

PLANEJAMENTO OTIMIZADO DA INFRA-ESTRUTURA DE REDE CELULAR

Marcos A. DeSousa¹ (*), J.R. Formigoni F. (**), Marco A. Bergamaschi (*),
Omar C. Branquinho (***), J. Sindi Yamamoto(***), Joana Machado(*), Carlos M. C. Filho(****)
(*) DENSIS-FEEC-UNICAMP; (**)USF; (***)USF/CPqD; (****)CEUV

¹ Departamento de Engenharia de Sistemas, Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação,
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Rua Albert Einstein, Caixa Postal 6101,
Cep 13083-970, Campinas - SP - Brasil, Tel: (019) 788-3705, Fax: (019) 289-1395
e-mail : masousa@denis.fee.unicamp.br - dpto@denis.fee.unicamp.br

SUMÁRIO

Nos últimos anos, o crescimento da rede móvel celular no Brasil e no resto do mundo tem sido explosivo. Além deste crescimento, tem-se verificado uma demanda cada vez maior por novos serviços na rede móvel, notadamente acesso à Internet com a necessidade de taxas de acesso mais altas. Gerações mais avançadas têm sido propostas, como por exemplo, os sistemas 2,5 G como uma evolução dos atuais sistemas digitais de segunda geração e uma nova terceira geração (3G). Para suportar esta evolução serão necessários novos equipamentos e infraestrutura tanto na interface aérea quanto na interligação BTS (Base Transceiver Station) com BSC/MSC (Base Station Controller/Mobile Switching Center). Neste contexto, no presente trabalho é introduzido um modelo de alocação ótima de recursos de rede fixa para a interligação das BTS's ao conjunto BSC/MSC. Adicionalmente, é mostrada uma aplicação deste modelo em um estudo de caso para sistemas de segunda geração (2G), podendo posteriormente ser evoluído para as novas gerações com a inclusão de novos parâmetros.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento do número de assinantes para serviços sem fio, tanto no Brasil como no exterior tem sido enorme. O Brasil possui atualmente sistemas de primeira e segunda geração em operação, totalizando 16 milhões de terminais móveis. Atualmente, as empresas operadoras oferecem basicamente três tipos de serviços: voz, dados a baixas taxas (até 9,6 Kbps) e mensagens curtas (até 200 bytes). Em curto prazo, prevê-se a evolução dos atuais sistemas digitais 2G para sistemas 2,5G com acesso a taxas mais altas (64 kbps) tanto por comutação por circuitos como por pacotes. A médio prazo, entrará a terceira geração de sistemas celulares (3G), a qual viabilizará a transmissão de dados em taxas mais elevadas (móvel a 144 kbps, baixa mobilidade a 384 kbps e indoor a 2 Mbps). Consequentemente, além do crescimento das redes atuais, haverá a implantação de novos equipamentos na rede para suportar novos serviços. Faz-se necessário, portanto, uma otimização de soluções na interligação dos componentes da parte fixa da rede celular, tanto agora para os sistemas 2G, 2,5G e, principalmente, 3G.

Atualmente, existem várias soluções de interface aérea 2G, tais como: Global System Mobile Communications (GSM), IS-136 e

IS-95. Além disto, as empresas operadoras dispõem de diferentes opções de tecnologias para interligação da parte fixa da rede celular. Esta infra-estrutura é responsável pela ligação das BTS's com o conjunto BSC/MSC, conexão entre MSC's e conexão das MSC's com a rede de telefonia pública. Cada tecnologia possui diferentes meios de transmissão (rádio, ótica e cabo), taxas, capacidades de multiplexação e estruturas de custo. A utilização de cada solução depende das condições e necessidades da alocação de recursos, que em última análise depende do planejamento celular que determina a localização das BTS's. Neste artigo será explorada a interligação das BTS's com o conjunto BSC/MSC.

