

Este exemplar corresponde a redação final da tese
defendida por MARCOS ANTÔNIO DE
SOUSA e aprovada pela Comissão
Julgada em 19 / 08 1999
Carlos Carlson
Orientador

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

**PLANEJAMENTO DA REDE DE ACESSO:
MAXIMIZAÇÃO DE RECEITA
NUM
AMBIENTE MULTI-SERVIÇO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Autor : **Marcos Antônio de Sousa**

Orientador : **Prof. Dr. Carlos Magnus Carlson Filho**

Co-orientador : **Prof. Dr. Raul Vinhas Ribeiro**

Banca Examinadora:

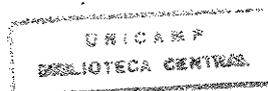
Dr. Carlos Magnus Carlson Filho (Presidente)

Dra. Eunice Luzizotto Medina Pissolato - Fundação CPqD

Dr. Vinicius Amaral Armentano - FEEC/UNICAMP

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP -
como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Campinas, agosto de 1999



185801

UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	UNICAMP
	So85p
V. Ex.	
TOMBO BC/	39520
PROC.	229199
C <input type="checkbox"/> D <input checked="" type="checkbox"/>	
PREÇO	R\$ 5.11,00
DATA	24.11.99
N.º CPD	

CM-00137134-5

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

So85p Sousa, Marcos Antônio de
Planejamento da rede de acesso: maximização de
receita num ambiente multi-serviço / Marcos Antonio
de Sousa.--Campinas, SP: [s.n.], 1999.

Orientadores: Carlos Magnus Carlson Filho, Raul
Vinhas Ribeiro.

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

1. Telecomunicações - Planejamento. 2. Inovações
tecnológicas. 3. Otimização combinatória. I. Carlson
Filho, Carlos Magnus. II. Ribeiro, Raul Vinhas. III.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Elétrica e de Computação. IV. Título.

RESUMO

Novas tecnologias, aliadas ao processo de desregulamentação e competição de mercado, vêm impondo mudanças substanciais, a um ritmo muito rápido, ao tradicional sistema de telecomunicações, e em particular à rede de acesso, segmento responsável pela comunicação entre o usuário (denominado assinante) e a sua estação telefônica. A busca de uma plataforma capaz de disponibilizar serviços diversificados e lucrativos é uma tendência a ser seguida pelas empresas operadoras do setor. A variedade de cenários possíveis e os valores financeiros envolvidos exigem que os planejadores disponham de ferramentas ao mesmo tempo abrangentes e flexíveis. Diante desta atual conjuntura, propõe-se neste trabalho uma metodologia de planejamento orientada à maximização de receita, descrevendo-se os procedimentos necessários a serem realizados pelo planejador para efetuar os estudos de evolução da rede para um ambiente multi-serviço. Para este fim, modelos matemáticos de otimização que tratam da etapa de dimensionamento de equipamentos também são propostos. 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. Como característica marcante, a metodologia permite um alto grau de interação com o planejador, flexibilidade que possibilita analisar variados aspectos do compromisso entre serviço e tecnologia, receita e custo. Resultados numéricos, fundamentados em dados reais, são apresentados e discutidos.

ABSTRACT

New technologies, besides the market deregulation and competitiveness, are changing Telecommunications in a fast-paced way. The Access Network, which connects users (subscribers) to their Central Offices, is one of the most affected parts of the system. Operating companies now look for a network structure which is able to provide several profitable services. The diversity of evolution settings and the large financial amount impose the need of flexible, comprehensive decision-support tools. This work proposes a revenue-oriented planning methodology and describes ways of studying the Access Network growth in a multi-service environment. Optimization mathematical models for equipment allocation and sizing are also presented for some technologies. The mixed linear-type models deal with the planning problem as a network flow problem with additional constraints and binary decision variables. As a remarkable feature, the interactiveness of the methodology allows analyses of services, technologies, and cost/revenue tradeoffs. An application to an actual network is reported.

Este trabalho é fruto de um convênio entre a UNICAMP e Fundação CPqD (Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações); e contou também com o apoio financeiro do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), através de uma bolsa de estudos.

Dedico este trabalho
a meus pais

**Terezinha e
Alberto** (in memoriam)

e a meus irmãos

**Mauro,
Mônica e
Márcia.**

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 e Raul, pela orientação e amizade, além das lições de coerência e de dedicação ao trabalho;
- Reynaldo, pela amizade e paciência em compartilhar sua experiência profissional, com sugestões sempre úteis;
- Hermano, pelo auxílio no início das atividades;
- Eunice, Vinícius e Christiano, pela disponibilidade e sugestões valiosas;
- Bergamaschi, Basseto, Walcir, Álvaro, Edilson, Daniel, Marcelo, Luciana, Cláudio, Alexandre, Gustavo, Noemia e demais amigos do DENSIS e da UNICAMP;
- Moacir, Aldionso, Jerônimo e demais amigos do CPqD;
- Flávia, pelo carinho e compreensão;
- Minha família, pelo amor sem limites; no fundo, o motivo de tudo isso. Esta conquista é nossa !

ÍNDICE

1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 – Objetivo.....	1
1.2 – Organização do Trabalho.....	3
2 – REDE DE ACESSO E SERVIÇOS	5
2.1 – Introdução.....	5
2.2 – Sistema de Telecomunicações.....	6
2.3 – Componentes da Rede de Acesso.....	8
2.4 – Serviços	9
2.5 – Necessidade de Evolução da Rede de Acesso.....	13
3 – SOLUÇÕES TECNOLÓGICAS PARA A REDE DE ACESSO	14
3.1 – Introdução.....	14
3.2 – Linha Digital de Assinante (xDSL).....	15
3.3 – Soluções Fiber-In-The-Loop (FITL).....	17
3.3.1 – Rede Óptica Primária (ROP).....	18
3.3.2 – Rede Óptica Passiva Banda-Larga Baseada em ATM (APON)...	23
3.4 – Solução Híbrida Fibra/Coaxial (HFC).....	27
3.5 – Soluções via Rádio Terrestre (SvRT).....	29
3.6 – Outras Soluções.....	31
4 – METODOLOGIA DE PLANEJAMENTO DE REDE	33
4.1 – Introdução.....	33
4.2 – Definição do Horizonte de Planejamento.....	33
4.3 – Definição dos Serviços.....	34
4.4 – Escolha das Soluções Tecnológicas.....	35
4.5 – Definição da Rede.....	36
4.6 – Atualização dos Dados Gerais.....	37
4.7 – Definição do Critério de Otimização.....	39

4.7.1 – Atender Toda a Demanda a um Custo Mínimo.....	39
4.7.2 – Maximização de Receita.....	40
4.8 – Realização dos Estudos de Caso.....	42
4.9 – Análise Econômica.....	45
<hr/>	
5 – MODELO GERAL DE MAXIMIZAÇÃO DE RECEITA.....	47
5.1 – Introdução.....	47
5.2 – Premissas de Modelagem.....	47
5.3 – Representação da Rede.....	48
5.4 – Formulação do Modelo Matemático.....	52
5.5 – Procedimentos para Resolver o Problema.....	56
5.6 – Comentários Adicionais.....	58
<hr/>	
6 – MODELOS ESPECÍFICOS.....	62
6.1 – Introdução.....	62
6.2 – Expansão em xDSL.....	63
6.3 – Expansão em ROP.....	64
6.4 – Expansão em APON-FTTC.....	65
6.5 – O Modelo xDSL <i>versus</i> ROP.....	67
6.5.1 – Representação em Grafos do Modelo xDSL <i>versus</i> ROP.....	67
6.5.2 – O Modelo Matemático xDSL <i>versus</i> ROP.....	68
6.6 – O Modelo xDSL <i>versus</i> APON-FTTC.....	75
6.6.1 – Representação em Grafos do Modelo xDSL <i>versus</i> APON- FTTC.....	75
6.6.2 – O Modelo Matemático xDSL <i>versus</i> APON-FTTC.....	76
6.7 – Comentários Adicionais.....	85
<hr/>	
7 – APLICAÇÃO DOS MODELOS.....	87
7.1 – Introdução.....	87
7.2 – Dados Gerais.....	87
7.3 – Aplicação do Modelo xDSL <i>versus</i> ROP.....	90
7.4 – Aplicação do Modelo xDSL <i>versus</i> APON-FTTC.....	99
7.5 – Comentários Adicionais.....	108
<hr/>	

8 – CONCLUSÕES.....	109
----------------------------	------------

REFERÊNCIAS.....	113
Anexo 1 – LISTA DE TERMOS TÉCNICOS.....	117
Anexo 2 – PLANILHA DE CUSTOS.....	120
Anexo 3 – COMPLEXIDADE COMPUTACIONAL DOS CENÁRIOS ESTUDADOS.....	122

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 – Objetivo

As mudanças nas Telecomunicações levam as empresas a assumirem novas posturas em todas as suas áreas de atuação, inclusive no que diz respeito ao planejamento da expansão do sistema. Enquanto vigorava o ambiente monopolista, com efetiva regulamentação, a meta de atendimento a mínimo custo era predominante. Independente do uso de modelos de otimização, o custo associado à implantação de prédios, equipamentos e cabos era o principal critério.

Atualmente, com a perspectiva de um ambiente de competição, no qual a exploração dos serviços está a cargo de empresas de capital privado, o foco de atenção transfere-se do investimento a mínimo custo para a necessidade de lucro a ser proporcionado pelo sistema implantado.

Isto traz novas preocupações para a etapa de planejamento. 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.

Assim, o planejamento precisa levar em consideração estes novos aspectos. Além disso, o porte dos problemas, a velocidade das transformações e as inúmeras possibilidades a analisar exigem metodologias consistentes, flexíveis (suportando diferentes cenários) e apoiadas em ferramentas computacionais. Os valores

significativos geralmente envolvidos neste tipo de situação tornam desejável o uso de modelos matemáticos de otimização.

As estratégias para a expansão da tradicional rede de acesso (apoiada em uma estrutura de cabos de pares metálicos, para o provimento de telefonia), seguindo um caminho eficiente de custos, e ao mesmo tempo suficientemente flexíveis para oferecer um conjunto complexo de novos serviços, são cruciais para as empresas operadoras, provedores de serviço e fabricantes de equipamentos. A decisão de se investir em uma nova tecnologia está sujeita a riscos e incertezas inerentes ao mercado competitivo. Qualquer que seja a metodologia empregada, depara-se com problemas nos quais a quantidade de informações a serem tratadas é enorme, como por exemplo:

- várias soluções tecnológicas, com suas respectivas topologias, equipamentos e custos;
- grande diversidade de serviços, acompanhada de diferentes taxas de penetração, taxas de transmissão e valores de receita;
- características mercadológicas: ambiente monopolizado ou competitivo;
- características das áreas a serem planejadas: quantidade de centros de fios, disponibilidade da rede instalada, demandas, etc.

O principal desafio será encontrar a combinação apropriada das tecnologias relevantes para disponibilizar uma solução multi-serviço escalável e versátil, a chamada *Rede de Acesso para Todos os Serviços (FSAN)*¹.

Tendo em vista esta conjuntura, este trabalho tem como objetivo propor uma metodologia e modelos de otimização que auxiliem na etapa de planejamento da Rede de Acesso. Procura-se planejar a transformação dessa rede 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, oferecendo ainda a opção de uso mais prolongado da rede metálica. O critério de otimização adotado é o de maximização de receita.

1 - Esta e todas as abreviações são explicadas no Anexo 1.

1.2 – Organização do Trabalho

Para atingir aquilo a que se propõe, este trabalho está organizado da seguinte maneira:

Capítulo 2 - situa a rede de acesso no sistema de telecomunicações. Adicionalmente, os serviços são caracterizados e a necessidade de expansão da rede é estabelecida.

Capítulo 3 - descreve quais as soluções tecnológicas que podem (ou poderão!) ser utilizadas na expansão da rede de acesso. Os diferentes meios de transmissão (cabo metálico de par trançado, cabo coaxial, cabo de fibras, rádio e satélite) são apresentados. São especificados topologias, configurações de nós e equipamentos.

Capítulo 4 - discute o problema do planejamento de redes 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. O planejamento orientado à maximização de receita é discutido.

Capítulo 5 - propõe um modelo matemático de otimização geral aplicado ao dimensionamento dos diversos segmentos da rede de acesso dos assinantes às centrais. Maximização de receita é o critério adotado. Discutem-se também os procedimentos para a resolução computacional do modelo.

Capítulo 6 - especifica a formulação do modelo geral de maximização para atender duas opções de opticalização da rede, quais sejam: *Rede Óptica Primária (ROP)* e *Rede Óptica Passiva Banda-Larga Baseada em ATM na configuração Fiber-To-The-Curb (APON-FTTC)*.

Capítulo 7 - apresenta os resultados da aplicação computacional dos modelos do capítulo 6 a uma rede real. Os cenários de viabilidade das soluções tecnológicas candidatas são avaliados. Uma análise de sensibilidade destaca a influência dos principais parâmetros envolvidos no planejamento.

Capítulo 8 - é dedicado aos comentários finais sobre a metodologia e os modelos propostos e à apresentação de temas que poderão ser objeto de trabalhos futuros.

Finalmente, são listadas as referências bibliográficas utilizadas como fonte de pesquisa, bem como anexos contendo a lista de termos técnicos, planilha de custos de equipamentos e dados referentes à complexidade computacional (número de variáveis, tempo de execução, etc.) dos cenários estudados.

Capítulo 2

REDE DE ACESSO E SERVIÇOS

2.1 – Introdução

Um sistema de telecomunicações pode ser definido como um conjunto ordenado de equipamentos e meios de transmissão que permite a transferência de informações de um ponto a outro, mantida a privacidade e integridade destas informações. 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 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. Cada qual era, ou ainda é, responsável por um segmento de informação.

A rede de telefonia é a que apresenta maior apelo popular, sendo altamente capilarizada, o que possibilita às *Empresas Operadoras* (EOs) do sistema a disponibilização do serviço de VOZ a milhões de usuários. O maior desafio destas EOs 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, a parcela que sofrerá as maiores transformações é a chamada Rede de Acesso.

Fazemos a seguir uma descrição geral do Sistema de Telecomunicações, com ênfase na Rede de Acesso. Também caracterizamos os serviços e justificamos a necessidade de evolução da rede para uma solução multi-serviço.

2.2 – Sistema de Telecomunicações

O sistema de telecomunicações aqui tratado é baseado na *Rede Nacional de Telefonia* (RNT), a qual deve evoluir no sentido de habilitar-se à prestação de novos serviços. A Figura 2.1 apresenta os principais componentes desta rede [Carlson 1998] [Formigoni 1995].

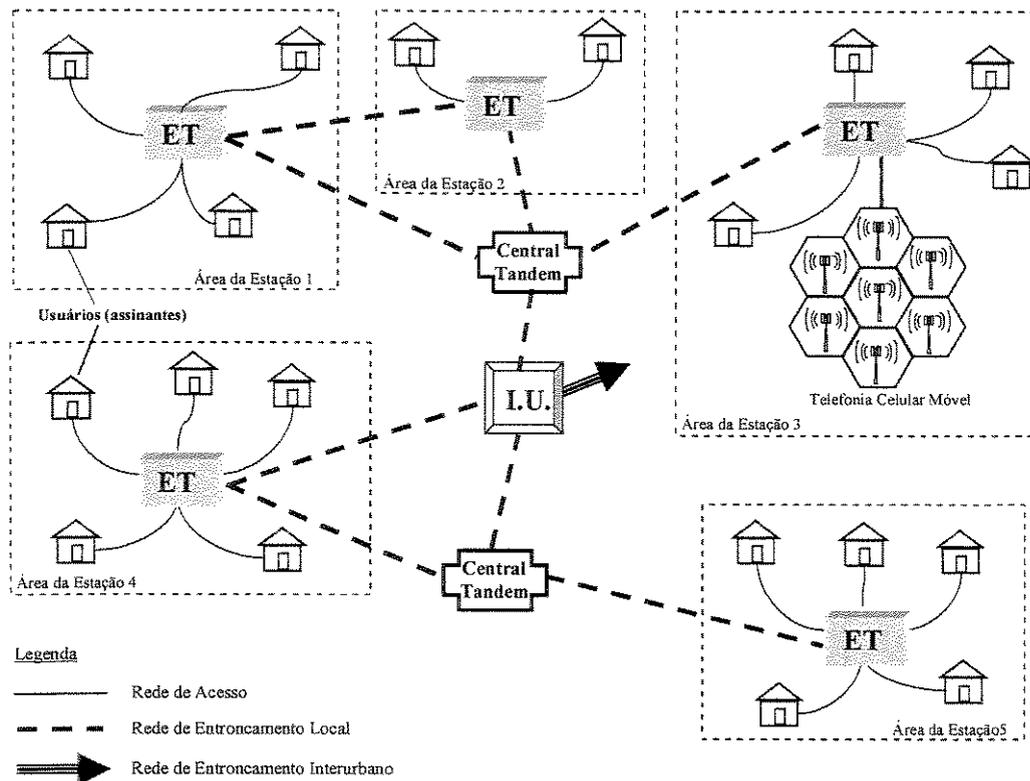


Figura 2.1. – Componentes da Rede Nacional de Telefonia.

Neste sistema cada usuário (denominado *assinante*) é ligado a uma *Estação Telefônica* (ET). Na ET, equipamentos de comutação (as *centrais locais de comutação*) permitem que cada assinante possa se comunicar com os demais. Em função da capacidade de processamento, tecnologia empregada e critérios de planejamento, a rede pode ser dividida em três níveis hierárquicos: *Rede de Acesso*, *Rede de*

Entroncamento Local e Rede de Entroncamento Interurbano. A seguir descrevemos cada um destes segmentos.

Rede de Acesso

É a coleção de equipamentos e infra-estrutura necessária para realizar a interligação dos assinantes às suas respectivas Estações Telefônicas. Ela pode ser construída em várias topologias: ponto-a-ponto, ponto-multi-ponto ou barramento compartilhado. Atualmente, é composta pela *rede externa* e pelos sistemas de *telefonia celular móvel*.

O planejamento desta parcela da rede é o objeto de interesse deste trabalho. No item 2.3, a seguir, ela é descrita com maiores detalhes.

Rede de Entroncamento Local

Esta parcela da rede 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 Estação. 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, o que possibilita o tráfego de informações a altas velocidades.

Rede de Entroncamento Interurbano

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

2.3 – Componentes da Rede de Acesso

A Rede de Acesso (também chamada de *Local Loop*), tal como se encontra hoje, utiliza linhas dedicadas para conectar cada usuário à ET. Fisicamente, a linha do usuário consiste de um cabo metálico (de cobre) segmentado ao longo do percurso usuário-ET (Figura 2.2).

A Área de Estação 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 instalados em dutos subterrâneos.

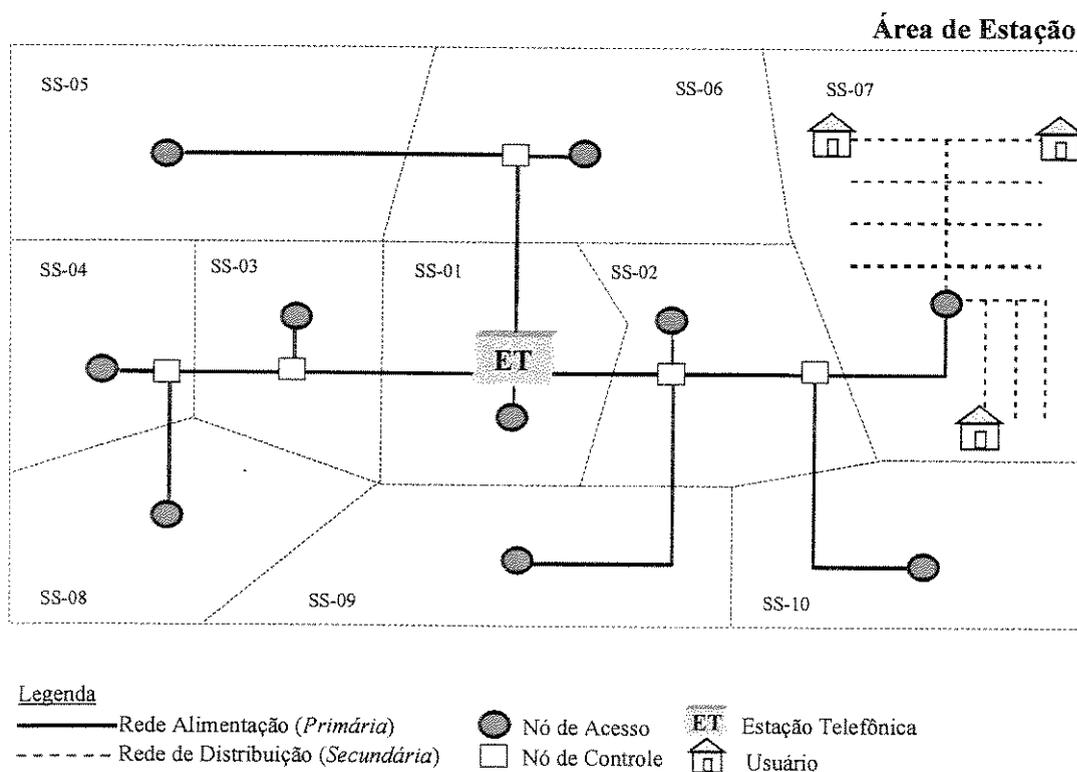


Figura 2.2. – Componentes da Rede de Acesso.

2.4 – Serviços

Um serviço de telecomunicações pode ser definido como: "aquilo que é oferecido por um provedor a seu cliente, para satisfazer uma necessidade específica de telecomunicações" [ITU-T 1993]. O surgimento de novas tecnologias de transmissão e comutação habilita a Rede de Acesso a suportar vários tipos de serviços. Entre os já oferecidos ou ainda previstos podemos citar:

- **VOZ:** é o serviço clássico, que exige apenas fios de cobre. Os sinais transmitidos são analógicos;
- **Dados em Baixa Velocidade:** o telex, o fax e a Internet atual 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 é muito 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 as EOs precisam estar atentas aos seguintes parâmetros:

- *velocidade (ou taxa) de transmissão Downstream (sentido ET→usuário) e Upstream (sentido usuário→ET):* 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 [Mattheus 1998];
- *tipo de tráfego:* se a transmissão é constante ou variável;
- *qualidade exigida pelo serviço:* por exemplo, a taxa de erro permitida;

– exigências quanto ao atraso : se a transmissão é em tempo real ou não.

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
Teleworking	0,128	0,128	4 - 6	1 - 2
Tele-Jogos	0,028	0,028	0,512	0,512
Homebanking	0,028	0,028	0,256	0,128
Homeshopping	0,028	0,028	4 - 6	0,128
Telemedicina	0,128	0,064	4 - 6	1 - 2

Tabela 2.1 – Velocidade de transmissão exigida pelos serviços.

Em função das indefinições sobre quais serão exatamente os serviços a serem oferecidos, 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 mais adotados [ImS 1997] [Olsen 1996].

Serviços Faixa-Estreta

- *Telefonia convencional (VOZ)*: canal de 64 Kbps simétricos;
- *Rede Digital de Serviços Integrados (RDSI)*: acesso básico demandando dois canais de 64 Kbps e um de 16 Kbps para sinalização (2B + D), totalizando 144 Kbps simétricos;

Serviços Faixa-Larga

- *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 de 2 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 de 2 Mbps.

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

Tabela 2.2 – Usuários por canal de 2 Mbps.

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 da Rede de Acesso

Conforme apresentado anteriormente, a infra-estrutura da Rede de Acesso ainda é baseada em pares metálicos. Sua capacidade de transmissão é considerada baixa frente às velocidades exigidas pela maioria dos serviços. Assim, a obtenção de uma rede multi-serviço, capaz de disponibilizar várias informações simultaneamente, exige profundas modificações nesta rede.

Esta evolução não é um processo imediato. Os valores orçamentários envolvidos são enormes. O que se espera é uma migração em etapas para uma Rede de Acesso Multi-Serviço Banda-Larga, na qual possam conviver, harmoniosamente, diferentes tecnologias. As possíveis soluções tecnológicas que poderão ser utilizadas nesta evolução constituem o assunto do próximo capítulo.

Capítulo 3

SOLUÇÕES TECNOLÓGICAS PARA A REDE DE ACESSO

3.1 – Introdução

A evolução da Rede de Acesso, no sentido de transformá-la numa rede multi-serviço, exigirá 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 a rede 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. As mais prováveis são: *Linha Digital de Assinante* (xDSL), *Fiber-In-The-Loop* (FITL), *Rede Híbrida Fibra/Coaxial* (HFC) e os *Sistemas via Rádio Terrestre* (SvRT). Conforme a Figura 3.1, avaliar riscos requer a preparação de um plano de migração para cada sistema candidato [ImS 1998]. São apresentados dois cenários: um com evolução a partir de uma rede metálica tradicional e outro a partir de uma área sem rede instalada (*green field*). A seta contínua indica uma mudança de tecnologia entre dois estágios, enquanto a seta pontilhada representa uma expansão na mesma solução tecnológica do estágio anterior.

A transição segura para um novo ambiente processa-se através de alguns passos essenciais. Analisados os objetivos e traduzidos em requisitos de como o sistema deve se comportar, avaliam-se as opções disponíveis e selecionam-se aquelas que melhor se adaptem aos objetivos traçados. A escolha final deve levar em conta a solução que apresente o menor risco durante a transição para um novo sistema.

