunto de vários nós de acesso, fato confirmado nos resultados.

Nos cenários com predominância de atendimento APON-FTTC o serviço FLC torna-se o mais rentável, enquanto o serviço de VOZ passa a ter sua demanda altamente penalizada. Este resultado confirma a "preferência" da tecnologia óptica para a disponibilização de serviços faixa-larga.

Através das Figuras 8.3 e 8.4 pode-se observar também, conforme já anunciado no Capítulo 6, que a migração da rede metálica para a rede óptica acontece a partir dos nós mais distantes da ET. Este resultado também reforça a afirmação de que a infra-estrutura existente no sistema é uma componente que não pode ser desprezada durante o planejamento.

As outras possibilidades de ocorrência a serem analisadas através do equivalente de Adamo para os números *fuzzy*, geram soluções que se enquadram num meio termo entre os "limites" obtidos para o valor esperado e o valor máximo previsto

para a penetração dos serviços. A configuração exata da rede vai depender do valor de α escolhido, começando de $\alpha=1$ (*valor esperado*) até $\alpha=0$ (*máxima penetração*). Através desta análise estabelecemos a variação no comportamento da solução com o parâmetro α nos intervalos estipulados. As Figuras 8.5 e 8.6 indicam as variações sofridas pelos índices financeiros (orçamento e receita) à medida que o valor de α é alterado. Novamente, é obtido o resultado de mínimo custo para atendimento pleno da demanda e depois verificada a melhor solução de maximização de receita para uma queda de 25% no orçamento.

Os resultados mostram que à medida que se reduz a confiança (α tendendo a zero) nos valores previstos, proporcionando o aumento dos valores de penetração, o orçamento cresce. A receita gerada também aumenta, uma vez que a receita unitária dos novos serviços é maior que aquela obtida através do assinante de VOZ. Pode-se conferir também que ao admitir um investimento de 25% a menos tem-se uma queda média em torno de 16% na receita gerada.

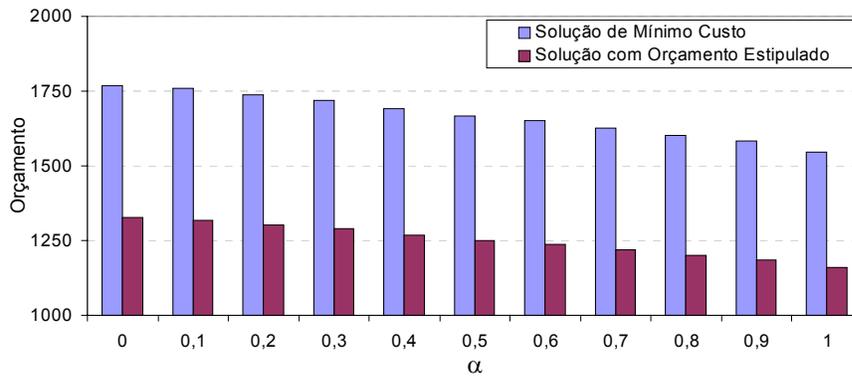


Figura 8.5 - Orçamentos necessários (cenário *Low-P*).

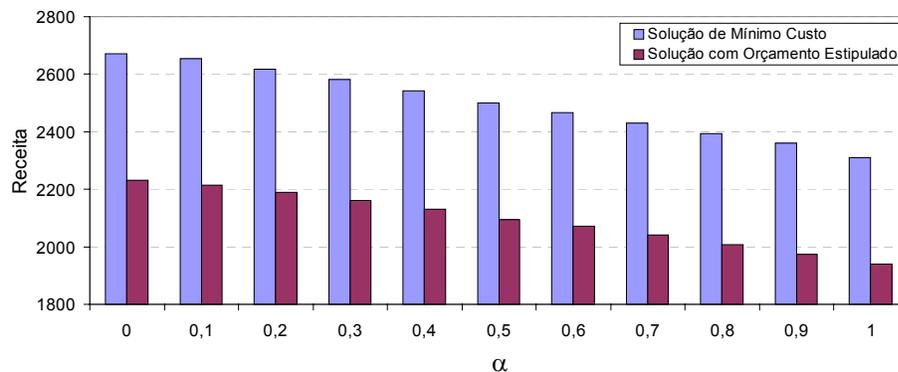


Figura 8.6 - Receitas geradas (cenário *Low-P*).

A Figura 8.7 apresenta o comportamento da receita gerada entre os serviços. A contribuição dos serviços faixa-larga supera a dos serviços faixa-estreita quando a confiança do planejador está em torno de 10% ($\alpha=0,1$).

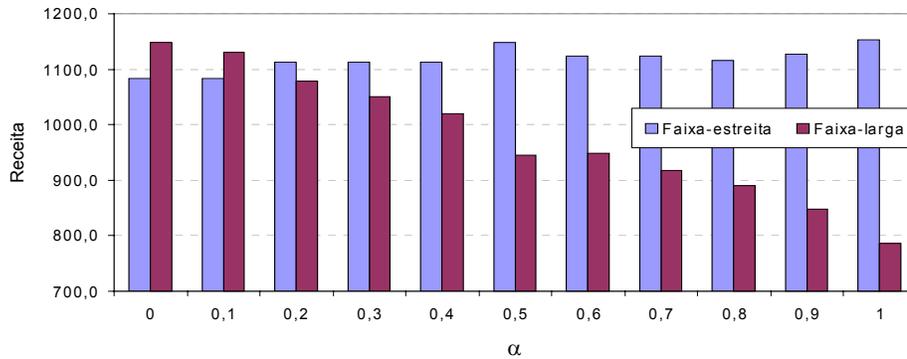


Figura 8.7 - Distribuição da receita entre os serviços (cenário *Low-P*).

O comportamento da rede para as soluções de maximização de receita (com corte de 25% no orçamento) pode ser conferido a partir da Figura 8.8. Dentro do intervalo analisado, os 17 nós de acesso são atendidos por fibra óptica e, à medida que se aumenta a penetração dos serviços ($\alpha \rightarrow 0$), aqueles nós antes alimentados por rede metálica tendem a migrar suas demandas para os sistemas ópticos.

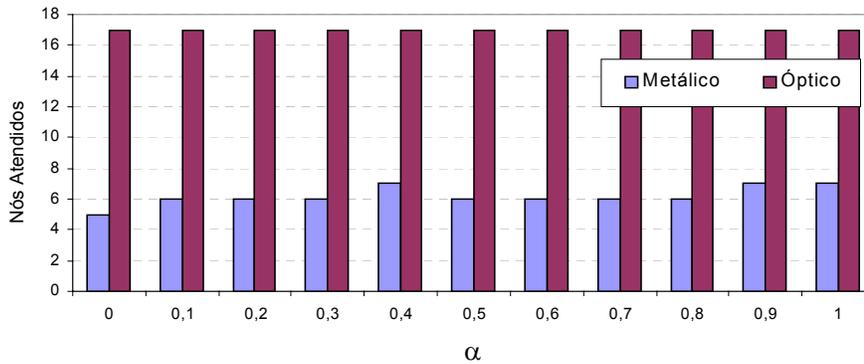


Figura 8.8 - Quantidade de nós de acesso atendidos por cada tecnologia (cenário *Low-P*).

Em geral, o atendimento dos serviços é penalizado ao se confirmar a redução no orçamento, mas existem diferenças dependendo do serviço. A Figura 8.9 mostra, para cada serviço, a relação entre o número de assinantes atendidos e o número de assinantes previstos, em função de α . O serviço FLC é o que apresenta a maior relação atendido/previsto: em todas as situações analisadas ele teve sua demanda quase que totalmente atendida, o que o credencia a ser o serviço “mais rentável”.

O serviço de VOZ tem atendimento em torno de 80%. Embora sua receita unitária seja baixa, comparada à dos outros serviços, a sua alta demanda justifica seu investimento. Acrescente-se a isto o fato da rede metálica já instalada ser capaz de disponibilizar este serviço sem investimento adicional.

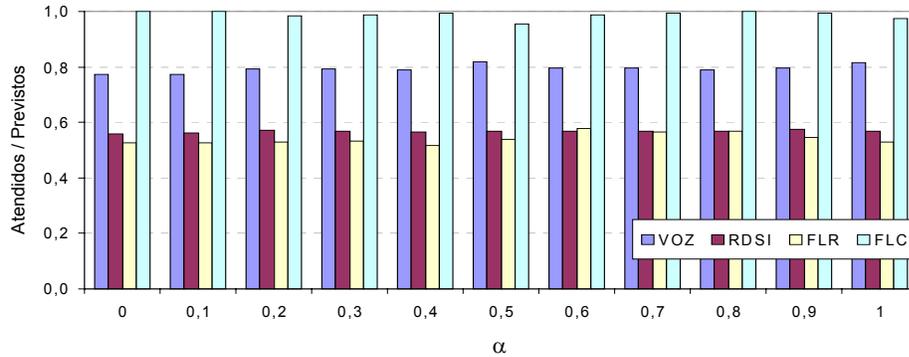


Figura 8.9 - Relação número de assinantes atendidos/assinantes previstos (cenário *Low-P*).

A avaliação mostra também que os serviços RDSI e FLR são os menos "rentáveis": ambos mantêm o atendimento próximo ao mínimo obrigatório (55% e 50%, respectivamente), evidenciando a pouca atratividade destes serviços para as tecnologias estudadas.

8.2.3.2 – Cenário *High-P*

Neste cenário seguimos os mesmos passos apresentados anteriormente para o cenário *Low-P*. Os resultados para os limites mínimo e máximo, e também para o valor esperado, estão na Tabela 8.6, onde acrescentamos o número de nós de acesso atendidos por cada uma das tecnologias.

Tabela 8.6 - Resultados para o cenário *High-P*.

Resultados	Mínimo custo (Atendimento pleno da demanda)			Maximização de receita (Orçamento 25% menor)		
	\underline{p}_{si}	P_{si}	\bar{p}_{si}	\underline{p}_{si}	P_{si}	\bar{p}_{si}
APON-FTTC	17	17	17	17	17	17
Nós xDSL	10	6	2	3	1	0
VOZ	9.996	8.449	6.902	7.198	6.151	5.418
RDSI	714	1.309	1.904	401	731	1.055
FLR	238	595	952	119	301	476
FLC	952	1.547	2.142	950	1.486	2.034
Orçamento	2.149,01	3.328,37	4.236,06	1.611,76	2.496,30	3.177,00
Receita gerada	3.349,14	4.724,78	6.100,42	2.806,90	3.905,20	5.055,10

Os sistemas APON-FTTC dominam o atendimento dos nós de acesso. No caso específico da penetração máxima, considerada a queda de 25% no orçamento, verifica-

se que a solução ótima de maximização de receita não apresenta alocação de novos cabos metálicos. Nesta situação utiliza-se a rede já instalada até a sua capacidade máxima, admitida a folga de 20%, e todos os assinantes excedentes passam a ser atendidos por sistemas ópticos.

O custo (investimento) e as receitas geradas são numericamente bem mais expressivos que no cenário *Low-P*. Em todas as situações de previsão de demanda, a receita gerada pelos serviços faixa-larga é superior àquela obtida dos serviços faixa-estreita.

Dentro do intervalo analisado, constatamos que para se ter um aumento de 80% na receita (de 2.806,90 para 5.055,10) há a necessidade de se dobrar o investimento (de 1.611,76 para 3.177,00).

As Figuras 8.10 e 8.11 mostram a variação dos índices financeiros em função de α . Em média, a queda de 25% no orçamento penaliza a receita em torno de 17%.

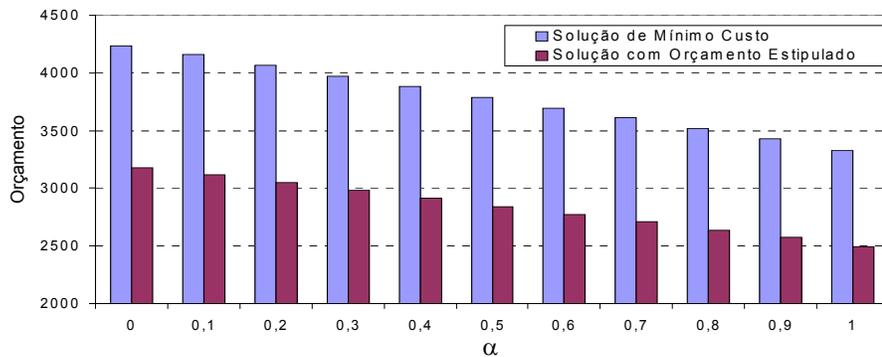


Figura 8.10 - Orçamentos necessários (cenário *High-P*).

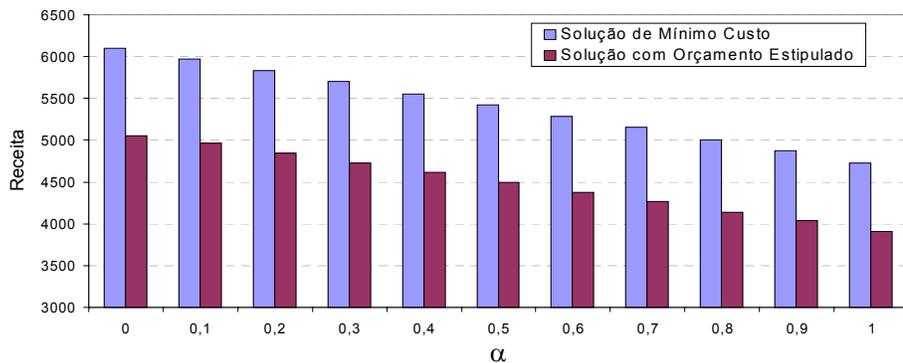


Figura 8.11 - Receitas geradas (cenário *High-P*).

As soluções de rede a serem implantadas podem ser conferidas na Figura 8.12. Já as configurações de atendimento dos serviços estão presentes na Figura 8.13. Assim como no cenário *Low-P*, os gráficos aqui apresentados são aqueles que

descrevem, em cada situação definida por α , o comportamento da solução de maximização de receita, mediante a queda de 25% no orçamento necessário para o atendimento pleno da demanda. Os resultados confirmam o que já foi comentado para o outro cenário: alta penetração justifica a utilização de sistemas ópticos e o serviço FLC continua assumindo a posição de serviço “mais rentável”, enquanto RDSI e FLR mantêm-se em situação de baixa atratividade. O serviço de VOZ perde a sua hegemonia e o seu oferecimento é garantido principalmente pela rede metálica já existente.

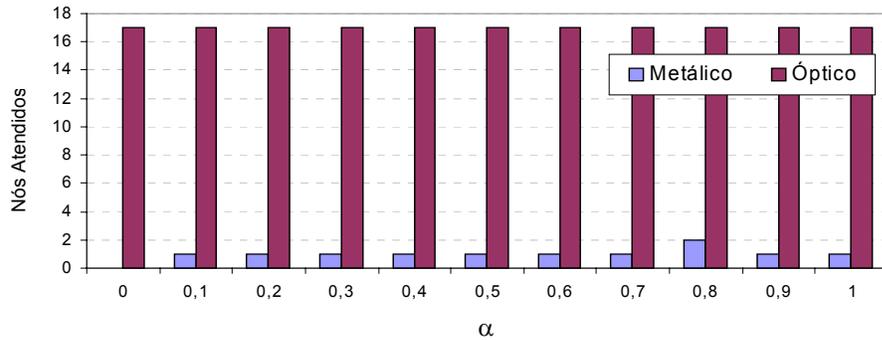


Figura 8.12 - Quantidade de nós de acesso atendidos por cada tecnologia (cenário *High-P*).

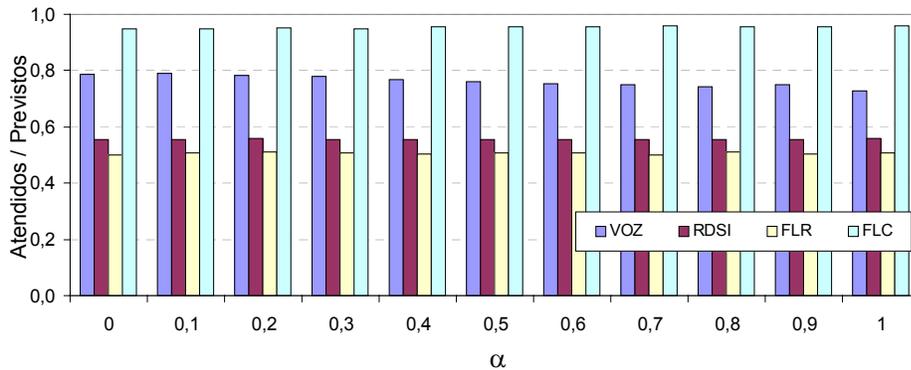


Figura 8.13 - Relação número de assinantes atendidos/assinantes previstos (cenário *High-P*).

Embora os comentários apresentados para a configuração de atendimento dos serviços sejam válidos para a rede como um todo, a análise também pode ser aplicada a cada nó de acesso individualmente. Este procedimento permite dividir a rede em setores, classificando os nós em função da sua atratividade técnico-econômica. Por exemplo, o nó de acesso 9 é o último a ter o atendimento da sua demanda excedente transferida do sistema metálico para o óptico. A sua proximidade da ET faz com que o custo da infra-estrutura metálica seja barata, criando restrições à opticalização, a qual só se torna viável para valores altíssimos de penetração dos serviços faixa-larga.

Isto pode ser observado através das Figuras 8.1 (rede analisada), 8.2, 8.3, 8.4 (cenário *Low-P*), 8.14, 8.15 e 8.16 a seguir (cenário *High-P*).

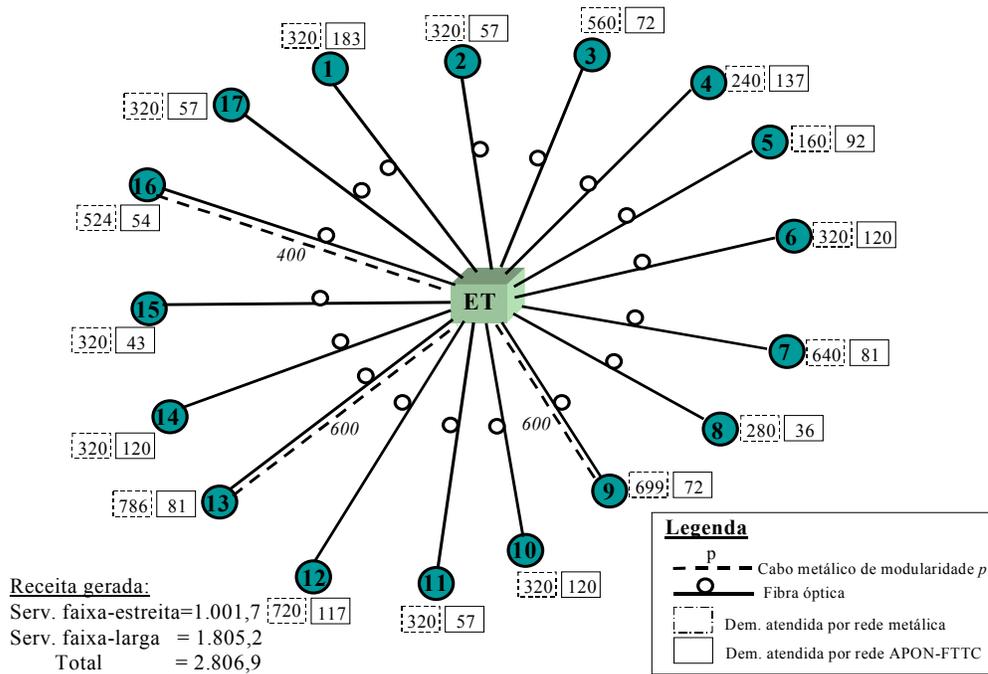


Figura 8.14 - Configuração de atendimento para a penetração mínima (cenário *High-P*).

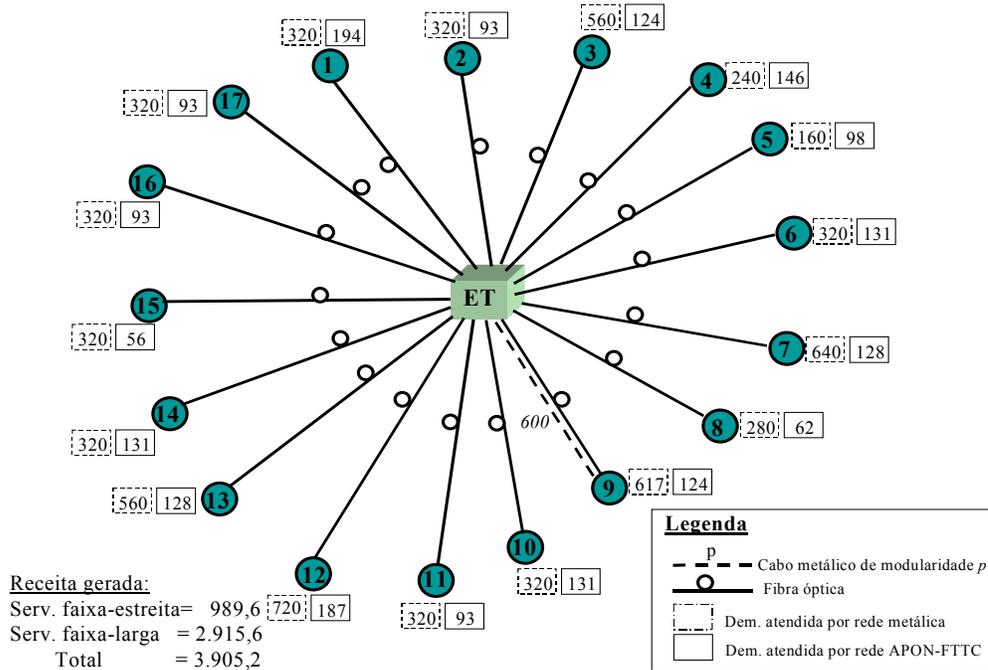


Figura 8.15 - Configuração de atendimento para a penetração esperada (cenário *High-P*).

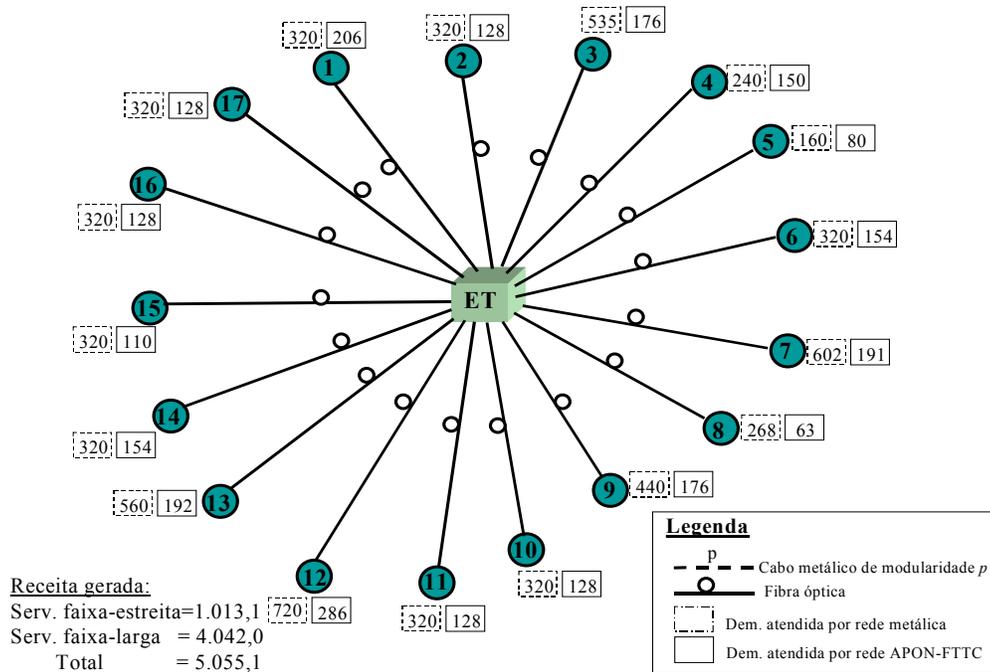


Figura 8.16 - Configuração de atendimento para a penetração máxima (cenário *High-P*).

Outro fato importante a ser analisado, agora de forma geral, está relacionado ao critério de otimização. A abordagem de maximização de receita, além de garantir a seletividade no atendimento da demanda, permite antecipar a opticalização da rede. Isto pode ser observado através da Tabela 8.6 e das Figuras 8.14, 8.15 e 8.16. Em todas as condições de atendimento avaliadas, as soluções obtidas com a abordagem de maximização de receita tiveram menos cabos metálicos alocados que naquelas que utilizam o critério de minimização de custo.

8.3 – Infra-estrutura do Sistema de Acesso Móvel Celular - SMC

Alguns dos resultados aqui apresentados provêm de DeSousa et alii (2004a, 2003b). Todos os experimentos computacionais foram realizados em uma máquina *Sun Workstation Ultra-1* com sistema operacional SunOS 5.7. As instâncias foram geradas em linguagem C e resolvidas com o *solver* CPLEX®.

