Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

ABORDAGEM EVOLUTIVA PARA O PLANEJAMENTO MULTI-PERÍODO DA EXPANSÃO DA REDE DE ACESSO AOS SERVIÇOS DE TELECOMUNICAÇÕES

JOANA TEIXEIRA MACHADO BANOV

Tese de Doutorado

Campinas
2005

Universidade Estadual de Campinas

Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

Departamento de Engenharia de Sistemas

ABORDAGEM EVOLUTIVA PARA O PLANEJAMENTO MULTI-PERÍODO DA EXPANSÃO DA REDE DE ACESSO AOS SERVIÇOS DE TELECOMUNICAÇÕES

Aluna:

Joana Teixeira Machado Banov

Orientadores:

Prof. Dr. Carlos Magnus Carlson Filho

Prof. Dr. Raul Vinhas Ribeiro

Banca examinadora:

Prof. Dr. Raul Vinhas Ribeiro

Prof. Dr. Paulo Valente

Prof. Dr. Vinícius Armentano

Prof. Dr. Marco Antonio Bergamaschi

Prof. Dr. Hermano Tavares

Profa. Dra. Franklina M. Bragion de Toledo

Prof. Dr. Edson Luiz Ursini

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 DOUTORA EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

RESUMO

Após a privatização, o setor de telecomunicações vem sofrendo grandes transformações tecnológicas. Do ponto de vista do usuário, isso significa a disponibilidade de serviços mais modernos. Para as empresas operadoras, a privatização significa concorrência. Para ganhar mercado é preciso um planejamento otimizado por parte das operadoras, de modo a maximizar receitas e evitar gastos excessivos com investimentos, operações e gerenciamento das redes. Este estudo tem como objetivo auxiliar os planejadores na expansão de longo prazo da rede de acesso aos serviços de telecomunicações. O trabalho apresenta os modelos matemáticos correspondentes e propõe um método de resolução evolutivo capaz de lidar com a complexidade intrínseca do problema de Programação Linear Inteiro Misto (PLIM). O Algoritmo Híbrido Evolutivo (AHE) decompõe o problema em duas partes, uma inteira e outra real. A parte evolutiva assume a determinação das variáveis de decisão inteiras e é baseada em algoritmos genéticos – método heurístico que imita a evolução das espécies para gerar soluções candidatas ao problema. A avaliação dessas soluções – função de adequação – acontece com a resolução do problema restante, de fluxo em redes, por meio de métodos clássicos de otimização linear. O algoritmo genético é ainda incrementado por regras anti-violação para evitar a geração de soluções candidatas infactíveis. As comparações de performance com o *solver* CPLEX® comprovam que o AHE cumpre com louvor sua meta de fornecer resultados de boa qualidade para o problema em um tempo computacional de execução aceitável.

Palavras-chave: Planejamento de redes. Otimização. Algoritmos Genéticos.

ABSTRACT

After privatization, the telecommunication area has been experienced big technological changes. From the user point of view, this means access to more modern services. For the service providers, the privatization means competition. The service providers need an optimized business plan to increase their market share, so that they can maximize their revenue and avoid excessive costs with investments, operation and management of the network. This research has the goal to assist the planners in their long-term project to expand the access network to the telecommunications services. This study presents corresponding mathematical models and proposes an evolutive resolution method capable to deal with the intrinsic complexity of the Mixed Integer Linear Programming problem (PLIM). The Hybrid Evolutive Algorithm (AHE) disassembles the problem in two parts. The evolutionary part assumes the evaluation of integer decision variables and it is based in genetic algorithms – heuristic method that imitates the evolution of species to generate possible solutions for the problems. The evaluation of these solutions – fitness function – is achieved by solving the remaining network flow problem via classic linear optimization methods. The genetic algorithm is also enhanced by anti-violation rules to avoid generation of non-feasible solutions. The performance comparisons with the solver CPLEX® confirms that the AHE does accomplish its goal of providing good quality results for the problem in an acceptable computer time.

Key words: Network planning. Optimization. Genetic Algorithms.

"A vida não é a que a gente viveu, e sim a que a gente recorda, e como recorda para contá-la".

Gabriel García Márquez

Este trabalho contou com o apoio financeiro da CAPES.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não seria possível sem a ajuda e o companheirismo de pessoas especiais. Gostaria de agradecer:

- Aos meus orientadores, Carlos e Raul, pelo grande incentivo de continuar adiante e pela presença sempre confiante nos momentos importantes do desenvolvimento desta tese; em especial ao Carlos, pela orientação cuidadosa e dedicada ao longo desses últimos anos, e também pela sua amizade e estímulo nos bons e maus momentos;
- Ao prof. Gerárd Authié, pela orientação e dedicação a este trabalho durante minha estadia na maravilhosa Toulouse;
- Aos professores da faculdade de engenharia elétrica pelo aprendizado, sugestões e críticas, fundamentais a este trabalho;
- Aos funcionários da faculdade pela ajuda nos assuntos operacionais durante a realização do doutorado;
- Aos amigos, craques em programação e implementação computacional (em especial à Fran!), que me prestaram uma ajuda fundamental para o desenvolvimento do método de resolução; também aos amigos de doutorado, que compartilham esta fase bem de perto, em especial ao Marcos, Edílson, Marcelo, Luiz, Vinícius e Aníbal;
- Às minhas grandes amigas, Lú e Fran, por estarem sempre ao meu lado; aos amigos de Sampa, Jú, Rê, Flá e Pietro, e aos grandes amigos de Pira. Amizade sempre cai bem!
- À minha família, pelo amor incondicional durante esta fase da minha vida. Para meu amor, Jú, para meu filhinho e luz da minha vida, Davi, para meus pais, Janét e Machado, para meus irmãos, Júlia e Virgílio, para meus sogros, Fê e Júlio, para meu cunhado, Carlos, para as vovós, Hilda, Armelinda, Laurinda e Aparecida, para meus titios e primos (em especial ao Ricardo, por me ensinar tanto sobre tele!), de perto e de bem longe, e para todos os agregados – esse título também é de vocês!

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....1

Capítulo 1 – PANORAMA DO SISTEMA DE TELECOMUNICAÇÕES.....6

1.1 Sistema de Telecomunicações.....6

1.2 Rede de Acesso.....9

1.3 Serviços de Telecomunicações.....11

1.4 Soluções Tecnológicas de Acesso.....15

Capítulo 2 – PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DA REDE DE ACESSO.....24

2.1 Introdução.....24

2.2 Revisão Bibliográfica.....25

2.3 Problema de Planejamento da Expansão da Rede de Acesso.....28

2.4 Representação Gráfica da Rede de Acesso.....32

2.5 Modelagem Matemática.....35

2.5.1 Modelo Matemático para o Planejamento da Expansão da Rede de Acesso em um Único Período.....35

2.5.2 Modelos Matemáticos para o Planejamento da Expansão da Rede de Acesso em Múltiplos Períodos.....39

2.6 Complexidade Computacional.....51

Capítulo 3 – MÉTODO HÍBRIDO DE RESOLUÇÃO.....58

3.1 Introdução.....58

3.2 Algoritmos Genéticos.....60

3.3 Algoritmo Híbrido Evolutivo – AHE.....67

Capítulo 4 – APLICAÇÕES.....80

4.1 Introdução.....80

4.2 Considerações.....80

4.3 Apresentação dos Cenários.....84

4.4 Dados Gerais de Planejamento e de Rede.....91

4.5 Parâmetros para o Algoritmo Híbrido Evolutivo.....96

4.6 Resultados.....97

4.7 Conclusões.....106

Capítulo 5 – CONCLUSÕES.....109

REFERÊNCIAS.....113

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – Entroncamentos de centrais telefônicas.....7

FIGURA 1.2 – Componentes de uma rede de telefonia fixa comutada.....9

FIGURA 1.3 – Componentes da rede de acesso.....11

FIGURA 1.4 – Acessos (em milhões) no Brasil.....12

FIGURA 1.5 – Equipamentos considerados em uma solução xDSL.....17

FIGURA 1.6 – Arquitetura de uma rede APON.....20

FIGURA 1.7 – Sistema sem fio.....22

FIGURA 2.1 – Estrutura geral de modelagem.....30

FIGURA 2.2 –Representação da rede para um período de planejamento.....33

FIGURA 2.3 – Relação entre as várias classes de problemas.....53

FIGURA 3.1 – Exemplo de *crossover* de um ponto.....61

FIGURA 3.2 – Exemplo de *crossover* de dois pontos.....61

FIGURA 3.3 – Exemplo de *crossover* uniforme.....62

FIGURA 3.4 – Roleta de proporcionalidade do valor de *fitness*.....62

FIGURA 3.5 – Fluxograma geral para um algoritmo genético.....65

FIGURA 3.6 – Fluxograma geral para o AHE.....67

FIGURA 3.7 – Exemplo da codificação de uma solução-candidata.....68

FIGURA 3.8 – Ponto de *crossover*.....76

FIGURA 3.9 – Mutação entre arcos.....76

FIGURA 3.10 – Ausência de equipamentos no arco 1 de filho 2.....77

FIGURA 3.11 – Fluxograma do Algoritmo Híbrido Evolutivo.....78

FIGURA 4.1 – Rede de acesso analisada.....87

FIGURA 4.2 – Solução para expansão da rede de acesso.....95

FIGURA 4.3 – Comparação entre os resultados obtidos para o cenário 1 pelo AHE e CPLEX®.....101

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 – Velocidade de transmissão exigida pelos serviços.....15

TABELA 2.1 – Comparativo de número de variáveis e restrições dos modelos lineares multi-período.....50

TABELA 4.1 – Informações sobre as tecnologias candidatas.....88

TABELA 4.2 – Informações sobre os serviços.....89

TABELA 4.3 – Previsão de demanda.....89

TABELA 4.4 – Resultados do planejamento para o cenário 1 na situação A.....93

TABELA 4.5 – Evolução dos equipamentos nos arcos – Situação A.....94

TABELA 4.6 – Resultados do planejamento para o cenário 1 na situação B.....96

TABELA 4.7 – Resultados do planejamento para o cenário 2 na situação A.....97

TABELA 4.8 – Resultados do planejamento para o cenário 2 na situação B.....98

TABELA 4.9 – Resultados do planejamento para o cenário 3 na situação A.....99

TABELA 4.10 – Soluções de planejamento sem equipamentos rádio microondas.....100

TABELA 4.11 – Resultados do planejamento para o cenário 3 na situação B.....100

LISTA DE MODELOS MATEMÁTICOS

MODELO 2.1 – Modelo de planejamento geral mono-período.....36

MODELO 2.2 – Modelo de planejamento geral multi-período.....41

MODELO 2.3 – Modelo não-linear de planejamento geral multi-período com penalidade...45

MODELO 2.4 – Modelo linear de planejamento geral multi-período com penalidade.....47

MODELO 2.5 – Modelo de planejamento geral multi-período com *schedules*.....48

MODELO 2.6 – Modelo linear de planejamento geral multi-período com *schedules*.....49

MODELO 2.7 – Modelo de programação inteira para o planejamento multi-período.....54

MODELO 2.8 – Modelo para o problema da mochila múltipla 0-1.....55

MODELO 2.9 – Modelo para o problema generalizado de atribuição.....56

MODELO 3.1 – Modelo de programação linear.....73

MODELO 3.2 – Modelo de programação linear para cálculo de *fitness*.....75

MODELO 4.1 – Modelo de planejamento multi-período com orçamento fixo.....82

MODELO 4.2 – Modelo de planejamento multi-período com orçamento variável.....86

LISTA DE ACRÔNIMOS

ADSL	*Asymmetric Digital Subscriber Line*
AG	Algoritmos Genéticos
AHE	Algoritmo Híbrido Evolutivo
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
APON	*ATM Passive Optical Network*
ATM	*Asynchronous Transfer Mode*
BLC	Banda-Larga Comercial
BLR	Banda-Larga Residencial
CATV	*Community Antenna Television*, ou TV a Cabo
CC	Central de Comutação
CCC	Central de Comutação e Controle
CCCSR	Central de Comutação e Controle do Sistema Rádio
CF	Centro de Fios
CT	Central Telefônica
DSL	*Digital Subscriber Line*
EM	Estação Móvel
EMBRATEL	Empresa Brasileira de Telecomunicações
ER	Estação Remota
ERB	Estação Rádio Base
ET	Estação Telefônica
ETA	Estação Terminal do Assinante
FAM	Fator de Atendimento Mínimo
FITL	*Fiber In The Loop*

FTTB	*Fiber-To-The-Business*
FTTC	*Fiber-To-The-Curb*
FTTH	*Fiber-To-The-Home*
GA	*Genetic Algorithms*
GAP	*Generalized Assignment Problem*
Gbps	Gigabits por segundo
GLIT	*Generic Local Improvement Template*
HDSL	*High bit-rate Digital Subscriber Line*
IP	*Internet Protocol*
ITU	*International Telecommunication Union*
Kbps	Quilobits por segundo
LAN	*Local Area Network*
Mbps	Megabits por segundo
MPL	*Mathematical Programming Language*
NGN	*Next Generation Network*, ou Rede de Próxima Geração
OLT	*Optical Line Terminal*
ONU	*Optical Network Unit*
PCV	Problema do Caixeiro Viajante
PGA	Problema Generalizado de Atribuição
PGMU	Plano Geral de Metas para Universalização
PI	Problema Inteiro
PL	Problema Linear
PLIM	Problema Linear Inteiro Misto
PMO	Programação de Múltiplos Objetivos
POC	Problema de Otimização Combinatorial

POP	Ponto de presença (*Point of Presence*) que permite ligações à *Internet*
QoS	Qualidade do Serviço
RDSI	Rede Digital de Serviços Integrados
ROI	*Return on Investments*, ou Retorno sobre os Investimentos
RPTC	Rede Pública de Telefonia Comutada
RTFC	Rede de Telecomunicações Fixa Comutada
SCM	Serviço de Comunicação Multimídia
SDSL	*Symmetric Digital Subscriber Line*
SHDSL	*Single-pair High-speedy Digital Subscriber Line*
SMC	Sistema Móvel Celular
STFC	Sistema Telefônico Fixo Comutado
TDM	*Time Division Multiplex*
UCS	Unidade de Controle do Sistema
USG	Unidade de Supervisão e Gerenciamento
VoD	*Vídeo on Demand*, ou Vídeo sob Demanda
VoIP	Voz sobre IP
VPL	Valor Presente Líquido
WLL	*Wireless Local Loop*
www	*World Wide Web*
xDSL	*Digital Subscriber Line*

INTRODUÇÃO

No mundo todo, a abertura do mercado gerou uma imensa revolução no panorama do setor de telecomunicações. As mudanças são grandes e constantes, marcadas pelo surgimento de novos e ambiciosos serviços, por exigências tecnológicas de transmissão e acesso, e por muita competitividade. Planejar a expansão do **sistema de telecomunicações** não é fácil pois exige a combinação de vários fatores. O dinamismo na área de telecomunicações, especialmente com relação aos novos serviços e tecnologias, torna fundamental o planejamento do sistema.

Inicialmente, no Brasil, as empresas operadoras recém-privatizadas preocuparam-se em atender as exigências do **Plano Geral de Metas para Universalização** (PGMU) estabelecidas pela ANATEL[1] – Agência Nacional de Telecomunicações. As principais metas do PGMU são definir prazos para atendimento das solicitações de acesso (telefones públicos ou individuais) e densidade de telefones em relação à população, adaptar telefones públicos para pessoas portadoras de deficiência, bem como disponibilizar centros de intermediação para a comunicação surdo-ouvinte e surdo-surdo, e garantir chamadas gratuitas para os serviços de emergência. Após cumpridas as metas, a preocupação passou a ser a recuperação dos investimentos, o aumento nas receitas e a participação no mercado. Essa guinada nos interesses das operadoras deve ser acompanhada de perto pela ANATEL, que tem um papel de extrema importância nesta nova situação de privatização da prestação de serviços de telecomunicações. Quando essa fiscalização não é eficiente, a privatização pode ser uma armadilha para o usuário, que não têm garantias de qualidade de serviço nem de atendimento (é preciso haver interesse financeiro por parte da operadora na prestação daquele serviço).

Grande parte da demanda reprimida, a maioria por serviços de voz (telefonia convencional), já foi atendida. De 1998, ano da privatização, até 2003 houve um aumento de mais de 96% no número de acessos telefônicos em uso no Brasil (VALENTE, 2004). Mas

[1] Órgão responsável pela regulamentação e fiscalização dos serviços de telecomunicações e pelo controle sistêmico e dinâmico do cumprimento das obrigações impostas às empresas de telecomunicações.

o serviço de voz não é rentável, embora demandado em alta escala, socialmente bem distribuído após a privatização e responsável por quase toda a receita das prestadoras. As empresas operadoras estão, portanto, buscando alternativas para maximizar seus lucros com a prestação de novos, e mais rentáveis, serviços de telecomunicações.

A explosão nas demandas por serviços de dados e vídeo certamente influenciou o aumento no número de acessos de telecomunicações no Brasil. Dentre os **Serviços de Comunicação Multimídia** (SCM), que abrangem todos os sinais de áudio, vídeo, dados, voz e outros sons, imagens, textos e outras informações de qualquer natureza, o grande destaque é a *Internet*.

No Brasil e no resto do mundo, embora existam diferenças no crescimento da demanda por serviços SCM em decorrência da situação econômica, política e cultural do país, a expectativa do mercado é que o aumento da demanda por serviços de voz nos próximos anos tenda a ser vegetativo, enquanto que a demanda por serviços de dados e vídeo, especialmente aqueles vinculados à *Internet*, tenda a crescer rapidamente (SCHULZRINNE, 2002). Nos Estados Unidos, por exemplo, o tráfego da *Internet* cresceu astronomicamente na última década: foi de 1 Tbps/mês[2], em 1990, para aproximadamente 110.000 Tbps/mês em 2002. Desde 1997 o tráfego vem dobrando a cada ano, com taxas anuais de crescimento de cerca de 70 a 150%; as expectativas para 2006 e 2007 são para um crescimento de 50 ou 60% por ano (ODLYZKO, 2003).

Até há pouco tempo, a *Internet* só estava disponível em velocidades baixas (acesso discado), de baixa qualidade e acesso volátil. Hoje, este serviço é oferecido também em altas velocidades (acesso em bandas largas), com taxas de transmissão que podem chegar a 8 Mbps, para clientes residenciais e corporativos. No caso das operadoras *incumbents* (operadoras que detêm a infra-estrutura da antiga Telebrás daquela região; a Telefônica, por exemplo, é a operadora *incumbent* no Estado de São Paulo), o serviço de *Internet* chega às casas dos assinantes pela mesma malha de acesso usada pelo serviço de voz. A habilitação dessas redes, cujo cabeamento é praticamente todo metálico, para o atendimento de

[2] 1 terabyte é igual a 1.024 gigabytes.

serviços banda larga é possível graças às tecnologias de acesso xDSL (*Digital Subscriber Line*) – apresentadas mais à frente neste trabalho, que permitem transmitir altas taxas a partir de pares de cobre. Operadoras *espelhos* (operadoras regulamentadas pela ANATEL para explorarem a região em conjunto com a *incumbent*, de forma a evitar monopólios) podem oferecer o serviço através da implantação total da rede de acesso ou por redes já instaladas de suas empresas (como é o caso das operadoras de TV a cabo que já estão autorizadas a oferecerem serviços de *Internet*).

O sucesso da *Internet* apressou a discussão sobre redes convergentes – capazes de transportar, sobre a mesma plataforma, sinais de voz, dados e vídeo. As redes convergentes, chamadas **Redes de Próxima Geração** (ou simplesmente NGN – *Next Generation Networks*), são baseadas em transmissão de Protocolo de *Internet* (IP), que faz a comunicação de dados através de pacotes de informação. A NGN associa uma forte redução nos custos operacionais, gerenciais e de manutenção da rede com a viabilidade de novas fontes de receita, pois provê uma grande diversidade de serviços multimídia de próxima geração, resultando, portanto, no desejado ROI (*Return on Investment* ou retorno sobre o investimento) em um prazo significativamente curto.

As empresas operadoras vêm fazendo experimentos e cálculos para decidir onde e quando implantar a rede NGN. Além do alto custo para a implantação da nova rede, o grande receio é a perda de receita com o serviço de voz que, comparado com a alta capacidade de transmissão da nova rede, é oferecido quase que sem custo algum. Mas as perspectivas do mercado são bastante otimistas. O crescimento vertiginoso dos serviços banda larga deve responder por cerca de 60% do faturamento total das empresas nos próximos anos (IC WORLD, 2002). Na prática, empresas que já possuem redes independentes para os serviços oferecidos vêm investindo em tecnologias inovadoras de transmissão, enquanto empresas novas, que não possuem nenhuma infra-estrutura, ou operadoras de novas áreas de serviço optam pelo investimento nas redes de próxima geração.

O boom nas demandas pelos serviços de *Internet* e serviços multimídia em geral, associado ao surgimento de redes convergentes, vêm incentivando as empresas operadoras a

expandirem e evoluírem suas redes, em especial a **rede de acesso**, responsável pela conexão entre o assinante e sua respectiva central telefônica (CT). A rede de acesso, por chegar mais perto de cada assinante, é a maior e mais complexa em termos topológicos dentre as redes que compõem o sistema de telecomunicações. Por isso é a que passará pelas maiores mudanças durante a modernização e convergência do sistema.

O grande desafio das empresas operadoras é adaptar e/ou renovar suas instalações, de modo a capacitá-las, do ponto de vista topológico e tecnológico, ao fornecimento dos serviços num horizonte de longo prazo. Esse processo envolve muitas soluções tecnológicas alternativas e um enorme volume de recursos financeiros, além do dever de acompanhar o surgimento de novas tecnologias de acesso e o crescimento das demandas dos serviços já em vigor e os novos. Este trabalho desenvolve modelos matemáticos e um método evolutivo de resolução que ajudam as operadoras nesta difícil tarefa de planejar a expansão multi-período das redes de acesso.

O **Algoritmo Híbrido Evolutivo** (AHE) é baseado em algoritmos genéticos, método que imita a evolução genética para resolver problemas de otimização combinatorial. Os algoritmos genéticos vêm ganhando bastante visibilidade nos últimos anos na comunidade científica; as características de algoritmo populacional (que gera uma população de soluções candidatas ao problema, sendo capaz de "varrer" o espaço de soluções mais rapidamente) e poucas exigências para implementação tornam os algoritmos genéticos uma heurística rápida e fácil de aplicar para uma grande quantidade de problemas. Para resolver o problema de planejamento da expansão da rede de acesso desenvolveu-se um algoritmo híbrido: um algoritmo genético resolve a parte inteira do problema e um método clássico de otimização linear resolve o problema linear restante, de fluxo em redes.

Esta tese é composta por cinco capítulos. O **Capítulo 1** apresenta o sistema de telecomunicações e os componentes de uma rede de acesso; apresenta também uma descrição dos principais serviços de telecomunicações e tecnologias de acesso. O **Capítulo 2** enfatiza a importância do planejamento e os principais critérios de otimização da expansão da rede de acesso. Uma revisão bibliográfica do problema é apresentada, seguida

dos modelos matemáticos mono e multi períodos, que representam o referido planejamento; o capitulo é encerrado com uma breve discussão sobre a complexidade computacional do problema. O **Capítulo 3** introduz os algoritmos evolutivos e apresenta os algoritmos genéticos. A seguir, a metodologia híbrida de resolução é descrita. O **Capítulo 4** exibe e analisa as aplicações do método para diferentes cenários de competição e situações econômicas. No **Capítulo 5** o trabalho é concluído e as perspectivas futuras deste trabalho são expostas.

Capítulo 1

PANORAMA DO SISTEMA DE TELECOMUNICAÇÕES

1.1 Sistema de Telecomunicações

O sistema de telecomunicações abrange todas as **Redes de Telecomunicações** (conjunto operacional contínuo de circuitos e equipamentos indispensáveis à operação de serviço de telecomunicações) e demais instalações organizadas para a exploração de serviços de telecomunicações.

Antes da privatização do setor, em 1998, a maioria dos serviços de telecomunicações era prestada através da Rede Pública de Telefonia Comutada (RPTC). Hoje existe uma multiplicidade enorme de redes, operadas por concessionárias independentes para a prestação de serviços de voz, dados ou outras formas de telecomunicações, chamadas de Redes de Telecomunicação Fixa Comutada (RTFC).

A descrição da rede de telecomunicações que segue é baseada na antiga rede RPTC (rede da extinta Telebrás, responsável por mais de 95% dos serviços públicos de telecomunicações do país até 29 de julho de 1998, quando o sistema Telebrás foi privatizado), por se tratar de uma rede abrangente, consolidada e de estrutura conhecida, que hoje, explorada por diversas empresas operadoras privadas, presta uma enorme variedade de serviços de telecomunicações, como voz, comunicação de dados e *Internet*.

As funções básicas de comunicação entre os assinantes estão reunidas em centrais telefônicas (CT) espalhadas estrategicamente pela rede. As centrais telefônicas abrigam equipamentos responsáveis pela comutação entre os assinantes, capazes de encaminhar ou estabelecer automaticamente chamadas telefônicas.

A central telefônica a que estão conectados os assinantes de uma mesma região é chamada de central local. Para permitir que assinantes ligados a uma central local se conectem com os assinantes ligados à outra central local são estabelecidas conexões entre as duas centrais, conhecidas como circuitos troncos. No Brasil, um circuito tronco utiliza geralmente o padrão internacional da ITU (*International Telecommunication Union*)[3] para canalização digital de canais E1, iguais a 2 Mbps.

Uma cidade pode ter uma ou várias centrais locais. Quando a região tem um número grande de assinantes (uma região metropolitana por exemplo), pode ser necessário o uso de uma central local/trânsito (antiga central Tandem) que concentra o tráfego de outras centrais locais da região antes de encaminhá-lo, otimizando a tarefa de transmissão. As centrais local/trânsito também agrupam tráfego de centrais locais de outras cidades, estados ou países, e são organizadas hierarquicamente conforme sua área de abrangência, sendo as centrais-trânsito internacionais as de maior hierarquia. As conexões entre centrais com alto volume de tráfego, sejam elas locais ou trânsito, acontece por meio de *backbones* – circuitos de transmissão de alta velocidade (figura 1.1).

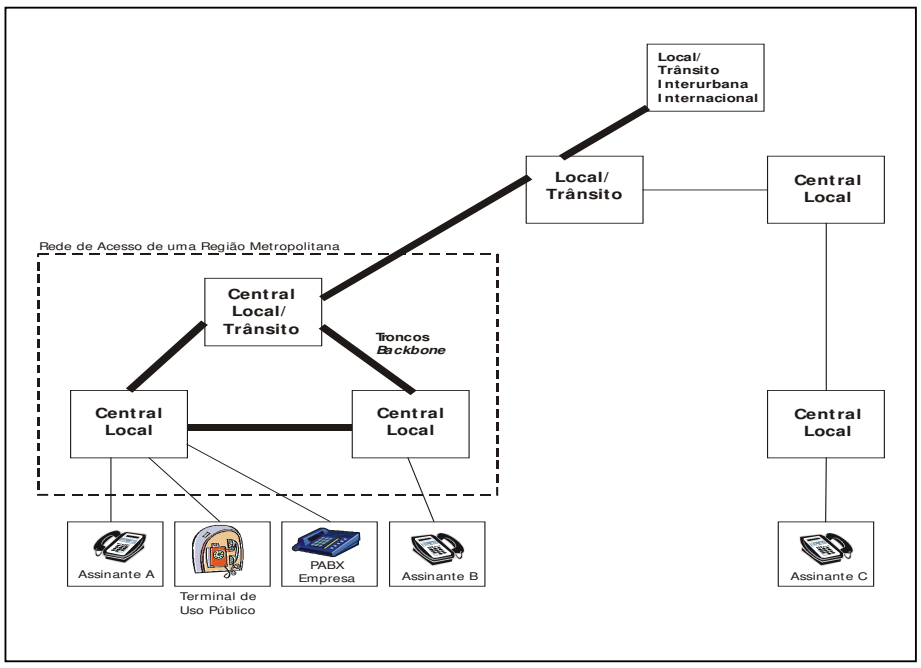


FIGURA 1.1 – Entroncamentos de centrais telefônicas.

[3] Órgão da ONU responsável pelo estabelecimento de normas e padrões em telecomunicações e radiodifusão no mundo.

A figura 1.2 apresenta os principais componentes de uma rede RTFC, que é formada pelas sub-redes de:

Comutação → rede que interliga as **centrais de comutação** (CC) responsáveis pela conexão entre os assinantes. As centrais de comutação, abrigadas em centrais telefônicas, exercem funções básicas de identificação e atendimento da chamada, encaminhamento da comunicação, supervisão e controle da comutação, bilhetagem e desligamento da chamada.

Acesso → rede responsável pela ligação física do assinante à sua respectiva CC. As redes de acesso são hoje predominantemente compostas de pares trançados de fios de cobre; um par é dedicado a cada assinante, conhecido como acesso ou linha telefônica.

Transporte → rede responsável pela interligação física, a altas taxas de transmissão, das centrais telefônicas, locais e trânsito. Esta rede é subdividida em **rede de entroncamento local**, que interliga CTs locais e **rede de entroncamento interurbano**, que interliga CTs de diferentes áreas locais.

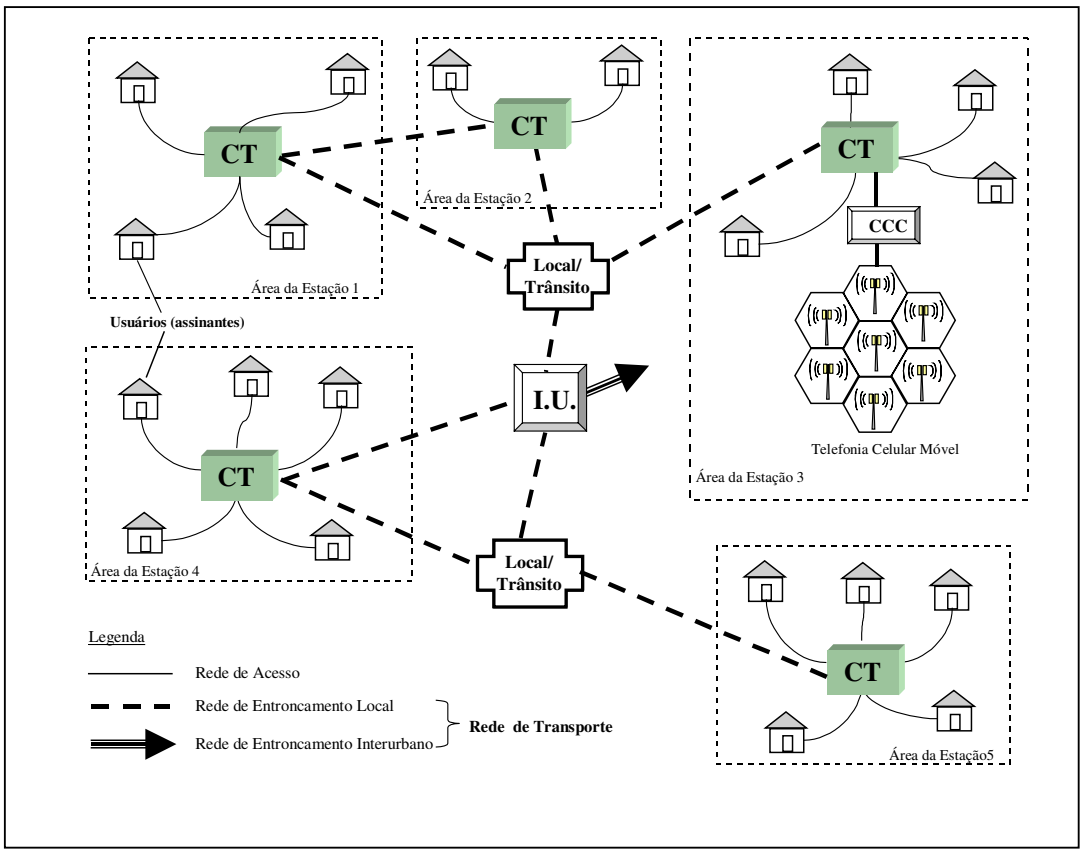


FIGURA 1.2 – Componentes de uma rede de telefonia fixa comutada.