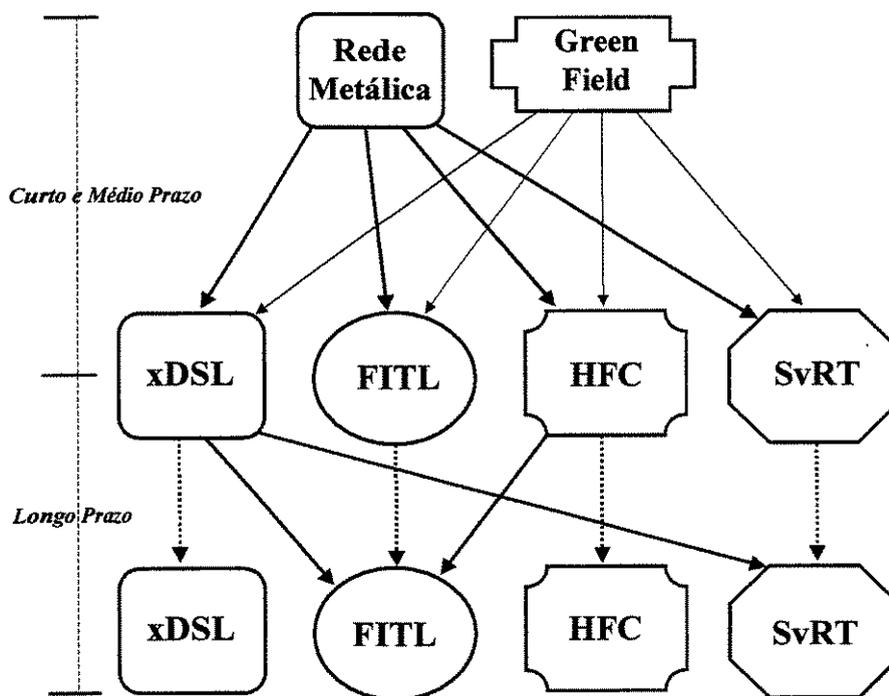


Figura 3.1 - Estratégias de evolução para a Rede de Acesso.

A seguir apresentamos as especificações técnicas para cada uma dessas soluções tecnológicas a fim de habilitar a Rede de Acesso a oferecer os serviços de VOZ, RDSI, FLR e FLC (item 2.4). 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.

3.2 – Linha Digital de Assinante (xDSL)

Esta tecnologia é a que provoca as menores mudanças na Rede 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 (Estação Telefônica e usuário).

A Figura 3.2 especifica os equipamentos exigidos por esta solução: na ET, Nó de Acesso e instalações do usuário. Maiores detalhes poderão ser encontrados em [Humphrey 1997] [Maxwell 1996] [Ahamed 1995] [Chang 1994].

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.

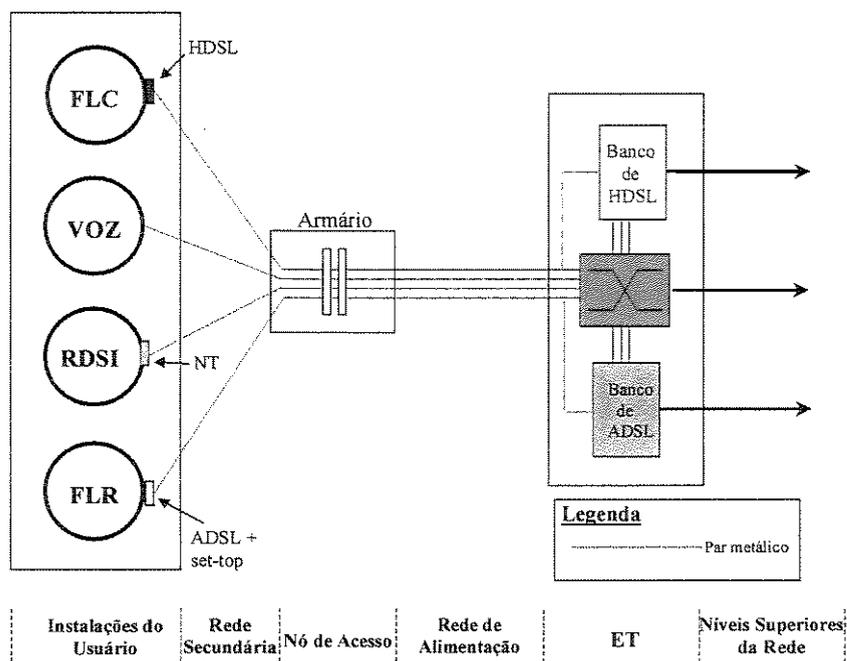


Figura 3.2 – Equipamentos considerados na solução xDSL.

Serviço RDSI

Para suportar o serviço RDSI, faz-se necessária a implementação desta funcionalidade na central telefônica 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 será necessário o uso de modems 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 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, consideramos 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 ET, e não da Rede de Acesso, motivo pelo qual não estão representados na Figura 3.2.

3.3 – Soluções Fiber-In-The-Loop (FITL)

A fibra óptica é um meio de transmissão que permite o tráfego simultâneo de enorme quantidade de sinais [Cook 1994]. Devido à possibilidade de transportar

informações a altas velocidades é bastante utilizada nos enlaces de entroncamento entre centrais [Quaglia 1995] [Garcia 1996] [Bortolon 1996].

A viabilidade de se utilizar a fibra óptica na Rede de Acesso surge com a perspectiva de demandas cada vez maiores por serviços faixa-larga, aliada à queda nos preços dos conversores eletro-ópticos. O objetivo a curto (e médio) prazo é instalar cabos ópticos nos enlaces que ligam a ET aos Nós de Acesso (Rede Primária), permitindo o compartilhamento do sistema por vários usuários. A longo prazo prevê-se a fibra chegando às dependências de cada usuário em particular.

São apresentadas a seguir duas opções de tecnologia FITL possíveis de serem utilizadas na expansão da Rede de Acesso: *Rede Óptica Primária (ROP)* e *Rede Óptica Passiva Banda-Larga Baseada em ATM (APON)*.

3.3.1 – Rede Óptica Primária (ROP)

A ROP pode ser considerada como o primeiro estágio para implantação da fibra óptica na Rede de Acesso. A idéia é colocar armários ópticos nas imediações ou no próprio local onde está localizado o Nó de Acesso. A ligação entre o armário óptico e a ET é feita utilizando fibra óptica, enquanto a conexão do usuário ao armário óptico continua sendo por par metálico. O objetivo de se utilizar essa solução é o de obter um melhor aproveitamento da infra-estrutura existente e a redução dos custos de implantação.

Segundo a Prática Telebrás SDT-210-120-103 [TELEBRÁS 1996], poderão existir 3 modelos de ROP:

- **Seção de Serviço com Acesso Óptico (SSAO):** nesse modelo cada *Seção de Serviço (SS)* é atendida por no mínimo 6 fibras ópticas. Os equipamentos são instalados em *Estágios Remotos (ER)* localizados nas imediações ou no próprio Nó de Acesso da SS.
- **Área de Serviço Remota Óptica com Seções de Serviço Atendidas por Cabos Alimentadores de Pares Metálicos (ASRO-P):** as diversas SS são

agrupadas em uma mesma *Área de Serviço Remota (ASR)*, que será atendida por um único ER. A conexão entre o ER e os Nós de Acesso é feita por cabos alimentadores de pares metálicos.

- **Área de Serviço Remota Óptica com Seção de Serviço Atendida por Unidades Remotas (ASRO-UR):** as diversas seções de serviço são agrupadas em uma mesma ASR e servidas por um único ER, o qual é conectado a cada SS por cabos metálicos sem repetidores ou cabos ópticos. Cada SS deverá possuir uma *Unidade Remota (UR)* com equipamentos de multiplexação, concentração ou comutação. Ela deverá ser localizada no Nó de Acesso ou nas suas imediações.

O modelo considerado neste trabalho é o SSAO. Atualmente, a tecnologia de transmissão adotada para a implantação deste tipo de ROP é a chamada *Hierarquia Digital Síncrona (SDH)* [Sexton 1997]. Padronizada pela *International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector (ITU-T)*, sua principal funcionalidade é a multiplexação das taxas de transmissão requeridas pelos usuários (os *tributários*), que em geral não são muito elevadas, agregando-as em um único canal de transporte (o *canal agregado*), aumentando a capacidade dos enlaces ópticos. A Tabela 3.1 apresenta as principais hierarquias do padrão SDH. Os principais equipamentos para uso na Rede de Acesso são: o *Optical Line Terminal Multiplexer (OLTM)* e o *Add-Drop Multiplexer (ADM)*.

Hierarquia SDH	Taxa de Transmissão (Mbps)	Capacidade (x 2 Mbps)
STM -1	155	63
STM - 4	622	252
STM -16	2.500	1.008

Tabela 3.1 - Hierarquias do padrão SDH.

Em termos de equipamentos existem duas soluções distintas para o modelo ROP tipo SSAO:

- **Solução usando PCM 30 :** nesta solução os sinais analógicos de VOZ na estação são agregados em feixes de 2 Mbps utilizando PCM 30 e enviados à interface tributária dos equipamentos SDH (Figura 3.3a). No ER são

alocados PCM 30 para converter novamente os feixes de 2 Mbps em sinais analógicos de VOZ, os quais são enviados aos usuários através da rede secundária. Esta é a solução recomendada pela Telebrás por não depender do fabricante da central de comutação para futuras expansões. Esta solução, também chamada de **Solução de Armário Óptico**, é cara e portanto não tem sido adotada pelas EOs.

- **Solução usando MTR no ER:** neste caso, ao invés de se utilizar os PCM 30 na estação e no ER, o *Módulo Terminal da Central* (MTR) é deslocado para o ER (Figura 3.3b). Geralmente, esta solução é mais barata; em contrapartida, a ligação entre a central e o MTR é proprietária, dificultando futuras expansões do sistema com diferentes fabricantes. Também chamada de **Solução de ER**, esta é a configuração adotada por algumas EOs no Brasil.

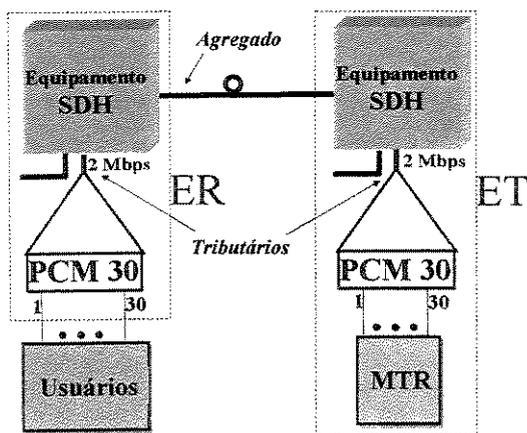


Figura 3.3a - Modelo SSAO utilizando PCM 30

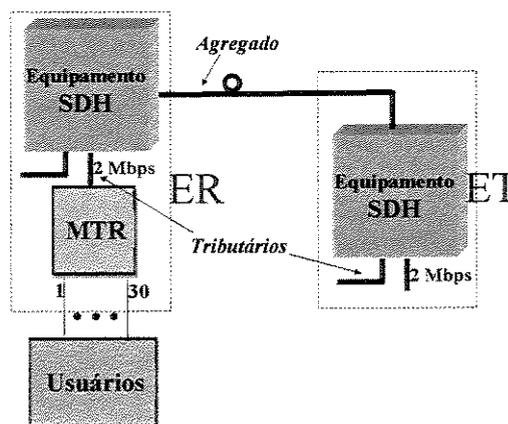


Figura 3.3b - Modelo SSAO utilizando MTR no ER.

Das duas configurações de ROP tipo SSAO apresentadas, a que adotamos neste trabalho é aquela usando MTR no ER. Analisaremos a seguir quais são os equipamentos exigidos por esta solução na ET, ER e dependências do usuário, utilizando-se a tecnologia SDH para a transmissão em fibra óptica.

Equipamentos na Estação

Na estação telefônica existirão os seguintes equipamentos:

- Multiplexadores SDH-OLTM que transportarão os feixes de 2 Mbps até o ER. A utilização deste equipamento exige uma topologia dupla-estrela ativa para a rede, conforme mostrada na Figura 3.4 para um ER;
- Multiplexadores SDH-ADM que transportarão os feixes de 2 Mbps até o ER. A utilização deste equipamento exige uma topologia anel-estrela para a rede (Figura 3.5). Devido às características peculiares das Redes de Acesso, em que o padrão de demanda é caracterizado por uma forte concentração de demanda de todos os Nós de Acesso para um único nó (ET), o anel adotado é do tipo unidirecional [Sosnosky 1991].

Equipamentos no Estágio Remoto

No ER deverão ser alocados os seguintes equipamentos:

- O MTR responsável pelo oferecimento dos serviços de VOZ e RDSI;
- Multiplexadores SDH (OLTM e ADM) com taxas de transmissão do agregado idênticas aos alocados no nó de estação;
- Banco de ADSLs destinado ao atendimento dos assinantes que demandarão o serviço FLR;
- Banco de HDSLs destinado ao atendimento dos assinantes que demandarão o serviço FLC;
- Armário ou abrigo tipo *Control Environment Vault* (CEV) com banco de baterias, conversores de energia e climatização (se necessário).

Equipamentos no Assinante

No assinante poderão ser alocados 3 tipos de equipamentos:

- interfaces RDSI (NT): para assinantes RDSI;

- modems ADSL e Set-top: para assinantes do serviço FLR;
- modems HDSL: para assinantes do serviço FLC.

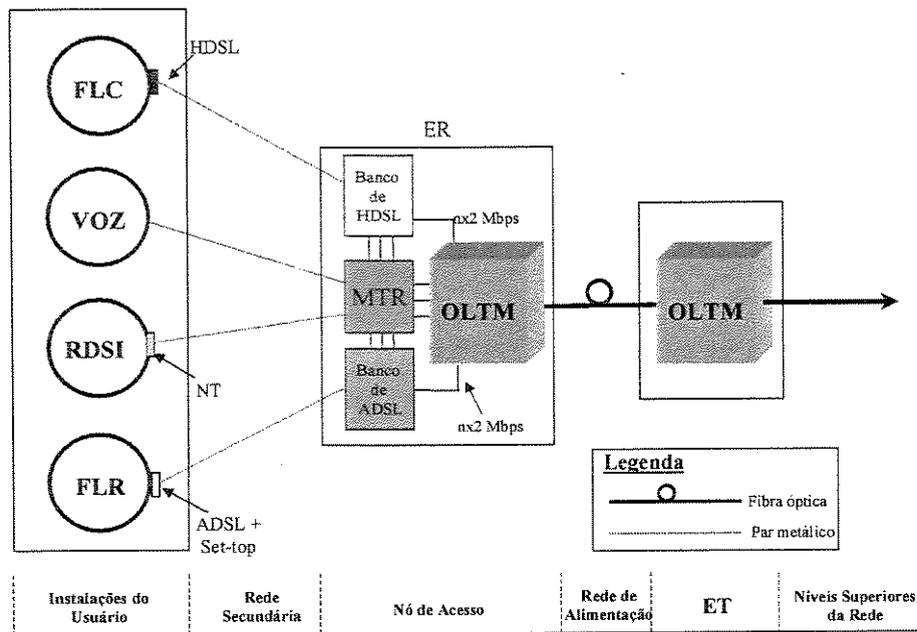


Figura 3.4 – Dupla-estrela ativa com a utilização de sistemas OLTM.

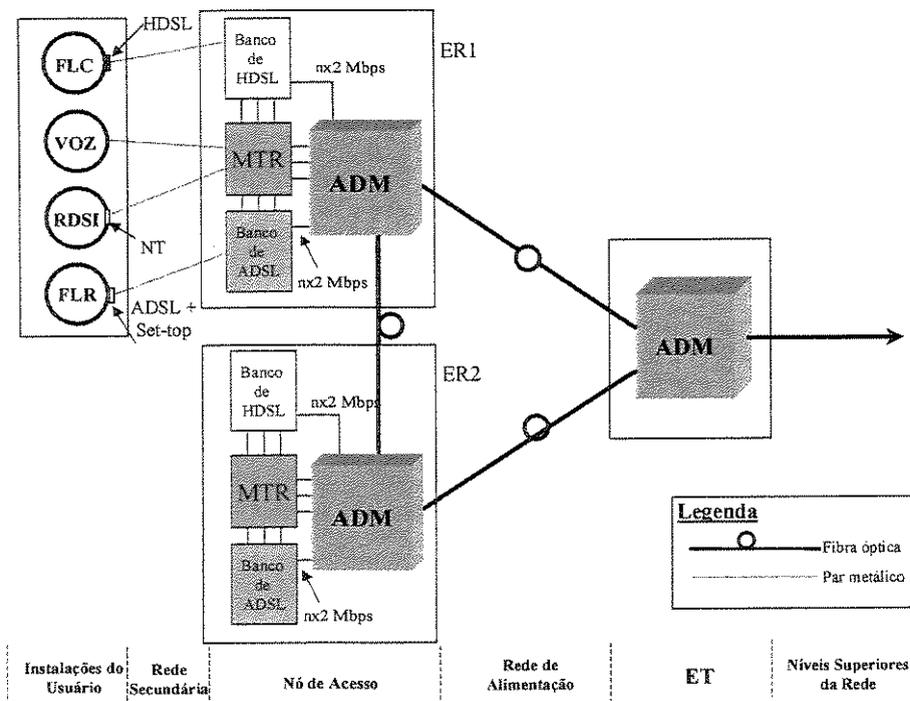


Figura 3.5 – Anel-estrela com a utilização de sistemas ADM.

Os modems utilizados na solução ROP são os mesmos da solução xDSL; a diferença está no seu deslocamento da Estação Telefônica para o Estágio Remoto. Embora os modems permitam o transporte do serviço de VOZ em conjunto com os serviços FLR e FLC, os equipamentos da tecnologia SDH gerenciam todos estes serviços separadamente (Figuras 3.4 e 3.5).

3.3.2 – Rede Óptica Passiva Banda-Larga Baseada em ATM (APON)

Telecomunicações sobre *Redes Ópticas Passivas* (PON) constituem uma das primeiras opções de sistemas 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 3.6. Suas especificações técnicas são resultado das pesquisas do grupo 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*.

Optical Line Terminal (OLT)

Como mostra a Figura 3.6, o OLT é localizado no nó de estação 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-estreita (VOZ e RDSI). 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 SDH STM-1. 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. 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.

Apresentamos 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.

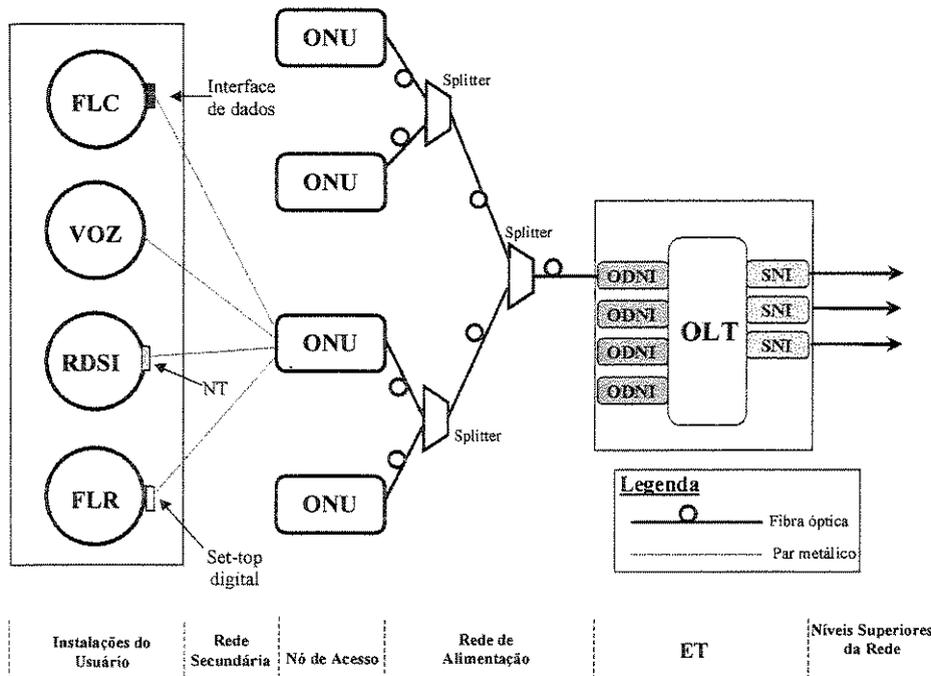


Figura 3.6 – Arquitetura de uma rede APON.

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 3.7 apresenta os principais componentes da 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.

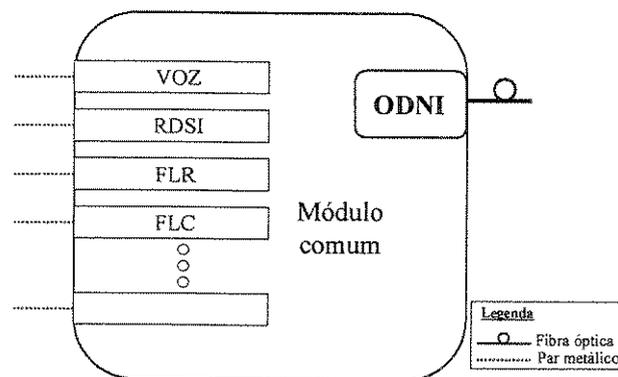


Figura 3.7 – Componentes da ONU.

Equipamentos no Usuário (NT – Network Termination)

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

- Placa 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 3.8), 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.

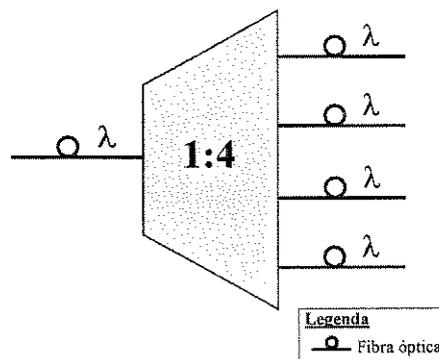


Figura 3.8 – Representação de um splitter.

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. Pode ser considerada, em termos de

topologia, uma evolução da solução ROP, uma vez que a fibra avança mais algumas centenas de metros em direção ao 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 da rede.

O planejamento da APON-FTTC, bem como das soluções xDSL e ROP, é parte integrante dos capítulos 6 e 7.

3.4 – Solução Híbrida Fibra/Coaxial (HFC)

A transmissão de sinais de vídeo analógicos em broadcasting já é uma realidade entre as empresas operadoras de CATV. Através de uma rede totalmente coaxial é possível oferecer ao usuário vários canais de vídeo simultaneamente.

A solução HFC apresenta-se como uma evolução das redes de CATV, no sentido de adaptá-las para o provimento de outros serviços. A adoção de uma rede mista, composta por um trecho em fibra óptica e um trecho coaxial, possibilita uma maior interatividade à rede.

Como mostra a Figura 3.9, a área de atendimento é dividida em células, as quais são alimentadas por fibra óptica. Na célula existe um equipamento conversor eletro-óptico, também chamado de *Nó Óptico*, que converte os sinais ópticos analógicos em sinais elétricos também analógicos, os quais são encaminhados aos assinantes através da rede coaxial. A rede tem uma topologia em estrela na parte óptica e em barramento na parte metálica. O nó óptico pode abranger uma ou mais seções de serviço [Martinelli 1996].

A solução HFC mais utilizada atualmente é a rede de 750 MHz. A Figura 3.10 mostra a alocação de serviços nesta faixa de espectro. Um dos maiores problemas deste tipo de solução é o elevado nível de ruído do canal de retorno (5 a 42 MHz). Esse canal é destinado à comunicação dos serviços interativos, no sentido usuário-ET (Head-end), e deve ser compartilhado por todos os usuários atendidos por um nó óptico.

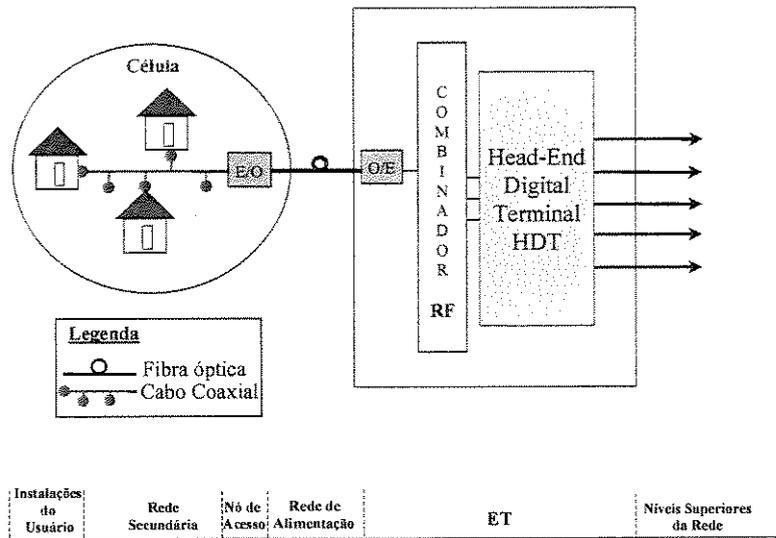


Figura 3.9 – Rede Híbrida Fibra/ Coaxial.

