

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

**Metodologia de Apoio ao Projeto de
Rede Externa de Telefonia**

Daniel Bachega Pinheiro

Orientadores: Prof. Dr. Christiano Lyra Filho

Dr. Marcos Carneiro da Silva

Este exemplar corresponde a redação final da tese
defendida por DANIEL BACHEGA PINHEIRO
e aprovada pela Comissão
Julgada em 11/10/1999
Orientador

Membros da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Christiano Lyra Filho (orientador)

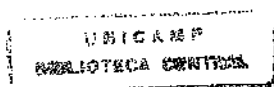
Prof. Dr. Hugo Tsugunobu Yoshida Yoshizaki

Prof. Dr. Akebo Yamakami

Tese submetida à Faculdade de
Engenharia Elétrica e Computação da
Universidade Estadual de Campinas,
para preenchimento dos pré-requisitos
parciais para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia Elétrica.

-Agosto/1999-

BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA
UNICAMP



UNIDADE BAE/FEEC
 N.º CHAMADA:
 T/UNICAMP
 P655m
 V. 1
 41142
 278/00
 0 1 0 1
 PUEL 9 0811 00
 DATA 16-06-00
 N.º OFD

CM-00142328-0

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

P655m Pinheiro, Daniel Bachega
 Metodologia de apoio ao projeto de rede externa de telefonia / Daniel Bachega Pinheiro.--Campinas, SP: [s.n.], 1999.

Orientadores: Christiano Lyra Filho, Marcos Carneiro da Silva.

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

1. Telecomunicações. 2. Otimização combinatória. 3. Sistemas de suporte de decisão. 4. Projetos de sistemas telefônicos. I. Lyra Filho, Christiano. II. Silva, Marcos Carneiro da. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. IV. Título.

Resumo

Esta tese apresenta o desenvolvimento de uma metodologia e um programa computacional para o projeto de rede externa de telefonia. Busca-se a minimização de custos através de métodos formais de otimização e automatiza-se o processo de projeto, levando a melhores tomadas de decisões.

A metodologia foi desenvolvida para um cenário onde se deseja capacitar as redes atuais para atender as demandas reprimidas. As redes externas telefônicas ligam o assinante ao centro de fios através de duas sub-redes, a rede primária e a rede secundária. O projeto de um conjunto dessas redes é um problema combinatorial complexo e de difícil tratamento; a metodologia apresentada divide-se em três etapas, utilizando técnicas formais de otimização combinatoria em conjunto com heurísticas construtivas e de melhoria.

Inicialmente, localizam-se os armários telefônicos, que são pontos de "passagem" da rede primária para a rede secundária. Em seguida, minimiza-se a utilização de cabos e a construção de novos dutos e galerias na rede primária, avaliando-se, inclusive, alternativas de utilização de novas tecnologias, como as fibras e armários óticos. Finalmente, procura-se minimizar a instalação de novos cabos na rede secundária. Para ambas as sub-redes, aproveitam-se as facilidades presentes nas redes telefônicas existentes.

Estudos de casos detalhados ilustram a aplicação da metodologia.

Abstract

This thesis presents the development of a methodology and software for telecommunications access network design. It adopts a network flow optimizations methods and heuristics to minimize costs, leading to better decisions.

The methodology was developed for a scenario where the network should be improved to deal with future demands. The access network connects the switching center to the subscribers, through the primary and secondary networks. Defining the best alternatives for both networks is a complex combinatorial problem; the methodology is divided in three stages that uses formal combinatorial optimization techniques in conjunction with a set of constructive heuristics and local search.

Initially, equipments that connect primary and secondary networks are located. Following, the combined costs of cables and galleries is minimized for the primary network; the optimization includes the evaluation of using new technologies, such as fiber and optics equipment. Finally, the use of new cables in the secondary network is minimized. All the installed facilities are taken in account for both networks (primary and secondary).

Detailed case studies illustrate application of the methodology.

Aos meus pais que,
com amor, sempre apoiaram,
incentivaram e lutaram pela minha formação pessoal e profissional.

Agradecimentos

Ao Christiano e Marcos, pela atenciosa orientação, amizade, motivação e momentos agradáveis.

Aos amigos Álvaro, Edilson e Marcelo pela amizade e apoio.

Aos amigos e amigas do DENSIS e COSE, que de alguma forma contribuíram para a realização desse trabalho.

À todos da Tele Design, em especial, o Humberto e Paulo Daniel pelas dicas, sugestões e os momentos de trabalho e descontração.

Ao Humberto, Márcia, Murilo, Gustavo, Carina e Vó Otávia pelo constante carinho, apoio e interesse durante todo esse período.

À Tatiana, pelo amor, carinho, incentivo e paciência nos momentos difíceis.

À Deus, por consentir a conclusão desse trabalho.

Este trabalho teve o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Índice

RESUMO	III
ABSTRACT	III
AGRADECIMENTOS.....	V
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 SISTEMA TELEFÔNICO BRASILEIRO.....	1
1.2 REDE EXTERNA	4
1.3 PROPOSTA DO TRABALHO	6
1.4 ORGANIZAÇÃO DA TESE.....	7
CAPÍTULO 2 – REDE EXTERNA.....	8
2.1 INTRODUÇÃO.....	8
2.2 REDE TELEFÔNICA CONVENCIONAL	8
2.3 REDE EXTERNA	11
2.3.1 Rede Primária ou Rede de Alimentação.....	12
2.3.2 Rede Secundária ou Rede de Distribuição	16
2.4 EVOLUÇÃO E TENDÊNCIAS NA REDE EXTERNA	18
CAPÍTULO 3 – O PROBLEMA.....	22
3.1 PROJETO DE REDE EXTERNA	22
3.1.1 Projeto da Rede Secundária.....	23
3.1.2 Projeto da Rede Primária	24
3.1.3 Distribuição dos Pares Telefônicos.....	24
3.2 CONSIDERAÇÕES NO PROJETO	26
3.3 CUSTOS DO PROJETO DA REDE EXTERNA.....	26
3.4 ABORDAGEM DO PROBLEMA	28
3.5 REPRESENTAÇÃO DA REDE TELEFÔNICA.....	30
3.6 FORMULAÇÃO PROPOSTA.....	31

CAPÍTULO 4 – MÉTODOS DE RESOLUÇÃO	38
4.1 INTRODUÇÃO	38
4.2 DECOMPOSIÇÃO DO PROBLEMA DE PROJETO DE REDES EXTERNAS	39
4.3 1ª ETAPA: LOCALIZAÇÃO DE ARMÁRIOS	41
4.3.1 Localização das Medianas	43
4.3.2 Substituição	45
4.3.3 Radialização	46
4.3.4 Factibilização	47
4.4 2ª ETAPA: PROJETO DA REDE SECUNDÁRIA	48
4.4.1 Custos Considerados	48
4.4.2 Metodologia de Resolução	50
4.4.3 Troca de Arcos	52
4.4.4 Reposicionamento de Armários	56
4.4.5 Busca Tabu	60
4.5 3ª ETAPA: PROJETO DA REDE PRIMÁRIA	64
4.5.1 Custos Considerados Para a Rede Primária Metálica	65
4.5.2 Custos Considerados Para a Rede Ótica Primária	66
4.5.3 Ponto de Entrada da Rede Subterrânea	66
4.5.4 Metodologia de Resolução	67
4.6 FERRAMENTA COMPUTACIONAL	72
CAPÍTULO 5 – ESTUDOS DE CASOS	77
5.1 INTRODUÇÃO	77
5.2 PROJETO INICIAL	78
5.2.1 Projeto Sem Melhoria	79
5.2.2 Projeto Com Melhoria	82
5.2.3 Comentários	94
5.3 REPROJETO COM 14 ARMÁRIOS	95
5.3.1 Reprojeto Sem Melhoria	96
5.3.2 Reprojeto Com Melhorias	98
5.3.3 Reprojeto com Rede Ótica Primária (ROP)	102
5.3.4 Comentários	108
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÃO	110
BIBLIOGRAFIA	113
APÊNDICE A – CUSTOS CONSIDERADOS	116

Capítulo 1 – Introdução

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma metodologia e um programa computacional para o projeto de rede externa de telefonia. Busca-se a minimização de custos através de métodos formais de otimização e automatiza-se o processo de projeto.

1.1 Sistema Telefônico Brasileiro

Desde a primeira demonstração pública do telégrafo por Morse, em 1844, e da primeira frase completa transmitida por Alexander Graham Bell através de um aparelho telefônico em março de 1876, as telecomunicações não pararam de evoluir. Atualmente, mais de 700 milhões de linhas telefônicas estão instaladas no mundo.

O setor de comunicações, constituído por telecomunicações, computação e entretenimento, vem crescendo no mundo a uma taxa de 7% ao ano. Esta taxa é cerca de duas vezes a taxa de crescimento anual da economia mundial. As justificativas para a taxa de crescimento acima da economia como um todo são, entre outros motivos, o aumento no número de terminais fixos e de equipamentos celulares, a multiplicação do número de usuários de equipamentos de informática para acesso à Internet, o aumento de transações econômicas (seja simplesmente através dos caixas eletrônicos, seja entre países, ou mesmo entre continentes diferentes), e de serviços de educação à distância (teleeducação). Torna-se essencial o aumento de toda a infra-estrutura de informação para suportar essa demanda.

O setor de serviços vem aumentando sua contribuição na composição do produto nacional bruto (PNB), podendo chegar a representar metade do seu valor em alguns países. Mesmo nos países subdesenvolvidos, o setor de produção de mercadorias vem reduzindo suas contribuições (MC, 1997).

A Figura 1.1 mostra a evolução do serviço de telecomunicações no mundo em comparação com a evolução da economia, entre 1990 e 1995.

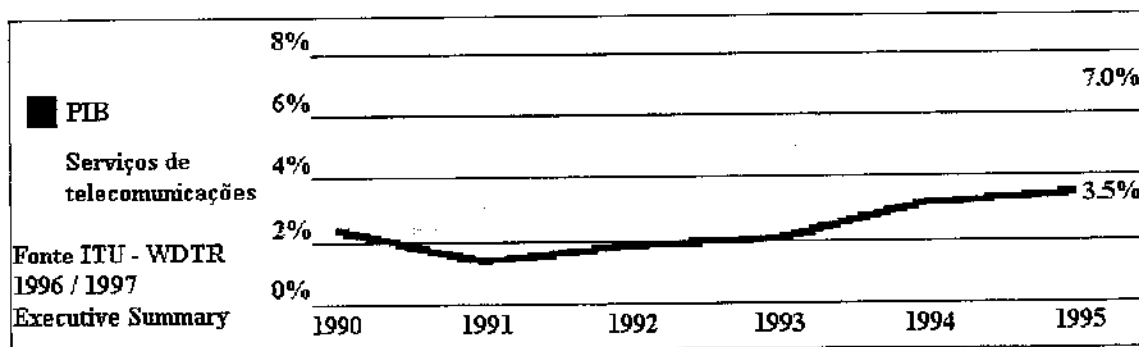


Figura 1.1 – Comparação entre taxas de crescimento anual (1990 a 1995).

Outro fator que reflete no crescimento dos serviços de telecomunicações é a atração de novos capitais em muitos países em desenvolvimento como consequência da abertura do mercado (MC, 1997). A Figura 1.2 apresenta a evolução do número de países que permitem a competição em diversos serviços de telecomunicações.

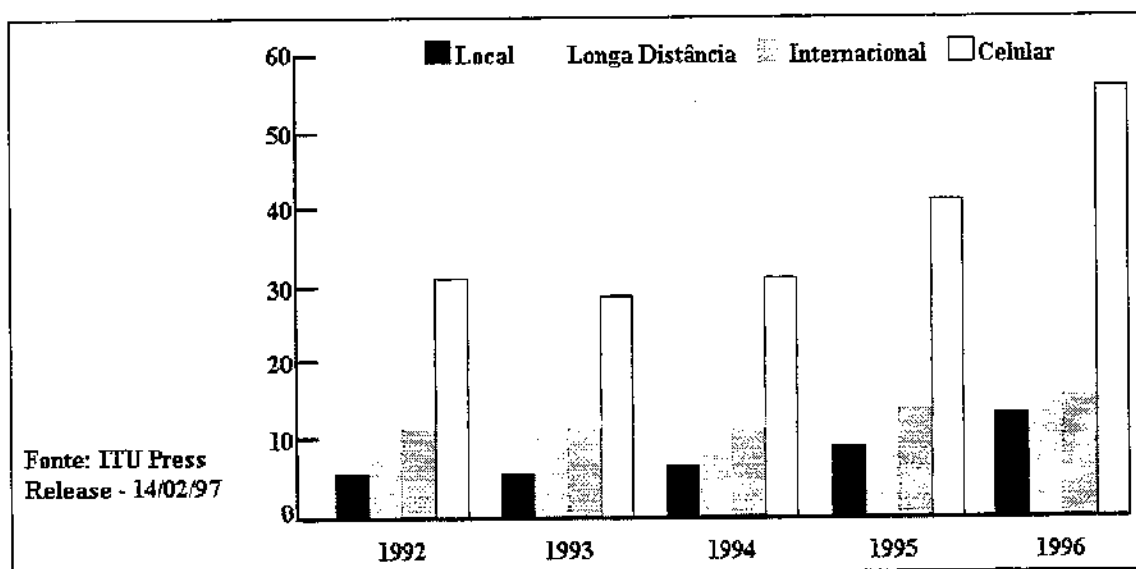


Figura 1.2 – Número de países com competição de serviços.

No Brasil, ao longo das últimas décadas, o serviço telefônico público foi explorado pela Companhia Brasileira de Telecomunicações (TELEBRAS) – os dados e tabelas mencionados nesse item são baseados no trabalho “Telecomunicações Brasileiras” (Fiorentino, 1996), publicado no *IEEE Communications Magazine*. A TELEBRAS era uma “holding” composta de 27 companhias operadoras (COs) e mais a EMBRATEL, responsável pelas comunicações interestaduais e internacionais, além de serviços como TELEX, FAX e Internet. Cerca de 97% das linhas telefônicas do país eram controladas pela

TELEBRAS; os 3% restantes eram explorados por 4 empresas (1 privada, 2 municipais e 1 estadual).

As quatro operadoras independentes são a CRT (Companhia Riograndense de Telecomunicações), controlada pelo Governo do Estado do Rio Grande do Sul, que atua na quase totalidade deste Estado; a CTBC (Companhia de Telecomunicações do Brasil Central), empresa privada com sede em Uberlândia-MG, atuando em partes dos Estados de Minas Gerais, São Paulo, Goiás e Mato Grosso do Sul; a SERCOMTEL S/A Telecomunicações, atuando no município de Londrina, Estado do Paraná; e a CETERP (Centrais Telefônicas de Ribeirão Preto S/A), atuando em Ribeirão Preto-SP. As duas últimas são vinculadas às prefeituras municipais.

O sistema TELEBRAS, antes de sua privatização em 1998, estava em 12º no “ranking” das maiores empresas telefônicas mundiais, contando com cerca de 17,7 milhões de linhas telefônicas. A densidade de terminais telefônicos instalados para cada 100 habitantes era de 11,92%; todos os municípios e 80% dos distritos, contendo 90% da população brasileira, eram servidos por telefones.

As empresas operadoras (sistema TELEBRAS e independentes) investiram bastante nos últimos anos. A Figura 1.3 mostra o montante aplicado pelas operadoras no período de 1994 a 1996 (MC, 1997).

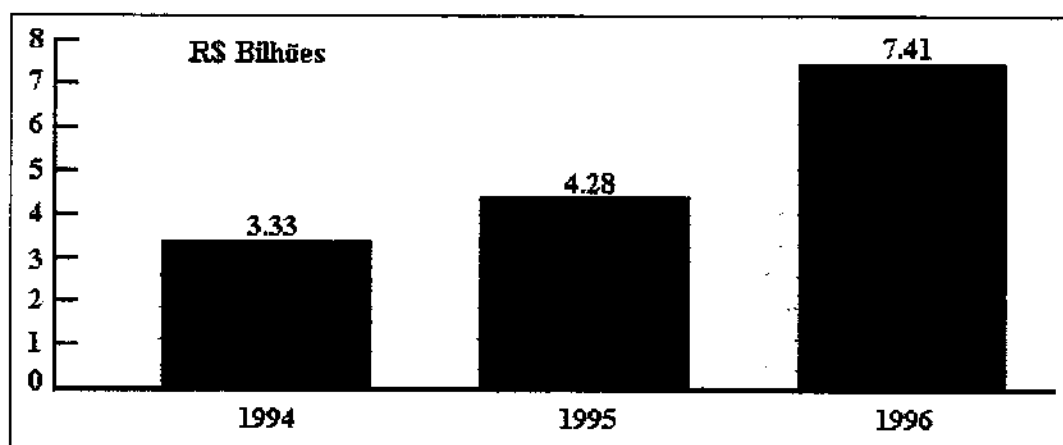


Figura 1.3 – Evolução do investimento total das operadoras de telecomunicações.

Em 1995 a “holding” tinha 85.000 empregados e estimava-se seu patrimônio em US\$ 8,4 bilhões. Separada em suas empresas operadoras, a TELEBRAS foi vendida por R\$ 22 bilhões em julho de 1998.

A ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações) é o órgão governamental que regulará o setor de telecomunicações, agora controlado pela iniciativa privada e detentor de um mercado dividido em classes bastante distintas. De um lado, empresas que necessitam de sistemas de comunicação com tecnologias sofisticadas e as famílias com alto poder aquisitivo; do outro lado, pequenas empresas e a grande maioria da população. A existência dessas duas classes dificulta decisões sobre as melhores tecnologias para expansão da rede.

Para os próximos anos, esperam-se no país investimentos de dezenas de bilhões de dólares na expansão dos atuais telefones fixos, alcançando-se em 2003 a marca de 40 milhões de terminais. As tabelas a seguir (Tabela 1.1 e Tabela 1.2) resumem as metas brasileiras para o atendimento dos telefones fixos e suas densidades por 100 habitantes.

Atendimento	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2003
Telefones fixos (em milhões)	13,3	14,6	16,5	19,5	22,7	26,0	40,0

Tabela 1.1 – Metas no atendimento de telefones fixos.

Densidade de linhas	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2003
Terminais fixos/100 habitantes	8,4	9,3	10,4	11,6	13,1	15,8	23,2

Tabela 1.2 – Densidade dos telefones fixos.

1.2 Rede Externa

Uma das partes do sistema de telecomunicações que receberá significativos recursos, caso as metas se cumpram, é a rede externa. A rede externa faz a conexão dos assinantes aos centros de fios telefônicos. Atualmente, as redes externas são quase que totalmente formada por cabos metálicos e compõem-se de duas sub-redes: a primária, ou de alimentação, e a secundária, ou de distribuição, ilustradas na Figura 1.4. A rede primária liga o centro de fios aos armários de distribuição, geralmente, por vias subterrâneas. A rede secundária liga os armários de distribuição aos assinantes, através de cabos aéreos.

Na rede primária, novas tecnologias têm surgido, empregando-se cada vez mais fibra ótica e novos conceitos para transmissão – como o “Synchronous Digital Hierarchy” (SDH), por exemplo. Esta tendência leva a novas topologias de rede e permite a introdução

de equipamentos para atender demandas mais amplas do que a de comunicação tradicional por voz (multimídia, por exemplo).

As previsões também apontam para a utilização das fibras óticas na rede secundária – termos como FTTC (“Fibber to the Curb”), FTTB (“Fibber to the Building”) e FTTH (“Fibber to the Home”), designando o destino da fibra ótica na rede de distribuição, são indicadores dessa tendência. No entanto, o custo alto dessas implementações ainda dificulta seu uso (Gavish, 1995; Luvison et al., 1996; Moncalvo, 1993; Shirakawa, 1989). Uma alternativa intermediária é o uso de soluções híbridas, utilizando a fibra ótica juntamente com cabos coaxiais (Careless, 1996; Lyford e Hart, 1994).

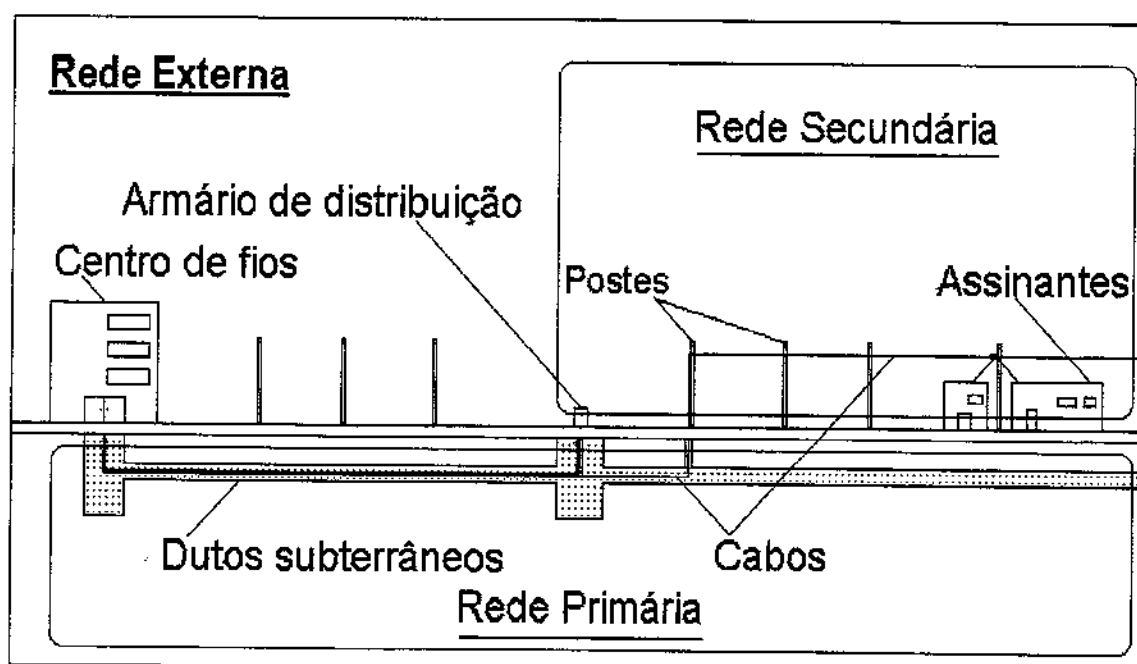


Figura 1.4 – Rede Externa.

A necessidade do aproveitamento máximo dos cabos de cobre existentes, procurando usá-los como meio físico para altas taxas de transmissões digitais, impulsionou pesquisas em novos padrões de transmissão. Tecnologias como HDSL (“High Bit-Rate Digital Subscriber Line”), ADSL (“Asymmetric Digital Subscriber Line”) e VDSL (“Very High Bit-Rate Digital Subscriber Line”) já são alternativas implementáveis (Luvison et al., 1996; Moncalvo, 1993).

1.3 Proposta do Trabalho

Fazer o projeto da rede externa consiste em encontrar “as melhores” alternativas para reconfiguração da rede primária e secundária de modo a atender às novas demandas. Atualmente, o projetista usa apenas os mapas impressos da rede e informações de demanda, muitas vezes não conseguindo visualizar possíveis economias com o redirecionamento do fluxo através de trechos da rede onde já existam cabos instalados. Também é difícil avaliar ganhos com o remanejamento da filiação dos assinantes aos armários.

Reduzir o custo do projeto usando métodos exatos de otimização é praticamente inviável. A complexidade de resolução de um problema de projeto de rede é NP-Completo (Johnson et al., 1978) e suas variantes podem ser fortemente NP-Hard (Magnanti e Mirchandani, 1993).

No entanto, métodos heurísticos para obtenção de boas soluções aproximadas e ferramentas computacionais com interfaces amigáveis podem ser usadas para se conseguir redução no tempo e melhora na qualidade do projeto de redes externas. Esse tipo de sistema, dito “sistema de apoio à tomada de decisão” (DSS - “Decision Support System”), apoia o projetista, avaliando suas indicações e sugerindo melhorias automaticamente (Jack et al., 1992).

O trabalho, dividido em três etapas, apresenta metodologias de otimização e uma ferramenta computacional para o projeto de rede telefônica externa. Diante da situação atual e das tendências do setor de telecomunicações, incluiu-se o tratamento de novas tecnologias como as fibras e armários óticos.

A primeira etapa trata, basicamente, do problema de localização dos novos armários. Os armários antigos são fixados em suas posições atuais e suas áreas de abrangência são recalculadas em função da nova demanda. A localização dos novos armários é modelada como um problema de determinação de medianas (Christofides, 1986). Empregam-se, na solução, métodos para problemas de fluxo de custo mínimo, heurísticas construtivas e de melhoria (busca local).

A partir da solução encontrada na primeira fase, a segunda etapa encarrega-se de definir os cabos que irão compor a rede secundária. Inicialmente, encontra-se uma solução factível através da análise de cada trecho da rede. Em seguida, avaliam-se os fluxos para definição da modularidade dos cabos, levando-se em consideração a rede antiga. Buscas

locais são então empregadas a fim de reduzir o custo da solução inicial obtida. As buscas fundamentam-se em "movimentos" que incluem e retiram arcos (isto é, cabos) da rede. Além disso, os armários novos são testados em posições diferentes da inicialmente definida, considerando-se o custo de interligação dos pontos candidatos com a rede de galerias existente. A solução inicial ajustada, construída por buscas locais, é melhorada numa etapa posterior através de métodos de otimização combinatória.

Finalmente, a última etapa determina a interligação dos novos armários com a rede primária existente. Uma solução inicial, obtida através do caminho mínimo entre os novos armários e a rede de galerias existente, é melhorada com a avaliação de novos trechos que possam reduzir o custo do projeto.

Todo o sistema faz uso de componentes da teoria dos grafos, como nós, arcos e árvores.

1.4 Organização da Tese

Maiores detalhes sobre a rede externa são apresentados no próximo capítulo. Temas como as configurações, topologias e novas tecnologias são discutidos.

No Capítulo 3, discute-se melhor o problema de projeto de rede externa e apresenta-se sua formulação matemática. Inicialmente, expõe-se as etapas e considerações relevantes necessárias em um projeto para a rede externa. Em seguida, mostra-se como o problema foi dividido e o tratamento em cada uma das fases. Finalmente, apresenta-se a formulação de cada uma das etapas.

A metodologia de resolução do problema é apresentada no Capítulo 4, onde se discute a abordagem e as técnicas de otimização empregadas nas etapas. Informa-se também os detalhes sobre a ferramenta computacional e o modo como foi implementada.

Resultados práticos do trabalho são ilustrados em alguns estudos de caso no Capítulo 5.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2 – Rede Externa

2.1 Introdução

Este capítulo descreve redes externas de telecomunicações, com seus componentes, topologias, equipamentos e tendências. Rede externa é a parte dos sistemas de telecomunicações que liga os centros de fios aos assinantes.

Dentre as redes que compõem o sistema telefônico, as redes externas são as que menos receberam investimentos para modernização nas últimas décadas. Por isso, dos investimentos esperados para a área de telecomunicações, grande parte será destinado às redes externas. Novas pesquisas, tanto em meios de transmissão como em equipamentos, têm impulsionado a modernização dessas redes (Luvison et al., 1996; Moncalvo, 1993).

O próximo item descreve as redes brasileiras para a telefonia convencional (transmitem voz e dados a baixas velocidades). Em seguida, tem-se maiores detalhes sobre redes externas, mostrando-se seus componentes, equipamentos e tendências.

2.2 Rede Telefônica Convencional

A telefonia convencional compõem-se das seguintes sub-redes: rede de acesso, rede de entroncamento local, rede de entroncamento interurbano e os sistemas de comutação. A relação entre essas sub-redes está ilustrada na Figura 2.1.

A rede de acesso é formada pela rede externa e pelo sistema móvel celular. Ela é a rede que faz a ligação do usuário até a central de comutação. No futuro, essa rede também terá a telefonia celular fixa e o PCN (Personal Communication Network) (Formigoni, 1995).

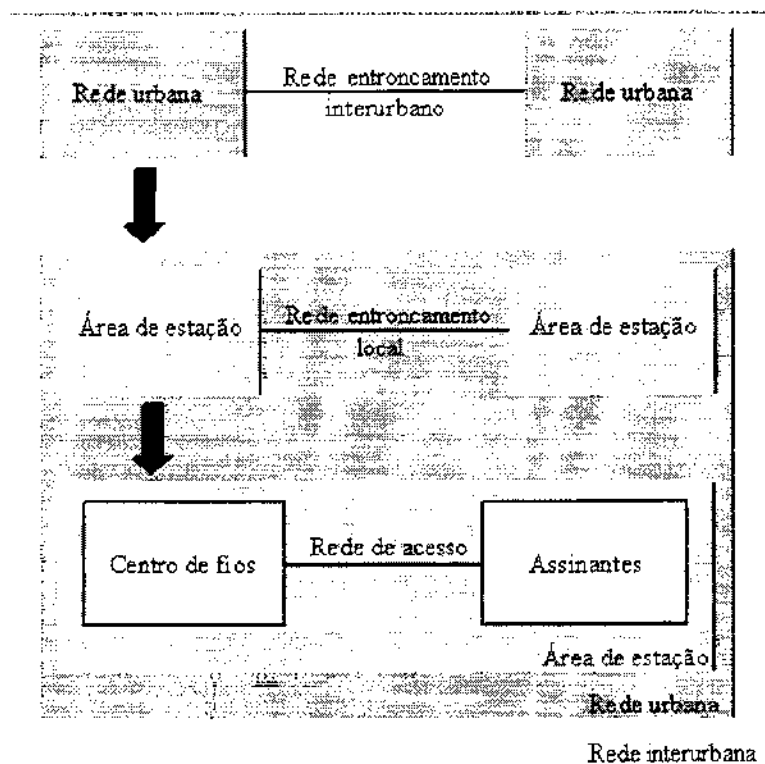


Figura 2.1 – Rede telefônica convencional.

Como ilustrado na Figura 2.2, cada centro de fios (podendo ter várias centrais de comutação) atende uma determinada região geográfica, chamada de área de estação. Nessa área há diversas seções de serviço (SS) que são subdivisões da área, atendidas pelos pontos de alimentação, ou pontos de controle. As seções de serviço são consideradas as menores áreas para planejamento e projeto da rede. Nos pontos de controle são localizados os armários de distribuição; é onde se interligam as redes primária e secundária, as duas redes que compõem a rede externa.

A rede primária, ou de alimentação, liga a central de comutação até os armários de distribuição, através de cabos que, em geral, passam por dutos subterrâneos. A rede secundária, ou de distribuição, liga os armários de distribuição até os assinantes, dentro da seção de serviço que atua. Essa ligação é feita através de pares de fios metálicos, agrupados em cabos aéreos que usam o posteamento das ruas.

A rede de entroncamento local faz a interligação de vários centros de fios de uma mesma região geográfica (cidade, por exemplo), formando a rede urbana. Antigamente,

utilizavam-se pares de fios metálicos para essa interligação; atualmente, utilizam-se, normalmente, fibras óticas, acomodadas em dutos subterrâneos.

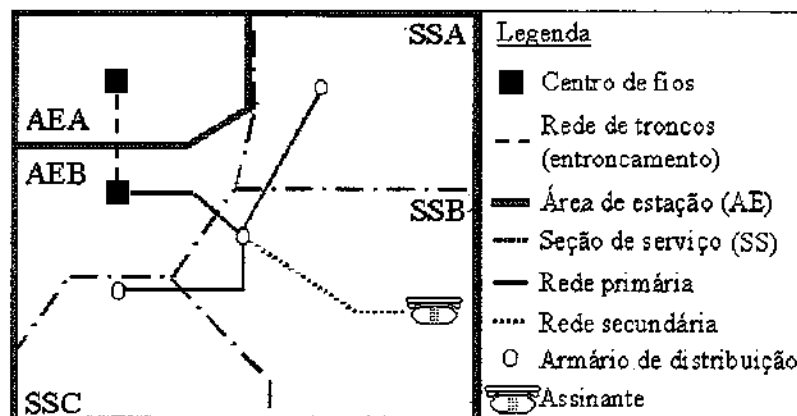


Figura 2.2 – Rede urbana.

A interligação de diferentes redes urbanas é realizada através de uma rede de entroncamentos interurbanos. O sistema de transmissão depende da distância e do tráfego entre regiões. Pode-se utilizar enlaces de microondas, enlaces via satélite e também uma rede de fibra ótica para se fazer a interligação. Logo, vê-se que o planejamento da rede de troncos exige cuidados, principalmente nos quesitos segurança e confiabilidade, pois nela trafega grande fluxo de ligações (Santos, 1997; Mello, 1996).

Inúmeros trabalhos propõem metodologias para se planejar uma rede de troncos, inclusive com redundância, a fim de satisfazer quesitos de sobrevivenciabilidade – a capacidade da rede manter suas ligações operantes no caso de falha ou acidente com alguma central ou fibra (Monma et al., 1989; Mello, 1996). Os acidentes em redes de telecomunicações podem ter diversas causas: fogo, terremoto, marés altas, furacões, acidentes com meios de transporte, guerra, hackers, problemas com software, etc. Mello (1996) propõe metodologias para evitar o comprometimento nas transmissões telefônicas causadas por acidentes.

Atualmente, adota-se uma divisão de centrais em clusters e backbones, como mostrado na Figura 2.3. Os clusters são agrupamentos de centros de fios, levando-se em conta proximidades geográficas e interesse de tráfego. Dentro dos clusters, esses centros de fios são ligados a uma única estação, a estação HUB. As estações HUB são interligadas através do backbone, uma rede de alta hierarquia (topologia em anel).

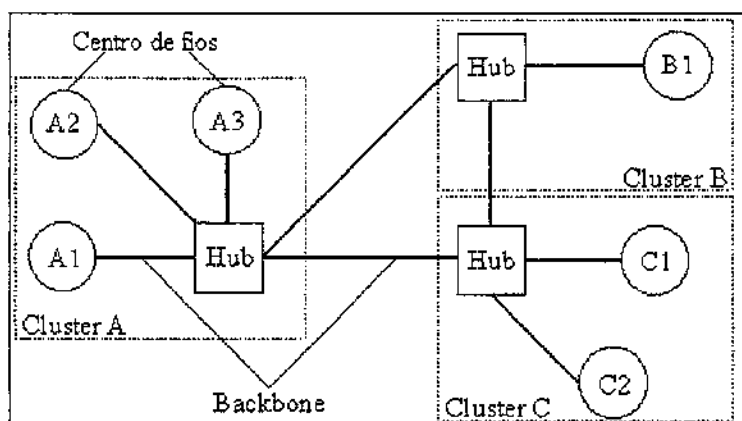


Figura 2.3 – Clusters e HUB.

Como dito anteriormente, o centro de fios pode ter uma ou várias centrais de comutação, compondo o sistema de comutação. São essas centrais que realizam a conexão dos assinantes a ela ligados e promovem a ligação com assinantes de outras centrais.

2.3 Rede Externa

As duas sub-redes que compõem a rede externa, ilustradas na Figura 2.4, são a rede primária (ou de alimentação) e rede secundária (ou de distribuição); descritas melhor a seguir.