8.3.1 – Dados Gerais

8.3.1.1 – Dados de Rede

Trata-se da mesma rede utilizada na Seção 6.3.3. A Figura 8.17 reapresenta essa rede, que contém 1 CCC e 15 ERBs.

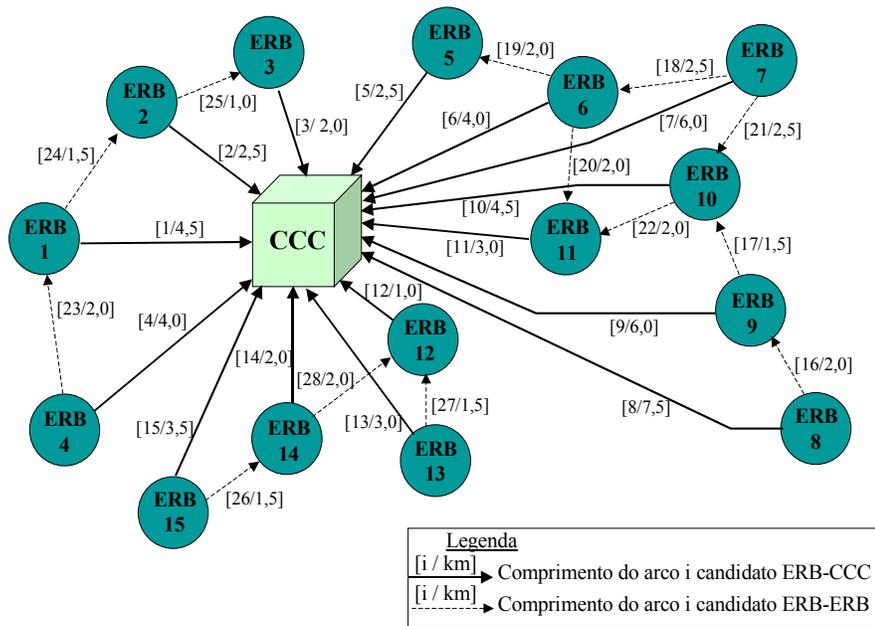


Figura 8.17 - Rede para aplicação, SMC, contendo 15 ERBs.

8.3.1.2 – Dados de Soluções Tecnológicas

Três tecnologias de transmissão são consideradas: *modem* HDSL, *modem* óptico e rádio microondas. São mantidas as mesmas premissas de planejamento adotadas na Seção 6.3. O custo (novamente, em valor relativo ao do HDSL) e a capacidade dos equipamentos candidatos são admitidos como sendo perfeitamente conhecidos e estão indicados na Tabela 8.7. Apenas os dutos dos sistemas HDSL e dos *modems* ópticos já se encontravam instalados (custo=0).

Tabela 8.7 - Informações sobre as tecnologias.

Sistema candidato	Custos					
	Equipamentos				Infra-estrutura (/km)	
	1xE1	2xE1	4xE1	8xE1	Dutos	Cabos
HDSL	1,00	-	-	-	4,17	4,30
Óptico	1,00	1,50	1,75	2,00	5,00	3,80
Rádio	-	8,50	13,50	20,00	0	0

8.3.2 – Impacto da Demanda Imprecisa

O planejamento do sistema é feito com o objetivo de oferecer dois tipos de serviço (hipotéticos), um que exige canais de transmissão a 64 Kbps (serviço 1) e outro a 144 Kbps (serviço 2), ambos simétricos e com comutação por circuito. Uma outra aplicação da metodologia, com a abordagem de minimização de custo para um único serviço, pode ser conferida em DeSousa et alii (2001b).

A análise técnico-econômica é subordinada à imprecisão dos dados de demanda (Tabela 8.8). Os triângulos são todos simétricos. Admite-se que o parâmetro de confiabilidade α , de cada serviço, é o mesmo para todas as ERBs.

Tabela 8.8 - Informações sobre os serviços.

ERB	Demanda (em número de canais)					
	Serviço 1			Serviço 2		
	\underline{d}_{si}	D_{si}	\bar{d}_{si}	\underline{d}_{si}	D_{si}	\bar{d}_{si}
1	11	18	25	7	13	19
2	10	21	32	6	11	16
3	10	15	20	5	9	13
4	8	16	24	7	12	17
5	12	18	24	10	15	20
6	16	23	30	4	12	20
7	18	26	34	6	10	14
8	9	14	19	5	9	13
9	13	20	27	7	11	15
10	18	24	30	9	12	15
11	11	20	29	6	10	14
12	13	18	23	7	12	17
13	13	19	25	5	10	15
14	7	16	25	4	8	12
15	8	14	20	11	14	17
Total	177	282	387	99	168	237
Atendimento mínimo (%)						
	50			50		
Receita unitária						
	0.1			0.2		

Nas situações em que a aplicação do parâmetro α resultar em valor de demanda não-inteiro efetua-se o arredondamento “para cima”. Portanto, a demanda prevista candidata sempre terá valor inteiro, porém a configuração de atendimento escolhida pode gerar valores de demanda reais, devido ao tipo de variável que gerencia o fluxo de usuários na rede.

O fator de atendimento mínimo e a receita unitária (valor relativo) são considerados como conhecidos e “precisos”, e estão indicados no final da Tabela 8.8.

8.3.3 – Análise dos Resultados

Os dois cenários de controle de demanda são avaliados: *por nó de acesso* e *por serviço*. O procedimento de resolução obedeceu a seguinte ordem de execução:

- 1 – Encontrou-se a configuração de rede, pelo critério de minimização de custo, capaz de atender toda a demanda prevista, resultante de cada grau de confiança considerado;
- 2 – Para cada solução obtida anteriormente, foi imposta uma queda de 15% no orçamento. A rede foi novamente dimensionada, objetivando a receita máxima.

8.3.3.1 – Impacto sobre o Controle de Demanda por Nó de Acesso

A Tabela 8.9 lista os índices econômicos e as configurações de atendimento para as principais situações de demanda prevista.

Tabela 8.9 - Principais resultados da Seção 8.3.3.1.

Solução min-custo	Demanda prevista		
	\underline{d}_{si}	D_{si}	\bar{d}_{si}
Custo	130,10	156,20	175,60
Receita gerada	37,50	61,80	86,10
Solução max-receita	(com corte de 15% no orçamento)		
Receita gerada	–	57,42	77,24
Receita / custo	–	0,43	0,52
Número de canais não atendidos			
<i>Serviço 1</i>	–	6,00	21,50
<i>Serviço 2</i>	–	18,88	33,56
Rede alocada			
<i>HDSL</i>	–	0	0
<i>Óptico(1/2/4/8)</i>	–	0/ 0/ 4/ 8	0/ 0/5 /5
<i>Rádio (2/4/8)</i>	–	3/ 0/ 0	3/ 2/ 0

Para a condição de demanda mínima, um corte de 15% no orçamento não permite obter uma solução de rede factível. Isto ocorre porque no *controle de demanda por nó de acesso*, mesmo que a previsão de demanda seja baixa, exige-se que seja alocado pelo menos um *link* em cada ERB, nem que seja para atender a sua demanda mínima obrigatória. Como a demanda a ser atendida é baixa, até mesmo a solução de mínimo custo (que atende toda a demanda prevista) exige equipamentos de baixa hierarquia (Figura 8.18). Nestas condições, o orçamento é bastante enxuto, fazendo com que o corte de 15% inviabilize uma configuração de rede que atenda todas as ERBs.

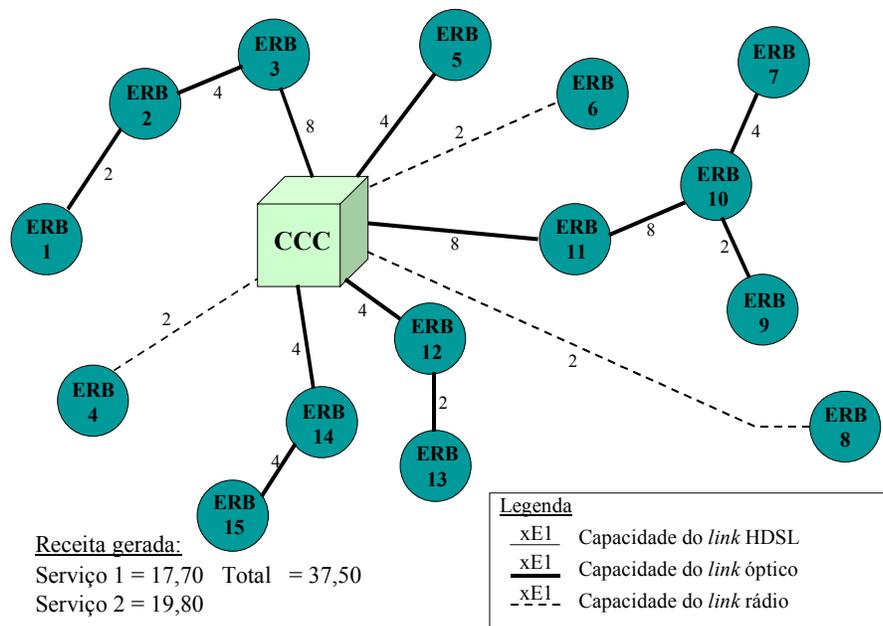


Figura 8.18 - Configuração da rede para \bar{d}_{si} (*controle por nó de acesso*), solução de mínimo custo.

A tecnologia utilizando *modems* ópticos mantém-se predominante. Mas deve-se ressaltar que a estrutura de custos adotada, a qual reflete a configuração da rede existente, é uma componente importante na escolha das tecnologias.

É interessante notar que a abordagem de maximização de receita torna-se mais eficiente (veja a relação receita/custo) para as situações com previsão de demanda mais otimista (\bar{d}_{si}). Nestas condições, a hierarquia dos equipamentos alocados tende a ser maior, o que permite um melhor compartilhamento baseado no ganho de escala.

As configurações de atendimento obtidas da aplicação do critério de maximização de receita podem ser averiguadas a partir das Figuras 8.19 e 8.20. Elas

também indicam a contribuição de cada serviço na receita gerada, bem como a perda de receita em relação ao cenário de mínimo custo correspondente (aquele com atendimento pleno da demanda). Em ambas as redes o serviço 2 foi o mais penalizado.

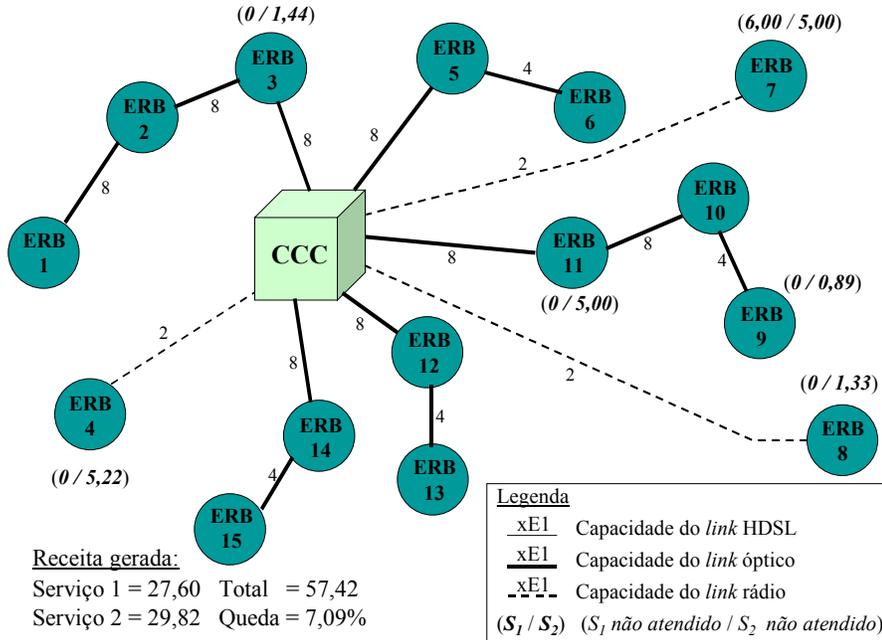


Figura 8.19 - Configuração da rede para D_{si} (controle por nó de acesso), admitindo-se uma queda de 15% no orçamento.

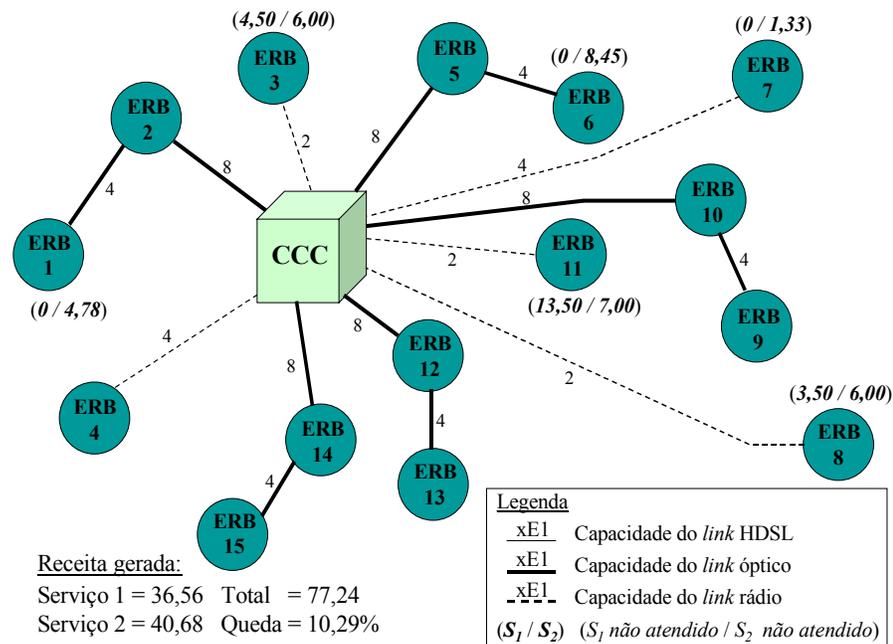


Figura 8.20 - Configuração da rede para \bar{d}_{si} (controle por nó de acesso), admitindo-se uma queda de 15% no orçamento.

As mudanças de topologia são evidentes. Na condição de demanda esperada as ERBs 3 e 11 possuem alta importância estratégica, apesar de terem perda de demanda. Os *links* que as conectam a CCC funcionam também como rota de passagem para a demanda de outras quatro ERBs (1, 2, 9 e 10). Já na previsão de demanda máxima, a configuração de atendimento escolhida opta por não escolher estas duas ERBs como rota alternativa para escoar a demanda das outras ERBs. Se o planejador optar por candidatar equipamentos com hierarquias acima de $8 \times E1$, talvez esta mudança de topologia não seja tão radical.

As receitas obtidas para alguns valores intermediários de demanda (em função dos níveis de confiança) são apresentadas na Figura 8.21. Para facilitar a análise são indicados também os valores de receita para a condição de atendimento total. Em geral, quando a confiança sobre os valores de demanda diminui ($\alpha \rightarrow 0$), a receita aumenta.

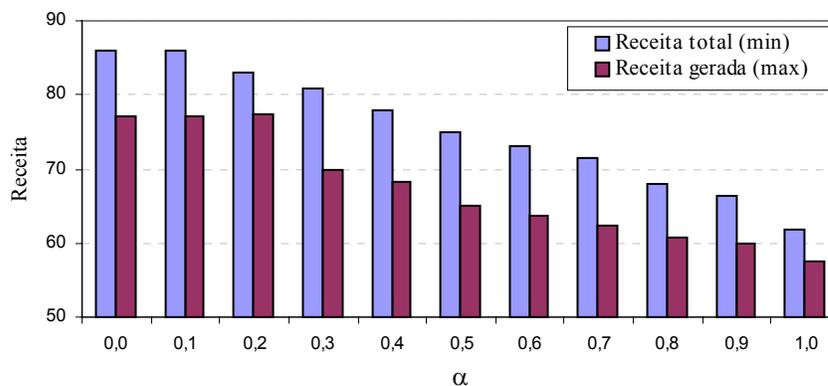


Figura 8.21 - Receitas geradas (*controle por nó de acesso*).

A distribuição da receita entre os serviços e a sua porcentagem de perda em relação ao total são indicadas na Figura 8.22. O atendimento dos serviços é, obviamente, penalizado quando o orçamento é reduzido. O corte de 15% no orçamento gera, em média, uma receita reprimida em torno de 11% do total previsto. Para a maior parte do intervalo de α , o serviço 2 teve (em valores absolutos) mais perdas que o serviço 1.

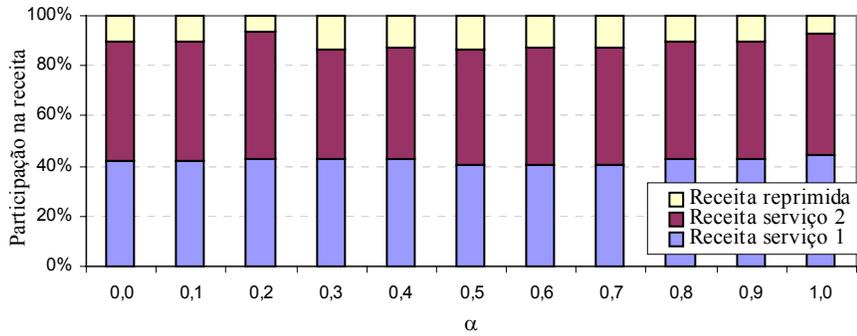


Figura 8.22 - Distribuição da receita (*controle por nó de acesso*).

8.3.3.2 – Impacto sobre o Controle de Demanda por Serviço

A Tabela 8.10 lista os índices econômicos e as configurações de atendimento para as principais situações de demanda prevista. Para facilitar a análise, os valores obtidos da solução de mínimo custo são apresentados novamente.

Tabela 8.10 - Principais resultados da Seção 8.3.3.2.

Solução min-custo	Demanda prevista		
	\underline{d}_{si}	D_{si}	\bar{d}_{si}
Custo	130,10	156,20	175,60
Receita gerada	37,50	61,80	86,10
Solução max-receita	(com corte de 15% no orçamento)		
Receita gerada	33,94	57,49	79,96
Receita / custo	0,31	0,43	0,54
ERBs não alocadas	8-14	-	8
Número de canais não atendidos			
<i>Serviço 1</i>	16,00	0,00	19,00
<i>Serviço 2</i>	9,78	21,56	21,22
Rede alocada			
<i>HDSL</i>	0	0	0
<i>Óptico</i> (1/2/4/8)	0/ 2/ 3/ 1	0/ 0/ 4/ 8	0/ 0/ 4/ 9
<i>Rádio</i> (2/4/8)	6/ 1/ 0	3/ 0/ 0	0/ 1/ 0

Diferentemente do ocorrido na Seção 8.3.3.1, aqui o corte de 15% no orçamento não impossibilitou a obtenção de uma solução factível para a previsão de demanda mínima (\underline{d}_{si}). A solução foi garantida através de uma rede “enxuta”, com os equipamentos alocados em baixa hierarquia, e sacrificando a demanda total das ERBs 8 e 14 (Figura 8.23). O número de enlaces via rádio microondas supera o de sistemas ópticos.

Para as outras duas situações de previsão de demanda (Figuras 8.24 e 8.25), a tecnologia óptica continua sendo a mais apropriada. A rede é dimensionada de forma

a compartilhar melhor os meios de transmissão, principalmente para a condição de demanda máxima, onde se tem uma grande utilização de equipamentos com maior hierarquia. A demanda reprimida do serviço 1, para a condição de demanda máxima (\bar{d}_{s1}) é toda aquela que estava prevista para a ERB 8.

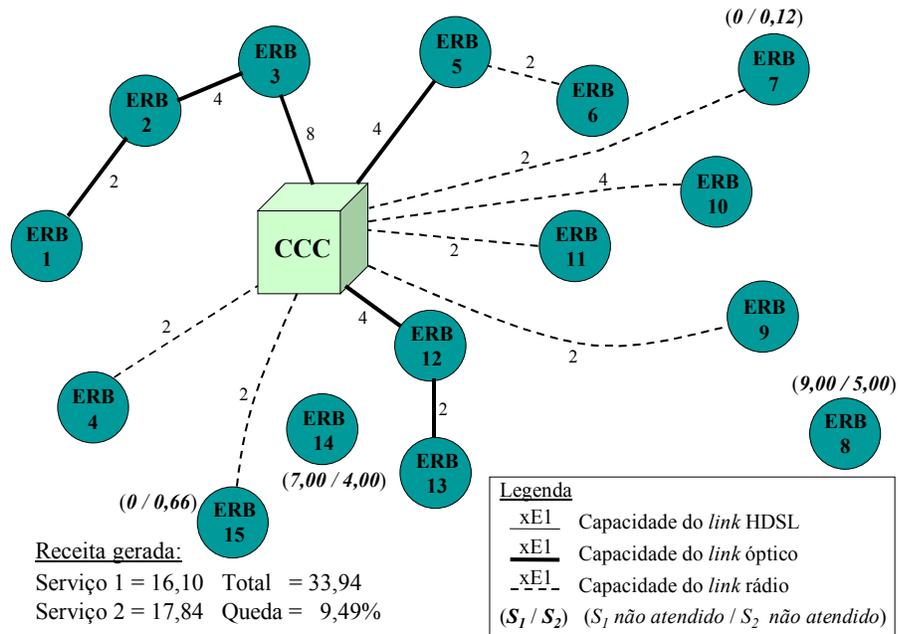


Figura 8.23 - Configuração da rede para \underline{d}_{si} (controle por serviço), admitindo-se uma queda de 15% no orçamento.

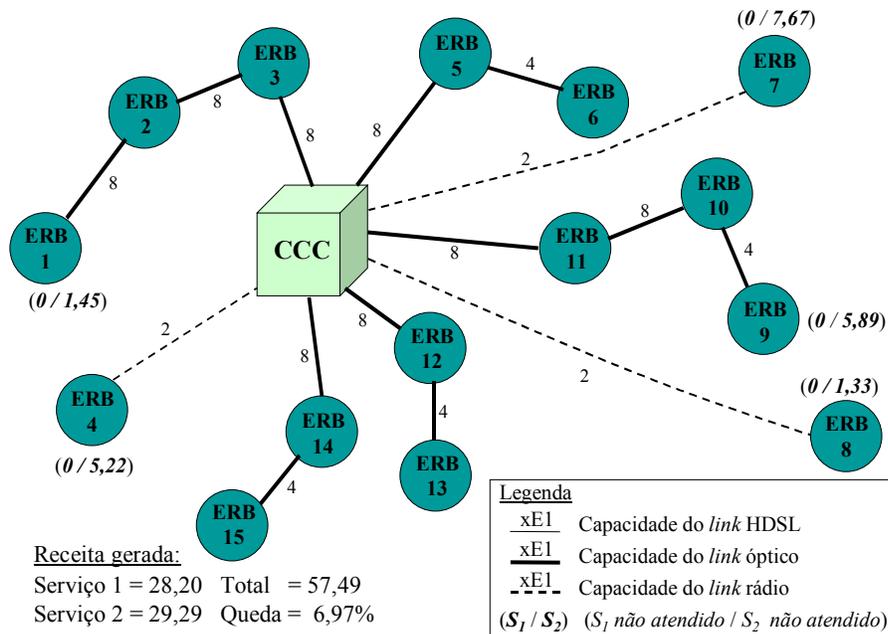


Figura 8.24 - Configuração da rede para D_{si} (controle por serviço), admitindo-se uma queda de 15% no orçamento.

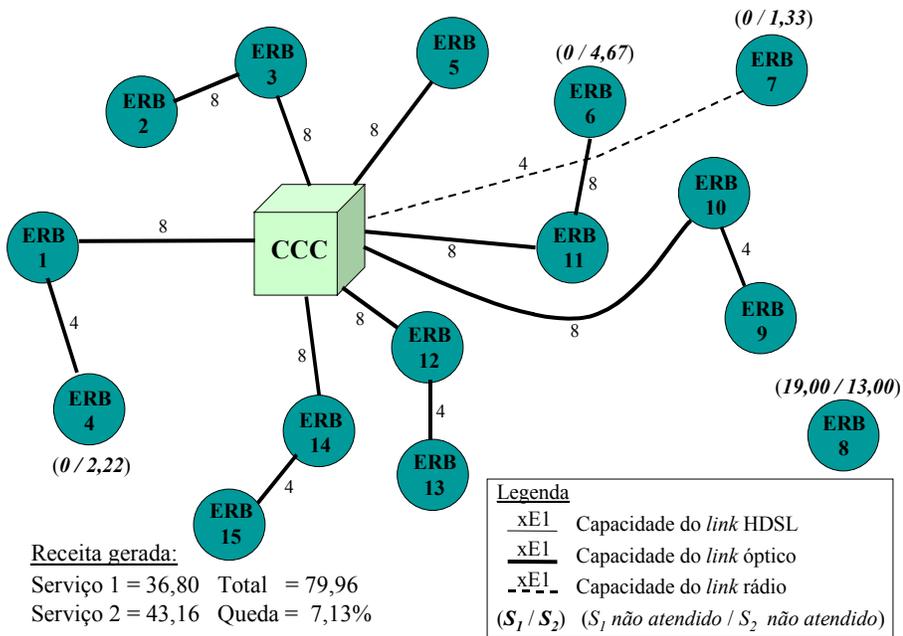


Figura 8.25 - Configuração da rede para \bar{d}_{si} (controle por serviço), admitindo-se uma queda de 15% no orçamento.