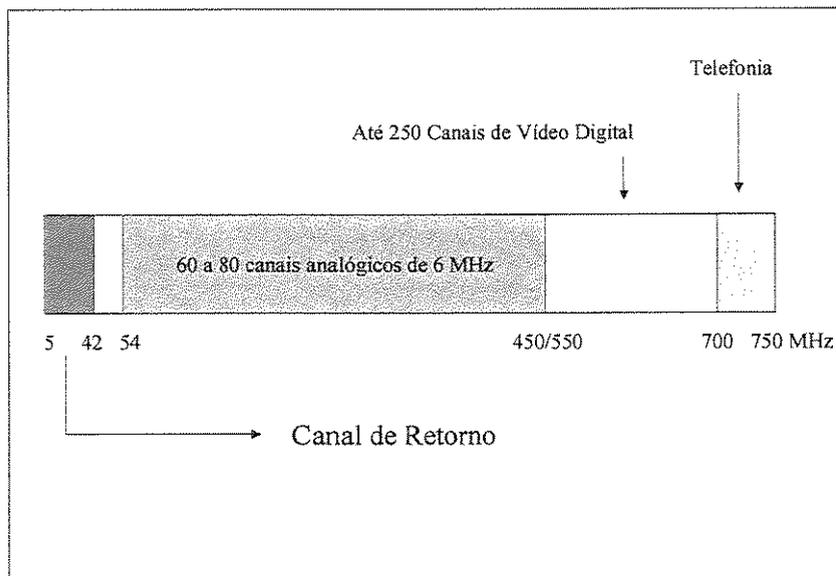


Figura 3.10 – Divisão do espectro de 750 MHz.

O tamanho da célula está diretamente relacionado com os serviços que a rede vai suportar, podendo variar de algumas dezenas a milhares de residências. Quanto maior o tamanho, maior será o número de usuários disputando o canal de retorno, ou seja, maior será o seu tráfego. Diminuindo o tamanho da célula, diminui o número de assinantes que disputarão o canal de retorno, viabilizando o fornecimento de uma quantidade maior de serviços interativos.

Como a modelagem desta rede foge ao escopo deste trabalho, não entraremos em detalhes de equipamentos.

3.5 – Soluções via Rádio Terrestre (SvRT)

Devido às suas características de flexibilidade de projeto, grande velocidade de implantação e baixo custo de infra-estrutura, as redes SvRT surgem como opções atraentes para as Redes 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. Há ainda porém limitações para um maior aplicabilidade das SvRT, tais como falta de padrões internacionais e indefinições do espectro de frequências a ser utilizado.

Como mostra a Figura 3.11, as Redes de Acesso utilizando a tecnologia SvRT podem ser divididas em dois segmentos:

- A conexão rádio entre o usuário e a *Estação Rádio Base* (ERB);
- A infra-estrutura de ligação ERB-ET, ou ERB-*Central de Controle e Comutação do Sistema Rádio* (CCCSR). Se a escolha é conectar a ERB a uma CCCSR, deve-se observar também a conexão desta com os níveis superiores da rede (por exemplo, um backbone).

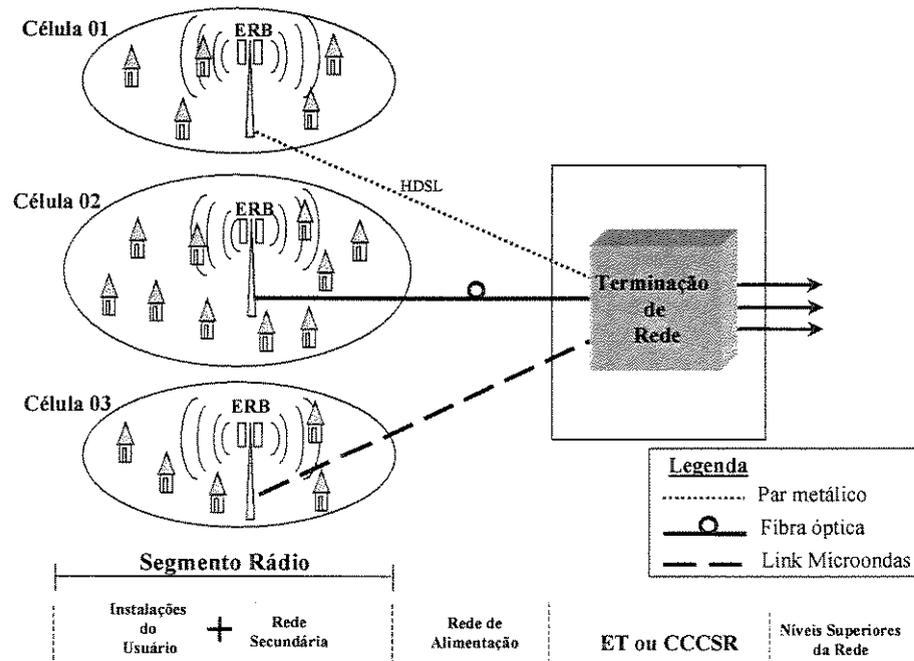


Figura 3.11 – Arquitetura de uma SvRT.

O planejamento, devido a esta característica da rede, é feito em duas etapas:

Localização/Dimensionamento das ERBs

Na ERB ocorre a conversão dos sinais provenientes da rede de alimentação (xDSL, fibra ou Link Microondas) para o segmento sem fio. Ela é composta por uma interface de rede para a terminação da rede de alimentação, funções de modulação e demodulação, equipamentos de transmissão e recepção de microondas. Pode ser alocada em torres, postes ou até mesmo sobre um telhado.

Nesta etapa do dimensionamento são definidas a altura das antenas na ERB, a área de cobertura de cada ERB, a alocação de frequências em cada ERB (que pode ser um procedimento estático ou dinâmico), e conseqüentemente a demanda a ser atendida por 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.

Dimensionamento da Rede de Transporte entre a ERB e ET ou CCCSR

Nesta etapa definem-se quais os meios de transmissão que deverão ser utilizados para a interconexão das ERB às suas centrais de controle (ET ou CCCSR). Este procedimento é semelhante ao realizado para as soluções cabeadas apresentadas anteriormente.

As duas etapas são realizadas de forma sequencial. Os dados referentes à localização/dimensionamento das ERBs são usados como dados de entrada para o planejamento da rede de transporte, que, por sua vez, deve ser capaz de escoar o tráfego dos usuários, levando-se em conta as diversas opções disponíveis, escolhendo-se aquela com melhor relação custo/benefício.

A quantidade de SvRT disponíveis para aplicação na Rede Acesso é enorme, tanto as fixas quanto aquelas capazes de oferecer mobilidade para o usuário. As fixas são, em sua maioria, uma adaptação dos sistemas móveis celulares. Maiores detalhes poderão ser encontrados nos trabalhos de [Linna 1998] [Garg 1996] [Dravida 1998].

3.6 – Outras Soluções

Como soluções capazes de oferecer serviços de telecomunicações ao usuário final, podemos citar ainda as seguintes tecnologias:

Acesso via Satélite

São vários os estudos envolvendo a utilização de *Satélites em Baixa Órbita* (LEO) para o oferecimento de serviços de telecomunicações, tais como o serviço de VOZ. Entre estes trabalhos podemos citar o projeto IRIDIUM [Hubbel 1997], que utiliza 66 satélites LEO e 3 bandas de frequência: uma para a interconexão entre os satélites, outra para a conexão dos satélites com a central de controle terrestre e a última para a comunicação com os usuários do sistema.

Acesso via a Tradicional Rede de Distribuição Elétrica

As redes de distribuição elétrica são dimensionadas para transportar *Corrente Alternada* (AC) a baixa frequência e baixa voltagem (no Brasil, 110V ou 220V em 60Hz). Dependendo da capacidade, um transformador, usando distribuição trifásica, pode atender até 300 usuários, 100 em cada fase, num raio de aproximadamente 500m.

A viabilidade de se oferecer serviços de telecomunicações através desta rede está condicionada a adaptações a serem feitas tanto nas proximidades do transformador quanto do usuário. Ao transformador precisam ser adicionados os seguintes componentes: software e hardware para mixar, controlar e adaptar os sinais de comunicações de baixa e alta frequência para disponibilizar comunicações bidirecionais, bem como uma conexão com a Estação Telefônica ou provedor de serviços. O usuário necessita de uma interface capaz de distinguir (usando filtros) os sinais de baixa e alta frequência para poder direcioná-los às portas apropriadas, porta de energia elétrica ou porta de comunicação, respectivamente.

Apesar da rede de distribuição elétrica ser a rede mais capilar dentro do sistema brasileiro, chegando a todas as residências, inclusive bem mais que a rede telefônica, as previsões de mercado para esta solução não são muito otimistas. Isto se deve principalmente aos grandes problemas de interferências a que esta rede (em geral, abertas, sem isolamento) estão sujeitas, a altas frequências. Adicionalmente, a queda efetiva nos custos e o oferecimento de serviços com melhor qualidade faz das soluções via rádio e tecnologias de distribuição óptica uma escolha mais atraente.

Capítulo 4

METODOLOGIA DE PLANEJAMENTO DE REDE

4.1 – Introdução

O setor de telecomunicações vem experimentando uma significativa transformação nos últimos anos. A desregulamentação torna o mercado mais competitivo, enquanto 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 propomos uma metodologia de planejamento para a Rede de Acesso, direcionada à maximização de receita. Ela descreve quais são os procedimentos 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. Os itens 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 (geralmente de 5 a 10 anos) e vários estágios (de 3 em 3 anos, 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 (inclusive telefonia no Brasil) 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.

Se o planejamento se fizer considerando-se somente um estágio (um ano qualquer, por exemplo), podemos concluir que ele será mais simples e a quantidade de dados a ser considerada também diminuirá sensivelmente. A adoção desse procedimento acontece com freqüência, por exemplo quando a EO deseja fazer um planejamento para atendimento imediato de demanda reprimida.

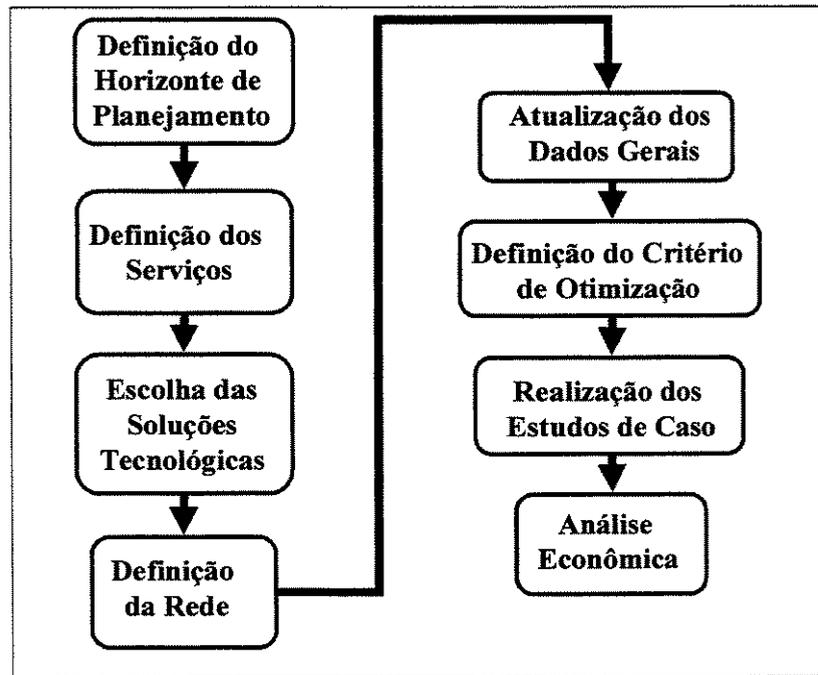


Figura 4.1 –Etapas do planejamento.

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 escolhidos os serviços é possível verificar quais tipos de rede terão condições de suportá-los.

Para cada serviço selecionado (item 2.4), o planejador deverá definir a sua taxa de penetração e a receita (mensal ou anual) estimada por canal para cada estágio do

horizonte de planejamento considerado. Existem poucas fontes confiáveis sobre estas informações.

Num eventual estudo de caso a ser realizado para uma EO, os dados de penetração de serviços poderão ser oferecidos pela própria empresa. Uma fonte de pesquisa, caso a empresa operadora não tenha nenhum tipo de informação, são os estudos desenvolvidos por grupos internacionais, por exemplo [Ims 1997]. No caso particular do Brasil, onde em muitas regiões a demanda pelo serviço de VOZ ainda é reprimida, ela deverá crescer de modo significativo durante o horizonte de planejamento. Além disso, as projeções de demanda variam de região para região ou mesmo de bairro para bairro numa mesma cidade.

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 do avanço tecnológico.

4.4 – Escolha das Soluções Tecnológicas

Conhecendo o cardápio de serviços a ser considerado, 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 ET, 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 xDSL + ROP*: neste cenário a demanda de serviços oferecida aos Nós de Acesso pode ser atendida tanto por rede metálica e modems xDSL quanto pela solução ROP, ou seja, uma parcela da rede continua sendo provida por rede metálica enquanto outra exige a opticalização;
- *Cenário xDSL + APON*: semelhante ao cenário anterior, avalia-se a competitividade entre estas duas tecnologias, de forma a escolher aquela que ofereça os maiores benefícios, seja por exemplo melhor qualidade de serviço ou menor custo.

Como se observa, podemos 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 muito grande, sendo praticamente impossível contemplar todos os cenários. Na prática o planejador deverá analisar quais são os cenários que mais se aproximam da realidade da sua EO, e a partir daí buscar os dados para poder realizar o estudo de caso.

4.5 – Definição da Rede

Conforme discutido no capítulo 2, a área de cobertura da Rede de Acesso é aquela delimitada por uma Área de Estação. Esta 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 possuem como atributos pares metálicos e dutos disponíveis. Existem basicamente três tipos de nós:

- *Nó de Estação*: corresponde ao prédio onde está localizada a central de comutação (ou as centrais);
- *Nó de Acesso*: é um ponto intermediário entre o nó de estação e o usuário, onde estão localizados alguns equipamentos ativos da rede;
- *Nó de Usuário*: é um ponto terminal na rede onde se localiza 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).

4.6 – 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 dito.

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 metro de 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 metro);
 - Subdutos (custo por metro);
 - Ampliação no centro de fios (obras civis);
 - Armário de distribuição com diferentes capacidades, para soluções de rede metálica;
 - Abrigo para Estágio Remoto tipo CEV, para soluções ópticas;
 - 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 da capa do cabo óptico por metro.

Quando o planejamento atinge vários estágios, uma questão importante é a definição da evolução dos custos dos elementos de rede (equipamentos, cabos e infraestrutura) que serão utilizados [Stordahl 1995] [Zaganiaris 1993]. 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 da Rede

Para realizar o planejamento da Rede 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 ET e dos Nós de acesso.

A Figura 4.2 mostra uma Área de Estação 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.

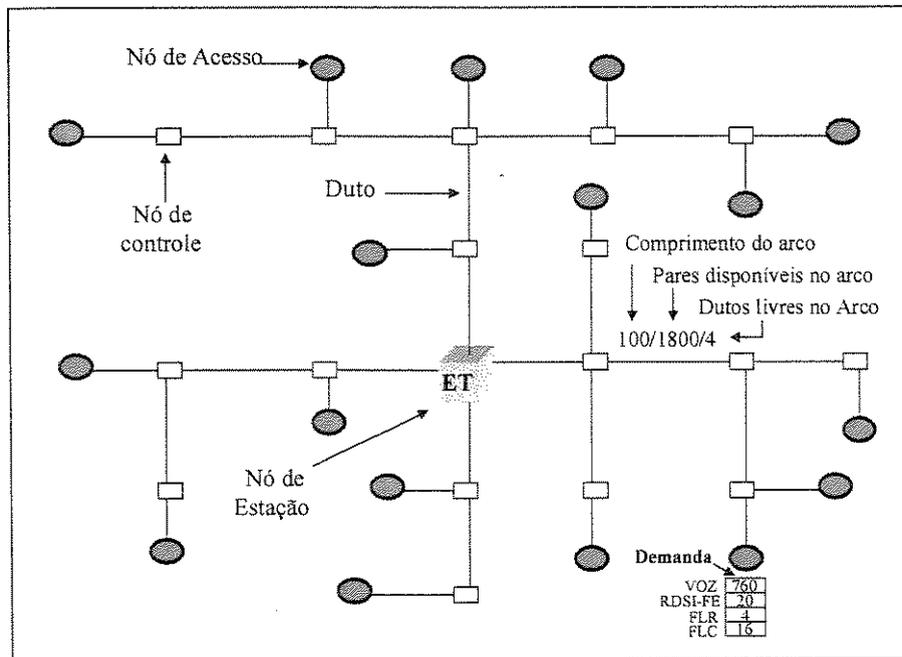


Figura 4.2 – Representação da rede.

4.7 – Definição do Critério de Otimização

Os objetivos a serem alcançados variam de empresa para empresa diante das incertezas de mercado. Mas qualquer que seja a meta o planejamento da rede pode ser realizado de forma otimizada, utilizando-se modelos matemáticos. Os prováveis critérios a serem adotados pelas empresas operadoras estão descritos a seguir.

4.7.1 – Atender Toda a Demanda a um Custo Mínimo

No planejamento de Redes 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 (implantação, operação e manutenção) [Balakrishnan 1991]. Toda a demanda será 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 maximização da receita e, para a maioria dos serviços, sem a necessidade de atendimento de 100% da demanda se o orçamento permitir.

4.7.2 – 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. 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, assume-se que as demandas por cada serviço são perfeitamente conhecidas 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. Isto caracteriza uma estrutura de preços côncava, cuja representação complicaria consideravelmente o modelo.

Maximização de Receita a Custo Mínimo de Implantação

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 outra metodologia de resolução do problema matemático. Deve ser usada alguma das técnicas de Programação com Múltiplos Objetivos. 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 Estação, 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 de alta velocidade. O planejador deverá calcular a demanda de pares em cada arco. Além disso deverá verificar se a capacidade do armário de distribuição atende a demanda. Se não atender, o mesmo deverá ser substituído.

Para as demais soluções cabeadas (exceto Rede Elétrica) prevê-se o lançamento de cabos de fibras ópticas. Para cada equipamento a ser atendido na rede supõe-se a alocação de 6 fibras ópticas, como por exemplo: ER na ROP e ONU na APON.

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 + custo do cabo de maior capacidade com o custo dos cabos sem realizar a emenda. A melhor solução é função do comprimento do arco e do custo da capa do cabo óptico. Quanto maior o arco, maior a possibilidade de se viabilizar a solução utilizando emenda. A Figura 4.3 ilustra esta situação.

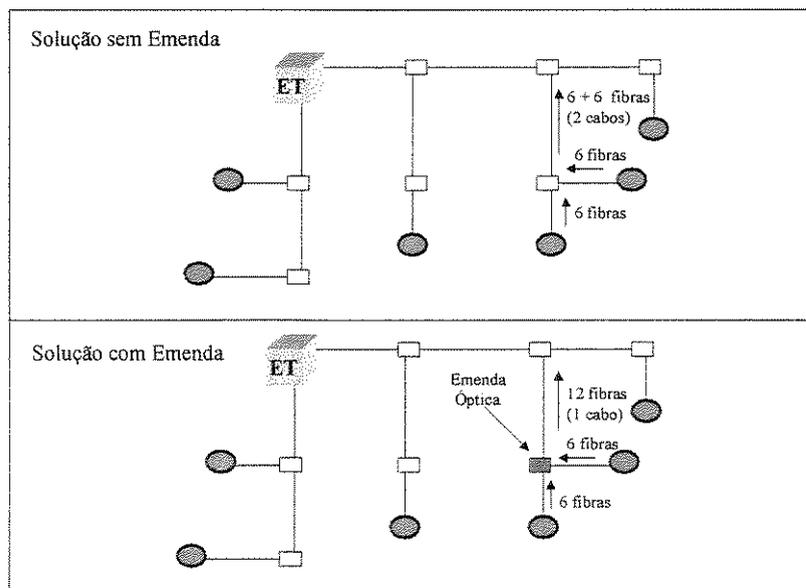


Figura 4.3 – Emenda óptica na rede.

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, será feito então um reforço de canalização lançando-se uma canalização com no mínimo 6 dutos.

No caso de lançamento de pares metálicos precisaremos de 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). Este subduto pode abrigar até 4 cabos ópticos.

Alocação e Dimensionamento de Equipamentos

A alocação e 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 impactar diretamente no

funcionamento dos algoritmos, gerando portanto a necessidade de atualizações, o que muitas vezes não é um procedimento trivial.

- *Alocação utilizando modelos otimizantes*: 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 minimize os custos ou maximize a receita a ser gerada pela rede. O procedimento de candidatar os equipamentos poderá também ser realizado por um algoritmo utilizando processos heurísticos.

Nos capítulos 5 e 6 são propostos modelos otimizantes destinados à alocação de equipamentos e lançamento de cabos para o planejamento da Rede Acesso, num ambiente multi-serviço, considerando as várias soluções tecnológicas, com a abordagem de maximização de receitas, respeitando um limitante de orçamento.

4.9 – Análise Econômica

Quando se desenvolve um planejamento estagiado, 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 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 [Hummel 1992] e [Malley 1992]:

- *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.

Capítulo 5

MODELO GERAL DE MAXIMIZAÇÃO DE RECEITA

5.1 – Introdução

Neste capítulo apresentamos uma visão geral do modelo de maximização de receita para o planejamento da Rede de Acesso, sujeito a um limitante de orçamento. 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 soluções tecnológicas candidatas. Versões preliminares do modelo podem ser encontradas em [deSousa 1999a] e [deSousa 1999b].

5.2 – Premissas de Modelagem

A fim de caracterizar o ambiente de aplicabilidade do modelo, discriminamos 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 oferecimento imediato de uma determinada demanda. O objetivo é buscar um compromisso entre receita e orçamento, analisando a implantação de diversas tecnologias em função das previsões de demandas dos serviços a oferecer em um único período.

Cobertura da rede

Compreende a área geográfica atendida por uma Estação Telefônica. Cada assinante é ligado a uma única estação e não são previstas ligações diretas entre assinantes.

Serviços

São dados de entrada do problema. Para cada serviço, é assumido que os seus valores de demanda, taxa de transmissão e receita são conhecidos.

Rede Existente

É assumido que apenas a rede metálica já está 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 implantação devem ser fornecidos pelo planejador. A estrutura adotada considera apenas os custos de implantação da tecnologia, desconsiderando os custos com operação e manutenção.

Ao longo deste trabalho, sempre que necessário, estas premissas serão retomadas a fim de caracterizar situações particulares para cada solução tecnológica.

5.3 – Representação da Rede

Como já dissemos anteriormente, não são previstas ligações diretas entre os assinantes, ou seja, toda a demanda apresentada à rede através dos seus Nós de

Acesso, e que é efetivamente atendida, é encaminhada à ET. Esse comportamento da demanda e a disposição física da rede sugerem o uso de grafos [Bazaraa 1990] para a sua representação.

Para o planejamento em que consideramos a presença de uma rede metálica instalada, esta representação para cada Nó de Acesso i pode ser conforme a Figura 5.1.

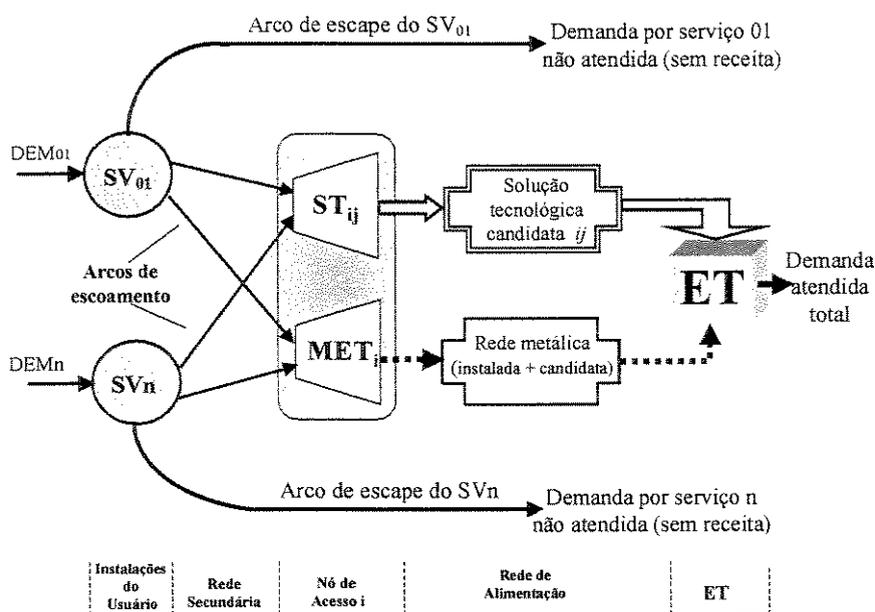


Figura 5.1 – Representação em grafos do modelo geral de maximização de receita.

Nesta representação são considerados os seguintes elementos:

Nós Artificiais de Serviço

Para o cálculo da receita, assume-se que as demandas por cada serviço ($DEM01-DEMn$) são perfeitamente conhecidas. Assim, para cada serviço existe um nó associado ($SV01-SVn$), 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 canais de 2 Mbps.

Nós de Acesso

Neste estudo os *Nós de Acesso* funcionam como pontos de concentração de demanda (podem representar, por exemplo, armários de distribuição da rede metálica), reunindo a demanda proveniente dos *Nós Artificiais de Serviço*. Cada *Nó de Acesso* i é 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" a rede metálica instalada, possibilitando também a sua expansão. No grafo, os *Nós de Acesso* funcionam como nós de passagem.

Nó de Estação

Este nó está fisicamente associado à ET. Toda a demanda efetivamente atendida pela rede é, conseqüentemente, encaminhada para o *Nó de Estação*.

Demanda Atendida Total

Representa a demanda efetivamente atendida pela rede planejada. Devido ao limite de orçamento, ela pode ser inferior à soma das demandas oferecidas aos *Nós Artificiais de Serviço*.

Arcos de Escoamento

Representam os arcos que ligam todos os *Nós Artificiais de Serviço* ($SV_{01}-SV_n$) a todos os *Nós de Acesso* ($Met_i + ST_{ij}$). 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 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 nosso modelo de otimização. Para garantir o atendimento mínimo e para não exceder a demanda efetiva em cada um dos *Nós de Acesso*, os *Arcos de Escoamento* são 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*. A demanda escoada por estes arcos conseqüentemente não é revertida em receita.