Dada a grande quantidade de opções tecnológicas e de custo para implantar a infra-estrutura da rede fixa de interligação dos elementos da rede celular, a escolha da melhor solução torna-se um problema complexo ao planejador. Nesta situação, faz-se necessário a utilização de ferramentas de planejamento para a obtenção de soluções de mínimo custo que considerem as restrições de demanda e de capacidade dos equipamentos envolvidos. Este tipo de ferramenta é útil para os fabricantes de equipamentos bem como para as empresas operadoras [1]. No primeiro caso, a ferramenta possibilita ao fabricante avaliar o impacto que pode causar a introdução de um novo produto ou funcionalidade. Os modelos utilizados nas ferramentas poderão auxiliar o fabricante na composição de custo de seus produtos e na elaboração de pacotes promocionais. No segundo caso, tais ferramentas auxiliam as empresas operadoras na obtenção de soluções de mínimo custo ou de maximização de receitas.

Este trabalho tem por objetivo apresentar um modelo matemático de programação inteira mista desenvolvido para a alocação ótima de equipamentos na infra-estrutura da rede celular. O trabalho descreve também um estudo de caso de aplicação do modelo a uma rede celular em uma região onde o tráfego oferecido de voz demanda 15 BTS.

O trabalho encontra-se assim organizado: na próxima seção é feita uma caracterização do problema a ser resolvido. Na seção 3 são apresentadas as tecnologias utilizadas na infra-estrutura da rede celular. Na seção 4 é descrita a estrutura de custo utilizada no modelo. Na seção 5 é apresentado o modelo matemático desenvolvido e na seção 6 são apresentados e analisados os resultados do estudo de caso. Finalmente, na seção 7 são apresentadas as principais conclusões do trabalho, assim como propostas de futuros trabalhos.

2. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

A rede celular é composta pelas estações móveis (MS – Mobile Station) e componentes fixos (BTS, BSC e MSC). A parte móvel é composta basicamente pelos terminais móveis (o telefone celular), os quais originam e terminam as chamadas. A parte fixa, também chamada de rede de infra-estrutura, é composta pelos seguintes elementos [2]: BTS, onde os equipamentos rádio são alocados, os multiplexadores (PDH e SDH, por exemplo), os quais concentram o tráfego gerado nas BTS's, a BSC, que faz o controle das BTS, e a MSC que faz a parte de comutação e o ponto de interface com a rede fixa de telefonia. Os componentes da rede fixa são interconectados por linhas privadas suportadas por redes de cobre, redes ópticas ou, ainda, enlaces de microondas.

O objetivo do planejamento de rede fixa é minimizar o custo total da rede respeitando, obviamente, os requisitos mínimos de performance e também as restrições técnicas e de capacidade dos equipamentos. Mais especificamente, o planejamento da rede fixa contempla as seguintes atividades:

- Localização e dimensionamento das BTS's;
- Localização e dimensionamento do conjunto BSC/MSC;
- Interconexão otimizada das BTS às BSC/MSC;
- Dimensionamento da rede de sinalização necessária para suportar os serviços oferecidos pela rede móvel.

Neste trabalho é considerado que a BSC está fisicamente próxima a MSC formando o conjunto BSC/MSC. Adicionalmente, é focalizado no desenvolvimento e aplicação de um modelo destinado a alocar equipamentos que realizem a interconexão otimizada das BTS's com o conjunto BSC/MSC. Tal conexão pode ser feita utilizando vários tipos de tecnologia, apresentadas na seção 3, e também diferentes topologias, tais como enlaces rádio ou modems de alta velocidade na rede metálica. Várias soluções com topologia tipo estrela simples, topologia dupla estrela utilizando multiplexadores ou, ainda, em anel utilizando equipamentos SDH são possíveis. Assim, o trabalho objetiva solucionar de forma otimizada estas conexões da rede fixa.