As receitas obtidas para alguns valores intermediários de demanda são apresentadas na Figura 8.26. Para permitir também a comparação com o controle de demanda por nó de acesso, a Figura 8.27 indica a distribuição das receitas. Devido à possibilidade de atender a demanda sem se preocupar com o atendimento mínimo por região da rede, a receita obtida aqui é ligeiramente maior (2%, em média) do que aquela apresentada na Seção 8.3.3.1 acima, resultando em menos demanda reprimida, mesmo que para isso se tenha que deixar de atender um nó inteiro.

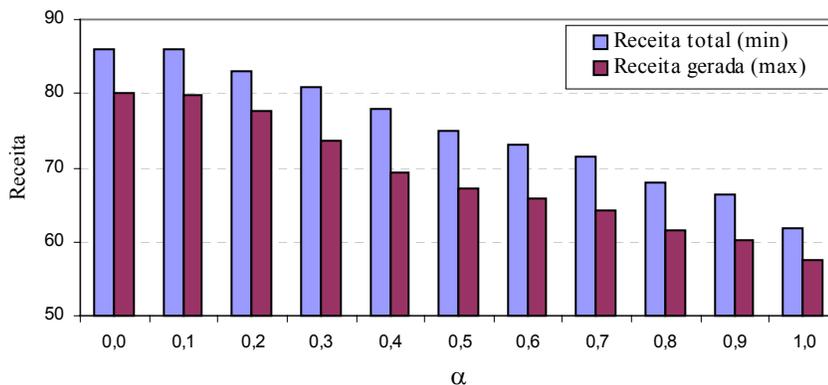


Figura 8.26 - Receitas geradas (controle por serviço).

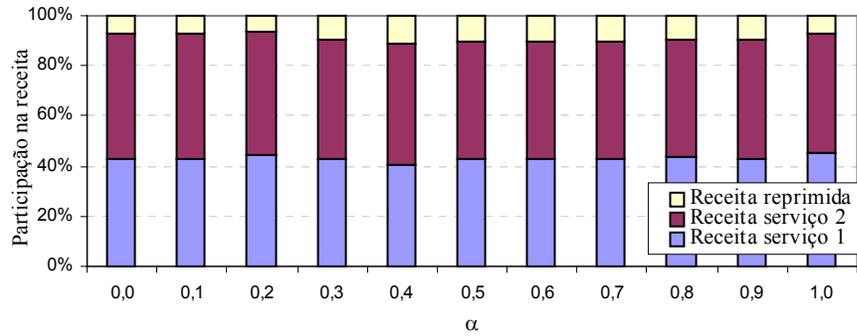


Figura 8.27 - Distribuição da receita (*controle por serviço*).

8.4 – Comentários Adicionais

Neste capítulo foram relatadas aplicações do modelo PLIM de maximização de receita em situações de previsão imprecisa de demanda. O uso do modelo *Fuzzy*-PLIM permitiu associar diferentes soluções a distintos níveis de certeza sobre os dados. Dessa forma, foi possível entender o impacto causado pela variação de demanda sobre o sistema de acesso planejado, e determinar os valores de receita em função dessas mudanças.

Como resultados de planejamento podemos destacar as seguintes observações:

Sistema de acesso fixo cabeado

As tecnologias xDSL e APON-FTTC foram combinadas no atendimento de quatro perfis de serviço: VOZ, RDSI, FLR e FLC. A migração de usuários de VOZ para os outros três serviços foi avaliada. Nos estudos, o custo dos equipamentos manteve-se fixo. Para a maioria dos cenários avaliados, a tecnologia óptica é dominante. Mas, para os valores de penetração mais confiáveis, a tecnologia xDSL sobre a rede metálica é uma boa escolha para alguns nós da rede. Esta tecnologia pode, então, ser considerada como fazendo parte da evolução do sistema de acesso fixo cabeado em direção a um ambiente faixa-larga totalmente óptico. Quanto ao desempenho dos serviços, pode-se destacar a alta preferência pelo oferecimento do serviço FLC, cuja demanda foi quase que totalmente atendida em todas as situações analisadas.

Sistema de acesso móvel celular:

As tecnologias HDSL, *modem* óptico e rádio microondas foram estudadas no atendimento de dois tipos de serviço, sendo um com taxa de transmissão de 64 Kbps e outro a 144 Kbps. O custo dos equipamentos foi considerado como perfeitamente conhecido. O planejamento foi executado para várias condições de previsão de demanda para os dois serviços. Para a maioria dos cenários, a tecnologia utilizando *modems* ópticos foi a mais atrativa. A estrutura de custos adotada impossibilitou a escolha da tecnologia HDSL em todas as previsões de demanda avaliadas. Em termos de receita o *controle de demanda por serviço* mostrou-se ligeiramente mais lucrativo.

Parte IV

**SOLUÇÃO COMPLETA DO PROBLEMA COM DADOS
IMPRECISOS: UMA ABORDAGEM HEURÍSTICA**

Capítulo 9

MÉTODO HEURÍSTICO PARA A RESOLUÇÃO DO MODELO *FUZZY*-PLIM

9.1 – Introdução

Uma característica marcante dos modelos discutidos nos Capítulos 7 e 8 é o fato de eles permitirem a adoção de valores imprecisos para a demanda dos serviços que estão previstos para serem oferecidos. A fim de poder avaliar o risco técnico-econômico e antecipar soluções para diferentes níveis de demanda, o modelo baseia-se no conceito de números *fuzzy*.

A estratégia escolhida para resolver o modelo PLIM com dados imprecisos foi substituir a demanda *fuzzy* por equivalentes paramétricos, em particular nos valores *right-hand-side* (rhs) das restrições. O modelo tornou-se bastante robusto. Porém, a dificuldade de se realizar a análise paramétrica em problemas PLIM deixou ainda mais complicado o procedimento de resolução. Isto fez com que as aplicações apresentadas anteriormente ficassem restritas a alguns valores particulares escolhidos para o parâmetro de controle da demanda.

A teoria e as técnicas computacionais para análise paramétrica de problemas PLIM ainda não estão totalmente fundamentadas, e muito menos disponíveis comercialmente. Assim, encontrar soluções para os problemas apresentados não é uma tarefa simples. A complexidade computacional aumenta se as instâncias possuem um grande número de variáveis binárias. Isto porque a solução completa exige a obtenção do objetivo ótimo para todos os valores de α .

O objetivo deste capítulo é apresentar um algoritmo que permita fazer uma escolha mais criteriosa dos valores pontuais para o parâmetro de controle da demanda (α). O método propõe resolver o PLIM em valores fixados para o parâmetro de controle e, posteriormente, juntar estas soluções através de *programação linear paramétrica* (PLP), quando se permite a variação contínua do parâmetro.

Desde que a principal carga computacional está em resolver os PLIMs em diferentes valores do parâmetro de controle, o algoritmo é projetado para completar cada análise paramétrica com a solução de poucos PLIMs, tanto quanto possível. A meta é automatizar o processo de resolução, otimizando a quantidade de problemas PLIM a serem avaliados. Acrescente-se a isso a possibilidade de utilizar o histórico de soluções no processo de decisão.

O algoritmo proposto independe do *solver* utilizado, desde que ele seja capaz de resolver problemas PLIM e desempenhar análise paramétrica em problemas de programação linear. Neste trabalho o CPLEX[®] continua sendo o *solver* adotado.

O desenvolvimento do algoritmo exige que se faça um breve detalhamento de algumas técnicas de programação matemática. Para facilitar a compreensão do algoritmo, este capítulo está assim composto: a Seção 9.2 retoma as especificidades do PLIM desenvolvido nos capítulos anteriores, a preocupação é diferenciar os conjuntos de decisões envolvidas no modelo e como eles podem ser manipulados para auxiliar no processo de resolução; algumas definições importantes para o desenvolvimento do método heurístico destinado a resolver o PLIM-paramétrico são indicadas na Seção 9.3; a Seção 9.4 descreve o algoritmo e sua forma de utilização; o procedimento prático utilizado para resolver os problemas de programação linear paramétrica (PLP) está na Seção 9.5; modificações no método de resolução do PLIM-paramétrico para permitir a utilização de receita unitária variável na função objetivo são propostas na Seção 9.6.

9.2 – Utilizando-se da Estrutura do PLIM

Nos modelos matemáticos propostos para o planejamento de sistemas de acesso podem-se dividir as variáveis de decisão em dois conjuntos:

- Variáveis de equipamentos: cada uma delas corresponde à decisão de alocar (ou não) e dimensionar os equipamentos em cada arco (ou nó) da rede. São do tipo binário (0 ou 1) e, para o padrão de sistemas avaliados aqui (redes de médio porte, em torno de 20 nós), podem chegar à casa de centenas.

- Variáveis de fluxo de demanda: modelam o caminho percorrido pela demanda desde o nó fonte (nó artificial de serviço) até o nó sumidouro (nó CC). São do tipo real e, para os nossos problemas, podem atingir uma centena.

Esta peculiaridade, somada à condição de desconsiderar os custos com a rede secundária no estudo do sistema de acesso fixo cabeado, possibilita fazer a análise paramétrica sobre o PLIM da seguinte forma:

Passo 1 – dimensionar a rede para um valor fixo de demanda (α fixo). Isto significa resolver o PLIM conforme foi feito nos capítulos anteriores;

Passo 2 – verificar o impacto da variação da demanda sobre a rede dimensionada, para todo o intervalo de α . Este procedimento fixa as variáveis binárias e realiza uma análise paramétrica sobre o PL resultante desta fixação. Este procedimento pode ser feito pois o custo computado, oriundo das decisões de dimensionamento de equipamentos, permanece inalterado durante toda a análise paramétrica. O único inconveniente é a possibilidade da rede fixada não ser capaz de suportar o atendimento mínimo obrigatório que, conforme foi modelado, cresce proporcionalmente ao aumento da demanda prevista. Este fato merece maior atenção quando se aplica o *controle de demanda por nó de acesso*, onde as restrições de atendimento são mais fortes.

O método heurístico proposto mais adiante procura contemplar todas estas situações. Ele baseia-se nos trabalhos de Crema (1998) e Jenkins (1982) que, em outro contexto, dispensaram tratamento similar ao que será mostrado aqui. Mais recentemente, Crema (2002a, 2002b, 2000) também indica outros métodos de análise paramétrica para problemas de programação linear inteira pura. Particularmente, estes não se aplicam ao padrão de problemas avaliados nesta tese (inteiro misto), mas fornecem uma boa visão do estado-da-arte. A seguir, são apresentadas algumas definições para esclarecer a terminologia utilizada no desenvolvimento do método heurístico, daqui em diante, chamado também de algoritmo ou heurística.

9.3 – Definições

O algoritmo opera com dois conjuntos de valores de α . Um, $\{ \alpha_{nA} \}$ - conjunto dos α não-avaliados, contém aqueles valores para os quais um PLIM será resolvido. O outro, $\{ \alpha_A \}$ - conjunto dos α já-avaliados, contém aqueles valores para os quais um PLIM já foi resolvido. A cada iteração, algum α_c é removido do primeiro conjunto, um

PLIM é resolvido para este valor, as variáveis binárias são fixadas e é feita uma análise paramétrica sobre o PL resultante.

Definições

P_α : PLIM a ser resolvido com α já definido (α_c), modelo C9-MI1, onde são indicadas apenas as restrições de demanda.

Modelo C9-MI1:

$$\begin{aligned}
 (P_\alpha) \quad & \text{Max } \mathbf{c}\mathbf{x} \\
 & \text{s.a. } \mathbf{A}\mathbf{x} + (\bar{\mathbf{d}} - \mathbf{D})\alpha \leq \bar{\mathbf{d}} \\
 & \mathbf{x} \geq 0, \underline{\mathbf{x}} \in \{0, 1\}^k \\
 & \alpha = \alpha_c
 \end{aligned} \tag{9-1}$$

\mathbf{X} : subconjunto formado por todas as variáveis reais (\mathbf{x}) do PLIM - todas as variáveis de fluxo de demanda (\mathbf{Y} e \mathbf{Y}_{esc}).

$\underline{\mathbf{X}}$: subconjunto formado por todas as variáveis binárias ($\underline{\mathbf{x}}$) do PLIM - todas as variáveis de rede ou de equipamento. Vide Seção 7.5 para maiores detalhes sobre $\underline{\mathbf{x}}$.

$Z(\alpha)$: valor da solução ótima quando P_α é resolvido em α . Mudanças em α modificam o espaço de soluções de P_α . Se um valor de α não permite nenhuma solução factível, então $Z(\alpha)$ é tomada como tendo valor $-\infty$ (lembre-se que o problema é de maximização).

$\underline{\mathbf{X}}(\alpha_1)$: supondo que P_α possua uma solução factível em α_1 , então $\underline{\mathbf{X}}(\alpha_1)$ representa o valor ótimo de $\underline{\mathbf{X}}$ quando P_α é resolvido em α_1 . $\underline{\mathbf{X}}(\alpha_1)$ é a configuração de rede ótima para α_1 .

$Z(\alpha, \underline{\mathbf{X}}(\alpha_1))$: solução ótima para um PL, com o parâmetro α variando continuamente dentro do intervalo $[0, 1]$. Esta função é côncava e linear por partes sobre os valores de α que permitem solução factível (Crema, 1998; Jenkins, 1982). Se $\underline{\mathbf{X}}(\alpha_1)$ não permite uma solução factível em α_2 , então $Z(\alpha_2, \underline{\mathbf{X}}(\alpha_1)) = -\infty$. Na computação de $Z(\alpha, \underline{\mathbf{X}}(\alpha_1))$ as variáveis reais \mathbf{X} são permitidas a variar para maximizar a receita, enquanto as variáveis binárias $\underline{\mathbf{X}}$ são fixadas em $\underline{\mathbf{X}}(\alpha_1)$. O procedimento utilizado para realizar esta análise paramétrica está detalhado na Seção 9.5, mais adiante.

$g_{\underline{x}^1, \dots, \underline{x}^p}(\alpha) : \max \{ Z(\alpha, \underline{X}(\alpha_j) : 1 \leq j \leq p) \} \forall \alpha \in [0, 1]$. $g_{\underline{x}^1, \dots, \underline{x}^p}(\alpha)$ é uma função côncava, linear por partes, e é também uma função solução limite inferior de $Z(\alpha)$.

$\alpha_c : \min \{ \alpha_{nA} \}$. α corrente = menor valor em $\{ \alpha_{nA} \}$.

$\alpha_{ce} : \max \{ \alpha_A \mid \alpha_A < \alpha_c \}$. α já-avaliado mais próximo de α_c à esquerda.

$\alpha_{cd} : \min \{ \alpha_A \mid \alpha_A > \alpha_c \}$. α já-avaliado mais próximo de α_c à direita.

$\{ \ } \rightarrow \blacksquare$: retirar elemento \blacksquare do conjunto $\{ \ }$.

$\blacksquare \rightarrow \{ \ }$: colocar elemento \blacksquare no conjunto $\{ \ }$.

9.4 – O Método Heurístico (Algoritmo)

A análise paramétrica sobre o PLIM é realizada conforme o *Algoritmo 1* descrito a seguir. Na Seção 9.6 são apresentadas algumas adaptações que podem ser feitas neste algoritmo para que ele também possa ser utilizado em situações de planejamento nas quais se tem imprecisão sobre o valor da receita unitária dos serviços.

Algoritmo 1 (*Inicialização*):

- T1. iniciar $\{ \alpha_{nA} \} = \{ 0, 1 \}$. (Nota: cada elemento subsequente de $\{ \alpha_{nA} \}$ é calculado conforme a tarefa T8);
- T2. $\{ \alpha_{nA} \} \rightarrow \alpha_c=0$, resolver P_0 ;
- T3. fixar $\underline{X}(0)$, obter $Z(\alpha, \underline{X}(0))$ por PLP (Seção 9.5), com $\alpha \in [0, 1]$;
- T4. $\alpha_c=0 \rightarrow \{ \alpha_A \}$;
- T5. $\{ \alpha_{nA} \} \rightarrow \alpha_c=1$, resolver P_1 ;
- T6. se $\underline{X}(0) = \underline{X}(1) \rightarrow$ **FIM** (redes iguais), senão continue;
- T7. fixar $\underline{X}(1)$, obter $Z(\alpha, \underline{X}(1))$ por PLP (Seção 9.5), com $\alpha \in [0, 1]$;
- T8. obter α' tal que $Z(\alpha', \underline{X}(0)) = Z(\alpha', \underline{X}(1))$, conforme a Figura 9.1;
- T9. $\alpha' \rightarrow \{ \alpha_{nA} \}$;
- T10. fazer $\{ \alpha_{nA} \} = \{ \alpha' \}$ e aplicar o *Algoritmo 1* da Figura 9.2.

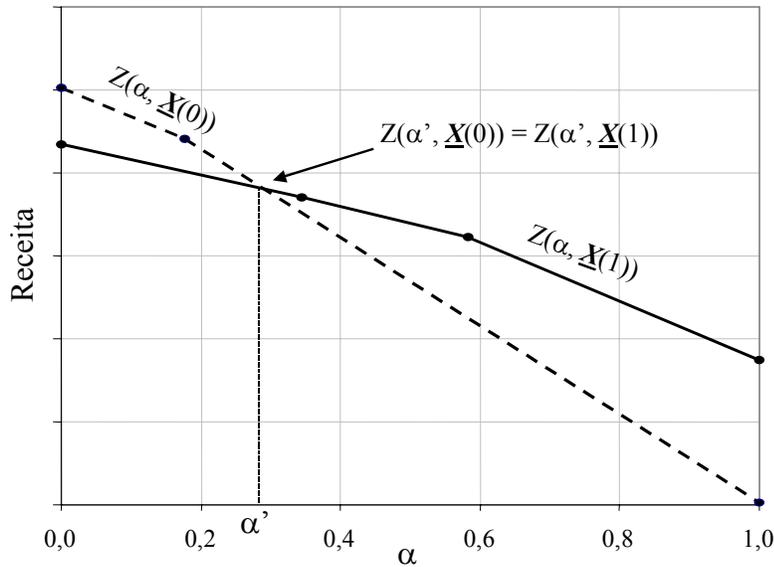


Figura 9.1 - Definição dos elementos de $\{\alpha_{nA}\}$ a partir da PLP.

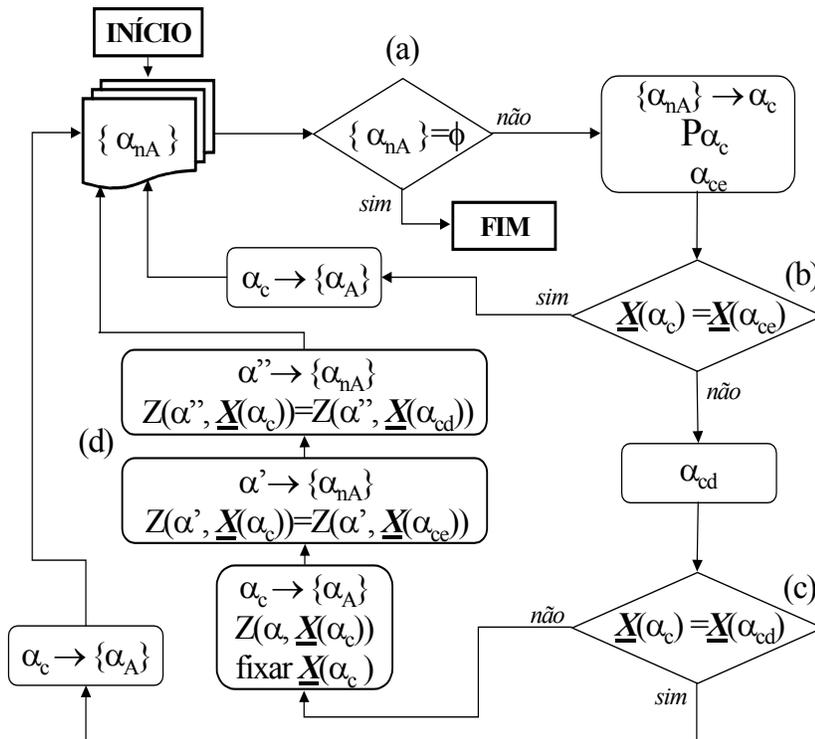


Figura 9.2 - Algoritmo 1, utilizado para fazer a análise paramétrica do PLIM.

9.4.1 – Funcionamento do Algoritmo 1

O Algoritmo 1 trabalha da seguinte forma:

- 1 - resolver P_0 ;

- 2 - com as variáveis binárias fixadas em $\underline{\mathbf{X}}^1 = \underline{\mathbf{X}}(0)$ a PLP é usada para obter $Z(\alpha, \underline{\mathbf{X}}(0))$;
- 3 - determinar a função solução limite inferior $g_{\underline{\mathbf{x}}^1}(\alpha) = Z(\alpha, \underline{\mathbf{X}}(0)) \forall \alpha \in [0, 1]$;
- 4 - resolver P_1 ;
- 5 - com as variáveis binárias fixadas em $\underline{\mathbf{X}}^2 = \underline{\mathbf{X}}(1)$ a PLP é usada para obter $Z(\alpha, \underline{\mathbf{X}}(1))$;
- 6 - determinar a função solução limite inferior melhorada: $g_{\underline{\mathbf{x}}^1, \underline{\mathbf{x}}^2}(\alpha) = \max \{ g_{\underline{\mathbf{x}}^1}(\alpha), Z(\alpha, \underline{\mathbf{X}}(1)) \}$, conforme indicado na Figura 9.3;
- 7 - obter a intersecção entre $Z(\alpha, \underline{\mathbf{X}}(0))$ e $Z(\alpha, \underline{\mathbf{X}}(1))$ para definir um novo valor de α (α_c), para o qual um novo problema PLIM será resolvido;
- 8 - resolver P_{α_c} ;
- 9 - obter $\underline{\mathbf{X}}^3 = \underline{\mathbf{X}}(\alpha_c)$ e $g_{\underline{\mathbf{x}}^1, \underline{\mathbf{x}}^2, \underline{\mathbf{x}}^3}(\alpha) = \max \{ g_{\underline{\mathbf{x}}^1, \underline{\mathbf{x}}^2}(\alpha), Z(\alpha, \underline{\mathbf{X}}(\alpha_c)) \}$ e assim por diante.

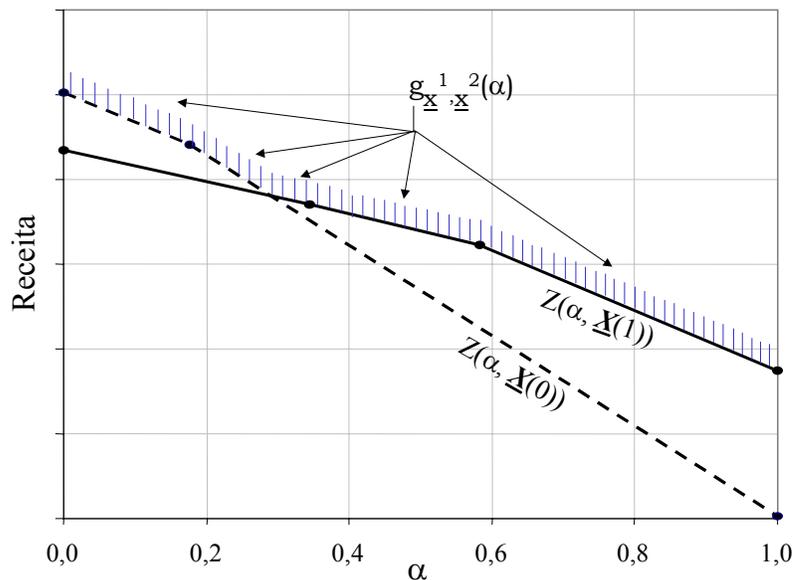


Figura 9.3 - Determinação da função solução limite inferior $g_{\underline{\mathbf{x}}^1, \underline{\mathbf{x}}^2}(\alpha)$.

Quanto às anotações indicadas na Figura 9.2, vale ressaltar:

- (a) os PLIMs são resolvidos para α_c enquanto $\{ \alpha_{nA} \}$ não se tornar um conjunto vazio. Da forma como é feita a escolha de α_c , o intervalo $[0, 1]$ é analisado “da esquerda para a direita”. A cada iteração ele é reduzido até que se obtenha a mesma configuração de rede para os seus valores de α extremos, $\alpha_{ce} - \alpha_c$ ou $\alpha_c - \alpha_{cd}$ (Figura 9.4).

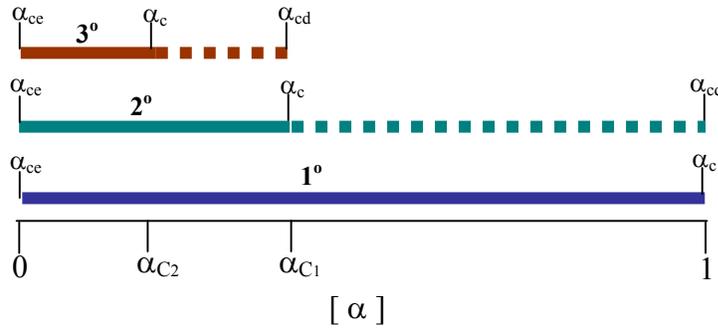


Figura 9.4 - Seqüência de avaliação dos subintervalos de α .