Rede Metálica

Este segmento do grafo é utilizado para representar tanto a rede metálica já *instalada* quanto a *candidata*.

Instalada: garante o reconhecimento da infra-estrutura disponível na rede, tais como cabos e dutos.

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 solução xDSL.

Solução Tecnológica Candidata

Representa as diversas soluções tecnológicas possíveis de serem utilizadas para a evolução da Rede de Acesso, exceto a solução xDSL (candidata em conjunto com a rede metálica). Conseqüentemente, na aplicação do modelo, haverá a necessidade de se adaptá-lo às características próprias de cada tecnologia. Esta adaptação pode significar a utilização de nós artificiais e/ou variáveis de decisão específicas para a alocação e dimensionamento de equipamentos, por exemplo: modelagem de anéis unidirecionais na solução ROP (capítulo 6).

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*.

A rede secundária física (cabos) é assumida existente (sem custo) ou tem seu custo calculado a partir de valores médios.

5.4 – Formulação do Modelo Matemático

O modelo matemático formulado é um problema de *Programação Linear Inteira Mista* (PLIM) que utiliza a abordagem nó-arco. As variáveis de decisão do problema se referem (1) ao valor do fluxo nos arcos, e (2) à alocação ou não de facilidades (equipamentos de transmissão, cabos ópticos e metálicos, infra-estrutura) instaláveis em cada arco (ou nó) para o atendimento dos serviços.

O modelo de otimização geral para o dimensionamento da Rede de Acesso apresenta a seguinte formulação:

Maximizar Receita = *Receita Total dos Serviços Oferecidos*

Sujeito a:

- *Restrição de Limite de Orçamento*
- *Restrições de Satisfação de Demanda*
- *Restrições Técnicas de Capacidade*
- *Restrições Adicionais*

As expressões matemáticas podem ser caracterizadas da seguinte forma:

Função Objetivo

A função objetivo (1) se refere à receita gerada pelos serviços oferecidos. É calculada somando-se a receita dos serviços escolhidos, através dos arcos de escoamento.

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

onde :

R(y) : receita total para os serviços oferecidos;

A_E : conjunto de arcos de escoamento;

Y_{si} : variável real associada ao fluxo de demanda escoado pelo arco (s, i) ∈ A_E;

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

Restrição de Limite de Orçamento

A restrição de orçamento (2) assegura que a alocação e dimensionamento dos equipamentos não ultrapasse o orçamento previsto. A primeira parcela da inequação refere-se ao custo de implantação da solução tecnológica X. A segunda parcela refere-se aos custos com expansão em rede metálica. A última parcela refere-se ao custo da rede secundária para a disponibilização dos serviços.

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

Onde:

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

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

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

$\varphi_{ij}^{X,n}$: representa o custo associado à implantação da solução tecnológica X , do tipo n , no arco $(i, j) \in A_{ST}$;

\mathbf{A}_M : conjunto de arcos que podem receber cabos metálicos;

\mathbf{C}_M : conjunto de modularidades de cabos metálicos;

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

$\varphi_{ij}^{M,p}$: representa o custo associado à implantação do cabo metálico M , de modularidade p , no arco $(i, j) \in A_M$;

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

\mathbf{L} : representa o limitante de orçamento.

Restrições de Satisfação de Demanda

As restrições de satisfação de demanda (3) e (4) garantem o balanço de fluxo em todos os nós do grafo, exceto para o nó de estação, por representar uma equação redundante [Bazaraa 1990].

$$\sum_{i \in I_A} Y_{si} + Y_{esc_s} = d_s, \quad \forall s \in I_S \quad (3)$$

$$\sum_{j \in J1} Y_{ij} - \sum_{j \in J2} Y_{ji} = 0, \quad \forall i \in I - I_S \quad (4)$$

Onde:

\mathbf{I} : conjunto de todos os nós do grafo, exceto o nó de estação;

- I_s** : conjunto de nós artificiais correspondentes ao serviços;
- I_A** : conjunto dos nós de acesso;
- J₁** : conjunto de nós j diretamente conectados ao nó i por arcos emanando de i para j ;
- J₂** : conjunto de nós j diretamente conectados ao nó i por arcos emanando de j para i ;
- Y_{si}** : variável real associada ao fluxo de demanda escoado pelo arco $(s, i) \in A_E$;
- Y_{ij}** : variável real associada ao fluxo de demanda escoado pelo arco (i, j) ;
- Yesc_s** : variável real associada ao fluxo de demanda pelo serviço s escoado por um *Arco de Escape*;
- d_s** : demanda pelo serviço s oferecida ao nó $s \in I_s$.

Restrições Técnicas de Capacidade

As restrições de capacidade ocorrem em cada arco previsto pelo planejador. As inequações (5) e (6) asseguram que a soma das capacidades dos equipamentos instalados seja superior ao fluxo escoado pelo arco.

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

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

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 dos cabos metálicos de modularidade p , candidatos (ou instalados) no arco $(i, j) \in A_M$.

Restrições Adicionais

As restrições adicionais estão associadas à modelagem de funcionalidades próprias de algumas soluções tecnológicas, tais como topologias e aspectos de segurança na rede. São utilizadas também no gerenciamento do atendimento dos serviços (por exemplo: restrições de atendimento mínimo e máximo de um serviço em um determinado Nó de Acesso).

5.5 – Procedimentos para Resolver o Problema

Considerando os procedimentos da metodologia apresentada no Capítulo 4, a aplicação do modelo de otimização pode ocorrer conforme representado na Figura 5.2.

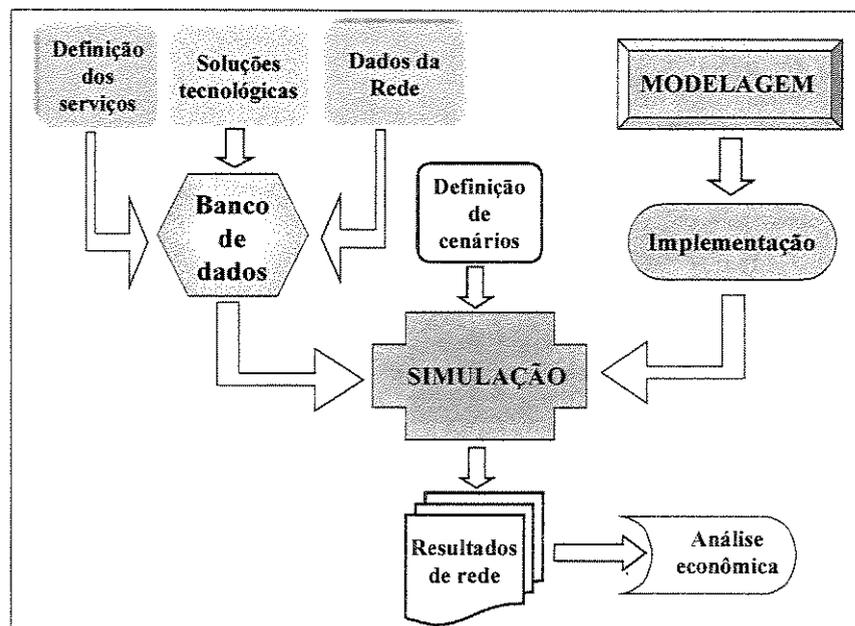


Figura 5.2 – Esquema de aplicação do modelo de otimização no planejamento da Rede de Acesso.

Algumas etapas já foram descritas no capítulo 4, a saber:

- definição dos serviços;
- escolha das soluções tecnológicas;
- dados de rede;

- definição de cenários; e
- análise econômica.

Conforme exposto anteriormente, o modelo proposto para o planejamento da Rede de Acesso pode ser traduzido como um problema de otimização de fluxo em rede com restrições adicionais e variáveis binárias. Atualmente existem vários algoritmos de otimização para resolver este tipo de problema. Podemos citar: Algoritmo SIMPLEX ou de Pontos Interiores [Bazaraa 1990] para problemas de Programação Linear, ou Branch-and-Bound [Nemhauser 1988], Busca Tabu [Glover 1997] ou Algoritmos Genéticos [Michalewicz 1996] para problemas de Programação Inteira. Comercialmente, são encontrados pacotes computacionais que se utilizam de alguns destes algoritmos.

A Figura 5.3 apresenta os procedimentos que utilizamos para desenvolver as etapas: banco de dados, modelagem, implementação e simulação do modelo. Descrevemos a seguir cada um destes procedimentos.

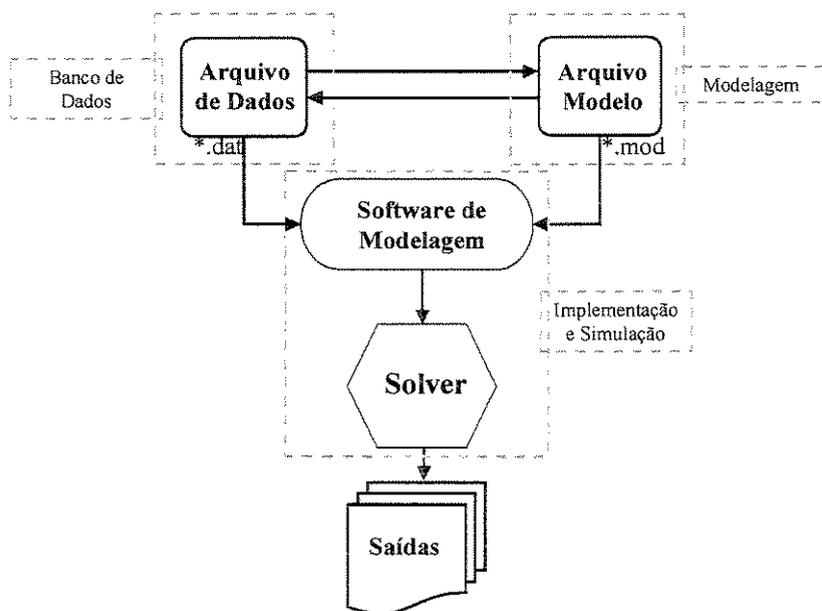


Figura 5.3 – Procedimentos computacionais para resolver o problema.

Arquivo de Dados (*.dat): onde são declarados todos os dados de rede (cabos, infra-estrutura, etc.), de equipamentos (capacidade, custos, etc.) e serviços (penetração, receita, largura de banda, etc.);

Arquivo Modelo (*.mod): onde é gerado o modelo matemático. As definições de cenários, como por exemplo: escolha de tecnologias e definição de topologias, são efetuadas neste arquivo;

Software de Modelagem: cria um projeto a partir dos arquivos de entrada (*Dados e Modelo*). A partir deste projeto são geradas as entradas para o Resolvedor (*Solver*). O software utilizado para a modelagem foi o AMPL [Fourer 1993];

Solver: o resolvedor utilizado foi o CPLEX® [Cplex 1994], que se baseia no algoritmo Branch-and-Bound. Ele recebe o arquivo (projeto) criado pelo *Software de Modelagem*, realiza a busca de soluções, e apresenta os resultados (saídas).

Saídas: para cada cenário especificado no *Arquivo Modelo*, ou alterações no *Arquivo de Dados*, temos um resultado de rede, armazenado em arquivo. Entre as várias informações que este arquivo fornece, podemos citar: alocação e dimensionamento dos equipamentos na rede, a demanda atendida de cada um dos serviços (e por qual solução tecnológica), ocupação dos arcos, e outros.

5.6 – Comentários Adicionais

O modelo desenvolvido pode a princípio ser aplicado a qualquer uma das soluções tecnológicas apresentadas no capítulo 3, exceto para a rede de distribuição elétrica e o acesso via satélite. Nas soluções via rádio terrestre o modelo pode ser utilizado no dimensionamento do segmento ERB-CCSR.

Embora tenham sido apresentadas várias alternativas de evolução da rede, e o modelo seja capaz de contemplá-las simultaneamente, este cenário é pouco provável. Por um lado, temos restrições técnicas: as EOs procuram evitar a adoção de mais de

uma solução tecnológica para uma mesma área de estação, com a finalidade de minimizar problemas de operação na rede. 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.

Controle do Atendimento dos Serviços

Foi mencionado anteriormente (item 5.3) a necessidade de se conhecer a demanda total de cada serviço a ser oferecido pela rede. 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, e ter-se um melhor controle da demanda a ser atendida, há a necessidade de se colocar limites para os fluxos a serem escoados pelos arcos do grafo. Este controle pode ser feito de duas maneiras:

- **Controle de Demanda por Nó de Acesso:** conforme descrito no item 5.3, 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 5.4 apresenta esta configuração de atendimento para um serviço s em um *Nó de Acesso* i . A garantia de que o atendimento estará entre a demanda mínima ($d_{min_{si}}$) e máxima ($d_{max_{si}}$) é assegurada limitando-se a soma das demandas atendidas pela rede metálica (Met_i) e solução tecnológica (ST_{ij}), em cada *Nó de Acesso* i . Nesta configuração, mesmo que um serviço não seja "rentável" em uma determinada Seção de Serviço, garante-se, obrigatoriamente, o seu atendimento mínimo. 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* ($d_{max_{si}}$) 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 (d_{min_s}), através da adoção de limites no *Arco de Escape*. A Figura 5.5 mostra este controle para um serviço s , bem

como a forma de atendimento deste serviço em um *Nó de Acesso i*. A restrição no *Arco de Escape* define os limites para a demanda não atendida (Y_{esc_s}), a qual atingirá no máximo a diferença entre a demanda total prevista (d_s) e a demanda mínima a ser atendida (d_{min_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) os *Nós de Acesso* menos "rentáveis", fato controlado no **Controle de Atendimento por Nó de Acesso**.

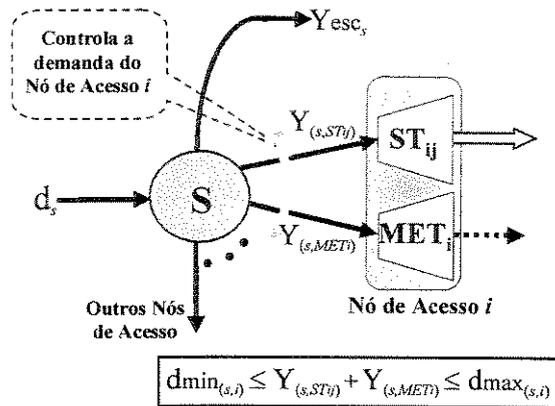


Figura 5.4 - Controle de demanda por Nó de Acesso.

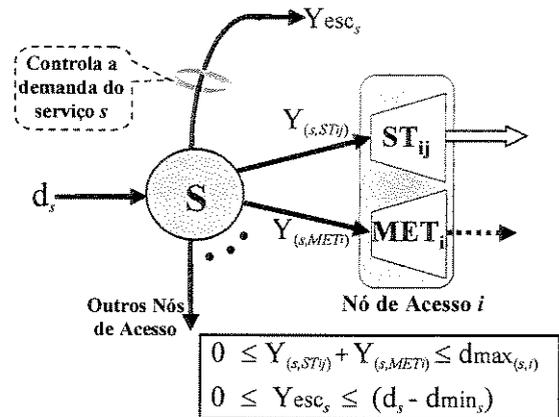


Figura 5.5 - Controle de demanda por serviço.

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. 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.

Primeiramente, a função objetivo (expressão 1, item 5.4) deve ser substituída pela inequação 2 (item 5.4):

Função objetivo

$$\text{Min } C(x, m, y) = \sum_{(i,j) \in A_{ST}} \sum_{n \in N_{STij}} \varphi_{ij}^{X,n} \cdot X_{ijn} + \sum_{(i,j) \in A_M} \sum_{p \in C_M} \varphi_{ij}^{M,p} \cdot M_{ijp} + \sum_{(si) \in A_E} \varphi_{si} \cdot Y_{si}$$

Esta expressão continua contabilizando os custos com a rede a ser implantada, 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 no item 5.4.

As restrições técnicas de capacidade de equipamentos e de satisfação de demanda continuam as mesmas do item 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 ($Y_{esc_s} = 0$). Agora, se o objetivo for 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 ($Y_{esc_s} = d_s - d_{min_s}$), o que assegura o atendimento igual à demanda mínima. O mesmo pode ser feito para qualquer outro nível de atendimento de demanda.

Capítulo 6

MODELOS ESPECÍFICOS

6.1 – Introdução

Neste capítulo apresentamos a modelagem matemática para três possibilidades de evolução de uma Rede de Acesso hoje totalmente metálica, capaz de oferecer apenas serviços de VOZ.

Por ser uma tecnologia com elevado grau de maturidade e uma das mais adotadas pelas empresas operadoras brasileiras [Silva 1997] [Martinelli 1997], a solução ROP é a primeira a ser considerada.

A segunda é a APON, que apesar de ser uma tecnologia recente, apresenta-se como forte opção de evolução, devido principalmente à possibilidade de uma comutação ATM mais próxima do usuário (na ONU) e às fortes previsões de queda de preços. Por permitir um maior compartilhamento dos equipamentos, a configuração adotada para a solução APON é a FTTC.

Uma vez que a rede metálica instalada representa um enorme patrimônio para as empresas operadoras e a sua vida útil, para o oferecimento de novos serviços, pode ser prolongada através da tecnologia xDSL, ela será considerada como terceira possibilidade, a ser confrontada com as anteriores.

Para fins de modelagem, descrevemos inicialmente as premissas adotadas quanto ao dimensionamento de equipamentos e infra-estrutura de cada tecnologia no sentido de preparar a rede para oferecer os serviços de VOZ, RDSI, FLR e FLC. Em seguida apresentamos os modelos *xDSL versus ROP* e *xDSL versus APON-FTTC*.

6.2 – Expansão em xDSL

Equipamentos

O meio físico de transmissão continua sendo a rede metálica. Os equipamentos exigidos para o oferecimento dos serviços estão na Tabela 6.1, e encontram-se detalhados no item 3.2. Vale lembrar que o serviço de VOZ não exige equipamentos adicionais.

Equipamento	Local	Serviço
Interface RDSI	Usuário	RDSI
ADSL	Usuário e ET	FLR
Set Top	Usuário	FLR
HDSL	Usuário e ET	FLC

Tabela 6.1 - Equipamentos exigidos pela solução xDSL.

Infra-estrutura

Substituição de Armários

Consideramos inicialmente que os armários de distribuição instalados 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 (1650 usuários). 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. Adotamos também um custo compartilhado, ou seja, para cada Nó de Acesso associamos o custo de implantação de um único duto, e não o custo total de uma canalização de 6 dutos, conforme apresentado no item 4.8.

6.3 – Expansão em ROP

Equipamentos

A transmissão entre a ET e o ER é feita utilizando-se fibra óptica, enquanto a rede secundária (ER-usuário) continua sendo atendida por pares metálicos, considerados existentes. Os equipamentos exigidos por esta solução tecnológica são os da Tabela 6.2 e estão detalhados no item 3.3.1.

Equipamento	Local	Serviço
Multiplexadores OLTM	ER e ET	Compartilhado
Multiplexadores ADM	ER e ET	Compartilhado
Interface RDSI	Usuário	RDSI
ADSL	Usuário e ER	FLR
Set Top	Usuário	FLR
HDSL	Usuário e ER	FLC

Tabela 6.2 - Equipamentos exigidos pela solução ROP.

Infra-estrutura

Estágio Remoto

Para cada ER é alocado um armário óptico ou abrigo tipo CEV com banco de baterias, conversores de energia e climatização (se necessário).

Lançamento da Rede Óptica

Para cada ER são alocadas 6 fibras em dutos subterrâneos. Se a solução escolhida for estrela (Figura 3.4) o comprimento do cabo é igual à distância entre a ET e o ER. Para a solução em anel (Figura 3.5) esse comprimento é igual à metragem necessária para interligar todos os ER candidatos a fazerem parte do anel. Assim como na solução metálica, são desconsideradas as situações de emendas.

Lançamento de Subdutos

São considerados subdutos que possibilitam o lançamento de até 4 cabos ópticos por duto. O cálculo da metragem necessária é feita para cada ER. 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 emendas de cabos ópticos em uma 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.

6.4 – Expansão em APON-FTTC

Equipamentos

A estrutura geral de uma rede APON-FTTC é descrita no item 3.3.2. A Tabela 6.3 apresenta os principais equipamentos exigidos por esta solução.

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

Tabela 6.3 - Equipamentos exigidos pela solução APON-FTTC.

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 ET-Nó de Acesso. Para a segmento Nó de Acesso-ONUs são adotados cabos aéreos, e a metragem necessária é obtida através de uma estimativa de distância média entre eles.

Rede Secundária

Diferentemente da solução ROP, a solução APON-FTTC não utiliza os modems ADSL e HDSL na 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

O dimensionamento dos subdutos a serem alocados no link ET-Nó de Acesso é idêntico ao apresentado para a topologia estrela da solução ROP.

Alocação de Splitters

O número de splitters por APON-FTTC, bem como a sua localização, deve ser fornecido pelo planejador.

6.5 – O Modelo xDSL versus ROP

6.5.1 – Representação em Grafos do Modelo xDSL versus ROP

A Figura 6.1 apresenta o grafo para um *Nó de Acesso i*.

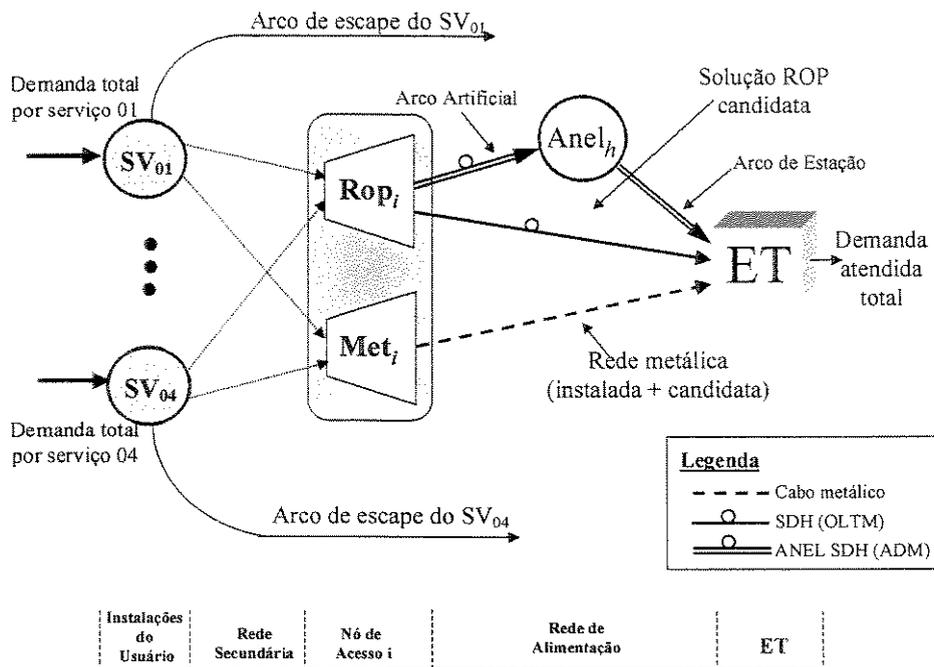


Figura 6.1 - Modelo xDSL versus ROP.

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 solução ROP. Cada *Nó de Acesso i* pode ser atendido tanto por ROP (Rop_i) quanto pela tecnologia xDSL (Met_i), ou ambas.

Na solução ROP, a modelagem de cada anel unidirecional exige a utilização de um *Nó Artificial* ($Anel_h$) para representá-lo [Formigoni 1995]. A este nó são ligados todos os *Nós de Acesso* Rop_i (ERs) candidatos a fazerem parte do anel. O *Arco Artificial* Rop_i - $Anel_h$ é utilizado para dimensionar o equipamento ADM candidato no ER, bem como contabilizar os custos. O *Arco de Estação* $Anel_h$ - ET possibilita o

dimensionamento do equipamento ADM candidato na ET, além de garantir o controle da capacidade do anel e permitir o cálculo do custo da infra-estrutura e cabos ópticos exigidos por esta topologia. É aconselhável que o equipamento da ET seja candidatado com sua capacidade máxima (o que determina a capacidade do anel), enquanto os ADMs dos ERs, apesar da exigência de possuírem a taxa de transmissão do agregado idêntica à da ET, podem apresentar modularidades variadas; isto vai depender da demanda prevista para o Nó de Acesso.

A topologia estrela está representada pelos arcos Rop_i-ET , necessários para o dimensionamento dos equipamentos OLTMs, a serem alocados no ER e ET.

Como os modems xDSL são comuns às duas tecnologias, e são dedicados a cada serviço individualmente, eles serão contabilizados através da rede secundária.

As demandas nos *Nós Artificiais de Serviço* – SV_{01} (VOZ), SV_{02} (RDSI), SV_{03} (FLR) e SV_{04} (FLC) – devem ser apresentadas em uma mesma unidade, com por exemplo número de assinantes previstos para cada serviço.

6.5.2 – O Modelo Matemático xDSL versus ROP

Função Objetivo

A função objetivo é a mesma do modelo geral (item 5.4).

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

Onde :

R(y) : receita total para os serviços oferecidos;

A_E : conjunto de arcos de escoamento;

Y_{si} : variável real associada ao fluxo de demanda escoado pelo arco $(s, i) \in A_E$;

r_{si} : receita unitária do serviço s oferecido ao Nó de Acesso i .

