

EXPANSÃO DE REDES TELEFÔNICAS

Paulo Morelato França
Jurandir F. Ribeiro Fernandes
Hermano de Medeiros F. Tavares

Deptº de Engenharia de Sistemas
Faculdade de Engenharia Elétrica
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP
C.P. 6101 - Campinas, SP.

Resumo

Este artigo apresenta uma metodologia para o planejamento da expansão de redes telefônicas urbanas dentro de um horizonte de longo prazo (10 a 20 anos). O problema de expansão de rede é dividido em subproblemas interligados cujas resoluções obedecem uma ordem hierárquica. Os subproblemas são modelados de programação matemática solucionados por técnicas de otimização tradicionais como fluxo em redes, programação inteira e heurísticas. Os programas computacionais geram alternativas otimizadas de expansão de um sistema telefônico baseados no critério econômico da minimização dos custos totais de investimento, que incluem custos de cabos, edificações, equipamentos de comutação e outros. Esse ferramental de planejamento é utilizado atualmente por companhias telefônicas brasileiras para planejar a expansão de suas redes.

Abstract

This article reports a methodology for planning the long term expansion of urban telephone networks. The planning task is partitioned into interconnected subproblems which are solved by classical optimization techniques, such as network flows, integer programming and heuristics. The procedure selects expansion alternatives for the telephone system based on an economical criterion which minimizes the total investment costs. This set of planning computational tools is presently used by Brazilian telephone companies to design the expansion of their networks.

1. INTRODUÇÃO

As comunicações telefônicas urbanas são processadas através de uma intrincada malha de fios interligados, onde cada assinante encontra-se conectado a uma central telefônica automática através de um par de fios agrupados em cabos telefônicos. As centrais possuem equipamentos de comutação cuja finalidade é estabelecer um contato físico para que uma ligação se efetue. Para isso é necessário que as centrais estejam conectadas entre si por uma rede de cabos chamada de entroncamento.

O crescimento da demanda por serviços telefônicos determina a necessidade de lançar novos cabos e ampliar a capacidade de comutação das centrais. Pode ocorrer, porém, que os prédios que abrigam os equipamentos de comutação chamados de estações - não comportem ampliações, o que determina a construção de novos edifícios e o conseqüente remanejamento de milhares de assinantes.

O aumento populacional desloca as fronteiras urbanas e traz a necessidade de se planejar uma nova rede telefônica para servir os novos assinantes. É possível que novas esta-

ções devam ser construídas. Aí reside um dos dilemas fundamentais do planejamento da expansão de sistemas telefônicos: investir na construção de novas estações, se possível localizadas nos baricentros dos novos bairros ou investir na rede de cabos, levando os novos assinantes a se ligarem a centrais já existentes e mais distantes?

Outro fator que influi nas decisões de como ampliar um sistema telefônico são as mudanças tecnológicas. A incorporação do computador às centrais telefônicas deu origem às centrais digitais que deverão substituir, com inúmeras vantagens, os atuais equipamentos eletro-mecânicos de comutação. Como processar essa gradual substituição é uma preocupação que deve fazer parte do planejamento de um sistema telefônico. As centrais digitais trouxeram consigo o conceito de comutação remota, ou seja, parte da central pode ser fisicamente deslocada para regiões periféricas, constituindo-se numa central-umbilicalmente conectada à sua central-mãe. As decisões sobre se é ou não vantajosa a instalação de estágios remotos, quantos e onde localizá-los são tarefas que vieram complicar o planejamento de sistemas futuros.

O aparecimento da fibra ótica com sua brutal capacidade de transmissão de informações é outra inovação tecnológica que deve ser considerada pelos planejadores.

Essas considerações, e outras não mencionadas, fazem com que a tarefa de projetar a expansão de um sistema telefônico seja um formidável problema de tomada de decisões, com milhares de alternativas possíveis. A responsabilidade nas decisões de expansão do sistema é grande, pois os investimentos necessários são vultosos. Além disso, exorbitando um pouco o lado puramente técnico do problema, os serviços telefônicos brasileiros são prestados por empresas públicas, com investimentos públicos e assim a busca por soluções as mais adequadas é uma imposição social muito forte, principalmente nos períodos de maior escassez de recursos.

Decisões erradas de expansão em sistemas telefônicos dificilmente podem ser reparadas e seus efeitos tendem a se acumular com o passar do tempo. Por exemplo, retardar muito a implantação de novas estações obriga reforçar a rede de cabos, que por sua vez tende a ficar ociosa quando a estação for finalmente construída. Tais erros de planejamento levam a situações paradoxais como a que se está vivendo no momento atual: a demanda por serviços telefônicos está altamente reprimida e o tráfego telefônico tem altas taxas de congestionamento, o que mostra a saturação do sistema atual. O sistema clama, pois, por urgente expansão. Por outro lado, um levantamento feito pela TELEBRÁS em 1982 mostrou que a rede nacional de cabos telefônicos estava com uma ociosidade média de 46% e vinha aumentando a uma taxa de 1% ao ano nas localidades com mais de 1000 assinantes!