Quando uma das situações $\underline{\mathbf{X}}(\alpha_{ce}) = \underline{\mathbf{X}}(\alpha_c)$ ou $\underline{\mathbf{X}}(\alpha_c) = \underline{\mathbf{X}}(\alpha_{cd})$ é alcançada, o algoritmo passa a avaliar o subintervalo adjacente à direita, e assim por diante até que se tenha concluído todo o intervalo de α . Esta escolha da direção em que o algoritmo caminha dentro do intervalo $[0, 1]$ é arbitrária. Poderia ser de outra forma: por exemplo, “da direita para a esquerda”, escolhendo-se $\alpha_c = \max \{ \alpha_{nA} \}$.

Para melhorar o desempenho computacional do algoritmo, $Z(\alpha_{cd})$ pode ser usado como “*limite inferior*” no algoritmo *branch-and-bound* durante o processo de busca da solução ótima de P_{α_c} .

- (b) verifica se a rede corrente é idêntica à rede obtida para o α mais próximo à esquerda. Se for, considerar $\underline{\mathbf{X}}(\alpha_{ce})$ como sendo a configuração da rede solução para $\alpha \in [\alpha_{ce}, \alpha_c]$;
- (c) verifica se a rede corrente é idêntica à rede obtida para o α mais próximo à direita. Se for, considerar $\underline{\mathbf{X}}(\alpha_c)$ como sendo a configuração da rede solução para $\alpha \in [\alpha_c, \alpha_{cd}]$;
- (d) as intersecções de $Z(\alpha, \underline{\mathbf{X}}(\alpha_c))$ com $Z(\alpha, \underline{\mathbf{X}}(\alpha_{ce}))$ e de $Z(\alpha, \underline{\mathbf{X}}(\alpha_c))$ com $Z(\alpha, \underline{\mathbf{X}}(\alpha_{cd}))$, definem os novos elementos de $\{ \alpha_{nA} \}$ a serem avaliados, que são α' e α'' , respectivamente. Estas tarefas são executadas para aquelas situações em que não se confirma a igualdade de redes para o subintervalo de α que se encontra em análise.

Conforme dito anteriormente, mudanças em α alteram os valores *rhs* do PLIM e, conseqüentemente, modificam o espaço de soluções factíveis de P_{α} . Em particular, a rede $\underline{\mathbf{X}}(\alpha_1)$ pode se tornar infactível para alguns valores de α , o que impossibilita uma análise $Z(\alpha, \underline{\mathbf{X}}(\alpha_1))$ completa. Nos casos em que esta infactibilidade proíbe determinar

α' e/ou α'' , os novos elementos de $\{\alpha_{nA}\}$ são tomados como sendo o valor médio do subintervalo em avaliação. Nestas situações a função solução limite inferior $g_{\underline{x}^1, \dots, \underline{x}^p}(\alpha)$ pode ter uma “descontinuidade” em α' e/ou α'' .

Outro fato que também merece importância durante o procedimento para definir α' e α'' é a modularidade dos equipamentos candidatos. Não se pode descartar a possibilidade de se encontrarem soluções de rede com custos diferenciados, dentro do limite de orçamento estipulado, mas que possuem o mesmo comportamento de receita para todo o intervalo de demanda previsto. Mais explicitamente, podem existir situações em que uma pequena variação no valor de α induza à mudança de hierarquia de algum equipamento ou até mesmo a uma troca de nó de acesso a ser atendido (soluções de P_α); mas quando se verifica o número total de usuários atendidos (receita gerada), elas mantêm o mesmo comportamento: $Z(\alpha, \underline{\mathbf{X}}(\alpha_1)) = Z(\alpha, \underline{\mathbf{X}}(\alpha_2))$.

Portanto, durante a aplicação do algoritmo deve ser dada ao planejador a liberdade de definir outros critérios de decisão (por exemplo: a rede mais barata, a que atende o maior número de nós de acesso, a que possui maior capacidade total de atendimento, entre outros) que possam auxiliá-lo na escolha da solução de melhor qualidade dentre todas aquelas que apresentam o mesmo comportamento de receita gerada. Uma opção mais simplista do ponto de vista de planejamento, porém mais eficiente do ponto de vista computacional, é adotar a primeira solução encontrada e descartar todas as outras.

9.5 – Procedimento Utilizado para Realizar a PLP

A programação linear paramétrica é uma tarefa importante dentro do método heurístico descrito na seção anterior. E como o CPLEX[®], *software* utilizado na resolução dos problemas tratados nesta tese, não possui uma sub-rotina que seja capaz de desempenhar esta tarefa de forma direta, torna-se necessária a criação de um procedimento que o manipule para este propósito.

Na Seção 9.3 foi definido que $Z(\alpha, \underline{\mathbf{X}}(\alpha_c))$ é a solução ótima para o PL resultante da fixação das variáveis binárias $\underline{\mathbf{X}}$ em $\underline{\mathbf{X}}(\alpha_c)$, onde o parâmetro α varia continuamente dentro do intervalo $[0, 1]$. Definida dessa forma, a função $Z(\alpha, \underline{\mathbf{X}}(\alpha_c))$ é a solução do seguinte PL:

Modelo C9-MI2:

$$\begin{aligned}
& \text{Max } \mathbf{c}\mathbf{x} \\
& \text{s.a. } \mathbf{A}\mathbf{x} + (\bar{\mathbf{d}} - \mathbf{D})\alpha \leq \bar{\mathbf{d}} \\
& \mathbf{x} \geq 0, \underline{\mathbf{x}} = \underline{\mathbf{X}}(\alpha_c) \\
& 0 \leq \alpha \leq 1
\end{aligned} \tag{9-2}$$

Resolver o modelo acima é o mesmo que obter todas as soluções básicas para $\alpha \in [0, 1]$. Em outras palavras, deseja-se medir o impacto devido às mudanças ocorridas no lado direito das (in)equações de demanda do seguinte PL:

Modelo C9-ME1:

$$\begin{aligned}
& \text{Max } \mathbf{c}\mathbf{x} \\
& \text{s.a. } \mathbf{A}\mathbf{x} \leq \mathbf{D} \\
& \mathbf{x} \geq 0, \underline{\mathbf{x}} = \underline{\mathbf{X}}(\alpha_c)
\end{aligned} \tag{9-3}$$

que é igual ao modelo C9-MI2 com $\alpha=1$.

A análise começa, portanto, com a solução básica de $\alpha=1$ e caminha em direção a $\alpha=0$, onde se encontra a solução básica ótima, visto que é nesta condição que se tem as previsões mais otimistas para a demanda. O algoritmo para realizar a PLP fica:

Algoritmo 2:

- T1. resolver o PL original ($\alpha=1$) – C9-ME1;
- T2. resolver C9-MI2 da seguinte forma:
 - T2.1. manter a base ótima do C9-ME1 como solução básica inicial na resolução de C9-MI2;
 - T2.2. resolver C9-MI2 para uma iteração do método SIMPLEX (configurar o CPLEX[®] para que o limite de iterações do SIMPLEX seja 1 e otimizar o problema);
 - T2.3. repetir o procedimento T2.2 até que o CPLEX[®] encontre uma solução básica ótima para C9-MI2, que nos casos avaliados aqui acontece para $\alpha=0$.

Vale lembrar que cada iteração do método SIMPLEX providencia um “*breakpoint*” para α , onde ocorre uma mudança de base. Nas situações em que o problema torna-se infactível (valores de α para os quais $\underline{\mathbf{X}}(\alpha_c)$ não suporta o fluxo de

demanda), adota-se valor nulo para a receita. Na presença de infactibilidade, portanto, $Z(\alpha, \mathbf{X}(\alpha_c))$ pode sofrer uma “descontinuidade”.

9.6 – Incorporando Receita Unitária Variável

Os modelos até aqui apresentados têm, essencialmente, perseguido o planeamento otimizado de sistemas de acesso de acordo com o critério de maximização de receita. Na função objetivo (apresentada novamente na Equação 9-4) a receita total é computada a partir do somatório das receitas geradas por cada serviço em cada nó de acesso. O valor da receita unitária é um dado de entrada para o modelo e em todas as análises manteve-se constante (Figura 9.5), independente do valor adotado para o parâmetro de controle da demanda.

$$\text{Maximizar } R(\mathbf{y}) = \sum_{(s,i) \in A_E} r_{si} Y_{si} \quad (9-4)$$

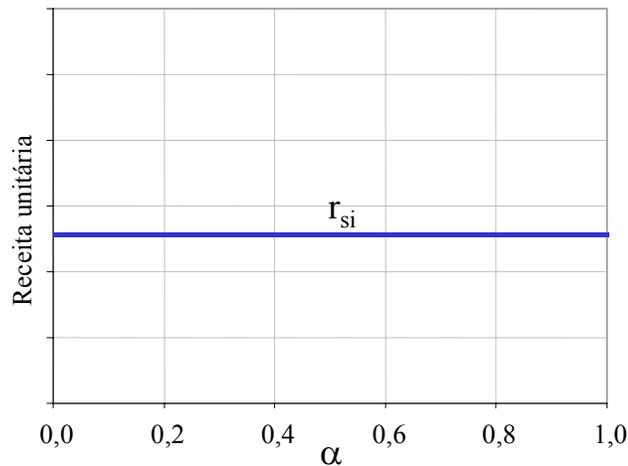


Figura 9.5 - Receita unitária do serviço s no nó de acesso i (constante).

No ambiente mercadológico, entretanto, na fase inicial de oferecimento de um serviço, quando ainda se tem uma baixa adesão por parte dos usuários, é natural que o custo do sistema por usuário seja elevado. Agora, este custo por usuário pode sofrer reduções quando os clientes da área avaliada tornam-se mais familiarizados com o serviço e os níveis de demanda aumentam. Isto permite à empresa operadora iniciar uma tendência de queda no valor da receita unitária. Ela passa a dar uma maior atenção à fidelidade do cliente e, conseqüentemente, à receita agregada. Um fator que pode influenciar esta tendência é, por exemplo, a competitividade entre operadoras

dentro da mesma área de atendimento, principalmente quando o serviço oferecido não é mais uma novidade exclusiva.

Para se aproximar ainda mais da realidade que buscam representar, os modelos desenvolvidos precisam, também, ser capazes de lidar com a possibilidade de utilizar dados imprecisos para a receita unitária.

Uma situação bastante razoável, encontrada no ambiente das operadoras de sistemas de telecomunicações, é que normalmente as mudanças nas tarifas ocorrem em momentos pontuais, quando o nível de atendimento alcança patamares que justifiquem tais adequações.

Nos modelos propostos nesta tese esta situação pode ser averiguada concomitantemente com a análise do parâmetro α . A receita unitária pode ser modelada, por exemplo, através de subintervalos, cujos valores (fixos) passam a depender do nível de demanda em que se encontram. A Figura 9.6 mostra um exemplo desta modelagem, admitindo-se mudanças no valor da receita unitária em apenas um nível de demanda (N_1).

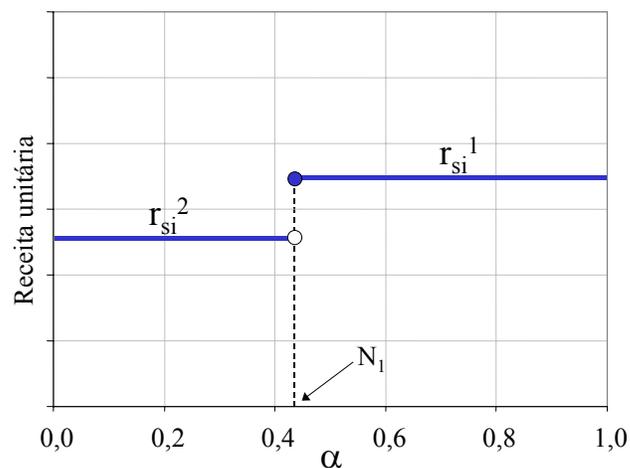


Figura 9.6 - Receita unitária do serviço s no nó de acesso i (variável).

9.6.1 – Novo Procedimento de Resolução do PLIM-Paramétrico

Por sua vez, o procedimento de resolução do modelo PLIM-paramétrico também precisa ser revisto. A preocupação agora é saber quais coeficientes devem ser adotados na função objetivo de P_{α_c} e durante a análise paramétrica para obter $Z(\alpha, \mathbf{X}(\alpha_c))$. O método heurístico modificado (tarefas assinaladas com *), admitindo-se um nível de mudança N_1 , fica:

Algoritmo 3 (Inicialização):

- T1. iniciar $\{\alpha_{nA}\} = \{0, 1\}$;
- T2*. $\{\alpha_{nA}\} \rightarrow \alpha_c=0$, resolver P_0 , com os coeficientes da função objetivo em r_{si}^2 ;
- T3*. obter $Z(\alpha, \underline{\mathbf{X}}(0))$ por PLP, com $\alpha \in [0, 1]$. Isto é feito da seguinte forma:
 - T3.1*. fixar os coeficientes da função objetivo em $r_{si}^1 (\alpha=1)$ e resolver o PL resultante;
 - T3.2*. manter a base ótima do PL resolvido em T3.1 como solução básica inicial na análise paramétrica;
 - T3.3*. fazer a análise paramétrica até $\alpha=N_1$ (primeiro intervalo de análise);
 - T3.4*. mudar os coeficientes da função objetivo em $\alpha=N_1$ para r_{si}^2 e resolver o PL resultante;
 - T3.5*. manter a base ótima do PL resolvido em T3.4 como solução básica inicial na segunda parte da análise paramétrica;
 - T3.6*. fazer a análise paramétrica até $\alpha=0$ (segundo intervalo de análise).

Nota: lembrar que $\underline{\mathbf{X}}(0)$ deve ser mantida fixa durante todo o processo, ou seja, independentemente da função objetivo escolhida a rede utilizada é a mesma em toda a análise paramétrica. Como resultado desta PLP, a função $Z(\alpha, \underline{\mathbf{X}}(0))$ terá a forma da Figura 9.7.

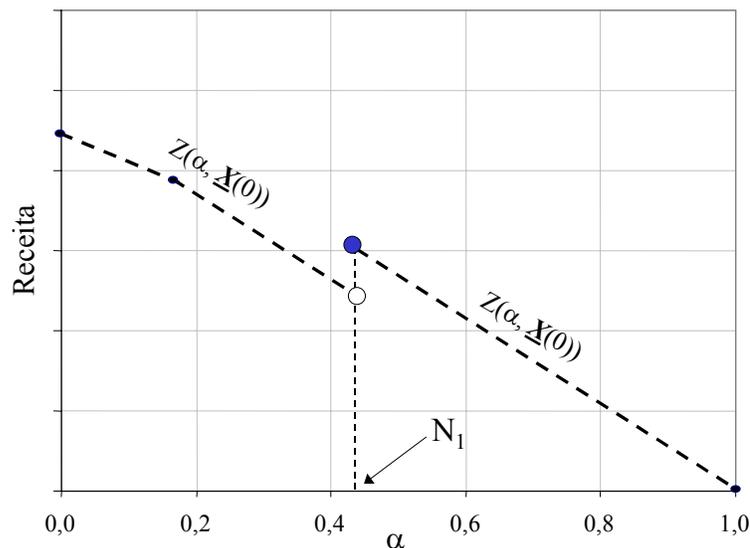


Figura 9.7 - Nova função $Z(\alpha, \underline{\mathbf{X}}(0))$.

Deve-se observar que esta nova função, bem como qualquer outra $Z(\alpha, \underline{\mathbf{X}}(\alpha_c))$, faz com que a solução $\underline{\mathbf{g}}_{\underline{\mathbf{x}}^1, \dots, \underline{\mathbf{x}}^p}(\alpha)$ tenha uma “descontinuidade de receita” em $\alpha=N_1$.

- T4. $\alpha_c=0 \rightarrow \{\alpha_A\}$;
- T5*. $\{\alpha_{nA}\} \rightarrow \alpha_c=1$, resolver P_1 , com os coeficientes da função objetivo em r_{si}^1 ;
- T6. se $\underline{\mathbf{X}}(0)=\underline{\mathbf{X}}(1) \rightarrow$ **FIM** (redes iguais), senão continue;
- T7*. obter $Z(\alpha, \underline{\mathbf{X}}(1))$ por PLP, com $\alpha \in [0, 1]$ da mesma forma que foi feito para $Z(\alpha, \underline{\mathbf{X}}(0))$ na tarefa T3;
- T8. obter α' tal que $Z(\alpha', \underline{\mathbf{X}}(0)) = Z(\alpha', \underline{\mathbf{X}}(1))$;
- T9. $\alpha' \rightarrow \{\alpha_{nA}\}$;
- T10*. fazer $\{\alpha_{nA}\} = \{\alpha'\}$ e aplicar o *Algoritmo 3* da Figura 9.8. As modificações em relação ao *Algoritmo 1* (Figura 9.2) encontram-se em destaque.

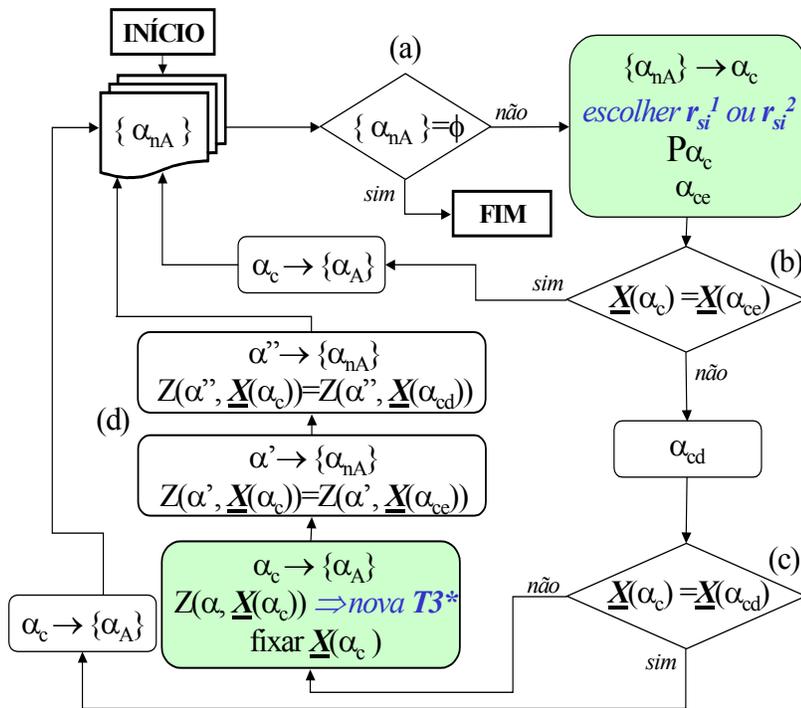


Figura 9.8 – *Algoritmo 3*, adaptado para aceitar receita unitária variável.

9.7 – Comentários Adicionais

Neste capítulo foi apresentado um método heurístico para auxiliar o planejador na tarefa de alocação e dimensionamento de equipamentos em sistemas de acesso quando existe a necessidade de se resolver um problema PLIM-paramétrico.

O método procura resolver os PLIMs em valores pontuais do parâmetro de controle e avaliar as soluções de rede de acordo com os conceitos de análise paramétrica linear. O histórico de soluções também é parte integrante do processo de resolução.

O planejador passa a ter, agora, duas opções para planejar o sistema de acesso:

- 1- liberdade para selecionar o nível de demanda, conforme as aplicações feitas no Capítulo 8. Nestes casos a rede é planejada, a cada momento, para um nível pontual de demanda pré-definido pela confiança do planejador nos dados;
- 2- indicar apenas os limites de variação para a demanda, do de maior para o de menor pertinência. O parâmetro de controle deixa de ser um dado de entrada e passa a fazer parte do processo de decisão. O resultado do planejamento é configurado através de uma “*classificação de soluções de rede*”.

Vale ressaltar também que, apesar de ter sido implementado para ser operado com um *solver* em particular, a forma como o algoritmo é proposto independe do método utilizado para resolver os problemas pontuais gerados. O *solver* só precisa ser capaz de solucionar problemas PLIM e desempenhar análise paramétrica linear.

Outro ponto que merece atenção está relacionado com a aplicabilidade. Embora tenha sido desenvolvido para resolver o problema resultante da modelagem *fuzzy* para os termos independentes das restrições, o algoritmo pode ser usado para resolver qualquer tipo de PLIM que exija análise paramétrica. Por exemplo, se a análise a ser feita é sobre os coeficientes da função objetivo, o procedimento torna-se, na verdade, um pouco mais simples. É que nestas condições, mudanças no parâmetro de controle não afetam o espaço de soluções factíveis do problema avaliado. Este procedimento é diferente daquele proposto na Seção 9.6, em que se admite receita unitária variável **juntamente** com a imprecisão sobre os dados de demanda.

Ainda com referência à utilização do método heurístico, não existe a obrigatoriedade de que o problema a ser resolvido seja resultante apenas da modelagem *fuzzy*. Carlson et alii (1998c), por exemplo, descrevem um PLIM-paramétrico, utilizado no planejamento de sistemas de acesso fixo cabeado para grandes assinantes, que é resultado da modelagem por intervalos, para o qual a heurística se aplica perfeitamente. Naquele mesmo trabalho, o autor demonstra que,

sob algumas condições, a abordagem usando intervalo nos coeficientes da função objetivo é similar ao equivalente de Adamo adotado nesta tese.

A aplicação prática do método heurístico, admitindo-se receita unitária fixa, é assunto do próximo capítulo. Já a implementação e aplicação do algoritmo indicado na Seção 9.6, para receita unitária variável, estão além do escopo deste trabalho. Entende-se que isto é uma continuação, ou seja, uma nova proposta voltada ao aperfeiçoamento da modelagem do problema de planejamento estudado aqui. Neste mesmo contexto, a avaliação da demanda imprecisa segundo uma ótica multi-paramétrica (diferentes níveis de confiança - α - para os valores de demanda, em regiões distintas da rede) também representa outro indicativo de melhoria que se pretende efetuar.

Capítulo 10

AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA MÉTODO HEURÍSTICO

10.1 – Introdução

Este capítulo apresenta os testes computacionais da aplicação do método heurístico discutido no Capítulo 9 à metodologia de planejamento. Os resultados produzidos demonstram grande parte dos aspectos mencionados anteriormente.

Dois cenários com previsão de demanda imprecisa são formalizados com o objetivo de avaliar a heurística sob dois pontos de vista distintos. O primeiro sintetiza a variedade de informações que o método é capaz de gerar: soluções de rede, comportamento da receita, configurações de atendimento dos serviços, etc. O segundo avalia o desempenho computacional do método diante de “perturbações” em alguns dos seus parâmetros de controle, tais como o tamanho da instância estudada e a utilização (ou não) de “*limite inferior*” na resolução dos PLIMs.

A análise técnico-econômica é feita para a infra-estrutura do sistema de acesso móvel celular, embora a metodologia seja aplicável a qualquer um dos sistemas de telecomunicações estudados nesta tese. São confrontadas três tecnologias de transmissão, com previsões de demanda imprecisa para dois perfis de serviço.

Este capítulo foi dividido em três seções principais. A Seção 10.2 apresenta os dados gerais de entrada para o planejamento do sistema: rede, tecnologias e serviços. A Seção 10.3 formaliza e indica os objetivos dos dois cenários de demanda imprecisa avaliados. A Seção 10.4 descreve as soluções propostas pelo método heurístico e uma breve análise destes resultados.

10.2 – Dados Gerais

Trata-se da mesma rede utilizada para ilustrar os modelos C6-ME2 (*Capítulo 6 – Modelo Exato 2*) e C8-MI2 (*Capítulo 8 – Modelo Impreciso 2*). A Figura 10.1 reapresenta essa rede, que contém 1 *Central de Comutação e Controle* (CCC) e 15 *Estações Rádio Base* (ERB). São previstos 28 arcos candidatos para escoar a demanda, sendo 15 diretos ERB-CCC (numerados de 1 a 15) e 13 indiretos ERB-ERB (numerados de 16 a 28).

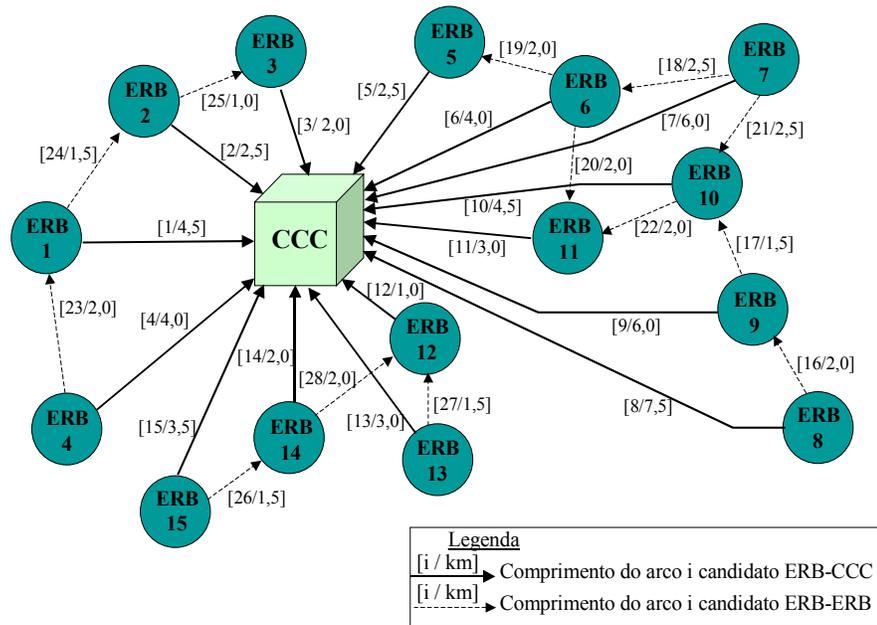


Figura 10.1 – Rede com previsão de 15 ERBs, para aplicação do método heurístico.