Restrição de Limite de Orçamento

A restrição (2) assegura que a alocação e dimensionamento dos equipamentos não vai ultrapassar o orçamento previsto. A primeira parcela da inequação refere-se ao custo de implantação do sistema ponto-a-ponto OLTM (equipamentos + cabos de fibras + subdutos). A segunda e terceira parcelas referem-se aos custos dos sistemas em anel (ADMs + cabos de fibras + subdutos). A quarta parcela contabiliza os custos com armários ópticos. A quinta parcela refere-se aos custos com rede metálica (armário + cabos + dutos). A última parcela refere-se ao custo da rede secundária para a disponibilização dos serviços.

$$\begin{aligned} & \sum_{(i,j) \in A_0} \sum_{n \in NO_{ij}} \varphi_{ij}^{X,n} . X_{ijn} + \sum_{(i,j) \in A_A} \sum_{h \in NL} \sum_{n \in NA_{ij}} c_{ijn} . Z_{ijn} + \sum_{(i,j) \in A_{ET}} \sum_{h \in NL} \varphi_{ijh}^Z . Z_{ijh} \\ & + \sum_{r \in I_R} c_r^{AO} . W_r + \sum_{(i,j) \in A_M} \sum_{p \in C_M} \varphi_{ij}^{M,p} . M_{ijp} + \sum_{(s,i) \in A_E} c_{si} . Y_{si} \leq L \end{aligned} \quad (02)$$

Para:

$$\begin{aligned} \varphi_{ij}^{X,n} &= [c_{ijn} + (c_{ij}^F + c_{ij}^{SD}) . cm_{ij}] \\ \varphi_{ijh}^Z &= [c_{ijh} + f_h^F . (c_h^F + c_h^{SD})] \\ \varphi_{ij}^{M,p} &= [c_{ij}^{AC} + (c_{ijp}^{CC} + (1 - fdd_{ij}) . c_{ij}^D) . cm_{ij}] \end{aligned}$$

Onde :

A₀ : conjunto de arcos que podem receber sistemas OLTM (na Figura 6.1, são os arcos Rop_i-ET);

NO_{ij} : conjunto de sistemas OLTM candidatos no arco $(i, j) \in A_0$;

X_{ijn} : variável binária associada à instalação do sistema OLTM do tipo n , candidato no arco $(i, j) \in A_0$;

$\varphi_{ij}^{X,n}$: representa os custos associados à implantação do sistema OLTM do tipo n , candidato no arco $(i, j) \in A_0$;

- \mathbf{C}_{ijn} : custo do par de equipamentos OLTM do tipo n , candidato no arco $(i, j) \in A_0$;
- \mathbf{C}_{ij}^F : custo, por unidade de comprimento, do cabo óptico candidato no arco $(i, j) \in A_0$;
- \mathbf{C}_{ij}^{SD} : custo, por unidade de comprimento, do subduto candidato no arco $(i, j) \in A_0$;
- \mathbf{cm}_{ij} : comprimento do arco $(i, j) \in A_0$;
- \mathbf{A}_A : conjunto de arcos que podem receber equipamentos ADM (na Figura 6.1, são os *Arcos Artificiais*);
- \mathbf{NL} : conjunto dos anéis candidatos;
- \mathbf{NA}_{ij} : conjunto de sistemas ópticos ADM candidatos no arco $(i, j) \in A_A$;
- \mathbf{Z}_{ijhn} : variável binária associada à instalação do sistema óptico ADM de modularidade n , pertencente ao anel h , candidato no arco $(i, j) \in A_A$;
- \mathbf{C}_{ijhn} : custo do sistema ADM de modularidade n , pertencente ao anel h , candidato no arco $(i, j) \in A_A$;
- \mathbf{A}_{ET} : conjunto de arcos que podem receber os equipamentos ADM da ET (na Figura 6.1, são os *Arcos de Estação*);
- \mathbf{Z}_{ijh} : variável binária associada à instalação do sistema óptico ADM do anel h , candidato no arco $(i, j) \in A_{ET}$;
- φ_{ijh}^Z : representa os custos associados à implantação do anel h , candidato no arco $(i, j) \in A_{ET}$;
- \mathbf{C}_{ijh} : custo do equipamento ADM do anel h , candidato no arco $(i, j) \in A_{ET}$;
- f_h^F : comprimento total de cabo óptico exigido pelo anel h ;
- \mathbf{C}_h^F : custo, por unidade de comprimento, do cabo óptico candidato no anel h ;

- C_h^{SD} : custo, por unidade de comprimento, do subduto candidato no anel h ;
- I_R : conjunto de nós correspondentes aos Nós de Acesso pela ROP;
- W_r : variável binária associada à instalação de armário óptico no nó $r \in I_R$;
- C_r^{AO} : custo de instalação do armário óptico candidato no nó $r \in I_R$;
- A_M : conjunto de arcos que podem receber cabos metálicos;
- C_M : conjunto de modularidades de cabos metálicos;
- M_{ijp} : variável binária associada à instalação do cabo metálico de modularidade p , candidato no arco $(i, j) \in A_M$;
- $\varphi_{ij}^{M,p}$: representa os custos associados à implantação do cabo metálico de modularidade p , candidato no arco $(i, j) \in A_M$;
- C_{ij}^{AC} : custo do armário metálico candidato no arco $(i, j) \in A_M$;
- C_{ijp}^{CC} : custo, por unidade de comprimento, do cabo metálico de modularidade p , candidato no arco $(i, j) \in A_M$;
- C_{ij}^D : custo, por unidade de comprimento, do duto candidato no arco $(i, j) \in A_M$;
- fd_{ij} : parâmetro que representa a disponibilidade de dutos do arco $(i, j) \in A_M$;
- c_{si} : custo da rede secundária para a disponibilização do serviço do tipo s oferecido ao Nó de Acesso i ;
- L : limitante de orçamento.

Restrições de Satisfação de Demanda

As restrições (3), (4), (5) e (6) modelam o balanço de fluxo nos nós.

A equação (3) contempla os nós artificiais de serviço.

A equação (4) controla a entrada da demanda nos nós de acesso da ROP. Os coeficientes 1/30 e 1/13 são necessários para a conversão da unidade de demanda dos serviços faixa-estreita para canais de 2 Mbps (item 2.4) – unidade de medida utilizada no dimensionamento dos equipamentos OLTM e ADM. Adicionalmente, a duplicidade de Y_{S3i} e Y_{S4i} garante a contabilização do serviço de VOZ oferecido conjuntamente com os serviços FLR e FLC. Apesar de serem disponibilizados através de um mesmo enlace metálico atendido por modems xDSL, os serviços FLR + VOZ e FLC + VOZ são gerenciados separadamente na ET, e que por isso, precisam ser multiplexados de forma distinta nos equipamentos OLTM e ADM da solução ROP.

A equação (5) está associada ao controle da demanda nos nós artificiais de anéis. O fluxo de demanda que chega nestes nós já foi convertido em canais de 2 Mbps.

Por fim, a equação (6) controla a entrada da demanda nos nós de acesso pela rede metálica. O coeficiente 2 em Y_{S4i} é devido ao fato de que este serviço exige um modem HDSL que demanda dois pares metálicos para efetuar a sua conexão.

$$\sum_{i \in (I_R \cup I_M)} Y_{si} + Y_{esc\ s} = d_s, \quad \forall s \in I_s \quad (3)$$

$$\sum_{j \in J1} Y_{ij} - \left[\frac{1}{30} (Y_{S1i} + Y_{S3i} + Y_{S4i}) + \frac{1}{13} Y_{S2i} + Y_{S3i} + Y_{S4i} \right] = 0, \quad \forall i \in I_R \quad (4)$$

$$\sum_{j \in J1} Y_{ij} - \sum_{j \in J2} Y_{ji} = 0, \quad \forall i \in I_A \quad (5)$$

$$\sum_{j \in J1} Y_{ij} - [Y_{S1i} + Y_{S2i} + Y_{S3i} + 2.Y_{S4i}] = 0, \quad \forall i \in I_M \quad (6)$$

Onde:

I_s : conjunto dos nós artificiais correspondentes ao serviços;

I_R : conjunto dos Nós de Acesso pela ROP;

I_M : conjunto dos Nós de Acesso pela rede metálica;

Y_{si} : variável real associada ao fluxo de demanda escoado pelo arco (s, i) ;

- Yesc_s** : variável real associada ao fluxo de demanda do serviço s escoado por um *Arco de Escape*;
- d_s** : demanda oferecida ao nó $s \in I_S$;
- J₁** : conjunto de nós j diretamente conectados ao nó i por arcos emanando de i para j ;
- Y_{ij}** : variável real associada ao fluxo de demanda escoado pelo arco (i, j) ;
- Ys_{ji}** : variável real associada ao fluxo de demanda do serviço s_j oferecido ao Nó de Acesso i ;
- I_A** : conjunto dos nós artificiais de anéis;
- J₂** : conjunto de nós j diretamente conectados ao nó i por arcos emanando de j para i .

Restrições Técnicas de Capacidade

As restrições de capacidade nos arcos são representadas pelas inequações (7), (8) (9) e (10), e estão relacionadas com a capacidade dos cabos metálicos e aos equipamentos OLTMs e ADM da solução ROP. Vale ressaltar que a discriminação dos arcos é necessária devido à forma diferenciada de atendimento da demanda pelas duas tecnologias.

Em (7) controlamos os enlaces ponto-a-ponto conforme a capacidade dos OLTMs candidatos. Em (8) definimos a capacidade dos ADMs nos ERs. Através da inequação (9) temos o controle da capacidade do anel ao dimensionar o ADM candidato na ET. E por fim, a capacidade da rede metálica é obedecida na inequação (10), na qual o parâmetro fdc_{ij} possibilita um planejamento com diferentes níveis de folga na rede.

$$\sum_{n \in NO_{ij}} \text{cap}_{ijn} \cdot X_{ijn} \geq Y_{ij} \geq 0 \quad , \quad \forall (i, j) \in A_O \quad (7)$$

$$\sum_{h \in NL} \sum_{n \in NA_{ij}} \text{cap}_{ijhn} \cdot Z_{ijhn} \geq Y_{ij} \geq 0 \quad , \quad \forall (i, j) \in A_A \quad (8)$$

$$\sum_{h \in NL_{ij}} \text{cap}_{ijh} \cdot Z_{ijh} \geq Y_{ij} \geq 0, \quad \forall (i, j) \in A_{ET} \quad (9)$$

$$\left(\text{pi}_{ij} + \sum_{p \in C_M} [\text{pc}_{ijp} \cdot M_{ijp}] \right) \cdot (1 - \text{fdc}_{ij}) \geq Y_{ij} \geq 0, \quad \forall (i, j) \in A_M \quad (10)$$

Onde :

Cap_{ijh} : capacidade do sistema OLTM do tipo n , candidato no arco $(i, j) \in A_O$;

Cap_{ijhn}: capacidade do sistema ADM de modularidade n , pertencente ao anel h , candidato no arco $(i, j) \in A_A$;

Cap_{ijh}: capacidade do sistema ADM do anel h , candidato no arco $(i, j) \in A_{ET}$;

pi_{ij} : quantidade de pares metálicos instalados no arco $(i, j) \in A_M$;

pc_{ijp} : quantidade de pares metálicos disponíveis no cabo de modularidade p , candidato no arco $(i, j) \in A_M$;

fdc_{ij} : (fator de disponibilidade de cabos) parâmetro que representa o controle da folga dos cabos metálicos nos arcos $(i, j) \in A_M$.

Restrições Adicionais

As restrições (11) estão relacionadas à modelagem de anéis unidirecionais, assegurando o vínculo entre os ADMs que fazem parte de um mesmo anel. Elas garantem que um determinado ADM de um anel h só será alocado no ER se o ADM deste anel na estação já estiver sido alocado.

As restrições (12) e (13) garantem a existência de um armário óptico sempre que um sistema OLTM ou ADM for alocado em um ER.

As restrições (14), através dos *Arcos de Escoamento*, controlam o atendimento da demanda em cada Nó de Acesso. A demanda escoada tanto por rede metálica quanto por ROP, ou ambas, estará limitada pelas previsões de valores máximo e mínimo do nó. Observe que estamos adotando o **Controle de Demanda por Nó de Acesso**, descrito no item 5.6.

$$Z_{ijhn} \leq Z_{jkh}, \quad \forall (i, j) \in A_A, \quad \forall (j, k) \in A_{ET}, \quad \forall n \in NA_{ij}, \quad \forall h \in NL \quad (11)$$

$$W_i - X_{ijn} \geq 0, \quad \forall n \in NO_{ij}, \quad \forall j \in J_1 \quad (12)$$

$$W_i - Z_{ijhn} \geq 0, \quad \forall (i, j) \in A_A, \quad \forall n \in NA_{ij}, \quad \forall h \in NL \quad (13)$$

$$dmin_{sij} \leq Y_{si} + Y_{sj} \leq dmax_{sij}, \quad \forall (i, j) \in I_{RM} \quad (14)$$

Onde:

I_{RM} : conjunto dos Nós de Acesso compostos por um Nó de Acesso da solução ROP ($i \in I_R$) e um Nó de Acesso da solução metálica ($j \in I_M$);

$dmin_{sij}$: demanda mínima do serviço s para o Nó de Acesso $(i, j) \in I_{RM}$;

$dmax_{sij}$: demanda máxima do serviço s para o Nó de Acesso $(i, j) \in I_{RM}$.

6.6 – O Modelo xDSL *versus* APON-FTTC

6.6.1 – Representação em Grafos do Modelo xDSL *versus* APON-FTTC

Na solução APON-FTTC a fibra chega mais próxima do usuário, indo além dos limites do Nó de Acesso (item 3.3.2). Nesta configuração, parte da rede secundária será opticalizada e parte continuará metálica. Esta situação, para cada Nó de Acesso, pode ser representada conforme a Figura 6.2.

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. Devido à falta de dados, consideraremos uma distância média entre o *Nó de Acesso* e as ONUs.

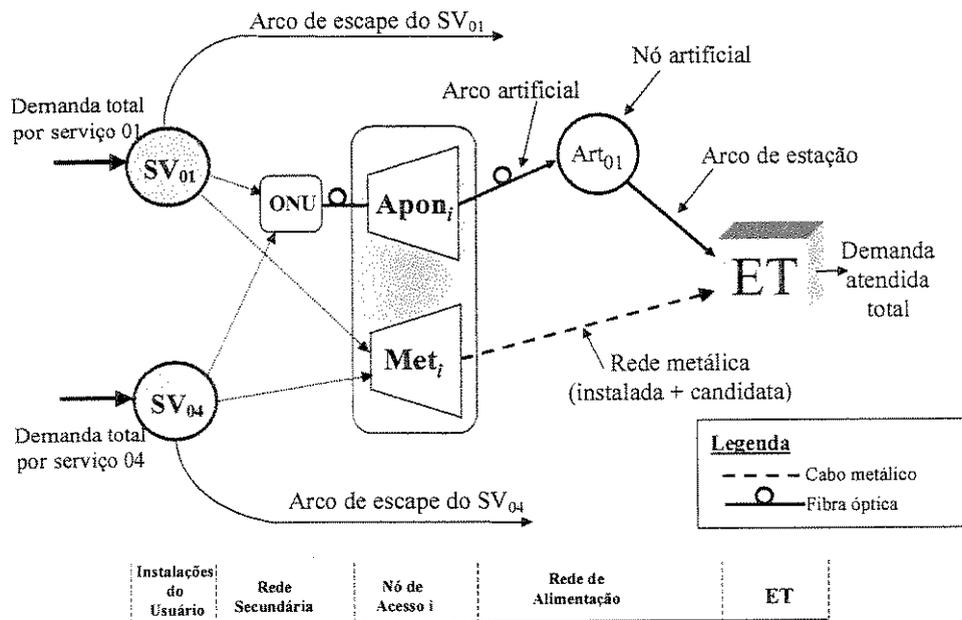


Figura 6.2 - Modelo xDSL versus APON-FTTC.

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 ($Apon_i$) será encaminhada a este nó. O dimensionamento das ONUs, cabos ópticos e infra-estrutura é realizado através do *Arco Artificial* ($Apon_i - Art_{01}$). O *Arco de Estação* ($Art_{01} - ET$) é utilizado para dimensionar os equipamentos na ET, especificamente os OLTs e as interfaces ODNIs.

Assim como no modelo do item anterior, o número de assinantes de cada serviço deve ser a unidade de demanda a ser apresentada aos *Nós Artificiais de Serviço*.

6.6.2 – O Modelo Matemático xDSL versus APON-FTTC

Função Objetivo

A função objetivo é a mesma do modelo geral (item 5.4).

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

Onde :

R(y) : receita total para os serviços oferecidos;

A_E : conjunto de arcos de escoamento;

Y_{si} : variável real associada ao fluxo de demanda escoado pelo arco $(s, i) \in A_E$;

r_{si} : receita unitária do serviço s oferecido ao Nó de Acesso i .

Restrição de Limite de Orçamento

A inequação (2) representa a restrição de orçamento. O primeira parcela refere-se ao custo de implantação de OLTs na ET. A segunda contabiliza o custo de implantação de ONUs. A terceira refere-se ao custo de alocação de ODNIs. A quarta representa o custo de infra-estrutura e cabos ópticos para alimentar os Nós de Acesso da rede APON-FTTC. A quinta está associada ao custo dos equipamentos da rede secundária para o provimento dos serviços pela rede APON-FTTC. A sexta representa os custos da rede metálica para a alimentação dos armários de distribuição. A última parcela contabiliza os custos com a rede secundária para a disponibilização dos serviços pela rede metálica.

Devemos observar que, em (2), o número de OLTs, ONUs e ODNIs é inteiro. A representação binária adotada visa facilitar a resolução do problema, deixando-o dependente apenas das variáveis 0-1 (exemplo: $5 = 2^0 \cdot X_0 + 2^1 \cdot X_1 + 2^2 \cdot X_2$, com $X_0=1$, $X_1=0$, $X_2=1$).

$$\begin{aligned} & \sum_{n \in N1} c^{X,n} \cdot \left[\sum_{k_1 \in \Psi} 2^{k_1} \cdot X_{nk_1} \right] + \sum_{(i,j) \in A_A} \sum_{n \in N2_{ij}} \varphi_{ij}^{O,n} \cdot \left[\sum_{k_2 \in \Psi} 2^{k_2} \cdot O_{ijnk_2} \right] + \sum_{n \in N3} \varphi^{Z,n} \cdot \left[\sum_{k_3 \in \Psi} 2^{k_3} \cdot Z_{nk_3} \right] + \\ & + \sum_{i \in I_F} \varphi_i^W \cdot W_i + \sum_{(s,i) \in A_{EF}} c_{si} \cdot Y_{si} + \sum_{(i,j) \in A_M} \sum_{p \in C_M} \varphi_{ij}^{M,p} \cdot M_{ijp} + \sum_{(s,i) \in A_{EM}} c_{si} \cdot Y_{si} \leq L \end{aligned} \quad (2)$$

Para :

$$\varphi_{ij}^{O,n} = (c_{ijn}^O + (c^{FO} \cdot cm^{DO}))$$

$$\varphi^{Z,n} = (c_n^{ODNI} + ns \cdot c^{SP})$$

$$\varphi_i^W = [c_i^{Ab} + (c_i^{FD} + c_i^{SD}) \cdot cm_i^{ED}]$$

$$\varphi_i^{M,p} = [c_{ij}^{AC} + (c_{ijp}^{CC} + (1 - fdd_{ij}) \cdot c_{ij}^D) \cdot cm_{ij}]$$

Onde :

A_{ET} : arco que pode receber equipamentos OLT e ODNI (na Figura 6.2, é o *Arco de Estação*);

N₁ : conjunto de sistemas OLT candidatos no arco A_{ET};

Ψ : conjunto dos números naturais {0, 1, 2, 3, 4, 5, ...};

X_{nk₁} : variável binária de ordem k_1 associada à instalação do sistema OLT do tipo n , candidato no arco A_{ET};

c^{X,n} : custo de instalação do sistema OLT do tipo n , candidato no arco A_{ET};

A_A : conjunto de arcos que podem receber ONUs (na Figura 6.2, são os *Arcos Artificiais*);

N_{2_{ij}} : conjunto de ONUs candidatas no arco $(i, j) \in A_A$;

O_{ijnk₂} : variável binária de ordem k_2 associada à instalação da ONU do tipo n , candidata no arco $(i, j) \in A_A$;

ϕ_{ij}^{O,n} : representa os custos associados à implantação da ONU do tipo n , candidata no arco $(i, j) \in A_A$;

c_{ijn}^O : custo da ONU do tipo n , candidata no arco $(i, j) \in A_A$;

c^{FO} : custo, por unidade de comprimento, do cabo óptico para alimentação da ONU a partir do Nó de Acesso;

- cm^{DO} : distância média considerada entre a ONU e o Nó de Acesso da rede APON-FTTC;
- N3** : conjunto de ODNI's candidatas no arco A_{ET} ;
- Z_{nk_3} : variável binária de ordem k_3 associada à instalação da ODNI do tipo n , candidata no arco A_{ET} ;
- $\varphi^{Z,n}$: representa os custos associados à implantação da ODNI do tipo n , candidata no arco A_{ET} ;
- C_n^{ODNI} : custo da ODNI do tipo n , candidata no arco A_{ET} ;
- ns** : número de splitters por ODNI candidados no arco A_{ET} ;
- C^{SP} : custo do splitter SP , candidato no arco A_{ET} ;
- I_F** : conjunto de nós correspondentes aos Nós de Acesso pela rede APON-FTTC;
- W_i** : variável binária associada à implantação do Nó de Acesso $i \in I_F$;
- φ_i^W : representa os custos associados à implantação do Nó de Acesso $i \in I_F$;
- C_i^{Ab} : custo de implantação de abrigo para o Nó de Acesso candidato no nó $i \in I_F$;
- C_i^{FD} : custo, por unidade de comprimento, do cabo óptico que liga o nó $i \in I_F$ à ET;
- C_i^{SD} : custo, por unidade de comprimento, do subduto que liga o nó $i \in I_F$ à ET;
- cm_i^{ED} : distância entre o nó $i \in I_F$ e a ET;
- A_{ET}** : conjunto de arcos de escoamento para a rede APON-FTTC;

- C_{si}** : custo da rede secundária para a disponibilização do serviço do tipo s oferecido ao Nó de Acesso i , através do arco $(s, i) \in A_{EF}$;
- A_M** : conjunto de arcos que podem receber cabos metálicos;
- C_M** : conjunto de modularidades de cabos metálicos;
- M_{ijp}** : variável binária associada à instalação do cabo metálico de modularidade p , candidato no arco $(i, j) \in A_M$;
- $\varphi_{ij}^{M,p}$: representa os custos associados à implantação do cabo metálico de modularidade p , candidato no arco $(i, j) \in A_M$;
- C_{ij}^{AC}** : custo do armário metálico candidato no arco $(i, j) \in A_M$;
- C_{ijp}^{CC}** : custo, por unidade de comprimento, do cabo metálico de modularidade p , candidato no arco $(i, j) \in A_M$;
- C_{ij}^D** : custo, por unidade de comprimento, do duto candidato no arco $(i, j) \in A_M$;
- cm_{ij}** : comprimento do arco $(i, j) \in A_M$;
- fd_{ij}** : parâmetro que representa a disponibilidade de dutos do arco $(i, j) \in A_M$;
- A_{EM}** : conjunto de arcos de escoamento para a rede metálica;
- C_{si}** : custo da rede secundária para a disponibilização do serviço do tipo s oferecido ao Nó de Acesso i , através do arco $(s, i) \in A_{EM}$;
- L** : limitante de orçamento.

Restrições de Satisfação de Demanda

As inequações (3), (4) e (5) modelam o balanço de fluxo nos nós, sendo que (3) representa os nós artificiais de serviço, (4) os nós da rede APON-FTTC e (5) os nós da rede metálica, onde a utilização do coeficiente 2 deve-se à obrigatoriedade de se utilizar dois pares metálicos para se conectar os modems HDSL. Diferentemente do

modelo apresentado no item anterior, aqui não há conversão de unidades de demanda; ela se mantém em número de assinantes por todo o grafo.

$$\sum_{i \in (I_F \cup I_M)} Y_{si} + Y_{esc_s} = d_s, \quad \forall s \in I_s \quad (3)$$

$$\sum_{j \in J_1} Y_{ij} - \sum_{j \in J_2} Y_{ji} = 0, \quad \forall i \in (I_F \cup I_A) \quad (4)$$

$$\sum_{j \in J_1} Y_{ij} - [Y_{S1i} + Y_{S2i} + Y_{S3i} + 2.Y_{S4i}] = 0, \quad \forall i \in I_M \quad (5)$$

Onde :

- I_s** : conjunto dos nós artificiais correspondentes aos serviços;
- I_F** : conjunto dos Nós de Acesso pela rede APON-FTTC;
- I_M** : conjunto dos Nós de Acesso pela rede metálica;
- Y_{si}** : variável real associada ao fluxo de demanda escoado pelo arco (s, i);
- Y_{esc_s}** : variável real associada ao fluxo de demanda do serviço s escoado por um *Arco de Escape*;
- d_s** : demanda oferecida ao nó s ∈ I_s;
- I_A** : único nó artificial do grafo, utilizado para controle do fluxo atendido pela rede APON-FTTC;
- J₁** : conjunto de nós j diretamente conectados ao nó i por arcos emanando de i para j;
- J₂** : conjunto de nós j diretamente conectados ao nó i por arcos emanando de j para i;
- Y_{ij}** : variável real associada ao fluxo de demanda escoado pelo arco (i, j);
- Y_{s_ji}** : variável real associada ao fluxo de demanda do serviço s_j oferecido ao Nó de Acesso i.