Atualmente, o **Sistema de Telecomunicações Móvel Celular** (SMC) está completamente integrado à rede de telefonia fixa RTFC. O sistema móvel celular é composto de uma Central de Comutação e Controle (CCC), Estações Móveis (EM) e Estações Rádio Base (ERB), usadas para a radiocomunicação entre as EMs e a central CCC. Os equipamentos que interconectam o sistema móvel à rede de telefonia fixa estão localizados na CCC e na CT, respectivamente.

1.2 Rede de Acesso

A rede de acesso, responsável por conectar adequadamente cada usuário à sua respectiva central de comutação, é a maior em conexões físicas e a mais complexa dentre as que compõem uma rede de telecomunicações. Isso porque ela deve atingir cada um dos

assinantes; em 2003 o número de acessos instalados no mundo passou de 1 bilhão, atingindo quase 40 milhões de assinantes só no Brasil (VALENTE, 2004).

As futuras redes de acesso devem atender a um conjunto de requisitos. Os mais importantes são:

- Flexibilidade para adaptação a novas aplicações e serviços com características muito diferentes em termos de taxas de transmissão. A disponibilidade de tecnologias e arquiteturas com capacidade para satisfazer rapidamente novos pedidos será um fator determinante para a concorrência entre as operadoras;
- Largura de banda elevada para usuários residenciais ou comerciais é um requisito fundamental que afeta a escolha entre as várias opções tecnológicas disponíveis;
- Qualidade de serviço adequada para os diversos serviços oferecidos, sobretudo em termos de confiabilidade, acessibilidade e segurança das comunicações.

A rede de acesso, devido à sua complexidade, é dividida em dois segmentos (figura 1.3):

- **Acesso Secundário**, ou de distribuição, que liga os assinantes a um nó de acesso (ponto de aglomeração e/ou de distribuição de tráfego);
- **Acesso Primário**, ou alimentador, rede que liga os nós de acesso às CTs, passando por nós de controle – pontos de flexibilidade que podem abrigar repetidores/regeneradores e efetuar, quando necessário, emendas de cabos.

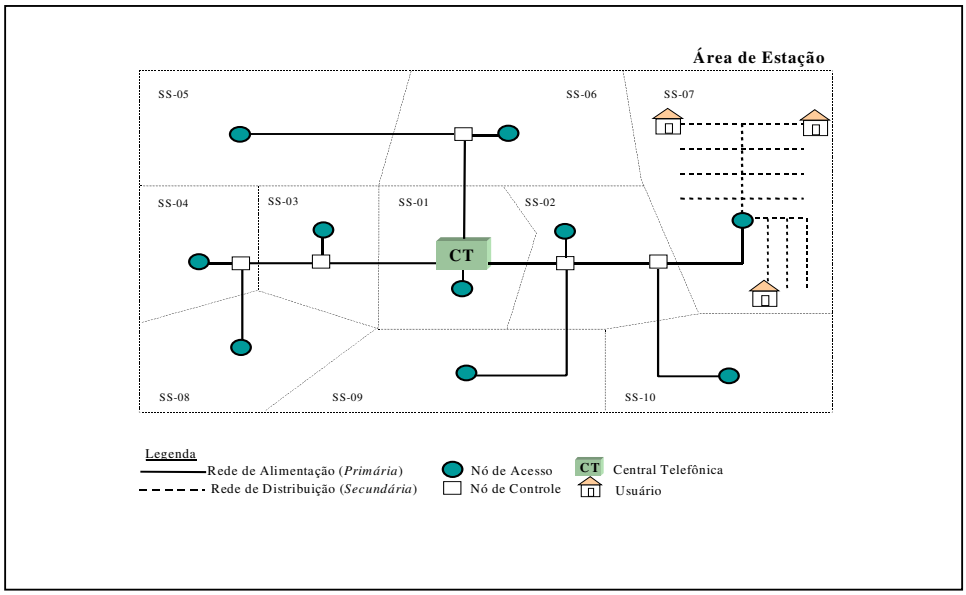


FIGURA 1.3 – Componentes da rede de acesso.

A prestação de diferentes serviços pode exigir diferentes características das redes de acesso, como topologias, tecnologias de acesso e meios de transmissão. Para a prestação de serviços fixos, a rede de acesso utiliza, tradicionalmente, cabos de cobre para interligar usuários e centrais telefônicas. Para oferecer serviços móveis, o acesso primário é usualmente fixo, ou seja, por meio de cabos metálicos ou ópticos.

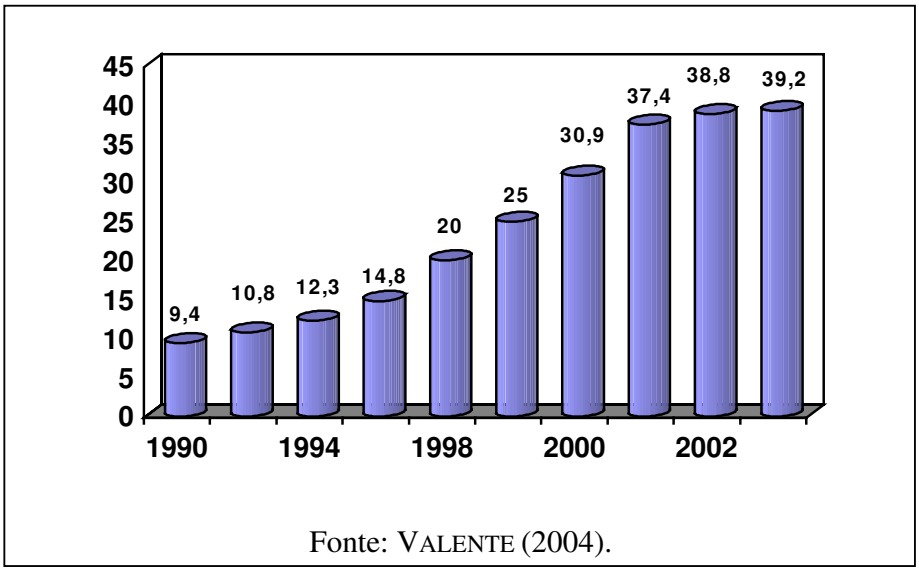
O trabalho desenvolvido nesta tese considera o segmento primário da rede de acesso (chamado, daqui para adiante, simplesmente de **rede de acesso**). Portanto, devido às similaridades dos dois sistemas, é possível aplicá-lo tanto em redes de acesso para telefonia fixa quanto para telefonia móvel.

1.3 Serviços de Telecomunicações

Serviço de Telecomunicações Fixo Comutado (STFC) é o serviço de telecomunicações que, por meio da transmissão de voz e de outros sinais, destina-se à comunicação entre pontos fixos determinados, utilizando processos de telefonia. As concessionárias prestadoras de STFC devem planejar e expandir suas redes de modo a projetá-las para o atendimento de

qualidade dos serviços (atuais e futuros), suportando o forte e contínuo crescimento da demanda.

As estatísticas de crescimento para os serviços de telecomunicações desde a privatização do setor e a difusão de seus serviços mostram um aumento muito elevado no número de acessos (figura 1.4) devido, principalmente, à popularização de serviços de comunicação de dados e vídeo via *Internet*.



Fonte: VALENTE (2004).

FIGURA 1.4 – Acessos em Telefonia Fixa (em milhões) no Brasil.

Para que a disponibilização desses serviços seja possível, é preciso que as empresas operadoras estejam atentas a algumas características e informações dos serviços, como taxas de transmissão e tipos de tráfego.

A velocidade (ou taxa) de transmissão é o principal atributo do serviço. É este parâmetro, normalmente medido em *Quilobits* por segundo (Kbps) ou *Megabits* por segundo (Mbps), que define se a rede está apta para oferecer, com qualidade, o serviço. Se as taxas de transmissão *downstream* (sentido CT $\rightarrow$ usuário) e *upstream* (sentido usuário $\rightarrow$ CT) são iguais, o serviço é simétrico, caso contrário é assimétrico.

O tipo de tráfego, se a transmissão é constante ou variável, define entre essa ou aquela tecnologia apropriada para o oferecimento de um serviço. É o caso do tráfego de *Internet*, que pode apresentar um comportamento enormemente volátil; durante uma promoção, por exemplo, o acesso de centenas de milhares de usuários a uma determinada página pode gerar picos de utilização em um determinado momento e cessar logo em seguida, exigindo uma solução de rede extremamente flexível.

Outras propriedades que devem ser levadas em conta são tolerância a erros, exigências quanto ao atraso do sinal e tipo de comutação, por circuito ou por pacote. A comutação por pacotes vem ganhando atenção especial, uma vez que pode indicar o futuro do serviço nas redes NGN (*Next Generation Network*), baseada na tecnologia IP (*Internet Protocol*), que usa esse tipo de comutação; *Internet* e VoIP (Voz sobre IP) são alguns exemplos.

Para contornar esta multiplicidade de especificações os serviços podem ser agrupados em: serviços banda-estreita e serviços banda-larga.

Serviços banda-estreita, ou *narrowband services*, exigem baixa taxa de transmissão. O canal básico de acesso pode estar em 64 Kbps simétricos para voz por exemplo, cujos sinais transmitidos podem ser analógicos ou digitais, ou em 144 Kbps simétricos para dados em baixa velocidade (como o telex, o fax e a *Internet* discada).

Serviços banda-larga, ou *broadband services*, exigem alta taxa de transmissão. Esses serviços podem ser divididos em duas outras faixas, residencial e comercial:

- Banda-Larga Residencial (BLR) para atendimento de demanda de serviços residenciais de 2 a 8 Mbps assimétricos. Alguns exemplos de serviços banda-larga residencial são:

    - CATV (*Community Antenna Television*, ou TV a Cabo): serviço de difusão de sinais de TV via cabo. Vários canais de imagem e som são oferecidos ao usuário simultaneamente;

- *Fastinternet*: serviço de *Internet* de alta velocidade. Provedoras deste serviço oferecem opções de conexão cujas velocidades variam de 256 Kbps a 8 Mbps;
- VoD (Vídeo sob Demanda): serviço onde o sinal é transmitido num horário pré-definido pelo usuário, ou seja, é um serviço de CATV cuja programação é controlada pelo assinante;
- Tele-jogos: serviço de jogos em rede, disponíveis em *sites* da *Internet*. A qualidade do serviço ainda é inferior às expectativas do usuário; as previsões são de redes mais velozes, capazes de suportar animações em 3D com alta definição;
- Acesso a Banco de Dados: serviço que 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.;
- *Teleworking*: é uma forma flexível de trabalho que pode atender uma variedade 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.;

- Banda-Larga Comercial (BLC) para atendimento de demanda de serviços comerciais com transmissão a 2 Mbps simétricos e assimétricos. Alguns exemplos são:

  - Dados em Alta Velocidade: permite a interconexão de redes de computadores mas exige transmissão bidirecional em altas velocidades;
  - Tele-Educação: possibilita o ensino a distância. A rede deve ser de alta velocidade, capaz de transmitir texto, figuras, animação interativa, vídeo clips e *World Wide Web* (www);

- Vídeo-Fone: além da transmissão de voz, o vídeo-fone permite 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.

A tabela 1.1 apresenta as taxas de transmissão para alguns serviços.

TABELA 1.1 - Velocidade de transmissão exigida pelos serviços.

Velocidade de transmissão				
Serviço	*Downstream* mínima (Mbps)	*Upstream* mínima (Mbps)	*Downstream* adequada (Mbps)	*Upstream* 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
Tele-working	0,128	0,128	4 - 6	1 -2
Tele-jogos	0,028	0,028	0,512	0,512
Home-banking	0,028	0,028	0,256	0,128
Home-shopping	0,028	0,028	4 - 6	0,128
Tele-medicina	0,128	0,064	4 - 6	1 - 2

1.4 Soluções Tecnológicas de Acesso

As principais limitações da evolução para uma rede multi-serviço estão relacionadas à capacidade de transmissão da rede de acesso, que atualmente tem uma infra-estrutura baseada em pares metálicos, é analógica e não suporta as taxas de transmissão exigidas pela maioria dos novos serviços, taxas bem mais elevadas que aquelas dispensadas para o serviço de voz. Além disso, serviços banda-larga como vídeo e *Internet* também exigem

qualidade e velocidade na transmissão.

A implantação de fibras ópticas na rede de acesso para possibilitar a instalação de equipamentos de alta velocidade seria a solução ideal. Mas é preciso considerar que em torno de 95% do sistema de acesso é metálico, e tornar óptico essa parte da rede implica em obras civis caras e complexas. Além disso, trocar o meio de transmissão exige a disposição de conversores eletro-ópticos em pontos de transferência de meio físico. Por isso existem certas prioridades na implantação de fibras na rede de acesso.

Há uma grande disponibilidade de soluções tecnológicas eficientes para a habilitação da rede de acesso à prestação de novos serviços. 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 escolhida seja capaz de suportar serviços banda-estreita com alta penetração e serviços banda-larga com baixa penetração. Em longo prazo, a rede deve suportar também os serviços banda-larga com alta penetração. As tecnologias de acesso mais usadas na rede atualmente estão definidas a seguir, subdivididas em tecnologias para plataforma metálica, óptica e sem fio.

Não é o intuito deste trabalho abordar profunda e detalhadamente as soluções tecnológicas. Portanto, a apresentação a seguir é sucinta, destacando apenas características relevantes para a modelagem matemática, apresentada à frente. Maiores detalhes sobre soluções tecnológicas de acesso podem ser encontrados em TOLEDO (2001) e HUMPHREY & FREEMAN (1997).

Rede Metálica

Linha Digital de Assinante *(xDSL)*

A xDSL (*Digital Subscriber Line*) é uma tecnologia capaz de transmitir sinais a altas taxas através da rede metálica, provocando apenas pequenas mudanças no sistema e atingindo um grande número de assinantes. As mudanças ficam por conta de *modems* de alta velocidade instalados nas duas extremidades da rede (CT e usuário) (figura 1.5). Chamada de solução

conservadora por causa do aproveitamento da rede metálica já instalada, a adoção da tecnologia xDSL pode considerar, inclusive, uma expansão em cabos metálicos para o atendimento de novos serviços.

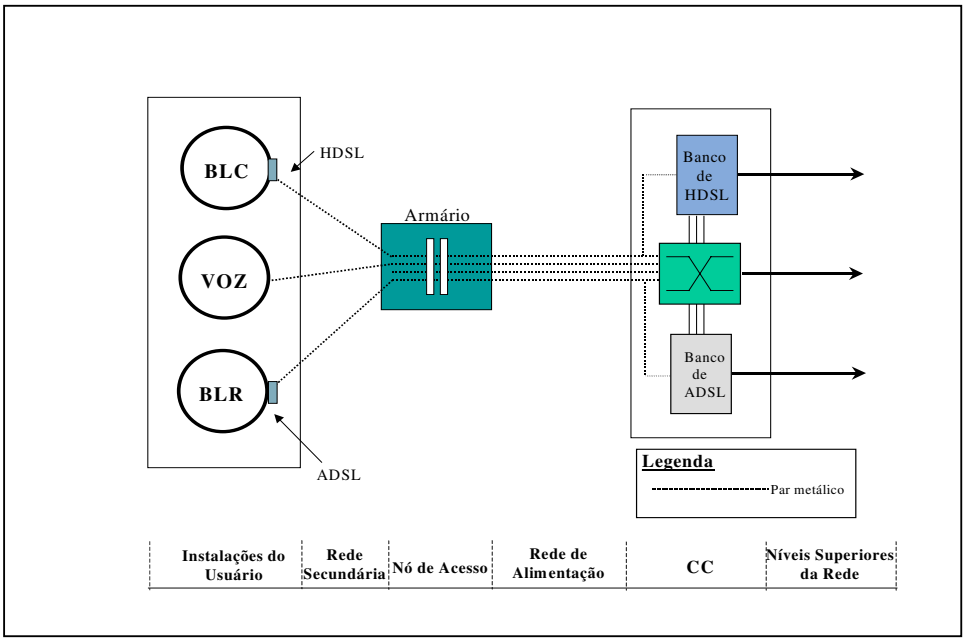


FIGURA 1.5 – Equipamentos considerados em uma solução xDSL.

Os principais *modems* desta tecnologia são o HDSL (*High bit-rate Digital Subscriber Line*), uma das primeiras tecnologias DSL a ser amplamente usada, e o ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*), usado principalmente para prover conexões em banda-larga para a *Internet*.

As novidades xDSL são a Linha Digital de Assinante Simétrica – SDSL (*Symmetric Digital Subscriber Line*) e sua versão com conexão em um único par de fios, SHDSL (*Single-pair High-speedy Digital Subscriber Line*).

- HDSL

O *modem* HDSL opera a uma velocidade de transmissão, ou modularidade, de 2 Mbps, permitindo eficientemente o atendimento de serviços de dados que demandam taxas simétricas de até 2 Mbps; por isso, são freqüentemente usados no atendimento de

clientes corporativos. O alcance médio dos sistemas HDSL é de aproximadamente 3 Km, dependendo da taxa de transmissão exigida. O uso de regeneradores/repetidores de sinal pode até dobrar o alcance do sinal. A utilização deste equipamento exige a disponibilidade de 2 pares de fios para a sua conexão.

Considerando que em muitos casos já existem cabos metálicos interligando a central e o cliente, o HDSL se torna uma solução bastante rápida e econômica se comparada com soluções através de fibras ópticas ou com equipamentos de rádio digital. Apesar disso, os sistemas HDSL vêm perdendo espaço para a versão assimétrica DSL, que permite maior taxa de transmissão *downstream*.

- ADSL

A tecnologia ADSL permite otimizar a rede de acesso, suportando simultaneamente sobre um mesmo par de fios o tráfego de dados de alta velocidade e o atual serviço telefônico. As taxas de transferência são superiores a 6 Mbps (chegando ao máximo, hoje, de 9 Mbps) no sentido *downstream* e a 640 Kbps (máximo de 1 Mbps) no sentido *upstream* (www.abusar.org). Estas taxas aumentam a capacidade de acesso já existente em cerca de 50 vezes ou mais, sem a necessidade de novos cabeamentos.

O alcance de uma linha ADSL é proporcional à velocidade do *modem* utilizado. Para taxas de transmissão entre 1,5 e 2 Mbps a distância do acesso chega em média a 5 Km; para taxas de 6 Mbps o alcance cai para 2,5 Km. Para prolongar o alcance da linha ADSL é preciso utilizar regeneradores/repetidores de sinal, que evitam distorções, queda e até perda do sinal.

Sistemas ADSL podem fornecer uma gama extensa de serviços banda-estreita e banda-larga. Os principais são:

- *Internet* e *Fastinternet*: o serviço mais popular comercializado sobre a tecnologia ADSL, como o *Speedy*, da Telefônica, que pode chegar à velocidade de 2 Mbps;

- Vídeo-conferência de alta resolução;
- Vídeo digital (*Vide-on-Demand* e *Pay-per-View*);
- Interconexão de LAN (*Local Area Network*);

O ADSL é a tecnologia de acesso mais difundida entre os assinantes de banda larga, com 75% do mercado no Brasil (www.abusar.org).

- SDSL

O DSL simétrico, ou SDSL, transmite a mesma quantidade de dados, na mesma velocidade, em ambas as direções. Essa solução é apropriada, portanto, para usuários que necessitam receber e também transmitir grandes volumes de dados. A transmissão é feita por dois pares de fios telefônicos comuns, sendo que a taxa máxima possível de ser atingida é de até 1,168 Mbps nos dois sentidos.

Empresas de médio porte, por exemplo, podem utilizá-lo para conectar diversas redes locais (LANs) regionais ao computador central da rede corporativa. Além disso, o SDSL pode ser usado para transmitir tráfego de voz sobre a mesma linha de cobre do assinante (Voz sobre DSL, ou VoDSL).

A nova versão do sistema DSL é a linha digital de assinante G.SHDSL[4]. A transferência de dados varia de 192 Kbps a 2,3 Mbps, em ambas as direções, de maneira simétrica e por um único par de fios.

Rede Óptica

Rede Óptica Passiva Banda Larga baseada em ATM (APON)

A rede APON é uma tecnologia óptica de acesso banda-larga que sucede as redes PON (*Passive Optical Network*), de baixa capacidade de transmissão. Na rede APON, um

[4] Tecnologia padronizada pela ITU (*International Telecommunication Union*); a letra G é a designação do protocolo G994.1.

conjunto de usuários compartilha uma infra-estrutura de fibras ópticas capaz de transmitir altas taxas, permitindo o oferecimento de serviços banda-larga.

A localização das unidades ópticas de rede (ONU – *Optical Network Unit*), onde estão postados os conversores eletro-ópticos, é um parâmetro importante a ser considerado no dimensionamento das redes APON. A sua proximidade do usuário caracteriza as configurações ópticas de atendimento (FITL – *Fiber-In-The-Loop*). Essas soluções são usualmente definidas como a infra-estrutura de fibras que vem desde a unidade de terminação óptica (OLT – *Optical Line Terminal*), localizada na CT, até a ONU (figura 1.6).

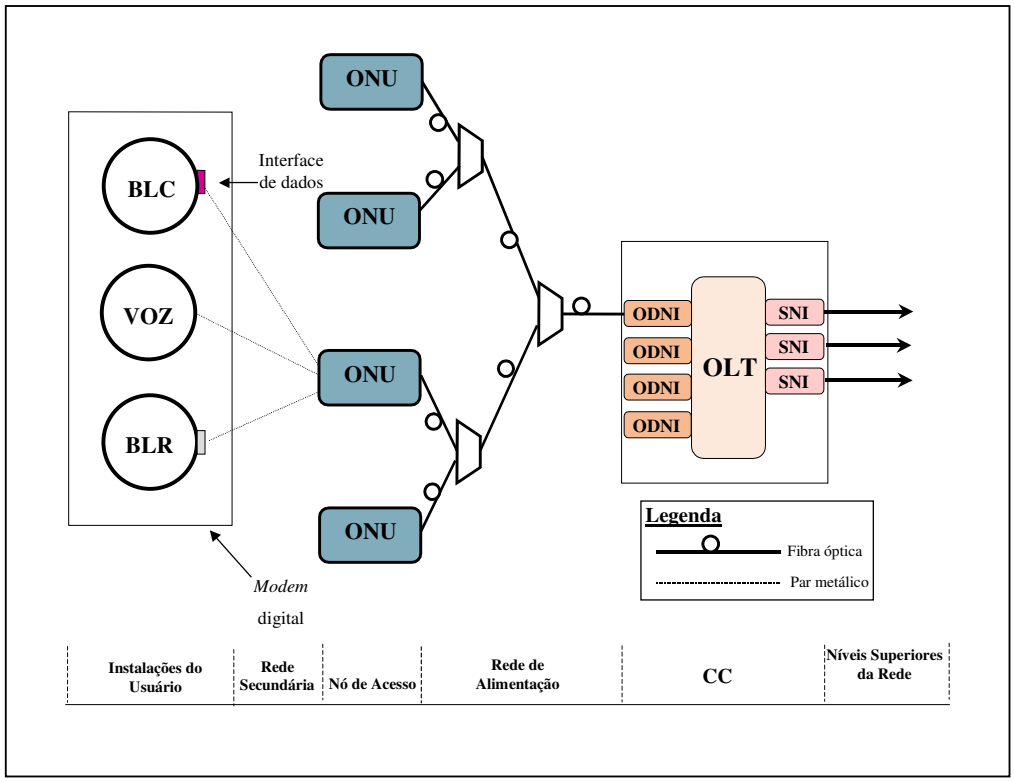


FIGURA 1.6 – Arquitetura de uma rede APON.

As topologias mais comuns de FITL são:

- FTTC (*Fiber-To-The-Curb*): nesta configuração a fibra chega até um armário de pedestal ou poste, onde está a ONU. A conversão eletro-óptica ocorre praticamente na quadra do usuário;
- FTTH (*Fiber-To-The-Home*) e FTTB (*Fiber-To-The-Business*): nestas duas configurações 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 é a mais viável dentre as soluções FITL. Isto ocorre porque com a fibra chegando até o armário, existe o compartilhamento da ONU entre vários usuários, reduzindo os custos de implantação do sistema. Para empresas que demandam grande volume de tráfego de telecomunicações, a FTTB é também economicamente compensadora.

As prioridades para implantação de fibras ópticas, entretanto, acompanham a escala de taxas de transmissão necessárias. A rede de transporte, pelo seu elevado volume de tráfego, é naturalmente a mais prioritária. De fato, hoje no Brasil quase toda a rede de transporte é óptica. A seguir vêm os grandes assinantes, aqueles que requerem, isoladamente, altas velocidades em razão dos serviços demandados (FTTH ou FTTB). Para eles, a solução óptica também é vantajosa, através das chamadas "rotas estratégicas". Na rede primária de acesso, a instalação de fibras ópticas requer grande quantidade de equipamentos espalhados por toda a área da estação, o que encarece a viabilidade de tornar óptico essa parcela da rede. A menor prioridade é a da rede secundária de acesso, cuja solução óptica exige fibras e equipamentos alocados para cada usuário (FTTC).

Rede Sem Fio

Um sistema sem fio é composto basicamente[5] pelos elementos (figura 1.7):

- Central de Comutação e Controle (CCC): unidade responsável pelo controle do sistema de acesso fixo sem fio e pela interligação com a rede que dá suporte ao

[5] Conforme definido pela ANATEL.

STFC;

- Unidade de Supervisão e Gerenciamento (USG): supervisiona e gerencia todo o sistema;
- Unidade de Controle do Sistema (UCS): controla a sinalização referente ao estabelecimento de chamadas, faz a interface entre a função de comutação e a ERB e supervisiona funções da ERB. Nos casos em que o sistema não possui CCC, a UCS terá a função complementar de fazer interface com a central de comutação;
- Estação Rádio Base (ERB): conjunto de um ou mais transmissores e receptores destinados à radiocomunicação com as várias ETAs;
- Estação Terminal do Assinante (ETA): conjunto de equipamentos que constituem a estação fixa do usuário e que permite a sua integração ao STFC; num sistema celular móvel é correspondente à estação móvel do usuário – o aparelho celular.

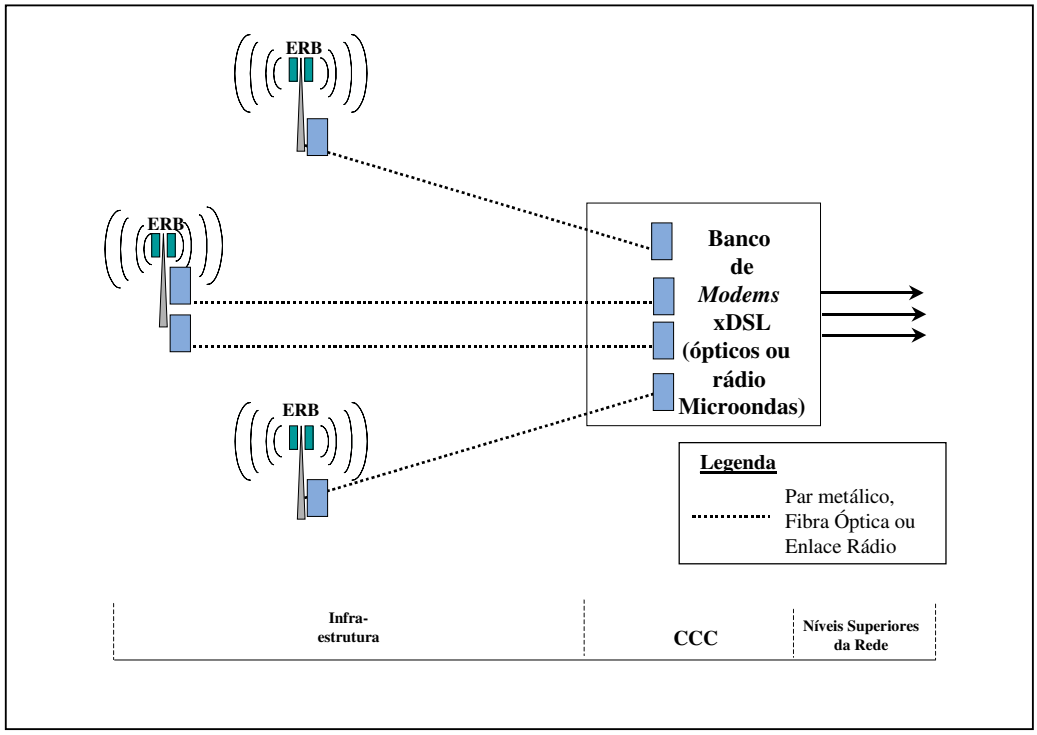


FIGURA 1.7 – Sistema sem fio.

As redes sem fio têm características de flexibilidade de projeto, grande velocidade de

implantação e baixo custo de infra-estrutura, e podem ser divididas em dois segmentos:

- conexão rádio entre o usuário e a ERB;
- infra-estrutura de ligação ERB-CT, ou ERB-Central de Comutação e Controle do Sistema Rádio (CCC).

Estas características possibilitam a entrada de competidores na rede local, bem como o atendimento de assinantes em prazos cada vez menores. Há ainda, porém, limitações para uma maior aplicabilidade dessas redes, tais como falta de padrões internacionais e indefinições do espectro de freqüências a ser utilizado.

Os Sistemas Sem Fio Ponto-a-Ponto são uma alternativa de acesso para atendimentos a clientes distantes das CTs, onde não há infra-estrutura de rede de acesso metálica ou óptica, ou em situações emergenciais em que a construção de uma rede cabeada não atende as necessidades de prazos.

Os Sistemas Sem Fio Ponto-MultiPonto, ou *Wireless Access Local Loop* (WLL), podem ser adotados por operadoras que almejam disputar o mercado de telefonia fixa concorrendo com empresas já situadas e implantadas no mercado há algum tempo. O WLL substitui a parte final do sistema de acesso local fixo, de par trançado por ondas de rádio.

Os mais comuns meios de transmissão sem fio são satélite, infravermelho e rádio microondas. Eles são usados principalmente quando não há facilidades terrestres ou visuais na comunicação entre dois pontos devido a obstáculos do meio como rios, florestas ou mesmo regiões urbanas com montanhas ou vales. Nesses casos, *links* de comunicação via microondas podem ser instalados rapidamente, disponibilizando conexões de alta velocidades, que podem chegar a 2 Mbps (ou múltiplos de 2 Mbps).

As soluções de acesso, sejam elas totalmente ópticas ou híbridas (redes com acesso metálico, óptico e sem fio), devem prover uma infra-estrutura que permita uma fácil migração para novas tecnologias e serviços.

Capítulo 2

PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DA REDE DE ACESSO

2.1 Introdução

Durante o processo de desregulamentação e privatização do mercado brasileiro de telecomunicações a ANATEL estabeleceu o Plano Geral de Metas para Universalização (PGMU), que garante o acesso às telecomunicações a toda pessoa ou instituição, independentemente de sua localização e condição socioeconômica. Cumpridas essas exigências, as empresas operadoras agora buscam retorno sobre os investimentos despendidos e uma participação cada vez maior no mercado de telecomunicações. Para garantir competitividade e atingir seus objetivos, as operadoras devem continuar expandindo e investindo em tecnologias inovadoras, de modo a acompanhar as tendências mercadológicas do setor.

Como já foi dito, a rede de acesso, que alcança cada um dos usuários de telecomunicações, é a que mais sofrerá mudanças topológicas e tecnológicas durante a modernização do sistema. Esse processo envolve muitas soluções tecnológicas alternativas e um enorme volume de recursos financeiros. Além disso, para que a estratégia de expansão do sistema esteja comprometida com o dinamismo inerente ao problema, é preciso considerar um **horizonte de planejamento de longo prazo**. Este plano multi-período deve acompanhar a expectativa de crescimento das demandas e o incessante surgimento de novas tecnologias de acesso. O planejamento da expansão da rede de acesso visando maximizar os lucros é, portanto, uma tarefa complexa e exige o auxílio de modelos matemáticos na sua resolução.

2.2 Revisão Bibliográfica

A revisão apresentada a seguir destaca trabalhos relacionados à expansão das várias redes que compõem o sistema de telecomunicações, enfatizando aqueles que usam métodos heurísticos na proposta de resolução. Problemas de planejamento da expansão de redes geralmente são representados por modelos matemáticos de programação inteira ou inteira-mista, de difícil resolução.

A grande maioria das pesquisas nesta área considera apenas um período de planejamento, estratégia que pouco condiz com as necessidades atuais do mercado, mas que já exige um grande esforço, de modelagem e computacional, para a obtenção de soluções ótimas ou mesmo próximas ao ótimo. Além disso, os artigos mais recentes o fazem para introduzir o problema de expansão ou para enfatizar outras faces do problema, como enfoque *fuzzy* ou multiobjetivo do planejamento.