3. TECNOLOGIAS UTILIZADAS

Atualmente, a comunicação da BTS à BSC/MSC é feita através de canais E1. Para suportar este tipo de interface existem várias tecnologias. A seguir, são apresentadas as principais tecnologias atualmente utilizadas:

- *Enlace via rádio microondas* - é uma solução ponto a ponto bastante utilizada pelas empresas operadoras. Os fabricantes fornecem rádios com capacidades de 1, 2, 4 e 8 canais E1.
- *Modems de Alta Velocidade na Rede Metálica* - tal solução utiliza modems HDSL (High Bit Rate Digital Subscriber Line), os quais oferecem enlaces balanceados de 2 Mbps para uma distância de até 4 quilômetros.

- *Modems ópticos* - é uma solução ponto a ponto com as mesmas opções de velocidade dos enlaces rádio (1, 2, 4 e 8 canais E1).
- *Equipamentos SDH/PDH* - para grandes concentrações de demanda na rede (16 ou mais canais E1) poderá ser viável utilizar multiplexadores PDH e SDH e também os ADM (Add-Drop Multiplexer) com tecnologia SDH.

A diversidade de tecnologias possibilita ao planejador um elevado número de soluções de atendimento da demanda, com várias opções de topologia. Consequentemente, dependendo da quantidade de nós da rede a ser planejada, encontrar a solução de menor custo de forma manual torna-se uma atividade complexa, sendo conveniente o uso de modelos de otimização.

4. ESTRUTURA DE CUSTOS UTILIZADA

Para cada canal instalado para atendimento da demanda na rede é possível associar um custo fixo e um custo variável. Tal flexibilidade permite a aplicação do modelo para dois tipos de cenários:

- *Implantação de rede*: são considerados custos de implantação de uma nova rede ou a expansão de uma rede existente. Neste caso são considerados os custos de equipamentos alocados (custos fixos) e custos de cabos e dutos utilizados (custos variáveis com a distância).
- *Aluguel de Rede*: os enlaces ponto a ponto são alugados pelas Empresas Operadoras utilizando duas componentes de custo. A primeira é uma parte fixa, com valor proporcional à capacidade do canal oferecido (geralmente múltiplos de canal E1) e uma parte variável com a distância do enlace.

Através de um pré-processamento dos dados de custo, é possível construir cenários comparando a opção de aluguel ou implantação da rede. Para isto é necessário utilizar os conceitos básicos de engenharia econômica [3] e converter o gasto com o aluguel para o valor presente ou converter o custo de implantação e OA&M em valor uniforme líquido.

5. DESCRIÇÃO DO MODELO

Todo tráfego gerado nas BTS's (nós de demanda) são encaminhados para o nó da BSC/MSC. Esta particularidade nos permite representar o problema com um grafo onde cada "nó de demanda" corresponde a um nó fonte e o conjunto BSC/MSC ao único nó sumidouro. Esta representação é feita utilizando-se o modelo de otimização de redes denominado Nó-Arco [4].

5.1 Modelo de Grafos

Um grafo orientado pode ser usado para representar a rede [4]. Um nó do grafo corresponde à BSC/MSC, enquanto os outros estão associados aos pontos de demanda (BTS's). Existe a necessidade de que a unidade de demanda apresentada à rede seja única, por exemplo canais E1. Os arcos de interligação entre as BTS's e o conjunto BSC/MSC representam as possíveis conexões onde o planejador realiza a candidatura dos sistemas de transmissão, atribuindo custos e restrições técnicas de capacidade. O modelo a ser apresentado considera as tecnologias

modems HDSL, modems ópticos e enlace via rádio, as quais podem ser arranjadas na rede em topologias ponto-a-ponto, dupla-estrela e rota (Figura 1).