Frente ao quadro atual do sistema de telecomunicações brasileiro e à crescente complexidade técnica de suprir adequadamente a demanda por serviços telefônicos, ganha importância um planejamento técnico de alta qualidade que seja capaz de orientar os investimentos no setor. Além disso, planos técnicos bem fundamentados têm maior poder de pressão para impedir decisões políticas danosas ao interesse público.

Este artigo relata os principais resultados de uma pesquisa em planejamento da expansão de sistemas telefônicos urbanos apoiada pela TELEBRÁS e realizada no Depto de Engenharia de Sistemas da UNICAMP no período de 1980 a 1985.

O objetivo da pesquisa foi construir ferramentas computacionais de planejamento para auxiliar o processo de tomada de decisões de investimentos em redes telefônicas urbanas.

2. VISÃO GERAL DA METODOLOGIA

O propósito de uma ferramenta computacional de planejamento é gerar ou analisar alternativas para expansão do sistema de modo a otimizar os recursos necessários para sua efetivação. A sua utilização, junto com a experiência de técnicos de planejamento, serve para gerar propostas para os planos de expansão

de longo e curto prazos, usados como política de crescimento otimizado de um sistema telefônico.

Essas ferramentas são modelos matemáticos capazes de capturar as principais características do sistema que influem economicamente no delineamento de alternativas de expansão.

Devido ao porte e à complexidade do problema da expansão de um sistema telefônico urbano, é imperativo que o mesmo seja decomposto em uma série de subproblemas hierarquicamente interligados. De fato, um único modelo matemático, representando o problema da expansão de todo um sistema urbano de médio porte, teria uma quantidade de variáveis e restrições (e equações e inequações) incompatível com os recursos computacionais ora disponíveis.

Uma decomposição temporal também é necessária a fim de permitir o estagiamento das decisões dentro de um período de planejamento escolhido para o estudo de longo prazo. Essa decomposição se inicia pela escolha de um ano horizonte que define a extensão do período de planejamento. A seguir procede-se a uma subdivisão do período em estágios de planejamento. Dá-se início, então, ao processo de planejamento que, a partir do estágio atual do sistema (ano base), vai sugerindo soluções a cada estágio, até alcançar o ano horizonte. O período de planejamento deve ser escolhido de modo a contemplar as transformações tecnológicas previstas e garantir a confiabilidade das previsões de demanda.

O subproblema associado à hierarquia 1 de termina qual o projeto de expansão ótimo para o ano horizonte. Fornece como primeira aproximação, quantas e onde serão instaladas novas estações e qual a capacidade de cada uma. Além disso, indica em quais das atuais estações é economicamente aconselhável realizar uma expansão de seus prédios. Em seguida decide sobre quantos, onde e de que capacidade serão os estágios de linha remotos (ELR) presentes no ano horizonte. É possível que o resultado sobre os ELR determine retroações sobre as decisões adotadas sobre as estações. Computacionalmente o subproblema da hierarquia 1 é resolvido pelo programa LOCUS.

Na hierarquia 2 o subproblema enfocado é estabelecer um cronograma de entrada em operação das estações e dos ELR previstos para o ano horizonte. Partindo do estágio atual do sistema e tendo como princípio que o sistema projetado para o ano horizonte pela hierarquia 1 é uma rede ótima e desejável, determina-se estágio a estágio quais estações e ELR serão construídas. O critério que orienta as decisões é sempre econômico: minimização do valor presente dos investimentos em cabos, equipamentos, edificações, etc. Aqui também há espaço para reflexões sobre os resultados da hierarquia 1; é possível que alguma estação prevista para o ano horizonte seja descartada do cronograma, assim como, por outro lado, ele pode alertar para a introdução de alguma estação não prevista. O programa computacional associado à hierarquia 2 chama-se CRONOS.

A hierarquia 3 se ocupa de redefinir as fi

liações dos assinantes às estações. Esse problema se coloca sempre que num certo estágio do período de planejamento é instalada uma nova estação na rede. Com isso, os assinantes próximos tendem a se ligar a ela, provocando uma redefinição das áreas de atendimento das estações vizinhas. Esse procedimento de refiliação é conhecido tecnicamente como cor te de área e deve ser realizado tendo-se em mente um compromisso entre aproveitar a rede já existente para proceder às refiliações - o que assegura baixos investimentos no curto prazo - e lançar novos cabos com vistas a organizar topologicamente a rede para objetivos de mais longo prazo. Ele é realizado estágio a estágio e também remete a reflexões sobre as hierarquias anteriores. O programa computacional é o PEOR.

A figura 1 ilustra o procedimento metodológico descrito anteriormente aplicado a um sistema - exemplo hipotético.

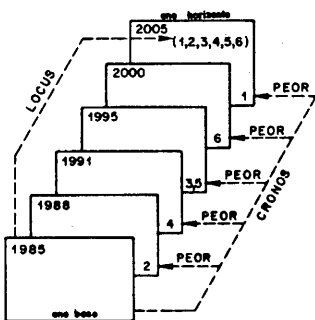


Fig.1 : Metodologia para o planejamento da expansão.