Restrições Técnicas de Capacidade

São restrições associadas à capacidade dos três principais equipamentos (ONU, ODNI, OLT) da solução APON-FTTC, além da rede metálica.

a) Restrições de Capacidade da ONU

As inequações (6) e (7) garantem que a capacidade total das ONUs alocadas no arco suportará o fluxo a ser escoado pelo mesmo, sendo que (6) assegura o dimensionamento em função do número de assinantes para os serviços faixa-estreita e (7) em número de assinantes para os serviços faixa-larga.

$$\sum_{n \in N2ij} \text{cap}_{nb}^{O,n} \cdot \left[\sum_{k_2 \in \Psi} 2^{k_2} \cdot O_{ijnk_2} \right] \geq \sum_{(s,i) \in A_{EFnb}} Y_{si} \geq 0, \quad \forall (i,j) \in A_A \quad (6)$$

$$\sum_{n \in N2ij} \text{cap}_{bb}^{O,n} \cdot \left[\sum_{k_2 \in \Psi} 2^{k_2} \cdot O_{ijnk_2} \right] \geq \sum_{(s,i) \in A_{EFbb}} Y_{si} \geq 0, \quad \forall (i,j) \in A_A \quad (7)$$

Onde:

A_{EFnb} : conjunto de arcos de escoamento dos serviços faixa-estreita para a rede APON-FTTC;

A_{EFbb} : conjunto de arcos de escoamento dos serviços faixa-larga para a rede APON-FTTC;

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

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

b) Restrições de Capacidade da ODNI

As inequações (8) e (9) garantem que a capacidade total das ODNI's alocadas no arco A_{ET} suportará o fluxo a ser escoado pelo mesmo, sendo que (8) dimensiona em

função da capacidade de transmissão da ODNI no sentido *downstream* e (9) no sentido *upstream*. Assim como na ROP, aqui também há a necessidade de se considerar banda exigida pelo serviço de VOZ transportado em conjunto com os serviços faixa-larga (segundo somatório do lado direito das inequações).

$$\sum_{n \in N3} \text{cap}_{ds}^{Z,n} \cdot \left[\sum_{k_3 \in \Psi} 2^{k_3} \cdot Z_{nk_3} \right] \geq \sum_{(s,i) \in A_{EF}} \text{bd}_s \cdot Y_{si} + \sum_{(s,i) \in A_{EFbb}} \text{bd}_{s_1} \cdot Y_{si} \geq 0 \quad (8)$$

$$\sum_{n \in N3} \text{cap}_{us}^{Z,n} \cdot \left[\sum_{k_3 \in \Psi} 2^{k_3} \cdot Z_{nk_3} \right] \geq \sum_{(s,i) \in A_{EF}} \text{bu}_s \cdot Y_{si} + \sum_{(s,i) \in A_{EFbb}} \text{bu}_{s_1} \cdot Y_{si} \geq 0 \quad (9)$$

Onde:

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

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

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

bd_{s_1} : banda exigida pelo serviço s_1 no sentido *downstream*;

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

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

c) Restrições de Capacidade do OLT

As inequações (10), (11) e (12) asseguram os limites de capacidade dos OLTs alocados no arco A_{ET} . Em (10) tem-se o controle da capacidade máxima do OLT em número de assinantes dos serviços faixa-estreita. Deve ser observado que esta inequação também contabiliza o serviço de VOZ oferecido em conjunto com os serviços faixa-larga. A capacidade de atendimento em número de assinantes dos serviços faixa-larga e a limitação do número de ODNI a serem gerenciadas estão garantidas em (11) e (12), respectivamente.

$$\sum_{n \in N1} \text{cap}_{nb}^{X,n} \cdot \left[\sum_{k_1 \in \Psi} 2^{k_1} \cdot X_{nk_1} \right] \geq \sum_{(s,i) \in A_{EF}} Y_{si} \quad (10)$$

$$\sum_{n \in N1} \text{cap}_{bb}^{X,n} \cdot \left[\sum_{k_1 \in \Psi} 2^{k_1} \cdot X_{nk_1} \right] \geq \sum_{(s,i) \in A_{EFbb}} Y_{si} \quad (11)$$

$$\sum_{n \in N1} \text{cap}_{odni}^{X,n} \cdot \left[\sum_{k_1 \in \Psi} 2^{k_1} \cdot X_{nk_1} \right] \geq \sum_{n \in N3} \sum_{k_3 \in \Psi} 2^{k_3} \cdot Z_{nk_3} \quad (12)$$

Onde:

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

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

$\text{cap}_{odni}^{X,n}$: capacidade do OLT do tipo n , em número de ODNIs a serem gerenciadas.

d) Restrições de Capacidade da Rede Metálica

A inequação (13) assegura que a rede metálica alocada no arco (i, j) será capaz de suportar o fluxo escoado pelo mesmo. O parâmetro fdc_{ij} permite variar a folga desejada em cada arco da rede metálica a ser planejada.

$$\left(\text{pi}_{ij} + \sum_{p \in C_M} \left[\text{pc}_{ijp} \cdot M_{ijp} \right] \right) \cdot (1 - fdc_{ij}) \geq Y_{ij} \geq 0 \quad , \quad \forall (i, j) \in A_M \quad (13)$$

Onde :

pi_{ij} : quantidade de pares metálicos instalados no arco $(i, j) \in A_M$;

pc_{ijp} : quantidade de pares metálicos disponíveis no cabo de modularidade p , candidato no arco $(i, j) \in A_M$;

\mathbf{fdc}_{ij} : (fator de disponibilidade de cabos) parâmetro que representa o controle da folga dos cabos metálicos nos arcos $(i, j) \in A_M$.

Restrições Adicionais

A inequação (14) garante que a ONU só é alocada para um Nó de Acesso APON-FTTC se este existir, enquanto (15) impõe limites de atendimento aos serviços em cada Nó de Acesso I_{FM} . Estamos adotando novamente o **Controle de Demanda por Nó de Acesso** (item 5.6)

$$W_i - O_{ijnk_2} \geq 0, \forall i \in I_F, \forall j \in J_1, \forall n \in N2_{ij}, \forall k_2 \in \Psi \quad (14)$$

$$dmin_{sj} \leq Y_{si} + Y_{sj} \leq dmax_{sj}, \forall (i, j) \in I_{FM} \quad (15)$$

Onde :

I_{FM} : conjunto dos Nós de Acesso compostos por um Nó de Acesso APON-FTTC ($i \in I_F$) e um Nó de Acesso da solução metálica ($j \in I_M$);

$dmin_{sj}$: demanda mínima do serviço s para o Nó de Acesso $(i, j) \in I_{FM}$;

$dmax_{sj}$: demanda máxima do serviço s para o Nó de Acesso $(i, j) \in I_{FM}$.

6.7 – Comentários Adicionais

Neste capítulo pôde-se observar que as adaptações no modelo geral para contemplar um 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, especificações técnicas de capacidade, etc.

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.

Capítulo 7

APLICAÇÃO DOS MODELOS

7.1 – Introdução

Como exemplo de aplicação do critério de maximização de receita, neste capítulo apresentamos os resultados da simulação dos modelos *xDSL versus ROP* e *xDSL versus APON-FTTC*. A rede utilizada representa uma Área de Estação de uma metrópole brasileira com predominância de assinantes residenciais. Os dados de serviços e equipamentos também são reais e atuais, obtidos de artigos internacionais e fabricantes de equipamentos.

Para a simulação do modelo foram usados os seguintes recursos computacionais: linguagem de programação matemática AMPL, para elaboração do modelo matemático, e o pacote de otimização CPLEX®, ambos rodando em um microcomputador Pentium 133 MHz com 64 Mbytes de memória RAM em ambiente Windows NT.

7.2 – Dados Gerais

Serviços considerados

Para o planejamento das Redes de Acesso, os serviços são caracterizados pelas suas taxas de transmissão, taxa de penetração (demanda) em determinada área de estudo e as suas respectivas receitas unitárias (mensais ou anuais). A Tabela 7.1 mostra estas especificações para os quatro serviços considerados.

Serviços	Taxa de Transmissão		Penetração	Receita Anual (US\$)
	<i>downstream</i>	<i>upstream</i>		
VOZ	64 Kbps	64 Kbps	-	120
RDSI	144 Kbps	144 Kbps	2,5%	344
FLR	2 Mbps	64 Kbps	0,5%	800
FLC	2 Mbps	2 Mbps	2,0%	1.800

Tabela 7.1 – Especificações técnicas dos serviços.

Dados da Rede

Utilizamos dados de uma Área de Estação que atende um bairro residencial de classe média, com baixa atividade comercial. Na Figura 7.1 apresentamos os 17 Nós de Acesso que compõem esta rede, além do comprimento dos arcos e da quantidade de pares metálicos disponíveis em cada Nó de Acesso.

O número total de assinantes em cada Nó de Acesso está representado na Tabela 7.2. As previsões de demanda para cada serviço, em cada Nó de Acesso (Figura 7.1), são obtidas a partir dos valores de penetração da Tabela 7.1. O número de usuários de cada serviço representa uma porcentagem do número total de assinantes do nó. Por exemplo: prevêem-se 400 assinantes para o Nó de Acesso 5; assim, teremos 10 usuários para o serviço RDSI (e VOZ) com uma penetração de 2,5%, 2 usuários para o serviço FLR (e VOZ) com uma penetração de 0,5%, 8 usuários para o serviço FLC (e VOZ) com uma penetração de 2,0% e o restante (380 usuários) demandará apenas o serviço de VOZ. Nas situações em que o resultado não for um número inteiro, efetua-se o arredondamento "para cima".

Nó de Acesso	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Assinantes	800	600	800	600	400	700	900	400	800
Nó de Acesso	10	11	12	13	14	15	16	17	
Assinantes	700	600	1.300	900	700	500	600	600	

Tabela 7.2 – Número total de assinantes em cada Nó de Acesso.

As previsões de demandas totais para 1999 para cada serviço, em toda a Área de Estação (considerando os dados de penetração da Tabela 7.1) são as apresentadas na Tabela 7.3.

Serviço	Demanda
VOZ	11.298
RDSI	301
FLR	63
FLC	238
Total	11.900

Tabela 7.3 – Demandas totais de cada serviço.

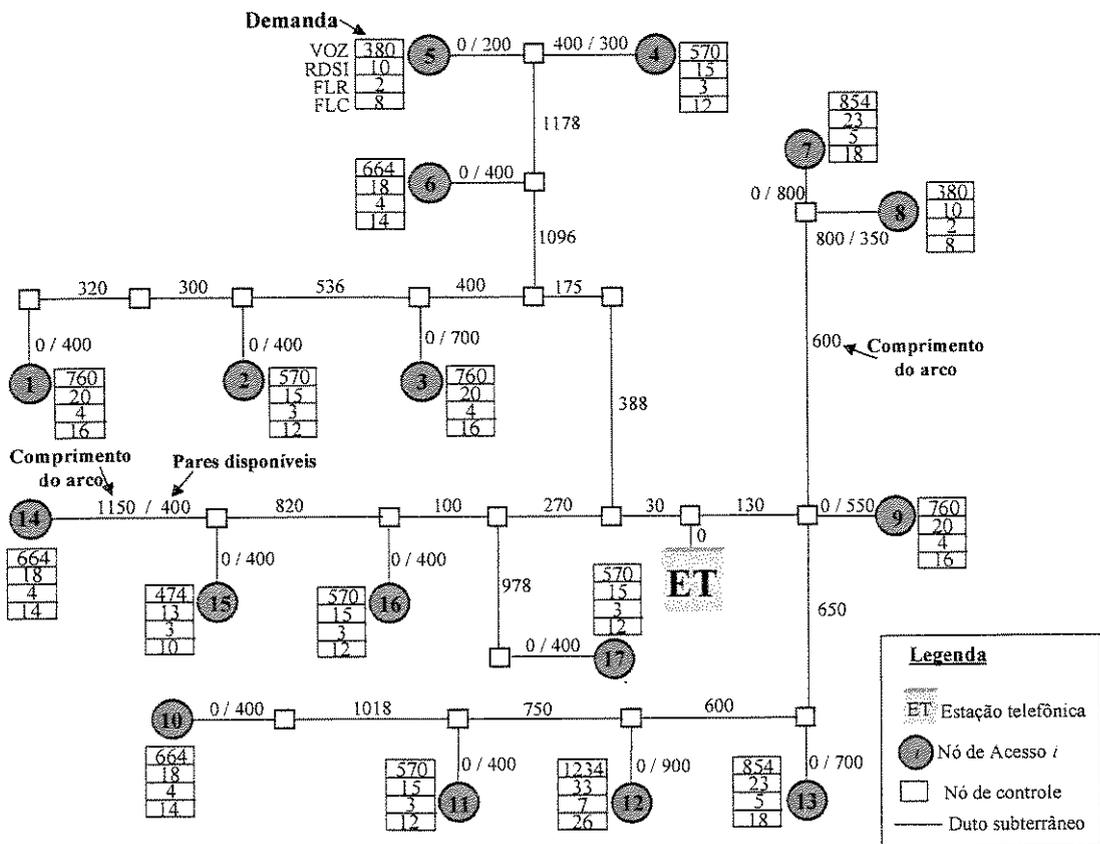


Figura 7.1 – Rede utilizada.

Adicionalmente, consideramos que a rede deve atender um mínimo de demanda de cada serviço, em cada Nó de Acesso (Tabelas 7.4 e 7.5).

Serviço	Porcentagem do Total	Assinantes
VOZ	60 %	6.783
RDSI	55 %	173
FLR	50 %	36
FLC	65 %	163
Total		7.155

Tabela 7.4 – Atendimento mínimo de cada serviço.

Serviço	Nós de Acesso																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
VOZ	456	342	456	342	228	399	513	228	456	399	342	741	513	399	285	342	342
RDSI	11	9	11	9	6	10	13	6	11	10	9	19	13	10	8	9	9
FLR	2	2	2	2	1	2	3	1	2	2	2	4	3	2	2	2	2
FLC	11	8	11	8	6	10	12	6	11	10	8	17	12	10	7	8	8

Tabela 7.5 – Demanda mínima a ser atendida em cada Nó de Acesso.

7.3 – Aplicação do Modelo xDSL versus ROP

Segue-se o relato de uma aplicação do modelo *xDSL versus ROP* à rede considerada. Em [deSousa 1999b] encontra-se documentada outra aplicação do modelo, baseada em premissas levemente distintas, supondo ainda como unidade de medida de demanda canais de 2 Mbps ao invés de assinantes.

Equipamentos

Em cada Nó de Acesso as capacidades dos equipamentos precisam ser compatíveis com as demandas apresentadas na Figura 7.1. Com base nestes valores foram consideradas como candidatas ópticas (ROP) as soluções ponto-a-ponto (OLTM-OLTM) e anéis unidirecionais (ADMs), ambos na hierarquia STM-1 (155 Mbps). Os dados dos equipamentos de transmissão, tais como serviço suportado, capacidades e custos, são apresentados na Tabela 7.6. O Anexo 2 contém a planilha de custos para todos os equipamentos utilizados.

A discriminação dos anéis candidatos é mostrada na Tabela 7.7. Eles fazem parte do conjunto de dados de entrada, a ser fornecido pelo planejador. Para cada anel a ser constituído é obrigatória a instalação de um ADM-63 na ET.

A possibilidade de expansão em rede metálica também é analisada utilizando-se os modems xDSL.

Equipamento/Serviços	Capacidade	Custo (US\$)
OLTM-21 / todos	21 x 2 Mbps	11.120
OLTM-42 / todos	42 x 2 Mbps	12.620
OLTM-63 / todos	63 x 2 Mbps	14.120
ADM-21 / todos	21 x 2 Mbps	14.300
ADM-42 / todos	42 x 2 Mbps	15.800
ADM-63 / todos	63 x 2 Mbps	17.300
ADSL / FLR	1 x 2 Mbps	1.000
HDSL / FLC	1 x 2 Mbps	1.000
PLACA RDSI / RDSI	1 x 144 Kbps	400

Tabela 7.6 – Dados de equipamentos das tecnologias xDSL e ROP.

Anel	Nós de Acesso candidatos
1	10-11-12-13-15-16
2	2-3-7-8-9-15-16
3	4-5-6-7-8-9

Tabela 7.7 – Anéis SDH candidatos.

Cenários Estudados

Com o objetivo de avaliar o comportamento da rede, e conseqüentemente a versatilidade do modelo, foram realizadas várias simulações, enfocando os seguintes cenários:

- *Cenário 1:* influência causada pela variação no orçamento;
- *Cenário 2:* influência causada pela infra-estrutura da rede instalada;
- *Cenário 3:* influência causada pelo uso obrigatório de sistemas ópticos em caso de atendimento dos serviços faixa-larga (FLR e FLC), com variação no orçamento.

Análise dos Resultados

Os comentários deste item referem-se aos três cenários apresentados anteriormente. Vale lembrar que a estrutura de custos utilizada tem influência direta sobre os resultados obtidos.

Os dados referentes à complexidade computacional, tais como número de variáveis (e restrições) e tempo de execução, para todos os cenários avaliados, são listados no Anexo 3.

Cenário 1

Consideramos, para a rede da Figura 7.1, uma disponibilidade de 50% ($fdd_{ij} = 0,5$) nos dutos instalados e que a rede a ser planejada terá uma folga de pelo menos 20% ($fdc_{ij} = 0,2$) nos seus cabos metálicos. Nestas condições, é necessário disponibilizar um orçamento de US\$1.192.500,00 para atender toda a demanda prevista (solução de custo mínimo). A obrigatoriedade de atendimento mínimo mostrada na Tabela 7.5 exige um orçamento de US\$ 838.300,00, pelo menos.

À medida que um limitante de orçamento é imposto, a solução de rede se modifica, objetivando a receita máxima. A Tabela 7.8 indica a participação das tecnologias nos resultados encontrados para diferentes valores de orçamento. Também é mostrada a demanda atendida de cada serviço.

Orçamento (kUS\$)	Receita (kUS\$)	Rede Metálica + xDSL				ROP			
		VOZ	RDSI	FLR	FLC	VOZ	RDSI	FLR	FLC
1.192,5	1.938,1	9.394	301	63	238	1.904	0	0	0
1.150,0	1.923,7	9.412	283	45	238	1.886	18	0	0
1.100,0	1.897,2	9.283	297	36	236	1.896	0	0	0
1.050,0	1.854,6	9.318	173	36	236	1.861	0	0	0
1.000,0	1.809,6	9.318	173	36	211	1.861	0	0	0
950,0	1.764,6	9.318	173	36	186	1.861	0	0	0
900,0	1.716,2	9.029	173	36	171	1.972	0	0	0
838,3	1.603,0	8.214	173	36	163	1.964	0	0	0

Tabela 7.8 – Resultados para o cenário 1.

Podemos verificar que o serviço de VOZ é preservado com a redução no orçamento, apesar de possuir uma receita unitária baixa. Isto se deve principalmente à rede metálica já instalada, que não exige custos adicionais para a disponibilização deste serviço. Os serviços FLR e RDSI são os primeiros a serem penalizados com a redução no orçamento, o que indica serem pouco lucrativos, comparados aos outros dois serviços.

Em nome da economia, os serviços faixa-larga (FLR e FLC) encontram uma melhor aplicação através da rede metálica, visto que o fornecimento destes serviços pela ROP exige maiores investimentos em equipamentos e cabos ópticos, além dos modems xDSL.

A Tabela 7.9 mostra os sistemas a serem implantados para o atendimento dos 17 Nós de Acesso. Com os custos utilizados, a participação da rede metálica é grande, atendendo, em média, 70% dos nós.

Observa-se também a inexistência de anéis nas soluções. Em testes adicionais foi constatado que eles começam a ser competitivos a partir do momento em que os ADMs apresentam uma queda de preço em torno de 10%. Outro parâmetro que influencia na implantação de anéis é a maneira adotada para contabilizar a metragem de cabos ópticos. Um melhor refinamento nestes dados possivelmente beneficiará a sua candidatura.

Orçamento (kUS\$)	Nós de Acesso Atendidos		
	OLTM	ADM	Cabos Metálicos
1.192,5	5	0	12
1.150,0	5	0	12
1.100,0	5	0	11
1.050,0	5	0	11
1.000,0	5	0	11
950,0	5	0	11
900,0	5	0	10
838,3	5	0	7

Tabela 7.9 – Participação dos sistemas a serem implantados para o atendimento dos Nós de Acesso, cenário 1.

A Figura 7.2 mostra uma possível configuração da rede a ser implantada para um orçamento de US\$ 1.100.000,00. São indicadas as demandas atendidas pela rede metálica e óptica (ROP) em cada Nó de Acesso. A escolha pelos sistemas ROP é feita, preferencialmente, para os nós que se encontram mais distantes da ET (1, 4, 5, 10 e 14). Embora não se tenha lançado nenhum sistema óptico (OLTM ou ADM), e nem mesmo um cabo metálico, para o atendimento do nó 8, a capacidade do sistema já existente é capaz de suportar a demanda escolhida pelo modelo, admitida a folga de 20%. Para este nó a novidade são os equipamentos individuais para os assinantes RDSI, FLR e FLC atendidos.

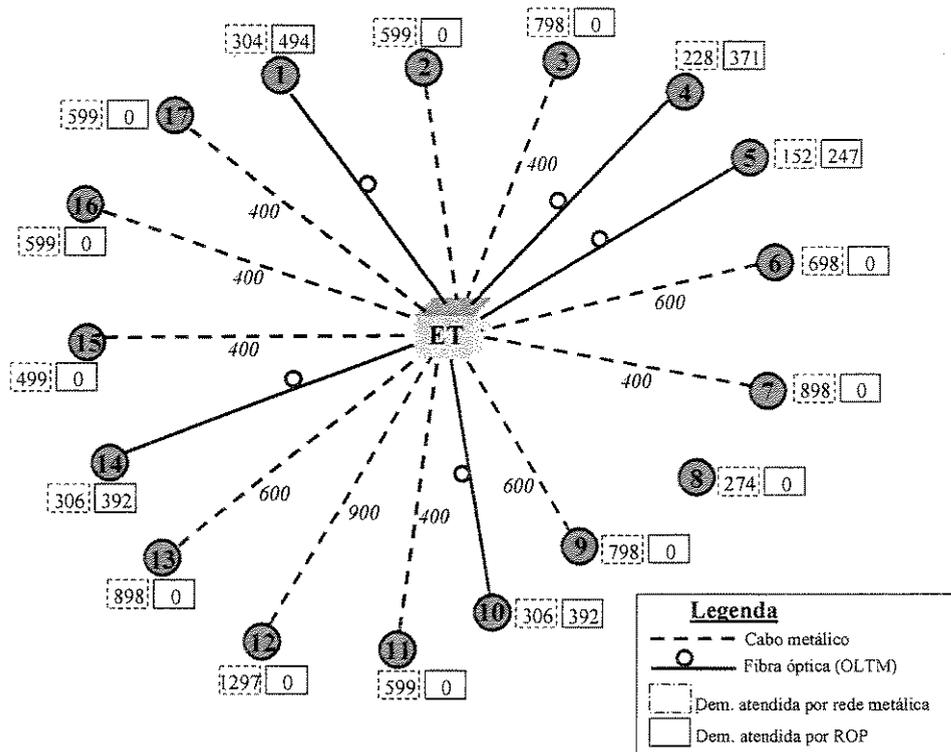


Figura 7.2 – Resultado do cenário 1 para um orçamento de US\$ 1.100.000,00.

Os resultados do Cenário 1 foram construídos a partir da variação gradual do orçamento. Em [deSousa 1999a], é proposta uma abordagem paramétrica para a questão, considerando na aplicação uma rede menor e apenas dois serviços.

Cenário 2

Neste cenário consideramos uma folga de pelo menos 20% nos cabos metálicos ($f_{dc_{ij}}=0,2$) e um orçamento fixado em US\$ 1.100.000,00. A partir destes dados verificamos o comportamento da rede a ser implantada para diferentes disponibilidades de dutos ($f_{dd_{ij}}$). A Tabela 7.10 mostra a demanda a ser atendida de cada serviço, enquanto 7.11 indica a participação dos sistemas nas soluções para diferentes valores de $f_{dd_{ij}}$.

fdd _{ij}	Receita (kUS\$)	Rede Metálica + xDSL				ROP			
		VOZ	RDSI	FLR	FLC	VOZ	RDSI	FLR	FLC
100%	1.936,5	10.051	286	61	238	1.247	15	0	0
90%	1.930,8	10.518	301	56	238	766	0	0	0
80%	1.923,7	9.816	286	45	238	1.482	15	0	0
70%	1.917,3	9.648	301	37	238	1.650	0	0	0
60%	1.905,1	9.649	268	36	238	1.649	0	0	0
50%	1.897,2	9.283	297	36	236	1.896	0	0	0
40%	1.886,9	9.293	267	36	236	1.886	0	0	0
30%	1.876,6	8.562	237	36	228	2.617	0	0	8
20%	1.868,7	8.043	214	36	236	3.136	0	0	0
10%	1.863,5	7.876	199	36	236	3.303	0	0	0
0%	1.858,4	7.876	184	36	236	3.303	0	0	0

Tabela 7.10 – Resultados para o cenário 2.

fdd _{ij}	Nós de Acesso Atendidos		
	OLTM	ADM	Cabos Metálicos
100%	3	0	14
90%	2	0	15
80%	3	0	14
70%	4	0	13
60%	4	0	13
50%	5	0	11
40%	5	0	11
30%	6	0	10
20%	8	0	8
10%	5	4 (anel 1)	7
0%	5	4 (anel 1)	7

Tabela 7.11 – Participação dos sistemas a serem implantados para o atendimento dos Nós de Acesso, cenário 2.