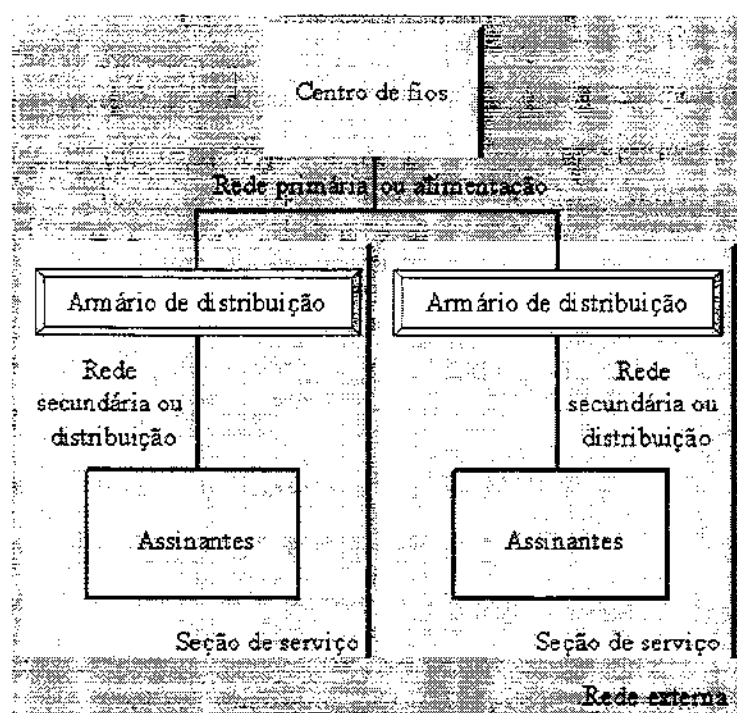


Figura 2.4 – Rede externa.

2.3.1 Rede Primária ou Rede de Alimentação

De acordo com a tendência de modernização da rede externa, considera-se, nesse trabalho, o possível uso de duas tecnologias para a rede primária. A primeira delas são os tradicionais armários e cabos metálicos; a outra, os armários óticos e os cabos de fibras óticas.

A rede primária liga a central de comutação aos armários de distribuição, localizados nas ruas. Seus componentes principais são a central, os dutos subterrâneos, as caixas subterrâneas, armários de distribuição e os cabos de alimentação. No caso da rede primária metálica, os cabos metálicos saem da central e são conduzidos através de dutos subterrâneos até os armários metálicos. No caso de ser ótica, os cabos de fibras óticas também saem da central com destino aos armários óticos. No entanto, pode-se usar os dutos subterrâneos ou o posteamento das ruas para se acomodar esses cabos.

As caixas subterrâneas servem para realização de serviços, como emendas, e também como pontos estratégicos de verificação e manutenção dos cabos – pois esses estão sempre sujeitos a danificações.

Passaremos a descrever os componentes da rede primária.

Central Telefônica

Dentro de uma central existem equipamentos que controlam e direcionam as chamadas telefônicas, além de registrá-las. Várias centrais podem estar localizadas no mesmo espaço físico de outras centrais, formando então o centro de fios (estação telefônica), como ilustrado na Figura 2.5. Cada central telefônica tem uma certa capacidade e, em geral, comporta 10.000 terminais.

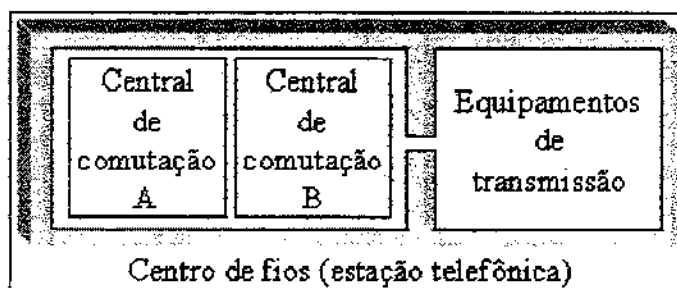


Figura 2.5 – Centro de fios.

Em uma rede primária metálica, fios telefônicos saem da central condicionados em cabos metálicos de grande modularidade (2.400 pares, por exemplo) e percorrem os dutos subterrâneos. Na rede ótica primária, os sinais elétricos são convertidos em sinais óticos pelos equipamentos alocados na própria central. Essas sinais passam a percorrer os cabos de fibra ótica que deixam a central e chegam aos armários óticos, onde poderá haver o processo inverso de conversão dos sinais (passando de óticos para elétricos).

Dutos Subterrâneos

Os dutos servem para alocar os cabos (metálicos ou óticos) que saem da central para os armários. Geralmente, em cada trecho de duto, entre uma caixa subterrânea e outra, existem “furos” dispostos lado a lado e um sobre o outro (normalmente seis ou oito furos) (Figura 2.6). Os furos são revestidos com tubos cerâmicos ou plásticos.

Caixas Subterrâneas

As caixas subterrâneas têm de 5 a 12m³ (Soares et al., 1991), e geralmente são construídas para realização de serviços de manutenção e emenda (Figura 2.6). Para a rede primária metálica, poderá ocorrer a distribuição de cabos metálicos dentro dessas caixas subterrâneas. Além disso, as caixas próximas aos armários metálicos ajudam na seleção e realização de emendas de pares metálicos destinados à sua área de atuação.

Os custos elevados de construção, tanto das caixas quanto dos dutos, fazem com que sejam projetadas para terem um alto índice de aproveitamento.

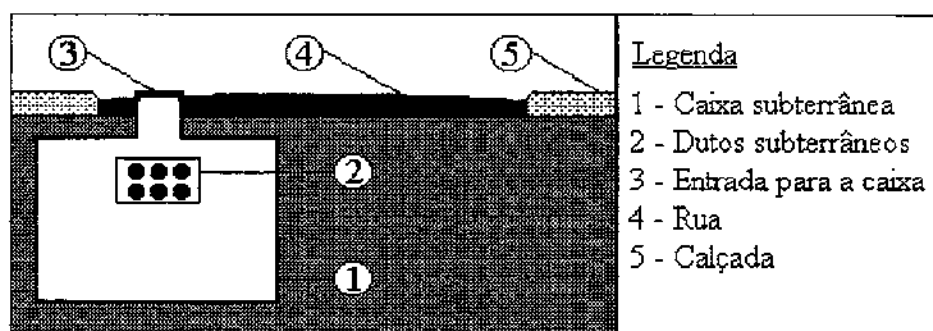


Figura 2.6 – Caixa e dutos subterrâneos.

Tipos de Cabos Metálicos

Os cabos metálicos têm diversos tipos, cada um com características específicas para determinado uso. Essas características são, por exemplo, a modularidade (ou seja, o número de pares telefônicos que eles possuem), a bitola (que indica o diâmetro dos fios que compõem os pares telefônicos), o tipo (aéreo, subterrâneo ou auto-sustentável), o peso (para fins de cálculo de tração nos postes da rede), e, naturalmente, o custo associado a cada cabo.

A bitola depende muito da distância do trecho em relação ao armário metálico. Quanto maior a distância até o armário, maior a bitola. Isto é necessário devido às atenuações ao longo do caminho até o assinante.

Para a rede primária, os cabos metálicos possuem, normalmente, modularidade superiores a 200 pares. O custo dos cabos variam de acordo com sua modularidade; geralmente são mais caros os que possuem maior número de pares.

Fibra Ótica

Com a descoberta do LASER, em 1959, tentou-se transmitir feixes de raios concentrados através da atmosfera. No entanto, essa tentativa fracassou devido à heterogeneidade do meio. Novas pesquisas foram realizadas e descobriu-se que esses raios poderiam ser transmitidos em tubos homogêneos, transparentes e de grande pureza. Neles, os raios acompanhariam seu eixo longitudinal, mesmo com o tubo curvado. Estava descoberto o princípio das fibras óticas (Ferrari, 1991).

As fibras óticas têm como principais vantagens suas pequenas dimensões, peso reduzido, flexibilidade e alta resistência. Ela permite altas taxas de transmissão e têm uma baixa atenuação por quilômetro. Como características especiais, as fibras não são inflamáveis, têm imunidade eletrostática e eletromagnética, resistem a altas temperaturas e têm custo reduzido.

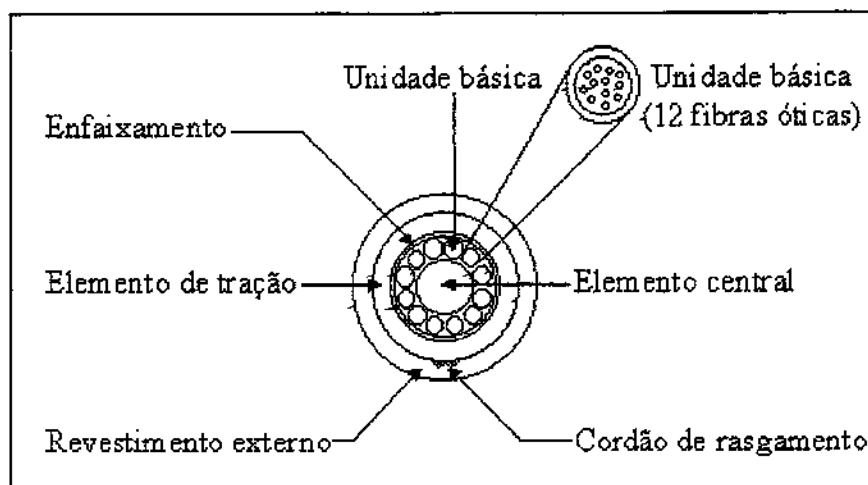


Figura 2.7 – Fibra ótica.

O acondicionamento das fibras dá-se em cabos óticos multifibras, com várias capacidades e contando com uma proteção externa que varia conforme a aplicação (aérea, armado ou para dutos), ilustrado na Figura 2.7. Emendas nas fibras são processos delicados, que exige alta qualidade para se evitar perdas do sinal. Todo tipo de tração e curvatura deve obedecer às normas do fabricante, para se evitar rupturas ou mesmo fissuras, que podem prejudicar a transmissão.

Armários de Distribuição

Os armários de distribuição metálicos, ilustrados na Figura 2.8, são, geralmente, localizados em pontos estratégicos para a distribuição dos pares para a rede aérea. Aqueles que ficam no solo, possuem cerca de 1.0m de altura, 0.8m de largura e 0.3m de profundidade, normalmente acomodados em bases de alvenaria. Existem armários que ficam suspensos, mas estes têm capacidade menor. Ambos são feitos de material resistente, para suportar ações do tempo e atos de vandalismo.

No seu interior, o armário possui furos na base para comunicação com a caixa subterrânea. Por alguns deles chegam os cabos metálicos da caixa, sendo alocados em blocos fixados na parede do armário. São nesses blocos que os operadores fazem a distribuição da numeração dos pares telefônicos; realizam também manutenções. Saindo dos blocos, os pares telefônicos são agrupados novamente em cabos metálicos e retornam à caixa subterrânea pelos furos restantes da base do armário. Voltando à caixa subterrânea, os

cabos são encaminhados para a rede aérea através das saídas laterais, ilustradas na Figura 2.9.

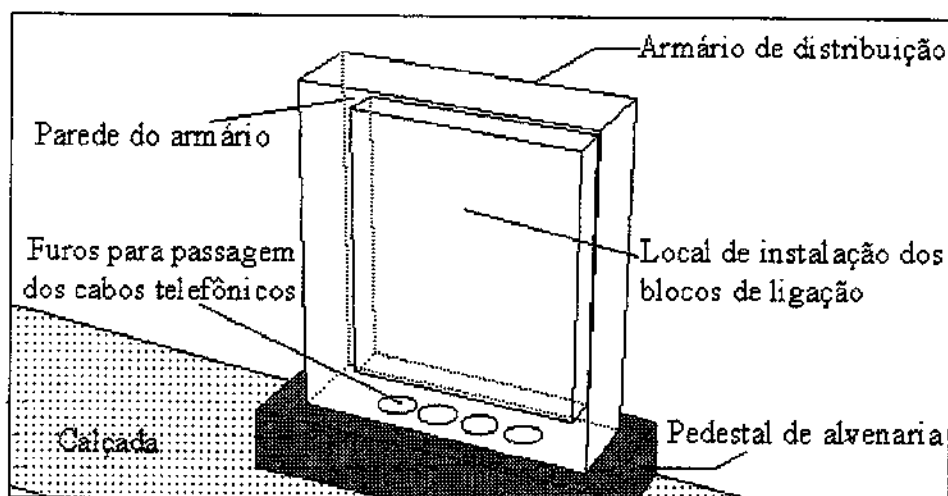


Figura 2.8 – Armário de distribuição metálico.

O armário ótico têm dimensões um pouco maior que o armário metálico. Apesar da possibilidade de serem alocados nas ruas, privilegiam-se locais mais seguros, pois, internamente, há equipamentos responsáveis pela conversão ótica-elétrica, geralmente de custos elevados.

Os sinais óticos, ao serem convertidos para elétricos, passam a percorrer a rede secundária através dos cabos metálicos. O início dos pares metálicos secundários ocorre de maneira semelhante ao descrito no armário metálico, ou seja, dentro do armário ótico há blocos de ligações que servem para a manutenção e distribuição dos pares metálicos.

Cada armário (metálico ou ótico) possui uma identificação e em seu interior está o mapa de distribuição dos pares – usado para orientar o operador no momento da manutenção das linhas.

2.3.2 Rede Secundária ou Rede de Distribuição

A rede de distribuição faz a ligação dos armários de distribuição até o assinante. Os cabos metálicos para a rede secundária saem do armário (metálico ou ótico) pelas saídas laterais existentes ao lado do postes e próximos aos armários, como ilustra a Figura 2.9.

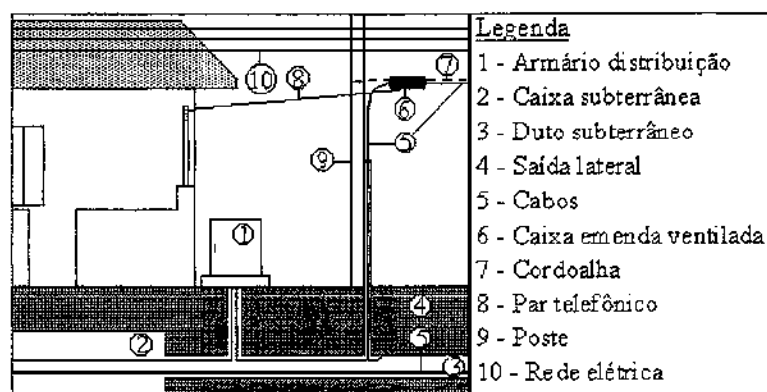


Figura 2.9 – Rede de distribuição.

Uma vez na superfície, os cabos passam a percorrer as ruas, distribuindo os pares aos assinantes, ao longo do caminho. Para que os cabos metálicos sejam esticados e firmes através do posteamento, eles são fixados a cabos de aço, chamados cordoalha. Outros acessórios são utilizados para realizar a correta disposição dos cabos através da rede aérea.

Geralmente, estipula-se um número máximo de cabos aéreos por trecho entre postes (normalmente dois cabos). Esta determinação deve ser levada em conta no momento de elaboração do projeto da rede.

Para distribuir os pares aos assinantes, existe um equipamento específico chamado “caixa de emenda ventilada” (CEV) ou caixa terminal. A CEV fica presa ao cabo e próxima do poste, como na Figura 2.10. Nela entram os pares telefônicos trazidos pelo cabo aéreo e saem finos cabos de par trançado que vão até aos assinantes próximos ao poste. Pode-se ligar até vinte assinantes a cada CEV. As CEV também podem ser usadas para se realizar distribuição de cabos menores ao longo das ruas, principalmente em cruzamentos.

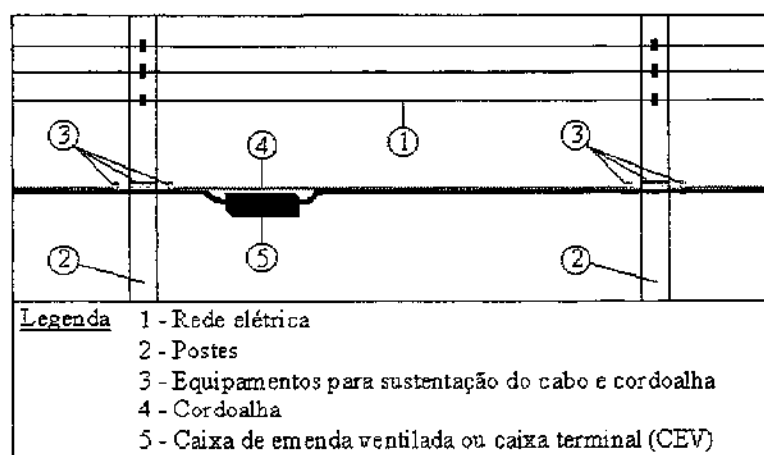


Figura 2.10 – Equipamentos da rede de distribuição.

Finalmente, cada par trançado que chega ao assinante é conectado ao aparelho telefônico, equipamento final de toda a rede.

Tipos de Cabos

Como descrito anteriormente, há diversos tipos de cabos metálicos que possuem características para determinados usos. A definição da modularidade do cabo metálico, em um trecho do projeto da rede secundária, está diretamente associada ao número de assinantes que “passam” pelo trecho.

Na rede secundária, os cabos aéreos possuem uma modularidade máxima (normalmente 200 pares telefônicos). Novamente, o custo dos cabos varia de acordo com sua modularidade.

Caixa de Emenda Ventilada

As caixas de emenda ventilada (CEV), ou caixas terminais, são necessárias para se ligar o par telefônico trazido pelo cabo aéreo até o assinante. São equipamentos que ficam suspensos e presos aos cabos aéreos, próximos aos postes.

Possuem cerca de 40 cm de comprimento e são feitas de material resistente para suportar as ações do tempo e possíveis impactos. No seu interior, as CEV possuem equipamentos denominados “blocos de ligação telefônica” (BLT). É no BLT que os pares que serão distribuídos aos assinantes próximos à CEV são conectados e depois distribuídos ao usuário. Cada BLT tem capacidade para até 10 assinantes e cada CEV comporta até 2 BLT, totalizando 20 usuários por CEV. Os BLT contêm produtos químicos para evitar umidade, que compromete a qualidade da transmissão telefônica.

Há casos em que as CEV são utilizadas para distribuição dos pares para outros cabos de menor modularidade, principalmente em cruzamentos de ruas.

2.4 Evolução e Tendências na Rede Externa

A necessidade de introdução da fibra ótica na rede externa se deve, principalmente, a dois motivos: a crescente demanda por serviços que requerem altas taxas de transmissão e a exigência por novos serviços (TV à cabo, video-on-demand, videofone, videoconferência, TV interativa).

No futuro próximo, espera-se um crescimento anual de 15% no uso de fibra ótica, mas considerando-se apenas as redes de entroncamento, onde está concentrado o maior fluxo (Formigoni, 1995).

Por ser basicamente metálica, a rede externa não emprega topologias complexas na distribuição telefônica até os assinantes (topologia em anel, por exemplo), principalmente devido a uma limitação técnica dos fios de cobre. Atualmente, fios dedicados de cobre ligam o assinante ao centro de fios (topologia estrela simples), onde muitas vezes o emprego de novas técnicas de transmissão (mais sofisticadas) é impossível. Junto com a limitação técnica dos fios de cobre há o alto processo de deterioração da rede externa, dificultando sua evolução e, conseqüentemente, o fornecimento de novos serviços (Dall'Antonia, 1992; Formigoni, 1995).

Para melhorar os recursos das redes externas, permitindo o oferecimento de melhores serviços, têm-se a RDSI (Rede Digital de Serviços Integrados), onde além dos serviços tradicionais de voz e dados, consegue-se fornecer outros serviços com altas taxas de transmissão como videofone, TV à cabo, vídeo-sob-demanda e videoconferência – maiores detalhes sobre a RDSI podem ser vistos em Formigoni (1995).

Muitos países têm adotado uma seqüência de etapas para o emprego da fibra ótica na rede externa. Este procedimento procura reduzir os problemas decorrentes das indefinições quanto à tecnologia e tipos de serviços, e do elevado custo de implantação da rede de fibras óticas até o assinante. Uma possível seqüência para essas etapas é descrita a seguir.

- a) Utilização de equipamentos para transmissão e comutação que possibilitem a máxima utilização da rede atual. Entre elas: PCM (Pulse Code Modulation) de assinante, ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line), HDSL (High Bit-Rate Digital Subscriber Line), VDSL (Very High Bit-Rate Digital Subscriber Line), concentradores e pequenas centrais digitais.
- b) Atendimento de grandes assinantes por fibra, dispondo rotas específicas para clientes (geralmente empresas) que desejem grandes taxas de transmissão. Essas redes de assinantes constituem as chamadas Rotas Estratégicas (RE).
- c) Implantação da fibra na rede alimentadora, com a rede primária passando a ser constituída por cabos de fibra ótica, e deixando a rede de distribuição na mesma forma

atual. A conversão dos sinais digitais para analógicos poderia se dar nos pontos de distribuição, sendo os armários de distribuição substituídos por pequenas centrais, ou por concentradores, ou ainda por multiplexadores. Esta rede é chamada de Rede Ótica Primária (ROP).

d) Implantação da rede ótica de assinante. Seria a última etapa no processo de digitalização da rede externa. A fibra chegaria até o assinante, ou até a pontos bem próximos das residências, onde seria realizada a conversão analógica/digital. Esses pontos estariam capacitados a atender diversos assinantes, cujas ligações seriam através de cabos coaxiais ou pares metálicos trançados. Concluída essa etapa, têm-se a Rede Ótica do Assinante (ROA).

Nas rotas estratégicas, o intuito é servir clientes que demandem grandes taxas de transmissão (maiores ou iguais a 2Mbps) – preferencialmente os que se encontram na mesma área de estação. Os serviços a serem disponibilizados são transmissão de voz e dados a baixas e médias velocidades.

Já a intenção com a rede ótica primária é a redução nos custos de implantação da rede – esses custos vêm diminuindo nos últimos anos, devido à queda nos preços da fibra ótica e dos equipamentos. Deseja-se também, com a ROP, reduzir investimentos em infraestrutura, como dutos e galerias (Curado, 1996). Os vários modelos que podem ser usados para a implantação da rede ótica primária são discutidos detalhadamente em Formigoni (1995).

O último estágio previsto para a evolução da rede externa rumo à sua digitalização é a rede ótica de assinante (ROA). Avaliações sobre a utilização da fibra ótica até o assinante muitas vezes são divergentes (Formigoni, 1995). Alguns autores acreditavam na viabilidade econômica da rede ótica de assinante (ROA) a partir do século XXI. Outros autores acreditam que a ROA será viável à medida que crescer a demanda por serviços de vídeo-entretenimento. Portanto, sua implantação, em um prazo médio e longo, dependerá da evolução dos custos dos equipamentos, da disponibilização dos novos tipos de serviços e da concentração de assinantes. Há diversas topologias e configurações de atendimento para esse tipo de rede – detalhes sobre elas podem ser vistas em Dall’Antonia (1992) e Curado (1996).

Diante dessas possibilidades de tecnologia para a rede externa, novos serviços poderão ficar disponíveis para os usuários. Esses serviços compreenderão, além da tradicional transmissão de voz, dados e imagens em altas velocidades.

O capítulo seguinte traz os detalhes de um projeto de rede externa de telefonia. Discute-se suas restrições e se propõe uma formulação matemática para o problema de se projetar redes telefônicas externas.

Capítulo 3 – O Problema

A complexidade, os procedimentos, restrições e a formulação proposta para o problema de projetar redes externas de telefonia são tratados nesse capítulo.

3.1 Projeto de Rede Externa

Quando se planeja o atendimento de novos assinantes, duas situações são possíveis. Se a região já estiver sendo atendida por alguma central de comutação, então o projeto será de expansão. Mas se a área for desprovida de qualquer serviço telefônico, então necessita-se de um novo projeto. Em ambas as situações os projetos seguem várias etapas.

Para os projetos de expansão, deve-se analisar o número de novos assinantes para a área de estação, confrontando com a capacidade de atendimento do centro de fios daquela região. Como o centro de fios tem várias centrais, talvez apenas uma ampliação de centrais possa satisfazer a demanda de novos telefones. Outra alternativa é avaliar detalhadamente a localização geográfica dos novos assinantes, podendo-se adotar as transferências de demanda para as seções de serviço de outras centrais. Mas, se a capacidade do centro de fios está no seu limite, o problema pode ser resolvido com a construção de novos.

A localização de novos centros de fios é abordada em vários trabalhos (Nakagawa, 1984; Araújo, 1981). Nessa etapa de localização dos centros de fios e da definição de suas áreas de atendimento, procura-se sempre as melhores soluções de custo. A rede primária e o custo da construção são preponderantes na definição das novas estações.

Resolvida a capacidade do centro de fios, a próxima fase é o projeto da rede externa, feito, muitas vezes, de forma manual e trabalhosa. Apesar disso, é possível obter bons resultados, quando os projetistas conseguem identificar e avaliar as variáveis mais significativas (Rodrigues et al., 1993). No entanto, manipular um número grande de configurações, para se obter melhores resultados no projeto, é uma tarefa praticamente impossível. Rodrigues et al. (1993) propõem uma alternativa automatizada para o projeto de rede ao integrar diversos sistemas desenvolvidos em outros trabalhos.

Pode-se realizar o projeto de rede externa dividindo-o de acordo com as duas sub-redes que a compõem, ou seja, projeto da rede primária e projeto da rede secundária.

Ambos têm etapas dependentes entre si; uma decisão equivocada em uma delas pode afetar significativamente outra.

Atualmente, o projetista usa mapas impressos da área e precisa estar muito atento às diversas características da rede. Inicia-se pelo projeto da rede secundária, descrito a seguir.

3.1.1 Projeto da Rede Secundária

O projeto da rede secundária começa com a localização das novas demandas no mapa de determinada área de estação e seção de serviço. Com essa informação, a área de atuação das caixas terminais é redefinida, avaliando-se a colocação de novas. Como dito no capítulo anterior, cada caixa terminal pode atender no máximo 20 assinantes e procura-se alocar aqueles que estejam o mais próximo possível do equipamento. Internamente, cada caixa terminal possui no máximo dois blocos, chamados BLT (bloco de ligação telefônica), com capacidade de 10 assinantes cada. No bloco se realiza a ligação física dos assinantes com o cabo que passa pelo trecho. No mapa do projeto existe a indicação de quantos blocos há em cada caixa, e se algum outro deve ser instalado.

Em seguida, percorre-se o cabeamento da rua, contando o número de assinantes e indicando o total em cada trecho entre postes (fluxo de pares). Através desse valor de fluxo, determina-se a capacidade necessária dos cabos no trecho, indicando-se a necessidade de colocação de novos cabos ou a retirada de algum, substituindo-o por outro de modularidade maior.

Na distribuição dos cabos deve-se considerar a restrição de se ter um número máximo de cabos em cada trecho (normalmente dois cabos). Essa restrição é imposta pela empresa proprietária dos postes onde os cabos são fixados (normalmente, a empresa proprietária é a distribuidora de energia elétrica). Ultrapassar esse limite aumenta a tração no poste, podendo causar deslocamentos ou outras avarias.

Todo o procedimento de definição das áreas das caixas terminais, e definição dos cabos, é feito em todos os trechos da rede secundária, “subindo-se” pela rede até alcançar o armário de distribuição.

Sabendo-se quantos usuários terá uma determinada seção de serviço, o armário existente pode não ser capaz de atendê-los. Quando um armário está saturado, uma alternativa é alterar a área de atuação das seções de serviço, remanejando assinantes para

armários onde haja “folga” de pares metálicos, nas seções vizinhas do armário com capacidade acima do limite. Assim, as seções de serviço podem ser alteradas.

Se, mesmo com a alteração das seções de serviço, os armários vizinhos não forem capazes de suprir a demanda excedente, avalia-se a possibilidade de inserção de um novo armário naquela área de estação. A melhor localização desse armário pode ser difícil de avaliar, pois deve-se estar atento ao tipo de armário que será escolhido (metálico ou ótico) e à capacidade e topologia da rede alimentadora. Localizar o novo armário, sobretudo o metálico, o mais próximo possível de uma rede primária é, normalmente, a decisão mais indicada para se reduzir o gasto elevado na construção de dutos subterrâneos.

3.1.2 Projeto da Rede Primária

A rede primária “abastece” os armários de distribuição. Se ela for metálica, novos cabos metálicos deverão sair da central e percorrer a rede de galerias até alcançar o armário metálico.

Há trechos de galerias que são usados por mais de um armário, em seus caminhos até a central. Neles, a modularidade do cabo metálico subterrâneo será definida de acordo com o número de armários que compartilham o trecho. Por exemplo, se um determinado trecho da rede primária metálica for compartilhada por três novos armários (com capacidade de 600 pares cada um), bastará um cabo de 1.800 pares no trecho correspondente. No caso da rede ótica primária, um cabo de fibra ótica é suficiente para atender os armários óticos, não se necessitando definir modularidades.

Em ambos os tipos de tecnologia (metálico ou ótico), deve-se verificar a disponibilidade dos dutos subterrâneos por onde os cabos serão acomodados. Na inexistência de dutos livres, procuram-se rotas alternativas próximas ou, em uma medida mais extrema, ampliam-se os dutos da rede existente. A necessidade de expandir, ou mesmo construir, novos dutos deve ser informada pelo projetista. Esta tarefa será desnecessária caso a rede ótica primária utilize o posteamento das ruas para a passagem dos cabos óticos alimentadores.

3.1.3 Distribuição dos Pares Telefônicos

Um trabalho extremamente importante é a definição da distribuição dos pares metálicos telefônicos ao longo de todo o projeto. No caso de uma rede externa metálica,

cada par metálico sai do centro de fios com uma numeração, que deve ser seguida até o usuário. Portanto, cada cabo terá um conjunto de números identificadores dos pares metálicos que o compõe. À medida que os pares vão sendo distribuídos pelos armários ao longo da rede primária metálica, a numeração daquela seção de serviço também é informada.

De maneira análoga à distribuição dos cabos na rede primária metálica, toda essa numeração continua na rede secundária (independentemente da tecnologia utilizada na rede primária). A numeração dos pares é atribuída à medida que se percorre a “árvore” que configura a rede secundária, passando pelos cabos e caixas terminais. Todos esses dados devem ser informados no projeto.

Essa regra também deve ser obedecida para as caixas terminais que estão ligadas ao cabo aéreo metálico. No momento do projeto, indica-se as numerações atribuídas a todas as caixas terminais de cada uma das seções de serviço, ficando fácil identificar onde está sobrando pares telefônicos e onde há possíveis conflitos de alocação. As indicações de numerações normalmente são realizadas em “folhas de anotações” semelhantes à apresentada na Figura 3.1. Essa numeração é muito importante, pois é através dela que as companhias operadoras conseguem associar o par telefônico ao assinante.

CARTA DE DISTRIBUIÇÃO DE TERMINAIS DE CABO																			
ESTAÇÃO				CABO				DATA				No. da folha							
												Quant. de folhas							
Número e local do terminal										Número e local do terminal									
1										51									
2										52									
3										53									
4										54									
5										55									
6										56									
7										57									
8										58									
...										...									

Figura 3.1 – Folha de anotação da distribuição da numeração dos pares telefônicos.

3.2 Considerações no Projeto

Como dito anteriormente, o projeto de rede externa possui uma série de considerações e restrições que devem ser obedecidas de acordo com normas preestabelecidas pelas operadoras.

Com relação à utilização dos cabos ao longo da rede secundária, define-se um limite para a quantidade de cabos em cada trecho entre postes. Além disso, a modularidade de cada um deles deve obedecer um determinado valor. Talvez tenha-se que reconfigurar a “árvore” de atendimento para não transpor esses limites. Encontrar o melhor caminho para se fazer essa tarefa, ou mesmo analisar um número grande de possibilidades de configuração, pode ser uma tarefa exaustiva, ou inviável, devido ao tempo despendido na operação.

Outra restrição importante diz respeito à configuração da rede secundária. Não se pode elaborar um projeto que não seja radial, ou seja, não podemos ter um trecho onde os pares telefônicos venham de dois ou mais cabos de trechos anteriores diferentes. Pelo mesmo motivo, nenhuma caixa terminal e, conseqüentemente os assinantes ligados a ela, pode ser atendida por mais de um armário. Essas restrições são decorrentes de conveniências operacionais da rede. Manter e reparar uma rede com múltiplas rotas pode ser impraticável (Balakrishnan e Magnanti, 1995).

Os armários de distribuição têm uma capacidade que determina o número máximo de usuários de sua seção de serviço. Geralmente, as empresas operadoras deixam um percentual de pares livres para auxiliar nas operações de manutenção e outros serviços na rede – o percentual varia de operadora para operadora, podendo ser de 10 a 20%. Esta consideração deve ser levada no momento do projeto, porém não se trata de uma restrição forte; se o número de assinantes ultrapassar o limite estipulado para a folga, mas ainda for menor que 90% ou mesmo 95% da capacidade total do armário, ele ainda pode ser considerado capaz de atender a demanda.

3.3 Custos do Projeto da Rede Externa

Vários elementos formam o custo total de um projeto de rede externa. Os custos com os equipamentos referem-se à quantidade utilizada no projeto. Geralmente enquadram-se nesse item os armários de distribuição, os blocos de ligações que compõem o armário, os

equipamentos óticos, as caixas terminais, os blocos de ligações telefônicas das caixas e demais equipamentos menores.

Já os cabos telefônicos têm custo por metro, sendo, usualmente, os de modularidade maior mais caros que os de menor modularidade. Dentro da mesma modularidade, ainda há diferenças de custo em relação às bitolas dos pares, aumentando proporcionalmente ao tamanho. A Figura 3.2 mostra um gráfico dos custos mínimos com cabos, à medida que aumenta o fluxo no trecho da rede secundária (na figura, usou-se como dados os cabos de 20, 30, 50, 100 e 200 pares). Percebe-se uma função escada por partes na composição desses custos.

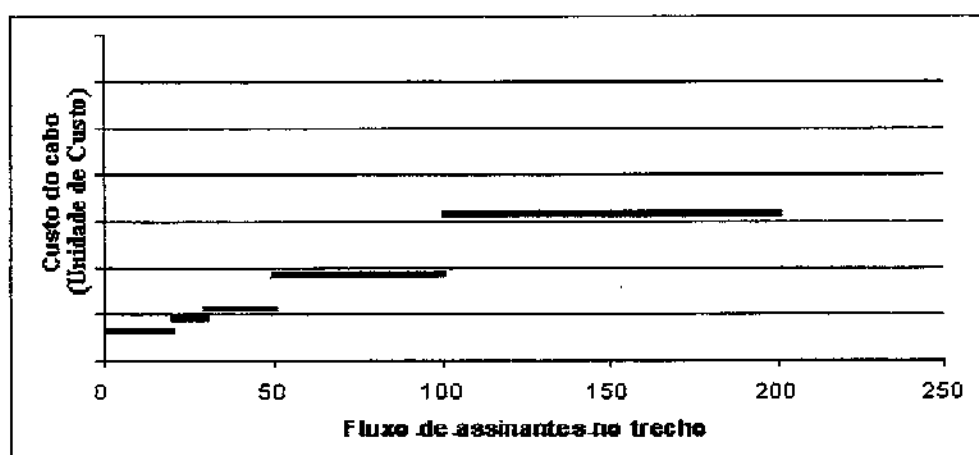


Figura 3.2 – Custo cabo telefônico em função do fluxo no trecho.

O gráfico anterior representa uma situação em que se pode ter apenas um cabo em cada trecho. Na possibilidade de mais de um cabo por trecho, o gráfico terá um comportamento como o apresentado na Figura 3.3. Nele, vemos que a função se repete após cada intervalo de 200 pares (cabo de maior modularidade considerado para o exemplo).