No estudo, o atendimento pode ser realizado por equipamentos das tecnologias *modems* HDSL (que usam cobre em topologia estrela simples), *modems* ópticos (sistemas ópticos sob a topologia estrela simples e/ou estrela dupla e/ou rota), além de equipamentos rádio microondas (que podem ser configurados com as mesmas topologias dos sistemas óticos). São mantidas as premissas de planejamento adotadas na Seção 6.3. A capacidade, expressa em canais E1, e demais características destes equipamentos, estão na Tabela 10.1. A referência de custo (1,00) é o par de *modems* HDSL 1xE1.

Várias configurações de rede existente podem ser contempladas, porém nesta etapa do trabalho estas mudanças não são o foco da análise técnico-econômica. Portanto, durante todo o processo de avaliação que se segue é admitida uma única

configuração de rede: para todos os arcos candidatados pelo planejador (Figura 10.1) apenas os dutos necessários aos sistemas HDSL e aos *modems* ópticos estão disponíveis, sem custo de implantação.

Tabela 10.1 - Informações sobre as tecnologias.

Sistema candidato	Custos					
	Equipamentos				Infra-estrutura (km)	
	1xE1	2xE1	4xE1	8xE1	Dutos	Cabos
HDSL	1,00	-	-	-	4,17	4,30
Óptico	1,00	1,50	1,75	2,00	5,00	3,80
Rádio	-	8,50	13,50	20,00	0	0

Dois serviços (hipotéticos) com taxa de transmissão simétrica são previstos para serem oferecidos pelo sistema: um a 64 Kbps e outro a 144 Kbps. Ambos exigem comutação por circuito.

10.3 – Cenários de Demanda Imprecisa Avaliados

O planejamento é realizado sob duas condições de previsão de demanda imprecisa:

10.3.1 – Cenário 1: Análise Técnico-econômica – 5 ERBs “Imprecisas”

A análise técnico-econômica tem por objetivo avaliar estrategicamente o comportamento de um sistema de acesso que exige, *a priori*, a presença de 10 ERBs com suas demandas perfeitamente definidas. Juntamente com estas ERBs pretende-se estudar a possibilidade de se implantar mais 5 novas ERBs em posições estratégicas dentro do sistema.

A Tabela 10.2 indica as dez ERBs que são obrigadas a fazer parte do sistema de acesso final, e para as quais o planejador tem pleno conhecimento da demanda a ser atendida (total de 255 canais de 64 Kbps para o serviço 1 e 165 canais de 144 Kbps para o serviço 2). As outras cinco ERBs que ainda podem ser interconectadas têm suas demandas representadas através de números *fuzzy* triangulares. Os triângulos são todos simétricos. Na Tabela 10.3 estão os dados a considerar como demanda nestas ERBs. Todos os valores são expressos em número de canais de cada serviço.

A receita unitária (em valor relativo) de cada serviço é perfeitamente conhecida e encontra-se no final da Tabela 10.2. Como se trata de um planejamento estratégico

que avalia uma possibilidade de expansão, a exigência de atendimento encontra-se apenas para aquelas ERBs que possuem a obrigatoriedade de fazer parte do sistema final. A escolha (ou não) das outras depende do que o orçamento é capaz de suportar, caso seja viável.

Tabela 10.2 - ERBs com demandas precisas.

ERB	Demanda (em número de canais)	
	Serviço 1	Serviço 2
2	32	16
3	20	13
4	24	17
5	24	20
6	30	20
9	27	15
10	30	15
12	23	17
13	25	15
15	20	17
Total	255	165
Receita	0,1	0,2

Tabela 10.3 - ERBs com demandas imprecisas.

ERB	Demanda (em número de canais)					
	Serviço 1			Serviço 2		
	\underline{d}_{si}	D_{si}	\bar{d}_{si}	\underline{d}_{si}	D_{si}	\bar{d}_{si}
1	11	18	25	7	13	19
7	18	26	34	6	10	14
8	9	14	19	5	9	13
11	11	20	29	6	10	14
14	7	16	25	4	8	12
Total	56	94	132	28	50	72

10.3.2 – Cenário 2: Avaliação de Desempenho do Método Heurístico – 15 ERBs “Imprecisas”

O objetivo aqui é avaliar o impacto que algumas mudanças nas instâncias e nos parâmetros do método heurístico causam no processo de resolução. Destacam-se:

Modificações na instância

São feitas mudanças na quantidade de ERBs que apresentam demanda imprecisa. A análise começa com as cinco ERBs do cenário anterior e prossegue até atingir todas as outras, sendo acrescentadas uma a uma, obedecendo a numeração

indicada na Tabela 10.4. Os triângulos de demanda são todos simétricos e idênticos ao cenário de demanda avaliado na Seção 8.3.2.

Tabela 10.4 - Dados de demanda imprecisa em todas as ERBs.

ERB	Demanda (em número de canais)					
	Serviço 1			Serviço 2		
	\underline{d}_{si}	D_{si}	\bar{d}_{si}	\underline{d}_{si}	D_{si}	\bar{d}_{si}
1	11	18	25	7	13	19
2	10	21	32	6	11	16
3	10	15	20	5	9	13
4	8	16	24	7	12	17
5	12	18	24	10	15	20
6	16	23	30	4	12	20
7	18	26	34	6	10	14
8	9	14	19	5	9	13
9	13	20	27	7	11	15
10	18	24	30	9	12	15
11	11	20	29	6	10	14
12	13	18	23	7	12	17
13	13	19	25	5	10	15
14	7	16	25	4	8	12
15	8	14	20	11	14	17
Total	177	282	387	99	168	237
Atendimento mínimo (%)	50		50			
Receita	0,1		0,2			

Modificações nos parâmetros do algoritmo

A análise é guiada pela previsão imprecisa de demanda em todos os nós de acesso (Tabela 10.4). Utilização de “*limite inferior*” no algoritmo *branch-and-bound* e de limite para a diferença de receita (*gap de receita*) entre soluções adjacentes ($P_{\alpha_{ce}} - P_{\alpha_c}$ ou $P_{\alpha_c} - P_{\alpha_{cd}}$) são os parâmetros estudados.

Embora não seja parte integrante do método heurístico proposto nesta tese, a direção de busca do algoritmo *branch-and-bound* também é objeto de avaliação. Conforme foi implementado no *solver* adotado, este parâmetro pode influenciar o processo de resolução dos problemas PLIM tratados.

A receita unitária (valor relativo) de cada serviço e o atendimento mínimo obrigatório (%) são perfeitamente conhecidos e estão listados no final da Tabela 10.4. O orçamento é mantido fixo durante todo o intervalo de análise.

Nos dois cenários avaliados (10.3.1 e 10.3.2), o parâmetro de confiabilidade α , de cada serviço, é mantido o mesmo para todas as ERBs que possuem imprecisão de

demanda. Ele faz parte do processo de decisão e é uma variável real, bem como todas as que gerenciam o fluxo de usuários pelos arcos da rede. Naturalmente, as configurações de atendimento escolhidas pelo método heurístico podem gerar valores de demanda não necessariamente inteiros. Conforme mencionado anteriormente, isto não é um problema sério, visto que se está na etapa de planejamento e existem muitos dados imprecisos.

Todos os equipamentos oferecidos como candidatos em cada nó de acesso têm capacidades compatíveis com os níveis de demanda mostrados nas tabelas de previsões.

10.4 – Análise dos Resultados

Todos os experimentos computacionais foram realizados em uma máquina *Sun Workstation Ultra-1* com sistema operacional SunOS 5.7. O método heurístico e as instâncias foram implementados em linguagem C. As soluções dos PLIMs e PLs, sempre que necessárias, foram obtidas através de “chamadas” ao *solver* CPLEX®.

Embora o método heurístico discutido no Capítulo 9 possa ser utilizado para avaliar todo o intervalo de variação de demanda indicado nas Tabelas 10.3 e 10.4, nas análises que se seguem sua aplicação fica restrita ao intervalo $[D_{si}, \bar{d}_{si}]$, resultante da modelagem da demanda *fuzzy* presente no PLIM (Capítulo 7). Os procedimentos para calcular os limitantes inferior (demanda prevista= \underline{d}_{si}) e superior (demanda prevista= \bar{d}_{si}) para o orçamento são idênticos aos que já foram feitos no Capítulo 8 e não serão retomados novamente.

10.4.1 – Cenário 1 – 5 ERBs “Imprecisas”

Alguns dos resultados aqui apresentados provêm de DeSousa et alii (2004b).

A configuração de atendimento mais econômica, capaz de interconectar as 10 ERBs que exigem atendimento pleno da demanda, é a que está indicada na Figura 10.2. Ela foi obtida aplicando-se o critério de minimização de custo descrito no Capítulo 5. Esta rede gera 58,50 unidades de receita e exige um orçamento de 110,90 unidades de custo. Se o planejador não dispender ao menos esta quantia, certamente haverá repressão de demanda, independente de seu valor efetivo.

A tecnologia óptica é predominante, atendendo 8 das 10 ERBs previstas. A rede possui topologia mista. Destacando:

- 4 ERBs são atendidas em estrela simples: 4, 5, 6 e a 15; e
- 6 ERBs formam três configurações tipo rota: 2-3, 9-10 e 13-12.

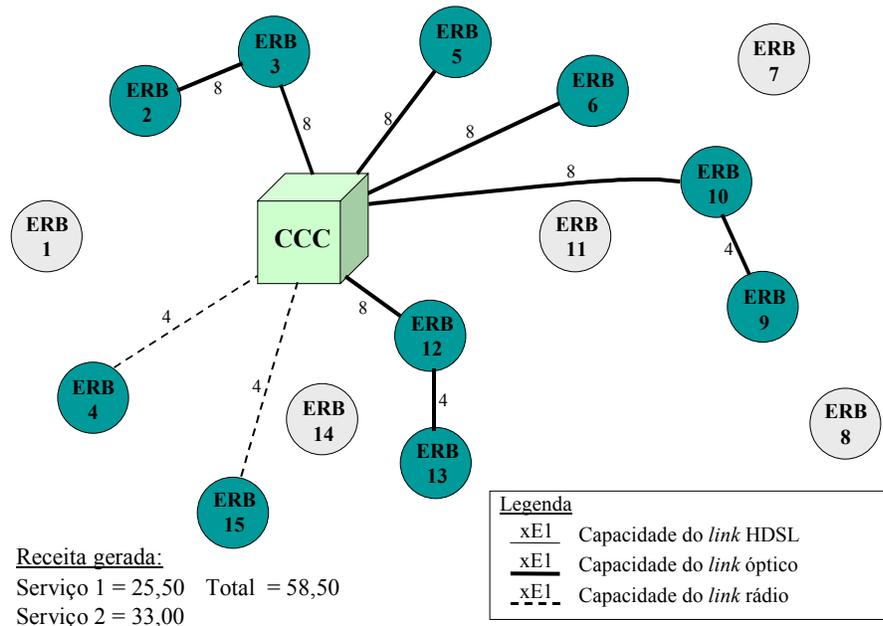


Figura 10.2 - Rede mínima para atender 10 ERBs, com indicação de localização de outras 5.

Partindo do plano da Figura 10.2, considere que seja possível atingir um orçamento de 140,00 unidades de custo. Qual seria a melhor forma de investir esta folga ($140,00 - 110,90 = 29,10$) no orçamento? Quais seriam as mudanças a serem feitas no plano original de forma a agregar mais usuários ao sistema? Este estudo é feito verificando a implantação conjunta de mais 5 novas ERBs, indicadas na Figura 10.2, se o orçamento de 140,00 unidades de custo assim o permitir. Esta estimativa de orçamento é mantida fixa durante todo o restante da análise.

A solução completa (estudo de todo o intervalo $[D_{si}, \bar{d}_{si}]$) exigiu a execução de 12 PLIMs e consumiu 18 minutos e 37 segundos de processamento. Um exemplo de PLIM gerado e resolvido ($P_{a=0}$) durante o processo pode ser visto no Anexo 2. As configurações de rede, em função da confiabilidade α (da maior para a menor), são listadas na Tabela 10.5. Ela mostra a “classificação das soluções” e indica, para cada uma delas, a sua capacidade total e o valor de α para o qual o PLIM definiu a sua configuração de atendimento. Cada arco escolhido (variável na solução=1) é formado pela tríade: **TECNOLOGIAarco_capacidade** (Z010_8, por exemplo, significa que foi

alocado um sistema de *modems* ópticos para o arco de número 10, com capacidade de 8 canais E1), onde a numeração dos arcos obedece àquela apresentada na Figura 10.1.

Tabela 10.5 - Soluções de rede para o cenário 10.4.1 (5 ERBs imprecisas).

Intervalo de α	PLIM	Configuração da rede							Cap. total
[1,000; 0,653]	0,653	Z026_4	Z027_4	Z003_8	Z005_8	Z010_8	Z011_8	Z012_8	88xE1
		Z014_8	Z017_8	Z020_8	Z025_8	W001_2	W007_2	W004_4	
[0,653; 0,306]	0,306	Z019_4	Z023_4	Z026_4	Z027_4	Z001_8	Z003_8	Z005_8	86xE1
		Z011_8	Z012_8	Z014_8	Z022_8	Z025_8	W006_2	W009_4	
[0,306; 0,228]	0,306	Z019_4	Z023_4	Z026_4	Z027_4	Z001_8	Z003_8	Z005_8	86xE1
	*	Z011_8	Z012_8	Z014_8	Z022_8	Z025_8	W006_2	W009_4	
		ou							
	0,228	Z023_4	Z026_4	Z027_4	Z001_8	Z003_8	Z005_8	Z006_8	88xE1
	*	Z011_8	Z012_8	Z014_8	Z022_8	Z025_8	W009_4		
[0,228; 0,227]	0,228	Z023_4	Z026_4	Z027_4	Z001_8	Z003_8	Z005_8	Z006_8	88xE1
		Z011_8	Z012_8	Z014_8	Z022_8	Z025_8	W009_4		
[0,227; 0,000]	0,225	Z026_4	Z027_4	Z003_8	Z005_8	Z011_8	Z012_8	Z014_8	86xE1
	*	Z019_8	Z022_8	Z025_8	W005_2	W004_4	W007_4	W009_4	
		ou							
	0,000	Z026_4	Z027_4	Z003_8	Z005_8	Z006_8	Z011_8	Z012_8	84xE1
	*	Z014_8	Z022_8	Z025_8	W004_4	W007_4	W009_4		
		ou							
	0,114	Z019_4	Z026_4	Z027_4	Z003_8	Z005_8	Z011_8	Z012_8	82xE1
	*	Z014_8	Z022_8	Z025_8	W006_2	W004_4	W007_4	W009_4	
		ou							
	0,200	Z026_4	Z027_4	Z003_8	Z005_8	Z011_8	Z012_8	Z014_8	86xE1
	*	Z019_8	Z022_8	Z025_8	W006_2	W004_4	W007_4	W009_4	

* Soluções múltiplas

X=HDSL

Y=Óptica

Z=Rádio

Além dos indicados na Tabela 10.5, foram resolvidos PLIMs também para os seguintes valores de α : 1,000, 0,171, 0,215, 0,222 e 0,227.

À medida que o valor de α vai de 1 para 0 (diminui o grau de confiança nos dados de demanda ou; equivalentemente, aumenta a demanda prevista nas ERBs imprecisas) podem ser encontradas até sete mudanças na topologia do sistema. Isto vai depender das escolhas do planejador, uma vez que o método heurístico indica dois subintervalos para α ([0,306; 0,228] e [0,227; 0,000]) onde se tem soluções múltiplas, aquelas com redes diferentes, mas que apresentam o mesmo comportamento de receita. Em todas as soluções encontradas, pode-se observar que a tecnologia óptica atende a maioria dos nós, entre 71% (10/14) e 92% (12/13).

As soluções indicam a variedade de respostas que o método heurístico é capaz de gerar. Uma “*classificação de redes*” é disponibilizada ao planejador, que tem a oportunidade de escolher a mais apropriada, de acordo com a sua confiança nos dados de demanda imprecisa.

Admitindo-se como critério de decisão entre soluções múltiplas a preferência por redes de maior capacidade total, as redes dimensionadas para $\alpha=0,653$, $\alpha=0,306$, $\alpha=0,228$ e $\alpha=0,225$ são as melhores opções de atendimento. Estes sistemas estão detalhados nas Figuras 10.3 a 10.6, respectivamente. A receita apresentada em cada uma destas figuras significa o atendimento máximo da rede dentro do intervalo de demanda para o qual ela foi dimensionada. Na verdade, devido à característica modular dos equipamentos, as redes apresentam folgas que poderiam aumentar a receita gerada em pontos estratégicos dentro do sistema, sem acréscimo no orçamento previsto.

Ao comparar a capacidade das redes na Tabela 10.5 deve-se fazer a seguinte ponderação: a capacidade total do sistema dimensionado para $\alpha=0,653$, por exemplo, é maior que a do sistema obtido com $\alpha=0,000$, porém a primeira rede não é capaz de atender a configuração de demanda prevista com $\alpha=0,000$. O fato é que o sistema pode ter uma capacidade total maior mas apresentar enlaces de baixa taxa de transmissão, que não sejam capazes de suportar um pequeno acréscimo de demanda. Este fato pode ser observado nos enlaces que utilizam rádio microondas W001_2 e W007_2.

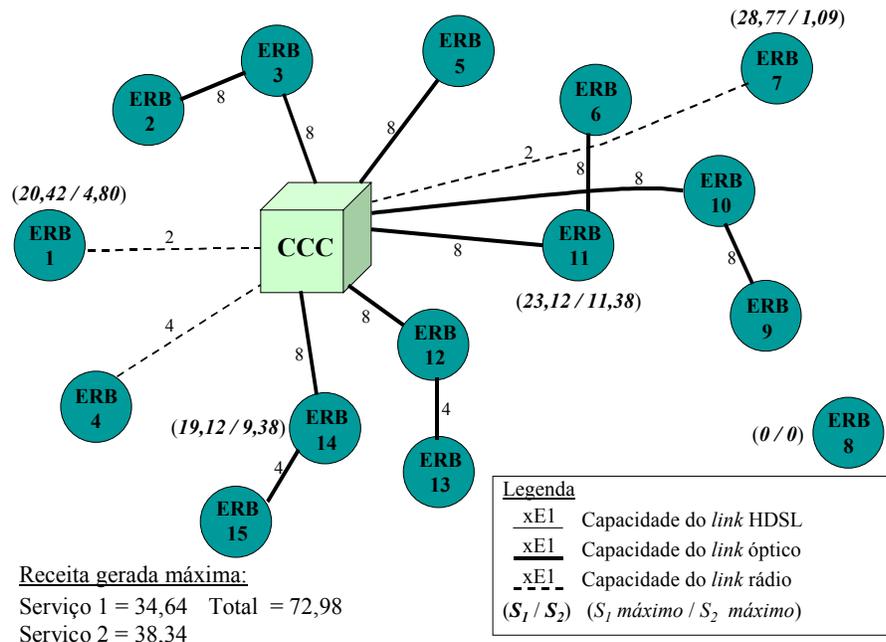


Figura 10.3 - Configuração da rede para $\alpha \in [1,000; 0,653]$ - maior possibilidade de ocorrência.

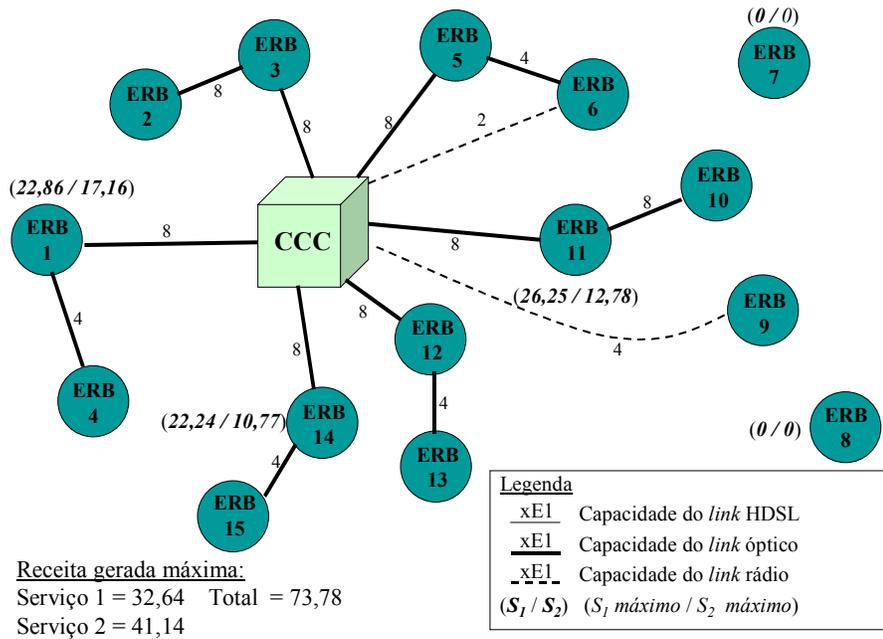


Figura 10.4 - Configuração da rede para $\alpha \in [0,653; 0,306]$.

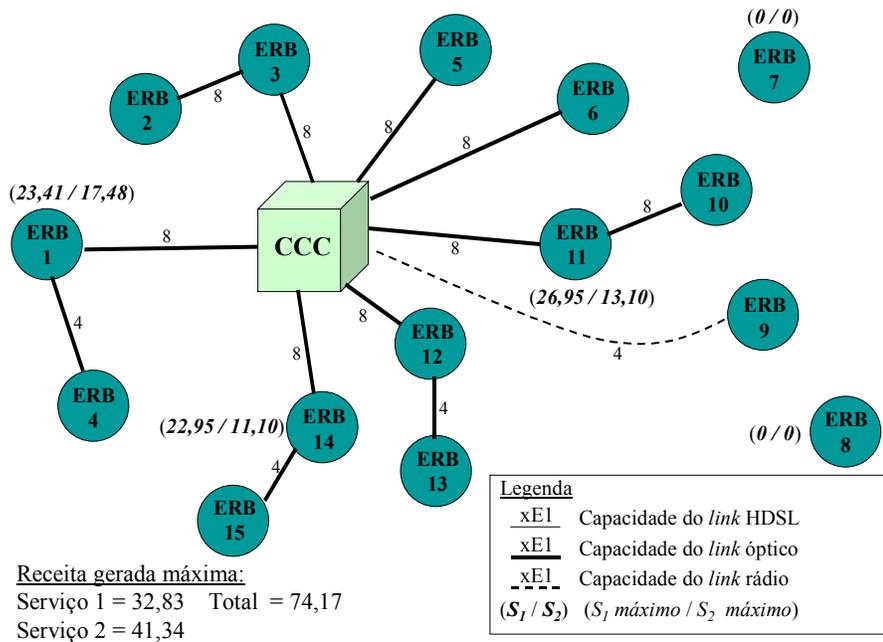


Figura 10.5 - Configuração da rede para $\alpha \in [0,306; 0,227]$.

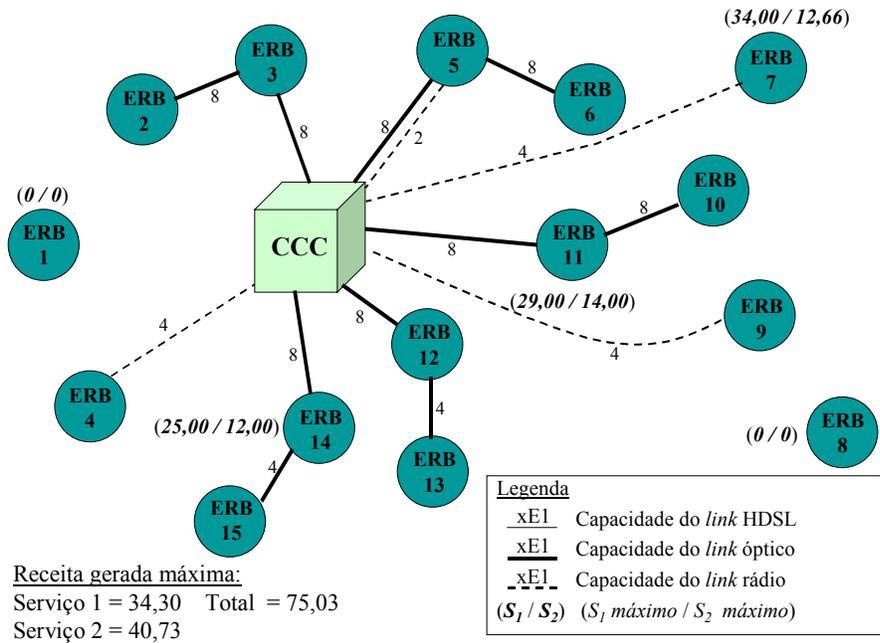


Figura 10.6 - Configuração da rede para $\alpha \in [0,227; 0,000]$ –menor possibilidade de ocorrência.