A diminuição dos dutos disponíveis compromete parte do orçamento. Assim, o número de assinantes atendidos (e a receita) cai à medida que a disponibilidade de dutos decresce. Para evitar perda exagerada de receita, os sistemas ROP são usados mais intensamente, inclusive com a escolha de anéis (entre 10–0%). Como resultado, as mudanças na topologia de atendimento da rede são significativas, evidenciando o esforço do modelo no sentido de preservar a receita máxima.

Em relação ao comportamento dos serviços, mantêm-se os comentários do item anterior, exceto pelo fato de que o atendimento do serviço de VOZ pela ROP tende a aumentar na medida em que se reduz o fdd_{ij} e aumenta o número de sistemas ópticos.

As Figuras 7.3 e 7.4 apresentam as configurações da rede a ser implantada com fdd_{ij} em 80 e 10%, respectivamente. É anotado em cada nó o número de assinantes a ser atendido por cada sistema. Deve ser observado que para o anel 1 candidato apenas 4 Nós de Acesso foram escolhidos (10, 11, 12 e 15). Os nós 13 e 16 são atendidos por cabo metálico.

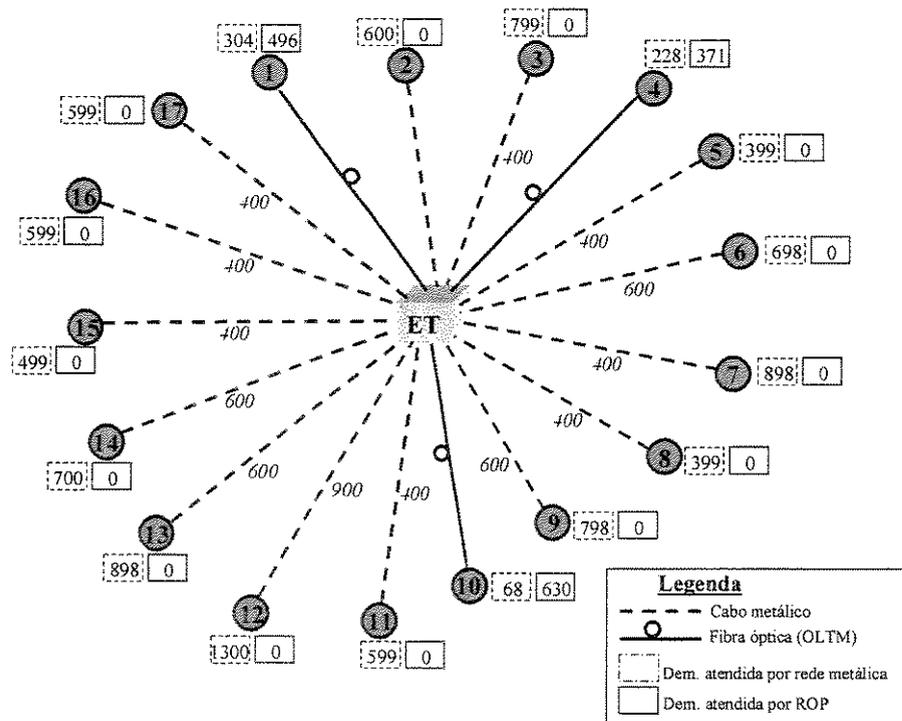


Figura 7.3 – Resultado do cenário 2 para o fdd_{ij} em 80%.

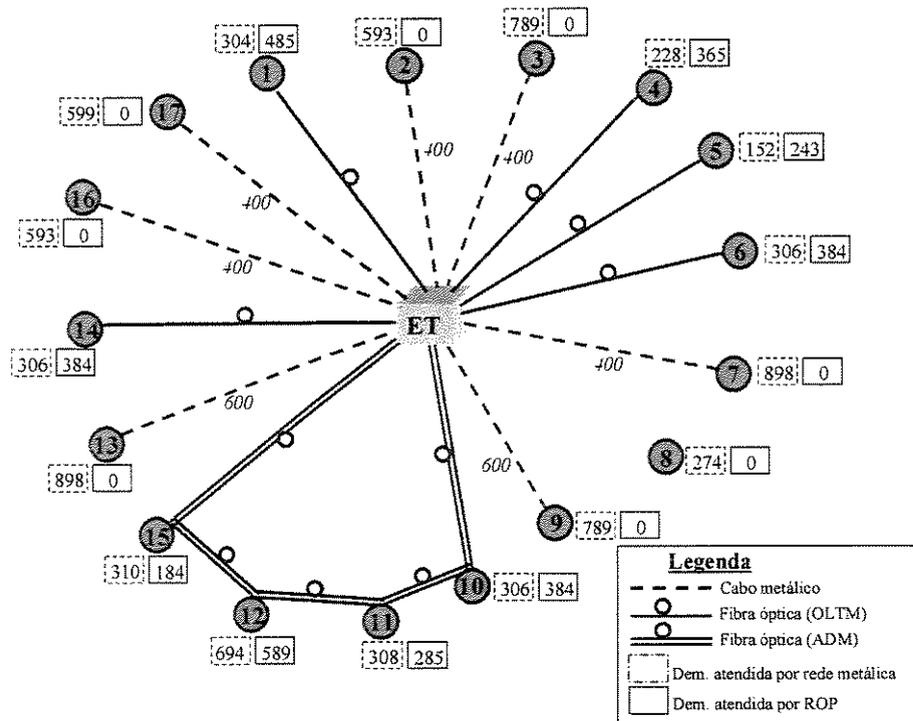


Figura 7.4 – Resultado do cenário 2 para o fd_{ij} em 10%.

Cenário 3

Neste cenário damos uma atenção mais criteriosa ao atendimento dos serviços faixa-larga. O dimensionamento assume que estes serviços são fornecidos apenas pela ROP. Os resultados para alguns valores de orçamento estão na Tabela 7.12. Comparados aos resultados do Cenário 1, observamos que há a necessidade de se investir em média 20% a mais para se obter os mesmos níveis de receita.

Orçamento (kUS\$)	Receita (kUS\$)	Rede Metálica + xDSL				ROP			
		VOZ	RDSI	FLR	FLC	VOZ	RDSI	FLR	FLC
1.401,3	1.938,1	6.179	301	0	0	5.119	0	63	238
1.300,0	1.893,8	6.203	277	0	0	5.095	0	36	230
1.250,0	1.857,4	6.519	300	0	0	4.754	0	36	207
1.200,0	1.814,4	6.638	173	0	0	4.641	0	36	207
1.150,0	1.769,4	6.638	173	0	0	4.641	0	36	182
1.100,0	1.643,5	6.307	173	0	0	4.208	0	36	163
1.052,2	1.195,7	5.993	173	0	0	790	0	36	163

Tabela 7.12 – Resultados para o cenário 3.

Com a redução no orçamento, o comportamento no atendimento dos serviços mantêm-se o mesmo dos cenários anteriores, com os serviços FLR e RDSI sendo os mais penalizados. O serviço de VOZ continua sendo atraente, já que o seu oferecimento, mesmo através da rede óptica, exige pouco investimento adicional em equipamentos. Entretanto, ele pode ter influência sobre a modularidade dos equipamentos OLTM e ADMs, alocados devido às exigências de atendimento para os serviços faixa-larga.

Como pode ser observado na Tabela 7.13, o critério adotado para o atendimento dos serviços faixa-larga exige o lançamento de cabo óptico em toda a rede. Nestas circunstâncias basicamente não temos alocação de cabos metálicos. A única exceção é o Nó de Acesso 9 (o mais próximo da ET), que para certos limitantes de orçamento, deixa de ser atendido por OLTM e passa a ter parte da sua demanda atendida pelo anel 3 e parte atendida por um novo cabo metálico.

Para as situações em que o orçamento é bastante enxuto, verifica-se uma grande preferência por anéis. Isto é possível porque para baixas demandas um anel STM-1 (155Mbps) pode compartilhar a demanda de vários Nós de Acesso.

Orçamento (kUS\$)	Nós de Acesso Atendidos		
	OLTM	ADM	Cabos Metálicos
1.401,3	17	0	0
1.300,0	17	0	0
1.250,0	13	4 (anel 3)	1 (nó 9)
1.200,0	13	4 (anel 3)	1 (nó 9)
1.150,0	13	4 (anel 3)	1 (nó 9)
1.100,0	10	7 (anéis 1 e 3)	0
1.052,2	7	10 (anéis 1 e 3)	0

Tabela 7.13 – Participação dos sistemas a serem implantados para o atendimento dos Nós de Acesso, cenário 3.

7.4 – Aplicação do Modelo xDSL versus APON-FTTC

Segue-se o relato de uma aplicação do modelo *xDSL versus APON-FTTC* à rede da Figura 7.1. No trabalho desenvolvido por [Basseto 1999] encontra-se documentada outra aplicação do modelo, baseada nas mesmas premissas, supondo ainda o oferecimento de apenas três serviços: VOZ, RDSI e FLR.

Equipamentos

Os dados dos principais equipamentos da solução APON-FTTC, como capacidades e custos, estão apresentados na Tabela 7.14 (a planilha de custos completa encontra-se no Anexo 2). As considerações sobre rede instalada e modems xDSL são as mesmas do item anterior.

Equipamento	Capacidade	Custo (US\$)
OLT	Assinantes: 10.000 faixa-estreita + 2.500 faixa-larga; Gerenciamento: até 16 ODNI's.	231.250
ODNI (no OLT)	Banda livre: 600 Mbps <i>downstream</i> ; 150 Mbps <i>upstream</i> .	4.000
ONU (Mod. Comum + ODNI)	Assinantes: 128 faixa-estreita + 32 faixa-larga.	1.025

Tabela 7.14 – Dados de equipamentos da solução APON-FTTC.

Alocação de splitters

As possíveis topologias para a rede APON-FTTC, no segmento óptico, são a estrela simples e a dupla estrela passiva (Figura 7.5).

São considerados splitters 1:4, permitindo-se colocar no máximo dois splitters em cascata (na ET e/ou Nó de Acesso) no percurso ODNI-ONU. A quantidade de splitters é obtida considerando que cada ODNI possui um sistema de reserva, ou seja, um par Tx/Rx em operação e um par Tx/Rx na reserva e que as ONUs se comportam da mesma forma. Este cálculo é realizado considerando que cada ODNI irá atender no máximo 16 ONUs, o que torna necessário, em média, a utilização de 10 splitters por ODNI alocada.

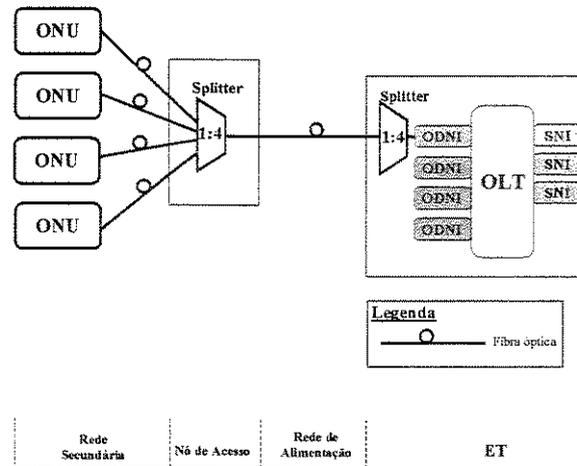


Figura 7.5 – Uso de splitters 1:4.

Cenários Estudados

O objetivo é conferir a viabilidade da APON-FTTC e avaliar a sua competitividade com a tecnologia xDSL. Foram estudados dois cenários:

Cenário 4

Neste cenário avaliamos o dimensionamento da rede em diferentes situações de queda de preço para os equipamentos das duas tecnologias. Para satisfazer as previsões de mercado de maneira mais realista, assumimos que a redução 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, teremos 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 atual de implantação do equipamento.

Cenário 5

Seguimos os mesmos procedimentos do Cenário 4, e paralelamente com a redução nos custos dos equipamentos, variamos também a penetração dos serviços RDSI, FLR e FLC.

Análise dos Resultados

Cenário 4

Consideramos, para a rede da Figura 7.1, uma disponibilidade de 50% ($fdd_{ij} = 0,5$) nos dutos instalados e que a rede a ser planejada terá uma folga de pelo menos 20% ($fdc_{ij} = 0,2$) nos seus cabos metálicos. Estipulamos um orçamento de US\$ 900.000,00 (com este valor de orçamento é possível o atendimento da demanda mínima com uma pequena folga, considerando os custos de todos os equipamentos em 100% do seu valor nominal) e o mantivemos fixo. Nestas condições, simulamos situações de queda de preço somente para os equipamentos do *Grupo 2* até atingirmos o atendimento de toda a demanda. A Tabela 7.15 indica a receita gerada em cada situação e o número de usuários atendidos por cada tecnologia.

Custo Grupo 2	Receita (kUS\$)	Rede Metálica + xDSL				Rede APON-FTTC			
		VOZ	RDSI	FLR	FLC	VOZ	RDSI	FLR	FLC
100%	1.645,0	10.512	173	36	164	0	0	0	0
95%	1.686,2	10.766	173	36	170	0	0	0	0
90%	1.725,0	11.179	173	36	164	0	0	0	0
85%	1.750,2	11.179	173	36	178	0	0	0	0
80%	1.779,2	11.001	173	36	206	0	0	0	0
75%	1.813,4	11.001	173	36	225	0	0	0	0
70%	1.850,3	11.001	254	36	230	0	0	0	0
67%	1.880,1	9.226	232	1	6	1.830	0	60	230
65%	1.906,7	8.434	226	0	0	2.824	0	62	238
63%	1.933,1	8.379	292	0	0	2.910	0	62	238
60%	1.938,1	9.914	276	3	17	1.384	25	60	221

Tabela 7.15 – Resultados para o cenário 4.

A participação dos principais equipamentos da solução APON-FTTC, bem como o número de Nós de Acesso atendidos por sistemas metálicos e ópticos, é indicada na Tabela 7.16.

Custo Grupo 2	Equipamentos da APON-FTTC			Nós de Acesso Atendidos	
	ONU	ODNI	OLT	Sist. Met.	APON-FTTC
100%	0	0	0	13	0
95%	0	0	0	14	0
90%	0	0	0	16	0
85%	0	0	0	16	0
80%	0	0	0	15	0
75%	0	0	0	15	0
70%	0	0	0	15	0
67%	24	4	1	9	16
65%	31	5	1	7	17
63%	32	5	1	7	17
60%	25	4	1	12	16

Tabela 7.16 – Participação dos sistemas a serem implantados para o atendimento dos Nós de Acesso, cenário 4.

Com os custos atuais a tecnologia APON-FTTC ainda não é viável. Adicionalmente, a alta modularidade do OLT impede que a tecnologia seja escolhida para atender poucos Nós de Acesso. Entretanto, à medida que os custos dos equipamentos diminuem a solução tende a se modificar. Inicialmente, as mudanças ocorrem apenas com as demandas a serem atendidas. Quando a queda nos preços chega aos 33% a tecnologia APON-FTTC começa a se tornar competitiva.

Em situações com predominância de atendimento por rede metálica, a preferência pelo serviço de VOZ é clara. Novamente, esta escolha se deve ao fato de que uma vez lançado um cabo metálico para o atendimento de um nó, não temos gastos adicionais para a disponibilização deste serviço. Além disso, a alta demanda pelo serviço acaba compensando o baixo valor da receita unitária.

A APON-FTTC mostra-se mais viável ao atendimento dos serviços faixa-larga. Uma vez alocada, o fornecimento destes serviços, em cada Nó de Acesso, fica bem próximo do valor máximo, chegando a proporcionar em certos casos, a migração total destes serviços da rede metálica para a óptica.

Para um maior detalhamento deste cenário e para mostrar a flexibilidade do modelo em relação à geração de relatórios de saída, ilustramos a seguir duas situações distintas para o atendimento dos serviços.

Na Figura 7.6 temos uma configuração da rede para o custo dos equipamentos do Grupo 2 em 95%. São indicados os cabos a serem instalados e a demanda a ser atendida em cada Nó de Acesso. A solução é totalmente metálica. Devido ao orçamento enxuto, não há lançamento de cabos para alguns nós (3, 8 e 15), de forma que a demanda escolhida pelo modelo será atendida pelo cabo já instalado. A especificação de quantos usuários de cada serviço devem ser atendidos em cada Nó de Acesso é mostrada na Tabela 7.17.

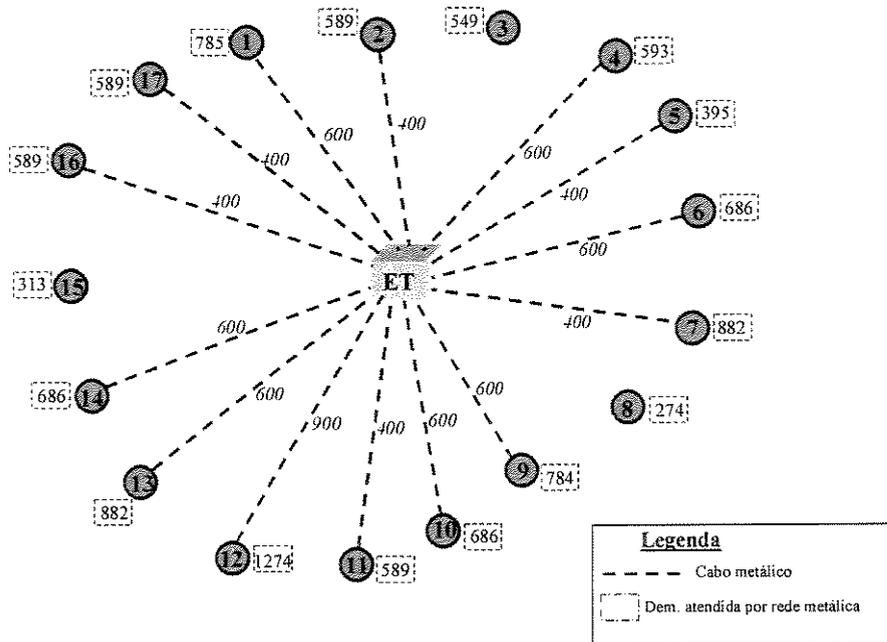


Figura 7.6 – Resultado do cenário 4 com os custos do Grupo.2 em 95%.

		Nós de Acesso																
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Metálica + xDSL																		
VOZ	760	570	525	570	380	664	854	261	760	664	570	1234	854	664	296	570	570	
RDSI	11	9	11	9	6	10	13	6	11	10	9	19	13	10	8	9	9	
FLR	2	2	2	2	1	2	3	1	2	2	2	4	3	2	2	2	2	
FLC	12	8	11	12	8	10	12	6	11	10	8	17	12	10	7	8	8	

Tabela 7.17 - Demanda atendida em cada Nó de Acesso, cenário 4, com os custos do Grupo 2 em 95%.

A Figura 7.7 apresenta o resultado considerando uma queda de 35% no custo dos equipamentos do Grupo 2. Para cada Nó de Acesso são apresentados o número de ONUs alocadas, os cabos a serem instalados e a demanda de cada serviço a ser atendida por cada uma das tecnologias. A especificação de quantos usuários de cada serviço devem ser atendidos em cada Nó de Acesso, por cada uma das tecnologias, pode ser conferida na Tabela 7.18.

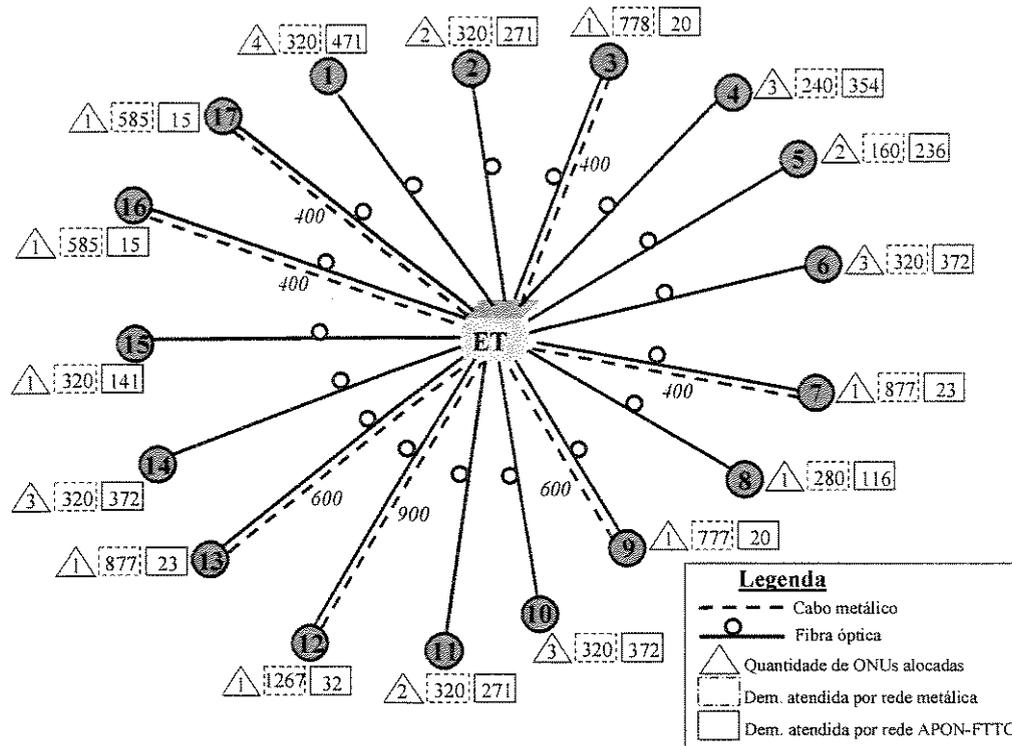


Figura 7.7 – Resultado do cenário 4 com os custos do Grupo 2 em 65%.

		Nós de Acesso																
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Metálica + xDSL																		
VOZ		309	311	760	231	154	310	854	274	760	310	311	1234	854	310	312	570	570
RDSI		11	9	18	9	6	10	23	6	11	10	9	33	23	10	8	15	15
FLR		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FLC		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
APON-FTTC																		
VOZ		451	256	0	339	226	354	0	106	0	354	256	0	0	354	128	0	0
RDSI		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FLR		4	3	4	3	2	4	5	2	4	4	3	6	5	4	3	3	3
FLC		16	12	16	12	8	14	18	8	16	14	12	26	18	14	10	12	12

Tabela 7.18 - Demanda atendida em cada Nó de Acesso, cenário 4, com os custos do Grupo 2 em 65%.

Verifica-se que a alocação de ONUs é bastante influenciada pela serviços faixa-larga, e a sua presença no Nó de Acesso não garante que a sua ocupação em serviços faixa-estreita, principalmente RDSI, seja completa. Para determinados nós elas são escolhidas apenas para o provimento dos serviços faixa-larga.

Cenário 5

Neste cenário, consideramos uma disponibilidade de 50% ($fdd_{ij}=0,5$) nos dutos instalados e uma folga de pelo menos 20% ($fdc_{ij}=0,2$) nos cabos metálicos. Nestas condições variamos, ao mesmo tempo, o custo dos equipamentos do *Grupo 2* e a penetração dos serviços RDSI, FLR e FLC. Na Tabela 7.19 mostramos esta variação para 7 instâncias.

Parâmetro	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7
Penetração do Serviço							
VOZ	–	–	–	–	–	–	–
RDSI	2.5%	2.8%	3.9%	6.0%	9.8%	13.3%	15.0%
FLR	0.5%	0.8%	1.2%	1.9%	3.1%	5.2%	7.5%
FLC	2.0%	3.0%	5.0%	7.5%	10.5%	14.0%	18.0%
Custo de Equipamentos							
Grupo 1	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Grupo 2	100%	90%	85%	80%	75%	70%	65%
Orçamento (kUS\$)							
	1.000	1.150	1.300	1.500	1.800	2.100	2.300

Tabela 7.19 - Instâncias do cenário 5.

Esta variação é para um único ano base, e não ao longo de um horizonte de planejamento. Assim, deve-se obedecer algumas premissas quanto à variação na penetração dos serviços:

- 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 continuam demandando apenas o serviço de VOZ;
- 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 ao valores da Tabela 7.2.

Como resultado dessas premissas, à medida que aumentamos a penetração dos serviços RDSI, FLR e FLC, a demanda (exclusiva) do serviço de VOZ diminui. Em função desta variação, as novas demandas dos serviços são as apresentadas na Tabela 7.20. O atendimento mínimo em cada nó continua obedecendo a porcentagem apresentada na Tabela 7.4 (60% para VOZ, 55% para RDSI, 50% para FLR e 65% para FLC), ocasionando, para cada instância, a obrigatoriedade de atendimento mínimo indicada na Tabela 7.20.

Penetração de Serviço	Demanda Prevista				Atendimento Mínimo			
	VOZ	RDSI	FLR	FLC	VOZ	RDSI	FLR	FLC
Caso 1	11.298	301	63	238	6.783	173	36	163
Caso 2	11.099	341	103	357	6.665	195	56	238
Caso 3	10.679	475	151	595	6.412	270	79	393
Caso 4	10.053	714	237	896	6.040	401	119	591
Caso 5	9.098	1.174	375	1.253	5.466	651	193	822
Caso 6	8.016	1.591	627	1.666	4.820	878	317	1.089
Caso 7	7.077	1.785	896	2.142	4.254	988	452	1.401

Tabela 7.20 - Limites de atendimento máximo e mínimo para cada instância do cenário 5.

Para cada instância foi estipulado um orçamento (Tabela 7.19) e, na busca da receita máxima, obtemos as configurações de atendimento mostradas na Tabela 7.21. A receita gerada cresce consideravelmente com aumento da penetração dos serviços.