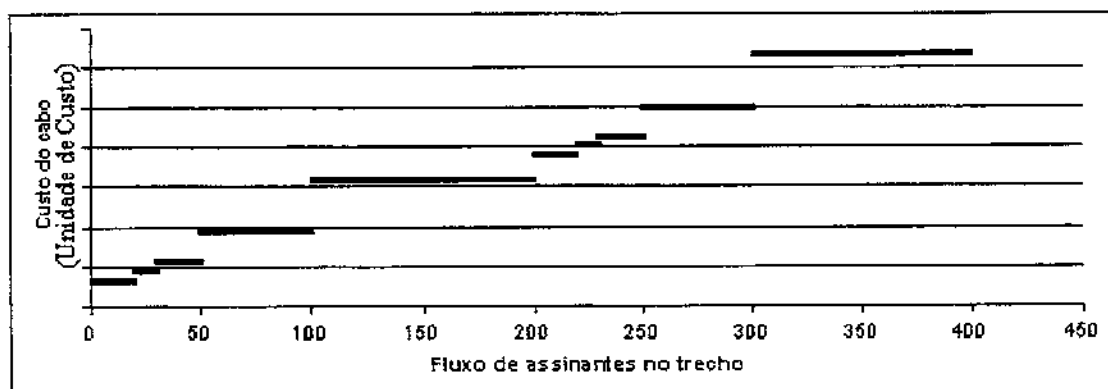


Figura 3.3 – Custo cabo telefônico com até dois cabos por trecho

Em um cenário onde já existam cabos instalados no trecho, o comportamento dos gastos mínimos com cabos será diferente. O custo permanecerá em zero até que o fluxo ultrapasse a capacidade já instalada no trecho. Só então é somado o custo mínimo de um cabo adicional para suprir a demanda. O gráfico da Figura 3.4, por exemplo, apresenta o custo mínimo de cabo para um trecho onde já tenha um cabo de 100 pares instalado, e onde se permita mais de um cabo por trecho.

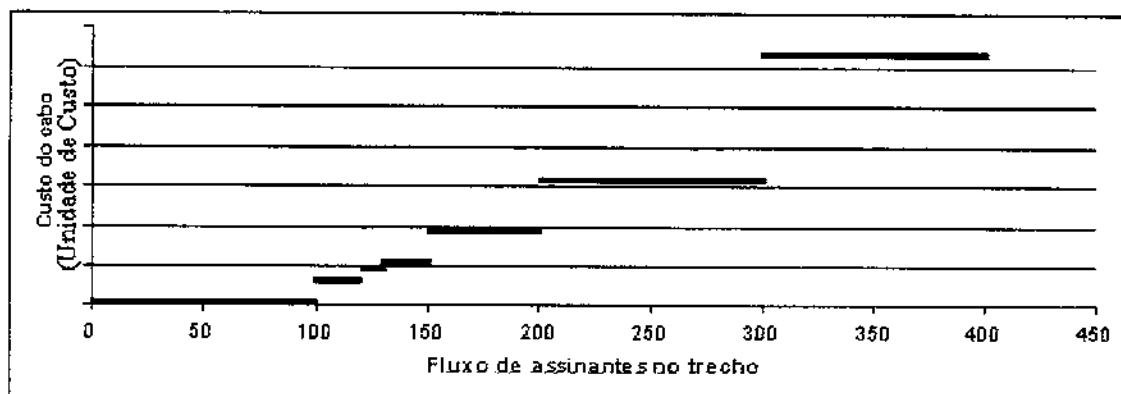


Figura 3.4 – Custo cabo telefônico com cabo já instalado no trecho.

Os serviços relacionados à instalação e remoção de cabos são calculados por uma unidade chamada *unidade de rede*. Esta unidade serve para unificar o valor dos serviços relacionados ao projeto; geralmente é calculada sobre a metragem dos cabos instalados ou retirados.

Nos serviços de manipulação de cabos há algumas considerações. Se um cabo novo está sendo instalado em um trecho, instala-se primeiro a cordoalha para fixação do cabo. Há valores distintos de serviços para a instalação da cordoalha e do cabo.

Se o serviço for em um trecho onde será necessário tirar um cabo para se passar outro, será cobrado o serviço de remoção do cabo antigo e o de instalação do novo cabo. Em ambos os casos, o valor do serviço será o valor da unidade de rede correspondente, multiplicado pelo valor da distância do trecho.

Na emenda de cabos, o valor do serviço é relacionado com a modularidade do cabo.

3.4 Abordagem do Problema

Este trabalho não se propõe a abranger todas as fases do projeto, discutida nos itens anteriores. Concentra-se na construção de uma metodologia e ferramenta computacional que automatize a avaliação dos aspectos de maior impacto no custo da rede. Em relação aos

procedimentos de projetos tradicionais, inova-se pelo uso de técnicas formais de otimização, encontrando as soluções mais econômicas.

Dois possíveis cenários são tratados:

- 1) *Projeto inicial* – projeto para uma região onde não haja rede telefônica implantada;
- 2) *Reprojeto* – projeto para uma região que já tenha uma rede telefônica e onde haverá uma expansão; a rede existente deve ser considerada, pois os equipamentos e cabos podem ser aproveitados para atender a nova demanda, dentro de suas características de capacidade.

No segundo cenário, percebe-se melhor a característica combinatorial do problema. A decisão de redirecionar o fluxo, decidir qual armário irá atender certo assinante ou mesmo avaliar se um determinado trecho da rede deve, ou não, ter a configuração de cabos alterada, pode influenciar no custo total do projeto. Analisar todas as possibilidades para uma rede com muitos assinantes, contendo cabos com diversas modularidades, é um problema complexo.

Três etapas do projeto são tratadas na metodologia proposta nesse trabalho: a localização de novos armários de distribuição, o projeto de cabos para a rede secundária e o projeto da rede primária.

Na localização dos armários, o problema consiste em determinar o número de novos armários necessários para se atender a demanda, e a melhor localização para esses novos equipamentos. Levar em conta a topologia da rede primária é um quesito importante na redução de custos, principalmente com a construção de novos dutos subterrâneos.

Na distribuição dos cabos aéreos para a rede secundária, procura-se uma configuração inicial baseada no fluxo de assinantes em cada trecho da rede. Possíveis rearranjos nessa configuração guiam as heurísticas que procuram melhorar a solução inicial.

O projeto da rede primária é realizado após a definição da localização dos armários e dos cabos para a rede secundária. O objetivo é minimizar o custo de alimentação dos armários, que podem ser metálicos ou óticos. Esse custo engloba os gastos com os armário, com a construção ou expansão dos dutos subterrâneos e com os cabos alimentadores (metálicos ou óticos). Empregam-se heurísticas para melhorar uma solução inicial,

baseadas nos caminhos mínimos entre os armários e a central de comutação (ou determinado ponto de uma rede de alimentação existente).

Essas abordagens são discutidas no capítulo seguinte.

3.5 Representação da Rede Telefônica

Representou-se a rede externa telefônica como um grafo $G = (N, A)$, onde N é o conjunto de nós da rede e A o conjunto de arcos (Ahuja, Magnanti e Orlin, 1993). Cada nó $n \in N$ representa um poste da rede, onde há um conjunto de assinantes que devem ser atendidos. Também se utiliza a representação do nó para indicar um ponto de cruzamento entre duas ou mais ruas.

Cada arco, $e \in A$, é uma ligação física possível entre os postes da rede, podendo ser aérea ou subterrânea. Os arcos do grafo têm um atributo associado, que representa a distância entre os postes.

Como dito anteriormente, o projeto da rede externa deve obter uma solução radial, sendo sua solução representada como uma árvore enraizada na central de comutação. Além do valor da distância entre postes, também se atribui aos arcos o valor do fluxo de pares passando pelo trecho.

Os armários de distribuição podem ser alocados nos nós. A partir deles, têm-se uma subárvore representando a rede secundária. A Figura 3.5 mostra parte de uma região onde se deseja fazer um projeto de rede externa, juntamente com um possível projeto na forma de um grafo (sugere-se uma localização para o armário).

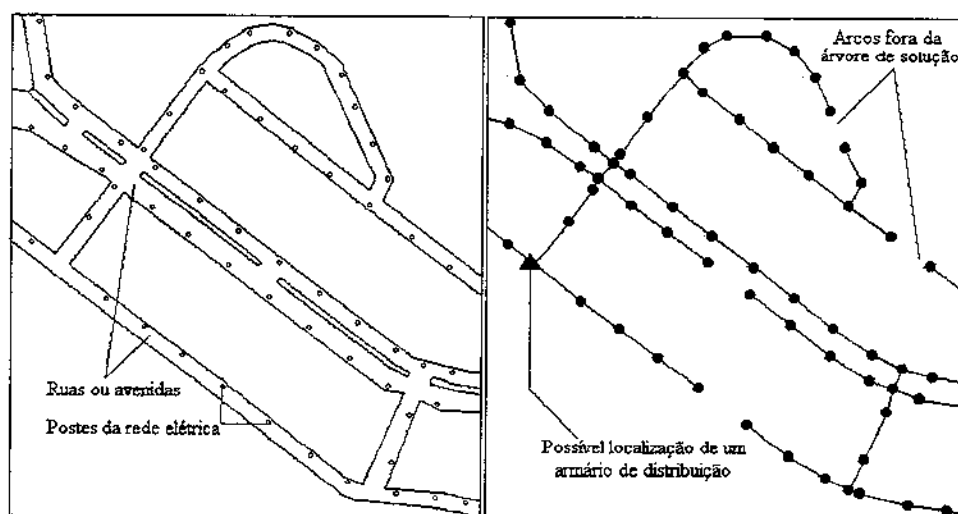


Figura 3.5 – Representação da rede.

3.6 Formulação Proposta

O objetivo é realizar o projeto da rede externa a um custo mínimo, atendendo às restrições do problema. O custo total do projeto da rede externa é a somatória de diversos custos necessários para sua concretização. Pode-se separá-lo nos custos com a rede primária e a rede secundária.

$$\text{custo projeto rede externa} = \text{custo projeto rede primária} + \text{custo projeto rede secundária}$$

As formulações apresentadas nesse capítulo foram baseadas em Formigoni (1995), Balakrishnan e Magnanti (1995), Mateus et al. (1993) e Jack et al. (1992).

Para a rede primária, os custos com equipamentos, infra-estrutura da rede subterrânea e cabos de alimentação são os mais significativos. Em relação aos equipamentos, os principais custos são os dos armários de distribuição (metálicos ou óticos). Os gastos com a infra-estrutura da rede subterrânea são os custos de construção ou expansão da rede de dutos. Os custos com cabos de alimentação incluem os gastos com os cabos e mão-de-obra de instalação.

$$\begin{aligned} \text{custo projeto rede primária} = & \text{custo equipamentos} + \\ & \text{custo rede subterrânea} + \\ & \text{custo com cabos da rede subterrânea} \end{aligned}$$

Sendo N o conjunto de nós da rede e A o conjunto de arcos não direcionados, o custo para o projeto da rede primária pode ser escrito da seguinte maneira:

- Custo total com infra-estrutura e equipamento para alocação dos armários na rede:

$$\sum_{j \in N} F_j \cdot x_j$$

s.a.

$$\sum_{j \in N} x_j = n \quad (1)$$

$$\sum_{j \in N} x_j \cdot Ca \geq dt \quad (2)$$

$$x_j = \{0,1\}. \quad (3)$$

onde,

F_j é o custo de se alocar um armário no nó j ,

x_j é uma variável de decisão indicando se o novo armário deve ou não ficar em j ,

n é o número de armários desejados,

Ca é a capacidade dos armários e

dt é a nova demanda total de terminais para a rede.

A restrição (1) define o número de novos armários que devem ser alocados e (2) determina que toda a nova demanda da rede deve ser satisfeita com a instalação dos novos armários.

- Custo total da interligação dos armários com a central de comutação através da rede subterrânea:

$$\sum_{(i,j) \in A} C_{s_{ij}} \cdot y_{ij}$$

s.a.

$$x_j \leq y_{lm} \quad \forall j \in N \text{ e } \forall (l,m) \in Lj. \quad (4)$$

$$y_{ij} = \{0,1\}. \quad (5)$$

onde,

$C_{s_{ij}}$ é o custo de construção (expansão) da rede subterrânea no trecho (i,j) ,

y_{ij} é uma variável de decisão, indicando se o trecho (i,j) da rede faz parte da rede subterrânea,

x_j é uma variável de decisão, indicando se o novo armário deve ou não ficar em j , e

L_j é o conjunto de arcos que pertencem ao caminho mínimo entre j e a central de comutação.

A restrição (4) refere-se à ligação dos novos armários com a central, onde (l,m) é o conjunto de arcos que pertencem ao caminho único entre o nó j e a central de comutação. Pela restrição, se um armário é alocado no nó j , então deverá existir uma ligação subterrânea desse nó com a central.

- Custo total de cabos da rede subterrânea:

$$\sum_{(i,j) \in A} \sum_{k \in K_s} n_{s_{ij}}^k \cdot C_{b_{ij}}^k \cdot y_{ij}$$

s.a.

$$\sum_{k \in K_s} n_{s_{ij}}^k \cdot y_{ij} \leq du_{ij} \quad \forall (i,j) \in A. \quad (6)$$

$$\sum_{k \in K_s} n_{s_{ij}}^k \cdot Q_s^k \cdot y_{ij} \geq f_{s_{ij}} \quad \forall (i,j) \in A. \quad (7)$$

$$\sum_{e \in I_1} f_{s_e} - \sum_{e \in I_2} f_{s_e} \geq d_{s_j} \cdot x_j \quad \forall j \in N. \quad (8)$$

onde,

$n_{s_{ij}}^k$ é o número de novos cabos subterrâneos do tipo k no trecho (i,j) ,

C_{ij}^k indica o custo do cabo subterrâneo do tipo k no trecho (i,j) (o custo do cabo no trecho é calculado como sendo o produto do seu valor unitário pelo comprimento do trecho),

y_{ij} é uma variável de decisão, indicando se o trecho (i,j) da rede faz parte da rede subterrânea,

Q_s^k é a capacidade do novo cabo subterrâneo do tipo k ,

$f_{s_{ij}} (f_{s_e})$ é o aumento no fluxo do trecho (i,j) (ou trecho $e \in A$) da rede subterrânea,

du_{ij} é o número de dutos livres no trecho (i,j) da rede subterrânea,

ds_j é a demanda de novos pares subterrâneos no nó j ,

x_j é uma variável de decisão, indicando se o novo armário deve ou não ficar em j ,

K_s é o conjunto de tipos de cabos subterrâneos,

$I1$ representa o conjunto de arcos subterrâneos que chegam ao nó j ,

$I2$ representa o conjunto de arcos subterrâneos que saem do nó j .

A inequação (6) restringe o número de cabos novos em um trecho da rede subterrânea – o número de cabos novos pode ser, no máximo, o número de dutos livres na canalização. A restrição (7) obriga que o número de novos pares no trecho subterrâneo seja igual ou superior ao aumento do fluxo no mesmo trecho. A restrição (8) especifica que a diferença entre a somatória do aumento dos fluxos nos trechos subterrâneos que chegam ao nó j , onde se encontra o novo armário, e a somatória do aumento dos fluxos dos trechos subterrâneos que saem do mesmo nó j , deve ser igual ou superior à demanda total do novo armário.

Na rede secundária, o custo é formado pela definição do cabeamento que deve ser utilizado. O custo do cabeamento inclui os custos de novos cabos, custos de expansão (instalação) de novos cabos e custo de retirada de cabos (se necessário).

custo projeto rede secundária = custo cabeamento

Ainda considerando N como conjunto de nós da rede e A como conjunto de arcos, o custo para o projeto da rede secundária pode ser escrito da seguinte maneira:

- Custo total de cabos da rede secundária:

$$\sum_{(i,j) \in A} \sum_{k \in Ka} n_{ij}^k \cdot Ca_{ij}^k + \sum_{(i,j) \in A} \sum_{k \in Ka} r_{ij}^k \cdot Cr_{ij}^k$$

s.a.

$$\sum_{j \in N} z_{ij} \cdot x_j = 1 \quad \forall (i,j) \in A. \quad (9)$$

$$\sum_{e \in Ae} f_{a_e} - \sum_{e \in As} f_{a_e} = da_i \quad \forall i \in N. \quad (10)$$

$$\sum_{k \in Ka} n_{ij}^k \cdot Qa^k + \sum_{k \in Ka} e_{ij}^k \cdot Qa^k - \sum_{k \in Ka} r_{ij}^k \cdot Qa^k \geq f_{a_{ij}} \quad \forall (i,j) \in A. \quad (11)$$

$$\sum_{k \in Ka} n_{ij}^k + \sum_{k \in Ka} e_{ij}^k - \sum_{k \in Ka} r_{ij}^k \leq M_{ij} \quad \forall (i,j) \in A. \quad (12)$$

$$\sum_{k \in Ka} n_{ij}^k \cdot Qa^k \cdot x_j + \sum_{k \in Ka} e_{ij}^k \cdot Qa^k \cdot x_j - \sum_{k \in Ka} r_{ij}^k \cdot Qa^k \cdot x_j \leq P \quad \forall i \in j \in N. \quad (13)$$

$$z_{ij} = \{0,1\}. \quad (14)$$

onde,

n_{ij}^k é o número de cabos aéreos do tipo k a serem **expandidos** no trecho (i,j) ,

Ca_{ij}^k indica o custo do cabo aéreo do tipo k no trecho (i,j) (o custo do cabo no trecho é calculado como sendo o produto do seu valor unitário pelo comprimento do trecho),

r_{ij}^k é o número de cabos aéreos do tipo k retirados do trecho (i,j) ,

Cr_{ij}^k indica o custo de retirada do cabo aéreo do tipo k no trecho (i,j) (o custo de retirada do cabo é calculado como sendo o produto do valor do serviço pelo comprimento do trecho),

z_{ij} é uma variável binária, informando se o nó i deve ou não ser ligado ao armário no nó j ,

x_j é uma variável de decisão, indicando se o armário deve ou não ficar em j ,

$f_{a_{ij}}$ (f_{a_e}) é o fluxo no trecho (i,j) (ou no trecho $e \in A$) da rede aérea,

da_i indica a demanda de pares aéreos no nó i ,

Q_a^k é a capacidade do cabo aéreo do tipo k ,

e_{ij}^k é o número de cabos aéreos do tipo k **existentes** no trecho (i,j) ,

M_{ij} indica o número máximo de cabos aéreos que podem existir no trecho (i,j) ,

P é a capacidade do armário de distribuição,

Ka é o conjunto de tipos de cabos aéreos,

Ae representa o conjunto de arcos aéreos que chegam ao nó i ,

As representa o conjunto de arcos aéreos que saem do nó i .

A restrição (9) obriga todo nó da rede a estar ligado a um único armário. A equação (10) é necessária para que se satisfaça a demanda de pares no nó i . A restrição (11) faz com que os cabos aéreos presentes no trecho (i,j) atendam o fluxo presente em (i,j) , isto é, a capacidade total dos arcos da rede aérea deve ser igual ou superior ao fluxo. O capacidade do trecho é obtida com a soma dos pares telefônicos nos cabos existentes com os pares dos cabos a serem instalados, subtraindo-se os pares dos cabos que serão retirados.

Existe também a restrição de se ter um número máximo de cabos em cada trecho, representada pela inequação (12). O número de cabos no trecho é dado pela soma dos cabos existentes com os cabos a serem instalados, descontando-se os cabos que podem ser retirados de (i,j) . Finalmente, a restrição (13) diz que a somatória dos pares telefônicos nos cabos que saem do armário não pode ser superior à sua capacidade total.

Os custos de emendas dos cabos da rede primária (e da rede secundária) não são tratados no trabalho (seus valores são pequenos em relação a outros custos envolvidos) –

Mateus et al. (1993) sugere um modelo para projeto da rede de distribuição que contempla o custo de emenda de cabos.

Como se deseja minimizar o custo total do projeto da rede externa, a formulação apresentada pode ser sintetizada no seguinte problema de otimização:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \sum_{j \in N} F_j \cdot x_j + \sum_{(i,j) \in A} C_{s_{ij}} \cdot y_{ij} + \sum_{(i,j) \in A} \sum_{k \in K_a} n a_{ij}^k \cdot C a_{ij}^k + \sum_{(i,j) \in A} \sum_{k \in K_a} r_{ij}^k \cdot C r_{ij}^k + \\ & \sum_{(i,j) \in A} \sum_{k \in K_s} n s_{ij}^k \cdot C b_{ij}^k \cdot y_{ij} \end{aligned}$$

s.a.

(1) – (14)

A estratégia de resolução, apresentada no próximo capítulo, aborda o problema de projeto de redes externas em três etapas: localização de armários, projeto da rede secundária e projeto da rede primária.

Capítulo 4 – Métodos de Resolução

4.1 Introdução

Problemas reais difíceis têm motivado o desenvolvimento de técnicas mais poderosas de otimização. Essas técnicas são, frequentemente, o resultado de adaptações de idéias das mais variadas áreas. Dependendo da complexidade e dimensão do problema, sua resolução pode ser obtida através de métodos exatos em tempos de processamento aceitáveis. Já as heurísticas – do grego “*heuriskein*” que significa encontrar – são formas não exatas de se resolver problemas complexos. Na verdade, elas oferecem soluções factíveis que apesar de não serem ótimas, são consideradas suficientemente boas e obtidas em um tempo razoável.

Existem várias razões para se utilizar as heurísticas. Pode-se, por exemplo, destacar os seguintes motivos (Díaz et al., 1996): quando não existe um método exato de resolução do problema ou este requer muito tempo de cálculo ou memória; quando não se necessita de uma solução ótima; quando os dados são pouco confiáveis; quando se tem limitação de tempo ou espaço de armazenamento de dados; como um passo intermediário para a aplicação de outro algoritmo.

As heurísticas podem ser dos seguintes tipos: métodos construtivos, métodos de decomposição, métodos de redução, ou os métodos de busca em vizinhança, onde se encontram as heurísticas de melhoria e as metaheurísticas – entre elas a *busca tabu*, *algoritmos genéticos*, “*simulated annealing*”.

Os métodos construtivos incluem componentes passo a passo, partindo de uma solução inviável até torná-la viável. Geralmente, a cada iteração, o novo componente escolhido é o que proporcionar o maior ganho, dentre os outros candidatos, caracterizando uma *busca gulosa*.

Os métodos de decomposição dividem o problema em subproblemas menores, onde o resultado de um é a entrada de dados de outro, de forma que no final tem-se a solução para o problema global.

Nos métodos de redução, tenta-se identificar alguma característica que a solução final poderá ter (atribuir um valor zero para uma variável combinatória, por exemplo).

Nas buscas em vizinhança, parte-se de uma solução inicial factível (que pode ser obtida com um método construtivo). Através de alterações dessa solução, a cada iteração novas soluções que estejam ao seu redor no espaço de soluções (vizinhança) são obtidas – a alteração pode ser apenas a troca de um componente da solução por outro. A análise da vizinhança de uma solução prossegue até que um critério de parada seja satisfeito.

Uma classe especial da busca em vizinhança é a *busca local (busca de melhoria)*. Nela, a solução atual só é alterada para uma melhor, isto é, não se permite a mudança para soluções piores que a atual. O critério de parada é uma situação onde nenhuma solução da vizinhança melhora a solução encontrada até o momento.

Nas metaheurísticas, o critério de parada pode ser diferente pois, geralmente, elas permitem a piora da solução atual. O intuito dessas técnicas é “escapar” de mínimos locais.

Detalhes sobre os tipos de buscas podem ser encontrados em Díaz et. al (1996).

4.2 Decomposição do Problema de Projeto de Redes Externas

Diante da complexidade do problema de se projetar redes externas de telecomunicações, conforme capítulo anterior, adotou-se a estratégia de abordá-lo em três etapas:

- Localização de armários de distribuição;
- Definição do cabeamento da rede de distribuição ou rede secundária;
- Definição da rede de alimentação ou rede primária.

Esses problemas são resolvidos de maneira a se conseguir a melhor solução para uma certa demanda e cenários de custos.

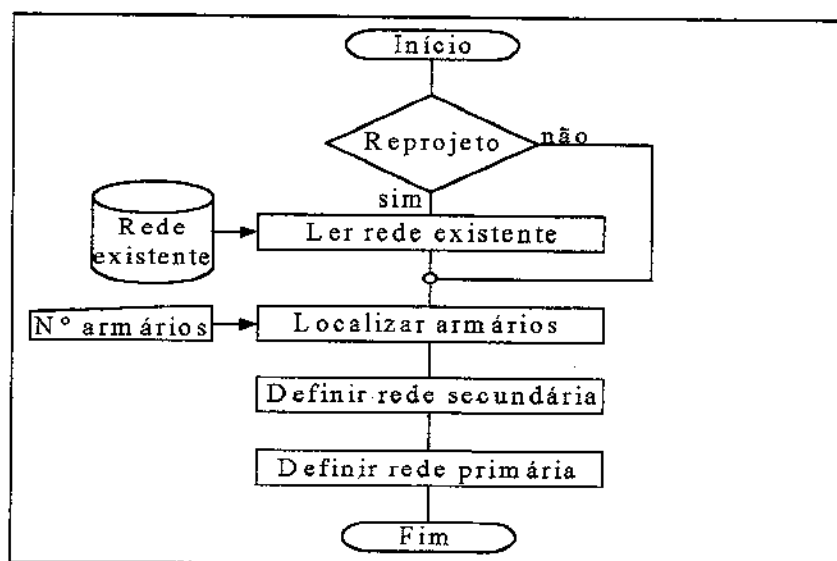
Na localização dos armários de distribuição, as informações disponíveis são apenas a demanda nos nós e a distância entre eles (comprimento dos arcos da rede). Os novos armários são localizados em posições que minimizam os produtos das distâncias pelos fluxos. Para isto, técnicas de otimização são utilizadas, gerando boas soluções. Vale lembrar que, nessa primeira etapa, não se leva em consideração uma possível rede já existente, nem a configuração da rede de dutos – esses aspectos serão tratados nas etapas posteriores.

Na segunda etapa, constrói-se uma solução inicial para a rede secundária, baseada na configuração obtida na primeira etapa. A possibilidade de se melhorar essa solução

construtiva inicial, motivou a implementação de heurísticas que conseguem economias, principalmente manipulando as diversas modularidades dos cabos metálicos. As heurísticas baseiam-se nas trocas de arcos que pertençam à solução por arcos que estejam fora dela. Além da movimentação dos arcos, avalia-se novas posições para os armários que não são fixos (os que não estão fisicamente instalados), considerando-se um custo estimado de ligação com a rede de dutos. Todos esses movimentos são controlados pela metaheurística *busca tabu*, para se escapar de possíveis mínimos locais.

Na última etapa, trata-se do problema da construção das galerias e da definição do cabeamento para a rede primária ou alimentação. As posições dos armários e a rede secundária, definidas nas etapas anteriores, são consideradas e permanecem inalteradas. Uma solução construtiva inicial baseada em caminhos mínimos é melhorada com uma heurística que avalia novos pontos, que possam pertencer à rede primária e diminuam o custo da interligação dos armários. A procura por melhores configurações avalia os custos de construção e de cabos. Considera-se qualquer rede primária existente e prioriza-se seu uso, para reduzir gastos com abertura de novos trechos.

Como dito anteriormente, ao se projetar uma rede externa sobre uma área onde não haja rede existente, constitui-se um projeto novo, chamado de *projeto inicial*. Outro cenário possível é quando uma área está sofrendo expansão a fim de atender novas demandas, caracterizando um *reprojeto*. O algoritmo geral para resolução (Algoritmo 4.1) é o mesmo para esses dois cenários de projeto de redes externas.



Algoritmo 4.1– Algoritmo geral de resolução.

Outros algoritmos são apresentados nos itens a seguir, onde são detalhadas as soluções de cada uma das etapas. Nesse capítulo, utiliza-se uma pequena rede, mostrada na Figura 4.1, com 326 nós e 342 arcos, para exemplificar a metodologia empregada.

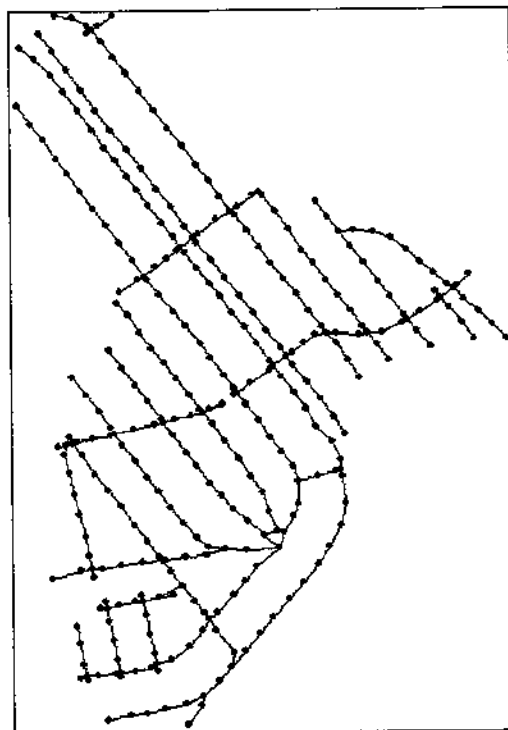


Figura 4.1 – Rede exemplo.

4.3 1ª Etapa: Localização de Armários

A primeira etapa localiza os armários de distribuição que irão atender a região sendo trabalhada. O projetista deverá informar quantos novos armários serão inseridos. No caso de um reprojeto, os armários já instalados permanecerão em suas posições durante todo o processo. As metodologias e heurísticas apresentadas nessa etapa foram baseadas no trabalho de Carneiro (1990).

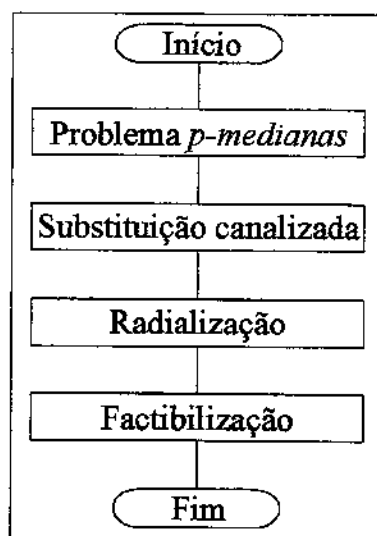
As informações utilizadas durante essa primeira etapa são a demanda nos nós e o comprimento dos arcos. Os nós onde ficam os armários são os nós “fornecedores” das linhas telefônicas, enquanto que os demais nós demandam a quantidade de linhas necessárias para atender aos assinantes associados a eles.

A metodologia busca a minimização da somatória do produto do fluxo nos arcos pelo seus comprimentos. Isto caracteriza um *problema de fluxo de custo mínimo (PFCM)*, podendo ser resolvido através do método *SIMPLEX* para redes. Nos *problemas de fluxo de*

custo mínimo, supõe-se que o custo do fluxo em cada arco varia linearmente com a quantidade do fluxo que passa no trecho.

A resolução do problema de se localizar os novos armários é feita em subetapas, mostradas no Algoritmo 4.2. Inicialmente, relaxa-se a capacidade de atendimento dos armários. Como se deseja localizar novas facilidades (armários) na rede, relaxando-se a restrição de capacidade, tem-se um problema de *p-medianas*. O local ótimo para essa facilidade (armário) é chamado de *mediana*. Se o número de facilidades for p , têm-se um problema de *p-medianas*, onde se minimiza a soma das menores distâncias para os nós do grafo a partir da facilidade mais próxima – maiores detalhes podem ser encontrados em Christofides (1986). A resolução de um problema de *p-medianas* é NP-Completo (Carneiro, 1990). Por isto, usa-se métodos heurísticos que localizam e buscam a minimização da filiação dos nós às medianas (armários de distribuição) de acordo com o critério “fluxo x distância”. A minimização desse produto tende a localizar as medianas mais próximas dos locais onde a demanda por pares telefônicos é maior.

Após essa primeira subetapa, o resultado pode estar inviável devido à relaxação da restrição de capacidade dos armários. As subetapas seguintes procuram realocar os novos armários, considerando-se a capacidade dos mesmos.



Algoritmo 4.2 – Algoritmo das subetapas da localização dos novos armários.

Na implementação da primeira etapa se considerou um nó hipotético (nó de fechamento) responsável pelo fornecimento de pares de fios à todos os assinantes da rede. Os arcos interligando o nó hipotético com todos os outros nós da rede real são chamados de

arcos de fechamento. A Figura 4.2 exemplifica um nó e seus arcos de fechamento. Há ocasiões que esses arcos são capacitados, permitindo um fluxo máximo igual à capacidade total do armário (excluindo os pares destinados à manutenção – pares de folga).

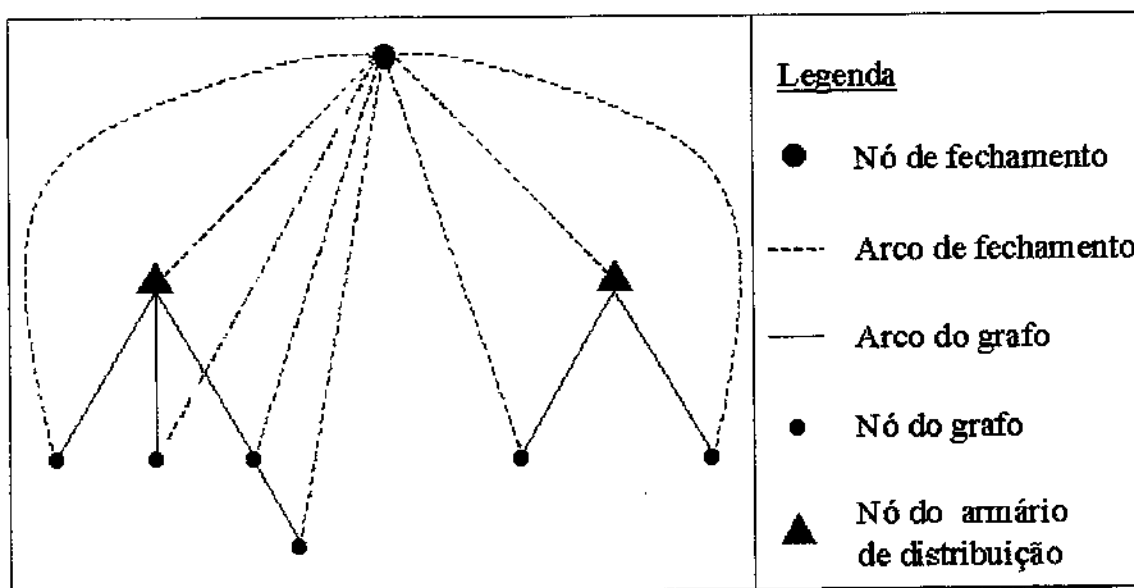


Figura 4.2 – Nó e arcos de fechamento.

4.3.1 Localização das Medianas

Nessa fase utiliza-se uma heurística que avalia posições candidatas para os novos armários. Os armários existentes permanecerão em suas posições, sendo criado arcos de fechamento dos nós onde eles se encontram até o nó de fechamento. Os custos desses arcos de fechamento serão nulos.

Cada novo armário será avaliado, um de cada vez, em posições (nós) escolhidos como candidatos. Essa escolha leva em consideração o grau do nó (grau igual ou superior a três, por exemplo). Ao se avaliar um nó candidato a abrigar um novo armário, cria-se um arco de fechamento, ligando-o ao nó de fechamento. Da mesma forma que os arcos de fechamento para os nós com os armário existentes, o custo dos arcos de fechamento será nulo. Os demais nós da rede também terão arcos de fechamento, mas seus custos serão elevados. Como dito anteriormente, relaxa-se a capacidade dos armários; por isto, todos os arcos de fechamento criados não serão capacitados.

Em seguida, executa-se o algoritmo SIMPLEX para rede. Analisa-se a solução e armazena-se o nó candidato se o valor da função objetivo for menor dentre todos os nós

candidatos analisados até o momento. Para o próximo nó candidato, o processo será o mesmo. No final da avaliação de todos os nós candidatos, aloja-se o novo armário na posição do melhor nó candidato escolhido. Essa posição será uma nova mediana e não mudará mais até que todos os outros novos armários (medianas) tenham sido posicionados.

Para um projeto inicial, por exemplo, inicia-se o processo com a avaliação do primeiro novo armário. Todo nó da rede é candidato a recebê-lo, caso não haja nenhuma rede existente. O melhor dos candidatos é escolhido como o local do primeiro armário.