A rede escolhida para a configuração de demanda com maior possibilidade de ocorrência (Figura 10.3, para $\alpha=1,000$) adiciona as ERBs 11 e 14 como pontos de concentração de demanda de outras ERBs (6 e 15, respectivamente) formando, assim, mais duas novas oportunidades de rota em relação ao sistema originalmente dimensionado para as 10 ERBs (Figura 10.2). As ERBs 1 e 7 foram interconectadas ao sistema através de enlaces de microondas em baixa capacidade ($2x\overline{E}1$). Do ponto de vista de receita, a ERB 8 mostrou-se pouca atrativa tendo sua demanda totalmente penalizada.

Outro fato importante que também deve ser observado é quanto às escolhas feitas devido ao critério de maximização de receita. A ERB 9, por exemplo, teve sua demanda total ($27 \times 0,064 + 15 \times 0,144 = 3,89$ Mbps) atendida na Figura 10.3 por um sistema ótico de capacidade $8x\overline{E}1$, sendo que um sistema $4x\overline{E}1$ seria o suficiente. Por que isto acontece? O objetivo é atender o máximo de usuários; desta forma o modelo tenta alocar o máximo de capacidade possível, respeitando o orçamento e as restrições técnicas dos equipamentos. Nesta rede, em particular, o que aconteceu foi que ao escolher um enlace $8x\overline{E}1$ o modelo procurou aproveitar uma folga no orçamento, suficiente para cobrir a diferença entre os sistemas ópticos ($2,00-1,75$) mas incapaz de auxiliar o atendimento de outro nó com demanda reprimida, como por exemplo as ERBs 1 e 7.

Na rede escolhida para atender os níveis de demanda mais elevados (Figura 10.6) é possível observar que o enlace ERB 5 - CCC, que transporta a demanda dos nós 5 e 6, é atendido por dois sistemas distintos: um óptico (8xE1) e outro rádio (2xE1). Esta escolha é fortemente influenciada pela capacidade dos sistemas candidatados. Se a modularidade dos equipamentos fosse elevada em uma hierarquia (16xE1) provavelmente a mudança de topologia seria um pouco mais suave, sem a necessidade de utilizar dois sistemas diferentes para atender um mesmo nó.

Portanto, em condições de planejamento com níveis de demanda acima dos que foram tratados aqui é importante que se fique atento à capacidade dos equipamentos candidatados. Hierarquias incompatíveis com a demanda podem “forçar” o modelo a escolher formas de atendimento em que se tenha que conviver com mais de uma tecnologia em um mesmo enlace. Em termos de operação do sistema, esta pode se tornar uma configuração não muito atraente.

Inspecionando simultaneamente todas as quatro configurações de atendimento (Figuras 10.3 a 10.6), verifica-se que a topologia permanece constante em algumas regiões da rede. É o caso das rotas formadas pelas ERBs 2-3, 13-12 e 15-14. Com α a partir de 0,653 esta característica também é observada para as ERBs 9 e 10-11.

As principais modificações são causadas pelas ERBs 1 e 7. Na busca da máxima receita, acomodar (ou não) os clientes previstos para estas ERBs exige modificações na forma de atendimento das ERBs vizinhas. A ERB 8 mostrou-se inviável durante toda a análise.

A Figura 10.7 mostra a evolução da receita de acordo com a variação de α . Como esperado, a receita gerada é uma função linear por partes e cresce à medida que α se aproxima de 0. Isto se deve à adição incremental de demanda nas ERBs imprecisas. A solução apresenta uma “descontinuidade de receita” em $\alpha=0,653$, em aproximadamente 1,000 unidade de receita. Esta descontinuidade ocorre porque $\alpha=0,653$ foi escolhido para ser resolvido ($P_{\alpha=0,653}$) a partir de um subintervalo de $[0, 1]$ que apresentou infactibilidade durante a sua análise paramétrica linear (vide Seções 9.4 e 9.5).

Para as situações que têm soluções múltiplas (intervalos $0 \leq \alpha \leq 0,227$ e $0,228 \leq \alpha \leq 0,306$), em que as redes são capazes de gerar o mesmo patamar de receita, a distribuição desta receita entre os serviços pode ser diferenciada, mesmo porque estas redes podem apresentar (e apresentam) topologias de atendimento distintas. As Figuras de rede 10.3 a 10.6, mostradas acima, apresentam dados importantes sobre

esta distribuição. Se o planejador tiver interesse em saber o número máximo de usuários de cada serviço em cada uma das quatro redes, dentro do respectivo intervalo de aplicação, basta dividir a receita gerada máxima pela receita unitária do serviço.

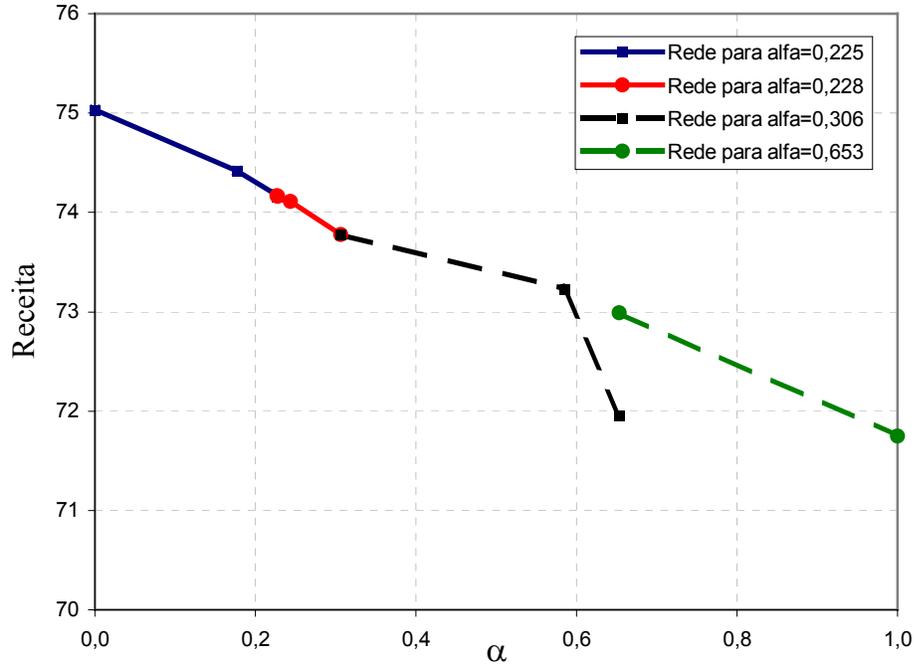


Figura 10.7 - Comportamento da receita x Nível de confiança.

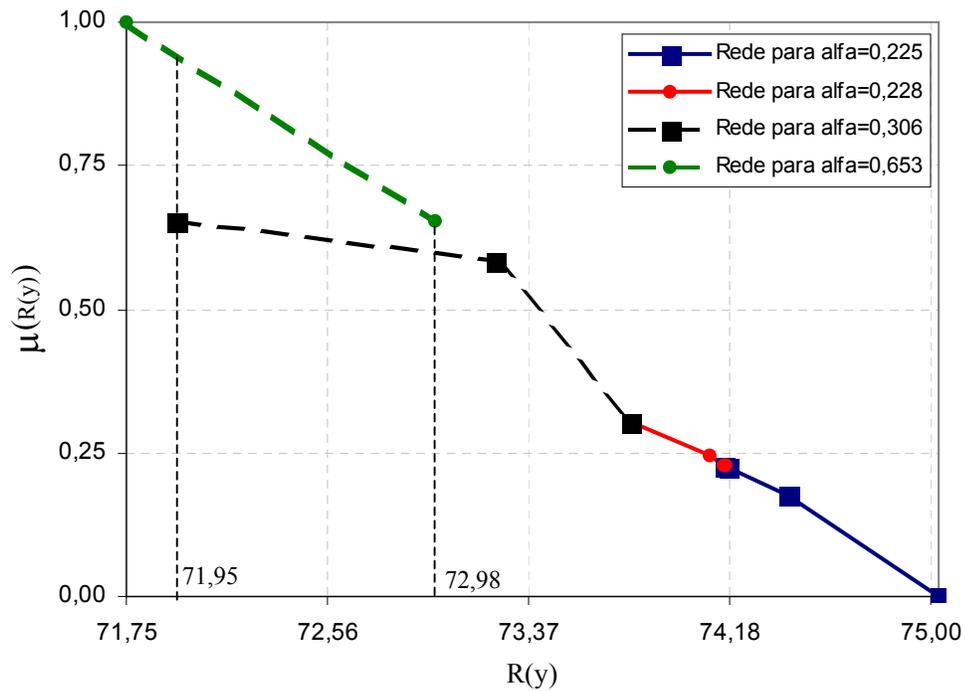


Figura 10.8 - “Função de pertinência” para a receita gerada no intervalo $[D_{si}, \bar{d}_{si}]$.

O comportamento exibido na Figura 10.7 pode ainda ser analisado de outro ponto de vista. Invertendo os eixos do gráfico, obtém-se uma espécie de “função de pertinência” da receita (Figura 10.8). É interessante observar que, no intervalo (71,95 – 72,98), uma solução de rede é dominada pela outra (sob o critério de maximização de receita).

10.4.2 – Cenário 2 – 15 ERBs “Imprecisas”

Todo o cenário anterior foi resolvido para um único tamanho de instância : 15 ERBs, sendo que 5 delas possuíam previsão de demanda imprecisa. Os parâmetros de controle também foram mantidos fixos durante todo o processo de resolução. Os principais, e seus respectivos valores, foram:

- *limite inferior* usado na resolução de $P_{\alpha_c} = Z(\alpha_{cd})$;
- valor absoluto do *gap de receita* entre soluções de rede adjacentes = 0.

O caminho de busca feito pelo algoritmo *branch-and-bound* influencia o processo de resolução dos PLIMs e, apesar de não ser (diretamente) parte integrante do algoritmo proposto, também precisa ser avaliado. No *solver* CPLEX[®], este controle é feito através de um parâmetro chamado “*backtracking tolerance*” que pode assumir valores entre 0 e 1. As escolhas próximas de 0 privilegiam uma busca mais em largura, enquanto valores próximos de 1 favorecem uma busca mais em profundidade. O valor padrão e que foi mantido no cenário anterior é 0,010.

Nesta seção é avaliada a influência destes parâmetros durante o processo de aplicação do algoritmo. Esta estratégia permite observar outros aspectos do funcionamento do algoritmo, tais como tempo de processamento, o número de PLIMs resolvidos, a quantidade de decisões tomadas e o número de subintervalos de α avaliados.

Impacto do número de nós de acesso com demanda imprecisa

Foram elaborados e resolvidos 11 problemas de planejamento para a infraestrutura do sistema de acesso móvel celular. A diferença entre eles está na quantidade de ERBs que apresentam demanda imprecisa. O grupo de ERBs imprecisas em cada problema é definido conforme indicado na Seção 10.3.2. A Tabela 10.6 lista os resultados obtidos.

Em todas as instâncias, os parâmetros de controle foram mantidos fixos e iguais ao cenário 10.4.1, exceto o *gap de receita* que teve seu valor absoluto alterado

para 0,100 (isto pode representar, por exemplo, a diferença de um usuário do serviço 1 entre duas soluções adjacentes).

Tabela 10.6 - Impacto do número de ERBs com demanda imprecisa.

Nº de ERBS imprecisas	Tempo (s)	Nº de PLIMs resolvidos	Nº decisões realizadas			Intervalos avaliados
			Sol. iguais	Sol. múltiplas	Gap receita	
5	14:23	9	2	5	1	8
6	27:38	15	0	8	6	14
7	36:17	16	0	10	5	15
8	34:36	15	2	9	3	14
9	42:56	32	2	20	9	31
10	44:01	29	8	9	11	28
11	50:42	55	8	16	30	54
12	89:05	69	6	16	46	68
13	80:57	83	8	24	50	82
14	125:25	110	2	34	73	109
15	173:15	116	6	30	79	115

O tempo de processamento necessário para obter uma solução completa depende, logicamente, do cenário avaliado. Quanto maior a imprecisão, maior a dificuldade para resolver o problema; conseqüentemente, mais tempo de processamento. Dependendo da instância, este aumento pode chegar a quase 100% (de 5 para 6 ERBs).

Pelos dados obtidos na Tabela 10.6, nota-se também a importância de utilizar um *gap de receita* no processo de decisão. A partir de 11 ERBs imprecisas o número de decisões tomadas devido a este parâmetro chega a superar a quantidade de decisões feitas segundo as condições de redes iguais ou múltiplas. A análise ficaria mais acurada se o *gap de receita* não fosse utilizado (conforme feito na Seção 10.4.1), mas o comprometimento do tempo computacional não justifica tal atitude. Além do mais, mesmo que o ambiente em análise apresente vários dados imprecisos, o método continua sendo capaz de disponibilizar soluções de rede que, se não são iguais dentro do intervalo em análise, pelo menos garantem patamares de receita muito próximos.

Impacto das mudanças nos parâmetros de controle

Uma única instância foi avaliada neste caso: 15 ERBs com demanda imprecisa, conforme os dados de demanda indicados na Tabela 10.4 (Seção 10.3.2). As Tabelas 10.7a e 10.7b mostram os resultados obtidos quando não se usa o “*limite inferior*” no processo de resolução. As Tabelas 10.8a e 10.8b mostram os mesmos resultados ao se admitir a utilização de “*limite inferior*”. Em cada uma das situações, a instância foi resolvida de 9 maneiras diferentes, conforme a combinação dos dados considerados

para os parâmetros *gap* absoluto de receita e *backtracking* (que influencia a direção de busca do algoritmo *branch-and-bound*).

Tabela 10.7a - Desempenho computacional sem o uso de “*limite inferior*”.

Parâmetros		Tempo (s)	Nº de PLIMs resolvidos
<i>Gap de receita</i>	<i>BackTracking</i>		
0,5	0,01	64:10	42
1,0	0,01	42:52	28
1,5	0,01	29:14	19
0,5	0,50	78:06	35
1,0	0,50	64:18	25
1,5	0,50	23:37	19
0,5	1,00	42:07	33
1,0	1,00	32:05	24
1,5	1,00	24:52	19

Tabela 10.7b - Decisões realizadas sem o uso de “*limite inferior*”.

Parâmetros		Nº de decisões realizadas			
<i>Gap de receita</i>	<i>BackTracking</i>	Sol. iguais	Sol.múltiplas	<i>Gap receita</i>	Intervalos
0,5	0,01	0	11	30	41
1,0	0,01	0	7	20	27
1,5	0,01	0	4	14	18
0,5	0,50	2	13	19	34
1,0	0,50	2	8	14	24
1,5	0,50	0	3	15	18
0,5	1,00	2	8	22	32
1,0	1,00	2	5	16	23
1,5	1,00	2	4	12	18

Tabela 10.8a - Desempenho computacional com o uso de “*limite inferior*”.

Parâmetros		Tempo (s)	Nº de PLIMs resolvidos
<i>Gap de receita</i>	<i>BackTracking</i>		
0,5	0,01	53:10	40
1,0	0,01	35:57	26
1,5	0,01	25:51	18
0,5	0,50	58:48	43
1,0	0,50	40:39	30
1,5	0,50	29:07	20
0,5	1,00	48:42	39
1,0	1,00	33:49	26
1,5	1,00	19:25	14

Tabela 10.8b - Decisões realizadas com o uso de “*limite inferior*”.

Parâmetros		Nº de decisões realizadas			
<i>Gap de receita</i>	<i>BackTracking</i>	Sol. iguais	Sol.múltiplas	<i>Gap receita</i>	Intervalos
0,5	0,01	0	16	23	39
1,0	0,01	0	9	16	25
1,5	0,01	0	6	11	17
0,5	0,50	4	10	28	42
1,0	0,50	2	6	21	29
1,5	0,50	0	3	16	19
0,5	1,00	2	9	27	38
1,0	1,00	2	4	19	25
1,5	1,00	2	2	9	13

Pode-se observar que o *gap de receita* é responsável pela maioria das decisões tomadas durante o processo de resolução de problemas com grande quantidade de nós com demanda imprecisa. Neste estudo em particular, sua participação na definição da rede escolhida ficou entre 55,9% (19/34, Tabela 10.7b) e 84,2% (16/19, Tabela 10.8b) dos intervalos avaliados.

A quantidade de intervalos definidos a partir de soluções de redes iguais foi muito baixa. Isto de certo modo já era esperado, devido à grande quantidade de ERBs imprecisas. Embora não esteja explicitado nas tabelas, quando o subintervalo de α , que está sendo avaliado, é pequeno e os valores de receita gerada para duas soluções adjacentes também estão próximos, geralmente estas soluções apresentam pequenas mudanças na topologia de suas redes, ou seja, o número de variáveis binárias diferentes entre elas é baixíssimo, quase sempre em torno de 1 ou 2.

Isto significa que a diferença entre essas redes, na maioria das vezes, é basicamente de:

1 variável binária: um enlace a mais que foi escolhido;

2 variáveis binárias: uma mudança de hierarquia em um mesmo enlace; ou, uma mudança de tecnologia em um mesmo enlace; ou, a escolha de dois enlaces distintos.

Esta característica é um indicativo de melhoria que pode ser acrescentada ao processo. Um subintervalo de α , em que as soluções de rede em seus extremos possuam no máximo duas variáveis binárias diferentes, poderia ser avaliado fixando-se a topologia que as duas redes possuem em comum.

A configuração do *branch-and-bound* privilegiando a busca em profundidade (*backtracking* próximo de 1) foi a que se mostrou mais eficiente. Na maioria das análises, para um mesmo *gap de receita*, a busca em profundidade permitiu a avaliação de um menor número de subintervalos para α (nos piores casos, houve igualdade), exigindo os menores tempos de processamento.

Inspecionando simultaneamente as Tabelas 10.7a e 10.8a, os resultados mostram que em 66,6% (6/9) das análises a utilização de “*limite inferior*” permitiu reduzir o tempo de processamento. A sua utilização ficou comprometida apenas em algumas das situações em que se privilegia a busca em profundidade no algoritmo *branch-and-bound*.

10.5 – Comentários Adicionais

Neste capítulo foram apresentados os resultados computacionais do método heurístico discutido no Capítulo 9 para resolver o modelo PLIM com números *fuzzy*, o qual é capaz de admitir dados imprecisos para os níveis de demanda prevista. A infraestrutura do sistema de acesso móvel celular, que admite uma grande variedade de sistemas de transmissão e serviços, foi focalizada.

O algoritmo utilizado para desempenhar a análise paramétrica, que é complexa quando existem variáveis binárias no problema, mostrou-se viável computacionalmente. Ele possibilita ao planejador, além do que já foi apresentado nos Capítulos 7 e 8, avaliar o dimensionamento das suas redes de forma contínua dentro do intervalo de imprecisão. O tempo de processamento exigido é aceitável para uma etapa de planejamento.

Alguns dos fatores que influenciam a performance do algoritmo, quer relacionados à plataforma computacional e de software adotada, quer incluídos nos passos do próprio algoritmo, foram investigados. Concluiu-se que tanto a escolha da estratégia de enumeração implícita adotada pelo *solver* como, principalmente, a redução do espaço de busca por meio de tolerâncias são importantes para obter resultados com menor número de problemas resolvidos.

A dimensão dos problemas e os intervalos de variação de demanda adotados também são fatores relevantes para o processo de decisão. Para o padrão de problemas avaliados, a possibilidade de se obter uma solução de rede ótima para um α_1 qualquer, encontrar outra solução de rede ótima para algum valor de $\alpha \in (\alpha_1, \alpha_2)$, e a solução ótima em α_2 reverter à rede obtida em α_1 , é muito pequena. Esta condição confirma a importância de se utilizar o histórico de soluções no processo de decisão.

O algoritmo foi aplicado ao planejamento de uma rede de médio porte (15 ERBs). Nos exemplos, visou-se a maximização da receita, embora a metodologia proposta pudesse ser adaptada para admitir outros critérios. Mostrou-se que o uso de parâmetros permite análises importantes e torna possível prever a variação de custo/receita e mudanças de tecnologia/topologia em função do comportamento da demanda.

Os resultados combinam as tecnologias ópticas e rádio. Com a estrutura de custos adotada, a tecnologia HDSL tornou-se proibitiva. A solução completa

disponibiliza ao planejador uma “*classificação de redes*”, da qual ele é capaz de selecionar aquela(ou aquelas) que atende(m) as suas exigências de fornecimento de serviços e ao mesmo tempo permite vislumbrar outros planos que possibilitam acompanhar a evolução da demanda prevista.

Capítulo 11

CONCLUSÃO

A possibilidade de oferecer novos serviços aos usuários e o surgimento de novas tecnologias são características do atual momento das telecomunicações. Grandes operadores de rede, múltiplos provedores de serviço e uma enorme variedade de fornecedores de equipamentos disputam este mercado. É importante que os sistemas evoluam de maneira sistemática, objetivando uma plataforma cada vez mais capaz de suportar tráfego multimídia e faixa-larga.

O sistema de acesso, por representar o segmento responsável pelo atendimento individual de cada usuário, é o foco imediato destas transformações. Planejar a sua evolução não é uma tarefa simples, principalmente porque um enorme volume de recursos financeiros está envolvido. Dúvidas sobre quais serviços oferecer, bem como sobre as suas rentabilidades, são inevitáveis.

É neste contexto (ambiente competitivo, diversidade tecnológica, serviços diferenciados, necessidade de planejamento estratégico) que se insere o presente trabalho. O objeto de estudo é o sistema de acesso do assinante. A seguir são destacadas algumas das contribuições que julgamos importantes, os resultados mais expressivos e os possíveis caminhos pelos quais a pesquisa pode enveredar em trabalhos futuros.

Na **Parte I**, uma metodologia de planejamento de sistemas multi-serviço faixa-larga é descrita em etapas, enfatizando as principais atividades a serem desenvolvidas pelos planejadores. São discutidas especificações de serviços, tecnologias e configurações de rede. A maximização de receita assume posição de destaque entre os critérios de otimização.

O dimensionamento dos componentes da rede e a configuração de atendimento dos usuários são as atividades mais exploradas. Na busca de um planejamento otimizado, são desenvolvidos modelos matemáticos para auxiliar no processo de decisão. Adotando como ponto de partida um cenário em que todas as informações

são precisas, a **Parte II** descreve uma formulação geral para o problema da evolução da rede para uma plataforma multi-serviço. A rede é vista como um grafo e a modelagem de maximização de receita é traduzida como um problema de programação linear inteira mista, o qual obedece restrições de capacidade e de orçamento.

Variantes do modelo geral também são discutidas, de maneira a adequá-lo a situações diversas de planejamento, particularmente àquelas que se referem ao tipo de rede a ser avaliada e aos serviços a serem oferecidos. A avaliação técnico-econômica é feita para dois padrões de sistema: o de acesso fixo cabeado e o de acesso móvel celular. Em qualquer caso, a rede continua sendo vista como um grafo e o modelo matemático é do tipo linear misto. As variáveis de decisão ajudam a alocar e dimensionar os equipamentos, bem como a definir o fluxo de demanda dentro do sistema.

O objetivo primeiro de um planejamento estratégico é o estabelecimento de uma vantagem competitiva e sustentável em um ambiente oferta-procura onde a relação operadora-cliente é, geralmente, instável. Destaca-se a dificuldade de se definir, por exemplo, o grau de aceitação de um novo serviço. Pressupondo que existe imprecisão sobre os dados necessários ao planejamento, os modelos são modificados. A **Parte III** é responsável por estas adaptações. A imprecisão sobre os dados de demanda é abordada por meio de conjuntos nebulosos (*fuzzy sets*). Algumas metodologias de resolução são discutidas e implementadas para resolver os problemas matemáticos, assim modificados pela presença de dados *fuzzy*. Elas se apóiam principalmente no uso de equivalentes paramétricos.

O método de resolução do problema com receita unitária variável é outra contribuição desta tese. O desejo de se alcançar uma metodologia de planejamento que se aproxime ao máximo da realidade que ela pretende retratar faz com que o problema se torne de difícil resolução computacional. A presença de variáveis binárias e a necessidade de realização de análise paramétrica são fatores suficientes para justificar uma proposta de solução heurística. A **Parte IV** descreve esta proposta. A princípio, o método oferece uma “*classificação de boas soluções de rede*” que são geradas a partir de valores pontuais de um parâmetro de controle da demanda. O procedimento de escolha destes valores está apoiado em conceitos de programação linear paramétrica.

A possibilidade de utilização de *solvers* comerciais é outra característica marcante dos algoritmos propostos na **Parte IV** desta tese. Isto se configura como um importante facilitador de sua utilização por parte dos principais interessados: operadores de rede, provedores de serviço e fornecedores de equipamentos.