O ano base é 1985, o ano horizonte é 2005 e decidiu-se realizar o estudo subdividindo-se o período de planejamento de 20 anos em 5 estágios. Inicialmente o subproblema da hierarquia 1, baseado em dados relativos à configuração do sistema no ano base de 1985, projeta uma rede otimizada capaz de atender a demanda prevista para o ano horizonte de 2005. É suposto que a melhor solução encontrada seja construir mais 6 novas estações até 2005. Na hierarquia 2 resolve-se o subproblema do cronograma que determina que a estação número 2 deve entrar em operação em 1988, a número 4 em 1991, a número 3 e a número 5 em 1995, a número 6 em 2000 e a número 1 em 2005. A seguir, a hierarquia 3 age sobre essas determinações e decide a cada estágio como realizar os cortes de área.

Nas próximas seções serão descritas as principais características comuns aos modelos matemáticos adotados para solucionar os subproblemas descritos, bem como serão apresentados os detalhes dos modelos dos subproblemas.

3. MODELO DA REDE TELEFÔNICA URBANA

Uma rede telefônica urbana - conhecida por rede local - pode ser vista como a composição de três redes interligadas: rede primária, secundária e de entroncamento. A figura 2 mostra uma rede local com seus principais elementos.

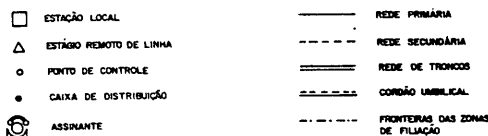
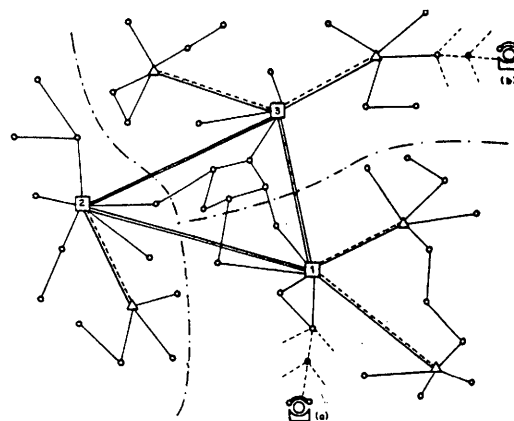


Fig.2 : Rede Telefônica Urbana

O ponto de controle representa um agregado de assinantes ou terminais que chegam até ele através da rede secundária. A rede primária interliga os pontos de controle às estações ou ELR e, em geral, é uma rede subterrânea constituída de cabos que enfeixam os pares de fios. Os cabos são acomodados em dutos plásticos ou cerâmicos construídos dentro de galerias subterrâneas. Um ponto de controle está conectado a apenas uma estação ou ELR. Assim, o conjunto dos pontos de controle liga diretamente a uma estação, ou ligados aos seus ELR satélites, define a zona de filiação da estação.

Um assinante (a) com desejo de se comunicar com um assinante (b) tem sua ligação processada através da estação (1), a que está filiada, que por sua vez, encaminha a chamada pela rede de troncos até a estação (3), a qual se filia (b).

Em geral, um plano de expansão compreende aumentos de capacidade para as três redes. É possível, porém, planejar suas expansões separadamente sem incorrer em erros apreciáveis. A rede secundária tem um caráter extensivo e por isso não apresenta muitas alternativas de projeto para sua expansão; assim, é pouco otimizante. Além disso, é uma rede aérea e relativamente aos investimentos totais não é dispendiosa. Assim, as ferramentas de planejamento devem ser orientadas para o planejamento da rede primária e de troncos. Neste artigo só serão apresentados programas para a rede primária. O planejamento da expansão da rede de troncos lida com conceitos diferentes e por isso é tratado em outro artigo (Garcia e outros, 1986).

A rede primária e as estações podem ser representadas por um grafo onde as estações, os ELR e os pontos de controle constituem os nós do grafo; os arcos são as seções da rede primária compreendidas entre dois nós quaisquer. A figura 3 mostra a rede primária desta rede local da figura 2. É a rede considerada relevante para a construção dos modelos matemáticos dos programas de planejamento

que serão descritos em seguida.

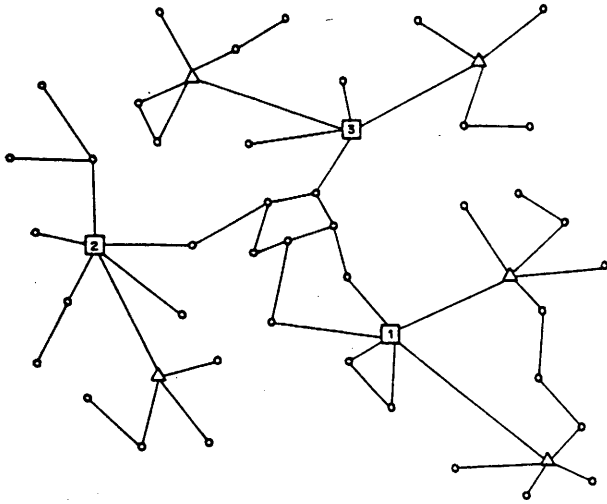


Fig.3 : Grafo representativo da rede primária

4. MODELAMENTO MATEMÁTICO

Cada arco não-orientado da figura 3, com preenchido entre os nós i e j , será substituído por um par de arcos orientados (i,j) e (j,i) .