BALAKRISHNAN et al. (1991) apresentam uma excelente revisão de trabalhos envolvendo expansão de redes de acesso para um período de planejamento. Os autores discutem vários aspectos tecnológicos relevantes para a modelagem do problema, relacionando-os com fatores de decisão econômica. Essa discussão sugere a existência de oportunidades promissoras para modelagem e desenvolvimento de algoritmos de versões multi-período e multi-serviço do problema.

CARLSON, TAVARES & FORMIGONI (2001), DESOUSA et al. (2003) e MACHADO et al. (2003) também apresentam soluções para problemas mono-período da expansão da rede de acesso. O enfoque é maximizar a receita, mais adequado com a atual concorrência do mercado de telecomunicações. CARLSON, TAVARES & FORMIGONI (2001) e DESOUSA et al. (2003) usam técnicas *fuzzy* para modelar o problema, considerando incertezas nos dados, como demandas e custos de equipamentos. A solução é obtida via métodos exatos para redes de pequeno porte (redes de acesso primário com nós de acesso). MACHADO et al. (2003) usam a mesma rede de acesso para propor um método heurístico baseado em Algoritmos Genéticos como ferramenta de resolução do problema.

Problemas de planejamento multi-período para sistemas de telecomunicações vêm sendo abordados com mais freqüência recentemente, em parte por causa do boom nas demandas por novos serviços e do surgimento de novas tecnologias, que tornam o planejamento do sistema uma tarefa bem mais complexa. A estratégia multi-período tornou-se obrigatória dentro deste novo cenário. MINOUX (1987) foi pioneiro em modelar o problema de expansão multi-período de uma rede de telecomunicações. Os trabalhos mais recentes procuram abordar o planejamento por porção da rede, ou seja, por sub-divisões da rede geral. Isso torna o problema mais fácil de se abordar, embora nem sempre mais fácil de se resolver.

Trabalhos multi-períodos que enfocam as redes de transporte do sistema de telecomunicações, ou redes *backbone*, são mais comuns na literatura. CHANG & GAVISH (1995) propõem uma metodologia de expansão topológica e de capacidade da rede *backbone* baseada em planos de corte. O objetivo é minimizar o valor presente do custo total de instalação e manutenção durante o horizonte de planejamento. O modelo, inteiro-misto, adota a formulação em *schedules*. A resolução do problema acontece por meio da resolução de dois sub-problemas, um para o dimensionamento topológico e outro para expansão da capacidade da rede. Já PICKAVET & DEMEESTER (2000) expõem uma proposta heurística de duas fases; a primeira usa Algoritmos Genéticos para gerar soluções de rede para cada período. As redes candidatas são os "*building blocks*" da segunda fase, onde o método do caminho mais curto é usado para expandir a rede a mínimo custo dentro de um horizonte de planejamento. A formulação do problema é composta por variáveis inteiras e binárias. Também fazendo uso de métodos heurísticos podemos citar GARCIA, MAHEY & LEBLANC (1998) e GEARY et al. (2001). O primeiro trabalho apresenta o GLIT (*Generic Local Improvement Template*), um algoritmo genérico de melhoria local que visa aumentar a performance e a flexibilidade dos métodos heurísticos clássicos. Os autores concluem, mediante apresentação de diversas comparações de resultados, que a técnica é eficaz, especialmente quando aplicada em conjunto com Algoritmos Genéticos. GEARY et al. (2001) apresentam resultados de planejamento multi-período para até 5 anos, comparando com planos ano a ano, com ou sem demanda acumulada.

O planejamento da expansão para múltiplos períodos da rede de acesso local, foco desta tese, é encontrado em menor número na literatura. BRITTAIN, WILLIAMS & MCMAHON (1997) levantam a questão da dificuldade em avaliar o desempenho dos algoritmos de resolução de problemas de redes de acesso devido à escassez de pesquisa nessa área. Os autores usam Algoritmos Genéticos para planejar a rede de acesso, por considerarem esse método uma ferramenta flexível de planejamento de rede, uma vez que permite a inserção de restrições durante o procedimento de resolução.

LEE & CHO (2000) apresentam um modelo de programação inteira-mista que tem como objetivo a maximização da receita. Os autores desenvolveram uma estratégia de evolução para decidir quando evoluir a rede de acesso existente de modo a incorporar tecnologias emergentes. As tecnologias candidatas são analisadas através de um algoritmo técnico-econômico que calcula o risco associado a cada escolha.

ANTUNES, CRAVEIRINHA & CLÍMACO (1998) propõem um modelo linear multiobjetivo para minimizar custo e maximizar oferecimento de serviços e a compatibilidade de tecnologias. Em contraste com os outros estudos, os autores resolvem o problema com métodos exatos, via pacotes computacionais, como MPL (MAXIMAL SOFTWARE) e CPLEX® (CPLEX, 1994).

KUBAT & SMITH (2001) apresentam um modelo para a expansão do sistema celular de telecomunicações. O trabalho não difere dos demais aqui expostos pois enfoca a rede de acesso fixa do sistema móvel, similar à rede de telefonia fixa. O objetivo é minimizar o custo do dimensionamento multi-período da topologia de interconexão célula-central CCC. É proposto um algoritmo heurístico baseado em pontos interiores, que tem um desempenho melhor (qualitativo e temporal) quando comparado a resultados obtidos via métodos heurísticos *Branch-and-Cut*, programação linear e relaxação *Lagrangeana*, além de um algoritmo ótimo *Branch-and-Bound*.

Problemas de planejamento e expansão de redes também são estendíveis para problemas de transporte, planejamento urbano e redes de energia elétrica. ANTUNES & PEETERS (2001), por exemplo, trabalham com localização de escolas num horizonte de tempo, no

planejamento urbano de uma cidade em Portugal. O modelo usado para representar o problema é bem similar àqueles já citados, linear inteiro-misto. Os autores propõem um algoritmo baseado em *simulated annealing* (AARTS & KORST, 1989) na resolução do problema.

Redes de energia elétrica são o foco do trabalho de ESCOBAR, GALLEGO & ROMERO (2004). Eles desenvolvem um modelo multi-período para planejar a expansão da rede de distribuição do sistema de energia elétrica. O modelo apresentado é não-linear inteiro misto, e visa minimizar a soma do valor presente do custo dos investimentos ocorridos durante todo o horizonte de planejamento. Os autores concluem que o investimento é menor quando a expansão é planejada dentro de um horizonte multi-período, em comparação com um planejamento onde a expansão é considerada separadamente para cada período. O método de resolução é híbrido: Algoritmos Genéticos e resolução de PL's para o cálculo do *fitness* dos indivíduos. ROMERO, GALLEGO & MONTICELLI (1996) resolvem este mesmo problema de planejamento por *simulated annealing*.

2.3 Problema de Planejamento da Expansão da Rede de Acesso

A evolução da rede de acesso de um sistema de telecomunicações é uma tarefa complexa que deve acompanhar o dinamismo inerente ao setor. Para que essa evolução aconteça adequadamente é necessário avaliar a situação atual e projetar as estratégias para o futuro, detalhando os passos que precisam ser percorridos para se chegar a esta situação desejada. Isso é **planejar**.

Um planejamento de longo prazo, ou **multi-período**, deve ser capaz de acompanhar a evolução da rede ao longo do tempo, especificando onde, quanto e quando novos equipamentos serão instalados, possibilitando ao planejador (ou operador de rede) adotar um comportamento proativo em relação ao futuro. Um planejamento pode ser dividido em três níveis diferentes (DAFT, 1999): estratégico, tático e operacional.

O planejamento estratégico estabelece planos gerais que ajudam as operadoras a ingressarem em novos mercados e a estruturarem o futuro. Esse plano gerencial é geralmente um processo de longo prazo e deve definir as ações para os próximos dois a cinco anos.

O planejamento tático destina-se a auxiliar atividades específicas dos principais planos estratégicos. É um planejamento de médio prazo, com um horizonte de tempo de um a dois anos, e as tomadas de decisão acontecem no nível intermediário da empresa.

O planejamento operacional estabelece etapas de ação que se relacionam com a operação no dia-a-dia da empresa. É conduzido com o objetivo de enfatizar a eficiência e eficácia das rotinas das tarefas; tem um horizonte de tempo de um ano ou menos.

O planejamento para expandir a rede de acesso para serviços de telecomunicações deve dimensionar e localizar os equipamentos e definir a infra-estrutura e topologias apropriadas às necessidades dos assinantes, tal que o sistema opere adequadamente num horizonte de planejamento de longo prazo. A importância desse planejamento se justifica, principalmente, pelo fato deste processo envolver muitas tomadas de decisão relevantes para o futuro da rede, num ambiente marcado por incertezas de mercado, grande diversidade tecnológica e muita competitividade. O planejamento multi-período abordado mais à frente encaixa-se no nível estratégico; planos táticos também foram considerados (planejamento mono-período), a fim de se determinar, em conjunto ou paralelamente, situações pontuais de expansão da rede.

O uso de modelos matemáticos na obtenção dos resultados é, portanto, essencial, permitindo otimizar recursos financeiros e escolher entre os serviços e as soluções tecnológicas candidatas. O modelo matemático para otimizar o planejamento da expansão da rede de acesso pode ter a seguinte estrutura de formulação (figura 2.1):

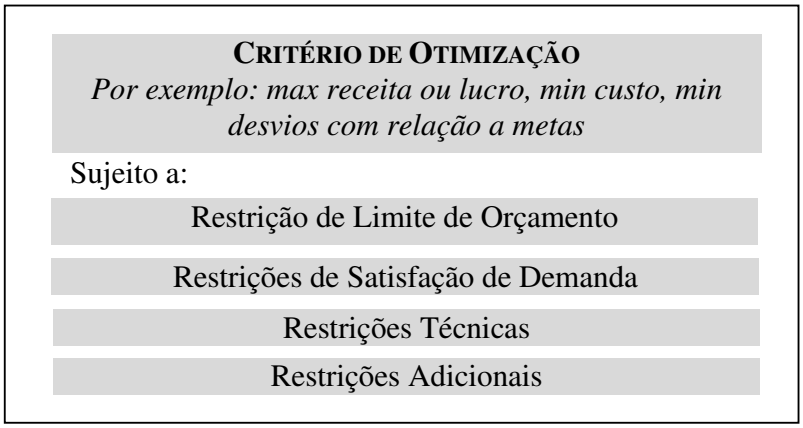


FIGURA 2.1 – Estrutura geral de modelagem.

Os critérios de otimização mais condizentes com o cenário atual são a maximização de lucro ou de receita (MACHADO et al., 2003). A primeira restrição impede gastos excessivos que extrapolam o orçamento com a implantação e/ou expansão da rede. Num problema de minimização de custos, a restrição de limite de orçamento é equivalente à função-objetivo (DESOUSA et al., 2001b).

O planejamento da rede com o objetivo de maximizar a receita deve considerar alguns pontos importantes, como a associação de diferentes serviços a diferentes 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. Além disso, a receita pode ser distribuída ao longo do período de tempo analisado (horizonte de planejamento). Neste caso, comparações com o custo (de implantação de equipamentos e infra-estrutura, de operação e manutenção, etc.) fazem mais sentido quando colocadas em uma mesma unidade de medida, como, por exemplo, o valor presente líquido (VPL) ou algum tipo de fluxo de caixa. Por ser o critério de maior interesse desta tese, diferentes interpretações de problemas envolvendo maximização de receitas são analisadas.

- 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, na prática isso nem

sempre é possível. As empresas operadoras acabaram de sair de um período de grandes investimentos, assim a pressão orçamentária impede a implantação de equipamentos e infra-estrutura suficientes para todos. Em outras palavras, parte da demanda pode não ser atendida. O objetivo é atender seletivamente a demanda, visando a configuração que proporciona melhor receita nessas condições. O modelo matemático que representa tais exigências deve ser capaz de contabilizar o custo e forçá-lo a obedecer ao orçamento (valor máximo permitido). Para o cálculo da receita, supõe-se que as demandas e tarifas de cada serviço são perfeitamente conhecidas (ou pelo menos estimadas) em cada nó da rede. Como parte da demanda apresentada pode não ser atendida, é preciso lembrar que essa parcela não se reverte em receita.

- Maximização de receita a custo mínimo

Nesta abordagem, 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 técnicas de Programação com Múltiplos Objetivos (PMO) na sua resolução.

Os critérios de otimização devem satisfazer as necessidades das operadoras e seus planejadores. Outros critérios comuns são atender toda a demanda prevista a um custo mínimo, maximizar folga e demandas protegidas e maximizar lucro.

As restrições técnicas dizem respeito às especificidades das tecnologias candidatas, como por exemplo limite de comprimento de enlaces para tecnologias xDSL. As restrições adicionais podem atender exigências do mercado como o atendimento mínimo de um serviço, ou impedir que a capacidade das centrais seja ultrapassada, com a adição da restrição de atendimento máximo. O atendimento máximo também pode estar relacionado à perspectiva de demanda de cada serviço. Atender uma quantidade de demanda superior àquela estimada tem como conseqüência a geração de uma receita irreal.

As variáveis de decisão do modelo referem-se ao valor do fluxo nos arcos, e à alocação (ou

não) de facilidades (equipamentos de transmissão, cabos ópticos e metálicos, infra-estrutura, etc.) instaláveis em cada arco (ou nó) para o atendimento dos serviços. O modelo matemático resultante é um problema de **Programação Linear Inteira Mista** (PLIM), com variáveis reais de fluxo nos arcos e variáveis 0-1 de alocação de facilidades.

Neste novo panorama de competição, a receita e o lucro passaram a ser os principais alvos das operadoras. Este trabalho enfoca a maximização da receita para o planejamento multi-período da rede de acesso, sujeito a um limite de orçamento. O que se pretende 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 horizonte de planejamento de longo prazo. São apresentados vários modelos matemáticos, desenvolvimentos com o objetivo principal, para um ou muitos períodos de planejamento, de alocar e dimensionar os equipamentos na rede, maximizando a receita total e permitindo a competição entre os serviços e soluções tecnológicas candidatas.

2.4 Representação Gráfica da Rede de Acesso

A representação gráfica da rede de acesso tem a finalidade de situar os componentes de uma rede de acesso nos modelos matemáticos. Para uma exposição mais clara e simplificada, os modelos – para um ou mais períodos, representam uma rede de acesso genérica onde é possível optar por várias tecnologias de acesso candidatas, como soluções tecnológicas *X* e a manutenção da opção de cabos metálicos *M*. Restrições técnicas específicas de cada tecnologia não foram consideradas nestes modelos genéricos, mas podem ser acrescentadas facilmente aos modelos.

A disposição física da rede (figuras 1.2 e 1.3) sugere o uso de grafos para a sua representação. O nó de acesso *i* pode ser conectado diretamente à central telefônica (CT) ou apresentar rota alternativa através do nó de acesso *k*. Os assinantes podem ligar-se a apenas uma CT e assim cada área de estação pode ser tratada independente das demais. A figura 2.2 mostra um nó de acesso *i* genérico.

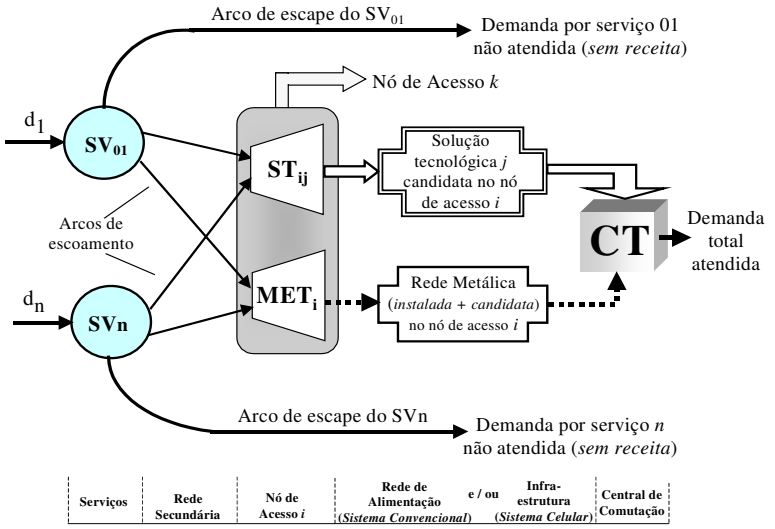


FIGURA 2.2 –Representação da rede para um período de planejamento.

São considerados os seguintes elementos:

- Nós Artificiais de Serviço: assume-se que as demandas dos serviços (d_1-d_n) já são conhecidas. Para cada serviço existe um nó associado (SV_{01}-SV_n), que é ligado a todos os nós de acesso *i* através de arcos de escoamento das demandas deste serviço. Obs.: existe a necessidade de que as demandas apresentadas aos nós artificiais de serviço tenham a mesma unidade de medida, por exemplo número de assinantes.

- Nós de Acesso: representam pontos intermediários entre o usuário do sistema e a CT (armários, por exemplo) que funcionam como pontos de concentração, reunindo a demanda proveniente dos nós artificiais de serviço. Cada nó de acesso *i* pode ser dividido em dois, um representando o acesso através da Rede Metálica (Met_i) e outro o acesso através da Solução Tecnológica Candidata *j* (ST_{ij}). Assim, é possível visualizar a rede metálica instalada, possibilitando também a sua expansão. No grafo, os nós de acesso funcionam como nós de passagem.

- Nó de Comutação: este nó está fisicamente associado à central telefônica, responsável pela comutação do sistema. Toda a demanda efetivamente atendida é encaminhada a esse nó.

- Demanda Total Atendida: representa a demanda efetivamente atendida pelo sistema. Devido ao limite de orçamento, ela pode ser inferior à soma das demandas previstas nos 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 i (Met_i + ST_{ij}). O fluxo de demanda escoado por estes arcos é utilizado tanto para contabilizar a receita gerada por cada um dos serviços oferecidos, quanto para controlar os gastos com a implantação da Rede Secundária. O controle no atendimento dos serviços exige que os arcos de escoamento sejam capacitados.

- Arcos de Escape: devido a 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 não é revertida em receita.

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

- Solução Tecnológica Candidata: representa as diversas tecnologias possíveis de serem utilizadas na evolução do sistema, exceto a solução xDSL (candidata em conjunto com a rede metálica). Na aplicação, haverá a necessidade de adaptar o modelo 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.

- 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 extensão desta representação para uma rede de acesso de telefonia celular móvel é direta; os nós de acesso podem representar as ERBs (estações rádio base) e o nó de comutação está associado à CCC (central de comutação e controle). No sistema de telefonia fixa, a rede secundária física (cabos) pode ser assumida como existente (sem custo) ou ter seu custo calculado a partir de valores médios. No sistema celular móvel, a rede secundária pode ser associada à interface aérea da rede.

2.5 Modelagem Matemática

O modelo de planejamento mono-período pode ser usado para expandir uma rede de acesso pontualmente, ou seja, para dimensioná-la a atender uma certa demanda imediatamente. MACHADO *et al*. (2003) apresentam este modelo e uma versão preliminar do método de resolução exposto mais à frente. O modelo mono-período pode também estimar o projeto de uma rede de acesso num determinado período do futuro: considera-se todos os equipamentos e investimentos que já estarão instalados e planeja-se a expansão daquele momento.

2.5.1 Modelo Matemático para o Planejamento da Expansão da Rede de Acesso em um Único Período

O modelo matemático para o planejamento mono-período da rede de acesso pode ter a seguinte formulação:

$$\max \mathrm{R}(Y) = \sum_{(s,i)\in A_s} r_{si} Y_{si} \qquad \text{(M2.1-1)}$$

sujeito a:

$$\sum_{(i,j)\in A_{ST}} \sum_{n\in N_{ST_{ij}}} \left(\varphi_{ij}^{X_{eq},n} + \varphi_{ij}^{X_r,n} \cdot l_{ij}\right) \cdot X_{ij}^{n} + \sum_{(i,j)\in A_M} \sum_{p\in N_M} \left(\varphi_{ij}^{M_{eq},p} + \varphi_{ij}^{M_r,p} \cdot l_{ij}\right) \cdot M_{ij}^{p} + \sum_{(s,i)\in A_s} \varphi_{si} \cdot Y_{si} \le \mathrm{L} \qquad \text{(M2.1-2)}$$

$$\sum_{i\in I-I_s} Y_{si} + Y_{esc_s} = \mathrm{d}_s \quad \forall \mathrm{s} \in \mathrm{I_s} \qquad \text{(M2.1-3)}$$

$$\sum_{j\in J_1} Y_{ij} - \sum_{j\in J_2-I_s} Y_{ji} - \sum_{s\in I_s} \mathrm{fc}_s \cdot Y_{si} = 0 \quad \forall \mathrm{i} \in \mathrm{I} - \mathrm{I_s} \qquad \text{(M2.1-4)}$$

$$\sum_{n\in N_{ST_{ij}}} \mathrm{cap}^{X,n} \cdot X_{ij}^{n} \ge Y_{ij} \quad \forall (\mathrm{i,j}) \in \mathrm{A_{ST}} \qquad \text{(M2.1-5)}$$

$$\sum_{p\in N_M} \mathrm{cap}^{M,p} \cdot M_{ij}^{p} \ge Y_{ij} \quad \forall (\mathrm{i,j}) \in \mathrm{A_M} \qquad \text{(M2.1-6)}$$

$$Y_{si} \ge \mathrm{dmin}_{si} \quad \forall \mathrm{s} \in \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{i} \in \mathrm{I} - \mathrm{I_s} \qquad \text{(M2.1-7)}$$

$$Y_{si} \le \mathrm{dmax}_{si} \quad \forall \mathrm{s} \in \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{i} \in \mathrm{I} - \mathrm{I_s} \qquad \text{(M2.1-8)}$$

$$Y_{si} \ge 0 \ \text{ real}, \forall \mathrm{s} \in \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{i} \in \mathrm{I} - \mathrm{I_s} \qquad \text{(M2.1-9)}$$

$$Y_{ij} \ge 0 \ \text{ real}, \forall (\mathrm{i,j}) \in \mathrm{A_{ST}}, \forall (\mathrm{i,j}) \in \mathrm{A_M} \qquad \text{(M2.1-10)}$$

$$Y_{esc_s} \ge 0 \ \text{ real}, \forall \mathrm{s} \in \mathrm{I_s} \qquad \text{(M2.1-11)}$$

$$X_{ij}^{n} \in [0,1] \ \forall (\mathrm{i,j}) \in \mathrm{A_{ST}}, \forall \mathrm{n} \in \mathrm{N_{ST_{ij}}} \qquad \text{(M2.1-12)}$$

$$M_{ij}^{p} \in [0,1] \ \forall (\mathrm{i,j}) \in \mathrm{A_M}, \forall \mathrm{p} \in \mathrm{N_M} \qquad \text{(M2.1-13)}$$

MODELO 2.1 – Modelo de planejamento geral mono-período

A função-objetivo (M2.1-1) refere-se à receita gerada pelos serviços oferecidos, onde:

- $\mathrm{R}(Y) \rightarrow$ receita total para os serviços oferecidos;
- $A_s \rightarrow$ conjunto dos arcos de escoamento que conectam os nós artificiais de serviço aos nós de acesso;

Y_{si} → variável real não-negativa associada ao fluxo de demanda escoado pelo arco $(s, i) \in A_S$;

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

A restrição (M2.1-2) é uma restrição de limite de orçamento. Ela assegura que o custo total de infra-estrutura, alocação e dimensionamento de equipamentos não ultrapasse o orçamento previsto. A primeira parcela da inequação refere-se ao custo de implantação da solução tecnológica *X*, a segunda ao custo com expansão da rede metálica *M*, e a última ao custo de implantação da rede secundária para a oferta dos serviços.

A_{ST} → conjunto de arcos do grafo que podem receber como candidata a solução tecnológica *X*;

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

X_{ij}^{n} → variável binária não-negativa associada à escolha da solução tecnológica *X*, de tipo *n*, candidata no arco $(i, j) \in A_{ST}$;

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

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

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

A_M → conjunto de arcos que podem receber cabos metálicos;

N_M → conjunto de modularidades de cabos metálicos (novos);

M_{ij}^{p} → variável binária não-negativa associada à escolha do cabo metálico, de modularidade *p*, candidato no arco $(i, j) \in A_M$;

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

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

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

L → limitante de orçamento.

Os dois próximos blocos de equações são restrições de satisfação de demanda. As restrições (M2.1-3), uma para cada serviço s oferecido pela rede, significam que nem toda a demanda d_s precisa ser atendida. A variável $Yesc_s$ representa o fluxo do serviço s não contemplado pelo orçamento previsto. As equações (M2.1-4) dizem que todo o fluxo de demanda que entra no nó deve ser igual ao fluxo que sai dele.

I → conjunto de todos os nós do grafo, exceto o nó de estação;

I_s → conjunto dos nós artificiais de serviço;

$Yesc_s$ → variável real não-negativa associada à demanda não atendida do serviço s (fluxo através de um Arco de Escape);

d_s → demanda pelo serviço s oferecida ao nó $s \in I_s$;

J_1 → conjunto de nós j diretamente conectados ao nó i, por arcos orientados de i para j;

J_2 → conjunto de nós j diretamente conectados ao nó i por arcos orientados de j para i;

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

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

As restrições técnicas de capacidade (M2.1-5) e (M2.1-6) asseguram que a soma das capacidades dos equipamentos instalados seja superior ao fluxo escoado pelo arco.

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

$cap^{M,p}$ → capacidade do cabo metálico *M*, de modularidade *p*, candidato (ou já instalado) no arco (*i, j*) $\in A_M$.

As restrições (M2.1-7) e (M2.1-8) estão associadas ao gerenciamento do atendimento dos serviços. As agências reguladoras podem impor um atendimento de demanda mínima, por exemplo; a demanda máxima pode estar relacionada à capacidade da central, e garante que a receita gerada seja real.

$dmin_{si}$ → demanda mínima exigida do serviço *s* para o nó de acesso $i \in$ I-I_s;

$dmax_{si}$ → demanda máxima estimada do serviço *s* para o nó de acesso $i \in$ I-I_s;

As demais restrições (de M2.1-9 a M2.1-13) são equações de declaração das variáveis do problema.

2.5.2 Modelos Matemáticos para o Planejamento da Expansão da Rede de Acesso em Múltiplos Períodos

Visando uma otimização mais realista, a modelagem foi estendida para planejar a expansão da rede de acesso durante um horizonte de tempo. O modelo multi-período deve orientar um planejamento capaz de acompanhar a evolução da rede ao longo do tempo. Este trabalho considerou várias alternativas de modelos multi-período[6] com o propósito de explorar ao máximo as possibilidades de resolução do problema.

Os modelos multi-período abaixo apresentados são baseados no Modelo de Planejamento Geral Mono-Período, M2.1. A principal diferença está na introdução de restrições que impedem a supressão de equipamentos (equações (M2.2-9) e (M2.2-10)), garantindo que aqueles já instalados num determinado período *t* não serão desinstalados posteriormente em

[6] Esta parte do trabalho foi desenvolvida durante estágio "sanduíche" no *Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes* – LAAS, Toulouse, França, sob a orientação do Prof. Dr. Gerárd Authié, professor responsável pelo grupo *Réseaux et Systèmes de Télécommunications* – RST, de abril a setembro de 2002.

t+1, ou seja, uma vez instalado um equipamento não é economicamente viável desinstalá-lo, a menos que uma análise prévia comprove a superação – tecnológica ou de capacidade – do equipamento. As equações que impedem a supressão de equipamentos são responsáveis pela conexão dos períodos durante o horizonte de planejamento. Além disso, as variáveis e constantes são acrescidas do índice de tempo *t*.

Quando o planejamento é feito em longo prazo, dados monetários do plano, como receitas, custos e orçamentos, devem ser recalculados de maneira a possibilitar a comparação entre eles. O método do valor presente líquido (VPL) permite tal comparação, trazendo os valores monetários do modelo todos para o presente, no início do horizonte de planejamento (HUMMEL & TASCHNER, 1992). A constante α_t, uma para cada período, é o valor a ser multiplicado para o cálculo do VPL.

Modelo de Planejamento Multi-Período sem Penalidades

$$\max \mathrm{R}(Y) = \sum_{t \in T} \alpha_t \sum_{(s,i) \in A_s} r_{sit} \cdot Y_{sit} \tag{M2.2-1}$$

sujeito a:

$$\sum_{(i,j) \in A_{ST_t}} \sum_{n \in N_{ST_{ijt}}} \left(\varphi_{ijt}^{X_{eq},n} + \varphi_{ijt}^{X_r,n} \cdot l_{ij} \right) \cdot \left(X_{ijt}^{n} - X_{ij,t-1}^{n} \right) + \sum_{(i,j) \in A_{M_t}} \sum_{p \in N_{Mt}} \left(\varphi_{ijt}^{M_{eq},p} + \varphi_{ijt}^{M_r,p} \cdot l_{ij} \right) \cdot \left(M_{ijt}^{p} - M_{ij,t-1}^{p} \right) + \sum_{(s,i) \in A_s} \varphi_{sit} \cdot Y_{sit} \leq \mathrm{L}_t \quad \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \tag{M2.2-2}$$

$$\sum_{i \in I - I_s} Y_{sit} + Y_{esc_{st}} = d_{st} \quad \forall \mathrm{s} \in \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \tag{M2.2-3}$$

$$\sum_{j \in J_1} Y_{ijt} - \sum_{j \in J_2 - I_s} Y_{jit} - \sum_{s \in I_s} \mathrm{fc}_s \cdot Y_{sit} = 0 \quad \forall \mathrm{i} \in \mathrm{I} - \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \tag{M2.2-4}$$

$$\sum_{n \in N_{ST_{ijt}}} \mathrm{cap}_n^X \cdot X_{ijt}^{n} \geq Y_{ijt} \quad \forall (\mathrm{i}, \mathrm{j}) \in \mathrm{A_{ST_t}}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \tag{M2.2-5}$$

$$\sum_{p \in \mathrm{N}_{Mt}} \mathrm{cap}_p^M \cdot M_{ijt}^{p} \geq Y_{ijt} \quad \forall (\mathrm{i}, \mathrm{j}) \in \mathrm{A_{M_t}}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \tag{M2.2-6}$$

$$Y_{sit} \geq \mathrm{dmin}_{sit} \quad \forall \mathrm{s} \in \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{i} \in \mathrm{I} - \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \tag{M2.2-7}$$

$$Y_{sit} \leq \mathrm{dmax}_{sit} \quad \forall \mathrm{s} \in \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{i} \in \mathrm{I} - \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \tag{M2.2-8}$$

$$\left(X_{ijt}^{n} - X_{ij,t-1}^{n}\right) \geq 0 \quad \forall (i,j) \in A_{ST_t}, \forall n \in N_{ST_{ijt}}, \forall t \in T \qquad \text{(M2.2-9)}$$

$$\left(M_{ijt}^{p} - M_{ij,t-1}^{p}\right) \geq 0 \quad \forall (i,j) \in A_{M_t}, \forall p \in N_{M_t}, \forall t \in T \qquad \text{(M2.2-10)}$$

$$Y_{sit} \geq 0 \quad \forall s \in I_s, \forall i \in I - I_s, \forall t \in T \qquad \text{(M2.2-11)}$$

$$Y_{ijt} \geq 0 \quad \forall (i,j) \in A_{ST_t}, \ \forall (i,j) \in A_{M_t}, \forall t \in T \qquad \text{(M2.2-12)}$$

$$Y_{esc_{st}} \geq 0 \quad \forall s \in I_s, \forall t \in T \qquad \text{(M2.2-13)}$$

$$X_{ijt}^{n} = 0 \text{ ou } 1, \quad \forall (i,j) \in A_{ST_t}, \forall n \in N_{ST_{ijt}}, \forall t \in T \qquad \text{(M2.2-14)}$$

$$M_{ijt}^{p} = 0 \text{ ou } 1, \quad \forall (i,j) \in A_{M_t}, \forall p \in C_{M_t}, \forall t \in T \qquad \text{(M2.2-15)}$$

MODELO 2.2 – Modelo de planejamento geral multi-período.

A função-objetivo (M2.2-1) refere-se ao valor presente da receita gerada pelos serviços oferecidos durante o período de planejamento.