O segundo armário poderá ficar em qualquer outro nó, exceto onde se encontra o primeiro armário, que permanecerá na posição determinada anteriormente. Novamente utiliza-se o método *SIMPLEX* para redes, para cada nó candidato. Dois nós serão considerados medianas: o nó onde está o primeiro armário e o nó candidato que está sendo avaliado. Dentre todos os candidatos, será escolhido aquele que propiciar o menor custo. O processo segue até que todos os novos armários estejam posicionados.

O Algoritmo 4.3 mostra todas as etapas presentes nessa primeira estratégia.

Início

- Determinar armários existentes;
- Escolher nós candidatos;

Enquanto posição dos novos armários não estiver definida faça:

Para cada nó candidato encontrado faça:

- Atribuir custo zero aos arcos de fechamento dos nós com armários já definidos e ao nó candidato que está sendo analisado;
- Atribuir custo infinito aos demais arcos de fechamento;
- Executar algoritmo *SIMPLEX* para o *PFCM* construído;

Se solução for a melhor entre todos os nós candidatos analisados até o momento, então

- Armazenar nó candidato como sendo o nó onde armário será alocado;

Fim se

Fim para

- Fazer nó candidato armazenado como a posição de um armário de distribuição;

Fim enquanto

Fim

Algoritmo 4.3 – Algoritmo guloso da localização de armários (mediana).

Como não se limitou a capacidade de atendimento dos armários, no final do processo poderá existir algum com atendimento acima de sua capacidade. A etapa seguinte procura testar novas localizações considerando-se a capacidade dos armários.

4.3.2 Substituição

Essa fase, chamada de substituição canalizada, consiste em verificar a possibilidade de redução de custos com o movimento dos armários para nós próximos às suas localizações atuais, respeitando-se as capacidades dos mesmos.

Para as novas medianas, escolhidas na subetapa anterior, são criados os arcos de fechamento, capacitados com o valor máximo de atendimento dos armários de distribuição. Com esta configuração, executa-se o SIMPLEX para o PFCM canalizado. O valor encontrado da função objetivo servirá de base para se avaliar possíveis ganhos. Para cada mediana que pode-se mover, desloca-se para nós candidatos vizinhos, buscando-se melhoras no valor da função objetivo, isto é, redução na somatória do fluxo pela distância.

O procedimento de avaliação é idêntico ao descrito na subetapa anterior. Os arcos de fechamento dos nós candidatos passam a ter custo nulo, mas serão capacitados. A filiação dos nós às medianas poderá se alterar e o melhor nó candidato será escolhido como nova posição da mediana, dentro de cada área de filiação (seção de serviço), se houver melhora na função objetivo. O processo terminará quando não houver mais mudanças no local das medianas. O Algoritmo 4.4 mostra os passos descritos.

Por se utilizar um nó hipotético como nó fonte, o fato de um arco de fechamento da mediana poder ter saído da base no limite superior (capacidade do armário) ocasiona a interligação de duas seções de serviço (áreas atendidas por duas medianas) para que a solução não seja uma árvore desconexa – considera-se aqui apenas o nó hipotético como raiz da solução. Isto significa que existirá um nó que não consegue ter toda sua demanda atendida por uma mediana. Assim, outra deverá supri-lo com os pares restantes, resultando na interligação de duas seções de serviço. Essa configuração não é radial; portanto, é impraticável.

Início

Enquanto houver alteração na posição dos novos armários faça:

Para cada armário de distribuição faça:

- Escolher nós candidatos do armário;

Para cada nó candidato encontrado faça:

- Atribuir custo zero aos arcos de fechamento dos outros armários e do nó candidato sendo analisado;

- Atribuir custo infinito aos demais arcos de fechamento (inclusive ao do armário de distribuição sendo manipulado);

- Atribuir limite igual à capacidade do armário à todos os arcos de fechamento;

- Executar algoritmo *SIMPLEX* para *PFCM* construído;

Se solução for melhor de que a de todos os nós candidatos analisados até o momento, então

- Armazenar nó candidato como nó para onde armário será mudado;

Fim se

Fim para

- Fazer nó candidato armazenado como nova posição do armário de distribuição (se melhor posição foi encontrada);

Fim para

Fim enquanto

Fim

Algoritmo 4.4 – Algoritmo da substituição canalizada.

4.3.3 Radialização

Conforme mencionado no capítulo anterior, somente são aceitas soluções radiais. Para radializar a solução conseguida com a subetapa anterior, usa-se uma heurística de radialização.

A heurística para a radialização, proposta por Carneiro (1990), procura retirar o arco de menor fluxo do ciclo formado pela inclusão de um arco que esteja fora da solução (arco não-básico no limite superior). Para isto, cada arco não básico e com fluxo é incluído, um de cada vez, na solução, formando um ciclo. Em seguida, calcula-se o valor de bloqueio nesse ciclo ao se reduzir o fluxo no arco incluído. O arco que causar o bloqueio sairá da base, entrando o arco que teve o seu fluxo diminuído. Este procedimento repete-se até que o número de arcos com fluxo seja igual a $n-1$ (onde n é o número de nós da rede). O Algoritmo 4.5 resume o processo de radialização.

A consequência da radialização é a possível existência de armários com atendimento acima de sua capacidade, necessitando-se da factibilização da solução, realizada na subetapa seguinte.

Início

Enquanto arcos com fluxo for maior que $n-1$ (n = nós da rede) faça:

Para cada arco não básico e com fluxo diferente de zero faça:

- Incluir arco não-básico na solução;
- Calcular valor de bloqueio ao se reduzir fluxo no arco incluído;
- O arco que bloqueou sai da base;
- O arco que teve seu fluxo diminuído entra na base;

Fim para

Fim enquanto

Fim

Algoritmo 4.5 – Algoritmo da radialização.

4.3.4 Factibilização

A última subetapa da localização dos armários é factibilizar a solução, caso algum armário atenda assinantes acima de sua capacidade, como consequência do processo de radialização. Para isto, transfere-se nós (demanda) para armários vizinhos ao armário com capacidade excedente, e que tenham pares de fios telefônicos disponíveis. Novamente, a redefinição das áreas das seções de serviço busca sempre o compromisso do menor valor para a função objetivo.

Inicialmente, identifica-se os armários com capacidade acima do permitido. Na inexistência desses armários, o processo de localização terá terminado e a solução existente será radial e factível. Caso contrário, avalia-se primeiro o armário com o maior número de assinantes excedentes. A seguir, determinam-se os arcos que interligam a seção de serviço desse armário com seus vizinhos.

Os arcos encontrados são candidatos a realizarem a transferência da demanda. Avalia-se o custo de transação para cada um dos candidatos, sendo escolhido o que propiciar o menor deles. Candidatos que inviabilizem o armário que estará recebendo a demanda excedente não são escolhidos.

A heurística continua até que todos os armários estejam factíveis, ou seja, com a demanda abaixo ou igual às suas capacidades. Com isto, tem-se uma solução radial e factível (Algoritmo 4.6).

Início

- Verificar se há armários com capacidades excedentes;

Enquanto houver armário com capacidade excedente faça:

- Obter armário com maior número de assinantes
- Encontrar arcos fora da solução e que interligam a seção de serviço sendo analisada e seções de serviço vizinhas e factíveis;

Para cada arco encontrado e fora da solução faça:

- Incluir arco na solução;
- Excluir arco da solução atual que viabilize a solução;

Se solução for melhor de todos os arcos candidatos analisados até o momento então

- Armazenar arco candidato como sendo o arco que fará parte da solução;

Fim se

Fim para

- Incluir na solução o arco armazenado e retirar outro que factibilize o armário;
- Verificar se há armários com capacidade excedente;

Fim enquanto

Algoritmo 4.6 – Algoritmo da factibilização.

Após a localização dos armários de distribuição e da definição da árvore de atendimento, procura-se determinar os cabos necessários para o atendimento dos assinantes. No caso de um projeto inicial, a definição dos cabos para a rede secundária será baseada no fluxo presente nos arcos da rede. No reprojeção, além do fluxo presente nos arcos, considera-se os cabos existentes na rede – o aproveitamento da rede é considerada depois de definida a posição dos armários, no momento de determinação dos cabos (o projeto da rede primária também considera as instalações existentes).

As etapas seguintes detalham a obtenção dessas configurações iniciais para as redes secundárias e primárias, e apresentam os métodos que buscam melhorias nessas definições.

4.4 2ª Etapa: Projeto da Rede Secundária

O foco principal dessa segunda etapa é a rede secundária ou de distribuição, onde serão definidos o cabeamento e toda a configuração de atendimento.

Consideram-se os valores de custos para os armários, cabos e seus serviços de instalação nessa rede. O custo de emendas de cabos não é tratado no trabalho (o apêndice A traz todos os custos considerados).

4.4.1 Custos Considerados

Os armários de distribuição possuem vários tipos, capacidades e, conseqüentemente, custos diferentes. Dois tipos de armários foram utilizados, mas outros tipos podem ser

considerados, configurados e tratados facilmente pela ferramenta computacional desenvolvida. Um desses armários é o armário metálico e a tabela a seguir mostra a capacidade, o custo do equipamento e o custo do serviço de instalação.

Capacidade do Armário	Custo (R\$)	Custo instalação (u.r.¹)
600 pares	2.000,00	15,00

Tabela 4.1 – Armário metálico considerado para a rede secundária.

O outro armário é o ótico. A seguir, na Tabela 4.2, também estão os valores de sua capacidade, custos de equipamentos e custo de serviço de instalação.

Capacidade do Armário	Custo (R\$)	Custo instalação (u.r.)
600 pares	150.000,00	100,00

Tabela 4.2 – Armário ótico considerado para a rede secundária.

Os cabos metálicos adotados diferem apenas em relação a modularidade. Utilizam-se cinco tipos, com os seguintes valores de custo unitário por metro, apresentados na Tabela 4.3.

Tipos de cabos (modularidade)	Custo (R\$ / m)
20 pares	1,26
30 pares	1,79
50 pares	2,21
100 pares	3,68
200 pares	6,30

Tabela 4.3 – Cabos metálicos considerados para a rede secundária.

A instalação dos cabos na rede secundária também é tratada como um custo adicional no projeto, detalhada na Tabela 4.4.

Serviços	Custo (u.r. / m)
Instalação do cabo telefônico	0,19
Adicional por instalação simultânea de cabo	0,04
Instalação da cordoalha	0,10
Retirada de cabo aéreo ficando a cordoalha	0,03
Retirada de segundo cabo aéreo	0,04
Retirada de cabo aéreo	0,07

Tabela 4.4 – Custos dos serviços de instalação de cabos.

¹ u.r. = unidade de rede. A unidade de rede é usada para padronizar os valores dos serviços para a rede externa. Ela foi proposta e implementada pela TELEBRÁS, sendo divulgada no documento de “padronização nos serviços de rede de 1997”.

Na Tabela 4.4, o primeiro serviço é o custo de instalação do cabo telefônico no trecho, independente de sua modularidade. Se for necessário mais de um cabo no local então será acrescido um custo por cada cabo adicional (segundo item da Tabela 4.4), além de seu valor normal de instalação. Para a fixação do cabo telefônico entre os postes, utiliza-se um cabo de aço chamado cordoalha. Sua instalação será efetivada mediante um custo por metro colocado (terceira linha da Tabela 4.4), se o trecho não o possuir.

Os três últimos custos de serviços da Tabela 4.4 referem-se a outras situações possíveis no momento da instalação dos cabos. Como há um limite para o número de cabos aéreos em cada trecho, talvez seja necessário retirar algum cabo para fixação de outro de maior modularidade para atender a demanda.

Todos os valores de custos apresentados são dados de entrada do programa, podendo ser alterados sem necessidade de modificações nos códigos implementados.

4.4.2 Metodologia de Resolução

A metodologia de resolução obtém inicialmente uma solução construtiva, baseada na análise da árvore (ou floresta) de atendimento encontrada na primeira etapa (Algoritmo 4.1).

De acordo com o fluxo presente em cada trecho, determina-se o cabo necessário para suprir o atendimento, escolhendo-se sempre a solução mais econômica. Por exemplo, um trecho com um fluxo de 38 assinantes e adotando-se os cabos da Tabela 4.3, considera-se duas soluções possíveis que dependerão do cenário em que o trecho se enquadra.

1) Não existe cabo instalado → adota-se sempre o cabo de menor modularidade e com capacidade suficiente para atender o fluxo.

No exemplo, o cabo de 50 pares é o mais adequado. Esta solução além de ser a mais econômica, pode proporcionar folga considerável de pares no trecho e possibilitar a instalação de mais cabos, caso seja permitido.

2) Existem cabos antigos → o fluxo que deve ser considerado é a diferença entre o fluxo atual e a soma dos pares dos cabos atuais. Nada será alterado se eles forem capazes de atender a demanda. Caso contrário, pode-se incluir um novo cabo, se houver permissão, ou troca-se um dos cabos, se o limite para o número de cabos aéreos for alcançado. A decisão sempre leva em conta a alternativa mais econômica.

Se no exemplo anterior já existir um cabo de 20 pares, e podendo-se ter no máximo dois cabos por trecho, a melhor solução seria a instalação de mais um cabo de 20 pares, totalizando 40 pares. Se o limite de cabos aéreos for de apenas um cabo por trecho, então deve-se retirar o existente e instalar outro de 50 pares.

A Figura 4.3² ilustra o exemplo apresentado.

Trecho (A,B):		
- Sem cabos antigos. <u>Custos:</u> - Cabo 50 pares: R\$ 110,50 - Instalação: R\$ 145,00 - Total: R\$ 255,50 <u>Configuração final:</u>	- Cabo antigo de 20 pares. - Apenas 2 cabos por trecho. <u>Custos:</u> - Cabo 20 pares: R\$ 63,00 - Instalação: R\$ 95,00 - Total: R\$ 158,00 <u>Configuração final:</u>	- Cabo antigo de 20 pares. - Apenas 1 cabo por trecho. <u>Custos:</u> - Cabo 50 pares: R\$ 110,50 - Instalação: R\$ 95,00 - Retirada de cabo: R\$ 15,00 - Total: R\$ 220,50 <u>Configuração final:</u>

Figura 4.3 – Exemplo da solução construtiva para a rede secundária.

A solução construtiva inicial pode ser inviável. Isto ocorrerá se existir algum trecho com fluxo acima do permitido, já que essa situação não foi considerada na primeira etapa.

Considerando-se apenas os tipos de cabos da Tabela 4.3 para a rede secundária e não se permitindo mais do que dois cabos nos trechos entre postes, o exemplo da Figura 4.4 seria inviável se algum arco ultrapassasse o fluxo de 400 pares. O processo de factibilização desses trechos com fluxo acima do permitido ocorrerá na medida em que se realizarem os movimentos de trocas de arcos, explicados adiante.

A Figura 4.4 ilustra uma solução inicial factível onde se realizou um *projeto inicial* com a instalação de apenas um armário de distribuição para atender uma demanda de 480 pares. A factibilidade é verificada ao se observar a configuração com apenas uma árvore de atendimento e a existência de fluxos nos arcos que não ultrapassam 400 pares – capacidade

² Os custos dos cabos e serviços utilizados nos cálculos são os apresentados na Tabela 4.3 e Tabela 4.4, respectivamente.

máxima adotada no exemplo e obtida pela restrição de se ter no máximo dois cabos por arco com 200 pares cada um.

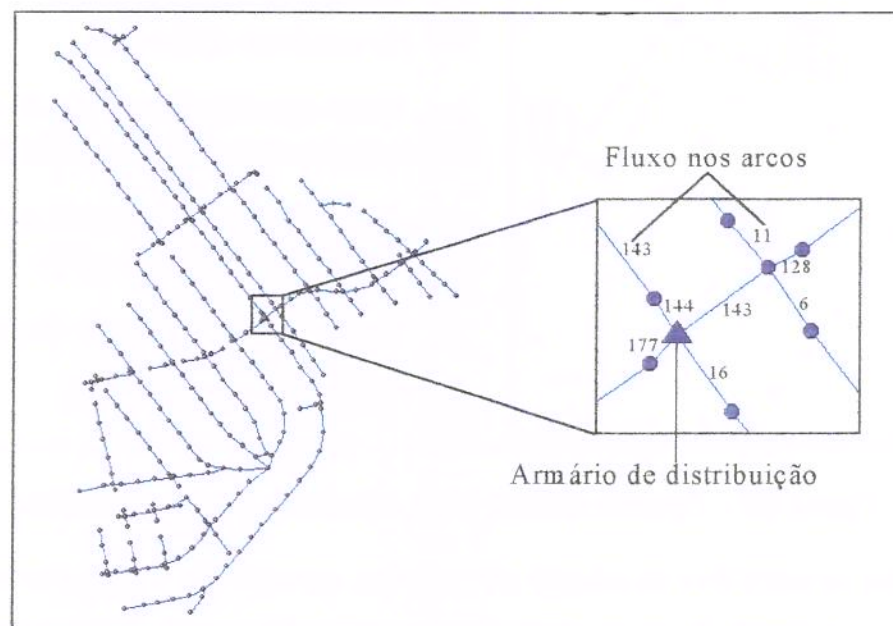


Figura 4.4 – Rede inicial factível.

A configuração e o custo dessa solução inicial servirão como valores de referência iniciais (chamados de valores incumbentes) para o processo de melhoria, que analisa novas configurações, consistindo de dois movimentos: a troca de arcos e o reposicionamento de armários.

4.4.3 Troca de Arcos

Novas soluções para a rede podem ser obtidas através de trocas de arcos, substituindo-se algum arco que pertença à solução por outro que esteja fora dela. Três tipos de arcos fora da solução são manipulados:

- Arcos que interligam nós de seções de serviço diferentes → interligam nós atendidos por armários diferentes (nós pertencem à árvores distintas);
- Arcos que interligam nós de subárvores diferentes → interligam nós descendentes de sucessores diferentes do nó onde se localiza o armário (saídas diferentes do armário);
- Arcos que interligam nós da mesma subárvore → interligam nós descendentes do mesmo sucessor do nó onde se localiza o armário (mesma saída do armário).

A Figura 4.5 ilustra os três tipos de arcos descritos, considerando armários com quatro saídas.

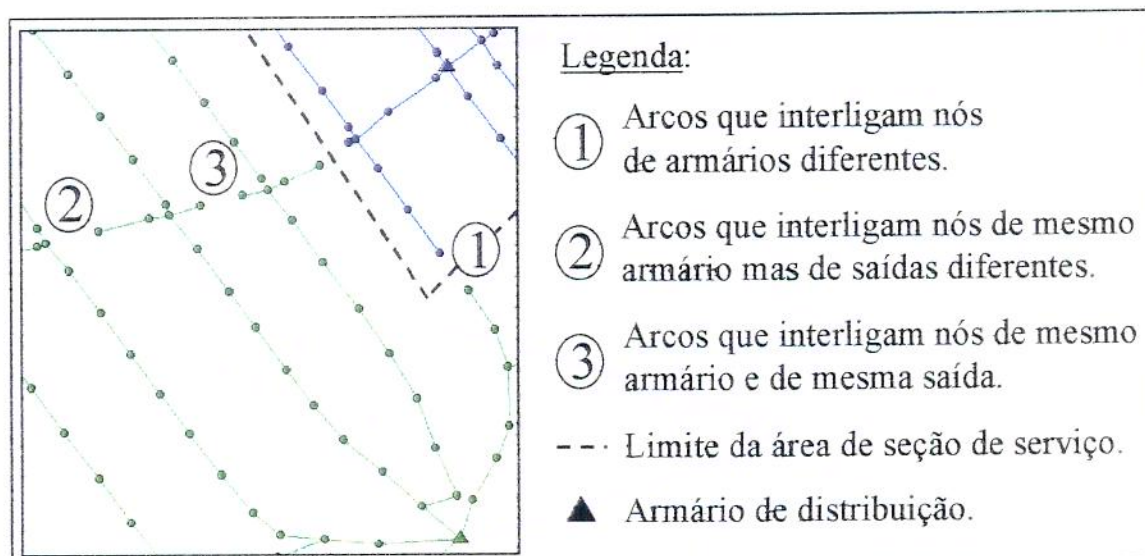


Figura 4.5 – Tipos de arcos fora da solução e saídas dos armários.

Todos os arcos fora da solução são testados, entrando um a um na árvore. Quando um arco entra na árvore, forma-se um ciclo, ilustrado na Figura 4.6. Necessita-se retirar um arco desse ciclo para se manter a topologia em árvore, saindo o arco que produzir a maior redução no custo total do projeto, e que não viole qualquer outra restrição de factibilidade do problema. Se nenhuma melhora puder ser obtida, então o arco candidato a entrar na solução é descartado. Após todos os arcos candidatos a participarem da solução serem analisados, escolhe-se, dentre eles, aquele que conseguir a maior redução no custo do projeto.

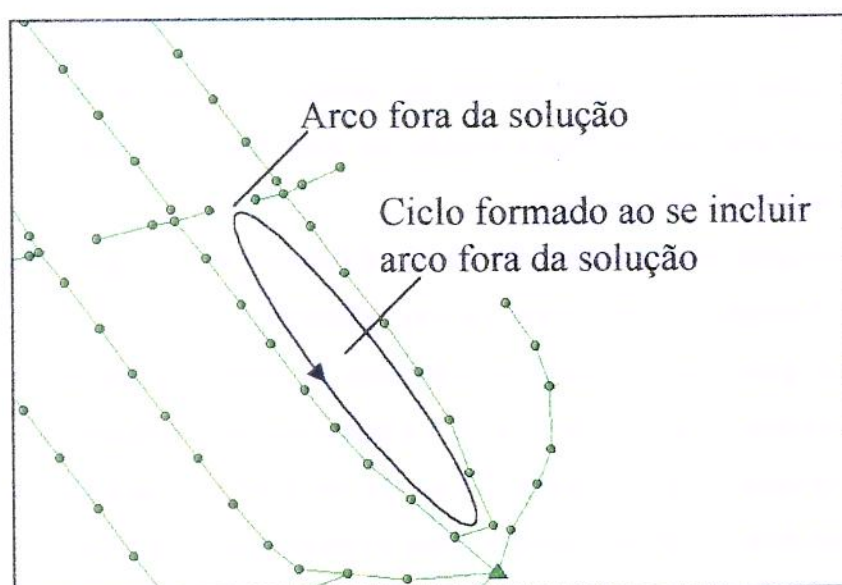


Figura 4.6 – Ciclo formado na inclusão de um arco fora da solução.

Este procedimento é o mesmo para todos os tipos de arcos que estão fora da solução, mostrados anteriormente. A única diferença é que não se considera a formação de um ciclo ao se incluir arcos que interligam nós de seções de serviço diferentes – o primeiro tipo de arco da Figura 4.5. Mas, incluí-los na solução torna-a inviável, pois existirão nós atendidos por dois armários ao mesmo tempo, violando uma restrição do projeto. Assim, tem-se um caminho que liga os dois armários e um arco que pertença a esse caminho deverá ser retirado para que as duas seções de serviço fiquem definidas.

Uma observação importante, em relação ao movimento desse tipo de arco ligando armários distintos, é que o armário de distribuição pode ter seu número de assinantes alterado – pode ocorrer transferência de assinantes entre os armários. O movimento será inviável se a capacidade total do armário for ultrapassada. Caso contrário, o armário é capaz de atender a demanda mesmo se o número de assinantes atendido estiver entre o valor definido para a folga de pares e sua capacidade máxima. No caso da utilização da folga de pares, atribui-se um acréscimo no valor do movimento, ou seja, uma penalidade. Cria-se então uma *função barreira* para o cálculo do valor desse movimento. A Figura 4.7 apresenta um exemplo de função barreira; a penalidade é nula se com o movimento a ocupação do armário não ultrapassar o valor de 80% de sua capacidade total; haverá uma certa penalidade se o movimento ocasionar uma ocupação entre 80 e 95% da capacidade total do armário, e uma penalidade maior se essa ocupação ficar acima de 95%.

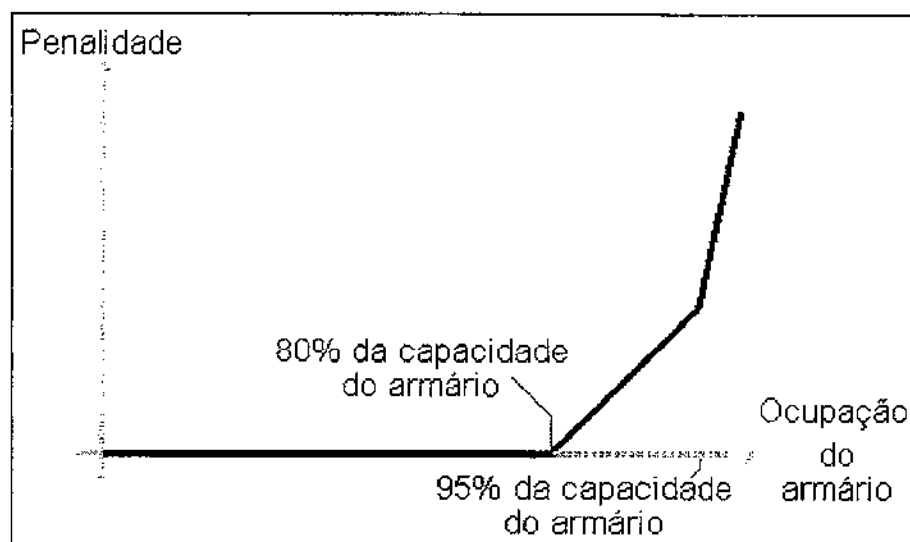


Figura 4.7 – Penalidade para a ocupação do armário.

O Algoritmo 4.7 descreve o processo de trocas de arcos.

Início

- Obter arcos candidatos fora da solução;

Para cada arco candidato fora da solução faça:

- Inserir arco candidato na solução;

Se arco candidato interligar duas seções de serviço então

- Determinar arcos da solução incumbente que chegam aos dois armários;

Senão

- Determinar arcos da solução incumbente do ciclo formado;

Fim se

Para cada arco da solução incumbente encontrado faça:

- Analisar ganho com a retirada do arco da solução incumbente;

Se ganho for o melhor de todos os arcos analisados até o momento e

Se movimento for factível então

- Armazenar arco da solução incumbente como sendo o arco que deve sair;

Fim se

Fim para

- Retirar arco da solução incumbente que foi armazenado;

- Avaliar solução candidata;

Se valor da solução candidata for menor que solução incumbente então

- Solução incumbente passa a ser a solução candidata;

Fim se

Fim para

Fim

Algoritmo 4.7 – Algoritmo de troca de arcos na rede secundária.

As melhorias na solução são possíveis porque na primeira etapa não se considera nem a modularidade dos cabos, nem uma possível rede já instalada no local.

O exemplo Figura 4.8 ilustra melhorias obtidas com a troca de arcos. O primeiro quadro traz as distâncias entre alguns trechos da rede exemplo.

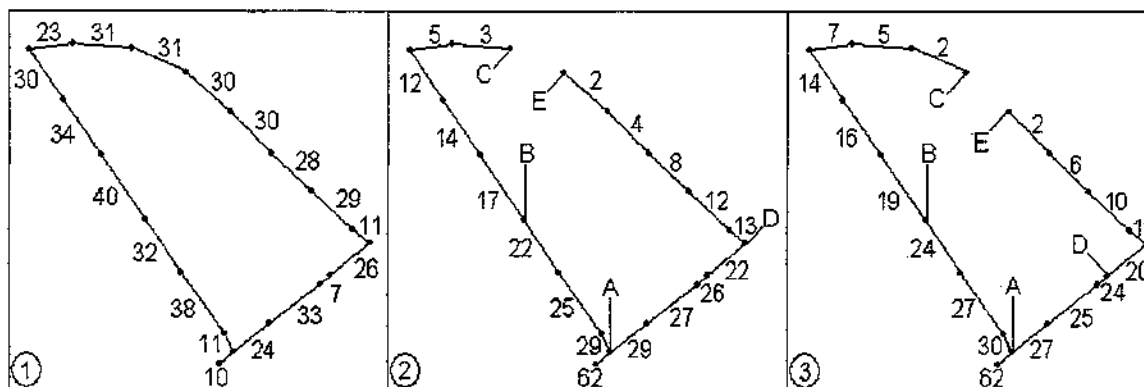


Figura 4.8 – Exemplo de melhoria com a trocas de arcos.

Considerando que não haja uma rede existente nesse exemplo, os quadros 2 e 3 mostram os fluxos nos trechos, obtidos com uma solução inicial e uma possível solução melhorada, respectivamente. Percebe-se que arcos diferentes não participam da solução nos

quadros 2 e 3 (entre os pontos C e E). Os valores do projeto do exemplo podem ser calculados ao se utilizar os cabos da Tabela 4.3 e os custos de instalação apresentados na Tabela 4.4.

Nos quadros 2 e 3, nos trechos entre os pontos A-B e A-D, instala-se cabos de 30 pares; e entre B-C e D-E, cabos de 20 pares. A Tabela 4.5 e Tabela 4.6 mostram os valores dos custos para a realização da configuração nos quadros 2 e 3, respectivamente.

Trechos entre os pontos	Cabo Utilizado	Distância (m)	Custo cabos (R\$)	Custo instalação (R\$)	Custo total (R\$)
A-B	30 pares	81	144,99	23,49	168,48
B-C	20 pares	158	199,08	45,82	244,90
A-D	30 pares	90	161,10	26,10	187,20
D-E	20 pares	128	161,28	37,12	198,40
Quadro 2					798,98

Tabela 4.5 – Cálculo dos custos do projeto para exemplo da Figura 4.8 – Quadro 2.

Trechos entre os pontos	Cabo Utilizado	Distância (m)	Custo cabos (R\$)	Custo instalação (R\$)	Custo total (R\$)
A-B	30 pares	81	144,99	23,49	168,48
B-C	20 pares	189	238,14	54,81	292,95
A-D	30 pares	64	114,56	18,56	133,12
D-E	20 pares	124	156,24	35,96	192,20
Quadro 3					786,75

Tabela 4.6 – Cálculo dos custos do projeto para exemplo da Figura 4.8 – Quadro 3.

Vê-se que a solução apresentada no quadro 3 é melhor que a do quadro 2. O ganho total com a menor utilização do cabo de 30 pares na configuração do quadro 3 (145m contra 171m) é superior à perda total com o maior uso de cabo de 20 pares na mesma configuração, resultando na economia alcançada.

Usando-se o critério adotado na localização dos armários, que é otimizar a solução minimizando o produto da distância pelo fluxo, vê-se que a solução do quadro 2 é mais econômica (6.933 contra 7.026 do quadro 3). Isto justifica o uso da heurística de trocas de arcos.

4.4.4 Reposicionamento de Armários

Reposicionar armários também pode criar soluções que sejam melhores que a solução incumbente. Essas melhorias são possíveis pelo mesmo motivo descrito na

movimentação dos arcos – a localização dos armários não leva em consideração a modularidade dos cabos e nem uma possível rede existente.

Os armários existentes não são passíveis de reposicionamento. Para os armários novos, duas restrições são impostas para um nó pertencer ao conjunto de candidatos a receber o armário de distribuição:

- Grau do nó → os nós candidatos devem possuir grau maior ou igual a um determinado valor (grau igual ou superior a três, por exemplo);
- Nível do nó → os nós candidatos devem estar a uma certa distância específica do nó raiz (i.e., nó onde se encontra o armário na solução incumbente).

A Figura 4.9 mostra os nós candidatos para uma determinada seção de serviço. Os candidatos considerados nesse exemplo são os nós que se encontram a uma distância de até oito níveis (i.e., oito arcos) do armário atual, e que possuem grau igual ou superior a três. A seção de serviço não é alterada com o movimento do armário.

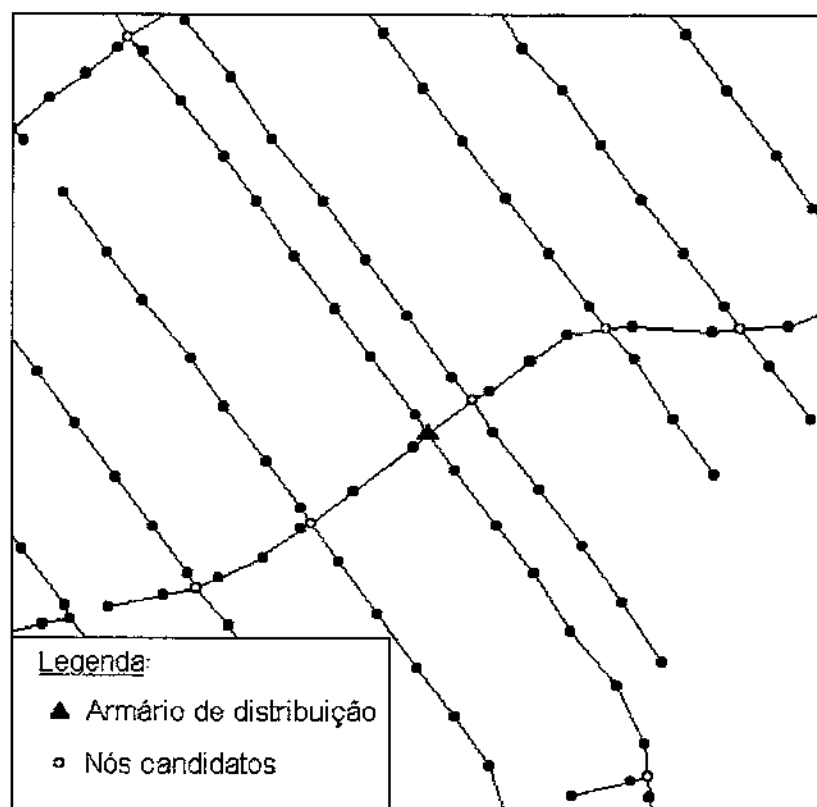


Figura 4.9 – Nós candidatos para receber armário.

Para cada um dos armários que podem ser movidos, todos os nós candidatos são analisados como o possível novo local para o armário. Cada nó candidato recebe o armário

de distribuição e toda a árvore da seção de serviço sendo analisada é alterada. A fim de tornar o movimento ainda mais significativo, realizam-se trocas de arcos por outros fora da solução, e que interligam nós da mesma área de seção de serviço. Após esses dois movimentos é que se analisa a possível economia no custo da solução.

Para cada nó candidato, o valor da solução também agrega um custo estimado de ligação do armário com o centro de fios através da rede primária. Esse custo estimado é obtido através do comprimento total do caminho mínimo entre o nó candidato e algum outro nó da rede de alimentação existente. O nó candidato que conseguir o maior ganho será a nova posição do armário.

O Algoritmo 4.8 descreve o reposicionamento de armários.

Início

Para cada armário que possa ser movido faça:

- Obter nós candidatos a receberem o armário;

Para cada nó candidato encontrado faça:

- Obter ganho com a mudança do armário para o nó candidato (estimando custo de interligação do armário com a rede primária);

- Acrescentar ao ganho obtido possível economia com a troca de arcos (apenas os da seção de serviço sendo manipulada);

Se ganho for o melhor de todos os nós candidatos analisados até o momento e Se movimento for factível então

- Armazenar nó candidato como sendo o nó para onde armário será mudado;

Fim se

Fim para

- Mudar armário para o nó que foi armazenado;

- Trocar arcos da seção de serviço sendo manipulada;

- Avaliar solução candidata;

Se valor da solução candidata for menor que solução incumbente então

- Solução incumbente passa a ser a solução candidata;

Fim se

Fim para

- Trocar arcos entre seções de serviço;

Fim

Algoritmo 4.8 – Algoritmo de reposicionamento de armários.

Pelo exemplo da Figura 4.10, vê-se que alterações na posição do armário podem trazer reduções no custo total do projeto. O primeiro quadro mostra as distâncias de alguns trechos da rede exemplo. Os quadros seguintes mostram, respectivamente, os fluxos nos trechos de uma determinada solução e uma possível melhora na configuração, supondo que não haja uma rede existente.