Fig.4 : Arcos orientados

A variável x_{ij} representa a quantidade de pares de fios no arco (i,j) e a_j designa a demanda prevista de terminais (ou pares de fios) no ponto de controle j . Seja b_j a capacidade em terminais de uma estação/ELR. Cada nó do grafo deve satisfazer a equação de balanço de fios que é a equação fundamental dos modelos matemáticos de expansão de redes. Considere um ponto de controle j qualquer com uma demanda a_j . Seja I_j o conjunto dos nós precedentes ao nó j e K_j o conjunto dos nós sucessores, mostrados na figura 5.

Assim, a equação de balanço de fios se escreve

$$\sum_{i \in I_j} x_{ij} - \sum_{k \in K_j} x_{jk} = -a_j$$

Se o lado esquerdo da equação for negativo, ele pode ser visto como a quantidade de assinantes efetivamente injetados na rede através do nó j e então a satisfação da equação

garante que a demanda de assinantes do nó j é atendida.

Se o nó j for uma estação/ELR, então a expressão fica,

$$\sum_{i \in I_j} x_{ij} - \sum_{k \in K_j} x_{jk} \leq b_j,$$

ou seja, os assinantes atraídos pelo nó-estação j , não devem ultrapassar a capacidade de b_j .

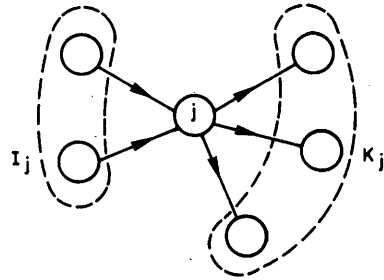


Fig.5 : Equação de balanço de fios

O critério de desempenho utilizado pelos programas LOCUS, CRONOS e PEOR, é a minimização dos custos dos investimentos necessários na expansão do sistema telefônico urbano.

Essencialmente, estes custos são decorrentes de investimentos em rede e em estações. Para a expansão da rede são considerados os custos dos pares de fios e dos dutos. Para as estações, consideram-se os custos de terreno, edificações, climatização, energia e dos equipamentos de comutação (analógicos ou digitais).

Os custos relativos aos investimentos em rede são representados por uma função convexa, linear por partes, conforme figura 6.

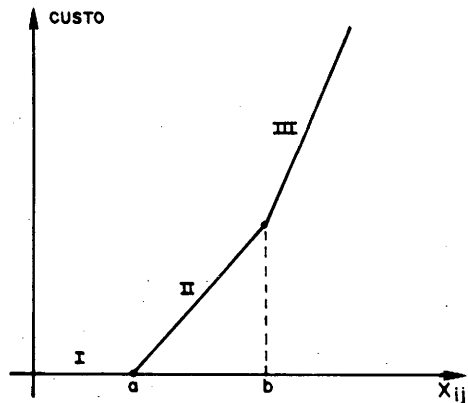


Fig.6 : Custos de rede no arco (i,j)

onde x_{ij} é o número de pares de fios no arco (i,j) .

O parâmetro (a) indica a quantidade dispo nível de pares de fios ao arco (i,j), incluindo aqueles atualmente em uso e os ociosos. A capacidade dos dutos já implantados neste arco, é indicada por (b). O trecho I da curva, é de inclinação nula, representando a utilização dos pares de fios já existentes em (i,j). A inclinação do trecho II decorre dos custos de novos pares de fios (C_{II}). No trecho III a inclinação mais acentuada se deve aos custos adicionais de abertura de novas galerias (C_{III}).

Na modelagem da rede, a ligação dos nós i, j é representada pela triplicação de cada arco orientado aos quais associam-se os custos e as capacidades descritas acima.

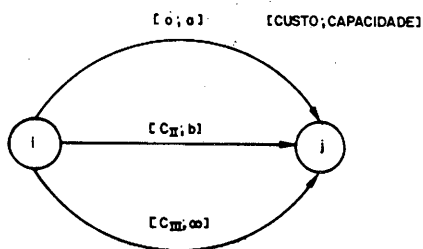


Fig.7 : Modelamento em grafo dos custos da rede.