- A_s → conjunto dos arcos de escoamento que conectam os nós artificiais de serviço aos nós de acesso;
- α_t → multiplicador econômico referente ao período *t* para o cálculo do VPL;
- I → conjunto de todos os nós do grafo, exceto o nó da central telefônica;
- Is → conjunto dos nós artificiais de serviço;
- Y_{sit} → variável real não-negativa associada ao fluxo de demanda escoado pelo arco $(s,i) \in A_S$ no período $t \in T$;
- r_{sit} → receita unitária do serviço *s* oferecido ao nó de acesso *i* no período $t \in T$;
- T → conjunto dos períodos de planejamento;

As restrições de limite de orçamento (M2.2-2), uma para cada período do horizonte de planejamento, asseguram que os custos de infra-estrutura, alocação e dimensionamento de equipamentos não ultrapassem o orçamento previsto para o período *t*. Estas restrições também impedem a duplicação de cobrança dos custos. Os custos e orçamentos também

devem ter seus valores atualizados para o VPL; o multiplicador α_t é omitido de M2.2-2 por aparecer em ambos os lados da inequação. A primeira parcela da inequação refere-se ao custo de implantação da solução tecnológica *X*, a segunda ao custo com expansão da rede metálica *M*, e a última ao custo da rede secundária para a oferta dos serviços.

A_{ST_t} → conjunto de arcos do grafo que podem receber a solução tecnológica *X* como candidata no período $t \in$ T;

$N_{ST_{ijt}}$ → conjunto de soluções tecnológicas *X* candidatas no arco $(i, j) \in A_{ST_t}$;

X_{ijt}^{n} → variável binária não-negativa associada à escolha da solução tecnológica *X*, de modularidade *n*, candidata no arco $(i, j) \in A_{ST_t}$ no período $t \in$ T. Para $t = 1$, X_{ij0}^{t} é 1 caso já haja aquele equipamento na rede, e zero caso contrário;

$\varphi_{ijt}^{X_{eq,n}}$ → custo associado à escolha dos equipamentos da solução tecnológica *X* de modularidade *n,* candidata no arco $(i, j) \in A_{ST_t}$ no período $t \in$ T;

$\varphi_{ijt}^{X_{r,n}}$ → custo (por unidade de comprimento) associado à escolha da infra-estrutura (cabos e dutos) da solução tecnológica *X*, de modularidade *n*, candidata no arco $(i, j) \in A_{ST_t}$ no período $t \in$ T;

l_{ij} → comprimento do arco (i, j);

A_{M_t} → conjunto de arcos que podem receber cabos metálicos no período $t \in$ T;

C_{M_t} → conjunto de modularidades de cabos metálicos candidatos no arco $(i, j) \in A_{M_t}$ no período $t \in$ T;

M_{ijt}^{p} → variável binária não-negativa associada à escolha do cabo metálico de modularidade *p*, candidato no arco $(i, j) \in A_{M_t}$ no período $t \in$ T. Para $t = 1$, M_{ij0}^{p} é 1 caso já haja aquele equipamento na rede, e zero caso

contrário.

$\varphi_{ijt}^{M_{eq,p}}$ → custo associado à escolha dos equipamentos relacionados com o cabo metálico *M*, de modularidade *p*, no arco $(i, j) \in A_{M_t}$ no período $t \in$ T;

$\varphi_{ijt}^{M_{r,p}}$ → custo (por unidade de comprimento) associado à escolha da infra-estrutura do cabo metálico *M*, de modularidade *p*, no arco $(i, j) \in A_{M_t}$ no período $t \in$ T;

φ_{sit} → custo da rede secundária para a disponibilização do serviço *s* para o nó de acesso *i*, no período $t \in$ T;

L_t → limitante de orçamento para cada período $t \in$ T.

As restrições de satisfação de demanda (M2.2-3) e (M2.2-4) continuam responsáveis pelo balanço do fluxo nos nós de acesso em cada período $t \in$ T.

$Y_{esc_{st}}$ → variável real não-negativa associada à demanda não atendida do serviço *s* (fluxo através de um Arco de Escape) no período $t \in$ T;

d_{st} → demanda pelo serviço *s* oferecida ao nó $s \in I_s$ no período $t \in$ T;

Y_{ijt} → variável real não-negativa associada ao fluxo de demanda escoado pelo arco (*i,j*) no período $t \in$ T.

As restrições técnicas de capacidade (M2.2-5) e (M2.2-6) asseguram que a soma das capacidades dos equipamentos instalados no arco (*i, j*) seja superior ao fluxo escoado pelo arco no período $t \in$ T.

As restrições (M2.2-7) e (M2.2-8) gerenciam o atendimento dos serviços para cada período $t \in$ T.

$dmin_{sit}$ → demanda mínima exigida, do serviço *s* para o nó de acesso *i*, em $t \in$ T;

$dmax_{sit}$ → demanda máxima estimada, do serviço *s* para o nó de acesso *i*, em $t \in$ T.

T.

As restrições (M2.2-9) e (M2.2-10) não permitem supressão de equipamentos. As demais restrições (de M2.2-11 a M2.2-15) são equações de declaração das variáveis do problema.

- **Modelo de Planejamento Multi-Período com Penalidades**

Para evitar que equipamentos já instalados sejam eliminados posteriormente da solução pode-se fazer uso de penalidades na modelagem do problema; a função-objetivo é acrescida de um termo ρ de penalidade. A formulação é inspirada em (KUBAT & SMITH, 2001). As funções $(\,)^+$ e $(\,)^-$ tornam o modelo não-linear:

$$\max \mathrm{R}(Y) = \sum_{t\in T}\alpha_t \sum_{(s,i)\in A_s} r_{sit}\cdot Y_{sit} - \sum_{t=2}^{T}\sum_{(i,j)\in A_{ST_t}}\sum_{n\in N_{ST_{ijt}}} \rho_{ijt}^{X,n}\cdot\left(X_{ijt}^{n} - X_{ij,t-1}^{n}\right)^{-} - \sum_{t=2}^{T}\sum_{(i,j)\in A_{M_t}}\sum_{p\in C_{M_t}} \rho_{ijt}^{M,p}\cdot\left(M_{ijt}^{p} - M_{ij,t-1}^{p}\right)^{-} \quad \text{(M2.3-1)}$$

sujeito a:

$$\sum_{(i,j)\in A_{ST_t}}\sum_{n\in N_{ST_{ijt}}}\left(\varphi_{ijt}^{X_{eq},n} + \varphi_{ijt}^{X_r,n}\cdot l_{ij}\right)\cdot\left(X_{ijt}^{n} - X_{ij,t-1}^{n}\right)^{+} + \sum_{(i,j)\in A_{M_t}}\sum_{p\in C_{M_t}}\left(\varphi_{ijt}^{M_{eq},p} + \varphi_{ijt}^{M_r,p}\cdot l_{ij}\right)\cdot\left(M_{ijt}^{p} - M_{ij,t-1}^{p}\right)^{+} + \sum_{(s,i)\in A_s}\varphi_{sit}\cdot Y_{sit} \le \mathrm{L}_t \quad \forall \mathrm{t}\in \mathrm{T} \quad \text{(M2.3-2)}$$

$$\sum_{i\in I-I_s} Y_{sit} + Y_{esc_{st}} = d_{st} \quad \forall \mathrm{s}\in \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{t}\in \mathrm{T} \quad \text{(M2.3-3)}$$

$$\sum_{j\in J_1} Y_{ijt} - \sum_{j\in J_2-I_s} Y_{jit} - \sum_{s\in I_s} \mathrm{fc}_s\cdot Y_{sit} = 0 \quad \forall \mathrm{i}\in \mathrm{I}-\mathrm{I_s}, \forall \mathrm{t}\in \mathrm{T} \quad \text{(M2.3-4)}$$

$$\sum_{n\in N_{ST_{ijt}}} \mathrm{cap}_n^X\cdot X_{ijt}^{n} \ge Y_{ijt} \quad \forall(\mathrm{i},\mathrm{j})\in \mathrm{A_{ST_t}}, \forall \mathrm{t}\in \mathrm{T} \quad \text{(M2.3-5)}$$

$$\sum_{p\in C_{M_t}} \mathrm{cap}_p^M\cdot M_{ijt}^{p} \ge Y_{ijt} \quad \forall(\mathrm{i},\mathrm{j})\in \mathrm{A_{M_t}}, \forall \mathrm{t}\in \mathrm{T} \quad \text{(M2.3-6)}$$

$$Y_{sit} \ge \mathrm{dmin}_{sit} \quad \forall \mathrm{s}\in \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{i}\in \mathrm{I}-\mathrm{I_s}, \forall \mathrm{t}\in \mathrm{T} \quad \text{(M2.3-7)}$$

$$Y_{sit} \le \mathrm{dmax}_{sit} \quad \forall \mathrm{s}\in \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{i}\in \mathrm{I}-\mathrm{I_s}, \forall \mathrm{t}\in \mathrm{T} \quad \text{(M2.3-8)}$$

$$Y_{sit} \geq 0 \quad \forall s \in I_s, \forall i \in I - I_s, \forall t \in T \tag{M2.3-9}$$

$$Y_{ijt} \geq 0 \quad \forall (i,j) \in A_{ST_t}, \forall (i,j) \in A_{M_t}, \forall t \in T \tag{M2.3-10}$$

$$Y_{esc_{st}} \geq 0 \quad \forall s \in I_s, \forall t \in T \tag{M2.3-11}$$

$$X_{ijt}^{n} = 0 \text{ ou } 1, \quad \forall (i,j) \in A_{ST_t}, \forall n \in N_{ST_{ijt}}, \forall t \in T \tag{M2.3-12}$$

$$M_{ijt}^{p} = 0 \text{ ou } 1, \quad \forall (i,j) \in A_{M_t}, \forall p \in C_{M_t}, \forall t \in T \tag{M2.3-13}$$

MODELO 2.3 – Modelo não-linear de planejamento geral multi-período com penalidade.

As penalidades são:

$\rho_{ijt}^{X,n} \rightarrow$ constante de penalidade associada à tecnologia *X* de modularidade *n*, instalada no arco (*i, j*) do período *t*;

$\rho_{ijt}^{M,p} \rightarrow$ constante de penalidade associada à tecnologia *M* de modularidade *p*, instalada no arco (*i, j*) do período *t*.

As funções não-lineares $(\,)^+$ e $(\,)^-$ são definidas como:

$$f(x)^+ = \begin{cases} 0 & para\ x \leq 0 \\ 1 & para\ x > 0 \end{cases}$$

$$f(x)^- = \begin{cases} 1 & para\ x < 0 \\ 0 & para\ x \geq 0 \end{cases}$$

É possível "linearizar" tais funções com o auxilio de variáveis binárias adicionais, U e V. Assim,

$$\left(X_{ijt}^{n} - X_{ij,t-1}^{n}\right)^- = U_{ijt}^{n\,-} = \begin{cases} 1 & \text{se } X_{ijt}^{n} = 0 \text{ e } X_{ij,t-1}^{n} = 1 \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$\left(X_{ijt}^{n} - X_{ij,t-1}^{n}\right)^+ = U_{ijt}^{n\,+} = \begin{cases} 1 & \text{se } X_{ijt}^{n} = 1 \text{ e } X_{ij,t-1}^{n} = 0 \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$\left(M_{ijt}^{p} - M_{ij,t-1}^{p}\right)^{-} = V_{ijt}^{p^{-}} = \begin{cases} 1 \text{ se } M_{ijt}^{p} = 0 \text{ e } M_{ij,t-1}^{p} = 1 \\ 0 \text{ caso contrário} \end{cases}$$

$$\left(M_{ijt}^{p} - M_{ij,t-1}^{p}\right)^{+} = V_{ijt}^{p^{+}} = \begin{cases} 1 \text{ se } M_{ijt}^{p} = 1 \text{ e } M_{ij,t-1}^{p} = 0 \\ 0 \text{ caso contrário} \end{cases}$$

O modelo "linearizado" é:

$$\max \mathrm{R}(Y) = \sum_{t \in T} \sum_{(s,i) \in A_s} r_{sit} \cdot Y_{sit} - \sum_{t=2}^{T} \sum_{(i,j) \in A_{ST_t}} \sum_{n \in N_{ST_{ijt}}} \rho_{ijt}^{X,n} \cdot U_{ijt}^{n^{-}} - \sum_{t=2}^{T} \sum_{(i,j) \in A_{M_t}} \sum_{p \in C_{M_t}} \rho_{ijt}^{M,p} \cdot V_{ijt}^{p^{-}} \tag{M2.4-1}$$

sujeito a:

$$\sum_{(i,j) \in A_{ST_t}} \sum_{n \in N_{ST_{ijt}}} \left(\varphi_{ijt}^{X_{eq},n} + \varphi_{ijt}^{X_r,n} \cdot l_{ij}\right) \cdot U_{ijt}^{n^{+}} + \sum_{(i,j) \in A_{M_t}} \sum_{p \in C_{M_t}} \left(\varphi_{ijt}^{M_{eq},p} + \varphi_{ijt}^{M_r,p} \cdot l_{ij}\right) \cdot V_{ijt}^{p^{+}} + \sum_{(s,i) \in A_s} \varphi_{sit} \cdot Y_{sit} \le L_t \quad \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \tag{M2.4-2}$$

$$\sum_{i \in I - I_s} Y_{sit} + Y_{esc_{st}} = d_{st} \quad \forall \mathrm{s} \in \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \tag{M2.4-3}$$

$$\sum_{j \in J_1} Y_{ijt} - \sum_{j \in J_2 - I_s} Y_{jit} - \sum_{s \in I_s} \mathrm{fc}_s \cdot Y_{sit} = 0 \quad \forall \mathrm{i} \in \mathrm{I} - \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \tag{M2.4-4}$$

$$\sum_{n \in N_{ST_{ijt}}} \mathrm{cap}_n^X \cdot X_{ijt}^n \ge Y_{ijt} \quad \forall (\mathrm{i,j}) \in \mathrm{A_{ST_t}}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \tag{M2.4-5}$$

$$\sum_{p \in C_{M_t}} \mathrm{cap}_p^M \cdot M_{ijt}^p \ge Y_{ijt} \quad \forall (\mathrm{i,j}) \in \mathrm{A_{M_t}}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \tag{M2.4-6}$$

$$Y_{sit} \ge \mathrm{dmin}_{sit} \quad \forall \mathrm{s} \in \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{i} \in \mathrm{I} - \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \tag{M2.4-7}$$

$$Y_{sit} \le \mathrm{dmax}_{sit} \quad \forall \mathrm{s} \in \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{i} \in \mathrm{I} - \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \tag{M2.4-8}$$

$$X_{ijt}^n - X_{ij,t-1}^n - U_{ijt}^{n^{+}} + U_{ijt}^{n^{-}} = 0, \quad \forall (\mathrm{i,j}) \in \mathrm{A_{ST_t}}, \forall \mathrm{n} \in \mathrm{N_{ST_{ijt}}}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \tag{M2.4-9}$$

$$M_{ijt}^p - M_{ij,t-1}^p - V_{ijt}^{p^{+}} + V_{ijt}^{p^{-}} = 0, \quad \forall (\mathrm{i,j}) \in \mathrm{A_{M_t}}, \forall \mathrm{p} \in \mathrm{C_{M_t}}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \tag{M2.4-10}$$

$$Y_{sit} \ge 0 \quad \forall \mathrm{s} \in \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{i} \in \mathrm{I} - \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \tag{M2.4-11}$$

$$Y_{ijt} \geq 0 \quad \forall (i,j) \in A_{ST_t}, \forall (i,j) \in A_{M_t}, \forall t \in T \tag{M2.4-12}$$

$$Y_{esc_{st}} \geq 0 \quad \forall s \in I_s, \forall t \in T \tag{M2.4-13}$$

$$X_{ijt}^{n} = 0 \text{ ou } 1, \quad \forall (i,j) \in A_{ST_t}, \forall n \in N_{ST_{ijt}}, \forall t \in T \tag{M2.4-14}$$

$$M_{ijt}^{p} = 0 \text{ ou } 1, \quad \forall (i,j) \in A_{M_t}, \forall p \in C_{M_t}, \forall t \in T \tag{M2.4-15}$$

$$U_{ijt}^{n\,-} = 0 \text{ ou } 1, \quad \forall (i,j) \in A_{ST_t}, \forall n \in N_{ST_{ijt}}, \forall t \in T \tag{M2.4-16}$$

$$U_{ijt}^{n\,+} = 0 \text{ ou } 1, \quad \forall (i,j) \in A_{ST_t}, \forall n \in N_{ST_{ijt}}, \forall t \in T \tag{M2.4-17}$$

$$V_{ijt}^{p\,-} = 0 \text{ ou } 1, \quad \forall (i,j) \in A_{M_t}, \forall p \in C_{M_t}, \forall t \in T \tag{M2.4-18}$$

$$V_{ijt}^{p\,+} = 0 \text{ ou } 1, \quad \forall (i,j) \in A_{M_t}, \forall p \in C_{M_t}, \forall t \in T \tag{M2.4-19}$$

MODELO 2.4 – Modelo linear de planejamento geral multi-período com penalidade.

- **Modelo de Planejamento Multi-Período com *Schedules***

Uma outra maneira de representar o problema é usando o conceito de *schedule* (KUBAT & SMITH, 2001): uma política de instalação de equipamentos $k \in K$ é definida para cada arco nos t períodos de planejamento. O objetivo é determinar a melhor política, respeitando as restrições do problema.

Assumindo $S_{ij}^{k} = \begin{cases} 1 \text{ se padrão } k \text{ é escolhido para arco } (i,j) \in A \\ 0 \text{ caso contrário} \end{cases}$ temos:

$$\max R(Y) = \sum_{t \in T} \alpha_t \sum_{(s,i) \in A_s} r_{sit} \cdot Y_{sit} - \sum_{(i,j) \in A} \sum_{k \in K} Q_{ij}^{k} \cdot S_{ij}^{k} \tag{M2.5-1}$$

sujeito a:

$$\sum_{(i,j) \in A} \sum_{k \in K} E_{ijt}^{k} \cdot S_{ij}^{k} \leq L_t \quad \forall t \in T \tag{M2.5-2}$$

$$\sum_{i \in I - I_s} Y_{sit} + Y_{esc_{st}} = d_{st} \quad \forall s \in I_s, \forall t \in T \tag{M2.5-3}$$

$$\sum_{j\in J_1} Y_{ijt} - \sum_{j\in J_2 - I_s} Y_{jit} - \sum_{s\in I_s} \mathrm{fc}_s \cdot Y_{sit} = 0 \quad \forall \mathrm{i} \in \mathrm{I} - \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \tag{M2.5-4}$$

$$\sum_{k\in K} \mathrm{cap}_t^k \cdot S_{ij}^k \geq Y_{ijt} \quad \forall (\mathrm{i}, \mathrm{j}) \in \mathrm{A}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \tag{M2.5-5}$$

$$Y_{sit} \geq \mathrm{dmin}_{sit} \quad \forall \mathrm{s} \in \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{i} \in \mathrm{I} - \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \tag{M2.5-6}$$

$$Y_{sit} \leq \mathrm{dmax}_{sit} \quad \forall \mathrm{s} \in \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{i} \in \mathrm{I} - \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \tag{M2.5-7}$$

$$\sum_{k\in K} S_{ij}^k = 1 \quad \forall (\mathrm{i}, \mathrm{j}) \in \mathrm{A} \tag{M2.5-8}$$

$$Y_{sit} \geq 0 \quad \forall \mathrm{s} \in \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{i} \in \mathrm{I} - \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \tag{M2.5-9}$$

$$Y_{ijt} \geq 0 \quad \forall (\mathrm{i}, \mathrm{j}) \in \mathrm{A}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \tag{M2.5-10}$$

$$Y_{esc_{st}} \geq 0 \quad \forall \mathrm{s} \in \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \tag{M2.5-11}$$

$$S_{ij}^k = 0 \text{ ou } 1, \ \forall k \in \mathrm{K}, \forall (i, j) \in \mathrm{A} \tag{M2.5-12}$$

MODELO 2.5 – Modelo de planejamento geral multi-período com *schedules*.

Em termos do modelo anterior M2.4, Q_{ij}^k e E_{ij}^k equivalem, respectivamente à penalidade e ao custo associado à escolha do *schedule k*:

$$Q_{ij}^k = \sum_{t=2}^{T} \alpha_t \sum_{(i,j)\in A_{ST_t}} \sum_{n\in N_{ST_{ijt}}} \rho_{ijt}^{X,n} \cdot \left(X_{ijt}^n - X_{ij,t-1}^n \right)^- + \sum_{t=2}^{T} \sum_{(i,j)\in A_{M_t}} \sum_{p\in C_{M_t}} \rho_{ijt}^{M,p} \cdot \left(M_{ijt}^p - M_{ij,t-1}^p \right)^-$$

$$E_{ij}^k = \sum_{(i,j)\in A_{ST_t}} \sum_{n\in N_{ST_{ijt}}} \left(\varphi_{ijt}^{X_{eq},n} + \varphi_{ijt}^{X_r,n} \cdot l_{ij} \right) \cdot \left(X_{ijt}^n - X_{ij,t-1}^n \right)^+ +$$

$$\sum_{(i,j)\in A_{M_t}} \sum_{p\in C_{M_t}} \left(\varphi_{ijt}^{M_{eq},p} + \varphi_{ijt}^{M_r,p} \cdot l_{ij} \right) \cdot \left(M_{ijt}^p - M_{ij,t-1}^p \right)^+ + \sum_{(s,i)\in A_s} \varphi_{sit} \cdot Y_{sit}, \ \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T}$$

K $\rightarrow$ conjunto das políticas de instalação de equipamentos.

O modelo 2.5 é também não-linear e o mesmo artifício usado em M2.3 pode ser novamente empregado para "linearizá-lo":

$$\max \mathrm{R}(Y) = \sum_{t \in T} \alpha_t \sum_{(s,i) \in A_s} r_{sit} \cdot Y_{sit} - \sum_{(i,j) \in A} \sum_{k \in K} \overline{Q}_{ij}^{k} \cdot S_{ij}^{k} \quad \text{(M2.6-1)}$$

sujeito a:

$$\sum_{(i,j) \in A} \sum_{k \in K} \overline{E}_{ijt}^{k} \cdot S_{ij}^{k} \leq \mathrm{L}_t \quad \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \quad \text{(M2.6-2)}$$

$$\sum_{i \in I - I_s} Y_{sit} + Y_{esc_{st}} = d_{st} \quad \forall \mathrm{s} \in \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \quad \text{(M2.6-3)}$$

$$\sum_{j \in J_1} Y_{ijt} - \sum_{j \in J_2 - I_s} Y_{jit} - \sum_{s \in I_s} \mathrm{fc}_s \cdot Y_{sit} = 0 \quad \forall \mathrm{i} \in \mathrm{I} - \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \quad \text{(M2.6-4)}$$

$$\sum_{k \in K} \mathrm{cap}_t^k \cdot S_{ij}^k \geq Y_{ijt} \quad \forall (\mathrm{i}, \mathrm{j}) \in \mathrm{A}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \quad \text{(M2.6-5)}$$

$$Y_{sit} \geq \mathrm{dmin}_{sit} \quad \forall \mathrm{s} \in \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{i} \in \mathrm{I} - \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \quad \text{(M2.6-6)}$$

$$Y_{sit} \leq \mathrm{dmax}_{sit} \quad \forall \mathrm{s} \in \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{i} \in \mathrm{I} - \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \quad \text{(M2.6-7)}$$

$$\sum_{k \in K} S_{ij}^k = 1 \quad \forall (\mathrm{i}, \mathrm{j}) \in \mathrm{A} \quad \text{(M2.6-8)}$$

$$Y_{sit} \geq 0 \quad \forall \mathrm{s} \in \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{i} \in \mathrm{I} - \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \quad \text{(M2.6-9)}$$

$$Y_{ijt} \geq 0 \quad \forall (\mathrm{i}, \mathrm{j}) \in \mathrm{A}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \quad \text{(M2.6-10)}$$

$$Y_{esc_{st}} \geq 0 \quad \forall \mathrm{s} \in \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \quad \text{(M2.6-11)}$$

$$S_{ij}^k = 0 \text{ ou } 1, \forall k \in \mathrm{K}, \forall (i, j) \in \mathrm{A} \quad \text{(M2.6-12)}$$

MODELO 2.6 – Modelo linear de planejamento geral multi-período com *schedules*.

Variáveis binárias auxiliares são criadas para "linearizar" o problema. Cada padrão *k* deve, além de fixar as variáveis de decisão *X* e *M*, fixar também as variáveis auxiliares *U* e *V*. As novas equações de penalidade e custo associadas à política *k* são:

$$Q_{ij}^{k} = \sum_{t=2}^{T} \alpha_t \sum_{(i,j)\in A_{ST_t}} \sum_{n\in N_{ST_{ijt}}} \rho_{ijt}^{X,n} \cdot \left(X_{ijt}^{n} - X_{ij,t-1}^{n}\right)^{-} + \sum_{t=2}^{T} \sum_{(i,j)\in A_{M_t}} \sum_{p\in C_{M_t}} \rho_{ijt}^{M,p} \cdot \left(M_{ijt}^{p} - M_{ij,t-1}^{p}\right)^{-}$$

$$E_{ij}^{k} = \sum_{(i,j)\in A_{ST_t}} \sum_{n\in N_{ST_{ijt}}} \left(\varphi_{ijt}^{X_{eq},n} + \varphi_{ijt}^{X_r,n} \cdot l_{ij}\right) \cdot \left(X_{ijt}^{n} - X_{ij,t-1}^{n}\right)^{+} +$$

$$\sum_{(i,j)\in A_{M_t}} \sum_{p\in C_{M_t}} \left(\varphi_{ijt}^{M_{eq},p} + \varphi_{ijt}^{M_r,p} \cdot l_{ij}\right) \cdot \left(M_{ijt}^{p} - M_{ij,t-1}^{p}\right)^{+} + \sum_{(s,i)\in A_s} \varphi_{sit} \cdot Y_{sit}, \ \forall t \in T$$

Devido às restrições de "linearização" envolvendo as variáveis de decisão e auxiliares (M2.4-9 e M2.4-10), gerar políticas de instalação factíveis é um desafio a parte.

A desvantagem em trabalhar com a formulação baseada em *schedule* é a dificuldade em gerar políticas de instalação factíveis. Além disso, se não há um conhecimento prévio do problema e/ou de seus dados, o número possível de diferentes *schedules* pode ser proibitivo.

A dimensão de um modelo matemático – número de variáveis e restrições – está diretamente relacionada à complexidade de achar a solução ótima do problema. Se o modelo envolver variáveis inteiras, como é o caso, a complexidade é ainda maior.

Para comparar a dimensão dos modelos, considere uma rede de acesso hipotética composta por 10 nós de acesso e 15 arcos (diretos e arcos de rotas alternativas), que oferece 2 serviços de telecomunicações e tem como candidata uma solução tecnológica *X* de 3 modularidades diferentes (n=3), e a solução de expandir a rede metálica *M* com uma modularidade (p=1). A dimensão dos modelos lineares M2.2, M2.4 e M2.6 para a expansão em 5 anos da rede é apresentada na tabela 2.1.

TABELA 2.1 – Comparativo de número de variáveis e restrições dos modelos lineares multi-período.

Modelo	Número de Variáveis		Número de Restrições
	Binárias	Reais	
2.2	300	185	865
2.4	900	185	865
2.6	300	185	355

2.6 Complexidade Computacional

A **teoria da complexidade computacional** surgiu no começo dos anos 1970, com o propósito de compreender as estruturas de problemas e seus algoritmos de resolução, classificando-os em problemas fáceis ou difíceis de serem solucionados (GAREY & JOHNSON, 1979). O tempo de execução de um algoritmo computacional é medido pelo número de passos aritméticos requeridos para resolver uma instância de um problema qualquer. Um algoritmo é dito **polinomial** se a complexidade do seu pior caso é uma função polinomial do tamanho da entrada de dados: existe um polinômio P tal que para cada entrada de tamanho n o algoritmo termina em no máximo $P(n)$ passos.

A $\mathcal{NP}$-completude, um dos tópicos fundamentais da teoria da complexidade, classifica um dado problema em duas grandes classes (AHUJA, MAGNANTI & ORLIN, 1993): (1) problemas fáceis, que podem ser resolvidos por um algoritmo de tempo de execução polinomial, chamados algoritmos eficientes, e (2) problemas difíceis, para os quais não há indícios de algoritmos eficientes para resolvê-los, e todos os algoritmos conhecidos requerem tempo de execução exponencial.

A $\mathcal{NP}$-completude mostra que a grande maioria dos problemas difíceis é equivalente entre si e, portanto, se existe um algoritmo eficiente para um desses problemas, é possível

desenvolver algoritmos eficientes para todos os outros. Esses problemas computacionalmente equivalentes são conhecidos como **problemas $\mathcal{NP}$-completos**.

Para o estudo teórico da complexidade de algoritmos é conveniente considerar problemas cujo resultado seja sim ou não. Essa versão sim/não é chamada de versão de identificação (AHUJA, MAGNANTI & ORLIN, 1993) ou problema de decisão (OSMAN, 1993). Para o Problema do Caixeiro Viajante (PCV), por exemplo, dados um conjunto de cidades $C = \{c_1, c_2, ..., c_n\}$, uma distância $d(c_i, c_j)$ para cada par de cidades $c_i, c_j \in C$, e uma constante k, existe um roteiro que visita todas as cidades em C uma única vez cujo comprimento total seja menor ou igual a k? Ou mais formalmente, dados um espaço de solução X, uma função objetivo f e um limitante k, o problema de decisão é: existe um roteiro factível $x \in X$ tal que $f(x) \leq k$?

A teoria da complexidade computacional classifica os problemas em quatro classes: $\mathcal{P}$, $\mathcal{NP}$, $\mathcal{NP}$-hard e $\mathcal{NP}$-completo.

Classe $\mathcal{P}$

Um problema $\overline{P}$ pertence à classe $\mathcal{P}$ se algum algoritmo polinomial resolve $\overline{P}$. Exemplos de problemas em $\mathcal{P}$ são: problema do menor caminho, problema do máximo fluxo, problema do fluxo de mínimo custo, etc.

Classe $\mathcal{NP}$

Um problema $\overline{P}$ pertence à classe $\mathcal{NP}$ se para toda instância "sim" de seu problema de decisão existe uma rápida verificação para a autenticidade da resposta. Por exemplo, considere uma instância do problema do caixeiro viajante com n cidades. Um roteiro W, de comprimento igual a k no máximo, é uma instância "sim"? W é um roteiro factível para o problema? É possível verificar rapidamente, com um esforço computacional da ordem de $O(n)$, que W contém todas as cidades do roteiro e que seu comprimento total não é maior que k. A verificação da resposta "sim" demanda tempo polinomial; a única maneira de se

verificar a autenticidade de uma instância "não" é enumerando todas as possibilidades de roteiros e verificando se cada um dos comprimentos de roteiro é maior que *k*, prova que exige um tempo computacional exponencial.

Classe $\mathcal{NP}$-*hard*

Um problema $\overline{P}$ pertence à classe $\mathcal{NP}$-*hard*, ou $\mathcal{NP}$ -difícil, se todos os outros problemas em $\mathcal{NP}$ se reduzem a $\overline{P}$ em tempo polinomial (um problema P_1 se reduz a P_2 em tempo polinomial se algum algoritmo de execução polinomial que resolve P_1 é usado como sub-rotina para resolver P_2).

Classe $\mathcal{NP}$-completo

Um problema $\overline{P}$ pertence à classe $\mathcal{NP}$-completo se (1) $\overline{P} \in \mathcal{NP}$, e (2) $\overline{P} \in \mathcal{NP}$-*hard*.

A figura 2.3 representa o esquema das relações entre as diferentes classes de problemas apresentadas.

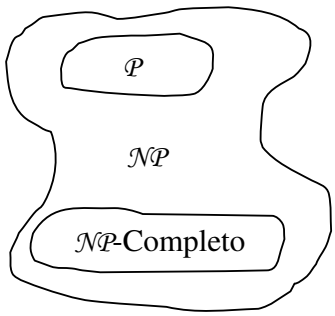


FIGURA 2.3 – Relação entre as várias classes de problemas.

A maioria dos problemas de *Programação Inteira* (PI) é $\mathcal{NP}$ -dificil (GAREY & JOHNSON, 1979). O problema de Programação Linear Inteira Mista que representa a expansão da rede de acesso, que chamaremos de $\overline{\text{PLIM}}$, pode ser decomposto em dois subproblemas: um linear (PL) e outro inteiro (PI).