Considerando o ponto de vista da modelagem, cuja finalidade é auxiliar o planejador ao longo do processo de decisão, verifica-se que a metodologia proposta é capaz de refletir todas as principais situações encontráveis no ambiente das telecomunicações. A flexibilidade quanto a variações nos cenários possíveis de serem contemplados é uma das suas principais virtudes. Podem-se destacar:

- capacidade de reconhecer uma rede existente. Esta é uma característica imprescindível para um eventual planejamento estagiado, onde o dimensionamento dos equipamentos em uma etapa é fortemente dependente da rede dimensionada no estágio anterior;
- inclusão de tecnologias de rede que otimizam a utilização da rede metálica para o provimento de serviços faixa-larga;
- previsão de competição entre as tecnologias (e topologias) mais viáveis para os sistemas de acesso;
- possibilidade de realizar um planejamento multi-serviço;
- possibilidade de atribuir prioridades no atendimento dos serviços;
- flexibilidade de adaptação às novas tecnologias (e topologias) e aos serviços a serem oferecidos;
- alta interatividade. Devido à modelagem de imprecisão, situações de análise de sensibilidade podem ser facilmente geradas pelo planejador;
- eficiência do método heurístico na busca de boas soluções. Assim, o planejador pode variar parâmetros dos modelos matemáticos e da heurística, propor novas topologias candidatas, a fim de obter soluções de rede otimizadas de acordo com as condições que julgar mais interessante;

- possibilidade de um planejamento que permite, ao mesmo tempo, obedecer a restrições de contrato (como por exemplo, o atendimento mínimo de determinado serviço, em uma região em particular da rede) e "visualizar" os cenários mais lucrativos (onde investir e como investir) dentro das suas condições financeiras de investimento.

Todos os modelos desenvolvidos nesta tese são aplicados a sistemas de acesso de médio porte, baseados em dados reais, tanto quanto possível. Nesses exemplos, o acesso fixo cabeado e o acesso móvel celular são planejados em um ambiente onde competem distintas tecnologias e topologias. Avaliam-se diversos serviços (VOZ, RDSI, FLR e FLC, outros), com taxas de transmissão que vão de 64 Kbps a 2 Mbps. As informações sobre os equipamentos também são atuais.

Em relação aos casos aqui tratados, é interessante ressaltar, do ponto de vista tecnológico, as seguintes constatações sobre os resultados obtidos:

Sistema de Acesso Fixo Cabeado:

- o serviço de VOZ, apesar de possuir uma receita unitária baixa, quando comparada aos outros serviços, continua sendo um bom investimento. Isto se deve em boa parte à infra-estrutura metálica já instalada, que disponibiliza este serviço sem gastos adicionais. Contribui também para esta afirmação o fato deste serviço apresentar ainda, dentro de algumas regiões do mercado brasileiro, altos índices de demanda reprimida;
- o serviço faixa-larga comercial (FLC) foi o que se mostrou mais rentável. Em todas os cenários avaliados ele teve atendimento quase que total;
- a infra-estrutura da rede metálica instalada é um fator decisivo para a opticalização da rede. Pôde-se observar que, para se obter uma maior receita, as soluções ópticas dominaram o planejamento em situações de baixa disponibilidade de dutos;
- as soluções ópticas são mais viáveis para o oferecimento dos serviços faixa-larga. Porém, uma vez implantadas, com infra-estrutura pronta, tornam-se boas candidatas ao provimento dos serviços faixa-estreita;

- a queda de preço para os equipamentos eletrônicos, associada às previsões de aumento na demanda por serviços que exigem taxas de transmissão cada vez mais elevadas, proporciona ambientes mais compartilhados, nos quais a fibra está chegando cada vez mais próxima do usuário final.

Sistema de Acesso Móvel Celular:

- a infra-estrutura da rede instalada é um fator decisivo para o dimensionamento do sistema. Pôde-se observar que, para se obter uma maior receita, as soluções utilizando *modems* ópticos dominaram o planejamento em situações de baixa disponibilidade de cabos metálicos;
- à medida que a hierarquia dos equipamentos alocados aumenta, consequência direta de cenários mais otimistas para a demanda, o compartilhamento de recursos torna-se mais acentuado, o que acaba melhorando a relação receita/investimento do sistema;
- em termos de receita gerada, o *controle de demanda por serviço* apresentou-se mais atraente que o *controle de demanda por nó de acesso*. Isto evidencia a necessidade de investimento adicional quando se tem o interesse de se manter um mesmo patamar de receita, porém, com obrigações de atendimento em setores específicos da rede.

Como o mercado de telecomunicações é altamente dinâmico, e às vezes até imprevisível, este trabalho não se esgota aqui. São várias as possibilidades a serem estudadas em trabalhos futuros. Adaptações nos modelos no sentido de incorporar novas tecnologias e serviços parece ser um passo natural. A avaliação técnico-econômica do aluguel de enlaces de rede entre operadoras configura-se também como uma aplicação imediata da metodologia.

Na tentativa de se alcançar um planejamento cada vez mais próximo do ideal, nesta mesma linha de pesquisa direcionada à receita, a possibilidade de maior interesse talvez seja o planejamento orientado ao lucro. Por considerar uma otimização mais realista, também no sentido de avaliar a evolução da rede ao longo do tempo, esta abordagem é consideravelmente mais complicada do que aquela apresentada neste trabalho, e exigirá um planejamento estagiado. Em contrapartida, abre a possibilidade de incorporar à análise técnico-econômica mais alguns conceitos

da engenharia econômica, tais como taxa interna de retorno, fluxo de caixa e tempo de recuperação do investimento.

Ainda na linha de pesquisa orientada à receita, pode-se prever a adaptação dos modelos para contemplar a dependência existente entre a penetração do serviço e o seu custo de implantação: quanto maior a penetração, menor o custo associado por acesso unitário. Outro parâmetro que também precisa ter a sua correlação com a penetração dos serviços melhor avaliada é a própria receita unitária. Uma alternativa seria oferecer um conjunto de regras baseadas em variáveis lingüísticas *fuzzy*, capazes de propor uma receita unitária variável nos moldes daquela indicada no Capítulo 9.

Por sua vez, os próprios métodos a serem adotados na resolução dos modelos apresentados geram grandes oportunidades de pesquisa. Embora os problemas matemáticos associados aos modelos tenham sido resolvidos por *solvers* convencionais (o que é interessante para os planejadores), não se pode desprezar o avanço de novas técnicas de resolução de problemas PLIM. Um indicativo preliminar para esta linha de pesquisa pode ser vista em Machado et alii (2003). Naquele trabalho os autores apresentam uma abordagem de resolução híbrida, apoiada em algoritmos genéticos (Michalewicz et alii, 2000), que foi desenvolvida para o padrão de problemas avaliados nesta tese. Outros algoritmos que fazem uso de metaheurísticas, tais como *simulated annealing* (Aarts e Korts, 1989) ou busca tabu (Glover e Laguna, 1997), também podem ser testados.

Enfim, os resultados obtidos nas quatro partes deste trabalho demonstram bem que os objetivos propostos foram alcançados. Num momento de expressivas mudanças tecnológicas, com imprevisibilidades marcantes em termos de demanda futura, custos e orçamentos, a abordagem multi-serviço utilizando o critério de maximização de receita, acrescido do tratamento *fuzzy* quanto ao cenário mercadológico dos serviços, abre grandes perspectivas. Não se pretende chegar a um planejamento completamente automatizado, mas sim dispor de modelos matemáticos refinados e capazes de fornecer resultados úteis. O papel do planejador é reforçado, sendo possível analisar em detalhe as variantes do problema e estabelecer diretrizes de grande importância para decisões futuras. Estes resultados demonstram também a validade da tese, a qual considera que a metodologia e os modelos propostos devem ocupar um lugar de importância dentre as ferramentas de apoio à decisão aplicadas ao planejamento de sistemas de telecomunicações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aarts e Korts (1989)

Aarts, E. and J. Korts. *Simulated Annealing and the Boltzman Machines*. Wiley, New York, 1989.

Ahuja et alii (1993)

Ahuja, R.K., T.L. Magnanti and J.B. Orlin. *Network Flows: Theory, Algorithms and Applications*. Prentice Hall, Englewood Cliffs (NJ), 1993.

AsGa (2004)

“Especificações Técnicas de Modems Ópticos”. Website do Fabricante AsGa: <http://asga.com.br>, 2004. Última visita em 10/05/2004.

Barradas (1995)

Barradas, O.. *Você e as Telecomunicações*. Interciência, Rio de Janeiro, Brasil, 1995.

Basseto et alii (2000)

Basseto, F., M. A. DeSousa, C. M. F. Carlson, J. R. F. Formigoni and M.A. Bergamaschi.. "Strategic and Technical Planning of Multi-service Access Networks under Max-Revenue Criterion". *Proceedings of 8th International Conference on Telecommunications Systems – Modeling and Analysis (ICTS-MA-2000)*, USA, pp. 472-478.

Basseto et alii (1999)

Basseto, F., M. A. DeSousa, C. M. F. Carlson, J. R. F. Formigoni e E. L. M. Pissolato. "Metodologia de Planejamento de Redes de Acesso com Otimização de Receitas". *Anais do XXXI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional - SOBRAPO'99*, Juiz de Fora, pp. 1572-1584.

Bazaraa et alii (1990)

Bazaraa, M.S., J.J. Jarvis and H.D. Sherali. *Linear Programming and Network Flows*. Wiley, 2nd ed., New York, 1990.

Bergamaschi (2001)

Bergamaschi, M. A.. *Planejamento de Redes de Transmissão SDH dividido em Camadas Funcionais*. Tese de Doutorado, FEEC-UNICAMP, Campinas-SP, 2001.

Bortolan e Degani (1985)

Bortolan, G. and R. Degani. "A Review of Some Methods for Ranking Fuzzy Subsets". *Fuzzy Sets and Systems*, n. 15, pp. 1-19.

Campos e Verdegay (1989)

Campos, L. and J.L. Verdegay. "Linear Programming Problems and Ranking of Fuzzy Numbers". *Fuzzy Sets and Systems*, n. 32, pp. 1-11.

Cantão (2003)

Cantão, L.A.P.. *Programação Não-Linear com Parâmetros Fuzzy: Teoria e Algoritmos*. Tese de Doutorado, FEEC-UNICAMP, Campinas-SP, 2003.

Carlson (1998a)

Carlson, C. M. F.. *Sistemas de Telecomunicações: Planejamento da Rede Externa em Situações de Incerteza*. Tese de Doutorado, FEEC-UNICAMP, Campinas-SP, 1998.

Carlson et alii (1998b)

Carlson, C.M.F., J.R.F. Formigoni and H.M.F. Tavares. "Dealing with Fuzzy Costs in Telecommunications Networks Design". *Procs. of the IEEE International Conference on Fuzzy Systems - FUZZ-IEEE'98*, Anchorage, vol. I, pp. 634-639.

Carlson et alii (1998c)

Carlson, C.M.F., H.M.F. Tavares and J.R.F. Formigoni. "Relating Fuzzy and Interval Approaches to the Access Network Planning under Uncertainty". *Procs. of the IEEE Global Conference on Communications - GLOBECOM'98*, Sidiney, vol. 2, pp. 1071-1076.

CPLEX (1999)

ILOG CPLEX – Versão 6.5. Manual do Usuário, 1999.

Crema (2002a)

Crema, A.. "The Multiparametric 0-1 Integer Linear Programming Problem: A Unified Approach". *European Journal of Operational Research*, n.139, pp. 511-520.

Crema (2002b)

Crema, A.. "An Algorithm to Perform a Complete Parametric Analysis Relative to the Constraint Matrix for a 0-1 Integer Linear Program". *European Journal of Operational Research*, n. 138, pp. 484-494.

Crema (2000)

Crema, A.. “An Algorithm for the Multiparametric 0-1 Integer Linear Programming Problem Relative to the Objective Function”. *European Journal of Operational Research*, n. 125, pp. 18-24.

Crema (1998)

Crema, A.. “A Procedure to Verify the Completeness of the Right-Hand-Side Parametric Analysis for a Mixed Integer Linear Programming Problem”. *European Journal of Operational Research*, n. 108, pp. 684-695.

Delgado et alii (1990)

Delgado, M., J.L. Verdegay and M.A. Vila. “Relating Different Approaches to Solve Linear Programming Problems with Imprecise Costs”. *Fuzzy Sets and Systems*, n. 37, pp. 32-42.

DeSousa et alii (2004a)

DeSousa, M.A., C.M.F. Carlson, J.T. Machado e R.V. Ribeiro. “Uma Abordagem Fuzzy para a Avaliação Técnico-Econômica de Sistemas de Telecomunicações”. *Revista SBA - Controle e Automação* (submetido).

DeSousa et alii (2004b)

DeSousa, M.A., C.M.F. Carlson, J.T. Machado e R.V. Ribeiro. “Planejamento Estratégico de Sistemas de Telecomunicações com Demanda Fuzzy – Uma Solução Paramétrica”. *XV Congresso Brasileiro de Automática-CBA2004*, Gramado-RS (aceito).

DeSousa et alii (2003a)

DeSousa, M.A., J.T. Machado, R.V. Ribeiro e C.M.F Carlson. “Uma proposta de Modelagem Técnico-Econômica para o Planejamento Estratégico de Sistemas de Acesso”. *Anais do XX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações – SBT 2003*, Rio de Janeiro, pp. 834-839.

DeSousa et alii (2003b)

DeSousa, M.A., J.T. Machado, R.V. Ribeiro and C.M.F. Carlson. “A Revenue-Focused Planning Model of Cellular Networks with Imprecise Demand Constraints”. *Procs. of the 7th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics – SCI 2003*, Orlando – USA, vol. IX, pp 320-325.

DeSousa et alii (2001a)

DeSousa, M.A., R.V. Ribeiro, J.T. Machado, C.M.F. Carlson and J.R.F. Formigoni. “Income-oriented Broadband Access Planning with xDSL and

APON-FTTC”. *Proceedings of the Third International Workshop on Design of Reliable Communication Networks (DRCN2001)*, Budapest, pp. 330-337.

DeSousa et alii (2001b)

DeSousa, M.A., M.S. Medrano, J. R. F. Formigoni, C.M.F. Carlson, J.S. Yamamoto, O.C. Branquinho, R.V. Ribeiro and M.A. Bergamaschi. “Cellular Networks Infrastructure: An Optimized Planning”. *Procs. of the 9th International Conference on Telecommunication Systems Modelling and Analysis (ICTS-MA-2001)*, Dallas -USA, pp. 331-340.

DeSousa et alii (2001c)

DeSousa, M.A., J.T. Machado, R.V. Ribeiro and C.M.F. Carlson. “Risk Evaluation in Broadband Telecommunications Planning under Services’ Imprecise Penetration – A Fuzzy Approach”. *Procs. of the 10th IEEE International Conference on Fuzzy Systems – FUZZ-IEEE 2001*, Melbourne, Austrália, vol. II, p#136.

DeSousa e Carlson (2000)

DeSousa, M.A. e C.M.F. Carlson. “Avaliação do Risco Técnico-Econômico no Planejamento da Rede de Acesso Multi-serviço - Uma Abordagem Fuzzy”. *Anais do XIII Congresso Brasileiro de Automática-CBA2000*, Florianópolis-SC, pp. 2192-2197.

DeSousa et alii (2000)

DeSousa, M.A., J.R.F. Formigoni, M.A. Bergamaschi, O.C. Branquinho, J.S. Yamamoto, J.T. Machado e C.M.F. Carlson. “Planejamento Otimizado da Infraestrutura de Rede Celular”. *Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações-SBT2000*. Gramado-RS, p#5140101.

DeSousa (1999a)

DeSousa, M. A.. *Planejamento da Rede de Acesso: Maximização de Receita num Ambiente Multi-serviço*. Dissertação de Mestrado, FEEC-UNICAMP, Campinas-SP, 1999.

DeSousa et alii (1999b)

DeSousa, M.A., C.M.F. Carlson, J.R.F. Formigoni e R.V. Ribeiro. “Planejamento da Rede de Acesso Orientado à Maximização de Receitas”. *Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações – SBT999*. Vila Velha-ES, pp. 389-394.

Ericsson (2004)

“Especificações Técnicas de Sistemas de Rádio Microondas”. *Website* do Fabricante Ericsson: <http://www.ericsson.com/products>, 2004. Última visita em 10/05/2004.

Formigoni et alii (1997)

Formigoni, J. R. F., R.V Ribeiro and H.M.F Tavares. "Optical Access Network: Optimal Deployment". *Proceedings of the 5th International Conference on Telecommunications Systems – Modeling and Analysis (ICTS-MA-1997)*. Nashville, pp. 210-213.

Formigoni (1995a)

Formigoni, J. R. F.. *Rede Externa: Planejamento de Rotas Estratégicas*. Dissertação de Mestrado, FEE-UNICAMP, Campinas-SP, 1995.

Formigoni et alii (1995b)

Formigoni, J. R. F., H.M.F Tavares and R.V Ribeiro. "A Software Planning Tool for a Business Oriented Optical Access Network - PREST". *Proceedings of the IEEE GLOBECOM'95*, Singapura, pp. 1920-1924.

Fourer et alii (1993)

Fourer, R., D.M. Gay and B.W. Kernighan. *AMPL - A Modeling Language for Mathematical Programming*, 1993.

Glover e Laguna (1997]

Glover, F. W. and M. Laguna. *Tabu Search*. Kluwer Academic Publishers, Boston, 1997.

Guerreiro et alii (1985)

Guerreiro, J., A. Magalhães e M. Ramalhete. *Programação Linear – Volume II*. McGraw-Hill, Lisboa, Portugal, 1995.

G.983 (1998)

High Speed Optical Access Systems Based on Passive Optical Network (PON) Techniques. ITU Draft Recommendation G.983, 1998.

Hirschfeld (1998)

Hirschfeld, H.. *Engenharia Econômica e Análise de Custos*. Atlas, 6^a ed., São Paulo, 1998.

Humphrey e Freeman (1997)

Humphrey, M. and J. Freeman. "How xDSL Supports Broadband Services to the Home". *IEEE Network*, January/February, pp. 14-23.

Ims et alii (1997)

Ims, L.A., K. Stordahl and B. T. Olsen. "Risk Analysis of Residential Broadband Upgrade in a Competitive and Changing Market". *IEEE Communications Magazine*, June 1997, pp. 96-103.

Jenkins (1982)

Jenkins, L.. "Parametric Mixed Integer Programming: an Application to Solid Waste Management". *Management Science*, vol. 28, n. 11, pp. 1270-1284.

Kikuchi (2000)

Kikuchi, S.. "A Method to Defuzzify the Fuzzy Number: Transportation Problem Application". *Fuzzy Sets and Systems*, n. 116, pp. 3-9.

Klir e Folger (1992)

Klir, G.J. and T.A. Folger. *Fuzzy Sets, Uncertainty and Information*. Prentice Hall, Singapore, 1992.

Laguna (1998)

Laguna, M.. "Applying Robust Optimization to Capacity Expansion of one Location in Telecommunications with Demand Uncertainty". *Management Science*, n. 44, pp. 5101-5110.

Machado et alii (2003)

Machado, J.T., M.A. DeSousa, C.M.F. Carlson e R.V. Ribeiro. "A Genetic Approach to Equipment Allocation and Topology Choice in Wireless Multi-Service Networks". *Procs. of the 9th International Conference on Computer, Communication and Control Technologies (CCCT-2003)*, Orlando -USA, vol. II, pp. 404-409.

Michalewicz et alii (2000)

Michalewicz, Z., T. Bäck and D.B Fogel. *Evolutionary Computation 1: Algorithms and Operators*. Institute of Physics Publishing, 2000.

Olsen et alii (1996)

Olsen, B.T. et alii.. "Techno-Economic Evaluation of Narrowband and Broadband Access Network Alternatives and Evolution Scenario Assessment". *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, August 1996, vol. 14, n. 6, pp. 1184-1204.

Pedrycs e Gomide (1998)

Pedrycz, W. and F. Gomide. *An Introduction to Fuzzy Sets: Analysis and Design*. MIT Press, Cambridge (MA), 1998.

Sahinidis (2003)

Sahinidis, N.V.. "Optimization under Uncertainty: State-of-the-art and Opportunities". *Computer & Chemical Engineering*, special issue with invited papers from the FOCAPO 2003 meeting.

Sexton e Reid (1997)

Sexton, M. and A. Reid. *Broadband Networking: ATM, SDH and SONET*. Artech House, Boston, 1997.

Siemens (2004)

"Especificações Técnicas de Sistemas de Rádio Microondas". *Website do Fabricante Siemens* : <http://www.siemens.com>, 2004. Última visita em 10/05/2004.

Steuer (1986)

Steuer, R.. *Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation and Application*. Wiley, New York, 1986.

Toledo (2001)

Toledo, A.P.. *Redes de Acesso em Telecomunicações*. Makron Books, São Paulo, 2001.

Waldman e Yacoub (1997)

Waldman, H. e M.D. Yacoub. *Telecomunicações: Princípios e Tendências*. Érica, 1ª ed., São Paulo, 1997.

Yacoub (2001)

Yacoub, M.D. *Wireless Technology: Protocols, Standards and Techniques*. CRC Press, London, 2001.

Anexo 1

PLANILHA DE CUSTOS

SISTEMA DE ACESSO FIXO CABEADO

São listados a seguir os componentes das soluções tecnológicas xDSL e APON-FTTC utilizadas no planejamento do sistema de acesso fixo cabeado. O custo do *modem* ADSL (unidade) é adotado como referência (custo=1,000).

EQUIPAMENTOS

<i>METÁLICA + xDSL</i>	<i>CUSTO</i>
<i>Modems ADSL (par)</i>	2,000
<i>Modems HDSL (par)</i>	2,000
<i>Set-top para ADSL (usuário)</i>	0,350
<i>Interface RDSI (usuário)</i>	0,400

APON-FTTC

<i>OLT (10.000 assinantes faixa-estreita + 2.500 faixa-larga)</i>	231,250
<i>ODNI (622 Mbps downstream / 155 Mbps upstream)</i>	4,000
<i>ONU32 (128 assinantes faixa-estreita + 32 faixa-larga)</i>	1,025
<i>Interface individual para o serviço VOZ (ONU)</i>	0,125
<i>Interface individual para o serviço RDSI (ONU)</i>	0,150
<i>Interface individual para o serviço FLR (ONU)</i>	0,350
<i>Interface individual para o serviço FLC (ONU)</i>	0,350
<i>Set-top digital para o serviço FLR (usuário)</i>	0,350
<i>Interface de dados para o serviço FLC (usuário)</i>	0,350
<i>Interface RDSI (usuário)</i>	0,400
<i>Splitter 1:4</i>	0,068

CABOS (custo por km)

CTS APL 40-400	(metálico - 400 pares)	8,610
CTS APL 40-600	(metálico - 600 pares)	12,540
CTS APL 40-900	(metálico - 900 pares)	16,270
CFOA.SM.APL.G 06	(óptico - 6 fibras)	1,660

INFRA-ESTRUTURA

Canalização urbana completa com 6 dutos (por km)	60,000
Subduto com 4 bocas (por km)	10,000
Armário de distribuição (1650 assinantes)	3,000
Abrigo para o nó de acesso APON-FTTC	8,000

Anexo 2

EXEMPLO DE PLIM-PARAMÉTRICO

A seguir é apresentado um exemplo de PLIM utilizado na análise paramétrica referente a alguns termos independentes das restrições. Mais especificamente, ele se aplica ao planejamento da infra-estrutura do sistema de acesso móvel celular. É adotado o *controle de demanda por serviço* e a imprecisão encontra-se sobre os dados de demanda de 5 ERBs (as de número: 1, 7, 8, 11 e 15, das Figuras 8.17 e 10.1).

Especificações do modelo:

Número de variáveis binárias: $N_Arc \times (N_hdsl + N_opt + N_r\acute{a}dio) = 280$

Número de variáveis reais: $S \times N_A + S + N_Arc + 1 = 61$

onde:

N_Arc : número de arcos candidatos (28);

N_hdsl : número de sistemas de *modems* hdsl candidatos em cada arco (3);

N_opt : número de sistemas de *modems* ópticos candidatos em cada arco (4);

N_r\acute{a}dio : número de sistemas de rádio microondas candidatos em cada arco (3);

S : número de serviços candidatos (2);

N_A : número de nós de acesso do sistema avaliado (15);

Y : fluxo de demanda – variável real;

X : sistemas de *modems* HDSL – variável binária;

Z : sistemas de *modems* ópticos – variável binária;

W : sistemas de radio microondas – variável binária.

Aplicação do modelo:

Capítulo 08: deve-se eliminar a variável α do processo de decisão. Para fazer isto, basta obrigar α a ser igual a um valor fixo. Por exemplo, com $\alpha=1$ configura-se a previsão de demanda mais confiável (\mathbf{D}_{si}).

Capítulo 10: a cada momento que se escolhe um valor de α (α_c), o modelo representa um P_{α_c} a ser resolvido. Após sua resolução, com as suas variáveis binárias fixadas, ele se configura como um PL sobre o qual é possível realizar uma análise paramétrica para $\alpha \in [0, 1]$.