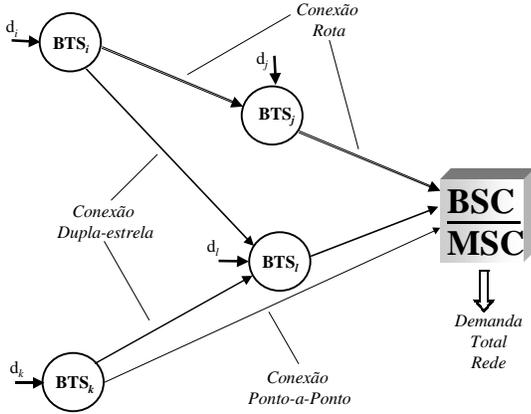


Figura 1. Representação da rede em grafos.

5.2 Modelo Matemático

O modelo matemático é um problema de *Programação Linear Mista com Variáveis 0-1*, que utiliza a abordagem nó-arco [4]. As variáveis de decisão referem-se ao valor do fluxo nos arcos e à alocação (ou não) e dimensionamento dos sistemas de transmissão instaláveis em cada arco para o atendimento das demandas. Apresenta a seguinte formulação:

Minimize Custo Rede =

$$\begin{aligned} & \sum_{(i,j) \in A} \sum_{n \in H_{ij}} (\varphi_{ij}^{H_{eq},n} + \varphi_{ij}^{H_r,n} \cdot l_{ij}) \cdot X_{ijn} + \\ & \sum_{(i,j) \in A} \sum_{n \in M_{ij}} (\varphi_{ij}^{M_{eq},n} + \varphi_{ij}^{M_r,n} \cdot l_{ij}) \cdot Z_{ijn} + \\ & \sum_{(s,i) \in A} \sum_{n \in R_{ij}} (\varphi_{ij}^{R_{eq},n} + \varphi_{ij}^{R_r,n} \cdot l_{ij}) \cdot W_{ijn} \end{aligned} \quad (01)$$

sujeito a:

$$\sum_{j \in J_1} Y_{ij} - \sum_{j \in J_2} Y_{ji} = d_i, \quad \forall i \in I \quad (02)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{n \in H_{ij}} \text{cap}_{ij}^{X,n} \cdot X_{ijn} + \sum_{n \in M_{ij}} \text{cap}_{ij}^{Z,n} \cdot Z_{ijn} + \\ & \sum_{n \in R_{ij}} \text{cap}_{ij}^{W,n} \cdot W_{ijn} \geq Y_{ij} \geq 0, \quad \forall (i,j) \in A \end{aligned} \quad (03)$$

Onde:

- A** : conjunto de arcos do grafo (ponto-a-ponto, dupla-estrela e rota);
- H_{ij}** : conjunto de sistemas de modems HDSL candidatos no arco $(i,j) \in A$;

X_{ijn} : variável real associada à implantação (ou aluguel) do sistema de modems HDSL, de modularidade n , candidato no arco $(i,j) \in A$;

ϕ_{ij}^{Heq,n} : custo associado à implantação (ou aluguel) do sistema de modems HDSL, de modularidade n , candidato no arco $(i,j) \in A$;

ϕ_{ij}^{Hr,n} : custo associado à implantação (ou aluguel) da rede para o sistema de modems HDSL, de modularidade n , candidato no arco $(i,j) \in A$;

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

M_{ij} : conjunto de sistemas de modems ópticos candidatos no arco $(i,j) \in A$;

Z_{ijn} : variável inteira (binária) associada à implantação (ou aluguel) do sistema de modems ópticos, de modularidade n , candidato no arco $(i,j) \in A$;

ϕ_{ij}^{Meq,n} : custo associado à implantação (ou aluguel) do sistema de modems ópticos, de modularidade n , candidato no arco $(i,j) \in A$;

ϕ_{ij}^{Mr,n} : custo associado à implantação (ou aluguel) da rede para o sistema de modems ópticos, de modularidade n , candidato no arco $(i,j) \in A$;

R_{ij} : conjunto de enlaces rádio candidatos no arco $(i,j) \in A$;