O subproblema inteiro de $\overline{\text{PLIM}}$, o $\overline{\text{PI}}$, é comparado com problemas do tipo mochila (*knapsack problem*). A razão do interesse no problema da mochila basicamente deriva de três fatos: (1) ele pode ser visto como o mais simples problema de programação inteira; (2) ele aparece como subproblema em muitos problemas mais complexos; (3) ele pode representar um número grande de problemas práticos (MARTELLO & TOTH, 1990).

O problema $\overline{\text{PI}}$ multi-período oriundo de M2.2 é formado pelas variáveis inteiras binárias X_{ijt}^{n} e M_{ijt}^{p} que representam a instalação (ou não) de equipamentos *n* no arco (*i*, *j*) no período *t*. A função-objetivo original do problema $\overline{\text{PLIM}}$ é formada por variáveis reais e visa maximizar a receita gerada pelos serviços oferecidos (M2.2-1). Para que este objetivo seja mantido em $\overline{\text{PI}}$, é considerada a maximização da capacidade dos equipamentos instalados, garantindo assim o máximo de demanda possível atendida.

Usando a terminologia de problemas da mochila, dados *n* equipamentos de acesso e *t* períodos, com:

cap_n = capacidade do equipamento *n*,

c_{nt} = custo do equipamento *n* se associado ao período *t*,

L_t = orçamento do período *t*,

maximizar a capacidade total associada, sem extrapolar o orçamento de nenhum período, isto é,

$$\text{maximize} \qquad z = \sum_{t=1}^{T}\sum_{n=1}^{N} cap_n X_{nt} \tag{M2.7-1}$$

sujeito a:

$$\sum_{n=1}^{N} c_{nt} X_{nt} \le L_t, \quad \text{t} \in \text{T} = \{1,...,\text{T}\} \tag{M2.7-2}$$

$$X_{nt} = 0 \text{ ou } 1, \qquad \text{t} \in \text{T}, \text{n} \in \text{N} \tag{M2.7-3}$$

onde $X_{nt} = \begin{cases} 1 & \text{se equipamento } n \text{ é selecionado para período } t; \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$

MODELO 2.7 – Modelo de programação inteira para o planejamento multi-período.

O modelo acima pode ser comparado com o problema da mochila múltipla 0-1, que é (MARTELLO & TOTH, 1990): dado um conjunto de n itens e um conjunto de m mochilas ($m \leq n$), com:

p_j = lucro do item j,

w_j = peso do item j,

c_i = capacidade da mochila i,

selecionar m subconjuntos distintos de itens tal que o lucro total dos itens selecionados é o máximo, e cada subconjunto pode ser associado a uma mochila diferente cuja capacidade é maior que o peso total dos itens do subconjunto. Formalmente,

$$\text{maximize} \qquad z = \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} p_j x_{ij} \qquad \text{(M2.8-1)}$$

sujeito a:

$$\sum_{j=1}^{n} w_j x_{ij} \leq c_i, \quad i \in M = \{1,...,m\} \qquad \text{(M2.8-2)}$$

$$\sum_{i=1}^{m} x_{ij} \leq 1, \qquad j \in N = \{1,...,n\} \qquad \text{(M2.8-3)}$$

$$x_{ij} = 0 \text{ ou } 1, \qquad i \in M, j \in N \qquad \text{(M2.8-4)}$$

onde $x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se item } j \text{ é selecionado para mochila } i; \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$

MODELO 2.8 – Modelo para o problema da mochila múltipla 0-1.

Ou ainda comparado com o problema generalizado de atribuição (PGA), ou do inglês *Generalized Assignment Problem* (GAP) (CATRYSSE & VAN WASSENHOVE, 1992), que pode ser incluído no rol dos problemas-mochila e é descrito da seguinte maneira: dados *n* itens e *m* mochilas, com:

p_{ij} = lucro do item *j* se associado a mochila *i*,

w_{ij} = peso do item *j* se associado a mochila *i*,

c_i = capacidade da mochila *i*,

associar cada item a exatamente uma mochila, de modo a maximizar o lucro total dos itens, sem atribuir a nenhuma mochila um peso total maior que sua capacidade, isto é,

$$\text{maximize} \qquad z = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} p_{ij} x_{ij} \tag{M2.9-1}$$

sujeito a:

$$\sum_{j=1}^{n} w_{ij} x_{ij} \le c_i, \quad \text{i} \in \text{M} = \{1,...,\text{m}\} \tag{M2.9-2}$$

$$\sum_{i=1}^{m} x_{ij} = 1, \qquad \text{j} \in \text{N} = \{1,...,\text{n}\} \tag{M2.9-3}$$

$$x_{ij} = 0 \text{ ou } 1, \qquad \text{i} \in \text{M}, \text{j} \in \text{N} \tag{M2.9-4}$$

onde $$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se item } j \text{ é selecionado para mochila } i; \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

MODELO 2.9 – Modelo para o problema generalizado de atribuição.

As restrições M2.7-3 e M2.8-3 podem ser relaxadas (ambos os problemas relaxados continuam sendo $\mathcal{NP}$-hard, segundo MARTELLO & TOTH (1990)) e os modelos M2.6, M2.7 e M2.8 são equivalentes. É possível também considerar a variável X_{nt} do M2.6 como uma sequência de *bits* 0-1 (uma sequência para cada período *t*, como na formulação M2.5, com *schedules*) e, neste caso, M2.6 é equivalente ao modelo do problema PGA, M2.8.

Problemas da mochila múltipla e de atribuição são problemas $\mathcal{NP}$-*hard* no seu sentido mais forte (MARTELLO & TOTH, 1990). Considerando a equivalência acima testada e sendo $\overline{\text{PI}}$ uma parte do problema maior abordado neste trabalho, conclui-se que $\overline{\text{PLIM}}$ é igualmente $\mathcal{NP}$-*hard*, intratável em tempo polinomial.

Por um lado, as pesquisas de $\mathcal{NP}$-completude indicam que problemas $\mathcal{NP}$–completos não podem ser resolvidos eficientemente em tempo polinomial; por outro, mais otimista, fornecem várias técnicas para provar que um dado problema é $\mathcal{NP}$–completo (AHUJA, MAGNANTI & ORLIN, 1993), e assim incentivar pesquisadores em otimização a direcionar seus esforços na elaboração de outras técnicas eficientes de resolução do problema, como métodos heurísticos.

Capítulo 3

MÉTODO HÍBRIDO DE RESOLUÇÃO

3.1 Introdução

Problemas de otimização combinatorial (POC) descrevem matematicamente o desafio de achar, dentre um conjunto finito porém enorme de itens, o subconjunto que melhor arranja, agrupa, seleciona ou ordena alguns elementos. São problemas de extrema importância prática pois aparecem com freqüência na vida cotidiana de planejadores, administradores e gerentes de negócios das mais variadas áreas, e são difíceis de resolver por meio de métodos clássicos de otimização exata. Problemas de planejamento de redes, de atribuição de tarefas, de empacotamento e de roteamento são alguns exemplos de POCs (NEMHAUSER & WOLSEY, 1999).

A principal dificuldade na resolução de problemas de otimização combinatorial é o esforço computacional exigido para obter a solução ótima. Problemas de grande porte, como a maioria dos problemas da vida real vêm se apresentando, podem ser impossíveis de resolver por métodos exatos. Resultados da teoria de complexidade computacional (GAREY & JOHNSON, 1979) indicam que, uma vez que a maioria dos problemas de otimização combinatorial é intratável, esforços para resolver esse tipo de problema devem ser direcionados para o estudo de algoritmos que fornecem soluções próximas da ótima numa quantidade razoável de tempo computacional.

Heurísticas são procedimentos de resolução que não possuem prova de convergência nem tampouco garantem achar a solução ótima; **algoritmos aproximados** têm propriedades de convergência de otimalidade mas também não garantem a melhor solução. Tais métodos parecem pouco atrativos frente à garantia de otimalidade dos métodos exatos, mas são importantes ferramentas de otimização para lidar com problemas difíceis ou impossíveis de resolver exatamente. São indicados, portanto, na resolução de problemas complexos para os

quais não existem métodos exatos conhecidos ou quando estes são proibitivos em relação ao tempo computacional de desenvolvimento e execução. São indicados também quando os dados do problema têm baixa confiabilidade, fazendo soluções exatas perderem o sentido. Uma coleção de métodos heurísticos e suas aplicações podem ser encontradas em (ZANAKIS, EVANS & VAZACOPOULOS, 1989).

Nos últimos anos, problemas da classe $\mathcal{NP}$-difícil impulsionaram o desenvolvimento de novas técnicas heurísticas. A disponibilidade de uma grande quantidade de recursos computacionais estimulou o surgimento da computação evolutiva, família de modelos computacionais inspirados na evolução natural de seres vivos onde impera a lei do mais apto: indivíduos mais adaptados ao meio sobrevivem à busca pela melhor solução. Os algoritmos precursores desta tendência evolutiva são os **algoritmos genéticos** (AG), a **programação evolutiva** e as **estratégias evolutivas**. Outras abordagens evolutivas mais recentes são a **programação genética** e os **sistemas classificadores**. Revisões completas sobre a pesquisa em computação evolutiva desde seu surgimento são encontradas em BÄCK, FOGEL & MICHALEWICZ (2000a) e BÄCK, FOGEL & MICHALEWICZ (2000b).

O planejamento de longo prazo de redes de acesso local é uma tarefa complexa, que implica em problemas de otimização combinatorial de difícil resolução. Por isso, este trabalho opta pelo uso de processos heurísticos que podem alcançar soluções próximas da ótima em tempo computacional aceitável. A estrutura do problema de planejamento em múltiplos períodos composto por variáveis inteiras e reais (Modelo 2.2) motivou o uso de um método heurístico de decomposição, que mescla métodos clássicos de otimização exata e algoritmos genéticos. A fase evolutiva do algoritmo resolve a parte inteira do problema mas, por se tratar de um problema restrito, os algoritmos genéticos foram usados com cautela a fim de evitar a geração de soluções infactíveis. Uma maneira eficaz de tratar esse tipo de infactibilidade é incorporar ao algoritmo técnicas de otimização baseadas em restrições (CRAENEN, EIBEN & MARCHIORI, 2001). As variáveis reais não são fatores complicadores, uma vez que já existem algoritmos de eficiência comprovada para tratá-las (BAZARAA, JARVIS & SHERALI, 1990); métodos exatos – via CPLEX® (CPLEX, 1994), resolvem o problema real de fluxos em rede.

3.2 Algoritmos Genéticos

Apesar de terem sido desenvolvidos de forma independente, os algoritmos evolutivos possuem uma estrutura comum, baseada na evolução natural. O que os difere, em geral, são os operadores genéticos empregados no processo evolutivo de procriação (MICHALEWICZ, 1996), como por exemplo recombinação, mutação e imigração.

O processo evolutivo de um **algoritmo genético** inicia-se com a geração (geralmente randômica) de uma população de indivíduos, ou cromossomos, que correspondem a soluções-candidatas do problema. Durante a evolução, alguns indivíduos da população são manipulados por um conjunto de operadores genéticos. O objetivo desse processo que imita a reprodução genética é formar novos indivíduos e aumentar a diversidade da população, ajudando na busca pela melhor solução. Os indivíduos são então avaliados, segundo uma medida de adaptação, o *fitness*, e os mais bem adaptados são selecionados para a próxima geração. A condição de parada indica geralmente a existência, na população, de um indivíduo que representa uma solução aceitável para o problema, ou o alcance de um número pré-determinado de gerações.

A seguir, os componentes de um algoritmo genético são detalhados:

- **representação genética para soluções candidatas**

  Em termos computacionais, cada indivíduo é codificado por uma única seqüência numérica, que deve representar uma solução como um todo e ser o mais simples possível. Na terminologia originada da teoria da evolução natural e da genética, cada cromossomo contém a codificação (genótipo) de uma possível solução do problema (fenótipo). Os cromossomos são usualmente implementados na forma de listas de atributos, onde cada atributo é conhecido como gene. Os possíveis valores que um determinado gene pode assumir são denominados alelos.

A codificação é uma das etapas mais críticas na elaboração de um algoritmo genético pois sua definição inadequada pode levar a problemas de convergência prematura do algoritmo ou fazer com que indivíduos modificados pelos operadores sejam inválidos. Em problemas de otimização restrita, essa codificação deve levar em conta ainda as restrições do problema.

Originalmente, os algoritmos genéticos usam arranjos binários de tamanho fixo para representar os candidatos a solução do problema. Entretanto, outros tipos de codificação vêm sendo usados, como a codificações inteira ou em ponto flutuante, além de cromossomos de tamanhos variáveis.

- **criação de uma população inicial**

A geração mais comum de população inicial é a aleatória. Porém, se algum conhecimento prévio a respeito do problema estiver disponível, pode ser utilizado na inicialização da população, especialmente relacionado a restrições.

- **avaliação dos indivíduos**

A função de *fitness* faz o papel da pressão ambiental exercida sobre o indivíduo, classificando as soluções em termos de sua capacidade de resolver o problema.

A definição da função de avaliação deve considerar a descrição do problema abordado. Se o problema é restrito, é importante escolher uma função que leva em conta as restrições do problema, evitando gerar indivíduos infactíveis. A função de *fitness* pode incorporar um termo de penalidade, por exemplo.

Para um bom desempenho do algoritmo a função deve ser relativamente simples, pelo fato de ter que avaliar milhares de indivíduos diversas vezes.

- **operadores genéticos**

Os principais operadores de reprodução de um algoritmo genético são o *crossover* e a mutação.

O operador de *crossover*, ou recombinação, gera novos indivíduos através da combinação de dois ou mais indivíduos. O objetivo é a troca de informação entre diferentes soluções candidatas. O tipo mais comum de recombinação é o crossover de um ponto: um mesmo ponto é escolhido aleatoriamente para cortar dois cromossomos (os pais) previamente selecionados. Os segmentos de cromossomo criados a partir deste ponto são trocados, criando assim dois novos indivíduos (os filhos). A figura 3.1 ilustra o cruzamento de dois indivíduos.

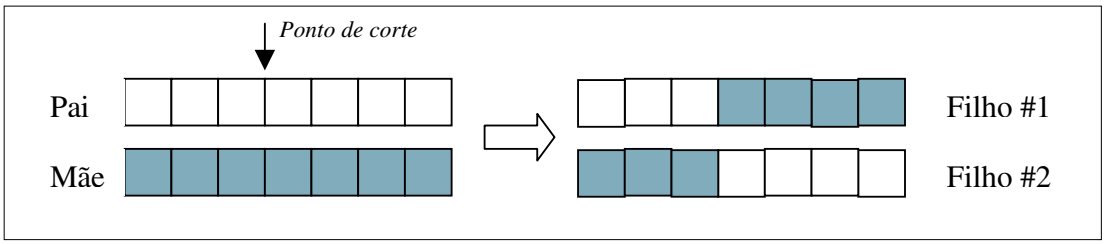


FIGURA 3.1 – Exemplo de *crossover* de um ponto.

Uma extensão deste cruzamento é o crossover de dois pontos, onde desta vez dois pontos de corte são escolhidos e informações genéticas são trocadas entre eles (figura 3.2).

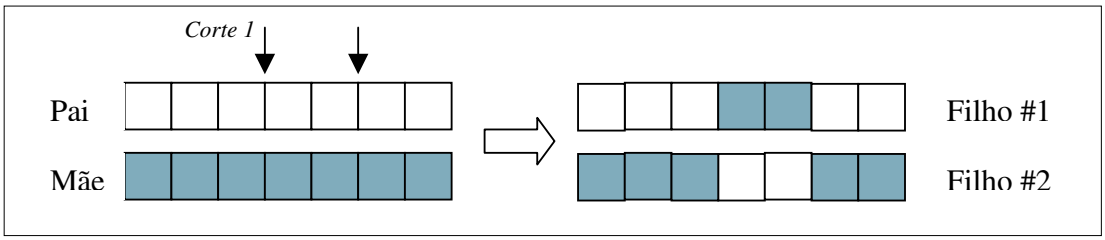


FIGURA 3.2 – Exemplo de *crossover* de dois pontos.

Outro tipo de recombinação muito comum é o *crossover* uniforme (figura 3.3). No caso de codificação binária, para cada *bit* no primeiro filho é decidido, com alguma probabilidade fixa p_c, qual pai vai contribuir com a característica daquela posição.

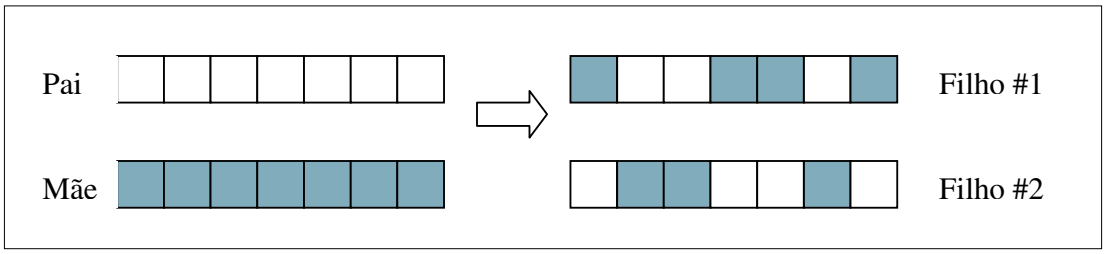


FIGURA 3.3 – Exemplo de *crossover* uniforme.

Como a eficiência dos operadores está particularmente ligada à natureza do problema abordado, muitos outros tipos de recombinação têm sido propostos na literatura, como o *crossover* OX (*Order Crossover*), desenvolvido para problemas de seqüenciamento, e o *crossover* aritmético, para codificação em ponto flutuante (MICHALEWICZ, 1996).

A seleção dos indivíduos a serem reproduzidos acontece, em geral, aleatoriamente, ou a partir de uma técnica baseada na proporcionalidade do valor de *fitness*, conhecida como *Roulette Wheel* (MICHALEWICZ, 1996); quanto maior o *fitness* de um indivíduo, maior sua probabilidade de passar para a próxima geração.

N	cromossomo	*fitness*	proporção (em graus)
1	000110010	6,0	180
2	010100101	3,0	90
3	101111010	1,5	45
4	101001010	1,5	45

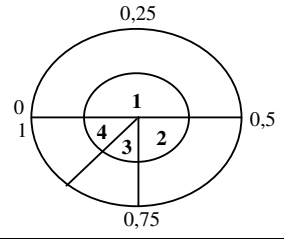


FIGURA 3.4 – Roleta de proporcionalidade do valor de *fitness*.

A mutação altera os indivíduos através de pequenas modificações aleatórias de um ou mais genes, visando diversificar a população. Para genes binários, a *mutação simples* equivale a trocar o que é 1 por 0, e vice-versa. Para problemas com codificação flutuante, uma alternativa para mutação é a uniforme: seleciona-se aleatoriamente um alelo k do cromossomo $x=[x_1,...,x_k,...,x_n]$, gerando um indivíduo $x'=[x_1,...,x'_k,...,x_n]$, onde x'_k é um número aleatório (com distribuição de probabilidade uniforme) amostrado

no intervalo [*LI*, *LS*], onde *LI* e *LS* são, respectivamente, os limites inferior e superior para o valor do alelo x_k .

Apesar de ser extremamente importante para uma diversidade extra da população, a probabilidade de ocorrência de mutação p_m deve ser baixa para evitar a destruição do progresso já obtido com a busca. Tipicamente a taxa de mutação é aplicada com probabilidade menor que 1%.

A imigração para a população corrente de novos indivíduos gerados aleatoriamente é um outro operador que pode ser usado nos algoritmos genéticos, e que também adiciona diversidade à população.

- **seleção de indivíduos para a próxima geração**

A seleção da nova população pode ser aleatória ou via *roulette wheel*. Contudo, estas estratégias de seleção podem eliminar a melhor solução da população. Alternativas salvacionistas mantêm sempre o melhor indivíduo da geração atual na geração seguinte.

Alguns mecanismos de seleção são:

Seleção aleatória	→	os indivíduos são selecionados aleatoriamente. Esta seleção pode ser subdividida em salvacionista, que mantém o melhor indivíduo na população e sorteia os demais, e não-salvacionista, onde todos os indivíduos são selecionados aleatoriamente.
Seleção elitista	→	os melhores indivíduos são selecionados para compor a nova população.
Seleção bi-classista	→	são selecionados os *P* % melhores indivíduos e os (100-*P*)% piores indivíduos da população.

- **parâmetros**

Os principais parâmetros a serem estabelecidos em um algoritmo genético são:

Tamanho da população → o tamanho da população influencia no desempenho dos algoritmos genéticos. Populações muito pequenas exploram uma parte muito insignificante do espaço de busca, podendo reduzir sensivelmente as possibilidades de atingir o ótimo global e exigindo um número de iterações bem maior para alcançar bons resultados. Por outro lado, populações muito grandes podem prejudicar a performance do algoritmo. Alguns estudos sugerem que o tamanho adequado da população deve estar relacionado com o tamanho da solução procurada, que pode coincidir ou não com o tamanho do cromossomo, dependendo da codificação adotada (DEB, 1998).

Taxa de *crossover* → taxas altas provocam uma convergência rápida, mas podem significar perda de estruturas de alta adaptabilidade, ou seja, pode-se descartar soluções com boa chance de alcançar o valor ótimo. Taxas baixas tornam o algoritmo lento. É preciso, portanto, buscar um valor de equilíbrio para a taxa de recombinação.

Taxa de mutação → taxas de valor baixo evitam que boas características das soluções candidatas sejam perdidas. Apesar de baixas, essas taxas são capazes de prevenir estagnação em um valor e possibilitam alcançar qualquer ponto do espaço de busca. Taxas altas de mutação tornam a busca essencialmente aleatória.

- **critério de parada**

Os critérios de parada de um algoritmo evolutivo podem estar relacionados com a qualidade desejada da solução ou com o tempo despendido para resolver o problema, limitando o número de gerações.

O fluxograma para um algoritmo genético genérico é (figura 3.5):

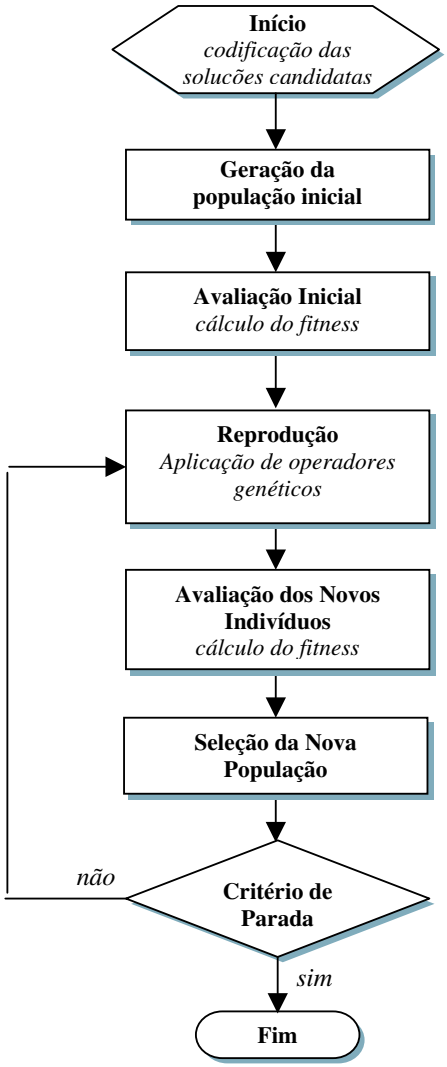


FIGURA 3.5 – Fluxograma geral para um algoritmo genético.

Algoritmos genéticos em sua forma tradicional, como o descrito acima, não são eficientes

quando aplicados à resolução de problemas de otimização com restrições. A característica de aleatoriedade da computação evolutiva pode acarretar na geração de um número muito grande de candidatos infactíveis, comprometendo o processo evolutivo. Não há garantias, por exemplo, que indivíduos gerados a partir de soluções factíveis sejam também factíveis.

MICHALEWICZ & SCHOENAUER (1996) classificam os métodos evolutivos para problemas restritos em cinco categorias: (1) métodos baseados na preservação da factibilidade das soluções, (2) métodos baseados em funções de penalidade, (3) métodos que abordam de modo distinto as soluções factíveis e infactíveis durante o processo evolutivo, (4) métodos baseados em decodificadores e (5) métodos híbridos.

O algoritmo heurístico proposto, apresentado na seção a seguir, usa três dessas estratégias: preservação da factibilidade, penalidade e métodos híbridos. O algoritmo também incorpora conhecimentos sobre as restrições na codificação dos candidatos, nos operadores genéticos e na função objetivo, recuperando ou inibindo a geração de soluções infactíveis.

3.3 Algoritmo Híbrido Evolutivo – AHE

Os modelos matemáticos que representam os problemas de planejamento da expansão da rede de acesso local mono (Modelo 2.1) e multi períodos (Modelo 2.2) são modelos de Programação Linear Inteira Mista, PLIM. A fim de diminuir a complexidade do problema, o algoritmo heurístico desenvolvido decompõe a resolução em duas partes, uma que aborda as variáveis binárias, e outra, as variáveis reais. A parte real do problema pode ser representada por um modelo de fluxos em rede e será incorporada na metodologia de resolução evolutiva.

A facilidade de codificar as variáveis binárias do problema motiva o uso dos algoritmos genéticos como componente do método de resolução. As variáveis 0-1 podem ser representadas diretamente através de uma cadeia de caracteres binários, sem a necessidade de uma codificação genética específica. Apesar da simplicidade na representação das soluções inteiras candidatas, fato que contribui para um bom desempenho do algoritmo, é

preciso lidar com as restrições envolvendo variáveis binárias. Como já foi dito, o algoritmo genético clássico não é eficiente na resolução de problemas de otimização restrita.

A metodologia de resolução proposta neste trabalho é chamada de **Algoritmo Híbrido Evolutivo**, ou simplesmente AHE (figura 3.6).

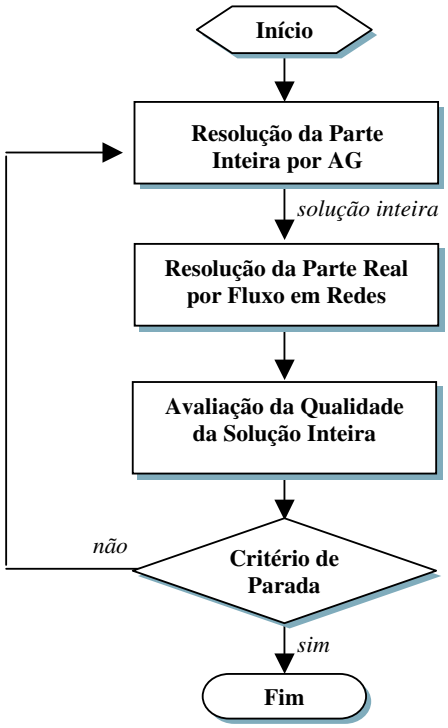


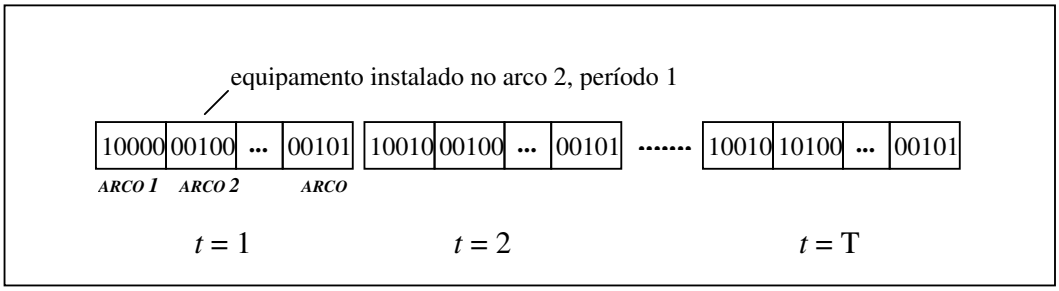
FIGURA 3.6 – Fluxograma geral para o AHE.

O algoritmo evolutivo é baseado nos fundamentos dos algoritmos genéticos e incrementado com técnicas de preservação da factibilidade das restrições. O algoritmo foi desenvolvido para resolver o problema de planejamento para múltiplos períodos, representado pelo modelo multi-período 2.2; fazendo T=1 tem-se a versão mono-período do método de resolução.

3.3.1 Codificação

O primeiro componente a ser definido é a representação genética das soluções candidatas

ao problema. As soluções candidatas para as variáveis binárias – X_{ijt}^{n} e M_{ijt}^{p}, representam a instalação (ou não) das tecnologias de acesso no arco *ij*, em cada período *t* do horizonte de planejamento. Essa representação codifica cada variável do problema em uma sequência de caracteres binários, de tamanho fixo. O cromossomo é dividido em blocos – para os períodos (*t*), e sub-blocos – para os arcos (*n_arco*). Cada gene do sub-bloco de um arco representa uma tecnologia candidata (*n_tec*). O tamanho do cromossomo é, portanto, igual a *n_tec*n_arco*t*. A figura 3.7 exibe um exemplo de cromossomo para um problema de



planejamento de rede para dois períodos.

FIGURA 3.7 – Exemplo da codificação de uma solução-candidata.

3.3.2 Geração da População Inicial

A geração da população inicial é baseada na aleatoriedade, mas segue algumas estratégias a fim de evitar que indivíduos iniciais violem as restrições de supressão de equipamentos e de limite de orçamento.

Técnica de Preservação de Factibilidade

A primeira dessas estratégias diz respeito às restrições de supressão de equipamentos:

$$\left(X_{ijt}^{n} - X_{ij,t-1}^{n}\right) \geq 0 \quad \forall (i,j) \in A_{ST_t}, \forall n \in N_{ST_{ijt}}, \forall t \in T \qquad \text{(M2.2-9)}$$

$$\left(M_{ijt}^{p} - M_{ij,t-1}^{p}\right) \geq 0 \quad \forall (i,j) \in A_{M_t}, \forall p \in C_{M_t}, \forall t \in T \qquad \text{(M2.2-10)}$$

As regras antiviolação para M2.2-9 e M2.2-10 são baseadas na estrutura do cromossomo. Para garantir que um equipamento (*equip*) instalado no período *t* se mantenha na solução nos períodos seguintes, a instalação é feita progressivamente e é ativada no respectivo gene, de *t* até o último período.

A técnica de preservação da factibilidade usa o conhecimento da estrutura das restrições para evitar a infactibilidade. A principal desvantagem é que essa estratégia é aplicável somente ao problema para o qual foi projetada.

Apesar de não ter o propósito de impedir possíveis excessos de fluxo sobre a capacidade do arco (*cap_arco*), restrição tratada no processo de avaliação do indivíduo, o procedimento de geração da população inicial analisa a capacidade do arco antes de realizar uma instalação. Apenas quando a capacidade do arco não é suficiente para atender a demanda mínima naquele período um equipamento é instalado. Isso evita a instalação excessiva de equipamentos, e conseqüentemente de custos altos, e garante o atendimento da demanda mínima, condição que valida a solução apesar de não a maximizar.

A demanda pode ser escoada por arcos conectados diretamente à CT, arcos diretos, ou usar uma rota alternativa através de um outro nó de acesso, opção chamada de arco-rota. Em cada nó (*n_nós*), a decisão de qual arco, direto ou arco-rota, irá atendê-lo e qual equipamento será instalado é aleatória. O custo do equipamento escolhido (c_{equip}) é acrescentado à somatória de custos da solução-candidata que está sendo montada.

O pseudocódigo para esta etapa do algoritmo é:

```
Procedimento geração da população inicial
Início
 para ii de 1 até tam_pop faça
  para i de 1 até T faça
   custo[ii][i] ← 0
   para j de 1 até n_nós faça
    sorteia (arco)
    se (arco=arco_rota ou arco=arco_direto) e(cap_arco<dmin)
     sorteia (equip);
     custo[ii][i] ← custo[ii][i]+c_equip;
     para l de t até T faça
```

```
      crom[ii][equip+j][l] ← 1;
    fimSe
   fimPara
  fimPara
 fimPara
Fim
```

Onde:

tam_pop é o tamanho da população, *custo[ii][i]* é o custo total com a instalação de equipamentos no cromossomo *ii*, no período *i*, *crom[ii][equip+j][i]* é o vetor que representa o cromossomo *ii* (igual a 1 se *equip* é instalado no nó *j* do período *i* e igual a zero caso contrário).