No exemplo, o quadro 2 traz uma solução onde o armário localiza-se no ponto A e o trecho A-B necessita de dois cabos para suprir o fluxo indicado. Os dois cabos são o de 200

e 100 pares, considerando-se os cabos apresentados na Tabela 4.3 e o limite de até dois cabos por trecho. O quadro 3 melhora a solução ao mudar o armário para o ponto B, reduzindo o fluxo no trecho A-B. Com isso, necessita-se de apenas um cabo de 200 pares entre A e B, obtendo-se uma solução mais econômica.

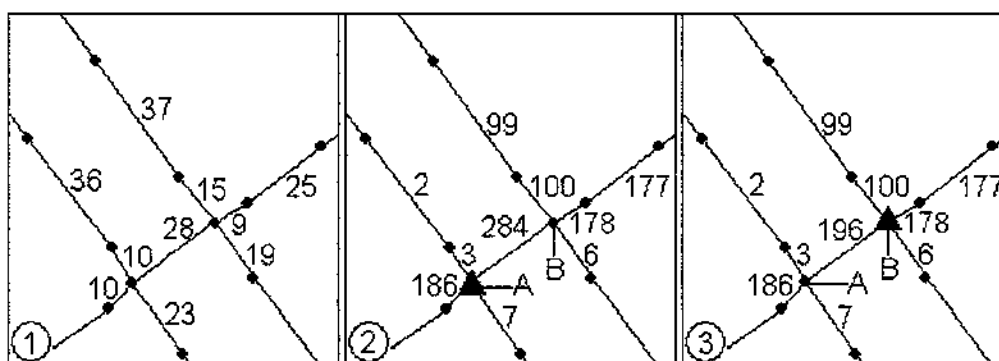
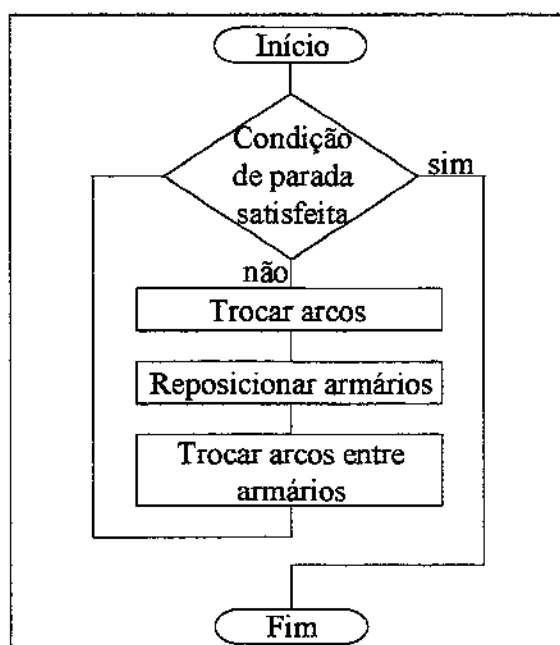


Figura 4.10 – Exemplo de melhoria com o reposicionamento de armários.

Um novo movimento de arcos fora da solução é realizado após todas as seções de serviço serem avaliadas. Mas, os arcos considerados são os que interligam seções de serviço – o primeiro tipo de arco da Figura 4.5. Essa última tentativa de melhora visa alterar a área de abrangência dos armários recém mudados, buscando novas economias.

Os tipos de movimentos definidos (trocas de arcos e movimentação de armários) são realizados até que a condição de parada seja satisfeita (Algoritmo 4.9).



Algoritmo 4.9 – Algoritmo do processo de melhoria da rede secundária.

Se for uma busca local, a condição de parada será quando não se conseguir mais nenhuma melhoria com a análise de todos os candidatos. Mas, como se implementou um controle sobre os movimentos para se explorar soluções além da encontrada pela busca local, a condição de parada pode ser outra. Esse controle é feito pela metaheurística *busca tabu*, apresentada a seguir.

4.4.5 Busca Tabu

A busca tabu, proposta por Fred Glover (1977), é uma metaheurística que trabalha como guia da busca local, direcionando seus movimentos para a exploração de diferentes regiões do espaço de soluções além do ótimo local. O Algoritmo 4.10 apresenta um esquema simplificado de *busca tabu*.

Início

- Dada uma solução inicial, considerá-la como solução atual e solução incumbente;
- Enquanto o critério de parada não for satisfeito faça:**
 - Buscar vizinhos da solução atual através de uma operação denominada movimento;
 - Selecionar o "melhor" vizinho encontrado não TABU, mesmo que este piore a solução atual;
 - Proibir movimentos relacionados ao atributo que gerou este "melhor" vizinho por um determinado número de iterações;
 - Fazer a solução atual igual à solução com o "melhor" vizinho escolhido;
- Se solução atual é melhor que a solução incumbente então
 - Atualizar a solução incumbente;

Fim se

Fim enquanto

Fim

Algoritmo 4.10 – Algoritmo da busca tabu.

No contexto do trabalho, viu-se que a solução para a rede secundária é uma árvore (em geral uma floresta), onde alguns arcos do grafo estão fora da solução. A indicação de quais arcos participam ou não da solução, e a posição dos armários, são considerados os atributos da solução.

Consegue-se outra configuração de árvore e, conseqüentemente, outra solução, ao se trocar um arco que esteja na solução por outro que não participe dela. Essa nova solução pode ser considerada "vizinha" da solução atual, obtida com o movimento de troca de arcos. O mesmo pode ser dito quando move-se armários de distribuição para novas posições.

Dois tipos de memórias podem ser empregadas na *busca tabu*: a memória de curto prazo e a de longo prazo – maiores detalhes podem ser obtidos em Díaz et. al (1996) e Glover e Laguna (1997). A memória de curto prazo é geralmente a mais usada (Díaz et. al, 1996) e armazena os atributos das soluções que mudaram no passado recente. Consiste em atribuir o rótulo de “tabu-ativo” aos atributos selecionados que ocorrem em soluções recentemente visitadas. Soluções que contêm elementos tabu-ativos, ou uma combinação particular desses elementos, são ditas *tabu*.

A duração em que um atributo permanece tabu-ativo (medido em número de iterações) é chamada de *duração tabu*. A *duração tabu* tem uma eficiência que depende do tamanho do problema, resultado mostrado empiricamente (Glover e Laguna, 1997).

Uma maneira de medir a eficiência da *duração tabu* é observar a ocorrência de ciclagem (retorno periódico à soluções já visitadas) quando tem-se uma *duração tabu* muito curta, ou uma deterioração da solução no caso dela ser muito longa. Em geral, *durações tabu* pequenas tendem a explorar regiões próximas a um ótimo local, enquanto que as maiores guiam a busca para regiões mais afastadas de um ponto ótimo local. Existem várias maneiras de se implementar uma *duração tabu* dinâmica. Essas implementações podem ser aleatória ou sistemática.

Há situações em que algum atributo tabu-ativo deve ser revogado, portanto removendo uma classificação tabu atribuída previamente. A ocorrência dessas situações podem ser determinadas pelo *critério de aspiração*. O *critério de aspiração* mais utilizado é quando uma solução obtida com algum atributo tabu for a melhor solução obtida até o momento.

A eficiência do componente memória de curto prazo está diretamente influenciada pela seleção do atributo, a regras que determinam o elemento como tabu-ativo, o tempo que o elemento permanece como tabu-ativo e a estratégia que permite movimentos tabus sob condições especiais.

Na memória de longo prazo é imprescindível armazenar um histórico das soluções visitadas ao longo da busca. Esse histórico pode conter informações, por exemplo, sobre a qualidade da solução, sua influência e a frequência com que determinados atributos aparecem ou não nas soluções. Essas informações, normalmente baseadas em frequências, ajudam no emprego de duas técnicas: a intensificação e a diversificação.

A intensificação modifica as regras de escolha, de forma a guiar movimentos para combinações e soluções já encontradas, e que sejam boas. Ela retorna a regiões boas para melhor explorá-las.

Na diversificação, encoraja-se o processo a examinar soluções não visitadas. Uma forma de implementar a diversificação é criar funções de penalidade e incentivo.

No trabalho não se utiliza a memória de longo prazo (esse aspecto poderá ser explorado em trabalhos futuros). A *busca tabu* implementada tem as seguintes características:

- Memória de curto prazo;
- Geração de vizinhança → novas soluções obtidas com a troca de arcos ou movimentação de armários;
- Nova solução a cada iteração Tabu → o melhor resultado obtido de toda a vizinhança analisada (será um movimento de arco e/ou um movimento de armário);
- Proibições →
 - o arco que deixar a solução não poderá retornar a ela por um determinado número de iterações (especificado pela *duração tabu*);
 - o arco que passar a fazer parte da solução não poderá abandoná-la por um determinado número de iterações (especificado pelo *duração tabu*);
 - o nó que deixar de possuir um armário não poderá abrigá-lo novamente por um determinado número de iterações (especificado pelo *duração tabu*);
- Critério de parada → determinado número de iterações Tabu;
- *Duração tabu* → fixa e aleatória, e de forma diferente para cada atributo a cada iteração; as formas implementadas de *duração tabu* aleatória são
 - Intervalo fixo e
 - Intervalo variável com o tamanho da rede;
- Critério de aspiração → por movimento, satisfeito se ele propor solução melhor que a atual (critério de aspiração dito objetivo e global).

O algoritmo da *busca tabu* implementada é semelhante ao mostrado no Algoritmo 4.9 para busca local. Uma diferença é que se procurou executar a troca de arcos em maior número de vezes. O movimento de armário só é executado depois que um determinado

número de trocas de arcos tenha sido realizada – além do movimento de arcos ser mais rápido, o objetivo dessa estratégia é explorar mais os *vizinhos* da solução atual.

Outra diferença em relação à busca local é na movimentação de armários. Apenas um armário mudará de posição, e será aquele que, com a mudança, conseguir o melhor valor de movimento dentre todos os outros armários. Essa alteração na lógica de execução do movimento tende a encontrar configurações que, inicialmente, melhoram a solução de partida.

Os processos de trocar arcos e movimentar armários, representados no Algoritmo 4.7 e Algoritmo 4.8, respectivamente, são alterados e rescritos no Algoritmo 4.11 e Algoritmo 4.12, respectivamente.

Início

- Reduzir em uma unidade a *duração tabu* dos arcos;

- Atualizar status tabu dos arcos;

- Obter arcos candidatos fora da solução;

Para cada arco candidato fora da solução faça:

- Inserir arco candidato na solução;

Se arco candidato interligar duas seções de serviço então

- Determinar arcos da solução atual que chegam aos dois armários;

Senão

- Determinar arcos da solução atual do ciclo formado;

Fim se

Para cada arco da solução atual encontrado faça:

- Analisar valor da solução com a retirada do arco da solução atual;

Se solução for a melhor entre todos os arcos analisados até o momento e

Se movimento for factível então

- Armazenar arco da solução atual como sendo o arco que deve sair;

Fim se

Fim para

- Retirar arco da solução atual que foi armazenado;

- Avaliar solução candidata;

Se solução candidata for a melhor entre todos os arcos candidatos até o momento então

Se o status dos arcos do movimento não for tabu ou

Se solução candidata for melhor que a solução incumbente então

- Armazenar solução candidata;

Fim se

Fim se

Fim para

- Atualizar solução atual para a solução candidata armazenada;

- Atribuir status tabu e *duração tabu* aos arcos envolvidos na troca;

Se nova solução atual for melhor que solução incumbente então

- Atualizar solução incumbente;

Fim se

Fim

Algoritmo 4.11 – Algoritmo de troca de arcos na rede secundária usando Busca Tabu.

Início

- Reduzir em uma unidade a *duração tabu* dos nós;
- Atualizar status tabu dos nós;

Para cada armário que possa ser movido faça:

- Obter nós candidatos a receberem o armário;

Para cada nó candidato encontrado faça:

- Obter valor da mudança do armário para o nó candidato (estimando custo de interligação do armário com a rede primária);
- Acrescentar ao valor obtido a possível economia com a troca de arcos (apenas os da seção de serviço sendo manipulada);

Se valor for o melhor de todos os nós candidatos analisados até o momento e Se movimento for factível então

Se o status do nó candidato não for tabu ou

Se solução candidata for melhor que a solução incumbente então

- Armazenar nó candidato como sendo o nó para onde armário será mudado;

Fim se

Fim se

Fim para

Se solução for melhor de todos os armários analisados até o momento então

- Armazenar melhor armário e seu nó candidato escolhido;

Fim se

Fim para

- Mudar o melhor armário encontrado para seu nó candidato armazenado;
- Trocar arcos da seção de serviço sendo manipulada;
- Atribuir status tabu e *duração tabu* ao nó de onde o melhor armário foi retirado;
- Avaliar nova solução;

Se valor da nova solução for menor que solução incumbente então

- Solução incumbente passa a ser a solução encontrada;

Fim se

- Trocar arcos entre seções de serviço;

Fim

Algoritmo 4.12 – Algoritmo de reposicionamento de armários usando Busca Tabu.

4.5 3ª Etapa: Projeto da Rede Primária

Após a determinação da posição dos novos armários na rede, necessita-se fazer suas interligações com alguma rede primária existente, ou diretamente com o centro de fios.

A alimentação dos armários é feita, em geral, através de cabos subterrâneos que saem do centro de fios e percorrem uma rede de galerias. O custo de interligação dos armários é composto, principalmente, pelos gastos com a construção ou expansão da rede de dutos, com cabos subterrâneos e com serviços para instalá-los.

A seguir, são relacionados os custos considerados, e seus valores adotados nesse trabalho (não se considera o custo de emendas de cabos). Dois tipos de redes primárias são

abordadas nesse trabalho: a rede primária metálica e a rede ótica primária (o apêndice A traz todos os custos considerados).

4.5.1 Custos Considerados Para a Rede Primária Metálica

Como visto no Capítulo 3, a rede de galerias é formada por dutos subterrâneos onde são acomodados os cabos de alimentação. Por cada um desses dutos passa um cabo responsável por “abastecer” os armários ao longo da área de estação. Os valores para construção das galerias e seus dutos são elevados, podendo ser dominante sobre o valor dos cabos metálicos.

Adotou-se um número mínimo de dutos para cada trecho novo da rede subterrânea. Nos locais que já possuem uma rede de galerias, o número de dutos poderá aumentar, se não houver mais nenhum disponível para acomodar novos cabos subterrâneos. Essa expansão tem um custo menor que a construção de um trecho novo, pois se supõe que outras infra-estruturas necessárias já estejam prontas – os pontos de serviço (caixas subterrâneas), por exemplo.

Os valores para os serviços de construção e expansão da rede de galerias adotados nesse trabalho são dados na Tabela 4.7.

Serviços	Custo (u.r. / m)	Infra-estrutura
Construção	30,00	Caixas subterrâneas, galerias e dutos subterrâneos
Expansão	20,00	Acréscimo de dutos subterrâneos

Tabela 4.7 – Custo do serviço de construção e expansão da galeria subterrânea.

De maneira análoga à rede de distribuição, os cabos metálicos adotados variam apenas em relação a modularidade. Os seis tipos utilizados são mostrados na Tabela 4.8 (valores do custo do cabo por metro). A Tabela 4.9 traz o valor do serviço de instalação do cabo metálico subterrâneo.

Tipos de cabos (modularidade)	Custo (R\$ / m)
400 pares	23,10
600 pares	31,50
900 pares	43,05
1200 pares	52,50
1800 pares	79,80
2400 pares	102,90

Tabela 4.8 – Cabos metálicos considerados para a rede primária metálica.

Serviço	Custo (u.r. / m)
Instalação do cabo telefônico	0,26

Tabela 4.9 – Custo do serviço de instalação de cabos metálicos subterrâneo.

Os valores de custos apresentados podem ser facilmente alterados.

4.5.2 Custos Considerados Para a Rede Ótica Primária

A rede primária também poderá ser ótica, onde duas situações são consideradas: os cabos de fibra ótica passarem pelos dutos subterrâneos ou os cabos de fibra ótica percorrerem a rede aérea, usando os postes nas ruas.

No caso da fibra ótica utilizar os dutos subterrâneos, o custo de construção ou expansão dos trechos da rede de galerias são os mesmos adotados para a rede primária metálica, apresentados no item anterior. Se a fibra ótica percorrer a rede aérea, os custos com a construção e expansão da rede de dutos não serão aplicados, mas apenas o de instalação dos cabos de fibras óticas, apresentado a seguir.

O custo do cabo de fibra ótica é mostrado na Tabela 4.10. A Tabela 4.11 apresenta os custos de instalação de cabos de fibras óticas, para ambas as situações consideradas para a rede ótica primária.

Tipo de cabo de fibra ótica	Custo (R\$ / m)
12 fibras	4,00

Tabela 4.10 – Cabo de fibra ótica considerado para a rede ótica primária.

Serviço	Custo (u.r. / m)
Instalação do cabo de fibras óticas na rede de dutos	0,26
Instalação do cabo de fibras óticas na rede aérea	0,20

Tabela 4.11 – Custo do serviço de instalação de cabo de fibras óticas.

4.5.3 Ponto de Entrada da Rede Subterrânea

A metodologia de resolução para a rede primária necessita da definição de um nó como o ponto inicial por onde os cabos chegam à área sendo projetada. Pode-se tratar esse nó como sendo a raiz da árvore que configura a rede primária. Este ponto, denominado aqui de ponto de entrada, pode estar localizado nos limites da região trabalhada e ser o final de uma possível rede primária existente, ou pode indicar a localização do centro de fios, caso este pertença à área em questão.

A Figura 4.11 traz o ponto de entrada para a rede exemplo. Da mesma forma que os valores de custos e outros parâmetros, esse nó é um dado de entrada para o programa e definido pelo projetista. Somente um nó pode ser definido como ponto de entrada.

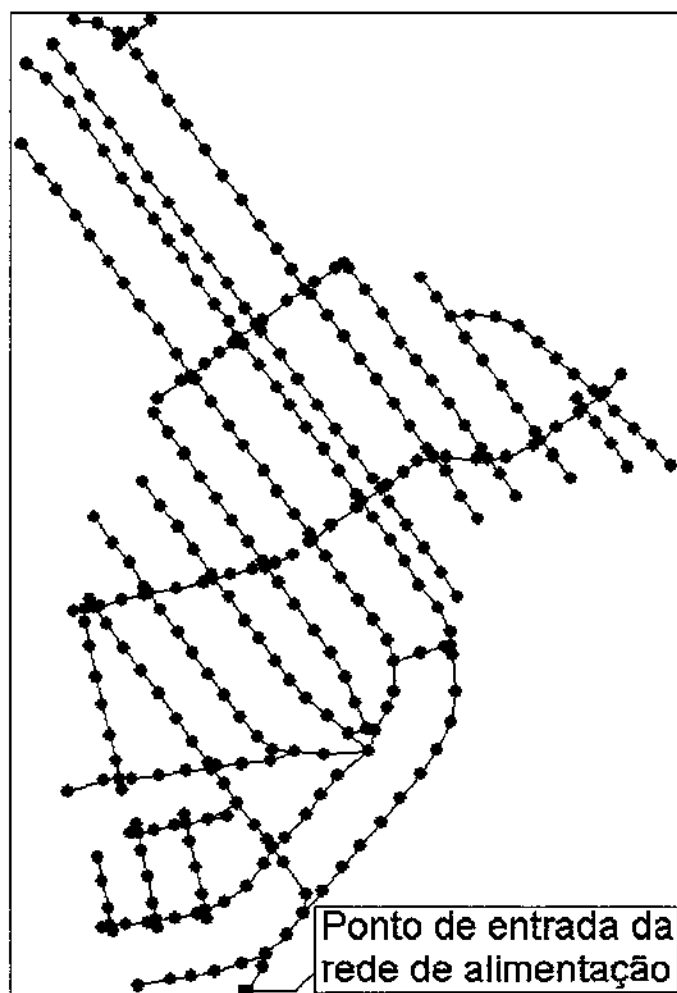


Figura 4.11 – Ponto de entrada da rede exemplo.

4.5.4 Metodologia de Resolução

Na metodologia considera-se o custo de construção da rede de galerias e também o custo dos cabos de alimentação (metálico ou ótico) – no entanto, o custo de construção das galerias é predominante. Vale lembrar que a metodologia de resolução será a mesma para ambos os tipos de rede primária consideradas (metálica ou ótica). No caso da rede ótica primária não utilizar a rede de galerias para se passar o cabo de fibras óticas, os custos de construção ou expansão da rede de dutos serão nulos.

Se apenas a construção das galerias determinasse o valor do projeto da rede primária (i.e., se considerássemos apenas o custo fixo de construção das galerias e desprezásssemos o custo variável de colocação dos cabos), bastaria construir uma árvore de *Steiner* para interligar os armários. Determinar uma árvore de *Steiner* é um problema NP-Hard, variante do problema da árvore geradora de custo mínimo. Nesse problema, tem-se um subconjunto de pontos S , onde $S \subseteq N$, sendo N é o conjunto dos nós da rede. Deseja-se encontrar uma árvore de custo mínimo (não necessariamente uma árvore geradora) que contenha todos os nós de S e podendo ter nós do conjunto $N-S$ (Ahuja, Magnanti e Orlin, 1993). Os nós do conjunto $N-S$ que possuam grau igual ou superior a três são chamados de pontos de *Steiner*. Os pontos de *Steiner* fazem parte da árvore de *Steiner*. Maiores detalhes sobre problemas de *Steiner* podem ser vistos em Hwang e Richards (1992).

Se, ao contrário das galerias, apenas os cabos fossem necessários na rede primária, talvez a solução que produzisse melhores resultados fosse a do caminho mínimo entre o ponto de entrada da rede e o local do armário – a solução com caminho mínimo seria ótima se apenas um tipo de cabo fosse usado (Magnanti e Mirchandani, 1993). O algoritmo de *Dijkstra* (Ahuja, Magnanti e Orlin, 1993) permite encontrar os caminhos mínimos de um nó fonte para todos os outros nós da rede com comprimento não negativo para os arcos. Nesse trabalho, é o algoritmo usado para encontrar caminhos mínimos.

Como ambos os custos – construção de galerias e uso dos cabos alimentadores – influenciam no valor final da rede primária, a estratégia busca uma solução que considere esses dois componentes de custos. Inicialmente, a solução construtiva proposta é ligar os armários de distribuição com o ponto de entrada através de caminhos mínimos. O custo dessa solução inicial tende a ser elevado, devido à extensão da rede de galerias resultante. A Figura 4.12 mostra uma rede primária para uma solução inicial com dois armários de distribuição da rede exemplo, usando-se o ponto de entrada da Figura 4.11.

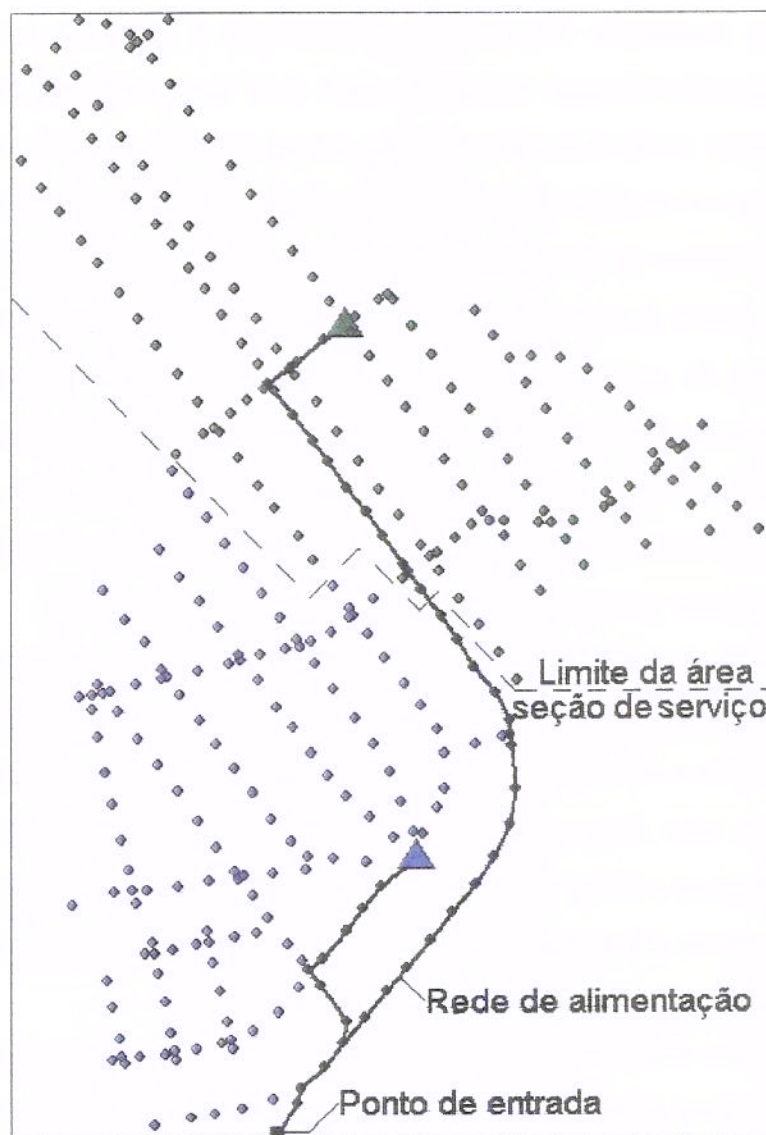


Figura 4.12 – Rede primária inicial.

A partir da solução inicial, analisa-se um conjunto de nós que possuam graus iguais ou superiores a três, na tentativa de melhorar a solução. A intenção é encontrar nós que sejam pontos de *Steiner* para fazerem parte da árvore de solução, e que minimizem o custo da rede primária. A Figura 4.13 mostra o conjunto desses nós para a rede exemplo.

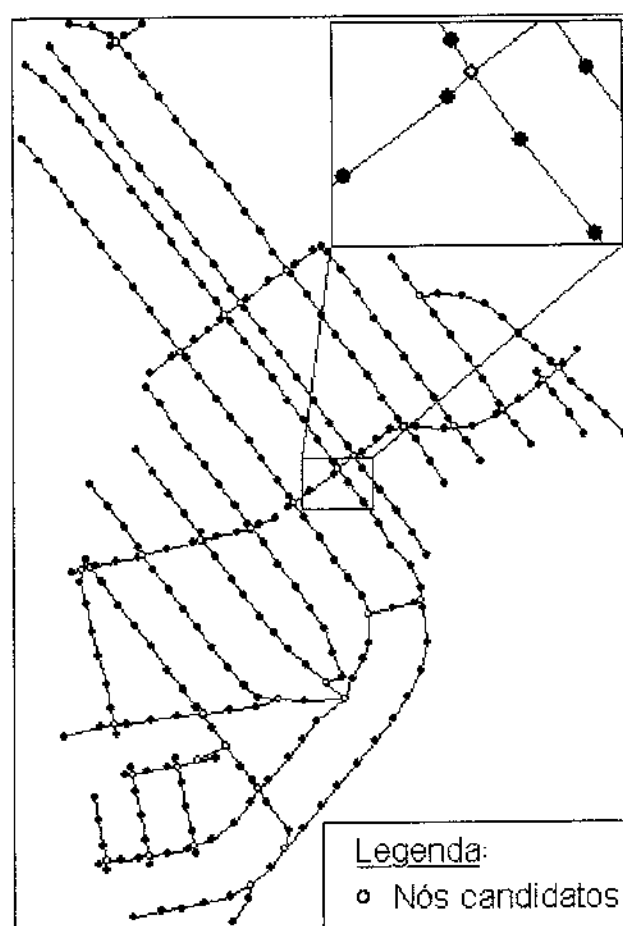


Figura 4.13 – Nós candidatos do processo de melhoria da rede primária.

Para avaliar cada nó candidato desse conjunto, constrói-se uma nova rede primária. Durante o processo de construção dessa nova rede primária de avaliação, alguns arcos são forçados a participar dela, atribuindo-se custo zero a eles. Esses arcos de custo zero são os que pertencem ao caminho mínimo do nó candidato até o armário de distribuição mais próximo a ele; atribui-se também custo zero aos arcos que ligam os outros armários ao ponto de entrada, com exceção do armário mais próximo do nó candidato.

A Figura 4.14 ilustra esse processo para o nó candidato destacado na Figura 4.13. A Figura 4.14-A mostra os arcos com custo zero que ligam o nó candidato ao armário mais próximo a ele (armário mais acima na figura) e os arcos que ligam o ponto de entrada com o outro armário (mais abaixo na figura). Como esses arcos estarão com custo zero, a construção de uma rede primária ligando o ponto de entrada aos armários vai procurar usá-los, resultando em uma nova rede primária, apresentada na Figura 4.14-B. Vê-se que essa nova rede primária é melhor que a rede primária inicial da Figura 4.12.

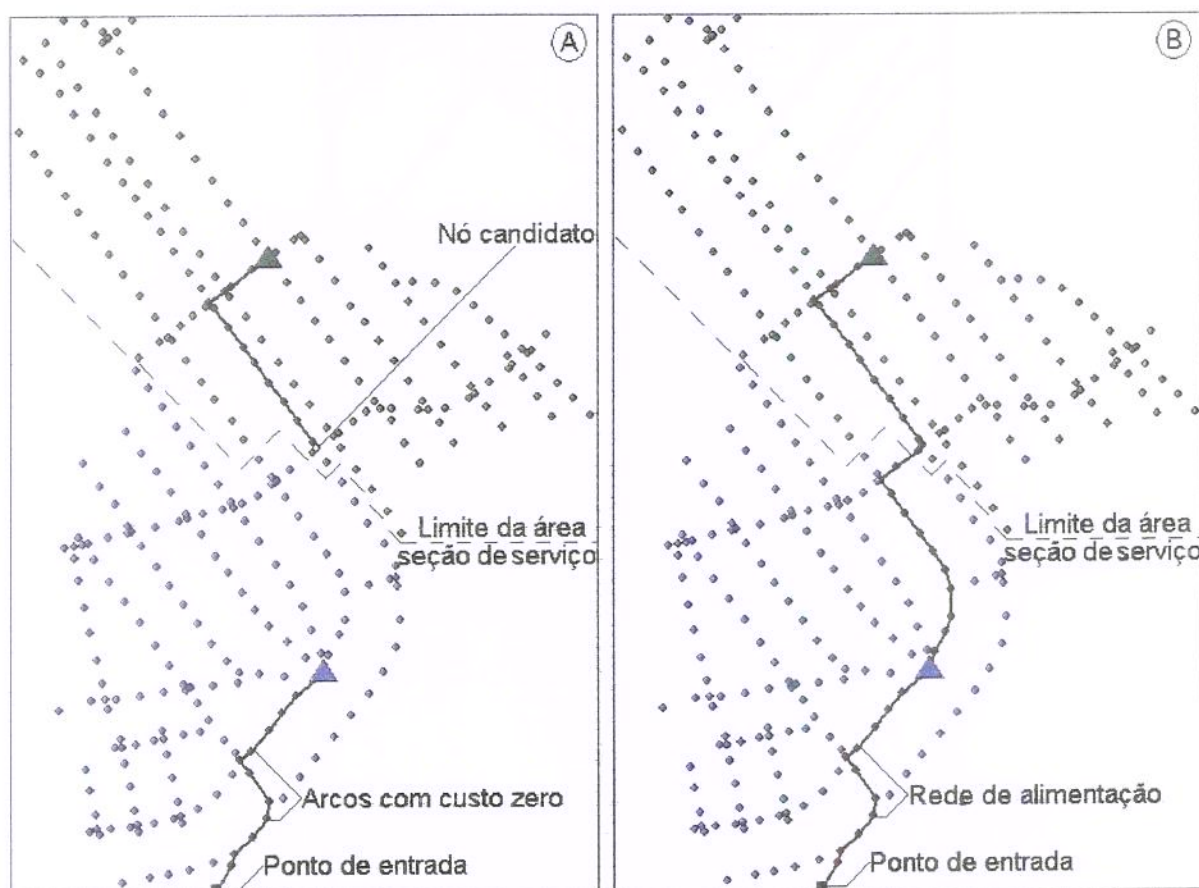


Figura 4.14 – Análise de um nó candidato e sua rede primária correspondente.

Após todos os nós candidatos terem sido testados, escolhe-se aquele que produzir a melhor configuração para a rede primária, que passa a ser a nova rede incumbente. Esse processo prossegue, até que nenhuma melhora seja conseguida.

O processo de analisar os nós candidatos se repete, mas desta vez ligando cada nó candidato aos dois, depois aos três e, finalmente, a todos os armários mais próximos.

Existirão armários fixos (que já se encontram fisicamente instalados e operando) e também uma rede de alimentação que os interligue ao ponto de entrada, se o cenário for um *reprojeto*. Nesse caso, em todo o processo descrito anteriormente essa rede será considerada e seus arcos terão custo zero.

Pode ocorrer de alguns trechos da rede primária existente estar com todos os dutos subterrâneos ocupados. Apesar da necessidade de expansão nas suas capacidades (dutos), esses trechos terão custo zero durante o processo de melhoria. O custo dessa expansão é considerado depois de definida a rede primária.

O Algoritmo 4.13 mostra o processo de melhoria da rede primária.

Início

- Obter nós candidatos a participarem da rede primária;
- $n := 1$;
- $N :=$ número total de armários novos;
- $S :=$ armários novos;

Enquanto $n \leq N$ faça:

Para cada nó candidato encontrado faça:

- Obter caminho mínimo do nó candidato com os armários novos;
- $\bar{S} := n$ armário(s) mais próximo(s) do nó candidato;
- Atribuir custo zero aos arcos do caminho mínimo entre o(s) armário(s) de $\bar{S}$ e o nó candidato;
- Atribuir custo zero aos arcos da rede primária atual entre o(s) armário(s) de S e o ponto de entrada da rede primária;
- Construir rede primária candidata através do caminho mínimo entre o ponto de entrada e os armários de S ;

Se custo da rede primária é o menor de todos os nós candidatos analisados então

- Armazenar rede primária candidata;

Fim se

Fim para

Se custo da rede primária candidata armazenada é menor que custo da rede primária atual então

- Rede primária atual passa a ser a rede primária candidata armazenada;

Fim se

Se $n = N$ então

- $n := N$;

Senão

- $n := n + 1$;

Fim se

Fim enquanto

Fim

Algoritmo 4.13 – Algoritmo do processo de melhoria da rede primária.

A seguir estão mais detalhes sobre a ferramenta computacional construída.

4.6 Ferramenta Computacional

A proposta desse trabalho é desenvolver uma metodologia, acompanhada de uma ferramenta computacional para apoio ao projeto de rede externa telefônica. Para implementação dos programas computacionais, escolheu-se uma linguagem de programação que possibilitasse a utilização de conceitos de orientação para objetos. Essa técnica de programação aproxima ao máximo a relação entre as estruturas de dados definidas e as operações que fazem acesso a elas (Szmit, 1993).

Os principais componentes desse paradigma de programação são (Wiener e Pinson, 1991):

- Objeto – coleção de dados privados e um conjunto de métodos que atuam sobre estes dados;
- Mensagem – é o meio de se ativar um método de determinado objeto;
- Classe – trata-se de uma coleção de objetos que apresentam semelhanças entre si (semelhanças estruturais e funcionais);
- Instância – os objetos são instâncias de uma classe (cada instância, ou objeto, tem propriedades especificadas pela descrição de sua classe);
- Método – formado por uma interface, que descreve suas características externas (nome, tipos de parâmetros e valor retornado), e pela implementação, que contém o código propriamente dito.

Existem propriedades que devem estar presentes em uma linguagem de programação orientada a objetos (Szmit, 1993; Wiener e Pinson, 1991):

- Abstração – é conseguir representar algo real ou partes dele na forma de objetos;
- Encapsulamento – é a capacidade de ocultar as informações de implementação do objeto, “separando” o usuário do implementador;
- Herança – permite que uma nova classe seja descrita a partir de outra já implementada, herdando suas propriedades;
- Polimorfismo – quando uma mesma mensagem pode ser enviada a objetos diferentes e cada um responder da forma mais apropriada para sua classe.