Quanto aos custos relativos à implantação de novas estações ou à ampliação das existentes, a representação se faz através de funções-custo com as seguintes características:

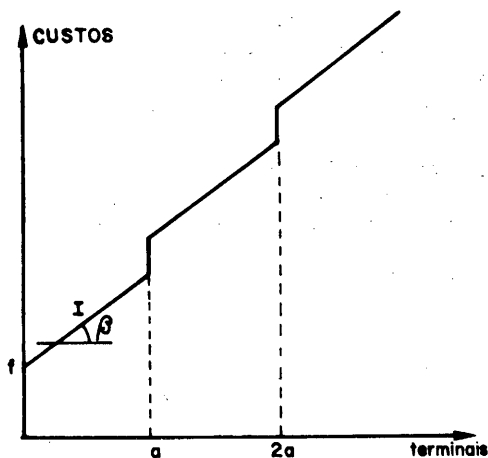


Fig.8 : Custos de implantação de estação nova.

onde:

- o parâmetro (a) indica a capacidade do módulo da central considerada. Assim, os programas LOCUS, CRONOS e PEOR levam em conta a possibilidade de se instalar uma estação em módulos com capacidade de comutação a critério do usuário.

- o parâmetro (f) corresponde ao custo fixo de implantação do primeiro módulo, via de regra superior aos dos módulos seguintes considerando-se, por exemplo, os gastos iniciais em terreno, edificações, etc.

- a inclinação β do trecho I, idêntica à

dos demais, representa o custo unitário do terminal.

No caso de ampliação de uma estação já existente, tem-se:

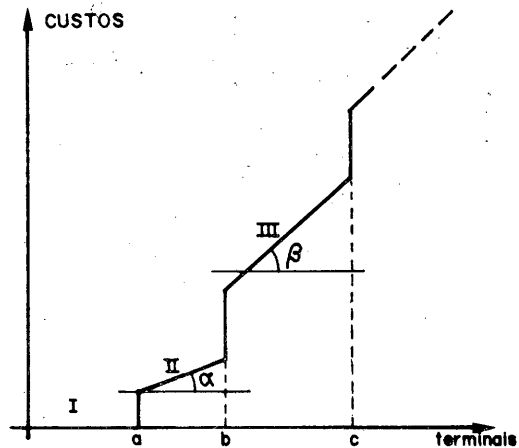


Fig.9 : Custos de ampliação de estação já existente.

onde:

- o parâmetro (a) indica a capacidade de comutação já implantada na estação.

- (b) corresponde à capacidade total de comutação da infraestrutura existente.

- (c-b) corresponde à capacidade de um módulo de ampliação da estação.

- o trecho I, de inclinação nula, representa a ausência de custos até que se atinja a capacidade de comutação instalada.

- no trecho II a inclinação α indica o custo por terminal referente a equipamentos de comutação a serem instalados no espaço existente na estação. O desnível entre este trecho e o anterior corresponde ao custo fixo daqueles equipamentos.

- a inclinação β do trecho III corresponde ao custo por terminal decorrente da ampliação da estação. Esta ampliação pode compreender edificação, energia, climatização e também equipamentos de comutação. O custo fixo desta ampliação corresponde ao desnível entre este e o trecho anterior.

Assim como os pontos de controle, também as estações/ELR são representadas por nós no modelo de grafos adotado. Cria-se um nó de fechamento (NF) ao qual são ligadas as estações/ELR através de arcos capacitados e orientados, denominados arcos de fechamento.

Observe-se que cada um dos arcos da fig. 10 corresponde a cada um dos trechos da função ilustrada na fig. 9. Note-se também que a soma dos fluxos dos arcos de fechamento, de todas as estações, fornece a \sum_{NF} .

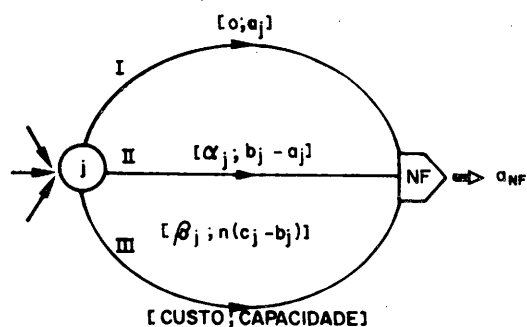


Fig.10 : Modelamento em grafo das estações/ELR.

onde:

- NF : nó de fechamento.
- j : estação.
- n : número máximo de módulos de j.
- a_{NF} : total de assinantes da rede.

5. PROGRAMA "LOCUS": LOCALIZAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE ESTAÇÕES

Neste primeiro passo do procedimento de planejamento aqui adotado, busca-se a melhor política de expansão do sistema telefônico tendo como meta a satisfação da demanda de assinantes projetada para o ano horizonte. Nesta etapa, faz-se portanto uma abordagem estática do problema.

A configuração ótima fornecida pelo programa LOCUS, para o ano horizonte, define:

- o conjunto de novas estações (localização e dimensão) a serem implantadas,
- quais estações já existentes devem ser ampliadas e quais as dimensões destas ampliações.

O programa LOCUS leva em conta a configuração do ano base, ou seja:

- os pares de fios e os dutos já implantados na rede e
- a capacidade de comutação e de infraestrutura existente nas estações.