Se o *custo[ii][i]* estiver acima do orçamento permitido para o período *i*, uma estratégia de reparação de custos é aplicada ao indivíduo *ii*, a fim de evitar a violação da restrição M2.2-2):

$$\sum_{(i,j)\in A_{ST_t}} \sum_{n\in N_{ST_{ijt}}} \left(\varphi_{ijt}^{X_{eq},n} + \varphi_{ijt}^{X_r,n} \cdot l_{ij}\right) \cdot \left(X_{ijt}^{n} - X_{ij,t-1}^{n}\right) + \sum_{(i,j)\in A_{M_t}} \sum_{p\in C_{M_t}} \left(\varphi_{ijt}^{M_{eq},p} + \varphi_{ijt}^{M_r,p} \cdot l_{ij}\right) \cdot \left(M_{ijt}^{p} - M_{ij,t-1}^{p}\right) \leq \mathrm{L}_t \quad \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \qquad \text{(M2.2-2)}$$

Um procedimento heurístico de reparação valida o custo dos indivíduos que extrapolam o limite de orçamento da expansão da rede. Esses procedimentos combinam regras heurísticas com o processo evolutivo, fazendo com que um indivíduo infactível torne-se factível. Este conjunto de regras pode ser considerado uma busca local pela solução factível mais próxima. A desvantagem desta técnica é, novamente, que a heurística é específica para o problema em questão, não podendo ser aproveitada para a resolução de outros problemas.

Reparação de Custos

Para garantir que o custo com a instalação de equipamentos no período *i* não ultrapasse o orçamento pré-definido L_i, uma heurística de reparação de custos foi elaborada e é aplicada sempre que *custo[ii][i]* > L_i, seja para indivíduos gerados inicialmente ou após *crossover* e

mutação.

O objetivo da reparação é eliminar possíveis excessos de equipamentos em um nó, diminuindo portanto o custo naquele período. A instalação de equipamentos em demasia ocorre quando a capacidade do equipamento já instalado não é capaz de atender a demanda mínima do período seguinte, exigindo a disposição de um outro equipamento no nó. O procedimento de reparação pesquisa a possibilidade de trocar esses dois equipamentos por outro, de capacidade igual ou maior[7].

A pesquisa é realizada de forma decrescente, para todos os períodos do horizonte de planejamento, percorrendo todos os arcos da rede ou até que o *custo[ii][i]* seja válido. O processo de busca verifica se existem dois equipamentos, $equip_1$ e $equip_2$, atendendo a demanda do nó *j*, estejam eles instalados no arco direto, no arco indireto ou um em cada um dos arcos. É preciso salientar que pode haver mais que dois equipamentos instalados, mas apenas dois serão analisados e eventualmente trocados.

No caso de confirmação de duplo atendimento para o nó *j*, $equip_1$ e $equip_2$ são desinstalados e um equipamento de maior modularidade, $equip_3$, é instalado. No caso de não haver muitos equipamentos instalados no período que justifiquem o alto custo da solução, é feita uma troca aleatória de equipamentos num arco escolhido também aleatoriamente. A capacidade do arco e o custo do indivíduo *i* são atualizados.

Não é finalidade do processo de reparação de custos garantir 100% de factibilidade durante a evolução. Se o esforço para validar um indivíduo for muito alto, há o risco da convergência prematura para um mínimo local. A diversidade na população (indivíduos válidos e inválidos) pode contribuir para a geração de boas soluções. O intuito é que o algoritmo seja capaz de partir de soluções iniciais infactíveis e obter soluções factíveis. Por isso, a busca por arcos com excesso de equipamentos é limitada, ou até que o custo daquele período seja factível. A busca por um equipamento cujo custo seja menor que aquele já instalado também é limitada (*n_limite*).

[7] Os equipamentos, em geral, têm preços com economia de escala.

O pseudocódigo para esta etapa do algoritmo é:

```
Procedimento reparação de custos
Início
 para ii de 1 até tam_pop faça
  para i de T até 1 faça
   j=0;
   enquanto (custo[ii][i] > L_i) e (j < n_nós) faça
    j ← j+1;
    busca (equip_1 e equip_2 em arco_direto);
    busca (equip_1 e equip_2 em arco_rota);
    busca (equip_1 em arco_direto e equip_2 em arco_rota);
    busca (equip_1 em arco_rota equip_2 em arco_direto);
    crom[ii][equip_1][i] ← 0;
    crom[ii][equip_2][i] ← 0;
    crom[ii][equip_3][i] ← 1;
    custo[ii][i] ← custo[ii][i]-c_equip1;
    custo[ii][i] ← custo[ii][i]-c_equip2;
    custo[ii][i] ← custo[ii][i]+c_equip3;
   fimEnquanto
   j=0;
   se (custo[ii][i] > L_i e (j < n_arco)) faça
    j ← j+1;
    sorteia (arco);
    busca (equip_1);
    aux=0;
    faça
     aux ← aux+1;
     sorteia (equip_2);
    enquanto (c_equip1 <= c_equip2 e aux <= n_limite)
     crom[ii][equip_1][i] ← 0;
     crom[ii][equip_2][i] ← 1;
     custo[ii][i] ← custo[ii][i]-c_equip1;
     custo[ii][i] ← custo[ii][i]-c_equip2;
    fimEnquanto
   fimSe
  fimPara
 fimPara
Fim
```

3.3.3 Cálculo do Valor de *Fitness*

Após a geração da população inicial, é calculado o valor de *fitness* de cada indivíduo, que é a avaliação de sua adequação ao ambiente.

No AHE, o *fitness* do indivíduo é medido a partir da resolução de um problema linear, resultante da fixação dos valores das variáveis binárias X_{ijt}^{n} e M_{ijt}^{p} determinados pelo algoritmo genético. Ou seja, o problema linear inteiro misto (modelo 2.2) tem os valores das variáveis binárias fornecidos pelo cromossomo em avaliação e é reduzido a um problema linear (modelo 3.1), formado pelas variáveis reais de fluxo.

$$\max \mathrm{R}(Y) = \sum_{t \in T} \sum_{(s,i) \in A_s} r_{sit} \cdot Y_{sit} \qquad \text{(M3.1-1)}$$

sujeito a

$$\sum_{i \in I - I_s} Y_{sit} + Y_{esc_{st}} = d_{st} \quad \forall \mathrm{s} \in \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \qquad \text{(M3.1-2)}$$

$$\sum_{j \in J_1} Y_{ijt} - \sum_{j \in J_2 - I_s} Y_{jit} - \sum_{s \in I_s} \mathrm{fc}_s \cdot Y_{sit} = 0 \quad \forall \mathrm{i} \in \mathrm{I} - \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \qquad \text{(M3.1-3)}$$

$$B_{ijt} \geq Y_{ijt} \quad \forall (\mathrm{i}, \mathrm{j}) \in \mathrm{A_{ST_t}}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \qquad \text{(M3.1-4)}$$

$$C_{ijt} \geq Y_{ijt} \quad \forall (\mathrm{i}, \mathrm{j}) \in \mathrm{A_{M_t}}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \qquad \text{(M3.1-5)}$$

$$Y_{sit} \geq \mathrm{dmin}_{sit} \quad \forall \mathrm{s} \in \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{i} \in \mathrm{I} - \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \qquad \text{(M3.1-6)}$$

$$Y_{sit} \leq \mathrm{dmax}_{sit} \quad \forall \mathrm{s} \in \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{i} \in \mathrm{I} - \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \qquad \text{(M3.1-7)}$$

$$Y_{sit} \geq 0 \quad \forall \mathrm{s} \in \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{i} \in \mathrm{I} - \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \qquad \text{(M3.1-8)}$$

$$Y_{ijt} \geq 0 \quad \forall (\mathrm{i}, \mathrm{j}) \in \mathrm{A_{ST_t}}, \forall (\mathrm{i}, \mathrm{j}) \in \mathrm{A_{M_t}}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \qquad \text{(M3.1-9)}$$

$$Y_{esc_{st}} \geq 0 \quad \forall \mathrm{s} \in \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \qquad \text{(M3.1-10)}$$

MODELO 3.1 – Modelo de programação linear

No modelo 3.1, as constantes B_{ijt} e C_{ijt} representam as constantes de capacidade, simplificadas com a fixação dos valores das variáveis binárias X_{ijt}^{n} e M_{ijt}^{p}.

Soluções-candidatas que não oferecem capacidade suficiente para atender a demanda mínima, em todos os períodos e para todos os arcos, retornam PLs infactíveis, devido à restrição (M3.1-6), e têm seu *fitness* anulado. Para evitar que isso ocorra, tais indivíduos são penalizados e se mantêm na população.

Técnicas que penalizam soluções infactíveis são as mais populares. Essa preferência se dá porque funções de penalidade podem ser aplicadas facilmente ao problema, com poucas modificações no algoritmo de resolução. A desvantagem é que esta técnica exige o controle dos parâmetros de penalidade, que deve acontecer sempre que um novo problema é abordado (DEB, 2000). As funções de penalidade podem ser estáticas, que atuam bem para uma gama maior de problemas (MICHALEWICZ & SCHOENAUER, 1996), ou dinâmicas, onde os parâmetros de penalidade são adaptados dinamicamente no tempo. O AHE usa penalidades estáticas para punir soluções infactíveis.

Para incorporar a função de penalidade ao modelo, é preciso algumas alterações. A restrição (M3.1-6), de exigência de atendimento da demanda mínima, é substituída pela restrição $V_{sit} = Y_{sit} - dmin_{sit}$; quando V_{sit} é negativa, significa a quantidade de demanda que o indivíduo deixou de atender. A função-objetivo artificial, maximizar $R(Y)' = V_{sit}$, penaliza os indivíduos que não atendem a demanda mínima para algum *s*, *i* ou *t*, ou seja, a constante de penalidade é a própria quantidade de demanda que deixou de ser atendida pela solução.

Quando uma solução válida é encontrada, ou seja, quando $V_{sit} \geq 0$ para $\forall$ *s, i* e *t*, o valor real da receita gerada é calculado, através da equação da função-objetivo original (M3.1-1), e guardado para comparações de resultado ao final da evolução.

A resolução dos PLs, um para cada indivíduo da população, é feita por métodos exatos, usando por exemplo o pacote de otimização CPLEX®. Cada PL tem a seguinte forma:

$$\max R'(Y) = \sum_{t \in T} \sum_{(s,i) \in A_s} V_{sit} \qquad \text{(M3.2-1)}$$

sujeito a

$$\sum_{i \in I - I_s} Y_{sit} + Y_{esc_{st}} = d_{st} \quad \forall s \in I_s, \forall t \in T \qquad \text{(M3.2-2)}$$

$$\sum_{j \in J_1} Y_{ijt} - \sum_{j \in J_2 - I_s} Y_{jit} - \sum_{s \in I_s} fc_s \cdot Y_{sit} = 0 \quad \forall i \in I - I_s, \forall t \in T \qquad \text{(M3.2-3)}$$

$$B_{ijt} \geq Y_{ijt} \quad \forall (i,j) \in A_{ST_t}, \forall t \in T \qquad \text{(M3.2-4)}$$

$$C_{ijt} \geq Y_{ijt} \quad \forall (i,j) \in A_{M_t}, \forall t \in T \qquad \text{(M3.2-5)}$$

$$V_{sit} = Y_{sit} - \text{dmin}_{sit} \quad \forall s \in I_s, \forall i \in I - I_s, \forall t \in T \qquad \text{(M3.2-6)}$$

$$Y_{sit} \leq \text{dmax}_{sit} \quad \forall s \in I_s, \forall i \in I - I_s, \forall t \in T \qquad \text{(M3.2-7)}$$

$$Y_{sit} \geq 0 \quad \forall s \in I_s, \forall i \in I - I_s, \forall t \in T \qquad \text{(M3.2-8)}$$

$$Y_{ijt} \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A_{ST_t}, \forall (i, j) \in A_{M_t}, \forall t \in T \qquad \text{(M3.2-9)}$$

$$Y_{esc_{st}} \geq 0 \quad \forall s \in I_s, \forall t \in T \qquad \text{(M3.2-10)}$$

$$V_{sit} \quad \textit{irrestrita} \quad \forall s \in I_s, \forall i \in I - I_s, \forall t \in T \qquad \text{(M3.2-11)}$$

MODELO 3.2 – Modelo de programação linear para o cálculo de *fitness*.

3.3.4 Reprodução

A seguir, os indivíduos são cruzados entre si para gerar a população seguinte. Uma seleção de pares, aleatória ou baseada em *Roulette Wheel*, escolhe as duplas de indivíduos para reprodução.

O AHE pode recombinar os indivíduos através do *crossover* de um ponto. É preciso, entretanto, considerar que equipamentos instalados em um determinado período no cromossomo-pai podem não ser os mesmos que os equipamentos instalados no cromossomo-mãe. Para cromossomos sem uma estrutura especial esse cruzamento fatalmente resultaria em filhos com supressão de equipamentos, ou seja, equipamentos instalados num período estariam desinstalados nos períodos subseqüentes.

A estrutura adotada para codificar as soluções nos cromossomos (em blocos, para cada período) permite que o ponto de corte do *crossover* seja sempre o mesmo para todos os períodos. Conseqüentemente, os equipamentos instalados na fração de cada período do cromossomo-pai serão os mesmos nos cromossomos-filho, evitando a supressão de equipamentos (ESCOBAR, GALLEGO e ROMERO, 2004). Além disso, o corte só é permitido entre os arcos (e nunca no meio deles); essa medida evita a instalação em excesso (ou em falta) de equipamentos (figura 3.8).

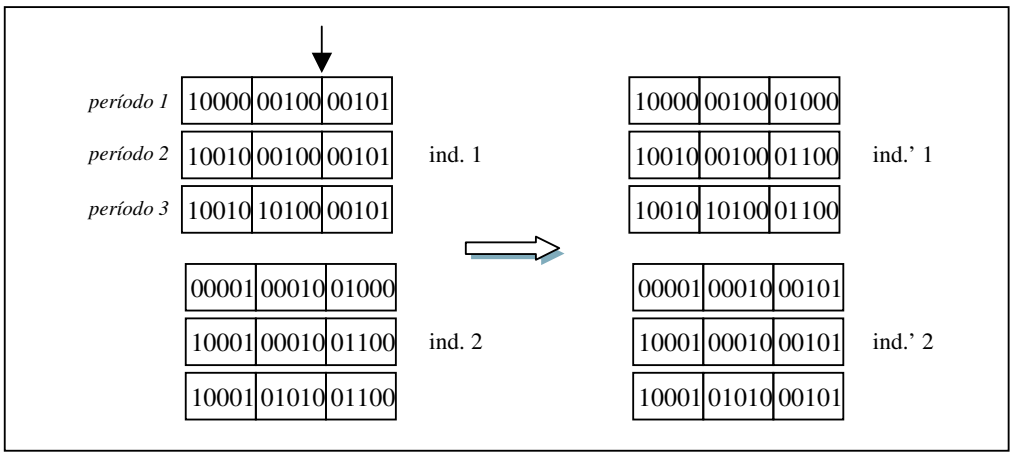


FIGURA 3.8 – Ponto de *crossover*.

Outra possibilidade de cruzamento é o *crossover* uniforme. Nele, um arco é sorteado com taxa p_c, e o equipamento instalado no cromossomo-pai é trocado pelo equipamento correspondente do cromossomo-mãe. A troca acontece para os arcos de todos os períodos, evitando a eliminação de equipamentos posteriormente.

Todo o indivíduo reproduzido tem a chance, com probabilidade p_m, de ser mudado geneticamente. A mutação é um fator de adição de diversidade, porém interferir em demasia na qualidade desta população pode fazer com que todo o esforço da busca seja perdido; p_m não deve ser muito alto. A estratégia de mutação adotada escolhe aleatoriamente dois arcos distintos da rede e suas seqüências de bits são trocadas, para todos os períodos (figura 3.9).

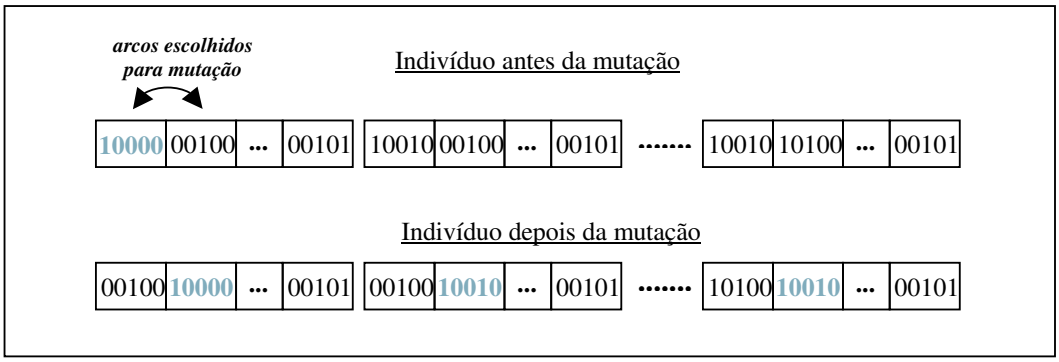


FIGURA 3.9 – Mutação entre arcos.

Da mesma maneira que a geração da população inicial tenta evitar arcos com capacidade abaixo do necessário para o atendimento da demanda mínima, é preciso impedir a ausência de equipamentos nos arcos em indivíduos gerados via operadores genéticos. Descendentes com arcos sem nenhum equipamento instalado são produtos do cruzamento de indivíduos que atendiam um determinado nó *i* por arcos distintos, como o exemplo da figura 3.10.

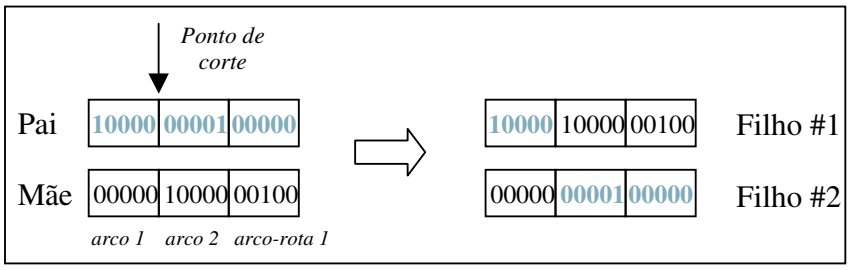


FIGURA 3.10 – Ausência de equipamentos no arco 1 de filho 2.

A ação para impedir a ausência de equipamentos num arco investiga, para todos os períodos e em todos os nós, se há ao menos um equipamento instalado (a escassez de capacidade é abordada pela penalidade da função de fitness). Caso não haja, um arco e um equipamento são sorteados, e o custo do cromossomo é atualizado.

A reprodução genética entre genitores factíveis não garante filhos factíveis. Assim como os indivíduos gerados inicialmente, os novos indivíduos gerados após *crossover* e mutação também têm seus custos reparados. A medida para reparar os custos dos indivíduos pós-reprodução é a mesma que a apresentada anteriormente.

3.3.5 Seleção da Nova População

Finalmente, depois de outra vez avaliados, os indivíduos da população expandida (formada pela população corrente e pelos novos indivíduos gerados via os operadores genéticos) são selecionados para a próxima geração. A seleção da nova população pode ser aleatória ou escolhida segundo o *fitness* de cada indivíduo, com *Roulette Wheel*.

A figura 3.11 apresenta o fluxograma mais detalhado para o Algoritmo Híbrido Evolutivo.

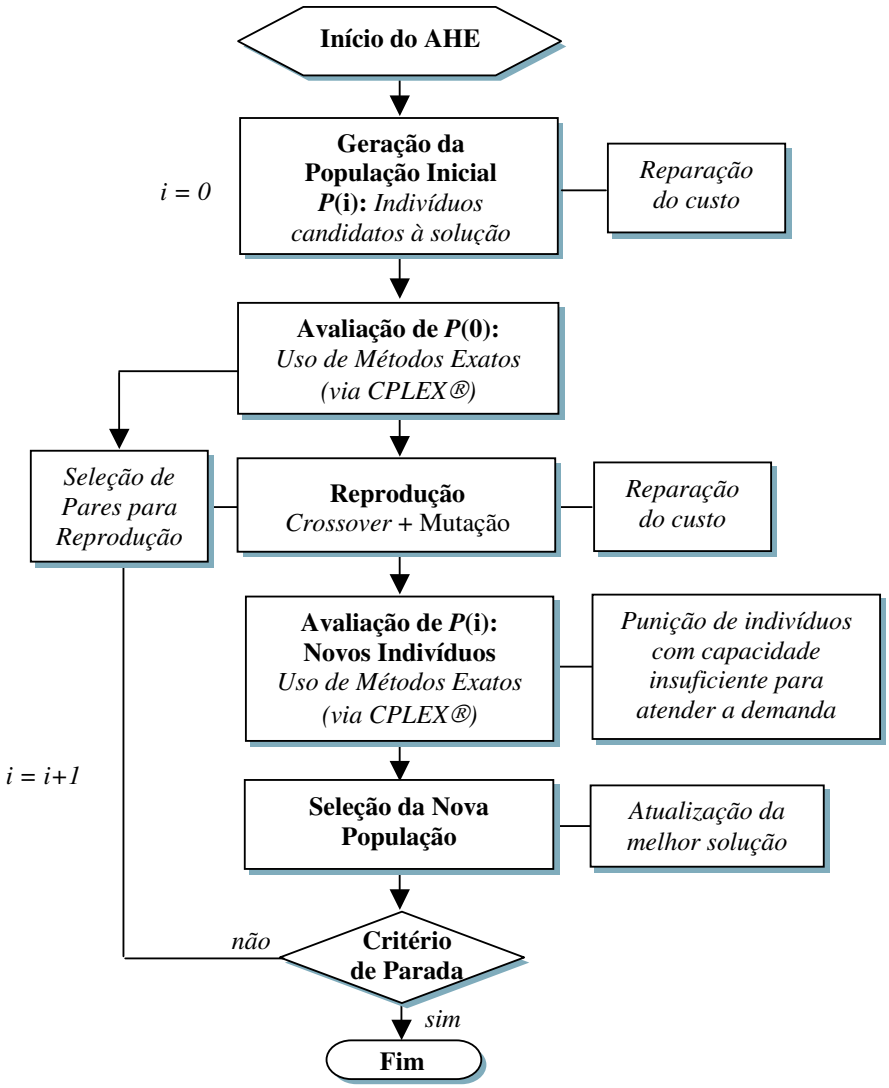


FIGURA 3.11 – Fluxograma do Algoritmo Híbrido Evolutivo.

Decompor o problema em partes inteira e real, e usar um método de resolução capaz de lidar facilmente com a explosão combinatorial das variáveis de decisão binárias é, sem dúvida, o grande mérito do AHE. A combinação de métodos exatos e evolutivos para resolver o PLIM acabou por reduzir significantemente a complexidade do Algoritmo Híbrido Evolutivo; a complexidade do AHE se restringe basicamente à resolução de PL's pelo CPLEX® (operação que leva apenas frações de centenas de segundo). Além disso, as regras antiviolação já incorporadas ao método são capazes de impedir outras violações. Para usar a penalidade em outras possíveis restrições do PLIM, por exemplo, basta incorporar as informações pertinentes à nova função de *fitness*.

Capítulo 4

APLICAÇÕES

4.1 Introdução

Este capítulo apresenta e discute os resultados computacionais provenientes da aplicação do método de resolução AHE para diversos cenários de expansão de uma rede de acesso. As situações consideradas para a expansão da rede basearam-se em aspirações das empresas operadoras e do mercado, como por exemplo, pretensão de maior receita em condições de orçamento limitado, concorrência entre tecnologias de acesso em porções de redes com ou sem infra-estrutura instalada e crescimento na demanda por serviços de banda-larga.

Os dados e a topologia da rede estudada foram definidos a partir de análises de relatórios e pesquisas de domínio público (ANATEL e EMBRATEL), de conversas informais com profissionais da área de telecomunicações e de outros trabalhos do grupo de telecomunicações do Departamento de Engenharia de Sistemas – DENSIS, da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC) da UNICAMP (MACHADO, 1997), (MACHADO, 2003), (CARLSON & AUTHIÉ, 2001), (BERGAMASCHI, 2001), (DESOUSA et al., 2001a) e (BASSETO et al., 2000).

4.2 Considerações

A elaboração de estratégias de planejamento para avaliar o desempenho do método AHE envolve a definição de alguns itens importantes. Inicialmente, deve-se definir o horizonte de planejamento, que pode ser de curto ou longo prazo. Um planejamento de curto prazo, mono-período, tem como propósito planejar um atendimento imediato de demanda reprimida, ou ainda prever uma situação futura de uma determinada região da rede (MACHADO, 2003) e (DESOUSA, 2003). O planejamento multi-período, que é o foco desta

tese, deve ajudar as empresas operadoras a estruturarem o futuro e a gerenciarem as mudanças necessárias para a evolução do sistema, determinando onde, quando e quanto investir. Este planejamento pode ser executado em um único estágio, evitando-se tomar decisões precoce ou tardiamente. Esse processo, entretanto, pode ser implementado em estágios, onde cada estágio "alimenta" o estágio seguinte, processo conhecido como horizonte rolante: o planejamento é feito no horizonte *T*, mas apenas a primeira decisão é implementada; um novo horizonte *T* é planejado, com informações atualizadas de demanda, preços, etc.

Devido ao dinamismo do setor de telecomunicações, o horizonte para planejamentos de redes de acesso não deve ser longo para não comprometer os dados de entrada, como previsões de demandas e serviços, preços, custos e escolha de tecnologias. O horizonte de planejamento adotado nos testes exibidos neste capítulo é de 5 anos.

A definição dos serviços deve considerar a Qualidade do Serviço (QoS) exigida, a aceitação do serviço (taxa de penetração) na área em estudo e a sua receita (anual ou mensal) estimada. Essas informações variam ao longo do tempo e devem ser acompanhadas pelo processo de planejamento. No caso das projeções de demanda, por exemplo, há ainda algumas regiões com altos índices de demanda reprimida para o serviço de voz, tanto na telefonia fixa quanto na móvel; quanto às projeções de tarifa, existe uma tendência de queda destes valores em função de um ambiente de maior concorrência e maturidade tecnológica. Todas as situações de planejamento estudadas consideram dois tipos de serviços, um de voz e outro de banda larga, para *Internet* por exemplo.

A área de atendimento que define uma rede de acesso é aquela delineada por uma central de comutação (CC). A rede pode ser representada por um grafo, composto por arcos e nós. Cada trecho da rede (arco do grafo) representa as conexões físicas entre os nós e possui como atributos, por exemplo, quantidade de pares metálicos e dutos disponíveis. Os nós de rede podem ser:

- Nó de CC: corresponde ao prédio onde está localizada a central (ou centrais) de comutação – CT no STFC, CCC no SMC ou POP (provedores de *Internet*/comunicação multimídia);

- Nó de Acesso: é um ponto intermediário entre a CC e o usuário (por exemplo, armário de distribuição no STFC e ERB no SMC), onde estão localizados alguns equipamentos ativos da rede;

- Nó de Usuário: é um ponto terminal no sistema, onde se localiza (ou se encontra) o assinante.

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

A escolha das soluções tecnológicas de acesso que serão consideradas no estudo só é possível após a definição do cardápio de serviços a ser oferecido e do tipo de rede a ser dimensionada. Eleger soluções tecnológicas implica, entre outras coisas, em saber quais são os dispositivos de rede (equipamentos, cabos, infra-estrutura, etc.) a serem considerados para efeito de planejamento e como eles são dimensionados nos nós da rede (nós de controle, de acesso e de usuário); é preciso também estimar o custo de cada dispositivo considerado, para todos os períodos de planejamento.

A atualização dos dados é um fator importante para o estudo de casos em planejamento de redes. Os dados necessários para realização de um estudo de caso são divididos em duas classes: os dados gerais de planejamento, que não possuem relação com a rede a ser estudada, e os dados de rede propriamente ditos. Os dados gerais de planejamento mais relevantes são:

- Dados de custo e dimensionamento dos equipamentos;

- Dados de custo (por unidade de comprimento) dos cabos, tanto metálicos como de fibras ópticas;

- Dados de infra-estrutura como canalização de dutos (por unidade de comprimento) e sub-dutos e ampliação no centro de fios (obras civis).

Quando o planejamento é multi-período deve-se considerar a evolução dos custos dos elementos de rede (equipamentos, cabos e infra-estrutura) que, ao longo do tempo, tendem a ficar mais baratos.

Os principais dados de rede a serem levantados pelo planejador são:

- 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;

- Quantidade de pares metálicos disponíveis em cada arco;

- Quantidade de fibras disponíveis em cada arco;

- Demanda concentrada em cada nó de acesso, para cada serviço considerado e para cada período de planejamento;

- Localização da CC e dos nós de acesso.

No panorama atual, onde as empresas enfrentam grandes concorrências, é esperado que os objetivos frisados pelos planejadores sejam conflitantes. Por isso é de extrema importância que o planejamento da rede seja realizado de forma otimizada, utilizando-se modelos matemáticos. Os critérios de otimização[8] mais significativos e prováveis de serem adotados pela empresas operadoras são maximizar a receita respeitando um limite orçamentário,

[8] Os critérios de otimização estão descritos detalhadamente no capítulo 2.

maximizar a receita a um custo mínimo, maximizar o lucro, atender toda a demanda prevista a um custo mínimo, etc.

Um estudo de caso pode ser composto por vários cenários. Um cenário pode planejar a expansão de uma determinada área de atendimento, já em funcionamento, ou pode planejar a implantação de uma área totalmente nova, chamada situação "*green field*". Além disso, o cenário pode utilizar uma ou mais soluções tecnológicas, que irão concorrer entre si para a implantação e expansão da rede de acesso. A diversidade de simulações ajuda os planejadores a visualizarem melhor a situação da rede.

A metodologia adotada neste trabalho é aplicável tanto para o planejamento das redes de acesso de serviços de telecomunicações fixos quanto móveis, devido à sua similaridade do ponto de vista dos modelos matemáticos correspondentes.

4.3 Apresentação dos Cenários

A diversidade dos cenários simulados é importante para analisar como a rede se comporta em situações de confronto. Neste trabalho foram analisadas duas situações econômicas distintas para três cenários de competição tecnológica em áreas de atendimento com e sem infra-estrutura. As tecnologias de acesso consideradas em todos os casos são as mesmas: *modems* ADSL, *modems* ópticos e enlaces rádio microondas ponto-multi-ponto.

As situações econômicas consideradas estão relacionadas com o orçamento disponível para investimento em expansão e implantação das áreas de atendimento:

A. Cada período tem um limite orçamentário fixo e pré-determinado para a expansão e implantação de novas áreas de atendimento. Esse orçamento deve ser no mínimo suficiente para atender a demanda mínima exigida por metas impostas pela agência reguladora do setor.

B. O orçamento para cada período é flexível, uma vez que empréstimos bancários são permitidos. O modelo matemático ajuda a decidir se é mais vantajoso usar apenas o orçamento pré-definido (e, eventualmente, deixar de atender alguma demanda, reduzindo a receita) ou se compensa recorrer a estabelecimentos de crédito, pagando juros pelo empréstimo, mas lucrando com o atendimento adiantado de demanda reprimida.

Cada uma das situações acima permite 3 cenários de competição tecnológica:

Cenário 1 A área de atendimento deve ser totalmente implantada, ou seja, a infra-estrutura de cabos e dutos ainda não existe para nenhuma tecnologia (seja ela baseada em pares de cobre ou fibras ópticas) ou nó da rede. Nesta situação "*green field*", as tecnologias de acesso competem entre si e é preciso investir em cabos, dutos e equipamentos de transmissão, nos nós de acesso e em pontos próximos aos assinantes (como poste ou armário, por exemplo).

Cenário 2 A área de atendimento já é cabeada por pares de fios metálicos e deve ser ampliada. Para a tecnologia baseada em pares metálicos deve-se investir somente em equipamentos. Para a tecnologia óptica, por exemplo, é preciso implantar a infra-estrutura e os equipamentos e para a tecnologia sem fio, apenas em equipamentos. A vantagem para as duas últimas manterem-se na concorrência pode ser ganho de escala nos equipamentos, por exemplo.

Cenário 3 A área de atendimento é totalmente estruturada, com cabos e dutos já instalados. A competição envolve apenas os custos com equipamentos e questões técnicas.

Os modelos matemáticos multi-período que representam as situações de planejamento A e B são apresentados a seguir. Os diferentes cenários não interferem nos modelos. O que muda são os dados de entrada: quando a infra-estrutura já está disponível, seu custo é igual

a zero. Os modelos matemáticos são baseados no modelo M2.2; as variáveis *X*, *Z* e *W* representam, respectivamente, as tecnologias candidatas ADSL, óptica e rádio microondas.