Essas propriedades facilitam a evolução da aplicação, reduzindo o retrabalho de programação. A linguagem de programação C++ apresenta todos os componentes e propriedades discutidos anteriormente, sendo a escolhida para a implementação do ferramenta. Construída para a plataforma de microcomputadores sob o sistema operacional Windows da Microsoft, utilizou-se recursos gráficos que facilitam a visualização das soluções apresentadas. A Figura 4.15 mostra a tela inicial da aplicação.

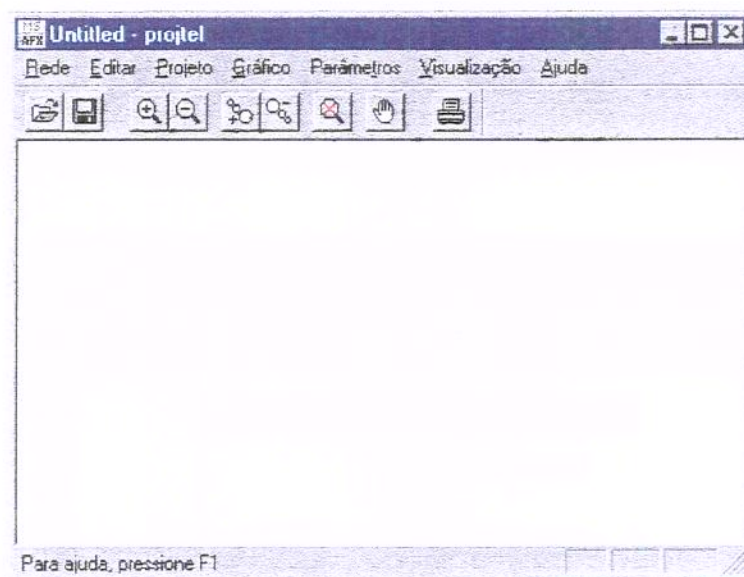


Figura 4.15 – Tela inicial da ferramenta computacional desenvolvida.

As representações das áreas onde se deseja realizar um projeto só são possíveis se existirem informações (formato específico para a ferramenta) sobre a posição dos nós (postes da rede), a interligação entre eles (arcos da rede) e valores das demandas nos nós.

Após a leitura da rede, conforme Figura 4.16, o usuário poderá escolher o tipo de projeto que deseja realizar: um *projeto inicial* ou um *reprojeto* – opção *projeto* do menu principal. No caso de um *reprojeto*, há a necessidade de informações sobre uma rede antiga e o sistema irá perguntar pelos arquivos específicos.

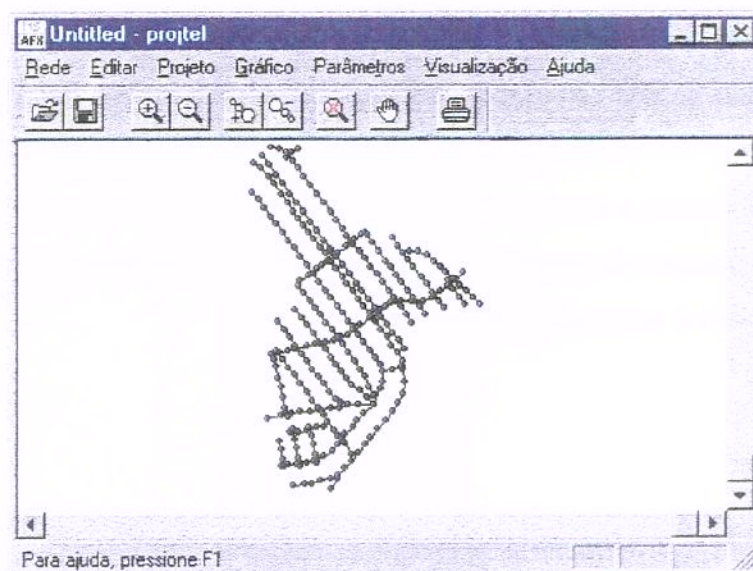


Figura 4.16 – Tela com rede exemplo aberta.

O próximo passo é a informação de quantos novos armários são desejados no projeto, exemplificado pela Figura 4.17. Com todos esses dados, o sistema inicia a construção do projeto da rede externa telefônica, realizando todas as etapas apresentadas ao longo desse capítulo.

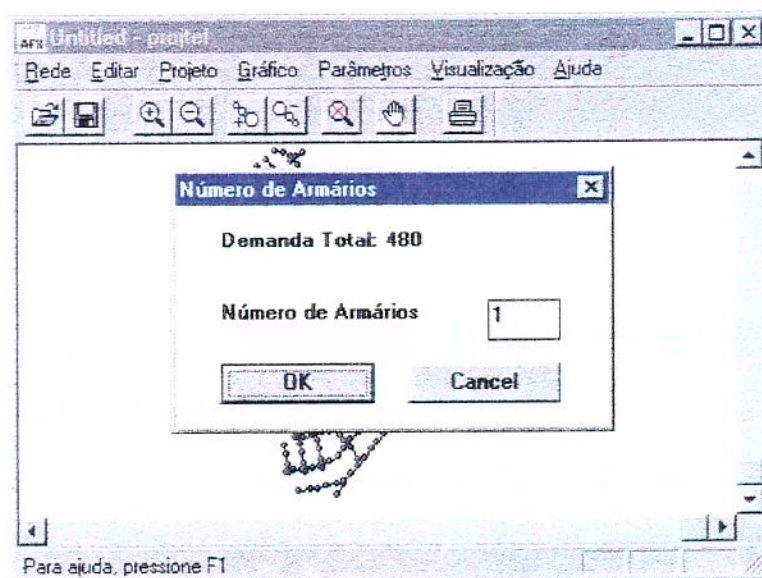


Figura 4.17 – Tela para informar quantos armários novos o projeto terá.

O resultado final pode ser visto na configuração apresentada pela aplicação e o custo total do projeto é obtido no menu principal com a opção *projeto*. Outros detalhes, como informações sobre cada uma das seções de serviço, aproximação e afastamento dos objetos na tela, valores dos fluxos e comprimentos nos arcos, armazenamento (salvar) e impressão do resultado podem ser executados facilmente na barra de ferramentas ou nos itens do menu.

A Figura 4.18 mostra o resultado final para o *projeto inicial* de um armário na rede exemplo – com aproximação do ponto de localização do novo armário. A visualização dos custos do mesmo projeto é mostrada na Figura 4.19.

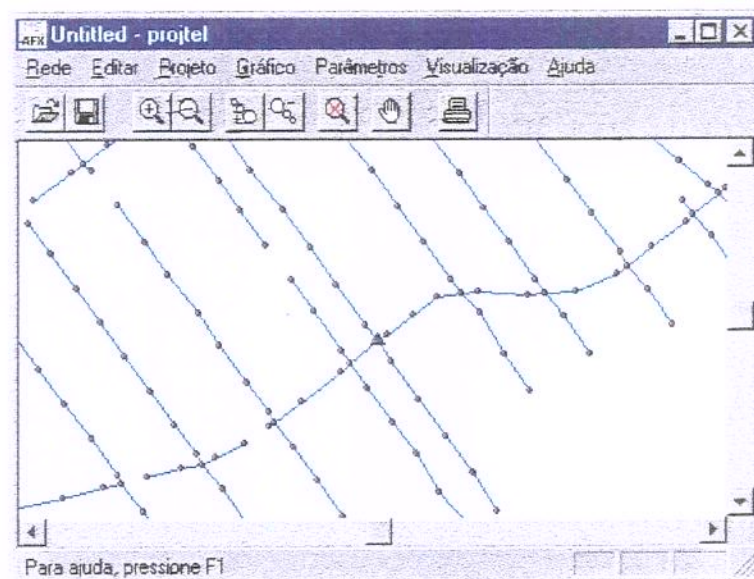


Figura 4.18 – Tela final do projeto realizado – localização do armário de distribuição.

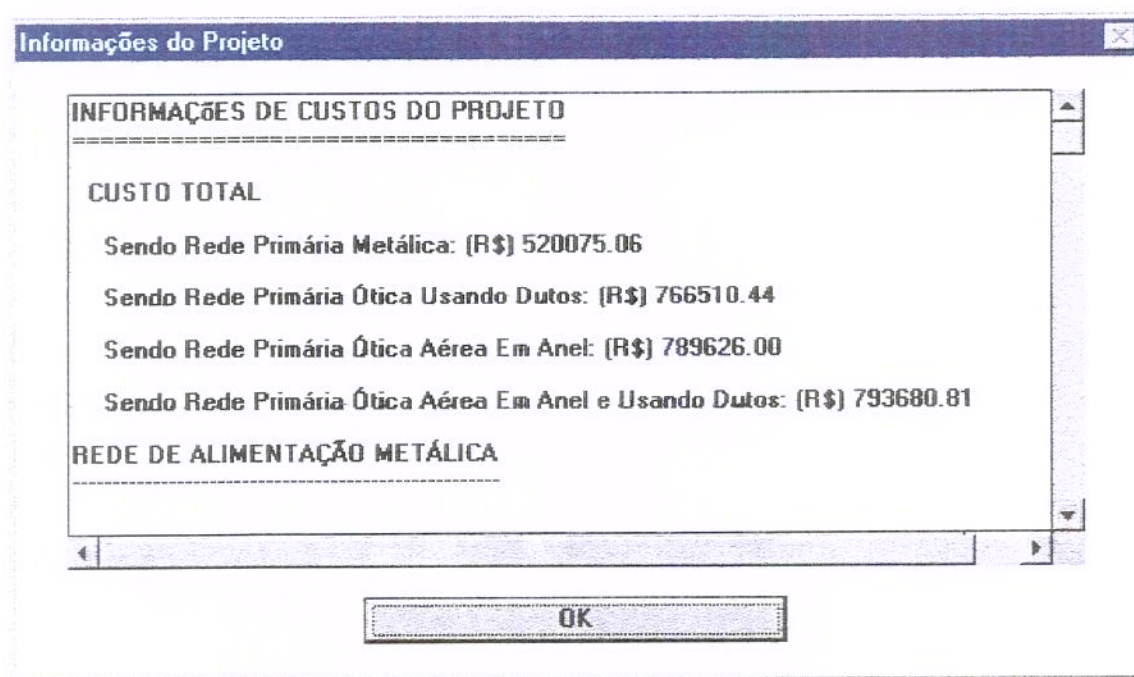


Figura 4.19 – Informação de custo do projeto realizado.

No capítulo seguinte são apresentados estudos de casos que ilustram a metodologia apresentada.

Capítulo 5 – Estudos de Casos

5.1 Introdução

Esse capítulo traz os estudos de casos realizados, apresentando, inicialmente, casos que demonstram a eficiência dos métodos de pesquisa operacional desenvolvidos e descritos no capítulo anterior. Analisa-se também alguns cenários que usam os armários óticos, interligados com as centrais através de fibras óticas.

Os estudos foram realizados em uma área da região de Campinas. A localização dos postes (nós) e os valores dos comprimentos dos arcos são reais. A demanda dos pares telefônicos, suas concentrações e o ponto de entrada da rede de alimentação são arbitrados (valores plausíveis). A rede teste, composta por 3.758 nós e 4.012 arcos, é mostrada na Figura 5.1, destacando-se o ponto de entrada considerado. Usou-se um computador Pentium MMX 233 MHz com 32 MB de memória RAM na realização dos testes. O tempo de execução dos testes variou de 30 a 50 minutos, dependendo do cenário e de outros parâmetros adotados (duração tabu, por exemplo).

Os dois cenários possíveis, apresentados nos capítulos anteriores, foram abordados: o projeto inicial e o reprojeto. No projeto inicial, uma rede externa é projetada em uma área onde não exista nenhuma rede existente. A demanda total simulada é de 4.486 assinantes. No reprojeto, expande-se uma rede existente (chamada de rede antiga) para atender uma demanda total de 6.560 assinantes, ou seja, 2.074 novos telefones. A rede antiga considerada no reprojeto foi o melhor resultado obtido com o projeto inicial da rede.

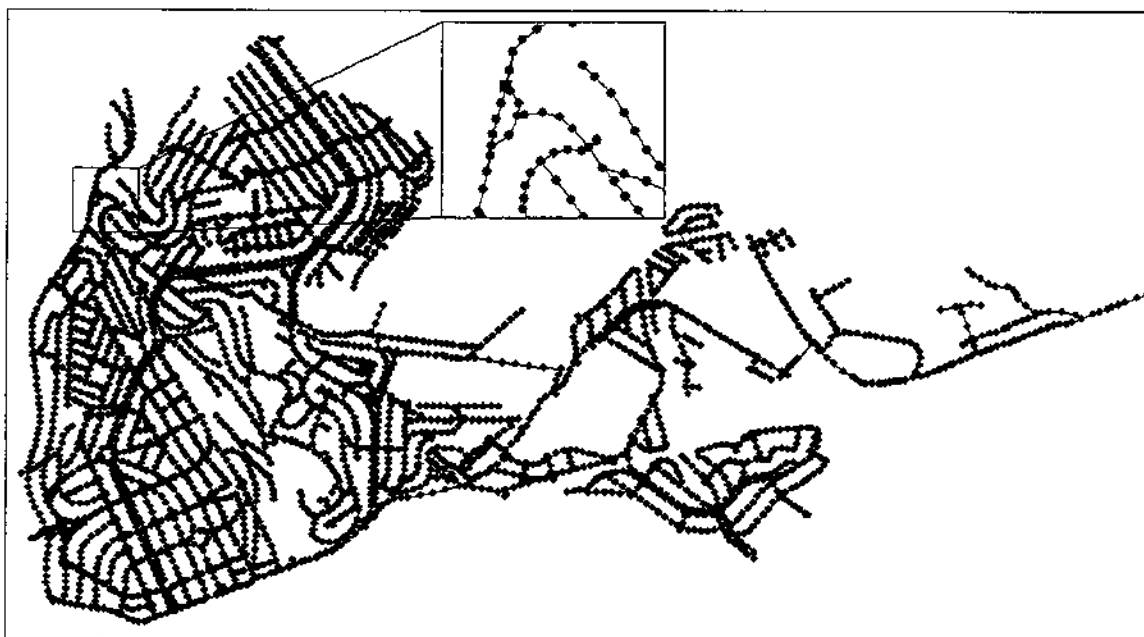


Figura 5.1 – Rede utilizada nos testes.

O armário de distribuição e os tipos de cabos da rede primária e secundária utilizados nos estudos são os apresentados no capítulo 4, juntamente com seus valores de custo e instalação.

Os armários de distribuição utilizados (metálicos ou óticos) têm capacidade de 600 pares, mas se considerou a necessidade de usá-los com uma folga de 20%, necessária para manutenção. Assim, a capacidade do armário passa a ser de 480 pares. Em alguns testes se permitiu ultrapassar esse número, mas penalizou-se qualquer movimento que ocasionasse a diminuição na folga. Para isto, utilizou-se uma função barreira para encarecer o valor do movimento, crescendo proporcionalmente ao valor excedido. Isto faz com que um armário fique com um número de assinantes acima de 480 pares apenas quando outras economias são conseguidas. Mais detalhes sobre a penalização podem ser vistos no capítulo 4.

5.2 Projeto Inicial

Como dito anteriormente, o projeto inicial compreende determinar uma rede externa para uma área onde ainda não tenha nenhum tipo de serviço telefônico. Nele serão definidos novos cabos para a rede primária e secundária, podendo o resultado final ter um valor elevado pela não existência de qualquer estrutura instalada.

Utilizou-se 10 armários metálicos em todos os estudos do projeto inicial da área mostrada na Figura 5.1. Esses armários são suficientes para atender a demanda de 4.486 assinantes – considerando os 20% de folga para manutenção. As fibras e armários óticos são avaliados nos reprojetos.

Descreve-se a seguir os tipos de estudos realizados.

5.2.1 Projeto Sem Melhoria

Nesse tipo de estudo usou-se os métodos da primeira etapa, apresentados no Capítulo 4. Localiza-se os armários de distribuição buscando a minimização do produto fluxo pela distância, seguido pelos métodos de substituição canalizada, radialização e factibilização da rede. Além disso, realiza-se uma configuração inicial para as redes primária e secundária, e tenta-se melhorar a rede primária através dos métodos apresentados no capítulo 4. Não se permite que os armários de distribuição ultrapassem 480 assinantes. A Figura 5.2 é o resultado desse estudo onde cada cor representa uma seção de serviço.

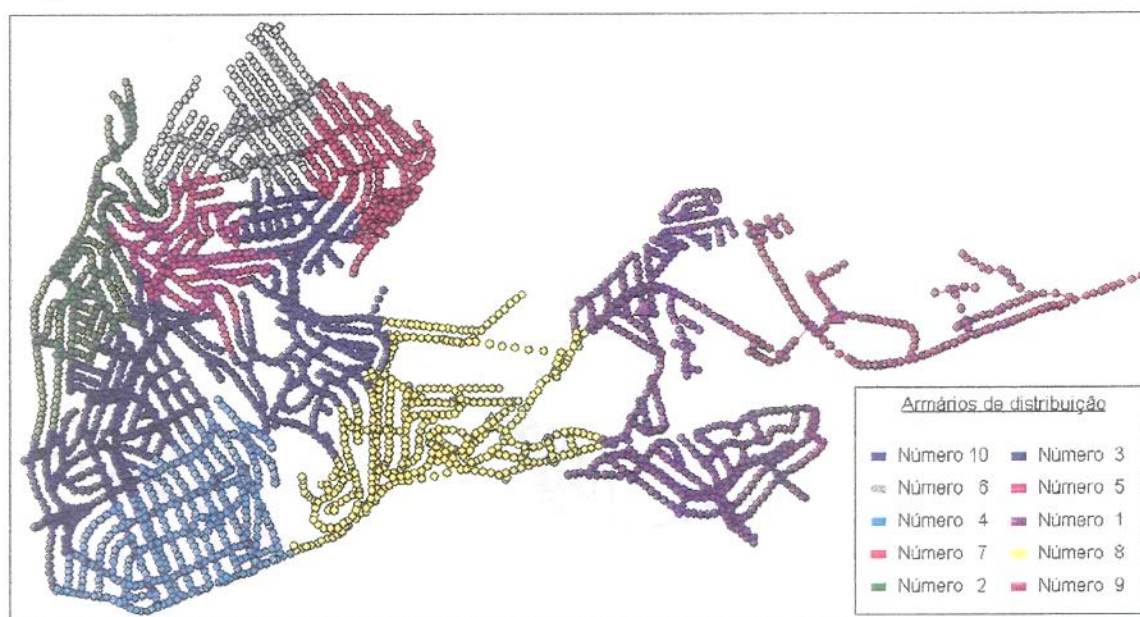


Figura 5.2 – Projeto inicial sem melhoria para 10 armários.

A Figura 5.3 traz o mesmo projeto mas evidenciando a rede primária sem aplicação de melhorias. Os trechos da rede de dutos e os armários de distribuição são representados por linhas pretas e triângulos, respectivamente. Nota-se que na rede primária obtida sem aplicação das melhorias, praticamente não há trechos compartilhados, indicando que a

solução inicial para a rede primária, baseada no caminho mínimo entre os armários e o ponto de entrada na rede (representado por um quadrado), precisa ser melhorada.



Figura 5.3 – Rede primária do projeto inicial sem melhoria para 10 armários.

Com a execução dos métodos heurísticos de melhoria para a rede primária, há um número maior de trechos compartilhados por vários armários. O resultado pode ser visto na Figura 5.4. A rede de distribuição permanece inalterada.



Figura 5.4 – Projeto inicial para 10 armários – rede primária melhorada.

O ganho com a aplicação da heurística para a rede primária é melhor visualizado na Figura 5.5. As áreas à esquerda e à direita da figura mostram a mesma parte da rede teste antes e após o processo de melhoria, respectivamente. Vários arcos da rede de alimentação passam a ser utilizados por mais de um armário, reduzindo o custo total. Ainda na Figura 5.5, os círculos nos nós da área à esquerda foram os nós candidatos escolhidos para se avaliar uma possível melhora na solução (nós com grau igual ou superior a três).

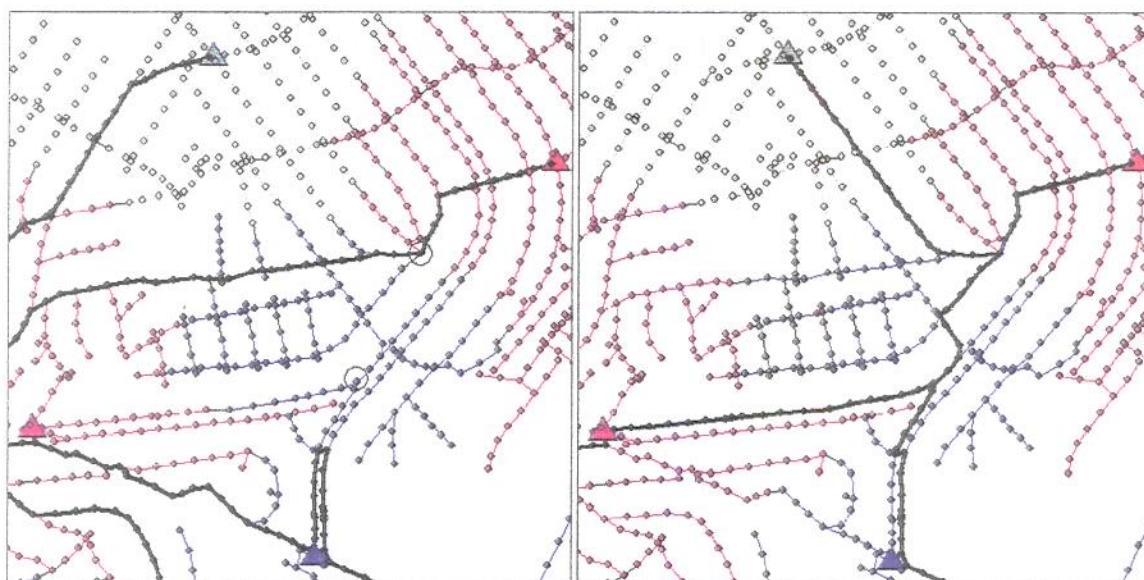


Figura 5.5 – Parte da rede primária melhorada ampliada.

Outras informações sobre esse projeto estão resumidas na Tabela 5.1. Nela têm-se os gastos com as redes primária e secundária, os cabos utilizados e a ocupação dos armários. No valor do armário de distribuição está incluído o gasto com sua instalação.

Redes		Distribuição	Alimentação
Equipamentos	Armários (R\$)	21.500,00	–
	Cabos Novos (R\$)	188.095,06	501.656,31
Serviços	Instalação de Cabo (R\$)	287.927,25	25.287,61
	Retirada de Cabo (R\$)	0,00	–
Galerias	Construção (R\$)	–	2.917.800,00
	Construção (m)	–	9.726
CUSTO TOTAL (R\$)		3.942.266,25	

Comprimento dos Cabos Metálicos Utilizados nas Redes (m)								
Distribuição					Alimentação			
200	100	50	30	20	2400	1800	1200	600
5.816	8.961	8.118	7.292	69.432	4.099	2.324	2.737	4.307

Armários	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ocupação (pares)	480	479	480	480	478	479	480	468	183	479

Tabela 5.1 – Valores do projeto inicial sem melhoria para 10 armários.

Nos resultados percebe-se os gastos elevados com construção da rede de galerias, que possui 9,76 Km. Nota-se também a inexistência de serviços de retirada de cabos por, supostamente, se trabalhar com uma área sem nenhuma rede instalada.

Este projeto será considerado como um projeto inicial sem melhoria e servirá de referência para se avaliar economias com as outras heurísticas implementadas.

5.2.2 Projeto Com Melhoria

A melhoria na rede secundária foi implementada, inicialmente, como um processo de busca local. Num segundo estágio, controla-se a busca local através da metaheurística Busca Tabu. Estudou-se os resultados de ambas as implementações sobre a rede teste, apresentados a seguir.

Considerou-se duas situações possíveis para os estudos com os métodos de melhoria para a rede secundária. A primeira situação não permite se ultrapassar a folga de pares estabelecida em 20% da capacidade total do armário, sendo proibido qualquer movimento (tanto de arcos como de armários) que viole esta restrição (considera-se como uma solução inviável). Na segunda situação, pode-se utilizar os pares estabelecidos para a folga, mas se aplica uma penalização caso isto ocorra. Esta penalização é realizada através de uma função barreira, como mencionado anteriormente e descrita no capítulo 4.

Na movimentação de armários, os nós candidatos considerados foram os que tinham grau igual ou superior a três e se encontravam a uma distância de até oito níveis da posição atual do armário (i.e., nós com até oito arcos de distância da posição atual).

Busca Local

Na busca local os movimentos de arcos e armários são intercalados e executados até que nenhuma melhora adicional possa ser conseguida. Os nós candidatos ao movimento de armários são analisados considerando suas proximidades com a configuração inicial para a rede primária – esta configuração é obtida após a localização dos armários e aplicação da heurística de melhoria para a rede primária.

A Figura 5.6 traz o resultado do projeto inicial, usando-se uma busca local sem violar a restrição que obriga a existência de folgas de pares nos armários.

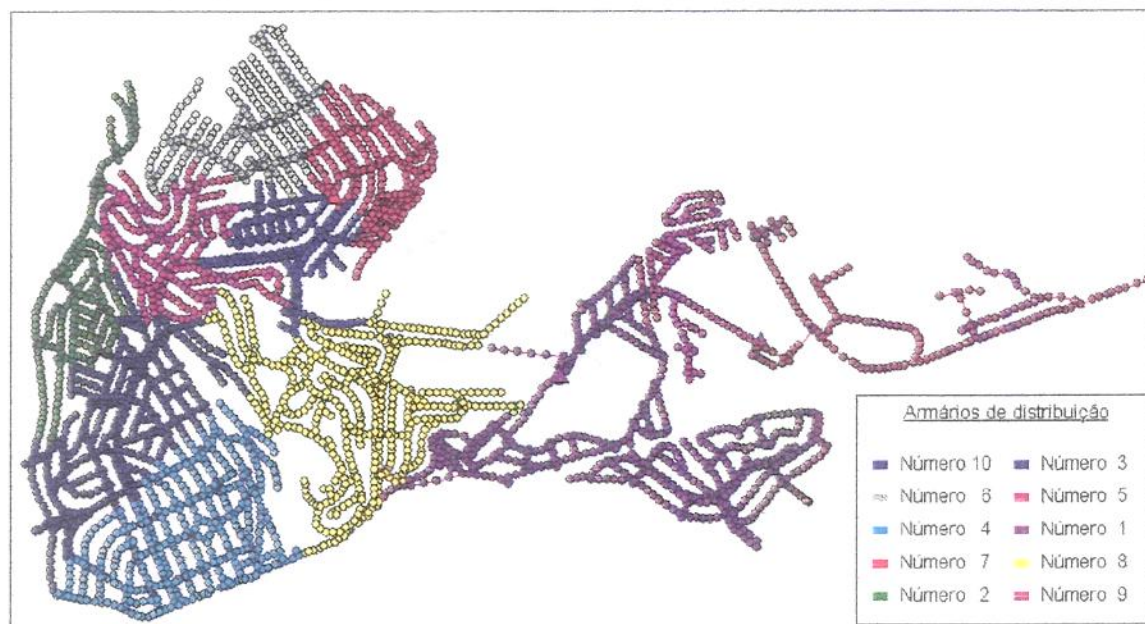


Figura 5.6 – Projeto inicial 10 armários – busca local sem ultrapassar folga de pares.

Nota-se que praticamente todos os armários de distribuição tenderam a mudar suas localizações para posições mais próximas ao ponto de entrada da rede de alimentação (mostrado na Figura 5.1). O valor de construção da rede de galerias é dominante sobre outros custos do projeto, justificando esse deslocamento – que só não foi ainda mais próximo do ponto de entrada devido à imposição de se obedecer a folga de pares nos armário de distribuição.

Outra observação importante é que os armários passaram a ter um número mais uniforme de assinantes. O armário de distribuição 9, por exemplo, praticamente dobrou seu atendimento, sendo que na solução sem melhoria havia folga considerável em sua capacidade (Tabela 5.1).

A mesma solução pode ser visualizada na Figura 5.7, onde se destaca a ligação da rede primária e a posição dos armários de distribuição.



Figura 5.7 – Projeto inicial 10 armários com busca local – rede primária.

A Tabela 5.2 resume as informações mais importantes do projeto estudado. Percebe-se que os gastos com a rede de distribuição são maiores que os apresentados no estudo anterior. Isto acontece devido ao acréscimo no número de cabos de 200 pares, indicando um afastamento do armário de distribuição do centro de demanda da seção de serviço. A Figura 5.8 traz o fluxo nas saídas do armário 8; nota-se que uma delas está praticamente no seu limite superior (400 pares), mostrando um desbalanceamento em suas saídas laterais.

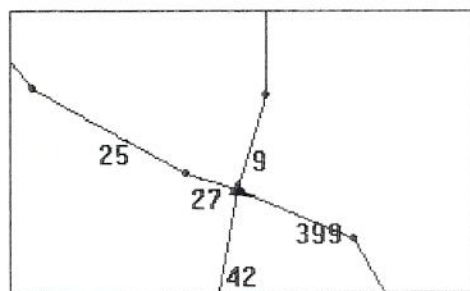


Figura 5.8 – Fluxo no armário do projeto inicial com 10 armários.

No entanto, o custo com o aumento do comprimento total de cabos na rede secundária é compensado pela redução nos gastos com cabos e construção de galerias para a rede primária. Como o custo de construção da galerias é dominante no custo total do projeto, o acréscimo nos gastos da rede secundária (em relação ao projeto sem melhoria)

acaba sendo irrisório (cerca de 2%) diante da economia obtida na construção da rede primária (aproximadamente 24%). No projeto anterior tem-se 9,76 Km de construção de galerias, reduzidos para 7,54 Km no projeto atual.

Redes		Distribuição	Alimentação
Equipamentos	Armários (R\$)	21.500,00	–
	Cabos Novos (R\$)	209.814,84	352.816,84
Serviços	Instalação de Cabo (R\$)	276.113,19	19.604,00
	Retirada de Cabo (R\$)	0,00	–
Galerias	Construção (R\$)	–	2.262.000,00
	Construção (m)	–	7.540
CUSTO TOTAL (R\$)		3.141.849,00	

Comprimento dos Cabos Metálicos Utilizados nas Redes (m)									
Distribuição					Alimentação				
200	100	50	30	20	2400	1800	1200	600	
11.675	7.847	8.669	5.312	62.475	1.964	502	2.337	4.113	

Armários	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ocupação (pares)	478	415	455	479	414	478	480	477	357	453

Tabela 5.2 – Projeto inicial 10 armários – busca local sem ultrapassar folga de pares.

Na implementação onde se permite usar os pares destinados à folga (o armário adotado consegue atender até 600 assinantes), estabeleceu-se as seguintes penalidades:

- se a ocupação do armário de distribuição estiver entre 80% e 90% de sua capacidade total, portanto entre 480 e 540 pares, a penalização será um acréscimo no valor do movimento de 10 vezes o número de pares excedentes;
- se a ocupação do armário estiver acima de 540 pares mas até sua capacidade total (600 pares), a penalização será 100 vezes o número excedido, somada no valor do movimento;
- para ocupações acima de 600 pares, ficando o armário acima de sua capacidade de atendimento, a penalização sobe para 10.000 vezes o número excedido – essa penalização evita a ultrapassar a capacidade do armário de distribuição.

A Figura 5.9 traz o resultado do projeto inicial permitindo-se ocupações acima de 480 pares no armário de distribuição. Ainda se empregam métodos de busca local para a rede secundária e primária.



Figura 5.9 – Projeto inicial 10 armários – busca local ultrapassando folga de pares.

Nesse estudo observa-se mudanças no formato das seções de serviço em relação ao último projeto. Estas mudanças refletem, novamente, a tendência dos armários em se posicionar em locais os mais próximos possíveis do ponto de entrada da rede de alimentação. O custo adotado para construção das galerias (R\$ 300,00 por metro) é predominante na decisão de se minimizar os gastos com o projeto.

O armário de distribuição 5, por exemplo, mudou quase que totalmente sua área de atuação em relação ao projeto anterior. Isto permitiu abrir uma “passagem” para os armários 6 e 7 se aproximarem do ponto de entrada.

Praticamente todos os armários de distribuição estão distantes do centro de demanda da seção de serviço. A única exceção é o armário 9, que não se deslocou porque o nó que poderia economizar o gasto com a rede primária, mostrado na Figura 5.10, está a mais de oito níveis de distância da atual localização do armário – portanto, pelo critério adotado, não poderia ser escolhido como nó candidato.

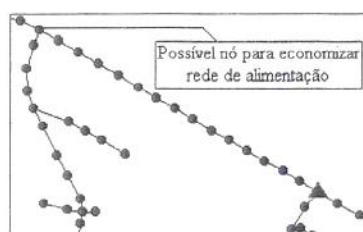


Figura 5.10 – Armário do projeto inicial com 10 armários e busca local.

A Figura 5.11 mostra a rede primária e a Tabela 5.3 apresenta outras informações do projeto.

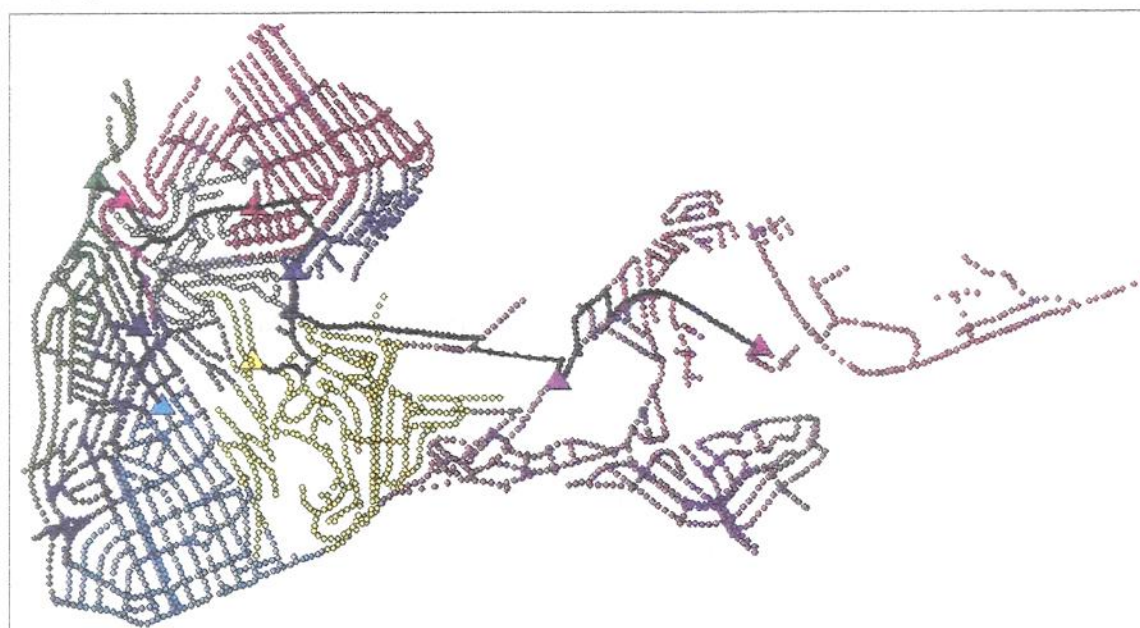


Figura 5.11 – Projeto inicial 10 armários com busca local – rede primária.