O problema é gerado automaticamente através de um software implementado em linguagem C que recebe todas as informações de rede, tecnologias e serviços e monta o modelo indicado na Figura A2.1, que obedece ao formato .LP requerido pelo *solver* CPLEX.

```

\ Funcao Objetivo de Maximizacao -->>
maximize
objmax:
+0.100Y001+ 0.100Y002+ 0.100Y003+ 0.100Y004+ 0.100Y005+ 0.100Y006+ 0.100Y007
+0.100Y008+ 0.100Y009+ 0.100Y010+ 0.100Y011+ 0.100Y012+ 0.100Y013+ 0.100Y014
+0.100Y015+ 0.200Y016+ 0.200Y017+ 0.200Y018+ 0.200Y019+ 0.200Y020+ 0.200Y021
+0.200Y022+ 0.200Y023+ 0.200Y024+ 0.200Y025+ 0.200Y026+ 0.200Y027+ 0.200Y028
+0.200Y029+ 0.200Y030

subject to

\ Limite de Orcamento = 140.00 -->>
Lorc:
+ 20.350X001_1+ 40.700X001_2+ 81.400X001_4+ 11.750X002_1+ 23.500X002_2
+ 47.000X002_4+ 9.600X003_1+ 19.200X003_2+ 38.400X003_4+ 18.200X004_1
+ 36.400X004_2+ 72.800X004_4+ 11.750X005_1+ 23.500X005_2+ 47.000X005_4
+ 18.200X006_1+ 36.400X006_2+ 72.800X006_4+ 26.800X007_1+ 53.600X007_2
+107.200X007_4+ 33.250X008_1+ 66.500X008_2+ 133.000X008_4+ 26.800X009_1
+ 53.600X009_2+ 107.200X009_4+ 20.350X010_1+ 40.700X010_2+ 81.400X010_4
+ 13.900X011_1+ 27.800X011_2+ 55.600X011_4+ 5.300X012_1+ 10.600X012_2
+ 21.200X012_4+ 13.900X013_1+ 27.800X013_2+ 55.600X013_4+ 9.600X014_1
+ 19.200X014_2+ 38.400X014_4+ 16.050X015_1+ 32.100X015_2+ 64.200X015_4
+ 9.600X016_1+ 19.200X016_2+ 38.400X016_4+ 7.450X017_1+ 14.900X017_2
+ 29.800X017_4+ 11.750X018_1+ 23.500X018_2+ 47.000X018_4+ 9.600X019_1
+ 19.200X019_2+ 38.400X019_4+ 9.600X020_1+ 19.200X020_2+ 38.400X020_4
+ 11.750X021_1+ 23.500X021_2+ 47.000X021_4+ 9.600X022_1+ 19.200X022_2
+ 38.400X022_4+ 9.600X023_1+ 19.200X023_2+ 38.400X023_4+ 7.450X024_1
+ 14.900X024_2+ 29.800X024_4+ 5.300X025_1+ 10.600X025_2+ 21.200X025_4
+ 7.450X026_1+ 14.900X026_2+ 29.800X026_4+ 7.450X027_1+ 14.900X027_2
+ 29.800X027_4+ 9.600X028_1+ 19.200X028_2+ 38.400X028_4+ 18.100Z001_1
+ 10.500Z002_1+ 8.600Z003_1+ 16.200Z004_1+ 10.500Z005_1+ 16.200Z006_1
+ 23.800Z007_1+ 29.500Z008_1+ 23.800Z009_1+ 18.100Z010_1+ 12.400Z011_1
+ 4.800Z012_1+ 12.400Z013_1+ 8.600Z014_1+ 14.300Z015_1+ 8.600Z016_1
+ 6.700Z017_1+ 10.500Z018_1+ 8.600Z019_1+ 8.600Z020_1+ 10.500Z021_1
+ 8.600Z022_1+ 8.600Z023_1+ 6.700Z024_1+ 4.800Z025_1+ 6.700Z026_1
+ 6.700Z027_1+ 8.600Z028_1+ 18.600Z001_2+ 11.000Z002_2+ 9.100Z003_2
+ 16.700Z004_2+ 11.000Z005_2+ 16.700Z006_2+ 24.300Z007_2+ 30.000Z008_2
+ 24.300Z009_2+ 18.600Z010_2+ 12.900Z011_2+ 5.300Z012_2+ 12.900Z013_2
+ 9.100Z014_2+ 14.800Z015_2+ 9.100Z016_2+ 7.200Z017_2+ 11.000Z018_2
+ 9.100Z019_2+ 9.100Z020_2+ 11.000Z021_2+ 9.100Z022_2+ 9.100Z023_2
+ 7.200Z024_2+ 5.300Z025_2+ 7.200Z026_2+ 7.200Z027_2+ 9.100Z028_2
+ 18.850Z001_4+ 11.250Z002_4+ 9.350Z003_4+ 16.950Z004_4+ 11.250Z005_4
+ 16.950Z006_4+ 24.550Z007_4+ 30.250Z008_4+ 24.550Z009_4+ 18.850Z010_4
+ 13.150Z011_4+ 5.550Z012_4+ 13.150Z013_4+ 9.350Z014_4+ 15.050Z015_4
+ 9.350Z016_4+ 7.450Z017_4+ 11.250Z018_4+ 9.350Z019_4+ 9.350Z020_4
+ 11.250Z021_4+ 9.350Z022_4+ 9.350Z023_4+ 7.450Z024_4+ 5.550Z025_4
+ 7.450Z026_4+ 7.450Z027_4+ 9.350Z028_4+ 19.100Z001_8+ 11.500Z002_8
+ 9.600Z003_8+ 17.200Z004_8+ 11.500Z005_8+ 17.200Z006_8+ 24.800Z007_8
+ 30.500Z008_8+ 24.800Z009_8+ 19.100Z010_8+ 13.400Z011_8+ 5.800Z012_8

```

Figura A2.1 - Exemplo de PLIM-paramétrico gerado automaticamente.

```

+ 13.400Z013_8+ 9.600Z014_8+ 15.300Z015_8+ 9.600Z016_8+ 7.700Z017_8
+ 11.500Z018_8+ 9.600Z019_8+ 9.600Z020_8+ 11.500Z021_8+ 9.600Z022_8
+ 9.600Z023_8+ 7.700Z024_8+ 5.800Z025_8+ 7.700Z026_8+ 7.700Z027_8
+ 9.600Z028_8+ 8.500W001_2+ 8.500W002_2+ 8.500W003_2+ 8.500W004_2
+ 8.500W005_2+ 8.500W006_2+ 8.500W007_2+ 8.500W008_2+ 8.500W009_2
+ 8.500W010_2+ 8.500W011_2+ 8.500W012_2+ 8.500W013_2+ 8.500W014_2
+ 8.500W015_2+ 8.500W016_2+ 8.500W017_2+ 8.500W018_2+ 8.500W019_2
+ 8.500W020_2+ 8.500W021_2+ 8.500W022_2+ 8.500W023_2+ 8.500W024_2
+ 8.500W025_2+ 8.500W026_2+ 8.500W027_2+ 8.500W028_2+ 13.500W001_4
+ 13.500W002_4+ 13.500W003_4+ 13.500W004_4+ 13.500W005_4+ 13.500W006_4
+ 13.500W007_4+ 13.500W008_4+ 13.500W009_4+ 13.500W010_4+ 13.500W011_4
+ 13.500W012_4+ 13.500W013_4+ 13.500W014_4+ 13.500W015_4+ 13.500W016_4
+ 13.500W017_4+ 13.500W018_4+ 13.500W019_4+ 13.500W020_4+ 13.500W021_4
+ 13.500W022_4+ 13.500W023_4+ 13.500W024_4+ 13.500W025_4+ 13.500W026_4
+ 13.500W027_4+ 13.500W028_4+ 20.000W001_8+ 20.000W002_8+ 20.000W003_8
+ 20.000W004_8+ 20.000W005_8+ 20.000W006_8+ 20.000W007_8+ 20.000W008_8
+ 20.000W009_8+ 20.000W010_8+ 20.000W011_8+ 20.000W012_8+ 20.000W013_8
+ 20.000W014_8+ 20.000W015_8+ 20.000W016_8+ 20.000W017_8+ 20.000W018_8
+ 20.000W019_8+ 20.000W020_8+ 20.000W021_8+ 20.000W022_8+ 20.000W023_8
+ 20.000W024_8+ 20.000W025_8+ 20.000W026_8+ 20.000W027_8+ 20.000W028_8 <=
140.000000

```

```

\ Balanco nos 02 nos de Servico -->>
Bser001:+Y001+Y002+Y003+Y004+Y005+Y006+Y007+Y008+Y009+Y010+Y011+Y012+Y013
+Y014+Y015+Y031+38.000alfa=387.000000
Bser002:+Y016+Y017+Y018+Y019+Y020+Y021+Y022+Y023+Y024+Y025+Y026+Y027+Y028
+Y029+Y030+Y032+22.000alfa=237.000000

```

```

\ Balanco nos 15 nos de ERB -->>
Berb001:-0.064Y001-0.144Y016+1.000Y033-1.000Y055+1.000Y056=0
Berb002:-0.064Y002-0.144Y017+1.000Y034-1.000Y056+1.000Y057=0
Berb003:-0.064Y003-0.144Y018+1.000Y035-1.000Y057=0
Berb004:-0.064Y004-0.144Y019+1.000Y036+1.000Y055=0
Berb005:-0.064Y005-0.144Y020+1.000Y037-1.000Y051=0
Berb006:-0.064Y006-0.144Y021+1.000Y038-1.000Y050+1.000Y051+1.000Y052=0
Berb007:-0.064Y007-0.144Y022+1.000Y039+1.000Y050+1.000Y053=0
Berb008:-0.064Y008-0.144Y023+1.000Y040+1.000Y048=0
Berb009:-0.064Y009-0.144Y024+1.000Y041-1.000Y048+1.000Y049=0
Berb010:-0.064Y010-0.144Y025+1.000Y042-1.000Y049-1.000Y053+1.000Y054=0
Berb011:-0.064Y011-0.144Y026+1.000Y043-1.000Y052-1.000Y054=0
Berb012:-0.064Y012-0.144Y027+1.000Y044-1.000Y059-1.000Y060=0
Berb013:-0.064Y013-0.144Y028+1.000Y045+1.000Y059=0
Berb014:-0.064Y014-0.144Y029+1.000Y046-1.000Y058+1.000Y060=0
Berb015:-0.064Y015-0.144Y030+1.000Y047+1.000Y058=0

```

```

\ Limite de capacidade dos 15 arcos diretos e dos 13 arcos rota -->>
CAdir001:+ 1Y033-1X001_1-2X001_2-4X001_4-1Z001_1-2Z001_2-4Z001_4-8Z001_8
-2W001_2-4W001_4-8W001_8<=0
CAdir002:+ 1Y034-1X002_1-2X002_2-4X002_4-1Z002_1-2Z002_2-4Z002_4-8Z002_8
-2W002_2-4W002_4-8W002_8<=0
CAdir003:+ 1Y035-1X003_1-2X003_2-4X003_4-1Z003_1-2Z003_2-4Z003_4-8Z003_8
-2W003_2-4W003_4-8W003_8<=0
CAdir004:+ 1Y036-1X004_1-2X004_2-4X004_4-1Z004_1-2Z004_2-4Z004_4-8Z004_8
-2W004_2-4W004_4-8W004_8<=0
CAdir005:+ 1Y037-1X005_1-2X005_2-4X005_4-1Z005_1-2Z005_2-4Z005_4-8Z005_8
-2W005_2-4W005_4-8W005_8<=0

```

Figura A2.1 - Exemplo de PLIM-paramétrico gerado automaticamente.

```

CAdir006:+ 1Y038-1X006_1-2X006_2-4X006_4-1Z006_1-2Z006_2-4Z006_4-8Z006_8
           -2W006_2-4W006_4-8W006_8<=0
CAdir007:+ 1Y039-1X007_1-2X007_2-4X007_4-1Z007_1-2Z007_2-4Z007_4-8Z007_8
           -2W007_2-4W007_4-8W007_8<=0
CAdir008:+ 1Y040-1X008_1-2X008_2-4X008_4-1Z008_1-2Z008_2-4Z008_4-8Z008_8
           -2W008_2-4W008_4-8W008_8<=0
CAdir009:+ 1Y041-1X009_1-2X009_2-4X009_4-1Z009_1-2Z009_2-4Z009_4-8Z009_8
           -2W009_2-4W009_4-8W009_8<=0
CAdir010:+ 1Y042-1X010_1-2X010_2-4X010_4-1Z010_1-2Z010_2-4Z010_4-8Z010_8
           -2W010_2-4W010_4-8W010_8<=0
CAdir011:+ 1Y043-1X011_1-2X011_2-4X011_4-1Z011_1-2Z011_2-4Z011_4-8Z011_8
           -2W011_2-4W011_4-8W011_8<=0
CAdir012:+ 1Y044-1X012_1-2X012_2-4X012_4-1Z012_1-2Z012_2-4Z012_4-8Z012_8
           -2W012_2-4W012_4-8W012_8<=0
CAdir013:+ 1Y045-1X013_1-2X013_2-4X013_4-1Z013_1-2Z013_2-4Z013_4-8Z013_8
           -2W013_2-4W013_4-8W013_8<=0
CAdir014:+ 1Y046-1X014_1-2X014_2-4X014_4-1Z014_1-2Z014_2-4Z014_4-8Z014_8
           -2W014_2-4W014_4-8W014_8<=0
CAdir015:+ 1Y047-1X015_1-2X015_2-4X015_4-1Z015_1-2Z015_2-4Z015_4-8Z015_8
           -2W015_2-4W015_4-8W015_8<=0
CARot016:+ 1Y048-1X016_1-2X016_2-4X016_4-1Z016_1-2Z016_2-4Z016_4-8Z016_8
           -2W016_2-4W016_4-8W016_8<=0
CARot017:+ 1Y049-1X017_1-2X017_2-4X017_4-1Z017_1-2Z017_2-4Z017_4-8Z017_8
           -2W017_2-4W017_4-8W017_8<=0
CARot018:+ 1Y050-1X018_1-2X018_2-4X018_4-1Z018_1-2Z018_2-4Z018_4-8Z018_8
           -2W018_2-4W018_4-8W018_8<=0
CARot019:+ 1Y051-1X019_1-2X019_2-4X019_4-1Z019_1-2Z019_2-4Z019_4-8Z019_8
           -2W019_2-4W019_4-8W019_8<=0
CARot020:+ 1Y052-1X020_1-2X020_2-4X020_4-1Z020_1-2Z020_2-4Z020_4-8Z020_8
           -2W020_2-4W020_4-8W020_8<=0
CARot021:+ 1Y053-1X021_1-2X021_2-4X021_4-1Z021_1-2Z021_2-4Z021_4-8Z021_8
           -2W021_2-4W021_4-8W021_8<=0
CARot022:+ 1Y054-1X022_1-2X022_2-4X022_4-1Z022_1-2Z022_2-4Z022_4-8Z022_8
           -2W022_2-4W022_4-8W022_8<=0
CARot023:+ 1Y055-1X023_1-2X023_2-4X023_4-1Z023_1-2Z023_2-4Z023_4-8Z023_8
           -2W023_2-4W023_4-8W023_8<=0
CARot024:+ 1Y056-1X024_1-2X024_2-4X024_4-1Z024_1-2Z024_2-4Z024_4-8Z024_8
           -2W024_2-4W024_4-8W024_8<=0
CARot025:+ 1Y057-1X025_1-2X025_2-4X025_4-1Z025_1-2Z025_2-4Z025_4-8Z025_8
           -2W025_2-4W025_4-8W025_8<=0
CARot026:+ 1Y058-1X026_1-2X026_2-4X026_4-1Z026_1-2Z026_2-4Z026_4-8Z026_8
           -2W026_2-4W026_4-8W026_8<=0
CARot027:+ 1Y059-1X027_1-2X027_2-4X027_4-1Z027_1-2Z027_2-4Z027_4-8Z027_8
           -2W027_2-4W027_4-8W027_8<=0
CARot028:+ 1Y060-1X028_1-2X028_2-4X028_4-1Z028_1-2Z028_2-4Z028_4-8Z028_8
           -2W028_2-4W028_4-8W028_8<=0

```

```

\ Proibicao de rota com a tecnologia hds1 -->>
ProtH001:+1X001_1+2X001_2+4X001_4+1X024_1+2X024_2+4X024_4-0.064Y001
          -0.144Y016<=0
ProtH002:+1X002_1+2X002_2+4X002_4+1X025_1+2X025_2+4X025_4-0.064Y002
          -0.144Y017<=0
ProtH003:+1X003_1+2X003_2+4X003_4-0.064Y003-0.144Y018<=0
ProtH004:+1X004_1+2X004_2+4X004_4+1X023_1+2X023_2+4X023_4-0.064Y004
          -0.144Y019<=0
ProtH005:+1X005_1+2X005_2+4X005_4-0.064Y005-0.144Y020<=0

```

Figura A2.1 - Exemplo de PLIM-paramétrico gerado automaticamente.

```

Proth006:+1X006_1+2X006_2+4X006_4+1X019_1+2X019_2+4X019_4+1X020_1
          +2X020_2+4X020_4-0.064Y006-0.144Y021<=0
Proth007:+1X007_1+2X007_2+4X007_4+1X018_1+2X018_2+4X018_4+1X021_1
          +2X021_2+4X021_4-0.064Y007-0.144Y022<=0
Proth008:+1X008_1+2X008_2+4X008_4+1X016_1+2X016_2+4X016_4-0.064Y008
          -0.144Y023<=0
Proth009:+1X009_1+2X009_2+4X009_4+1X017_1+2X017_2+4X017_4-0.064Y009
          -0.144Y024<=0
Proth010:+1X010_1+2X010_2+4X010_4+1X022_1+2X022_2+4X022_4-0.064Y010
          -0.144Y025<=0
Proth011:+1X011_1+2X011_2+4X011_4-0.064Y011-0.144Y026<=0
Proth012:+1X012_1+2X012_2+4X012_4-0.064Y012-0.144Y027<=0
Proth013:+1X013_1+2X013_2+4X013_4+1X027_1+2X027_2+4X027_4-0.064Y013
          -0.144Y028<=0
Proth014:+1X014_1+2X014_2+4X014_4+1X028_1+2X028_2+4X028_4-0.064Y014
          -0.144Y029<=0
Proth015:+1X015_1+2X015_2+4X015_4+1X026_1+2X026_2+4X026_4-0.064Y015
          -0.144Y030<=0

```

```
\ Atendimento maximo nos 30 arcos de servico -->>
```

```

Atmax001:Y001+ 7.000alfa <=25.000
Atmax002:Y002=32.000
Atmax003:Y003=20.000
Atmax004:Y004=24.000
Atmax005:Y005=24.000
Atmax006:Y006=30.000
Atmax007:Y007+ 8.000alfa <=34.000
Atmax008:Y008+ 5.000alfa <=19.000
Atmax009:Y009=27.000
Atmax010:Y010=30.000
Atmax011:Y011+ 9.000alfa <=29.000
Atmax012:Y012=23.000
Atmax013:Y013=25.000
Atmax014:Y014+ 9.000alfa <=25.000
Atmax015:Y015=20.000
Atmax016:Y016+ 6.000alfa <=19.000
Atmax017:Y017=16.000
Atmax018:Y018=13.000
Atmax019:Y019=17.000
Atmax020:Y020=20.000
Atmax021:Y021=20.000
Atmax022:Y022+ 4.000alfa <=14.000
Atmax023:Y023+ 4.000alfa <=13.000
Atmax024:Y024=15.000
Atmax025:Y025=15.000
Atmax026:Y026+ 4.000alfa <=14.000
Atmax027:Y027=17.000
Atmax028:Y028=15.000
Atmax029:Y029+ 4.000alfa <=12.000
Atmax030:Y030=17.000

```

```
\ Controle da demanda a ser escoada pelos 02 arcos escape -->>
```

```

EscSV11: Y031 >= 0
EscSV12: Y031+38.000alfa <= 132.000
EscSV21: Y032 >=0
EscSV22: Y032+22.000alfa <= 72.000

```

Figura A2.1 - Exemplo de PLIM-paramétrico gerado automaticamente.

```

BOUNDS
\ Intervalo de variacao permitido para alfa -->>
alfa >= 0
alfa <= 1
\ Limite de distancia da teconologia hds1
\ Variavel `X` anulada para Distancia > 4.0 km -->>
X001_1=0    X001_2=0    X001_4=0    X007_1=0    X007_2=0    X007_4=0
X008_1=0    X008_2=0    X008_4=0    X009_1=0    X009_2=0    X009_4=0
X010_1=0    X010_2=0    X010_4=0
\ Atendimento minimo nos 30 arcos de servico -->>
Y001 >= 0   Y002 >= 0   Y003 >= 0   Y004 >= 0   Y005 >= 0   Y006 >= 0
Y007 >= 0   Y008 >= 0   Y009 >= 0   Y010 >= 0   Y011 >= 0   Y012 >= 0
Y013 >= 0   Y014 >= 0   Y015 >= 0   Y016 >= 0   Y017 >= 0   Y018 >= 0
Y019 >= 0   Y020 >= 0   Y021 >= 0   Y022 >= 0   Y023 >= 0   Y024 >= 0
Y025 >= 0   Y026 >= 0   Y027 >= 0   Y028 >= 0   Y029 >= 0   Y030 >= 0
INTEGERS
X001_1    X001_2    X001_4    X002_1    X002_2    X002_4    X003_1
X003_2    X003_4    X004_1    X004_2    X004_4    X005_1    X005_2
X005_4    X006_1    X006_2    X006_4    X007_1    X007_2    X007_4
X008_1    X008_2    X008_4    X009_1    X009_2    X009_4    X010_1
X010_2    X010_4    X011_1    X011_2    X011_4    X012_1    X012_2
X012_4    X013_1    X013_2    X013_4    X014_1    X014_2    X014_4
X015_1    X015_2    X015_4    X016_1    X016_2    X016_4    X017_1
X017_2    X017_4    X018_1    X018_2    X018_4    X019_1    X019_2
X019_4    X020_1    X020_2    X020_4    X021_1    X021_2    X021_4
X022_1    X022_2    X022_4    X023_1    X023_2    X023_4    X024_1
X024_2    X024_4    X025_1    X025_2    X025_4    X026_1    X026_2
X026_4    X027_1    X027_2    X027_4    X028_1    X028_2    X028_4
Z001_1    Z001_2    Z001_4    Z001_8    Z002_1    Z002_2    Z002_4
Z002_8    Z003_1    Z003_2    Z003_4    Z003_8    Z004_1    Z004_2
Z004_4    Z004_8    Z005_1    Z005_2    Z005_4    Z005_8    Z006_1
Z006_2    Z006_4    Z006_8    Z007_1    Z007_2    Z007_4    Z007_8
Z008_1    Z008_2    Z008_4    Z008_8    Z009_1    Z009_2    Z009_4
Z009_8    Z010_1    Z010_2    Z010_4    Z010_8    Z011_1    Z011_2
Z011_4    Z011_8    Z012_1    Z012_2    Z012_4    Z012_8    Z013_1
Z013_2    Z013_4    Z013_8    Z014_1    Z014_2    Z014_4    Z014_8
Z015_1    Z015_2    Z015_4    Z015_8    Z016_1    Z016_2    Z016_4
Z016_8    Z017_1    Z017_2    Z017_4    Z017_8    Z018_1    Z018_2
Z018_4    Z018_8    Z019_1    Z019_2    Z019_4    Z019_8    Z020_1
Z020_2    Z020_4    Z020_8    Z021_1    Z021_2    Z021_4    Z021_8
Z022_1    Z022_2    Z022_4    Z022_8    Z023_1    Z023_2    Z023_4
Z023_8    Z024_1    Z024_2    Z024_4    Z024_8    Z025_1    Z025_2
Z025_4    Z025_8    Z026_1    Z026_2    Z026_4    Z026_8    Z027_1
Z027_2    Z027_4    Z027_8    Z028_1    Z028_2    Z028_4    Z028_8
W001_2    W001_4    W001_8    W002_2    W002_4    W002_8    W003_2
W003_4    W003_8    W004_2    W004_4    W004_8    W005_2    W005_4
W005_8    W006_2    W006_4    W006_8    W007_2    W007_4    W007_8
W008_2    W008_4    W008_8    W009_2    W009_4    W009_8    W010_2
W010_4    W010_8    W011_2    W011_4    W011_8    W012_2    W012_4
W012_8    W013_2    W013_4    W013_8    W014_2    W014_4    W014_8
W015_2    W015_4    W015_8    W016_2    W016_4    W016_8    W017_2
W017_4    W017_8    W018_2    W018_4    W018_8    W019_2    W019_4
W019_8    W020_2    W020_4    W020_8    W021_2    W021_4    W021_8
W022_2    W022_4    W022_8    W023_2    W023_4    W023_8    W024_2
W024_4    W024_8    W025_2    W025_4    W025_8    W026_2    W026_4
W026_8    W027_2    W027_4    W027_8    W028_2    W028_4    W028_8
end

```

Figura A2.1 - Exemplo de PLIM-paramétrico gerado automaticamente.