W_{ijn} : variável inteira (binária) associada à implantação (ou aluguel) do enlace rádio, de modularidade n , candidato no arco $(i,j) \in A$;

ϕ_{ij}^{Req,n} : custo associado à implantação (ou aluguel) do enlace rádio, de modularidade n , candidato no arco $(i,j) \in A$;

ϕ_{ij}^{Rr,n} : custo associado à implantação (ou aluguel) da rede para o enlace rádio, de modularidade n , candidato no arco $(i,j) \in A$;

I : conjunto de todos os nós do grafo, exceto o nó da BSC/MSC;

J₁ : conjunto de nós j diretamente conectados ao nó i , por arcos emanando de i para j ;

J₂ : conjunto de nós j diretamente conectados ao nó i , por arcos emanando de j para i ;

Y_{ij} : variável real associada ao fluxo de demanda escoado pelo arco $(i,j) \in A$;

d_i : demanda (em canais E1) exigida pelo nó $i \in I$;

cap_{ij}^{X,n} : capacidade do sistema de modems HDSL, de modularidade n , candidato no arco $(i,j) \in A$;

cap_{ij}^{Z,n} : capacidade do sistema de modems ópticos, de modularidade n , candidato no arco $(i,j) \in A$;

cap_{ij}^{W,n} : capacidade do enlace rádio, de modularidade n , candidato no arco $(i,j) \in A$.

Os principais componentes do modelo matemático são:

– *Função Objetivo* (1): é o custo total da infra-estrutura da rede celular, a ser minimizada.

– *Restrições de Satisfação de Demanda (2)*: garantem o balanço de fluxo em todos os nós do grafo (BTS), exceto para o nó da BSC/MSC, por ser uma equação redundante [4].

– *Restrições Técnicas de Capacidade (3)*: ocorrem em cada arco previsto pelo planejador, assegurando que a soma das capacidades dos sistemas candidatos seja superior ao fluxo escoado pelo arco.

– *Restrições Adicionais*: estão associadas à modelagem de funcionalidades próprias de alguns sistemas de transmissão, tais como topologias e aspectos de segurança na rede, por exemplo anéis unidirecionais na tecnologia SDH [5].

Embora o principal objetivo do modelo seja minimizar o custo da infra-estrutura da rede celular, com pequenas adaptações [6] ele pode ser aplicado também no planejamento orientado a receita, provável cenário da 2,5G e 3G, onde se espera uma competitividade entre os vários serviços a serem oferecidos pela rede.

6. ESTUDO DE CASO

6.1 Descrição da Rede

Foi utilizado como exemplo de aplicação uma rede que corresponde a uma área coberta por uma BSC/MSC e composta por 15 BTS's. As demandas entre BSC/MSC e as BTS's variam de 1 a 4 canais E1 e as distâncias de 1 a 7,5 Km.

As tecnologias Modems HDSL na Rede Metálica, Modems Ópticos e Enlaces via Rádio Microondas são utilizadas para interligar as BTS's às BSC/MSC. Os custos e as capacidades dos equipamentos e da infra-estrutura de cada tecnologia estão mostrados na Tabela 1. O custo do par de modems HDSL é adotado como referência.

Tecnologia	Custos dos Equipamentos				Custos da Infra-estrutura (km)	
	1xE1	2xE1	4xE1	8xE1	Dutos	Cabos
Metálica	1,00	-	-	-	4,17	4,30
Óptica	1,00	1,50	1,75	2,00	5,00	3,80
Rádio	-	8,50	13,50	20,00	0	0

Tabela 1. Custos e capacidades das tecnologias e infra-estrutura.

A linguagem de programação matemática AMPL foi utilizada para construir o modelo matemático e o pacote de otimização CPLEX® para a resolução deste modelo.

6.2 Cenários Estudados

Utilizando os dados de rede e das tecnologias descritas acima, foi realizado um estudo composto por 3 cenários:

- *Cenário 1*: considera-se que os cabos metálicos já estão instalados e os dutos das redes metálica e óptica já estão disponíveis. Resta lançar os modems HDSL e ópticos, enlaces via rádio microondas e cabos ópticos.