Modelo matemático para a situação econômica A

O modelo matemático que representa a situação de planejamento econômico A é:

$$\max \mathrm{R}(Y) = \sum_{t \in T} \alpha_t \sum_{(s,i) \in A_s} r_{sit} \cdot Y_{sit} \tag{M4.1-1}$$

sujeito a:

$$\begin{aligned} &\sum_{(i,j) \in A_{X_t}} \sum_{n \in N_{X_{ijt}}} \left(\varphi_{ijt}^{X_{eq},n} + \varphi_{ijt}^{X_r,n} \cdot l_{ij} \right) \cdot \left(X_{ijt}^{n} - X_{ij,t-1}^{n} \right) + \\ &\sum_{(i,j) \in A_{Z_t}} \sum_{p \in C_{Z_t}} \left(\varphi_{ijt}^{Z_{eq},p} + \varphi_{ijt}^{Z_r,p} \cdot l_{ij} \right) \cdot \left(Z_{ijt}^{p} - Z_{ij,t-1}^{p} \right) + \\ &\sum_{(i,j) \in A_{W_t}} \sum_{m \in C_{W_t}} \left(\varphi_{ijt}^{W_{eq},m} + \varphi_{ijt}^{W_r,m} \cdot l_{ij} \right) \cdot \left(W_{ijt}^{m} - W_{ij,t-1}^{m} \right) \le \mathrm{L}_t \quad \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \end{aligned} \tag{M4.1-2}$$

$$\sum_{i \in I - I_s} Y_{sit} + Y_{esc_{st}} = d_{st} \quad \forall \mathrm{s} \in \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \tag{M4.1-3}$$

$$\sum_{j \in J_1} Y_{ijt} - \sum_{j \in J_2 - I_s} Y_{jit} - \sum_{s \in I_s} \mathrm{fc}_s \cdot Y_{sit} = 0 \quad \forall \mathrm{i} \in \mathrm{I} - \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \tag{M4.1-4}$$

$$\begin{aligned} &\sum_{n \in N_{X_{ijt}}} \mathrm{cap}_n^X \cdot X_{ijt}^{n} + \sum_{p \in C_{Z_t}} \mathrm{cap}_p^Z \cdot Z_{ijt}^{p} + \sum_{m \in C_{W_t}} \mathrm{cap}_m^W \cdot W_{ijt}^{m} \ge Y_{ijt}, \\ &\qquad \forall (\mathrm{i,j}) \in \mathrm{A_{X_t}}, \forall (\mathrm{i,j}) \in \mathrm{A_{Z_t}}, \forall (\mathrm{i,j}) \in \mathrm{A_{W_t}} \, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \end{aligned} \tag{M4.1-5}$$

$$Y_{sit} \ge \mathrm{dmin}_{sit} \quad \forall \mathrm{s} \in \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{i} \in \mathrm{I} - \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \tag{M4.1-6}$$

$$Y_{sit} \le \mathrm{dmax}_{sit} \quad \forall \mathrm{s} \in \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{i} \in \mathrm{I} - \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \tag{M4.1-7}$$

$$\left(X_{ijt}^{n} - X_{ij,t-1}^{n} \right) \ge 0 \quad \forall (\mathrm{i,j}) \in \mathrm{A_{X_t}}, \forall \mathrm{n} \in \mathrm{N_{X_{ijt}}}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \tag{M4.1-8}$$

$$\left(Z_{ijt}^{p} - Z_{ij,t-1}^{p} \right) \ge 0 \quad \forall (\mathrm{i,j}) \in \mathrm{A_{Z_t}}, \forall \mathrm{p} \in \mathrm{C_{Z_t}}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \tag{M4.1-9}$$

$$\left(W_{ijt}^{m} - W_{ij,t-1}^{m} \right) \ge 0 \quad \forall (\mathrm{i,j}) \in \mathrm{A_{W_t}}, \forall \mathrm{m} \in \mathrm{C_{W_t}}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \tag{M4.1-10}$$

$$X_{ijt}^{n} = 0, \ \forall \mathrm{l_{ij}} > \mathrm{l_{max}} \quad \forall \mathrm{n} \in \mathrm{N_{X_{ijt}}} \quad \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \tag{M4.1-11}$$

$$Y_{sit} \geq 0 \quad \forall s \in I_s, \forall i \in I - I_s, \forall t \in T \tag{M4.1-12}$$

$$Y_{ijt} \geq 0 \quad \forall (i,j) \in A_{X_t}, \ \forall (i,j) \in A_{Z_t}, \forall (i,j) \in A_{W_t}, \forall t \in T \tag{M4.1-13}$$

$$Y_{esc_{st}} \geq 0 \quad \forall s \in I_s, \forall t \in T \tag{M4.1-14}$$

$$X_{ijt}^{n} = 0 \text{ ou } 1, \ \forall (i,j) \in A_{X_t}, \forall n \in N_{X_{ijt}}, \forall t \in T \tag{M4.1-15}$$

$$Z_{ijt}^{p} = 0 \text{ ou } 1, \quad \forall (i,j) \in A_{Z_t}, \forall p \in C_{Z_t}, \forall t \in T \tag{M4.1-16}$$

$$W_{ijt}^{m} = 0 \text{ ou } 1, \ \forall (i,j) \in A_{W_t}, \forall m \in C_{W_t}, \forall t \in T \tag{M4.1-17}$$

MODELO 4.1 – Modelo de planejamento multi-período com orçamento fixo.

Onde:

Y_{sit} → variável real não-negativa associada ao fluxo de demanda escoado pelo arco $(s,i) \in A_S$ no período $t \in T$;

r_{sit} → receita unitária do serviço *s* oferecido ao nó de acesso *i*, no período $t \in T$;

A_s → conjunto dos arcos de escoamento que conectam os nós artificiais de serviço aos nós de acesso;

T → conjunto dos períodos de planejamento;

α_t → multiplicador econômico referente ao período *t* para o cálculo do VPL;

X_{ijt}^{n} → variável binária não-negativa associada à escolha de *modems* ADSL, de modularidade *n*, candidatos no arco $(i, j) \in A_{X_t}$, no período $t \in T$;

$\varphi_{ijt}^{X_{eq,n}}$ → custo de *modems* ADSL, de modularidade *n,* candidatos no arco $(i, j) \in A_{X_t}$, no período $t \in T$;

$\varphi_{ijt}^{X_{r,n}}$ → custo (por unidade de comprimento) associado à infra-estrutura (cabos e dutos) da solução tecnológica ADSL, de modularidade *n*, candidata no arco $(i, j) \in A_{X_t}$, no período $t \in T$;

l_{ij} → Comprimento do arco (i, j);

$N_{X_{ijt}}$ → conjunto de modularidades dos *modems* ADSL candidatos no arco $(i, j) \in A_{X_t}$, no período $t \in$ T;

A_{X_t} → conjunto de arcos do grafo que podem receber *modems* ADSL como candidatos no período $t \in$ T;

Z_{ijt}^{p} → variável binária não-negativa associada à escolha de *modems* ópticos, de modularidade *p*, candidatos no arco (i, j) $\in A_{Z_t}$ no período $t \in$ T;

$\varphi_{ijt}^{Z_{eq,p}}$ → custo de *modems* ópticos, de modularidade *p,* candidatos no arco $(i, j) \in A_{Z_t}$ no período $t \in$ T;

$\varphi_{ijt}^{Z_{r,p}}$ → custo (por unidade de comprimento) associado à infra-estrutura (cabos e dutos) da solução óptica, de modularidade *p*, candidata no arco $(i, j) \in A_{Z_t}$, no período $t \in$ T;

C_{Z_t} → conjunto de modularidades dos *modems* ópticos candidatos no arco $(i, j) \in A_{Z_t}$ no período $t \in$ T;

A_{Z_t} → conjunto de arcos que podem receber *modems* ópticos como candidatos no período $t \in$ T;

W_{ijt}^{m} → variável binária não-negativa associada à escolha de sistemas rádio microondas, de modularidade *m*, candidatos no arco (i, j) $\in A_{W_t}$, no período $t \in$ T;

$\varphi_{ijt}^{W_{eq,m}}$ → custo do sistema rádio microondas (equipamentos), de modularidade *m*, candidato no arco (i, j) $\in A_{W_t}$, no período $t \in$ T;

$\varphi_{ijt}^{W_{r,m}}$ → custo do sistema rádio microondas (repetidores e amplificadores), de modularidade *m*, candidato no arco (i, j) $\in A_{W_t}$, no período $t \in$ T;

C_{W_t} → conjunto de modularidades do sistema rádio microondas candidato no arco $(i, j) \in A_{W_t}$ no período $t \in$ T;

A_{W_t} → conjunto de arcos que podem receber o sistema rádio microondas como candidato no período $t \in$ T;

$Y_{esc_{st}}$ → variável real não-negativa associada à demanda não atendida do serviço s (fluxo escoado através de um Arco de Escape) no período $t \in$ T;

d_{st} → demanda do serviço s, oferecida ao nó artificial de serviço $s \in I_s$, no período $t \in$ T;

I → conjunto de todos os nós do grafo, exceto o nó de estação telefônica;

I_S → conjunto dos nós artificiais de serviço;

Y_{ijt} → variável real não-negativa associada ao fluxo de demanda escoado pelo arco $(i,j) \in$ A, no período $t \in$ T;

A → conjunto de arcos conectando nós ponto-a-ponto ou nós ponto-CT;

fc_s → fator de conversão da taxa de transmissão do serviço s;

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

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

cap_n^X → capacidade do sistema de *modems* ADSL, de modularidade n;

cap_p^Z → capacidade do sistema de *modems* ópticos, de modularidade p;

cap_m^W → capacidade do sistema rádio microondas, de modularidade m;

$dmin_{sit}$ → demanda mínima exigida, do serviço s para o nó de acesso i, em $t \in$ T;

$dmax_{sit}$ → demanda máxima estimada, do serviço s para o nó de acesso i, em $t \in$ T;

l_{max} → comprimento máximo permitido para um enlace ADSL.

Modelo matemático para a situação econômica B

A situação econômica B exige mudanças na função-objetivo e na restrição M4.1-2 do modelo 4.1. O modelo matemático que representa a situação de planejamento econômico B é:

$$\max \mathrm{R}(Y) = \sum_{t \in T} \alpha_t \sum_{(s,i) \in A_s} r_{sit} \cdot Y_{sit} - \sum_{t=1}^{T-1} \beta_t \cdot V_t \qquad \text{(M4.2-1)}$$

sujeito a:

$$\sum_{(i,j) \in A_{X_t}} \sum_{n \in N_{X_{ijt}}} \left(\varphi_{ijt}^{X_{eq},n} + \varphi_{ijt}^{X_r,n} \cdot l_{ij} \right) \cdot \left(X_{ijt}^{n} - X_{ij,t-1}^{n} \right) +$$

$$\sum_{(i,j) \in A_{Z_t}} \sum_{p \in C_{Z_t}} \left(\varphi_{ijt}^{Z_{eq},p} + \varphi_{ijt}^{Z_r,p} \cdot l_{ij} \right) \cdot \left(Z_{ijt}^{p} - Z_{ij,t-1}^{p} \right) + \qquad \text{(M4.2-2)}$$

$$\sum_{(i,j) \in A_{W_t}} \sum_{m \in C_{W_t}} \left(\varphi_{ijt}^{W_{eq},m} + \varphi_{ijt}^{W_r,m} \cdot l_{ij} \right) \cdot \left(W_{ijt}^{m} - W_{ij,t-1}^{m} \right) \leq \mathrm{L}_t + V_t \quad \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T}$$

$$\sum_{i \in I - I_s} Y_{sit} + Y_{esc_{st}} = d_{st} \quad \forall \mathrm{s} \in \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \qquad \text{(M4.2-3)}$$

$$\sum_{j \in J_1} Y_{ijt} - \sum_{j \in J_2 - I_s} Y_{jit} - \sum_{s \in I_s} \mathrm{fc}_s \cdot Y_{sit} = 0 \quad \forall \mathrm{i} \in \mathrm{I} - \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \qquad \text{(M4.2-4)}$$

$$\sum_{n \in N_{X_{ijt}}} \mathrm{cap}_n^X \cdot X_{ijt}^{n} + \sum_{p \in C_{Z_t}} \mathrm{cap}_p^Z \cdot Z_{ijt}^{p} + \sum_{m \in C_{W_t}} \mathrm{cap}_m^W \cdot W_{ijt}^{m} \geq Y_{ijt}, \qquad \text{(M4.2-5)}$$

$$\forall (\mathrm{i,j}) \in \mathrm{A_{X_t}}, \forall (\mathrm{i,j}) \in \mathrm{A_{Z_t}}, \forall (\mathrm{i,j}) \in \mathrm{A_{W_t}} \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T}$$

$$Y_{sit} \geq \mathrm{dmin}_{sit} \quad \forall \mathrm{s} \in \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{i} \in \mathrm{I} - \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \qquad \text{(M4.2-6)}$$

$$Y_{sit} \leq \mathrm{dmax}_{sit} \quad \forall \mathrm{s} \in \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{i} \in \mathrm{I} - \mathrm{I_s}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \qquad \text{(M4.2-7)}$$

$$\left(X_{ijt}^{n} - X_{ij,t-1}^{n} \right) \geq 0 \quad \forall (\mathrm{i,j}) \in \mathrm{A_{X_t}}, \forall \mathrm{n} \in \mathrm{N_{X_{ijt}}}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \qquad \text{(M4.2-8)}$$

$$\left(Z_{ijt}^{p} - Z_{ij,t-1}^{p} \right) \geq 0 \quad \forall (\mathrm{i,j}) \in \mathrm{A_{Z_t}}, \forall \mathrm{p} \in \mathrm{C_{Z_t}}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \qquad \text{(M4.2-9)}$$

$$\left(W_{ijt}^{m} - W_{ij,t-1}^{m} \right) \geq 0 \quad \forall (\mathrm{i,j}) \in \mathrm{A_{W_t}}, \forall \mathrm{m} \in \mathrm{C_{W_t}}, \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \qquad \text{(M4.2-10)}$$

$$X_{ijt}^{n} = 0, \ \forall \mathrm{l_{ij}} > \mathrm{l_{max}} \ \forall \mathrm{n} \in \mathrm{N_{X_{ijt}}} \quad \forall \mathrm{t} \in \mathrm{T} \qquad \text{(M4.2-11)}$$

$$Y_{sit} \geq 0 \quad \forall s \in I_s, \forall i \in I - I_s, \forall t \in T \tag{M4.2-12}$$

$$Y_{ijt} \geq 0 \quad \forall (i,j) \in A_{X_t}, \ \forall (i,j) \in A_{Z_t}, \forall (i,j) \in A_{W_t}, \forall t \in T \tag{M4.2-13}$$

$$Y_{esc_{st}} \geq 0 \quad \forall s \in I_s, \forall t \in T \tag{M4.2-14}$$

$$X_{ijt}^{n} = 0 \text{ ou } 1, \quad \forall (i,j) \in A_{X_t}, \forall n \in N_{X_{ijt}}, \forall t \in T \tag{M4.2-15}$$

$$Z_{ijt}^{p} = 0 \text{ ou } 1, \quad \forall (i,j) \in A_{Z_t}, \forall p \in C_{Z_t}, \forall t \in T \tag{M4.2-16}$$

$$W_{ijt}^{m} = 0 \text{ ou } 1, \quad \forall (i,j) \in A_{W_t}, \forall m \in C_{W_t}, \forall t \in T \tag{M4.2-17}$$

$$V_t \geq 0 \quad \forall t \in T \tag{M4.2-18}$$

MODELO 4.2 – Modelo de planejamento multi-período com orçamento variável.

Onde:

β_t → taxa de juros referente ao empréstimo feito no período $t \in T$;

V_t → variável real não-negativa associada ao valor do empréstimo (em unidade monetária) realizado durante período $t \in T$.

As demais constantes e variáveis do modelo 4.2 são iguais àquelas descritas para o modelo 4.1.

4.4 Dados Gerais de Planejamento e de Rede

Sobre a rede de acesso

A rede de acesso[9] hipotética usada nos estudos de caso, e ilustrada na figura 4.1, é composta por uma central telefônica (CT), 17 nós de acesso e 29 arcos de conexão candidatos. A demanda em cada nó pode ser atendida por arcos diretos (17 arcos nó de acesso-CT, numerados de 1 a 17) e/ou utilizar rotas alternativas (12 arcos nó-nó, numerados de 18 a 29). A área de estação onde encontra-se a CT atende um bairro residencial com baixa atividade comercial.

[9] Para simplificação de nomenclatura, a sub-rede primária (figura 1.4) será chamada de **rede de acesso**.

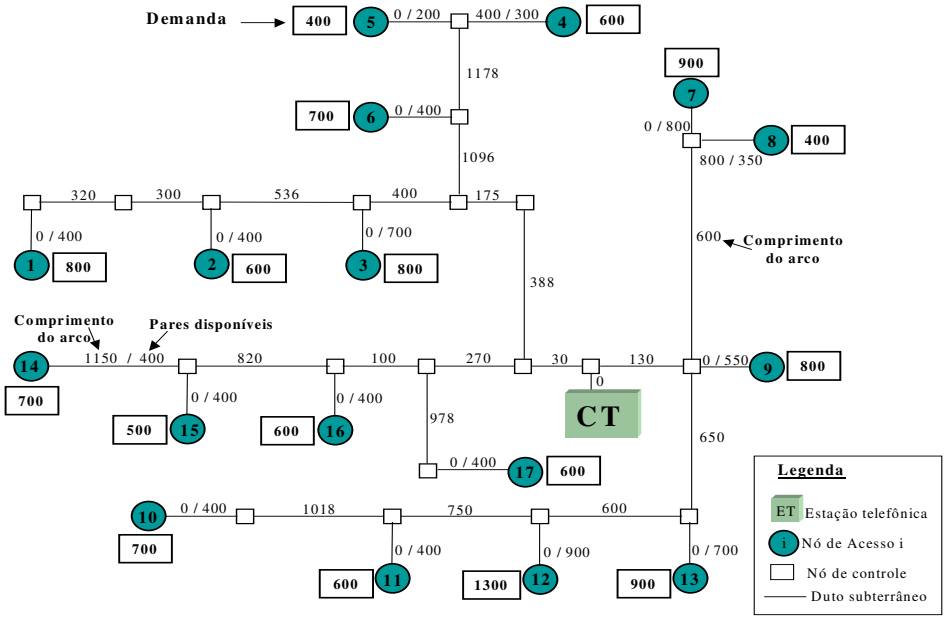


FIGURA 4.1 – Rede analisada.

Sobre as soluções tecnológicas de acesso

Três soluções tecnológicas de acesso são consideradas como candidatas para a capacitação da rede de acesso:

- Tecnologia de acesso baseada em cabos metálicos que utiliza *modems* ADSL para transmitir altas taxas de transmissão;
- Tecnologia óptica baseada em fibras ópticas;
- Tecnologia sem fio via enlaces de rádio microondas.

A tabela 4.1 lista as capacidades (em canais[10] E1) e os custos de equipamentos e infra-estrutura para cada tecnologia candidata no período 1. O custo do *modem* ADSL é adotado como referência (valor 1,00); o custo dos equipamentos corresponde às duas pontas do enlace.

[10] Especificação de capacidade mais praticada entre os fabricantes de equipamentos. E1 equivale a uma taxa de transmissão de 2 Mbps.

TABELA 4.1 – Informações sobre as tecnologias candidatas.

Equipamentos Candidatos	Custos								
	Capacidade de Transmissão (em canais E1)							Infra-estrutura (*km*)	
	16 tipo 1	32 tipo 2	64 tipo 3	128 tipo 4	256 tipo 5	512 tipo 6	1024 tipo 7	**Dutos**	**Cabos**
A – ADSL	1,00	2,00	4,00	8,00	16,00	32,00	64,00	7,00	3,80
OP – Óptico	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,60	4,30	7,00	4,30
R – Rádio	65,50	82,0	102,0	128,0	160,0	200,0	250,0	0	0

Na simulação para o planejamento de 5 períodos foram usadas as seguintes estratégias de evolução dos custos:

- Equipamentos
  - Queda de 15% no período 2 e de 15% no período 4;
- Cabos
  - Metálicos: queda de 7% no período 2 e 7% no período 4;
  - Ópticos: queda de 5% nos períodos 2 e 4;
- Infra-estrutura
  - O valor do *km* de dutos é fixo para todo o horizonte de planejamento (obra civil é a parte mais cara da infra-estrutura da rede de acesso);

Sobre os serviços oferecidos pela rede

A rede oferece atendimento para dois tipos de serviços de telecomunicações: um serviço banda-estreita simétrico (voz) e outro banda-larga assimétrico (*Internet*, por exemplo). A tabela 4.2 mostra a taxa de transmissão e a receita unitária inicial para os dois serviços considerados.

TABELA 4.2 – Informações sobre os serviços.

Serviços	Taxa de transmissão		Receita Inicial
	downstream	*upstream*	
Voz	64 Kbps	64 Kbps	0,1
Serviço Banda-Larga	2 Mbps	800 Kbps	0,5

O serviço 1, por ser já consolidado e exigir menos investimentos por parte da operadora e do usuário, não sofre alterações de preço no horizonte de 5 anos. Por outro lado, o serviço 2 exige investimentos iniciais maiores de ambas as partes (operadora e usuário). Por ser novidade, o serviço começa caro, mas vai baixando o preço conforme aumenta sua popularidade; o preço do serviço 2 apresenta queda de 20% por período.

A tabela 4.3 apresenta a previsão de demanda (demanda máxima por período) para cada um dos nós de acesso e o fator de atendimento mínimo (FAM) obrigatório em cada período; o FAM deve ser respeitado em cada um dos nós de acesso.

TABELA 4.3 – Previsão de demanda.

Demanda prevista (em número de canais E1) em cada nó de acesso										
Nó de Acesso	Período 1		Período 2		Período 3		Período 4		Período 5	
	S_1	S_2	S_1	S_2	S_1	S_2	S_1	S_2	S_1	S_2
1	9	4	10	7	10	7	10	32	10	92
2	21	9	23	16	23	16	24	75	24	114
3	28	12	31	21	31	21	32	100	32	185
4	9	4	10	7	10	7	10	32	10	92
5	18	8	20	14	20	14	20	64	20	184
6	29	13	32	22	32	22	32	103	32	296
7	19	8	21	14	21	14	21	68	21	195
8	7	3	8	5	8	5	8	25	8	72
9	29	14	31	23	31	23	76	44	76	72
10	11	5	12	8	12	8	12	39	12	112
11	23	10	25	17	25	17	25	82	25	135
12	31	14	34	23	34	23	34	81	34	117
13	23	9	25	15	25	15	44	78	44	109

14	9	4	10	7	10	7	10	32	10	92
15	17	7	19	13	19	13	19	61	19	174
16	25	11	28	19	28	19	28	90	28	200
17	7	3	8	5	8	5	8	25	8	71
FAM	50	50	60	55	70	60	80	65	90	70
S_1 – voz (cada canal E1 atende 30 usuários de voz) S_2 – banda-larga										

O serviço 1 não apresenta crescimento significativo durante o horizonte estipulado; há um crescimento de 8% no período 2 e 5% no período 4. O que existe, na verdade, é demanda reprimida; o fator de atendimento mínimo aumenta 10% a cada período.

A demanda do serviço 2 cresce rapidamente; a popularidade do novo serviço faz surgir picos de demanda nos períodos 2 e 4, com aumento de 65%. Nos períodos 3 e 5, a demanda S_2 cresce 40%. O crescimento do fator de atendimento mínimo é menor para o serviço 2, aumenta 5% por período.

Sobre os orçamentos para investimento

Determinar o investimento em cada período é uma tarefa tão complicada quanto otimizar a receita.

O valor do orçamento mínimo para atender a demanda máxima em um período pode ser calculado através da resolução de um problema de minimização de custos. O modelo que representa tal problema é equivalente ao modelo 4.1: a restrição M4.1-2 torna-se a função-objetivo a ser minimizada (DESOUSA et al., 2001b). Mas não é possível calcular desta maneira os orçamentos parciais para o planejamento multi-período devido ao ganho de escala com capacidades e custos dos equipamentos: o custo para expandir cada período separadamente pode ser bem maior do que aquele para atender toda a demanda no último período (ESCOBAR, GALLEGO & ROMERO, 2004).

Por isso, os orçamentos usados nas simulações de planejamento são uma estimativa do valor apropriado. A partir do valor do orçamento necessário para atender toda a demanda prevista no horizonte considerado (período 5), calculou-se uma parcela maior para o

período inicial (de maior investimento, especialmente em áreas em implantação). Os outros orçamentos foram estipulados conforme os aumentos de demanda.

Os valores dos orçamentos usados nas simulações, assim como os custos e receitas, já estão transformados para seus valores presentes, relativos ao período inicial de planejamento.

4.5 Parâmetros para o AHE

Tamanho da população inicial

Para uma escolha adequada do tamanho da população inicial foram feitos diversos testes preliminares, com tamanhos variando de 20 a 100 indivíduos. Os melhores resultados ocorreram para populações de tamanho igual a 30 indivíduos.

Tipos de reprodução e seleção

Dois tipos de cruzamento de indivíduos foram usados nos testes apresentados: *crossover* de um ponto e uniforme. A taxa usada para realização de *crossover* uniforme foi igual a 50%. A porcentagem de indivíduos escolhidos para reprodução foi igual a 80%. Os indivíduos modificados geneticamente foram 0,5% da população. As novas populações foram selecionadas a partir da estratégia de seleção elitista.

Critério de parada

O critério de parada usado em todos os testes foi a geração de 50 novas populações.

Quantidade de execuções

Devido à aleatoriedade do AHE, cada um dos testes realizado foi executado 10 vezes. Verificou-se que a aleatoriedade não interferiu no resultado final de cada teste, e sim na quantidade de soluções factíveis encontradas.

4.6 Resultados

Os resultados do AHE são comparados com resultados obtidos por meio do pacote computacional CPLEX® (CPLEX, 1994). Tanto o método AHE quanto o programa que gera o modelo PLIM resolvido pelo CPLEX® foram implementados através da linguagem computacional C (DEITEL & DEITEL, 2000). Ambos os programas foram executados em uma máquina de plataforma operacional Unix, Ultra-1, com processador UltraSparc de 167 Mhz, e a versão do pacote matemático CPLEX® utilizado foi a 6.6.

Em todas as comparações, o tempo limite dado ao CPLEX® para solucionar o problema foi de 25 minutos. Chegou-se a esse número a partir de simulações anteriores onde foi constatado que a média de tempo exigida pelo AHE é de 1,5 minutos. Assim, como o objetivo é criar métodos que concorram em relação ao tempo computacional, não faz sentido esperar por muito tempo por uma resposta. Além disso, o CPLEX® pode levar horas para chegar a uma solução factível de uma instância do problema, inviabilizando as comparações.

Para as simulações abaixo, sem restrições de orçamento, a receita máxima possível é **6579,67**.

4.6.1 Cenário 1

O planejamento para o cenário 1 deve implantar na área de estação determinada toda a infra-estrutura, que inclui construção de dutos e lançamento de cabos (metálicos e ópticos). Além disso, é preciso instalar equipamentos suficientes para o atendimento da demanda prevista.

Situação econômica A

Na situação econômica A, o orçamento é fixo, não podendo haver empréstimos durante o horizonte de planejamento. Os orçamentos considerados são: L_1=2000, L_2=1000, L_3=500,

L_4=1000 e L_5=500. Propositalmente, os orçamentos foram escolhidos de maneira a não ser possível atender toda a demanda prevista, apenas a demanda mínima obrigatória. Desta maneira, o método de resolução deve ser capaz também de priorizar o atendimento das demandas mais lucrativas. A tabela 4.4 mostra os resultados obtidos.

TABELA 4.4 – Resultados do planejamento para o cenário 1 na situação A.

Método de Resolução	Receita Obtida	Gap[11] (%)	Tempo Computacional (em minutos)
AHE 1 (*crossover* uniforme)	6464,07	1,6	1,950
AHE 2 (*crossover* 1 ponto)	6464,07	1,6	1,822
CPLEX®	6569,32		19,57

Nas duas soluções do AHE, embora as receitas obtidas sejam menores que aquela encontrada pelo CPLEX® (melhor solução factível encontrada em 25 minutos), a relação receita/tempo computacional é melhor.

As soluções encontradas pelo AHE, apesar de reverterem as mesmas receitas, não são iguais. Esta diferença pode ser conferida pela evolução dos equipamentos instalados em ambas as soluções, apresentada pela tabela 4.5. A mesma tabela apresenta também o resultado obtido pelo CPLEX®.

[11] Distância do melhor resultado obtido pelo CPLEX®.

TABELA 4.5 – Evolução dos equipamentos nos arcos – Situação A.

Solução		*AHE 1*					*AHE 2*					*CPLEX*				
Período / Arco		**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Arco Direto	**1**									O4[12]		R1[13]	R2		R4	
	2	O7					O6					O3			O5	
	3	R6					R7					O3		O6		
	4	R2					R1		R6			R1	O3,O4			
	5	R2		R5			R1			R6		O3		O4		
	6	O7			R6		O7					O7,R1				
	7				R5		R1		A3[14]		R1	A3			O7	
	8						R1			R1		O1			O3	O4
	9	O7			A1		O7					O5		O7	A1,R4	
	10	R1				R1	R2				O3	A1	R2		R5	
	11	R1			R1	O6	R1			O5		O3			R7	
	12	R3			R5		R4					O7				
	13	R4					O3				R1	O4			O6	
	14	R1	O2			R2					R5	R1	O6			
	15	O7					O5			O5			R6	R4		
	16	O5					O6			O6		O3			O6	
	17	R1			O7	R1	R1			R1		R2				O6,R3,R5
Arco Rota	**1-2**	O7					A1	R5		A1						
	2-3	R4	R4					A4								
	4-5		R5		R5		A1			A1						
	5-6	R1	O7				R1	O6		R1						
	8-7	R1	R6				O3			O3						
	7-9	O5					O4			O4	R5					
	10-11	R1	R4				O7			O7						
	11-12	O5	O7		R3		R1	O6		R1						
	12-13		O6				R1	R6		R1						
	13-9		R4							O7						
	14-15	R1		R6			R1	O3								
	15-16		O7	R4			R1			R4		R2				

A figura 4.2 mostra a configuração da rede no período 5, para os resultados obtidos pelo AHE 1 e pelo CPLEX®.

[12] Equipamento óptico.
[13] Equipamento rádio.
[14] Equipamento ADSL.

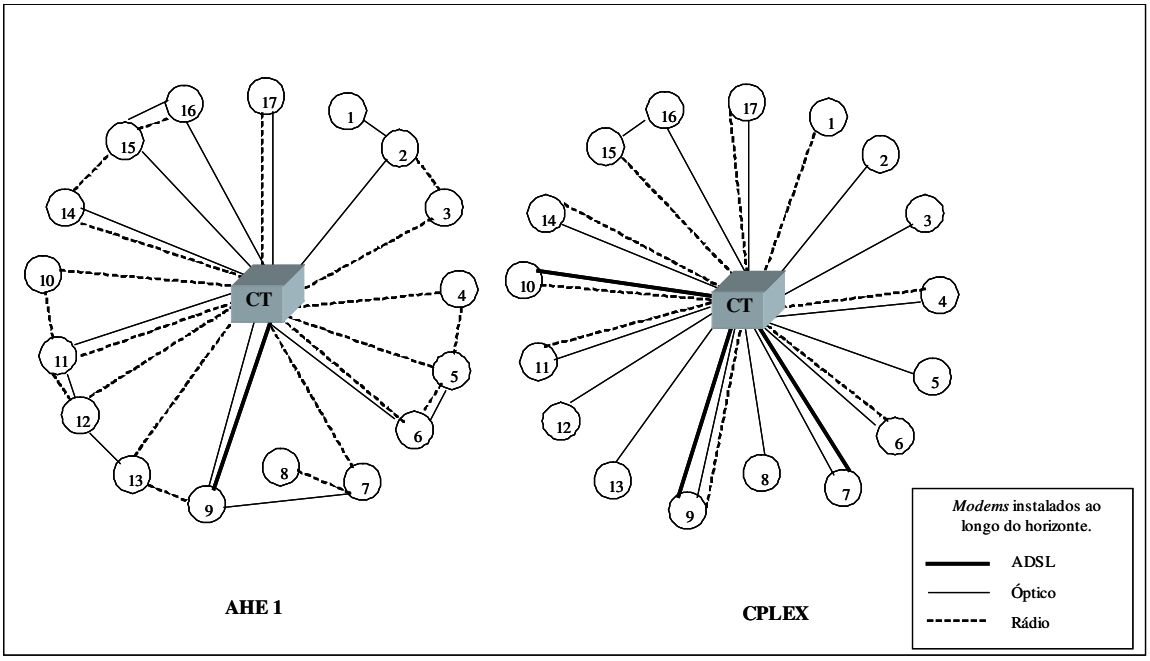


FIGURA 4.2 – Solução para expansão da rede de acesso.