Caberá ao analista fornecer um elenco de nós candidatos à localização de novas estações, bem como apontar as já existentes passíveis de ampliação. A cada um destes nós (localização ou ampliação) é associada uma variável binária de decisão (0/1) responsável, no modelo matemático, pelos custos fixos envolvidos.

O número de novos pares de fios a serem lançados na rede, arco a arco, é representado por variáveis de fluxo, reais, cujos valores são calculados por um Programa de Fluxo de Custo Mínimo (PFCM), desenvolvido a partir de um algoritmo especializado para problemas de fluxos em redes (Kennington e Helgason, 1980; Jensen e Barnes, 1980).

O problema resultante é abordado por técnicas de Programação Inteira-Mista, tendo sido desenvolvidos algoritmos especializados, sob

o enfoque da decomposição de Benders (Araújo e outros, 1983) e uma versão mais recente empregando um esquema "branch-and-bound" (Nakagawa e outros, 1985).

O programa LOCUS é composto de duas fases:

FASE I : localiza e dimensiona as estações. O modelo matemático adotado contempla um problema inteiro-misto, tendo como critério de desempenho as funções-custo apresentadas nas figuras 8 e 9. O procedimento de resolução, baseado na técnica de partição de Benders (Benders, 1962), decompõe o problema em dois ou três independentes:

- um problema mestre, de variáveis inteiras 0/1, que sugere onde e quantas estações implantar ou ampliar. É resolvido tendo por base o método descrito em Geoffrion (1967).

- um problema satélite, de variáveis reais, resolvido pelo algoritmo do (PFCM). Sua resolução fornece a melhor distribuição dos assinantes tendo em vista a política de estações sugerida pelo problema mestre. Consequentemente, as estações são aqui dimensionadas.

Os dois programas de resolução destes problemas interagem até convergirem para uma política ótima de localização/ampliação de estações no ano horizonte, tendo por base o conjunto de nós candidatos fornecido pelo analisista.

FASE II: faz um refinamento do resultado apresentado na fase anterior. Desloca as estações localizadas pela Fase I, para nós adjacentes. Numa análise tipo pós-otimização procura posições de menor custo. Trata-se de um ajuste fino, de caráter heurístico, que faz uso das rotinas do (PFCM).

O programa LOCUS pode ser complementado por dois outros programas, a critério do analisista:

PROGRAMA "NUVEM"

Aponta na rede telefônica as regiões ("nuvens" de nós) potencialmente candidatas a centros de fios (estações ou ELR). Facilita enormemente a função do analista na seleção de nós candidatos a receberem estações ou ELR e reduz o esforço computacional do programa LOCUS.

PROGRAMA "ERAH"

Deve ser utilizado após o LOCUS, se houver intenção de se usar estágios de linha remotos na rede. O programa foi desenvolvido à semelhança do LOCUS, ou seja, de modo permitir a localização modular de estágios remotos no ano horizonte (Ribeiro e outros, 1987).

Além dos custos de terreno, infraestrutura e equipamentos de comutação, o ERAH considera o custo dos regeneradores, das suas caixas e dos troncos necessários para interligar os estágios remotos às centrais às quais se ligam umbilicalmente.

Como resultado fornece a localização dos ELR, o número de módulos implantados, qual a estação mais próxima e o número de assinantes

concentrados através destes estágios remotos.

A estrutura de custos dos estágios de linha remotos é semelhante à apresentada na fig. 8. No caso, o valor de f é menor e o de β maior. Consequentemente, confrontando-se funções-custo de estações novas e de estágios de linha, verifica-se que a partir de um certo número de assinantes (ponto de equilíbrio) a implantação de uma estação é economicamente vantajosa. Este fato pode remeter o analista a fazer reflexões em função dos resultados obtidos pelo LOCUS e ERAH.

6. PROGRAMA "CRONOS": CRONOGRAMA DE IMPLANTAÇÃO DE ESTAÇÕES E DE ELR

O programa CRONOS (Carlson Filho e outros, 1984) vem cumprir a etapa do planejamento em que se define o cronograma de implantação/ampliação das estações/ELR, tomando por base os resultados apresentados pelos programas LOCUS e ERAH.

Nesta etapa, o efeito do crescimento da demanda (número de assinantes) é considerado desde o ano base até o ano horizonte. Durante o período de planejamento será necessário definir sistemas telefônicos (rede e estações) intermediários, partindo da situação existente no ano base, em direção à proposta dada pelo LOCUS/ERAH para o ano horizonte.

O processo decisório do CRONOS se depara com o seguinte dilema: a implantação/ampliação de todas as estações/ELR indicadas pelo LOCUS/ERAH no início do período de planejamento acarreta elevados investimentos iniciais, além de provocar a ocorrência de capacidade ociosa em infraestrutura e equipamentos. No entanto, os investimentos em rede são minimizados. Por outro lado, a postergação acarreta custos maiores em rede e custos menores relativos aos investimentos fixos das estações.