	Redes	Distribuição	Alimentação
Equipamentos	Armários (R\$)	21.500,00	–
	Cabos Novos (R\$)	221.802,00	337.635,91
Serviços	Instalação de Cabo (R\$)	278.953,50	18.119,41
	Retirada de Cabo (R\$)	0,00	–
Galerias	Construção (R\$)	–	2.090.700,00
	Construção (m)	–	6.969
CUSTO TOTAL (R\$)			2.968.710,75

Comprimento dos Cabos Metálicos Utilizados nas Redes (m)								
Distribuição					Alimentação			
200	100	50	30	20	2400	1800	1200	600
13.290	8.616	9.101	5.502	60.640	2.111	274	2.145	3.712

Armários	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ocupação (pares)	533	374	411	500	446	454	520	484	367	397

Tabela 5.3 – Projeto inicial 10 armários – busca local ultrapassando folga de pares.

Vê-se na tabela que quase metade dos armários de distribuição ficaram com uma ocupação acima de 480 pares. Dentre eles, os que tiveram aumentos mais significativos foram os armários 1, 4 e 7. Na solução anterior, esses armários estavam praticamente no

limite máximo de ocupação. Com a permissão de se ultrapassar os 480 pares, apesar da penalidade imposta, a economia na rede primária acabou se sobressaindo.

De maneira semelhante à ocorrida no estudo anterior, os valores de custos para a rede de distribuição aumentaram e os da rede de alimentação diminuíram (para 6,96 Km). Mas, novamente, o aumento nos gastos com a rede secundária em relação ao projeto sem melhoria da rede de distribuição foram pequenos (cerca de 5%) diante da economia com a rede de alimentação (aproximadamente 29%). A economia total em relação ao projeto inicial sem melhoria foi de 25%; em relação ao projeto anterior, a economia foi de 5,5%.

Busca Tabu

Usou-se a busca tabu para controlar os movimentos de arcos e armários, buscando-se maiores economias no valor do projeto. Nessa implementação, os movimentos de arcos (descritos no capítulo 4, item 4.4.3) podem ser executados mais vezes que os movimentos de armários. Os nós candidatos para o movimento de armários têm as mesmas considerações que na busca local (grau e distância em relação ao armário atual); também se considera suas proximidades com a configuração inicial para a rede primária (os nós mais próximos à rede primária têm possibilidade de permitir maior redução no custo do projeto).

Na busca tabu há variações de implementações que influenciam no resultado, podendo-se ajustá-los conforme a característica do problema. Estas variações manipulam alguns parâmetros da busca como, por exemplo, o tipo de duração tabu (Glover e Laguna, 1997). Nesse trabalho utilizou-se os parâmetros enumerados a seguir.

Critério de parada. Adotou-se o máximo de 3.000 iterações, sendo que a busca é interrompida após 300 iterações caso não haja melhora na solução (em alguns casos interrompeu-se após 500 iterações sem melhora).

Duração tabu. Foram testados três tipos de duração:

- Fixa – a duração tabu tem um valor fixo de 10 iterações;
- Aleatória em um intervalo fixo – foram utilizados valores aleatórios entre 10 e 70, e entre 30 e 150, para duração tabu;
- Aleatória em um intervalo variável com o tamanho da rede – a duração tabu pode ficar entre 10 e um número máximo que depende do tamanho da rede sendo trabalhada; se for duração tabu para arcos, o valor máximo será o número de arcos dividido por 4; no

caso de duração tabu para nós, o valor máximo será o número de nós dividido por 4; para a rede teste, este intervalo foi de 10 a 1005, para arcos, e de 10 a 939 para nós.

Crítério de aspiração. Realiza-se um movimento tabu se ele propuser solução melhor que a atual.

Número de movimentos de arcos para se realizar um movimento de armário. Testou-se duas situações: a primeira realiza movimentos de armários após 5 movimentos de arcos; a segunda após 10 movimentos de arcos.

Os melhores resultados obtidos para o projeto inicial com 10 armários, mostrados a seguir, foram com a duração tabu estabelecida como aleatória em um intervalo fixo de 10 a 70. Os valores aleatórios para essas durações tabu são determinados toda vez que um arco deixa ou entra na solução, ou quando um nó deixa de abrigar um armário de distribuição. O primeiro projeto apresentado não permite o uso dos pares de folga no armário de distribuição. O segundo relaxa essa restrição mas, da mesma forma que na busca local, aplica uma penalização aos movimentos que ocasionam ocupações nos armários acima do valor mínimo estipulado (480 pares).

A Figura 5.12 mostra o projeto inicial com 10 armários, usando-se busca tabu para obter melhorias no projeto. Para esse estudo, executou-se 10 movimentos de arcos para cada movimento de armário. Além disso, interrompeu-se a busca após 500 iterações sem melhoria na solução do projeto.

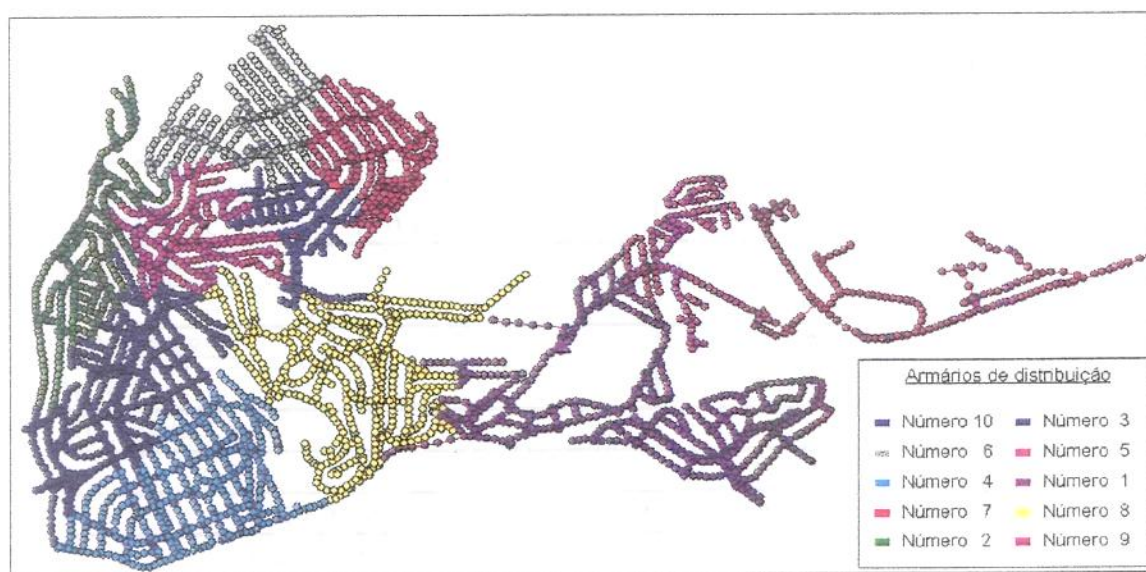


Figura 5.12 – Projeto inicial 10 armários – busca tabu sem ultrapassar folga de pares.

Percebe-se que a solução é muito próxima da obtida com a busca local. No entanto, há pequenas diferenças entre as duas soluções. Os armários 1,2,5 e 9, por exemplo, aumentaram o número de assinantes de suas seções de serviço, sendo que a alteração na área do armário 2 é a mais evidente. Outra diferença é a configuração da rede primária. Pela Figura 5.13 vê-se que os armários 6,7 e 10 usaram caminhos diferentes da rede primária no projeto de busca local (Figura 5.7). Essa alteração na rede de alimentação não proporcionou diminuição nas construções de galerias (agora com 7,61 Km – Tabela 5.4); o ganho foi com o valor gasto nos cabos primários utilizados (redução de 11,48% em relação à busca local). Outros valores do projeto podem ser vistos na Tabela 5.4 a seguir.



Figura 5.13 – Projeto inicial 10 armários com busca tabu – rede primária.

Redes		Distribuição	Alimentação
Equipamentos	Armários (R\$)	21.500,00	–
	Cabos Novos (R\$)	205.918,69	312.316,19
Serviços	Instalação de Cabo (R\$)	276.120,88	19.801,60
	Retirada de Cabo (R\$)	0,00	–
Galerias	Construção (R\$)	–	2.284.800,00
	Construção (m)	–	7.616
CUSTO TOTAL (R\$)		3.120.457,50	

Comprimento dos Cabos Metálicos Utilizados nas Redes (m)								
Distribuição					Alimentação			
200	100	50	30	20	2400	1800	1200	600
10.911	7.358	9.993	5.126	62.573	2.279	152	2.524	4.771

Armários	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ocupação (pares)	479	467	470	480	479	480	480	473	367	311

Tabela 5.4 – Projeto inicial 10 armários – busca tabu sem ultrapassar folga de pares.

A economia total conseguida com a busca tabu em relação à busca local foi de 0,68%. Como dito anteriormente, a diferença entre as configurações das duas soluções é muito pequena, refletindo-se na baixa diferença de custos entre as soluções.

O projeto onde se permite utilizar os pares de folga no armário de distribuição é mostrado na Figura 5.14. O resultado é diferente do projeto anterior e do obtido com a busca local. Além das posições diferentes dos armários de distribuição, as áreas das seções de serviço estão alteradas, principalmente a do armário 10.

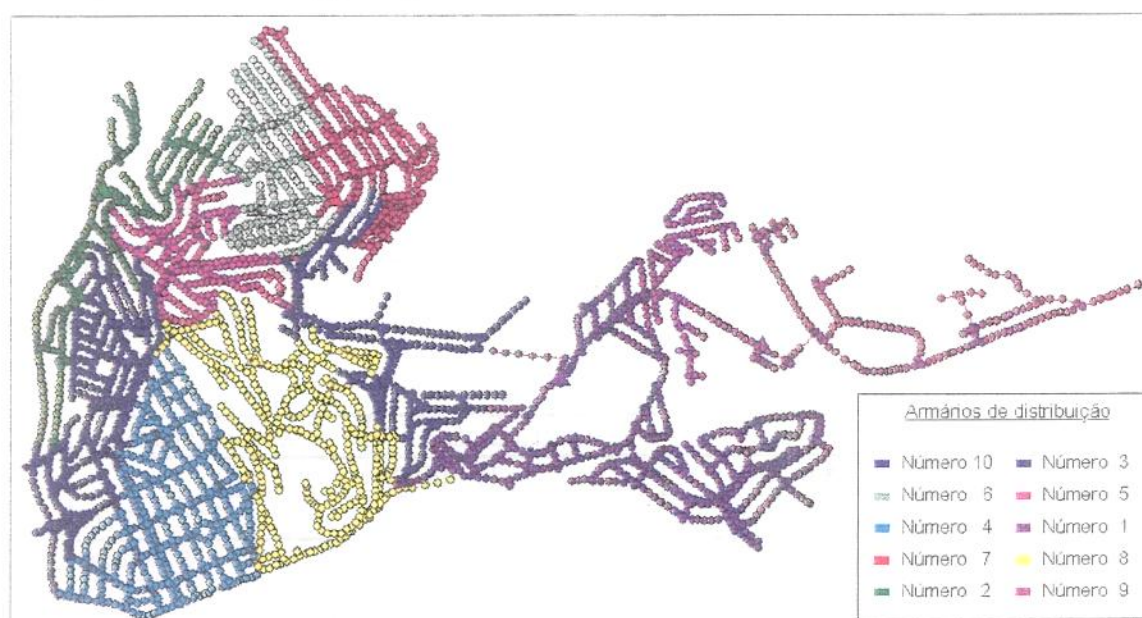


Figura 5.14 – Projeto inicial 10 armários – busca tabu ultrapassando folga de pares.

Percebe-se que a busca procurou, como em outros estudos, aproximar os armários do ponto de entrada para a rede primária (armários 3 e 4, por exemplo). Visualiza-se melhor estes deslocamentos dos armários pela Figura 5.15.

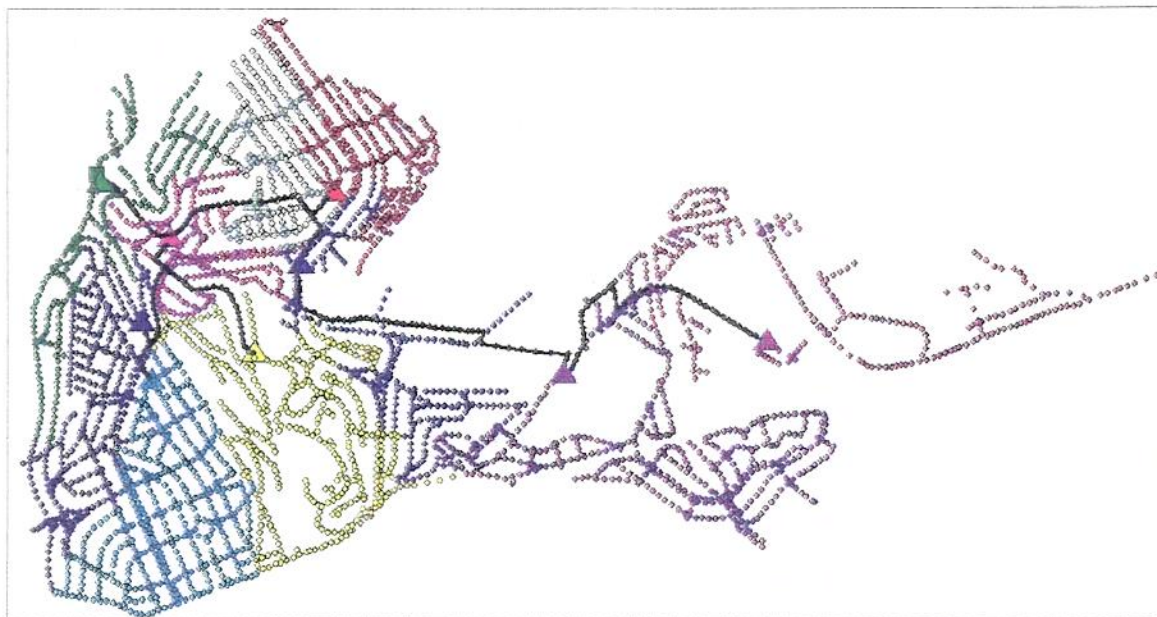


Figura 5.15 – Projeto inicial 10 armários com busca tabu – rede primária.

Os resultados obtidos com essa busca tabu, mostrados na Tabela 5.5, leva à solução mais econômica dentre todos os projetos iniciais realizados. Utilizou-se duração tabu aleatória entre o intervalo de 10 a 70; para cada cinco movimentos de arcos, realizou-se um movimento de armário; interrompia-se a busca se fossem executadas 300 iterações sem melhoria no custo total do projeto.

Redes		Distribuição	Alimentação
Equipamentos	Armários (R\$)	21.500,00	–
	Cabos Novos (R\$)	211.645,59	316.955,09
Serviços	Instalação de Cabo (R\$)	275.161,69	18.194,80
	Retirada de Cabo (R\$)	0,00	–
Galerias	Construção (R\$)	–	2.099.400,00
	Construção (m)	–	6.998
CUSTO TOTAL (R\$)		2.942.857,25	

Comprimento dos Cabos Metálicos Utilizados nas Redes (m)								
Distribuição					Alimentação			
200	100	50	30	20	2400	1800	1200	600
12.158	7.195	10.151	5.409	60.680	1.964	519	2.260	3.883

Armários	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ocupação (pares)	487	466	471	517	463	332	534	423	357	436

Tabela 5.5 – Projeto inicial 10 armários – busca tabu ultrapassando folga de pares.

Comparando os dados da tabela anterior com o mesmo projeto usando busca local, vê-se que a economia obtida deve-se principalmente à melhor utilização dos cabos – os de maior modularidade (200 pares na rede secundária e 2.400 pares na rede primária) foram menos utilizados. Apesar de um pequeno aumento na construção das galerias (6,998 Km contra 6,969 Km do projeto com busca local), houve ganho significativo com a economia nos cabos, levando a uma redução de 5,51% nos custos.

Para a rede secundária, a economia nos cabos pode ser justificada pelas diferentes configurações das seções de serviço nas duas soluções – a busca tabu pode ter explorado melhor o espaço de soluções.

Na rede primária, a economia nos cabos ocorre, principalmente, devido ao caminho diferente para a alimentação do armário 8 (armário mais inferior na Figura 5.16). No resultado da busca local, o armário 8 compartilha um número maior de arcos com outros armários, necessitando-se de mais pares nesses arcos comuns. Na solução da busca tabu, o compartilhamento dos arcos com outros armários acontece mais próximo do ponto de entrada, reduzindo o número de pares nos outros arcos e, conseqüentemente, a modularidade do cabo. A Figura 5.16 mostra essa diferença; à esquerda encontra-se a solução usando busca local e à direita o resultado da busca tabu.

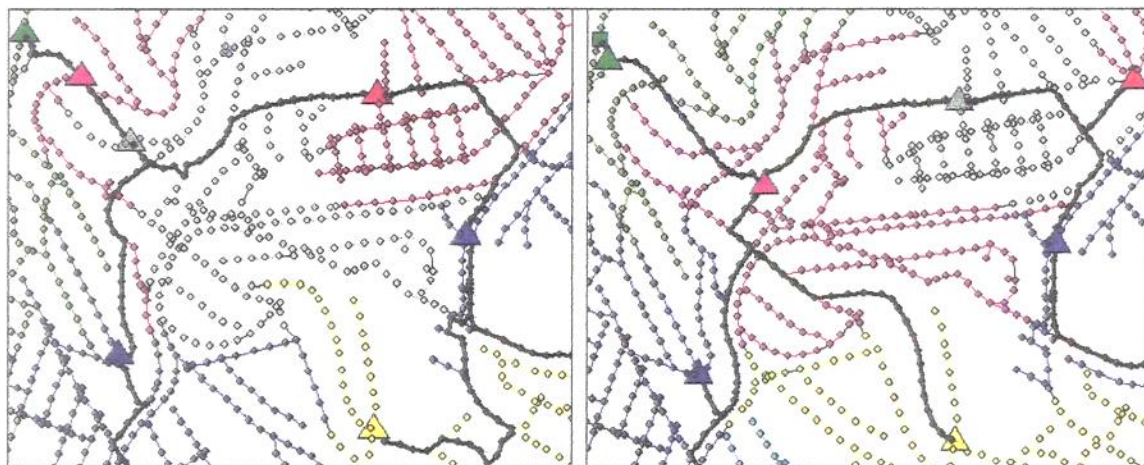


Figura 5.16 – Projeto inicial 10 armários – rede primária busca local e busca tabu.

5.2.3 Comentários

Os comentários a seguir são observações dos exemplos anteriores e, apesar dos bons resultados obtidos com a busca tabu, não se pode generalizá-la como a melhor alternativa pois não se abordou outras topologias nos estudos de casos.

A proposta dos projetos iniciais realizados é mostrar as diversas implementações realizadas e a eficiência das heurísticas desenvolvidas. Além disso, reforça-se a ideia da flexibilidade da ferramenta computacional, que permite tratar diversas configurações. Pode-se, por exemplo, tratar cada seção de serviço isoladamente, inserindo um novo armário, se necessário. Assim, reduz-se a interferência de novos armários em mais de uma seção de serviço.

Comparando-se os resultados obtidos entre a primeira e a última solução (conseguida com a busca tabu e permitindo-se utilizar os pares de folga), a redução no custo total do projeto foi de 25,35%.

Grande parte dessa economia foi alcançada com melhores configurações para a rede primária, tendo seu custo reduzido em 29,32%. Para a rede secundária, houve um pequeno aumento de custo (de 2,21%). O gráfico da Figura 5.17 apresenta o comportamento dos custos do projeto ao longo dos tipos de estudos realizados para o projeto inicial. Percebe-se que a composição do custo total do projeto é formado, em grande parte, pelo custo da rede primária. Nota-se também a diminuição do custo da rede primária e pequenos acréscimos no custo da rede secundária.

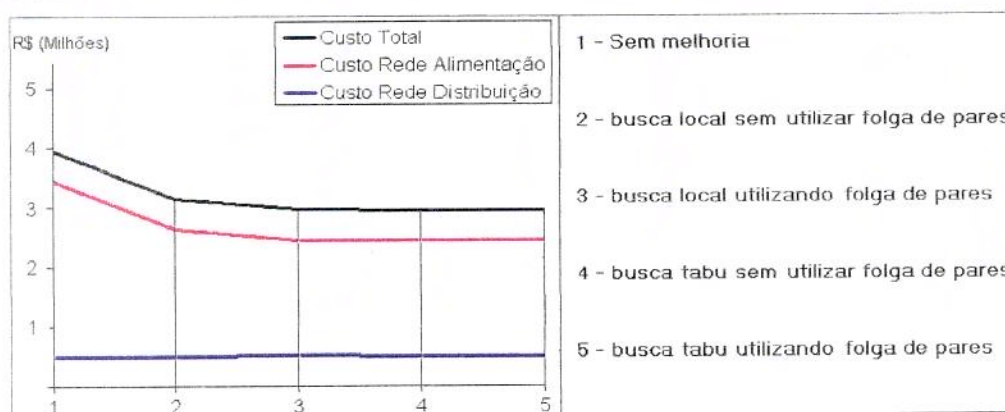


Figura 5.17 – Gráfico dos custos de acordo com as implementações.

O ganho obtido com o deslocamento do armário de distribuição para próximo do ponto de entrada foi superior ao aumento no custo da rede secundária. Este deslocamento

dos armários é vantajoso, principalmente pelo valor elevado de construção da rede de galerias. Por outro lado, como consequência, ocorre o afastamento dos armários dos centros de demanda das seções de serviço, aumentando o uso de cabos aéreos metálicos de maior modularidade e, conseqüentemente, encarecendo o projeto da rede secundária.

O gráfico da Figura 5.18 ilustra esse comportamento, ao mostrar a extensão da rede de galerias construída e o comprimento dos cabos de maior modularidade para a rede secundária, em função dos tipos de estudos realizados para o projeto inicial.

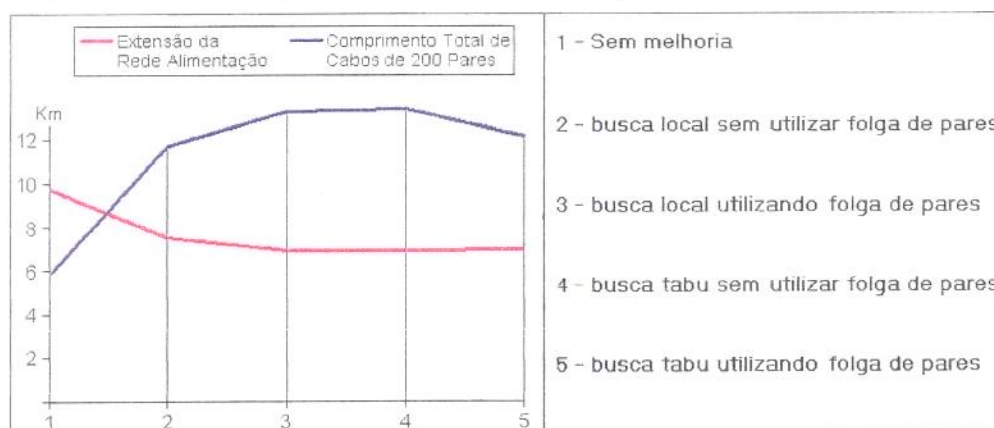


Figura 5.18 – Gráfico galerias e cabos 200 pares de acordo com as implementações.

5.3 Reprojetado Com 14 Armários

Nos estudos de reprojetado, considera-se uma rede existente (chamada de rede antiga) que sofrerá expansão para suportar novas demandas. Os cabos e armários da rede antiga são considerados e procura-se aproveitá-los ao máximo, reduzindo-se o custo de novos equipamentos e de instalação. Os armários de distribuição existentes são fixados em suas posições atuais e não são deslocados durante todo o processo de projeto.

Para a rede teste, utilizou-se como rede existente o projeto inicial conseguido com a busca tabu, quando se permitiu ultrapassar os pares de folga (último projeto do item anterior) (Figura 5.14). A nova demanda passa a ser de 6.560 assinantes, ou seja, 2.074 novos terminais.

Propõe-se a instalação de mais quatro armários de distribuição, totalizando 14 armários e uma capacidade de 6.720 pares (excluindo os 20% de folga nos armários de distribuição). Duas abordagens são avaliadas para a rede primária: a alimentação de armários metálicos com cabos metálicos, e a alimentação de armários óticos usando-se

cabos de fibras óticas. Nessa última abordagem, analisam-se cenários que podem ou não utilizar a rede de galerias – os cabos de fibras óticas percorreriam a rede aérea pelos postes das ruas.

Inicialmente, mostra-se o reprojeto sem nenhuma melhoria. Em seguida, resumem-se os resultados obtidos com os mesmos testes realizados para o projeto inicial, apresentando-se o melhor deles. Finalmente, propõe-se alternativas para o reprojeto de fibras e armários óticos.

5.3.1 Reprojeto Sem Melhoria

No reprojeto sem melhoria, localiza-se apenas os novos armários de distribuição e melhora-se suas posições com possíveis minimizações na somatória do produto “fluxo pela distância”.

A nova rede primária é definida através do caminho mínimo entre os novos armários e a rede primária antiga. Nesse teste, realiza-se a heurística para ajustar caminhos mais econômicos para a rede primária. No entanto, não houve melhorias na configuração da nova rede primária, inclusive para os demais testes de reprojeto.

Como no projeto inicial, não se permitiu, nesse teste, que os armários de distribuição ultrapassassem 480 assinantes. A Figura 5.19 mostra o resultado obtido com o reprojeto, onde os armários 5, 7, 11 e 14 são novos.



Figura 5.19 – Reprojeto sem melhoria para 14 armários.

Percebe-se que a ligação dos novos armários com o ponto de entrada utiliza grande parte da rede primária existente, mostrada na Figura 5.20. Nota-se também que não se consegue caminhos melhores para a interligação desses armários recém instalados com a rede primária existente.

A Tabela 5.6 resume os valores obtidos para o reprojeto da área teste. A redução no custo é conseguida com o aproveitamento das estruturas instaladas, apesar do menor número de armários. O gasto de cabos para a rede secundária, por assinante, é cerca de 18% menor que o melhor resultado para o projeto inicial, onde não há rede antiga.

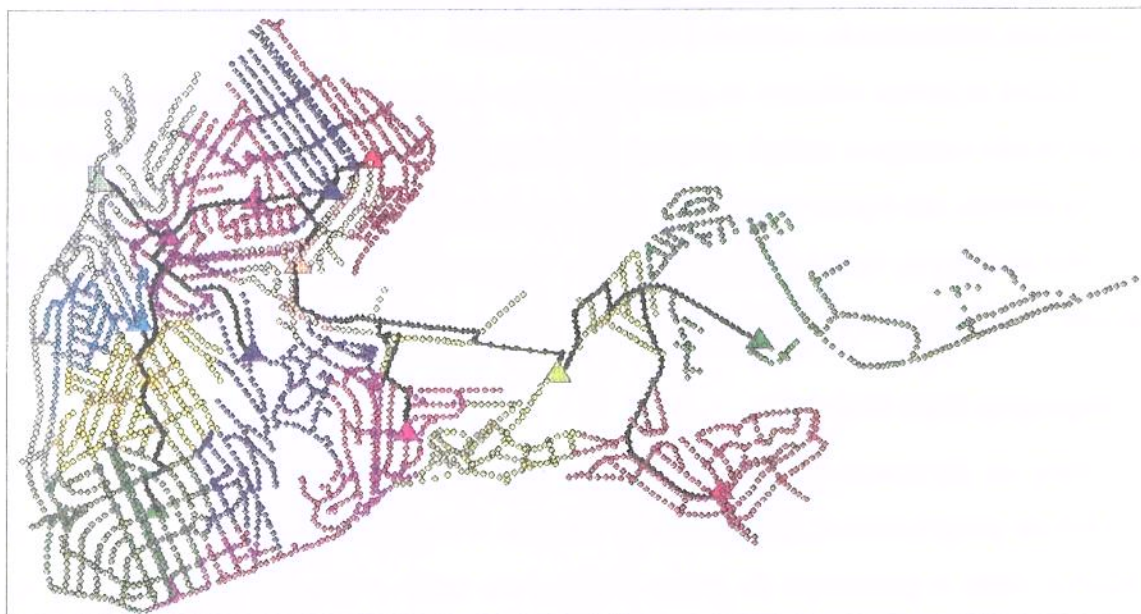


Figura 5.20 – Rede primária do reprojeto sem melhoria para 14 armários.

Os valores apresentados do comprimento total dos cabos, nas redes primária e secundária, é a soma dos cabos antigos e novos. Para as galerias, exibe-se o total construído, ou expandido, nos trechos da rede primária.

Redes		Distribuição	Alimentação
Equipamentos	Armários Novos (R\$)	8.600,00	–
	Cabos Novos (R\$)	80.371,66	383.262,63
Serviços	Instalação de Cabo (R\$)	85.951,00	23.223,21
	Retirada de Cabo (R\$)	248,60	–
Galerias	Construção (R\$)	–	1.042.200,00
	Construção (m)	–	3.474
CUSTO TOTAL (R\$)			1.623.857,13

Comprimento dos Cabos Metálicos Utilizados nas Redes (m)								
Distribuição					Alimentação			
200	100	50	30	20	2400	1800	1200	600
14.793	11.526	13.708	8.661	77.770	2.512	1.387	3.253	10.406

Ocupação dos Armários de Distribuição (pares)													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
416	513	454	476	476	479	577	480	476	480	480	440	414	399

Tabela 5.6 – Valores do reprojeito sem melhoria para 14 armários.

Novamente, o custo da rede primária é dominante sobre o custo total do projeto, representando, nesse estudo, cerca de 64% do custo total.

Alguns armários utilizam os pares destinados à folga porque a etapa de localização de armários não conseguiu reduzir as ocupações desses armários para valores abaixo de 480 pares. No entanto, em alguns estudos de caso não se permite que armários atendam mais do que os 480 assinantes; quando isto ocorre, aplica-se penalizações que encarecem a solução e “forçam” a redução nas ocupações desses armários.

5.3.2 Reprojeito Com Melhorias

Para os processos de melhoria do reprojeito, considerou-se os mesmos estudos realizados no projeto inicial da rede teste. A Tabela 5.7 mostra um resumo dos resultados alcançados, onde o percentual de ganho é calculado sobre o resultado do reprojeito sem melhoria. Vale lembrar que, em todos os estudos para o reprojeito com 14 armários, não se conseguiu melhorias na configuração inicial da rede primária.

Estudos	Custo Total (R\$)	% de Ganho
Busca local – sem permitir utilização dos pares de folga	1.191.814,75	26,60
Busca local – permitindo utilização dos pares de folga	972.452,50	40,11
Busca tabu – sem permitir utilização dos pares de folga	1.162.496,13	28,41
Busca tabu – permitindo utilização dos pares de folga	722.107,56	55,23

Tabela 5.7 – Valores do reprojeito com os processos de melhoria para 14 armários.

Os parâmetros e demais configurações para a busca tabu foram os mesmos do projeto inicial. Os movimentos de arcos foram executados mais vezes que o movimento de armários – após cinco movimentos de arcos fazia-se um movimento de armário. Os nós candidatos do movimento de armários também tinham grau igual ou superior a três e encontravam-se a uma distância de oito níveis (arcos) do armário atual. No

reposicionamento de armários, levou-se em conta as proximidades com a rede primária definida no início do processo.

Na busca tabu onde se permitia utilizar os pares estabelecidos para a folga, a duração tabu foi aleatória em um intervalo entre 10 e 70, como na maioria dos estudos realizados. No outro estudo da busca tabu (não utilizando os pares de folga), o melhor resultado obtido foi o usando a duração tabu aleatória em um intervalo de 30 a 150.

Como visto na Tabela 5.7, o melhor resultado dos estudos realizados para o reprojeto de 14 armários foi conseguido com a permissão do uso de pares destinados à manutenção (pares de folga) e com a busca tabu. Na Figura 5.21 está a configuração final para as seções de serviço; a rede primária é mostrada na Figura 5.22.

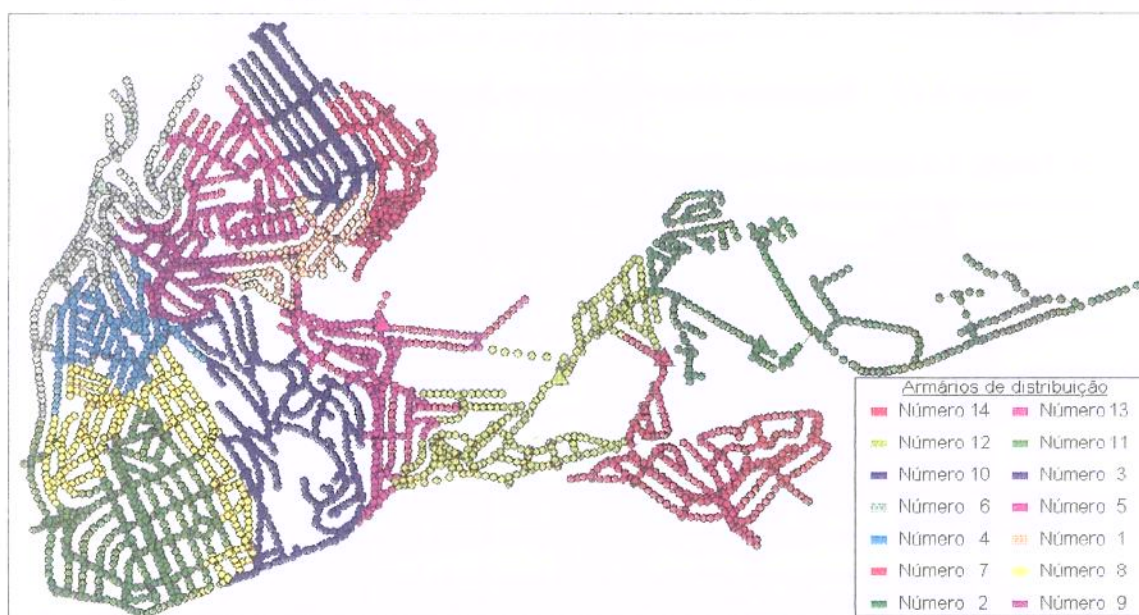


Figura 5.21 – Reprojeto 14 armários – busca tabu ultrapassando folga de pares.

Percebe-se alterações nas áreas das seções de serviço em relação ao reprojeto sem melhoria. O armário 8, por exemplo, teve sua área alterada devido à “invasão” do armário 11, seu vizinho – que se deslocou para o mais próximo possível em direção à rede primária existente, para reduzir o custo de construção de galerias. O armário 5 também alterou sua área de atuação para ficar mais próximo da rede primária existente (no caso ficando exatamente sobre um nó da rede primária antiga).

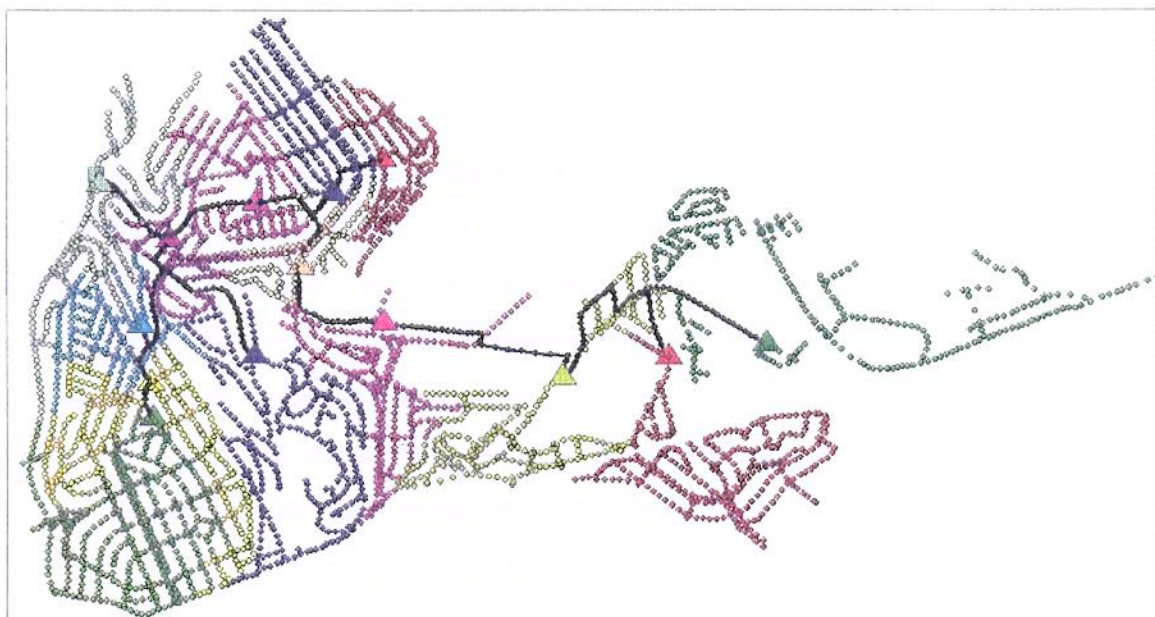


Figura 5.22 – Reprojeto 14 armários com busca tabu – rede primária.