Quando os orçamentos são cortados em 20%, o CPLEX® não é capaz de achar nenhuma solução factível em 25 minutos, enquanto que o AHE, em apenas 2 minutos, acha 4 soluções factíveis; a melhor é igual a 6456,47.

Situação econômica B

A situação econômica B permite que a empresa operadora faça empréstimos financeiros para complementar o orçamento de investimentos para a expansão da rede de acesso. O empréstimo, corrigido por juros periódicos, é descontado na receita total do horizonte de planejamento; há um limite, de 25% do valor já disponível para o orçamento do período, para cada empréstimo.

Os orçamentos são cerca de 20% mais baixos que os considerados na situação A (L_1=1400, L_2=700, L_3=350, L_4=700 e L_5=350) e os juros, iguais a 12% ao ano. Os juros praticados nos testes são anuais. Portanto, um empréstimo realizado no período 1 paga juros de 4 anos, um empréstimo no período 2 paga juros de 3 anos, e assim sucessivamente. Não são permitidos

empréstimos no último período de planejamento. Os resultados estão na tabela 4.6:

TABELA 4.6 – Resultados do planejamento para o cenário 1 na situação B.

Método de Resolução	Receita Obtida	Gap (%)	Tempo Computacional (em minutos)
AHE 1 (*crossover* uniforme)	6343,4814	-0,98	4,919
AHE 2 (*crossover* 1 ponto)	6327,4285	-0,72	4,907
CPLEX®	6281,8949		24,03

As duas soluções encontradas pelo AHE são superiores àquela encontrada pelo CPLEX®[15], tanto em relação à receita quanto ao tempo de resolução. Isso possivelmente acontece porque, com uma maior disponibilidade de dinheiro para investimento, o AHE gera um número maior de soluções candidatas (factíveis ou não), aumentando assim a diversidade da população; na solução obtida pelo AHE 1, foram encontradas 9 soluções factíveis diferentes. O fato de avaliar um número maior de soluções candidatas faz o tempo computacional do AHE crescer para os testes da situação B.

O resultado do AHE 1 (6343,4814) fez empréstimos nos períodos 1 e 4 (74,80 e 6,67, respectivamente); o AHE 2 (6327,4285) fez empréstimos nos períodos 1, 2 e 4 (53,39, 9,34 e 39,83, respectivamente). O CPLEX® emprestou quantia maior nos 3 primeiros períodos (169,57, 135,68 e 35,44, respectivamente).

4.6.2 Cenário 2

No cenário 2, a infra-estrutura já está instalada. Para este caso, a expansão da rede exige apenas o lançamento de cabos (metálicos e ópticos), além da instalação de equipamentos.

[15] Observe que o tempo de execução do CPLEX® é limitado em 25 minutos. Portanto, a solução encontrada não é a solução exata para o caso em questão.

Situação econômica A

Os orçamentos considerados são: L_1=700, L_2=200, L_3=0, L_4=250 e L_5=0. Não foram considerados orçamentos para os períodos 3 e 5 porque, para estes períodos, o crescimento da demanda não é significativo; como não há necessidade de investimento em infra-estrutura, os orçamentos prévios são suficientes. A tabela 4.7 mostra os resultados obtidos.

TABELA 4.7 – Resultados do planejamento para o cenário 2 na situação A.

Método de Resolução	Receita Obtida	Gap (%)	Tempo Computacional (em minutos)
AHE 1 (*crossover* uniforme)	6457,9825	1,67	1,743
AHE 2 (*crossover* 1 ponto)	6456,2825	1,70	1,593
CPLEX®	6568,1920		18,017

Assim como no caso do cenário 1, as receitas obtidas pelo AHE para o cenário 2 são menores que aquela encontrada pelo CPLEX®, mas a relação receita/tempo computacional é melhor.

Situação econômica B

Os orçamentos considerados são: L_1=420, L_2=120, L_3=0, L_4=150 e L_5=0; os empréstimos são igualmente limitados por 25% do valor do orçamento já disponível para o período e os juros adotados são iguais aos já divulgados anteriormente. Os resultados estão na tabela 4.8.

TABELA 4.8 – Resultados do planejamento para o cenário 2 na situação B.

Método de Resolução	Receita Obtida	Gap (%)	Tempo Computacional (em minutos)
AHE 1 (*crossover* uniforme)	6230,3691	5,14	2,347
AHE 2 (*crossover* 1 ponto)	6304,0635	4,02	2,381
CPLEX®	6568,0788		25,035

Os empréstimos efetuados pelo AHE são maiores que aqueles do cenário 1, o que explica as baixas receitas (o pagamento do empréstimo é descontado da receita total). O tempo computacional do AHE é maior porque o algoritmo avaliou mais soluções para chegar em resultados factíveis satisfatórios. Mas ainda assim a relação receita/tempo computacional é melhor que aquela do CPLEX®.

4.6.3 Cenário 3

No cenário 3, a expansão da rede de acesso é feita numa área onde já há infra-estrutura (obras civis e dutos) pronta. Planeja-se, portanto, apenas a instalação de equipamentos.

Situação econômica A

Os orçamentos considerados são: L_1=90 L_2=10 L_3=10 L_4=90 L_5=10. Não são permitidos empréstimos financeiros. Os resultados estão na tabela 4.9.

TABELA 4.9 – Resultados do planejamento para o cenário 3 na situação A.

Método de Resolução	Receita Obtida	Gap (%)	Tempo Computacional (em minutos)
AHE 1 (*crossover* uniforme)	6464,07	1,64	3,702
AHE 2 (*crossover* 1 ponto)	6464,07	1,64	3,182
CPLEX®	6571,62		16,614

No cenário 3, onde a infra-estrutura já está toda pronta, a concorrência em relação aos custos entre os equipamentos não é igual – o equipamento rádio é muito mais caro[16]. Como no AHE o sorteio de equipamentos para a geração de soluções é aleatório (com distribuição uniforme), o método demanda mais tempo para achar uma solução factível de qualidade. O CPLEX®, por sua vez, usando o método de busca *branch-and-bound* (WOLSEY, 1998), exclui os candidatos "caros" da solução com maior facilidade. Por isso, o CPLEX® obtém a solução ótima do problema, para este cenário, em um tempo computacional menor, comparado com outros resultados do CPLEX®. Em nenhum dos resultados, obtidos pelo AHE ou CPLEX®, foram instalados equipamentos rádio na rede.

Uma opção para que ambos os métodos concorram com mais igualdade em relação aos preços dos equipamentos é retirar os enlaces rádio microondas da lista de equipamentos candidatos. A tabela 4.10 apresenta os resultados deste novo cenário; os orçamentos considerados são os mesmos do caso acima.

[16] Um equipamento ADSL ou óptico, de modularidade igual a 16 canais E1, custa $1,00, enquanto que o equipamento rádio de mesma capacidade custa 65,50.

TABELA 4.10 – Soluções de planejamento sem equipamentos rádio microondas.

Método de Resolução	Receita Obtida	Gap (%)	Tempo Computacional (em minutos)
AHE 1 (*crossover* uniforme)	6329,54	1,58	1,576
CPLEX®	6431,24		23,056.

Quando os equipamentos rádio são retirados da competição, o AHE é capaz de achar soluções tão boas quanto as primeiras, mas na metade do tempo. Entretanto, o AHE não achou nenhuma solução factível usando o operador *crossover* de 1 ponto.

Situação econômica B

Consideraram-se orçamentos exatamente 40% menor que aqueles da situação A (para o cenário com equipamentos rádio microondas candidatados); os empréstimos são limitados em 25% do orçamento do período e os juros adotados são os mesmo já divulgados (tabela 4.11).

TABELA 4.11 – Resultados do planejamento para o cenário 3 na situação B.

Método de Resolução	Receita Obtida	Gap (%)	Tempo Computacional (em minutos)
AHE 1 (*crossover* uniforme)	6100,3670	6,69	2,291
AHE 2 (*crossover* 1 ponto)	5937,5243	9,19	2,622
CPLEX®	6538,3729		16,55

Este foi o estudo de caso com o maior *gap* entre os resultados de receita e com a mais próxima relação receita/tempo computacional. Os empréstimos realizados pelo algoritmo

AHE comprometeram a boa qualidade da função objetivo. Além disso, para este caso o CPLEX® apresentou um desempenho bom, encontrando a solução ótima do problema (o valor 6538,3729 é diferente daquele valor apresentado no início desta seção devido aos descontos relativos aos empréstimos realizados) num intervalo de pouco mais de 16 minutos.

4.7 Conclusões

A meta principal a ser atingida pelo AHE era obter soluções satisfatórias para o problema proposto em um tempo de resolução curto. Ou seja, a comparação entre o AHE e outros métodos de resolução deve acontecer para a relação **benefício *dividido* pelo tempo computacional**; quanto maior esta relação, maior o mérito do AHE. Baseando-se nesse critério, verificou-se que o AHE apresentou um desempenho bom em todos os casos analisados. O gráfico da figura 4.3 mostra, por exemplo, a comparação de performance entre o AHE e o CPLEX® para os três cenários na situação econômica A.

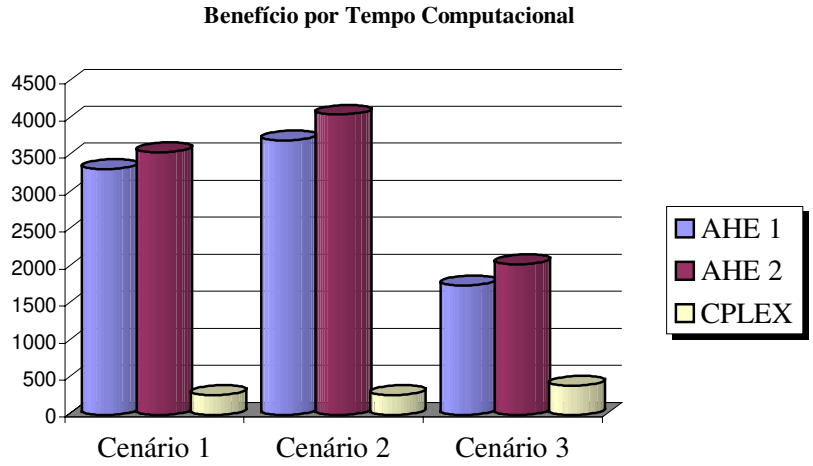


FIGURA 4.3 – Comparação entre os resultados obtidos para o cenário 1 pelo AHE e CPLEX®.

Na comparação qualitativa, levando em consideração que todos os parâmetros usados nos testes do AHE 1 e AHE 2 foram iguais, o método AHE 2 (usando *crossover* de 1 ponto)

atingiu os melhores resultados. Ou seja, o AHE 2 obteve resultados com as maiores receitas e os menores tempos computacionais.

As redes planejadas pelo AHE e CPLEX® não apresentaram grandes discrepâncias com relação à diversidade dos equipamentos instalados, como é possível conferir na figura 4.2. Todos os resultados apresentaram uma maior incidência de instalação de equipamentos ópticos e rádio, por causa do ganho de escala em preço e capacidade desses *modems*. Já as topologias das redes planejadas se apresentaram bem distintas. Essa diferença é ditada pela aleatoriedade do AHE, que sorteia caminhos diretos ou alternativos, muitas vezes repartindo o atendimento da demanda em dois caminhos.

Os orçamentos utilizados na análise dos casos foram estimados partindo da premissa que os gastos despendidos nos primeiros períodos do horizonte de planejamento são enormes, enquanto que a receita ainda é pequena. Conforme os investimentos vão sendo realizados, os gastos de expansão/implantação diminuem e a receita aumenta. Esse fluxo de caixa pode ser notado em todos os testes, com exceção para o orçamento do período 4, que deve suprir um aumento significativo nas demandas de ambos os serviços.

O modelo matemático para a expansão da rede como proposto neste trabalho trata os vários períodos de planejamento de uma única vez, ou seja, as decisões para a instalação de equipamentos e para obras de infra-estrutura na rede são determinadas no período 1 do horizonte considerado. Essa estratégia, apesar de não admitir intervenções de qualquer natureza durante o planejamento, permite uma visão geral da rede. Mas, para driblar essa inflexibilidade, o planejador pode adotar a técnica do *horizonte rolante* na implementação da solução de longo prazo. Com a técnica, o problema é resolvido para um horizonte de planejamento de T períodos onde apenas a solução para o primeiro é efetivamente implantada. A seguir, o horizonte é rolado à frente e o método é aplicado novamente, para mais T períodos, com as informações atualizadas (dados de demanda, por exemplo). O processo acaba quando o último estágio do horizonte pré-estabelecido (*ano horizonte*) tiver sido implantado.

A maior dificuldade (e também o maior aprendizado em termos de programação computacional) foi, sem dúvida, a incorporação do pacote CPLEX® ao programa evolutivo. Juntamente com a leitura dos dados de entrada dos cenários e da rede analisada, o AHE lê uma matriz referente às variáveis lineares do modelo, que guarda o nome, a qual restrição pertence e o valor de cada variável. A matriz é quase a mesma para todos os subproblemas avaliados pelo pacote; o que muda é a constante que representa a capacidade dos arcos na solução candidata (valor dado pela fixação das variáveis binárias), atualizada momentos antes da montagem do PL a ser lido pelo CPLEX®. Essa matriz deve ser alterada sempre que uma restrição for acrescentada ou retirada do modelo. Por ser de grande porte e bastante detalhada, seu preenchimento deve ser cuidadoso, pois qualquer equívoco pode comprometer a veracidade do modelo avaliado. Uma vez montada a matriz, o usuário do AHE deve se preocupar apenas em atualizar os dados de entrada para o cenário e rede analisados.

CONCLUSÃO

Desde a sua privatização, o setor de telecomunicações do Brasil mudou bastante. A concorrência entre as empresas operadoras do sistema é o ponto alto desse processo, que pode beneficiar os usuários, tanto aqueles que já assinavam algum serviço quanto os novos compradores de serviços de telecomunicações.

O Plano Geral de Metas para Universalização (PGMU), estabelecido pela ANATEL, além de ter garantido prestação de serviços públicos, de emergência e para portadores de deficiência, exigiu o atendimento rápido das demandas reprimidas para o serviço de voz, o mais básico dentre os serviços de telecomunicações. A ANATEL tem um papel importante nesta nova condição de prestação privada de serviços de telecomunicações. Como o objetivo das operadoras do sistema é obter lucro, a qualidade do serviço prestado nem sempre é o esperado. É o que vem acontecendo no Brasil: a gama de serviços modernos de telecomunicações aumentou, mas a qualidade e o custo dos serviços oferecidos ainda deixam a desejar. Por isso, a agência reguladora deve estar em constante alerta para fiscalizar e garantir os direitos dos assinantes.

Para que pudessem explorar a prestação de serviços de telecomunicações, as operadoras buscaram cumprir, o mais rapidamente possível, as exigências do PGMU para, então, iniciar a expansão do sistema de telecomunicações. Visando aumentar a receita e a participação no mercado, as operadoras vêm apostando em novas tecnologias, capazes de oferecer serviços inovadores e competitivos. Esse processo, além de satisfazer as necessidades atuais, deve preparar o sistema para outras transformações, como a migração para redes convergentes NGN, por exemplo. Operadoras *incumbents* devem expandir e habilitar as redes já existentes; operadoras espelhos devem implantar redes novas. Em ambos os casos, o planejamento da rede de acesso (complexo sistema que intercomunica os milhões de usuários às suas respectivas centrais telefônicas) é estratégico para o sucesso dessas expansões e/ou implantações.

O crescimento intenso e incessante das demandas e a necessidade de tomar decisões importantes em espaços curtos de tempo exigem agilidade por parte das operadoras. Para auxiliar os planejadores de rede, este trabalho apresentou alguns modelos matemáticos e um método de resolução capaz de resolver o problema linear inteiro misto (PLIM) da expansão multi-período da rede de acesso.

Heurísticas baseadas em evolução genética têm se destacado dentre os métodos de resolução desenvolvidos para resolver problemas $\mathcal{NP}$-hard. Os algoritmos evolutivos ganharam popularidade por causa de sua propriedade de busca multi-direcional: eles mantêm uma população de soluções candidatas enquanto que os métodos alternativos processam um único ponto no espaço de busca a cada instante. Este trabalho propôs o Algoritmo Híbrido Evolutivo (AHE), método evolutivo de resolução que usa algoritmos genéticos para determinar as variáveis inteiras do PLIM. O uso de algoritmos genéticos se justifica pela simplicidade e rapidez na implementação do algoritmo: cada indivíduo da população é representado por um único cromossomo, o qual contém a codificação de uma possível solução do problema. No caso do problema em questão, o cromossomo é formado por uma sequência de zeros e uns que representa a decisão de instalar (1) ou não (0) um equipamento candidato no arco da rede naquele período. Entretanto, os algoritmos genéticos clássicos não conseguem resolver facilmente problemas restritos. É preciso incrementá-los com regras antiviolação para evitar a geração de soluções infactíveis. O AHE foi incrementado com técnicas de preservação de factibilidade, com reparações de indivíduos e com penalidade. Essas três regras e o uso de operadores genéticos específicos evitaram a geração excessiva de indivíduos infactíveis na população corrente (indivíduos inválidos ajudam a diversificar a população durante a evolução da solução), não comprometendo a evolução dos resultados.

A expansão da rede de acesso gera um problema combinatorial; o número de variáveis inteiras cresce exponencialmente com o número de períodos, de equipamentos candidatados e o tamanho da rede (nós de acesso e centrais telefônicas) considerados no planejamento. Não é possível usar algoritmos ótimos, como os utilizados no *solver* CPLEX®, para resolver problemas de médio ou grande porte e/ou muito restritos, que

devem ser resolvidos a partir de métodos heurísticos.

Apesar da enorme ordem prática, o problema da expansão da rede de acesso primário é pouco abordado no meio científico. Não foi possível encontrar, durante as pesquisas de revisão bibliográfica, nenhum trabalho que aborde tal expansão usando algoritmos evolutivos.

O AHE apresentou um desempenho muito bom nos testes a que foi submetido, produzindo resultados, em média, apenas 1,6% distantes do melhor valor obtido pelo CPLEX® e numa velocidade bem superior. Além disso, o modelo matemático permitiu que o problema fosse abordado em diferentes situações econômicas; o AHE apresentou-se igualmente eficiente em situações de arrocho financeiro. Baseando-se na premissa de que um método heurístico deve obter soluções satisfatórias em um intervalo razoável de tempo, o AHE alcançou seus objetivos. Além do bom resultado obtido para a função-objetivo de maximizar a receita, o tempo curto de resolução foi o grande mérito do método. Freqüentemente, são necessárias diversas análises do planejamento antes da decisão; um método de resolução rápido, como o AHE, dá essa versatilidade ao planejador. Desta maneira, o AHE pode contribuir com eficiência no planejamento de redes, auxiliando os planejadores que vão programar a expansão e implantação de novas áreas de serviço.

Outra contribuição importante deste trabalho é a elaboração de uma classe de modelos matemáticos para o problema de planejamento multi-período da expansão da rede de acesso, que são pouco encontrados na literatura. Os modelos apresentados são multi-tecnologia, multi-serviço e também razoavelmente detalhados para o nível de planejamento estratégico abordado.

O algoritmo híbrido evolutivo AHE aproveita o que cada uma das duas técnicas de resolução adotadas tem de melhor, ou seja, ele explora a propriedade do pacote matemático CPLEX® de resolver, em frações de minutos e de maneira ótima, problemas lineares, e a eficiência dos algoritmos genéticos em lidar com variáveis binárias. Além disso, o AHE produz soluções para o modelo original, não sendo necessário simplificar o problema para sua resolução. Apresenta ainda uma boa relação do valor obtido da função objetivo e o

tempo de execução gasto. Essas características, somadas com o fato do AHE ser suficientemente genérico, torna o método de resolução desenvolvido uma boa ferramenta a ser estendida em outras abordagens do problema.

Uma das perspectivas de continuidade deste trabalho está relacionada com os objetivos conflitantes que integram um problema de planejamento para um setor de muita competitividade como o de telecomunicações. Os modelos apresentados podem ser melhorados com o acréscimo de um desses conflitos, como maximizar a receita e minimizar os custos dos investimentos. Tratar o modelo como multiobjetivo exige que o AHE seja incrementado com técnicas de programação multiobjetivo.

Outra abordagem decorrente de problemas de planejamento para múltiplos períodos e/ou voláteis como o de telecomunicações é o tratamento das incertezas dos dados de entrada, como custos e demandas. A incorporação de números *fuzzy* aos modelos matemáticos apresentados é possível (DESOUSA et al., 2003); para a resolução, os dados de entrada devem ser atualizados dinamicamente ao longo do processo de evolução das soluções.

Com algumas modificações, este trabalho pode ser estendido para resolver o problema de expansão de outras redes, como as de energia elétrica, de água e esgoto ou outras subredes do sistema de telecomunicações, como redes *backbone* de transmissão.

REFERÊNCIAS

ANATEL. **Plano Geral de Metas para Universalização**. Disponível em: www.anatel.gov.br. Acesso em: 30/11/2004.

SCM. **Regulamento SCM**. Disponível em: www.anatel.gov.br. Acesso em: 14/12/2004.

AHUJA, R. K.; MAGNANTI, T. L.; ORLIN, J. B. **Network Flows**: Theory, Algorithms, and Applications. New Jersey: Prentice-Hall, 1993.

AARTS, E.; KORST, J. **Simulated Annealing and Boltzmann Machines**: A Stochastic Approach to Combinatorial Optimization and Neural Computing. John Wiley & Sons, 1989.

ANTUNES, A.; PEETERS, D. On Solving Complex Multi-Period Location Models using Simulated Annealing. **European Journal of Operational Research**, 130, 190-201, 2001.

ANTUNES, C. H.; CRAVEIRINHA, J. F.; CLÍMACO, J. N. Planning the Evolution to Broadband Access Networks: A Multicriteria Approach. **European Journal of Operational Research**, 109, 530-540, 1998.

BÄCK, T.; FOGEL, D. B.; MICHALEWICZ, Z. (eds.). **Evolutionary Computation 1**: Algorithms and Operators. Institute of Physics Publishing, 2000a.

BÄCK, T.; FOGEL, D. B.; MICHALEWICZ, Z. (eds.). **Evolutionary Computation 2**: ADVANCED and Operators. Institute of Physics Publishing, 2000b.

BALAKRISHNAN, A.; MAGNANTI, T. L.; SHULMAN, A.; WONG, R. T. Models for Planning Capacity Expansion in Local Access Telecommunication Networks. **Operations Research**, 33, 239-284, 1991.

BASSETO, F.; CARLSON, C. M. F.; FORMIGONI, J. R. F.; DESOUSA, M. A.; BERGAMASCHI, M. A. Strategic and Technical Planning of Multi-Service Access Networks under Max-Revenue Criterion. In: 8th International Conference on Telecommunications Systems - Modeling and Analysis – ICTS-MA, Nashville, 2000. **Proceedings...** P.472-478.

BAZARAA, M.S.; JARVIS, J.J.; SHERALI, H.D. **Linear Programming and Network Flows**. 2. edição. Wiley, New York: 1990.

BERGAMASCHI, M. A. **Planejamento de Redes de Transmissão SDH dividido em Camadas Funcionais**. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

BRITTAIN, D.; WILLIAMS, J. S.; MCMAHON, C. A Genetic Algorithm Approach to Planning the Telecommunications Access Network. In: Seventh International Conference on Genetic Algorithms – ICGA'97, East Lansing, MI, USA, 1997. **Proceedings…** p.623-628.

CARLSON, C. M. F.; AUTHIÉ, G. A Model with Link-efficiency Parameters for Optimal Location and Sizing of LMDS Cells. In: Third International Workshop on Design of Reliable Communication Networks - DRCN'2001, Budapeste, 2001. **Proceedings...** P.42-49.

CARLSON, C. M. F.; TAVARES, H. M. F.; FORMIGONI, J. R. F. Evolution of Telecommunications Networks under Imprecise Demands. **Revista da Sociedade Brasileira de Telecomunicações**, Vol.16, N.2, p.79-90, 2001.

CATRYSSE, D.; VAN WASSENHOVE, L. N. A Survey of Algorithms for the Generalized Assignment Problem. **European Journal of Operational Research**, 60, p. 260-272, 1992.

CHANG, S-G.; GAVISH, B. Lower Bounding Procedures for Multiperiod Telecommunications. **Operations Research**, 43, 1: ABI/INFORM Global, p. 43, 1995.

CRAENEN, B. G. W.; EIBEN, A.E.; MARCHIORI, E. How to handle constraints with evolutionary algorithms. In: Lance Chambers. **Practical Handbook of Genetic Algorithms**: Applications. 2. edição. Chapman&Hall/CRC, 2000, p. 341-361.

DAFT, R. L. **Administração**. 4. edição. LTC Editora Ltda, 1999.

DEB, K. An Efficient Constraint Handling Method for Genetic Algorithms. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, Vol. 186, N. 2/4, 311-338, 2000.

DEB, K. Genetic algorithms in search and optimization: The technique and applications. In: International Workshop on Soft Computing and Intelligent Systems, Calcutta, India, 1998. **Proceedings...** Machine Intelligence Unit, Indian Statistical Institute, p.58-87.

DEITEL, H. M.; DEITEL, P. J. **C How to Program** (Third Edition), Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2000.

DESOUSA, M. A.; RIBEIRO, R. V.; MACHADO, J. T., CARLSON, C. M. F., FORMIGONI, J. R. F. Income-oriented Broadband Access Planning with xDSL and APON-FTTC. In: Third International Workshop on Design of Reliable Communication Networks - DRCN'2001, Budapeste, 2001a. **Proceedings...** P.330-337.

DESOUSA, M.A.; MACHADO, J.T.; CARLSON, C.M.F.; FORMIGONI, J.R.F. Cellular Networks Infrastructure: An Optimized Planning. In: 9th International Conference on Communications Systems – Modelling and Analysis – ICTS-MA, Dallas, 2001b. **Proceedings...** p.331-340.

DESOUSA, M.A.; MACHADO, J.T.; RIBEIRO, R.V.; CARLSON, C.M.F. A Revenue-Focused Planning Model of Cellular Networks with Imprecise Demand Constraints. In: 7th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics – SCI, Orlando, USA, 2003. **Proceedings...** p. 320-325.

ESCOBAR, A.H.; GALLEGO, R. A.; ROMERO, R. Multistage and Coordinated Planning of the Expansion of Transmission Systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 19, N. 2, p. 735-744, maio, 2004.

GALLEGO, R. A.; MONTICELLI, A.; ROMERO, R. Transmission System Expansion Planning by Extended Genetic Algorithm. In: IEE – Generation, Transmission, and Distribution, Vol. 145, 1998. **Proceedings…** p.329-335.

GARCIA, B. L.; MAHEY, P.; LEBLANC, L. J. Iterative Improvement Methods for a Multiperiod Network Design Problem. **European Journal of Operational Research**, 110, 150-165, 1998.

GAREY, M. R.; JOHNSON, D. S. **Computer and Intractability**: A Guide to the Theory of NP-Completeness. Freeman, 1979.

GEARY, N.; ANTONOPOULOS, A.; DRAKOPOULOS, E.; O'REILLY, J. Analysis of Optimization Issues in Multi-Period DWDM Network Planning. Presented at **IEEE Infocom**. Anchorage, Alaska, 2001.

HUMMEL, P.R.V.; TASCHNER, M.R.B. **Análise e Decisão sobre Investimentos e Financiamentos**. 3a. Edição. São Paulo, 1992.

HUMPHREY, M.; FREEMAN, J. How xDSL Supports Broadband Services to the Home. **IEEE Network**, p. 14-23, 1997.

ICWORLD – Publicação Brasileira para *Information* and *Communications*. **Especial NGN**, out/2002. Disponível em http://www.br.siemens.com.br/ngn/especial.htm, acesso em: nov/2004.

ILOG CPLEX Division. CPLEX Optimization Package (on line) – http://www.cplex.com. Acesso em: nov/2003.

KUBAT, P.; SMITH, J.M. A Multi-period Network Design Problem for Cellular Telecommunication Systems. **European Journal of Operacional Research**, 134, 439-456, 2001.

LEE, Y.; CHO, H. S. An Optimal Network Design and Evolution Problem of Local Access Networks. In: 8th International conference on telecommunication systems – modeling and analysis, Nashville, USA, 2000. **Proceedings…** p. 114-131.

MACHADO J.T.; DESOUSA, M.A.; RIBEIRO, R.V.; CARLSON, C.M.F. A Genetic Approach to Equipment Allocation and Topology Choice in Wireless Multi-service Networks. In: International Conference on Computer, Communication and Control Technologies - CCCT '03, Orlando, USA, 2003. **Proceedings...** Vol. II, p. 404-409.

MACHADO, J. T. **Rede de Transmissão SDH**: Planejamento da Camada Lógica (PCLOG). Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, 1997.

MARTELLO, S.; TOTH, P. **Knapsack Problems**: Algorithms and Computer Implementations. New York: John Wiley & Sons, 1990.

MAXIMAL SOFTWARE. MPL Modeling System (on line) – http://www.maxima-usa.com. Acesso em nov/2003.

MICHALEWICZ, Z. A Survey of Constraint Handling Techniques in Evolutionary Computation Methods. In: 4th Annual Conference on Evolutionary Programming, Cambridge, USA, 1995. **Proceedings...** MIT Press, p. 135-155.

MICHALEWICZ, Z. **Genetic algorithms + Data Structures = Evolution Programs**. 3rd edition. Springer-Verlag, 1996.

MICHALEWICZ, Z.; Schoenauer, M. Evolutionary algorithms for constrained parameter optimization problems. **Evolutionary Computation** 4:1, p. 1-32, 1996.

MINOUX, M. Network Synthesis and Dynamic Network Optimization. **Annals of Discrete Maths**, 31, 283-324, 1987.

NEMHAUSER, G. L.; WOLSEY, L. A. **Integer and Combinatorial Optimization**. New York: John Wiley, 1999.

ODLYZKO, A. M. Internet Traffic Growth: Sources and Implications. In: Optical Transmission Systems and Equipment for WDM Networking II, 2003. **Proceedings…** Ed. por B. B. Dingel, W. Weiershausen, A. K. Dutta e K.-I. Sato, vol. 5247, pp. 1-15.

OSMAN, I. Heuristics for combinatorial optimization problems: development and new directions. In: Second Conference on Information Technology and Applications, Swansea, UK, 1993. **Proceedings...** AMR Publishing (Eds. K. Hafeez, M.A. Wani & K. S. Jomaa), p.1-24.

PICKAVET, M.; DEMEESTER, P. Multi-Period Planning of Survivable WDM Networks. **European Transactions on Telecommunications**: special issue on WDM Networks, Vol. 11:1, 7-16, 2000.

ROMERO, R.; GALLEGO, R. A; MONTICELLI, A. Transmission System Expansion Planning by Simulated Annealing. **IEEE Transactions Power Systems**, Vol. 11, p. 364-369, 1996.

SCHULZRINNE, H. **Long-Term Traffic Statistics and Traces**. Disponível em: http://www.cs.columbia.edu/~hgs/internet/traffic.html. Acesso em: 14/12/2004.

TOLEDO, A.P. **Redes de Acesso em Telecomunicações**. Makron Books, São Paulo, 2001.

TRINDADE, M. B. **Evolução Otimizada do Nó de Comutação de uma Rede Local**. Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1991.

Using the CPLEX Callable Library. CPLEX Optimization, Inc., Handbook, version 3.0, 1994.

VALENTE, J. J. **Telecomunicações – Um Novo Salto para o Futuro**. ANATEL, 2004. Palestra em 05 de agosto de 2004, São Paulo. Disponível em: www.anatel.gov.br. Acesso em: 07/10/2004.

WOLSEY, L. A. **Integer Programming**. John Wiley & Sons, INC., 1998.

ZANAKIS, S. H.; EVANS, J. R.; VAZACOPOULOS, A. A. Heuristic Methods and Applications: A Categorized Survey. **European Journal of Operacional Research**, 43, p. 88-110, 1989.