É a partir do balanço de custos deste dilema que o programa CRONOS estabelecerá a política de implantação/ampliação das estações. Variáveis de decisão estabelecerão o estágio em que deverá ocorrer a implantação/ampliação das estações, bem como o número de módulos a instalar.

A fim de se dispor de um modelo matemático de resolução viável, sem demandar excessiva carga computacional, são necessárias algumas simplificações:

- estagiamento: o problema é tratado estágio a estágio. As decisões tomadas num determinado estágio levam em conta o passado, mas não consideram as consequências que acarretarão nos estágios seguintes.

- classificação: também com o propósito de diminuir o número de alternativas a analisar, as variáveis de decisão são classificadas em três categorias: variáveis correspondentes a estações

- a) que devem ser implantadas/ampliadas
- b) em dúvida
- c) que não devem ser implantadas/ampliadas

no estágio em estudo.

Após esta classificação, feita pelo analista, o Programa impõe valores "1" para as variáveis classificadas em (a) e "0" para as classificadas em (c). As variáveis correspondentes às estações em dúvida, ficarão livres, possibilitando 2^a alternativas a serem testadas.

O programa CRONOS é de caráter conversacional. Interage com o analista, a cada estágio, fornecendo-lhe subsídios para que possa classificar as estações. Dentro de um mesmo estágio, permite reclassificações. O programa é bastante flexível. Uma estação rejeitada num certo estágio pode ser implantada como um ELR e transformar-se em estação-mãe em estágios posteriores.

Uma versão automática para o programa CRONOS foi desenvolvida. Neste caso, a classificação é feita pelo próprio programa, segundo parâmetros fornecidos como dados de entrada.

7. PROGRAMA "PEOR": PROCESSO DE ALOCAÇÃO ASSINANTE-ESTAÇÃO

Na hierarquia anterior, o programa CRONOS definiu um cronograma para a instalação de novas estações/ELR e ampliações. O aparecimento de uma nova estação na rede ou mesmo a ampliação de uma antiga num determinado estágio obriga a redefinição das fronteiras das zonas de influência das estações.

A tarefa nesta hierarquia é proceder, em cada estágio, às refiliações assinante-estação de modo a acomodar as novas estações ou ampliações ocorridas na rede naquele estágio. Esse processo é realizado tendo em mente a otimização dos custos de investimento, com especial ênfase para o aproveitamento máximo da rede instalada.

O programa foi concebido em duas fases:

. FASE 1 : Nesta fase os assinantes de um certo estágio são alocados ao conjunto das estações previstas para o estágio, ignorando-se a quantidade de pares de fios existentes na rede primária. Ao desprezar a rede existente está-se favorecendo uma estrutura topológica da rede mais adequada ao longo prazo, onde a importância da rede atual não deverá ser relevante. Esse procedimento é feito com a aplicação do programa (PFCM) sobre uma rede onde os arcos são duplicados a fim de acomodar a função custo da figura 6. A rede existente é desprezada fazendo-se $a = \emptyset$. A fim de evitar transformações muito radicais na rede, proibe-se que as estações antigas percam muitos assinantes; assim assegura-se, através da aplicação do PEOR estágio a estágio, uma evolução suave da rede do ano base até a rede-meta do ano horizonte.

Entretanto, esta fase ignora importantes aspectos técnicos e econômicos do planejamento. De fato, sob o ponto de vista da engenharia econômica, a capacidade instalada de cabos é muito relevante para a otimização dos investimentos e precisa ser levada em conta.

. FASE 2 : O aproveitamento da rede instalada é a principal preocupação desta fase. As fronteiras das zonas de filiação, que foram definidas na fase 1, são fixadas e dentro de cada uma delas processa-se uma redefinição das alocações assinante-estação de modo a aproveitar ao máximo a rede existente. Para isso os arcos da rede são triplicados com o objetivo de se utilizar a função custo linear por partes da figura 6; a seguir aplica-se o programa (PFCM).

O procedimento de duas fases é aplicado a cada estágio de planejamento. O estágio k utiliza os resultados obtidos no estágio k-1. Assim, realiza-se o planejamento das expansões de um modo evolutivo e otimizado. Detalhes do programa PEOR podem ser encontrados em França e outros (1984).

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia hierarquizada relatada neste artigo tem sido empregada para planejar a expansão de sistemas telefônicos no Brasil. Até agora, estima-se que mais de 30 cidades, com preendendo 3,3 milhões de terminais, aplicaram estes programas. Dentre elas, destacam-se Fortaleza, Curitiba e Salvador. Excetuando-se o Rio de Janeiro e São Paulo, os programas são tão capacitados para executar o planejamento global de qualquer região metropolitana. Para essas duas é necessário repartir a rede em subredes. Os tempos de processamento para uma rede como Curitiba (410 mil terminais no ano 2000) são aproximadamente de 10 minutos de CPU para o LOCUS, 2 minutos para NUVEM e ERAH, 4 minutos para o CRONOS e 3 minutos para o PEOR. Estima-se que a economia conseguida pela aplicação desta metodologia em comparação com os procedimentos anteriores é de 15 a 20%. O volume do investimento necessário para atender a demanda até o ano 2000 na cidade de Curitiba - considerando apenas os custos da rede primária, edifícios e equipamentos de comutação - é da ordem de 140 milhões de dólares, distribuídos ao longo dos 15 anos do período de planejamento. É possível alcançar níveis de ociosidade da rede primária menores que 20%.

9. CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE PESQUISAS

A metodologia de planejamento apresentada neste trabalho mostra a potencialidade e a utilidade das técnicas de otimização aplicadas ao processo de planejamento da expansão de sistemas telefônicos.

O problema de planejar um sistema telefônico futuro foi decomposto em subproblemas de menor complexidade. Os subproblemas são modelos matemáticos que, quando solucionados computacionalmente por métodos de otimização, fornecem alternativas de expansão de mínimo custo para o sistema. O processo de resolução dos subproblemas obedece a uma ordem hierárquica, onde os resultados obtidos em determinada hierarquia podem retroagir sobre os resultados de hierarquias anteriores.

Uma área em que esforços em pesquisa são

muito promissores é a da expansão a curto prazo da rede primária. Em Ribeiro e outros (1986) são apresentados alguns resultados iniciais. O desenvolvimento de ferramentas de otimização e planejamento, seja através da concepção de outros programas ou de adaptação dos aqui apresentados, certamente propiciará decréscimos adicionais na taxa de ociosidade da rede primária.

Ressalte-se que o aparecimento de novas tecnologias - como a comutação digital e fibra óptica, e a demanda crescente por novos serviços como telex, vídeo-texto, transmissão de dados por linhas privadas, etc. - tornam inadequadas as ferramentas tradicionais disponíveis atualmente para o planejamento do entroncamento e do roteamento.

Outra área bastante afetada pelo aparecimento de novos serviços é a da previsão de demanda. Sabe-se que um planejamento de qualidade é fortemente dependente de dados confiáveis sobre a evolução do tráfego telefônico. Direcionar esforços de pesquisa para esta e outras áreas carentes é fundamental, sem esquecer que a tarefa mais difícil e mais importante é a formação de recursos humanos capazes de assumirem o papel de agentes das transformações tecnológicas.

10. AGRADECIMENTOS

Os programas e metodologias apresentadas neste artigo são frutos do trabalho de uma equipe. Em especial, os autores agradecem as contribuições de A. Yamakami, J.M. Nakagawa, C.M. Carlson Filho, F. Fraislebem, M.B. Martini, C. Lyra, C. Ribeiro, R.C. Xavier, E. Araújo.

11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Araújo, E.; França, P.M.; Soares, S. & Tavares, H.M.F., (1983). "Optimal Location of Telephone Exchanges", Proc. 3rd IFAC/IFORS Symposium on Large Scale Systems, Warsaw, Poland, ed. North-Holland.
- Benders, J.F., (1962). "Partitioning Procedures for Solving a Mixed Variables Programming Problems", Numerische Mathematik, vol. 4.
- Carlson Filho, C.M.; Tavares, H.M.F. & Fernandes, J.F.R., (1984). "Cronograma de Implantação de Centrais Telefônicas: Uma Nova Metodologia", Anais do 2º Congresso Latinoamericano de Investigación Operativa e Ingeniería de Sistemas, B. Aires, Argentina.
- França, P.M.; Fraislebem, F. & Tavares H.M.F., (1984). "O Programa PEOR - Uma Metodologia para a Evolução Dinâmica de Cortes de Área"; Revista TELEBRÁS, junho/julho.
- Garcia, A.S.; Tavares, H.M.F.; Ribeiro, R.V. & Guerra, R.B., (1986). "Um Procedimento para Otimização do Roteamento de Troncos em Horizonte de Longo Prazo", Anais do 6º Congresso Brasileiro de Automatica, Belo Horizonte.

- Geoffrion, A.M., (1967). "Integer Programming by Implicit Enumeration and Balas' Method", SIAM Review, nº 2.
- Jensen, P.A. & Barnes, J.W., (1980). Network Flow Programming, John Wiley.
- Kennington, J.L. & Helgason, R.V. (1980). Algorithms for Network Programming, John Wiley.
- Nakagawa, J.M.; Carlson Filho, C.M. & Yamakami, A., (1985). "A Branch-and-Bound Algorithm for the Location of Digital Telephone Switching Centers in a Long Term Planning", Proc. 2nd IASTED International Conference on Telecommunication and Control, Rio de Janeiro.
- Ribeiro, C.M.; Fernandes, J.F.R. & Tavares, H.M.F., (1987). "Digital Remote Units (DRU) Allocation Program for Analog-Digital Telephone Networks", Proc. IFORS' 11th Triennial Conference on Operations Research, B. Aires, Argentina.
- Ribeiro, J.F.F.; França, P.M. & Tavares, H.M.F., (1986). "Expansão a Curto Prazo de Redes Telefônicas Primárias", Anais do 6º Congresso Brasileiro de Automática. Belo Horizonte.