A Tabela 5.8 resume os resultados do reprojeto.

Redes		Distribuição	Alimentação
Equipamentos	Armários Novos (R\$)	8.600,00	–
	Cabos Novos (R\$)	61.087,85	302.591,13
Serviços	Instalação de Cabo (R\$)	59.061,30	16.564,60
	Retirada de Cabo (R\$)	302,70	–
Galerias	Construção (R\$)	–	273.900,00
	Construção (m)	–	913
CUSTO TOTAL (R\$)			722.107,56

Comprimento dos Cabos Metálicos Utilizados nas Redes (m)								
Distribuição					Alimentação			
200	100	50	30	20	2400	1800	1200	600
15.159	9.735	13.525	7.337	73.264	2.512	1.387	3.253	7.845

Ocupação dos Armários de Distribuição (pares)													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
381	513	530	539	306	424	485	532	486	499	538	441	483	403

Tabela 5.8 – Reprojeto 14 armários – busca tabu ultrapassando folga de pares .

Nota-se a grande economia conseguida em relação ao estudo inicial sem melhoria (55%). A maior parte desse ganho é conseguida com a aproximação dos novos armários de distribuição da rede primária antiga, levando a redução no comprimento total dos cabos

subterrâneos de 600 pares. A rede secundária também foi melhorada, apesar do aumento do número de cabos de 200 pares e diminuição de cabos de 20 pares – este fato é indicativo do distanciamento dos novos armários dos centros de demanda. A Figura 5.23 mostra o quanto o armário 14 está longe dos pontos de maior demanda da seção de serviço – vê-se, na ampliação, que um dos arcos que saem do armário está com um fluxo de 390 pares em direção à concentração de demanda.

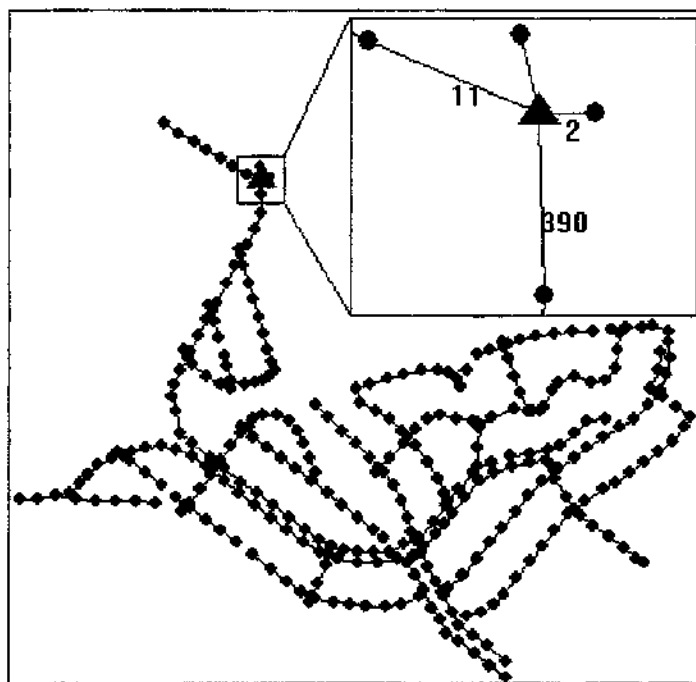


Figura 5.23 – Reprojetado 14 armários com busca tabu – armário 14.

Com relação à ocupação dos armários, 9 entre eles atendem assinantes com os pares reservados (pares de folga) – entre esses 9, 4 usam, no máximo, 17% desses pares e os demais, no máximo, 50%.

Os projetos de expansão (reprojeto) reproduzem, em grande parte, a situação das redes externas brasileiras, onde a maioria dos municípios possuem serviços telefônicos, mas ainda não estão disponíveis à toda população.

A ferramenta computacional desenvolvida ajuda o projetista a decidir a melhor maneira de expandir determinada área, verificando as vantagens, ou não, de obedecer certas restrições (folga nos pares, por exemplo). Os métodos de otimização empregados permitem a exploração de um número grande de soluções, e a escolha da mais econômica.

5.3.3 Reprojetado com Rede Ótica Primária (ROP)

Esse item procura avaliar o reprojetado de 14 armários utilizando equipamentos óticos para os novos armários estabelecidos. Os armários óticos têm suas demandas atendidas por fibras óticas vindas da central, e não mais por cabos de pares metálicos. Nesse cenário, os sinais de voz são multiplexados por equipamentos na central, transportados pelas fibras óticas e, finalmente, são demultiplexados por equipamentos presentes nos armários óticos. Os armários óticos têm custos mais elevados do que os tradicionais armários de distribuição metálicos, por possuírem os equipamentos que tratam os sinais.

Pode-se usar os dutos subterrâneos para levar as fibras óticas até os armários de distribuição óticos, ou passá-las pela rede aérea, usando o posteamento das ruas. As fibras ficam menos sujeitas a possíveis danos nos dutos subterrâneos do que na rede aérea; no entanto, estender a fibra ótica pela rede aérea pode reduzir os custos de projeto, por evitar a construção de novos trechos de galerias.

Três abordagens são realizadas nesse item. Todas usam a fibra ótica na alimentação dos armários de distribuição, mas variam em relação a topologia e instalação da fibra:

- através de dutos subterrâneos (topologia estrela simples ou anel);
- pela rede aérea com a topologia em anel;
- solução mista, passando pelos dutos subterrâneos e pela rede aérea.

Na conclusão, compara-se os resultados do reprojetado totalmente metálico com o reprojetado da rede ótica primária e rede secundária metálica.

Fibra ótica por dutos subterrâneos. Nessa configuração, os cabos de fibras óticas são distribuídos de forma radial. No entanto, as fibras óticas, que estão dentro do cabo, podem atender os armários através de uma topologia em estrela ou em anel; o anel é formado utilizando o mesmo cabo para ida e retorno das fibras a cada armário, como mostra a Figura 5.24. Como o cabo está disposto de forma radial, o custo de construção da rede de galerias será o mesmo para ambas as topologias, estrela ou anel. Não se constrói caminhos disjuntos pois se acredita na maior segurança dos dutos subterrâneos em relação à passagem aérea da fibra.

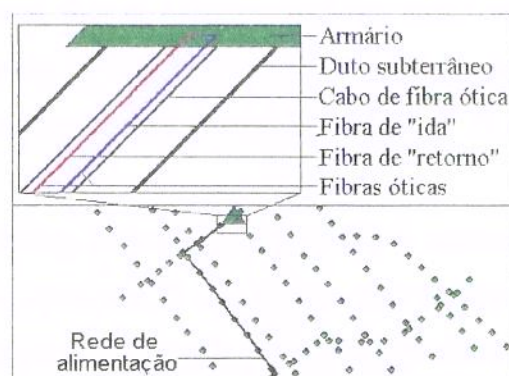


Figura 5.24 – Anel construído no interior do cabo de fibras óticas.

O resultado para esse estudo tem a mesma configuração apresentada para o reprojeto com o armário metálico, mostrado na Figura 5.21 – os armários 5, 7, 11 e 14 são os novos armários óticos da rede teste. A diferença está nos custos com cabos e armários de distribuição. A configuração não é diferente porque a fibra ótica, usada como o meio de transmissão na rede primária, também deverá usar os dutos subterrâneos, levando a necessidade de novos trechos, ou expansões, de dutos.

A solução ótica para a rede primária pode ser mais econômica que a solução metálica se os custos com os armários óticos (e outros equipamentos) e o custo da fibra ótica (geralmente muito inferior aos cabos metálicos) não forem superiores ao gasto com os novos cabos subterrâneos metálicos da solução anterior.

Pela Tabela 5.9, vê-se os valores de custo do reprojeto proposto.

Redes		Distribuição	Alimentação
Equipamentos	Armários Novos (R\$)	604.000,00	–
	Cabos Novos (R\$)	61.087,85	25.484,00
Serviços	Instalação de Cabo (R\$)	59.061,30	16.564,60
	Retirada de Cabo (R\$)	302,70	–
Galerias	Construção (R\$)	–	273.900,00
	Construção (m)	–	913
CUSTO TOTAL (R\$)		1.040.400,44	

Comprimento dos Cabos Metálicos Utilizados nas Redes (m)								
Distribuição					Alimentação			
200	100	50	30	20	2400	1800	1200	600
15.159	9.735	13.525	7.337	73.264	1.964	519	2.260	3.883

Comprimento do Cabo de Fibra Ótica Utilizado na Rede de Alimentação (m)	6.371
---	-------

Tabela 5.9 – Reprojeto 14 armários – ROP subterrânea (anel ou estrela simples).

Os comprimentos dos cabos metálicos, usados na rede primária, são os mesmos do projeto inicial, isto é, não são acrescentados cabos à rede. Com a fibra ótica, usada para alimentar os novos armários (5, 7, 11 e 14), ocupa-se apenas um duto da galeria subterrânea (percorrendo 6.371 metros).

O uso dos equipamentos e fibras óticas na rede primária através das galerias subterrâneas não reduz o custo da rede secundária. O alto custo de construção da rede de galerias ocasiona o deslocamento do armário para posições mais próximas da rede primária existente. A não utilização de novos cabos metálicos primários é que pode tornar viável a utilização dos equipamentos e fibras óticas. Nesse estudo, o custo da solução foi 30% maior do que o da solução da rede primária metálica. Os custos com os armários óticos foram dominantes. No entanto, deve-se considerar que há cabos que ligam o ponto de entrada com o centro de fios; essa solução será mais econômica se o centro de fios estiver a mais de 3,10 Km do ponto de entrada.

Fibra ótica aérea com topologia em anel aéreo. Pode-se conseguir economias na construção de dutos subterrâneos com a passagem dos cabos de fibras óticas pela rede aérea, usando os postes das ruas. Nesse cenário, tem-se um anel de fibra ótica “abastecendo” os armários óticos. Por estarem mais expostos e, conseqüentemente, mais vulneráveis a qualquer tipo de dano, é que se considera a topologia em anel para a passagem dos cabos óticos aéreos. Com isto, evita-se que o sinal para os armários seja interrompido caso algum trecho do anel seja danificado.

O resultado apresentado pela Figura 5.25 mostra as seções de serviço no reprojeito dos 14 armários para esse estudo. Nota-se as posições diferentes dos novos armários em relação aos reprojetos anteriores. Nessa abordagem não se avalia a proximidade dos nós candidatos a receberem um armário com a rede primária, pois os armários novos não são alimentados por cabos vindos dos dutos subterrâneos. O custo de ligação dos armários óticos passa a ser apenas os gastos com o cabo de fibra ótica (muito inferior em relação aos cabos metálicos).

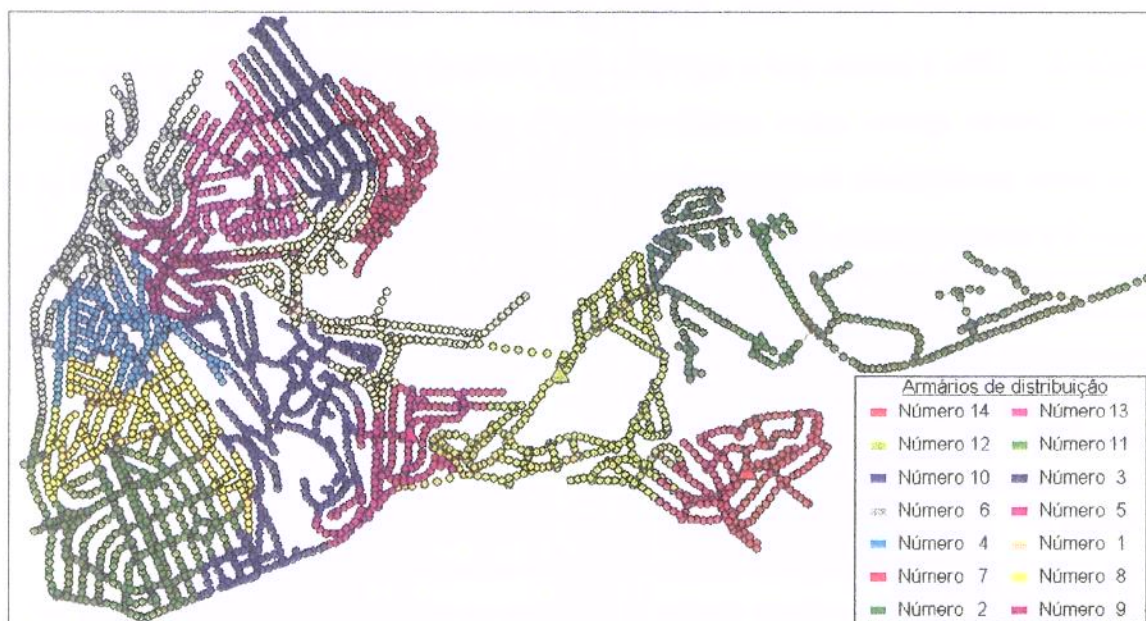


Figura 5.25 – Reprojetado 14 armários – seções de serviço com ROP aérea (anel).

A Figura 5.26 apresenta a alimentação dos quatro novos armários para a área. Os armários antigos continuam sendo atendidos pelos cabos metálicos subterrâneos, como mostrado na Figura 5.22.



Figura 5.26 – Reprojetado 14 armários – configuração da ROP aérea (anel).

Na Tabela 5.10 estão outras informações do reprojetado realizado. Nota-se um custo total um pouco superior em relação ao reprojetado com rede primária metálica (9,35% a mais). No entanto, percebe-se que a solução dos cabos óticos aéreos evita o gasto elevado

com as construções subterrâneas. Nota-se também a redução no custo total da rede secundária – 38% a menos que o reprojeto sem melhoria e 14,31% menor que o melhor reprojeto usando apenas cabos metálicos na rede primária. Esta economia é conseguida com a maior proximidade de alguns armários óticos dos centros de demanda das seções de serviço. Os novos armários 5 e 14 exemplificam essa ocorrência.

Redes		Distribuição	Alimentação
Equipamentos	Armários Novos (R\$)	604.000,00	–
	Cabos Novos (R\$)	48.247,43	54.940,00
Serviços	Instalação de Cabo (R\$)	54.805,00	27.470,00
	Retirada de Cabo (R\$)	163,60	–
Galerias	Construção (R\$)	–	0,00
	Construção (m)	–	0
CUSTO TOTAL (R\$)		789.626,00	

Comprimento dos Cabos Metálicos Utilizados nas Redes (m)								
Distribuição					Alimentação			
200	100	50	30	20	2400	1800	1200	600
13.206	9.760	13.275	7.308	73.668	1.964	519	2.260	3.883

Comprimento do Cabo de Fibra Ótica Utilizado na Rede de Alimentação (m)	13.735
---	--------

Ocupação dos Armários de Distribuição (pares)													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
488	513	507	537	311	461	479	502	479	538	539	467	480	259

Tabela 5.10 – Reprojeto 14 armários – ROP aérea (anel).

Outro fator que evidencia a posição dos novos armários mais próximos das concentrações de demanda é a diminuição do uso de cabos de maior modularidade na rede secundária, sobretudo o de 200 pares (redução de 12,88% em relação ao melhor reprojeto usando apenas cabos metálicos na rede primária); e no aumento dos cabos de 20 pares.

Os gastos com os armários óticos e seus equipamentos passam a compor a maior parte do custo total (76,5%). O único inconveniente dessa solução é a necessidade de um cuidado maior com as fibras óticas, mais expostas na rede aérea. Na Figura 5.27, por exemplo, não existem trechos alternativos para o cabo de fibra ótica “sair” da área do armário 14 por caminhos diferentes dos utilizados na “entrada”.

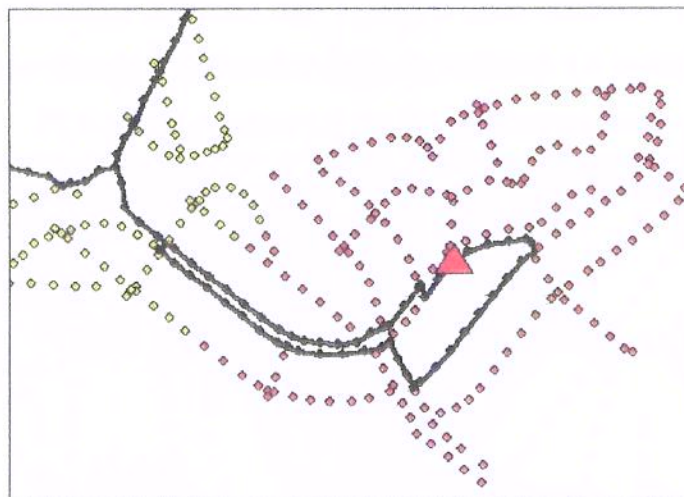


Figura 5.27 – ROP aérea (anel) – passagem para o armário 14.

Fibra ótica aérea e em dutos subterrâneos (alternativa mista). Uma alternativa que minimiza o risco de danos aos cabos óticos aéreos é a utilização das galerias subterrâneas antigas até o ponto mais próximo do novo armário ótico. A partir daí, as fibras óticas seguem caminho pela rede aérea, formando um anel – novamente, para prevenir interrupções nos serviços como consequência de algum dano ao cabo.

A posição dos novos armários é a mesma obtida no reprojeto anterior. Mas, o trajeto dos cabos alimentadores será diferente, como apresentado pela Figura 5.28. Outra diferença será nos gastos com o cabo ótico, tendo um pequeno aumento em sua extensão total em relação à solução anterior – acréscimo de 0,95%.



Figura 5.28 – Reprojeto 14 armários – ROP subterrânea e aérea (anel).

Para alimentar o armário ótico número 7, por exemplo, a fibra ótica utiliza os dutos subterrâneos até o armário 3 e depois segue pela rede aérea formando um anel que inclui o nó onde se encontra o novo armário, conforme ilustrado na Figura 5.29.

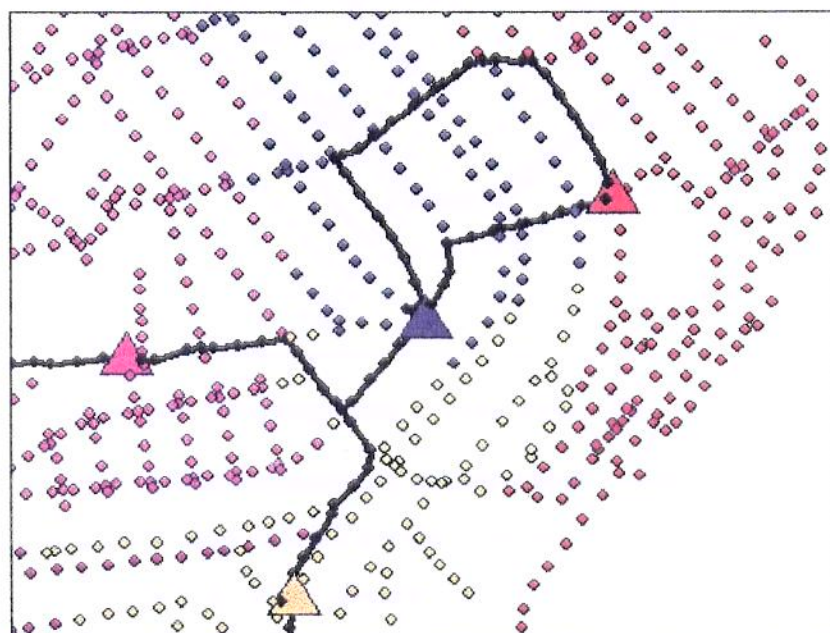


Figura 5.29 – ROP subterrânea e aérea (anel) – armário 7.

O custo total do projeto, mostrado na Tabela 5.11, é um pouco maior, mas se diminui os riscos com os cabos óticos – 40% de seu comprimento total está acomodado em dutos subterrâneos.

Redes		Distribuição	Alimentação
Equipamentos	Armários Novos (R\$)	604.000,00	–
	Cabos Novos (R\$)	48.247,43	55.460,00
Serviços	Instalação de Cabo (R\$)	54.805,00	31.004,80
	Retirada de Cabo (R\$)	163,60	–
Galerias	Construção (R\$)	–	0,00
	Construção (m)	–	0
CUSTO TOTAL (R\$)			793.680,81

Comprimento do Cabo de Fibra Ótica Utilizado na Rede de Alimentação (m)	13.865
---	--------

Tabela 5.11 – Reprojeto 14 armários – ROP subterrânea e aérea (anel).

5.3.4 Comentários

A rede primária metálica ainda foi a solução mais econômica diante das alternativas para a rede ótica primária. Mas, as opções para a rede ótica primária ainda podem

representar boas configurações à medida que reduzir o custo dos equipamentos óticos, principalmente os que compõem os armários óticos. A viabilidade das soluções com fibra ótica apresentadas serão mais econômicas que a rede primária metálica se o custo do armário ótico for menor que R\$ 130.000,00 (nos estudos realizados foi de R\$ 150.000,00), como ilustra o gráfico da Figura 5.30.

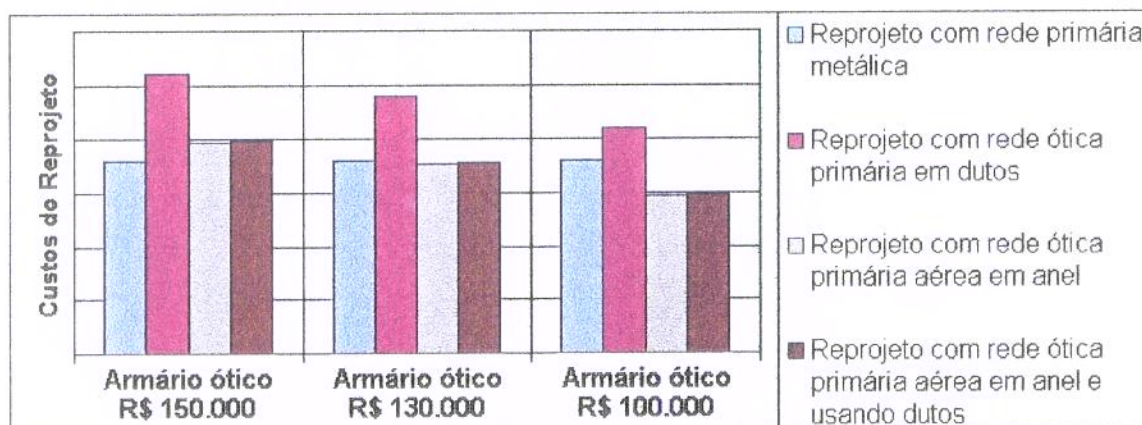


Figura 5.30 – Custos dos reprojetos variando custo do armário ótico.

A vantagem do uso da solução para a rede primária, além da qualidade de sinal, é, em algumas configurações, a diminuição no custo da rede secundária e a menor ocupação de dutos subterrâneos por parte dos cabos metálicos de grande modularidade, aumentando a vida útil da rede de galerias existente.

Capítulo 6 – Conclusão

O setor de telecomunicações vem crescendo nos últimos anos, esperando-se mais de R\$ 40 bilhões em investimentos na telefonia brasileira até o ano 2005 (MC, 1997). Diante dessa perspectiva e da atual situação da telefonia fixa brasileira (com uma densidade menor que 14 terminais para cada 100 habitantes), onde o fornecimento de novos serviços além das tradicionais transmissão de voz à maioria dos assinantes, provavelmente, estará disponível a longo prazo, as redes atuais ainda necessitam de grandes expansões para atender uma demanda reprimida de mais de 17 milhões de terminais (aumentando a densidade para 23% até o ano 2003).

A rede externa, uma das redes da telefonia fixa, que liga o centro de fios aos assinantes, deve ser a rede que sofrerá maior investimento se essas metas forem cumpridas. Composta de duas sub-redes (a rede primária e a rede secundária), a rede externa atual é quase que totalmente metálica. Mas, novas alternativas tecnológicas têm surgido, sobretudo na rede primária, como as fibras e armários óticos. No entanto, o custo elevado dessas novas configurações é ainda um empecilho para sua implementação.

Para realizar as expansões da rede telefônica, em especial da rede externa, necessita-se de um projeto de expansão ou construção da rede externa. O projeto, muitas vezes feito de forma manual e trabalhosa, norteia as alterações que devem ser realizadas para atender os novos assinantes. O projetista, usando mapas impressos da região sendo trabalhada, indica os locais de retirada ou inserção de cabos. Além disso, pode-se incluir novos equipamentos (armários) necessários para a distribuição dos pares telefônicos vindos do centro de fios. Avaliar todas essas variáveis é um problema complexo, e cuja solução pode ser substancialmente melhorada através de uma metodologia mais sofisticada, baseada em métodos de otimização e programas computacionais que ajudam na tomada de decisões.

Este trabalho desenvolveu a metodologia e ferramenta computacional capazes de sugerir melhorias ao projetista da rede externa. Essas melhorias são alcançadas com a utilização de técnicas de otimização presentes nas diversas etapas em que se dividiu o problema de projetar redes telefônicas externas. A metodologia desenvolvida permite avaliar a utilização de inovações tecnológicas na expansão da rede (equipamentos óticos, por exemplo).

Por ser um problema complexo, a partição do problema facilitou o desenvolvimento de metodologias de resolução para cada um dos subproblemas, sem comprometer a qualidade da solução.

Em uma primeira etapa, a metodologia localiza novos armários de distribuição usando heurísticas que implementam métodos para resolução de problemas de fluxo de custo mínimo. Ainda nessa etapa, outras heurísticas ajustam a localização dos armários para posições que reduzem o produto do “fluxo pela distância”.

Na segunda etapa, a metodologia busca o menor custo para o projeto da rede secundária. Para isto, usa-se heurísticas que trocam arcos e reposicionam armários de distribuição. Essas heurísticas são implementadas em uma busca local, utilizando-se a metaheurística *busca tabu*. O procedimento trouxe um ganho significativo sobre a busca local, levando a melhores projetos da rede externa.

Finalmente, a última etapa trata do projeto da rede primária. Na rede primária, o custo de construção da rede de galerias é dominante sobre os outros custos. Uma solução inicial baseada em caminhos mínimos é melhorada com heurísticas que buscam pontos que possam fazer parte da solução e reduzam o custo do projeto. O tratamento da rede primária e as técnicas para melhor defini-la levou a economias consideráveis.

A metodologia desenvolvida permite o projeto de redes tradicionais (completamente metálicas), de redes óticas primárias e de configurações mistas.

Como continuidade desse trabalho, sugere-se a inclusão do tratamento da distribuição dos pares telefônicos. Trata-se de um problema complexo, onde, certamente, sua otimização evitaria maiores gastos com os serviços de manutenção ou rearranjo de pares telefônicos na rede externa.

Outra sugestão é a implementação de técnicas mais sofisticadas na *busca tabu* como, por exemplo, o uso de estruturas de memória de longo prazo. Poderíamos também avaliar aplicações de outras metaheurísticas, como o *simulated annealing* ou mesmo GRASP.

Em relação aos armários de distribuição, sugere-se incluir uma nova variável determinando o número de armários necessários para o projeto. Além disso, os armários poderiam ter capacidades variadas em um mesmo projeto.

Como complementação da ferramenta desenvolvida, pode-se armazenar e manipular os dados geográficos e outras informações do projeto em um banco de dados, caracterizando um sistema de informações geográficas.

Bibliografia

- Ahuja, R.K.; Magnanti, T.L. e Orlin, J.B. 1993, "Network Flows – Theory, Algorithms, and Applications", Prentice Hall.
- Araújo, E.O. 1981, "Localização de Centrais Telefônicas Numa Rede Urbana", Tese de Mestrado, UNICAMP, Junho 1981.
- Balakrishnan, A. e Magnanti, T.L. 1995, "A Decomposition Algorithm For Local Access Telecommunications Network Expansion Planning", Operations Research, Vol. 43, No. 1, Janeiro–Fevereiro.
- Carneiro da Silva, M. 1990, "Planejamento a Longo Prazo em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica", Tese de Doutorado, UNICAMP, Agosto 1990.
- Careless, J. 1996, "The Five Big Headaches of Cable Telephony", CED: Communications Engineering & Design, Outubro, 72–76.
- Christofides, N. 1986, "Graph Theory an Algorithmic Approach", Academic Press Inc.
- Curado, P.J.P. 1996, "Tecnologias e Tendências em Rede Externa para Rede Ótica de Assinantes", Revista Telebrás, Vol. 19, No. 63 (Julho).
- Dall'Antonia, J.C. 1992, "Rede Ótica de Assinantes: Uma Breve Análise", Revista Telebrás, Vol. 16, No. 55 (Setembro).
- Díaz, A.; Glover, F.; Ghaziri, H.M.; González, J.L.; Laguna, M.; Moscato, P. e Tseng, F.T. 1996, "Optimización Heurística y Redes Neuronales", Editorial Paraninfo.
- Ferrari, A.M. 1991, "Telecomunicações – Evolução e Revolução", Érica Editora Ltda.
- Fiorentino, L.D. 1996, "Telecommunications in Brazil", IEEE Communications Magazine, Vol. 34, No. 5 (Maio).

- Formigoni Filho, J.R. 1995, “Rede Externa: Planejamento de Rotas Estratégicas”, Tese de Mestrado, UNICAMP, Setembro 1995.
- Gavish, B. 1995, “Telecommunications – A Revolution in Progress”, Operations Research, Vol. 43, No. 1 (Janeiro–Fevereiro).
- Glover, F.; Laguna, M. 1997, “Tabu Search”, Kluwer.
- Hwang, F. K. e Richards, D. S. 1992, “Steiner Tree Problems”, Networks, Vol. 22, 55–89.
- Jack, C.; Kai, S-H. e Shulman, A. 1992, “NETCAP – An Interactive Optimization System For GTE Telephone Network Planning”, Interfaces, Vol. 22, No. 1, 72–89.
- Johnson, D.S.; Lenstra, J.K. e Rinnooy Kan, A.H.G. 1978, “The Complexity of the Network Design Problem”, NETWORKS, Vol. 8 ,279–285.
- Luvison, A.; Napolitano, A. e Roso, G. 1996, “Access Network Evolution: Services and Techniques”, CSELT Technical Report, Vol. XXIV, No. 2 (Abril), 179–191.
- Lyford, R. e Hart, G. 1994, “Telephony Via Cable: Competing in a New Business”, CED: Communications Engineering & Design, Abril, 46–50.
- Magnanti, T.L. e Mirchandani, P. 1993, “Shortest Paths, Single Origin–Destination Network Design, and Associated Polyhedra”, NETWORKS, Vol. 23, 103–121.
- Mateus, G.R.; Patrocínio Jr., Z.K.G. e Luna, H.P.L. 1993, “Projeto de Rede de Distribuição em Telefonia”, Anais do XXV SBPO – Campinas, Novembro.
- MC, 1997, “Paste Edição 1997 – Programa de Recuperação e Ampliação do Sistema de Telecomunicações e do Sistema Postal”, Ministério das Comunicações, http://www.mc.gov.br/Biblioteca/Publicacoes/paste/Versao97/PASTE_indice.html.

- Mello, O.D. 1996, “Sobrevivenciabilidade e Indisponibilidade no Planejamento de Redes de Telecomunicações”, Tese de Mestrado, UNICAMP, Novembro 1996.

- Monna, C.L. e Shallcross, D.F. 1989, “Methods For Designing Communications Networks With Certain Two-Connected Survivability Constraints”, Operations Research, Vol. 37, No. 4, Julho–Agosto.

- Moncalvo, A. 1993, “Trends of the Distribution Network”, CSELT Technical Report, Vol. XXI, No. 3 (Agosto), 595–605.

- Nakagawa, J.M. 1984, “Planejamento de Sistemas Telefônicos: Alocação de Centros de Fios”, Tese de Mestrado, UNICAMP, Julho 1984.

- Rodrigues, M.M.R.R.; Luna, H.P.L. e Mateus, G.R. 1993, “Sistemas Integrados de Configuração de Rede Telefônica”, Anais do XXV SBPO – Campinas, Novembro 1993.

- Santos Filho, J.R. 1997, “Planejamento de Rede de Dutos Para Cabos Troncos em Redes Urbanas de Telecomunicações”, Tese de Mestrado, UNICAMP, Janeiro 1997.

- Soares Neto, V.; Rattes, T.M.F.; da Silva, R.C. e da Silva, J.C. 1991, “Telefonia em Sistemas Locais – Tópicos Avançados”, Érica Editora Ltda.

- Shirakawa, H. 1989, “Fiber Optic Subscriber Networks”, NTT Review, Vol. 1, No. 4 (Novembro).

- Szmit, R. 1993, “Programação Orientada Para Objeto – Com Turbo Pascal 6.0”, Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda.

- Wiener, R.S. e Pinson, L.J. 1991, “C++ Programação Orientada Para Objetos – Manual Prático e Profissional”, Makron Books do Brasil Editora Ltda. e Editora McGraw-Hill Ltda.

Apêndice A – Custos considerados

Este apêndice traz os custos considerados na realização do projeto de rede externa de telefonia.

Armários de Distribuição

Capacidade do Armário Metálico	Custo (R\$)	Custo instalação (u.r.)
600 pares	2.000,00	15,00

Armário metálico considerado para a rede secundária.

Capacidade do Armário Ótico	Custo (R\$)	Custo instalação (u.r.)
600 pares	150.000,00	100,00

Armário ótico considerado para a rede secundária.

Rede Secundária

Tipos de cabos (modularidade)	Custo (R\$ / m)
20 pares	1,26
30 pares	1,79
50 pares	2,21
100 pares	3,68
200 pares	6,30

Cabos metálicos considerados para a rede secundária.

Serviços	Custo (u.r. / m)
Instalação do cabo telefônico	0,19
Adicional por instalação simultânea de cabo	0,04
Instalação da cordoalha	0,10
Retirada de cabo aéreo ficando a cordoalha	0,03
Retirada de segundo cabo aéreo	0,04
Retirada de cabo aéreo	0,07

Custos dos serviços de instalação de cabos na rede secundária.

Rede Primária

Serviços	Custo (u.r. / m)	Infra-estrutura
Construção	30,00	Caixas subterrâneas, galerias e dutos subterrâneos
Expansão	20,00	Acréscimo de dutos subterrâneos

Custo do serviço de construção e expansão da galeria subterrânea.

Tipos de cabos (modularidade)	Custo (R\$ / m)
400 pares	23,10
600 pares	31,50
900 pares	43,05
1200 pares	52,50
1800 pares	79,80
2400 pares	102,90

Cabos metálicos considerados para a rede primária metálica.

Serviço	Custo (u.r. / m)
Instalação do cabo telefônico	0,26

Custo do serviço de instalação de cabos metálicos subterrâneo.

Tipo de cabo de fibra ótica	Custo (R\$ / m)
12 fibras	4,00

Cabo de fibra ótica considerado para a rede ótica primária.

Serviço	Custo (u.r. / m)
Instalação do cabo de fibras óticas na rede de dutos	0,26
Instalação do cabo de fibras óticas na rede aérea	0,20

Custo do serviço de instalação de cabo de fibras óticas.