Instâncias	Receita (kUS\$)	Rede Metálica + xDSL				Rede APON-FTTC			
		VOZ	RDSI	FLR	FLC	VOZ	RDSI	FLR	FLC
Caso 1	1.771,8	11.179	173	36	190	0	0	0	0
Caso 2	2.014,3	9.358	195	0	0	867	0	97	357
Caso 3	2.442,1	9.051	270	0	0	594	0	151	595
Caso 4	3.023,0	7.941	410	0	0	1.116	0	228	896
Caso 5	3.683,0	6.739	809	0	125	372	0	370	1.128
Caso 6	4.572,0	5.888	878	0	0	665	0	606	1.666
Caso 7	5.556,0	5.537	988	0	0	227	0	836	2.142

Tabela 7.21 – Resultados para o cenário 5.

O aumento na penetração dos serviços faixa-larga faz com que a tecnologia APON-FTTC fique competitiva com uma queda de apenas 10% nos custos dos equipamentos. Este resultado confirma o que foi relatado no cenário anterior quanto à preferência desta tecnologia no atendimento destes serviços.

Para a primeira instância, em que a solução é totalmente metálica, os serviços mais penalizados são o RDSI e o FLR (com atendimento mínimo), seguidos de perto pelo serviço FLC.

A partir do momento em que a tecnologia APON-FTTC passa a ser escolhida, os serviços faixa-larga tornam-se os mais rentáveis. 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 perde a sua hegemonia a medida que se aumenta a penetração, a demanda não atendida cresce consideravelmente, e o oferecimento é garantido principalmente pela rede metálica já instalada.

É possível observar que todos os usuários dos serviços faixa-larga são atendidos pela rede APON-FTTC. A única exceção está no caso 5, onde encontramos 125 assinantes atendidos por rede metálica. Esta escolha é puramente econômica. Se observarmos na Tabela 7.22, esta instância representa a transição entre optarmos por 1 ou 2 OLTs na ET, decisão altamente influenciada pela capacidade deste equipamento em número de ODNIs a serem gerenciadas: 16 (Tabela 7.14). Como esta transição representa um investimento muito alto, a opção mais apropriada foi a de atender parte dos serviços FLC por modems HDSL.

Outro fato a ser observado diz respeito ao dimensionamento das ODNIs. Os resultados mostram que o número de ODNIs alocadas é definido basicamente em função da sua restrição de capacidade *upstream*, possibilitando uma folga considerável na banda *downstream*. A justificativa é simples: dos 4 serviços considerados, 3 possuem taxa de transmissão simétrica, e o único assimétrico, FLR, apresenta uma demanda relativamente baixa. Uma forma de ocupar esta ociosidade seria oferecer também o serviço de CATV através da rede APON-FTTC.

Instâncias	Equipamentos da APON-FTTC			Nós de Acesso Atendidos	
	ONU	ODNI	OLT	Sist. Met.	APON-FTTC
Caso 1	0	0	0	16	0
Caso 2	18	6	1	10	17
Caso 3	31	9	1	10	17
Caso 4	42	13	1	7	17
Caso 5	54	16	1	4	17
Caso 6	77	24	2	2	17
Caso 7	90	31	2	1	17

Tabela 7.22 – Participação dos sistemas a serem implantados para o atendimento dos Nós de Acesso, cenário 05.

7.5 – Comentários Adicionais

Analisando os resultados de uma forma geral (cenários 1, 2, 3, 4 e 5) podemos observar que o serviço RDSI é o menos rentável, enquanto o serviço FLC apresenta uma grande aceitação. Devido a presença da infra-estrutura já instalada, o serviço de VOZ, com alta demanda, ainda representa um mercado lucrativo.

Com os dados de custos atuais, para a rede estudada, as soluções metálicas são ainda predominantes. Porém, ao promovermos uma análise de sensibilidade com a variação de parâmetros tais como disponibilidade de rede instalada, custo de equipamentos e penetração de serviço, as demais tecnologias (ROP e APON-FTTC) aparecem como boas alternativas.

A modularidade dos equipamentos e a forma de atendimento dos serviços faixa-larga é um fator determinante. A ROP teve a seu favor a qualidade de oferecer equipamentos de baixa modularidade, o que permite a avaliação quase que individualizada de cada Nó de Acesso; porém a exigência de se utilizar modems xDSL na rede secundária, onera consideravelmente este segmento da rede. Já na implantação da APON-FTTC, a modularidade do OLT, certamente, foi o fator decisivo. Por concentrar a demanda de toda a Área de Estação, o seu dimensionamento só é viável para o atendimento de vários Nós de Acesso (confirmado pelos resultados).

Capítulo 8

CONCLUSÕES

A perspectiva de um ambiente de competição está levando as empresas de telecomunicações a assumirem uma nova postura quanto ao planejamento de suas redes. A velocidade com que surgem novas tecnologias e demandas por novos serviços obriga as empresas a tomarem decisões de forma cada vez mais rápida. A rede de acesso, componente do sistema de telecomunicações, por representar o segmento responsável pelo atendimento individual de cada usuário, é o foco imediato destas transformações.

Além da telefonia tradicional, as numerosas soluções tecnológicas (xDSL, ROP, APON-FTTC, etc.), disponibilizadas através de vários fabricantes de equipamentos, abrem a possibilidade de se alcançar uma rede mais compartilhada, capaz de oferecer serviços diversificados, com taxas de transmissão variadas. Porém, as decisões a serem tomadas não são triviais. A migração envolve um enorme volume de recursos financeiros. Dúvidas sobre quais serviços oferecer, e sobre as suas rentabilidades, são inevitáveis. Portanto, faz-se necessário um planejamento da rede, enfatizando a receita gerada pelos serviços oferecidos, além do custo envolvido, em um ambiente capaz de analisar várias opções tecnológicas.

Neste trabalho, apresentamos uma metodologia de planejamento orientada à maximização de receita. O objeto de estudo é a rede de acesso. O planejamento de uma rede multi-serviço é descrito em etapas, enfatizando as principais atividades a serem desenvolvidas pelos planejadores. São discutidas especificações de serviços e tecnologias, configurações de rede e critérios de otimização.

O dimensionamento dos componentes da rede é a atividade mais explorada. Na busca de um planejamento otimizado, são desenvolvidos modelos matemáticos para auxiliar no processo de decisão. Inicialmente, é indicada 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 técnicas de capacidade e orçamento.

Para ilustrar a aplicabilidade da metodologia, o modelo geral é adaptado para atender possibilidades específicas de evolução da rede. As tecnologias ópticas mais prováveis de serem aproveitadas, tais como ROP e APON-FTTC, são contempladas. Os investimentos feitos em rede metálica também são considerados, através da utilização de modems da tecnologia xDSL.

Os modelos propostos são aplicados ao planejamento da evolução de uma rede de médio porte, baseada em dados reais. As informações sobre equipamentos e serviços também são atuais. A possibilidade de disponibilizar diversos serviços é analisada, avaliando as opções de evolução metálica e óptica.

Em relação aos casos aqui tratados, é interessante ressaltar, do ponto de vista tecnológico, as seguintes constatações sobre os resultados obtidos:

- 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 do mercado brasileiro, altos índices de demanda reprimida;
- 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, principalmente a APON-FTTC, 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.

Do ponto de vista da aplicabilidade, podemos afirmar que a flexibilidade quanto às variações nos cenários possíveis de serem contemplados é uma das principais virtudes da metodologia (e modelos) proposta. Apenas como exemplo, podemos citar:

- contempla tecnologias de rede que otimizam a utilização da rede metálica;
- permite competição entre as tecnologias (e topologias) mais viáveis para a rede de acesso;
- permite um planejamento multi-serviço;
- é flexível quanto à variação nos cenários de estudo, como por exemplo a possibilidade de atribuir prioridades no atendimento dos serviços;
- é facilmente adaptável às novas tecnologias (e topologias) e aos serviços a serem oferecidos;
- é altamente interativa. Situações de análise de sensibilidade podem ser facilmente geradas pelo planejador;
- possibilita à empresa operadora fazer um planejamento que permite, ao mesmo tempo, obedecer restrições de contrato (como por exemplo, o atendimento mínimo de determinado serviço) e "visualizar" os cenários mais lucrativos (onde investir e como investir) dentro das suas condições financeiras de investimento.

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.

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.

Por sua vez, os próprios métodos a serem adotados na resolução dos modelos apresentados geram grandes oportunidades de pesquisa. Em certas situações, como no planejamento estagiado, a complexidade combinatorial do problema pode inibir a adoção de métodos exatos (do tipo aqui tratado) para resolver o modelo. Procedimentos que fazem uso de metaheurísticas, tais como busca tabu e algoritmos genéticos, precisariam ser testados.

Finalmente, devemos dizer que a abordagem de maximização de receita é bastante adequada ao momento atual das Telecomunicações. A metodologia e modelos aqui apresentados auxiliam o planejamento otimizado em situações reais (competição de tecnologias, múltiplos serviços) e portanto podem ocupar um lugar de importância dentre as ferramentas de apoio à decisão.

REFERÊNCIAS

- [Ahamed 1995] S. V. Ahamed, P. L. Gruber e J. J. Werner, "**Digital Subscriber Line (HDSL and ADSL) Capacity of the Outside Loop Plant**", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol 13 (9).
- [Balakrishnan 1991] A. Balakrishnan, T.L. Magnanti, A. Shulman e R.T. Wong, "**Models for Planning Capacity Expansion in Local Access Telecommunication Networks**", Annals of Operations Research 33, 1991, p. 239-284.
- [Basseto 1999] Fernando Basseto, C. M. F. Carlson, J. R. F. Formigoni, M. A. deSousa, E. L. M. Pissolato, "**Metodologia de Planejamento de Redes de Acesso com Otimização de Receitas**", aceito no XXXI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Juiz de Fora-MG, Outubro 1999.
- [Bazaraa 1990] Mokhtar S. Bazaraa, J.J. Jarvis, H.D. Sherali, "**Linear Programming and Network Flows**", 2nd ed., Willey, New York, 1990.
- [Bortolon 1996] S. Bortolon, E. Quaglia, M. Bergamaschi, H. Tavares e R. V. Ribeiro, "**Planejamento Otimizado de Redes SDH em Telecomunicações**", Anais do XI Congresso Brasileiro de Automática, São Paulo, Vol 1, p. 251-256.
- [Carlson 1998] C. M. F. Carlson, "**Sistemas de Telecomunicações: Planejamento da Rede Externa em Situações de Incerteza**", Tese de Doutorado, FEEC/UNICAMP, Novembro 1998.
- [Chang 1994] Y.H. Chang et alii, "**An Open-System Approach to Video on Demand**", IEEE Communications Magazine, May 1994, p. 68-80.
- [Cook 1994] A. Cook, J. Stern, "**Optical Fiber Access - Perspectives Towards the 21st Century**", IEEE Communications Magazine, February 1994, p. 78-86.
- [Cplex 1994] CPLEX Optimization, Inc., "**Using the CPLEX[®] Callable Library**", 1994.

-
- [deSousa 1999a] Marcos Antônio de Sousa, C. M. F. Carlson, M. A. Bergamaschi, "**Revenue-Oriented Access Network Planning in a Multi-Service Environment**", submetido ao IEEE Global Communications Conference, Rio de Janeiro, Dezembro 1999.
- [deSousa 1999b] Marcos Antônio de Sousa, C. M. F. Carlson, J. R. F. Formigoni, R. V. Ribeiro, "**Planejamento da Rede de Acesso Orientado à Maximização de Receitas**", aceito no XVII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, Vila Velha-ES, Setembro 1999.
- [Dravida 1998] Subra Dravida, H. Jiang, M. Kodialam, B. Samadi and Y. Wang, "**Narrowband and Broadband Infrastructure Design for Wireless Networks**", IEEE Communications Magazine, May 1998, p.72-78.
- [Formigoni 1995] J. R. F. Formigoni, "**Rede Externa: Planejamento de Rotas Estratégicas**", Tese de Mestrado, FEE/UNICAMP, Setembro 1995.
- [Fourer 1993] Robert Fourer, David M. Gay, Brian W. Kernighan, "**AMPL - A Modeling Language for Mathematical Programming**", 1993.
- [Garcia 1996] A. S. Garcia e G. B. Zananbrea, "**A Heuristic Approach for SDH Transmission Network Evolution**", Proceedings of 4th International Conference on Telecommunications Systems - Modelling and Analysis, Nashville, p. 620-626.
- [Garg 1996] Vijay K. Garg and E. L. Sneed, "**Digital Wireless Local Loop System**", IEEE Communications Magazine, October 1996, p. 112-115.
- [Glover 1997] F. W. Glover, M. Laguna, "**Tabu Search**", Kluwer Academic Publishers, Boston, 1997.
- [G.983 1998] ITU Draft Recommendation G.983, "**High Speed Optical Access Systems Based on Passive Optical Network (PON) Techniques**", 1998.
- [Hubbel 1997] Y. C. Hubbel and L. M. Sanders, "**A Comparison of the IRIDIUM and AMPS System**", IEEE Network, March/April 1997, p. 52-59.
- [Hummel 1992] Paulo Roberto Vampré Hummel, Mauro Roberto B. Taschner, "**Análise e Decisão sobre Investimentos e Financiamentos**", Editora Atlas, 3^a edição, São Paulo, 1992.
-

-
- [Humphrey 1997] Marlis Humphrey, John Freeman, "**How xDSL Supports Broadband Services to the Home**", IEEE Network, January/February 1997, p. 14-23.
- [Ims 1997] Leif Aarthun Ims, K. Stordahl, B. T. Olsen, "**Risk Analysis of Residential Broadband Upgrade in a Competitive and Changing Market**", IEEE Communications Magazine, June 1997, p. 96-103.
- [Ims 1998] Leif Ims, B. T. Olsen, D. Myhre, K. Stordahl, "**Examining the technologies, migration strategies and economics of broadband wireline access network architectures**", Presented at the IIR Conference - Evaluating Broadband Access Network Strategies, Londres, February 1998.
- [ITU-T 1993] "**ITU-T Rec. I.112 - Integrated Services Digital Network General Structure - Terminology**", March 1993.
- [Linna 1998] P. Linna et al, "**Opportunities for Broadband Radio Technologies in the Access Network**", EURESCOM Project P614 Deliverable 4, March 1998.
- [Malley 1992] Daniel P. Malley, O. K. Tonguz, "**Fiber in the Loop: Where and When is it Feasible**", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 10, No. 9, December 1992, p. 1523-1544.
- [Martinelli 1996] Camilo E. Martinelli, F.R. Carneiro, "**Evolução das Redes Híbridas Fibra/Coaxial**", Anais do XII Seminário de Redes do Sistema Telebrás, Agosto 1996, p. 247-258.
- [Martinelli 1997] Ricardo Martinelli, "**Implantação de Rede Óptica Primária - ROP**", Anais do XIII Seminário de Redes do Sistema Telebrás, Junho 1997, p. 197-211.
- [Mattheus 1998] A. Mattheus, B. Jacobs, Ph. Schröter, M. Salerno, E. Demierre, U. Ferrero, G. Paksy, J. Schneider, "**Business Opportunities for FTTH as a Consumer Product**", Annals of Proc. NOC'98 (Network and Optical Communications), vol. 1, p.119-126, Manchester, UK, June 1998.
- [Maxwell 1996] Kim Maxwell, "**Asymmetric Digital Subscriber Line: Interim Technology for the Next Forty Years**", IEEE Communications Magazine, October 1996, p. 100-106.
-

-
- [Michalewicz 1996] Z. Michalewicz, "**Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs**", 3rd ed., Springer-Verlag, 1996.
- [Nemhauser 1988] George L. Nemhauser, Laurence A. Wolsey, "**Integer and Combinatorial Optimization**", Wiley, 1988.
- [Olsen 1996] Borgar T. Olsen et al., "**Techno-Economic Evaluation of Narrowband and Broadband Access Network Alternatives and Evolution Scenario Assessment**", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 14, No. 6, August 1996, p. 1184-1204.
- [Quaglia 1995] E. J. Guaglia, H. M. F. Tavares e R. V. Ribeiro, "**O Enfeixamento no Planejamento da Transmissão: Um Estudo de Caso**", Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, Águas de Lindóia, p. 548-463.
- [Sexton 1997] Mike Sexton and Andy Reid, "**Broadband Networking: ATM, SDH and SONET**", Artech House, Boston, 1997.
- [Silva 1997] Roberto Corrêa da Silva, "**Evolução da Rede Fixa na TELEMIG**", Anais do XIII Seminário de Redes do Sistema Telebrás, Junho 1997, p. 117-137.
- [Sosnosky 1991] J. Sosnosky, "**SONET Ring Applications for Survivable Fiber Loop Network**", IEEE Communications Magazine, June 1991, p. 51-58.
- [Steuer 1986] R. Steuer, "**Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation and Application**", Wiley, New York, 1986.
- [Stordahl 1995] Kjell Stordahl, Eddie Murphy, "**Forecasting Long-Term Demand for Service in the Residential Market**", IEEE Communications Magazine, February 1995, pp. 44-49.
- [TELEBRÁS 1996] Prática SDT – 210-120-103, "**Conceitos de Rede Óptica Primária**", Telebrás, Brasília, Abril de 1996.
- [Zaganiaris 1993] A. Zaganiaris et al., "**Life Cycle Costs and Economical Budget of Optical and Hybrid Access Networks**", 5th. International Workshop on Optical/Hybrid Access Network, Montreal, Sept. 1993, 7.01.01-7.01.08.
-

Anexo 1

LISTA DE TERMOS TÉCNICOS

AC	– Alternating Current (Corrente Alternada)
ADM	– Add-Drop Multiplexer (Multiplexador de Adiciona - Deriva)
ADSL	– Asymmetric Digital Subscriber Line (Linha Digital de Assinante Assimétrica)
AMPL	– A Modeling Language for Mathematical Programming (Linguagem de Modelagem para Programação Matemática)
APON	– ATM - based Broadband Passive Optical Network (Rede Óptica Banda-Larga baseada em ATM)
ASR	– Área de Serviço Remota
ASRO-P	– Área de Serviço Remota Óptica com Seções de Serviço Atendidas por Cabos Alimentadores de Pares Metálicos
ASRO-UR	– Área de Serviço Remota Óptica com Seção de Serviço Atendida por Unidades Remotas
ATM	– Asynchronous Transfer Mode (Modo de Transferência Assíncrono)
CATV	– Community Antenna TV (TV a Cabo)
CCCSR	– Central de Controle e Comutação do Sistema Rádio
CEV	– Control Environment Vault
ELO	– Equipamento de Linha Óptico
EO	– Empresa Operadora
ER	– Estágio Remoto
ERB	– Estação Rádio Base

ET	– Estação Telefônica
FITL	– Fiber-In-The-Loop
FLC	– Faixa-Larga Residencial
FLR	– Faixa-Larga Comercial
FSAN	– Full Services Access Networks (Rede de Acesso para Todos os Serviços)
FTTC	– Fiber-to-the-Curb (Fibra até a Calçada)
FTTH	– Fiber-to-the-Home (Fibra até o Usuário)
HDSL	– High-data-rate Digital Subscriber Line (Linha Digital de Assinante com Alta Taxa de Dados)
HFC	– Hybrid Fiber/Coax (Híbrida Fibra/Coaxial)
IFC	– Installed First Cost (Custo de Instalação)
ITU - T	– International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization sector of ITU (União Internacional das Telecomunicações - Setor de Padronização)
Kbps	– Kilobits por segundo
LEO	– Low Earth Orbit (Baixa Órbita)
Mbps	– Megabits por segundo
MTR	– Módulo Terminal da Central
NPV	– Net Present Value (Valor Presente)
NT	– Network Termination (Terminador de Rede)
ODNI	– Optical Distribution Network Interface (Interface de Rede para Distribuição Óptica)
OLT	– Optical Line Terminal (Terminal de Linha Óptico)

OLT	– Optical Line Transmission Multiplexer (Multiplexador de Linha Óptica)
ONU	– Optical Network Unit (Unidade de Rede Óptica)
PCM	– Pulse Code Modulation (Modulação por Código de Pulso)
PLIM	– Programação Linear Inteira Mista
PON	– Passive Optical Networks (Rede Óptica Passiva)
RDSI	– Rede Digital de Serviço Integrado
RF	– Rádio Frequência
RNT	– Rede Nacional de Telefonia
ROP	– Rede Óptica Primária
SDH	– Synchronous Digital Hierarchy (Hierarquia Digital Síncrona)
SNI	– Service Network Interface
SS	– Seção de Serviço
SSAO	– Seção de Serviço com Acesso Óptico
STM - N	– Synchronous Transport Module Level N (Módulo de Transporte Síncrono, nível N)
SvRT	– Soluções via Rádio Terrestre
Tx / Rx	– Transmissor / Receptor
UR	– Unidade Remota
VoD	– Video on Demand (Video sob Demanda)
xDSL	– Digital Subscriber Line (Linha Digital de Assinante - equívale às soluções ADSL, HDSL)
WWW	– Wide World Web

Anexo 2

PLANILHA DE CUSTOS

EQUIPAMENTOS

METÁLICA + xDSL	Custo(US\$)
Modems ADSL (par)	2.000,00
Modems HDSL (par)	2.000,00
Set-top para ADSL (usuário)	350,00
Placa RDSI (usuário)	400,00

ROP	
OLTM-21 (STM-1)	11.120,00
OLTM-42 (STM-1)	12.620,00
OLTM-63 (STM-1)	14.120,00
ADM-21 (STM-1)	14.300,00
ADM-42 (STM-1)	15.800,00
ADM-63 (STM-1)	17.300,00

APON-FTTC	
OLT (10.000 assinantes faixa-estreita + 2.500 faixa-larga)	231.250,00
ODNI (622 Mbps <i>downstream</i> / 155 Mbps <i>upstream</i>)	4.000,00
ONU32 (128 assinantes faixa-estreita + 32 faixa-larga)	1.025,00
Interface individual para o serviço VOZ (ONU)	125,00
Interface individual para o serviço RDSI (ONU)	150,00
Interface individual para o serviço FLR (ONU)	350,00
Interface individual para o serviço FLC (ONU)	350,00
Set-top digital para o serviço FLR (usuário)	350,00
Interface de dados para o serviço FLC (usuário)	350,00

Placa RDSI (usuário)	400,00
Splitter 1:4	68,00

CABOS (Custo por Metro)

CTS APL 40-400 (Metálico - 400 pares)	8,61
CTS APL 40-600 (Metálico - 600 pares)	12,54
CTS APL 40-900 (Metálico - 900 pares)	16,27
CFOA.SM.APL.G 06 (Óptico - 6 fibras)	1,66

INFRA-ESTRUTURA

Canalização urbana completa com 6 Dutos (por metro)	60,00
Subduto com 4 bocas (por metro)	10,00
Armário óptico ROP	7.000,00
Armário de distribuição (1650 assinantes)	3.000,00
Abrigo para o Nó de Acesso FTTC	8.000,00

Anexo 3

COMPLEXIDADE COMPUTACIONAL DOS CENÁRIOS ESTUDADOS

Neste anexo apresentamos os informações referentes à complexidade computacional dos modelos *xDSL versus ROP* e *xDSL versus APON-FTTC* para os cenários avaliados no capítulo 07. Dados como número de variáveis de decisão (binárias e reais), número de restrições, e tempo de execução são relatados nas tabelas a seguir.

Cenário 1

Parâmetro <i>Orçam. (kUS\$)</i>	Número de Variáveis		Número de Restrições	Tempo de Execução (mm:ss)
	Binárias	Reais		
1.192,5	73	192	201	00:40
1.150,0	73	196	202	01:52
1.100,0	73	196	202	01:35
1.050,0	73	196	202	01:44
1.000,0	73	196	202	01:50
950,0	73	196	202	01:47
900,0	73	196	202	02:14
838,3	73	196	202	04:30

Tabela A3.1 – Complexidade computacional do cenário 1.

Cenário 2

Parâmetro <i>fddij</i>	Número de Variáveis		Número de Restrições	Tempo de Execução (mm:ss)
	Binárias	Reais		
100%	73	196	202	00:25
90%	73	196	202	00:30
80%	73	196	202	00:50
70%	73	196	202	00:55
60%	73	196	202	01:15
50%	73	196	202	01:35
40%	73	196	202	01:52
30%	73	196	202	04:27
20%	73	196	202	03:10
10%	73	196	202	05:30
0%	73	196	202	05:25

Tabela A3.2 – Complexidade computacional do cenário 2.

Cenário 3

Parâmetro Orçam. (kUS\$)	Número de Variáveis		Número de Restrições	Tempo de Execução (mm:ss)
	Binárias	Reais		
1.401,3	74	124	131	02:15
1.300,0	74	162	132	14:20
1.250,0	74	162	132	40:15
1.200,0	74	162	132	42:45
1.150,0	74	162	132	44:14
1.100,0	74	162	132	43:51
1.052,2	74	162	132	45:23

Tabela A3.3 – Complexidade computacional do cenário 3.

Cenário 4

Parâmetro Custo Grupo 2	Número de Variáveis		Número de Restrições	Tempo de Execução (mm:ss)
	Binárias	Reais		
100%	74	175	199	00:02
95%	74	175	199	00:09
90%	74	175	199	00:04
85%	74	175	199	00:09
80%	74	175	199	00:20
75%	74	175	199	01:27
70%	74	175	199	06:05
67%	74	175	199	11:58
65%	74	175	199	15:02
63%	74	175	199	20:19
60%	74	175	199	00:27

Tabela A3.4 – Complexidade computacional do cenário 4.

Cenário 5

Parâmetro Instância	Número de Variáveis		Número de Restrições	Tempo de Execução (mm:ss)
	Binárias	Reais		
1	74	175	199	00:02
2	74	175	199	04:45
3	74	175	199	36:40
4	74	175	199	36:12
5	83	175	207	51:37
6	83	175	206	01:40
7	90	175	213	02:20

Tabela A3.5 – Complexidade computacional do cenário 5.