- *Cenário 2*: apenas estão implantados os dutos das redes metálicas e óptica. Faz-se necessário lançar cabos e equipamentos para as 3 tecnologias.
- *Cenário 3*: não existem dutos nem cabos lançados.

Os resultados obtidos para os 3 cenários estão mostrados nas figuras a seguir.

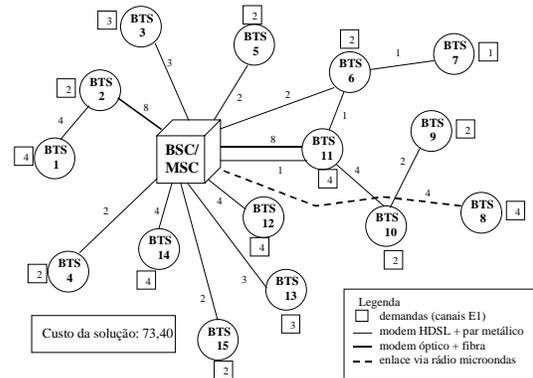


Figura 2. Solução obtida para o Cenário 1.

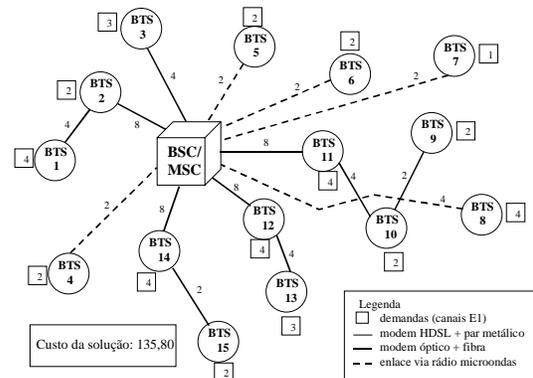


Figura 3. Solução obtida para o Cenário 2.

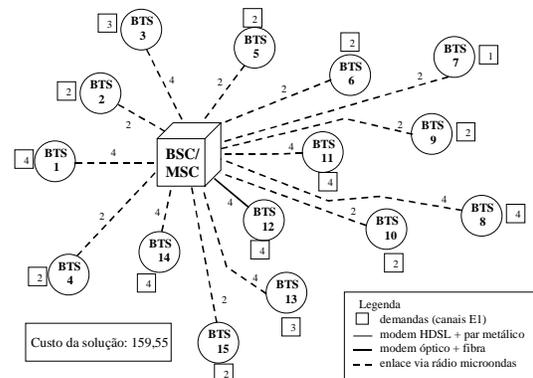


Figura 4. Solução obtida para o Cenário 3.

6.3 Análise das Soluções

Pode-se observar que as soluções obtidas para os 3 cenários são fortemente dependentes da estrutura de custo adotada. Assim, no Cenário 1 predominaram as soluções tecnológicas formadas por Modems HDSL na Rede Metálica, pois o custo da infra-estrutura desta solução é nulo (dutos e cabos já lançados).

No Cenário 2, predominaram os Modems Ópticos devido a economia de escala oferecida por esta tecnologia à medida que agregamos demandas em pontos intermediários e utilizamos enlaces de maior capacidade. Notamos que esta solução apresentou 4 pares de modems ópticos com capacidade de 4 canais E1 e outros 4 com capacidade de 8 canais E1. Nesta situação, a solução utilizando enlaces via rádio microondas também se mostrou competitiva.

No cenário 3 predominaram os enlaces via Rádio com capacidades de 2 e 4 canais E1 devido ao fato de que neste caso a infra-estrutura das redes metálicas e ópticas não estavam disponíveis e o seu lançamento é de custo elevado.

Outra característica importante das soluções é a obtenção de topologias de rede mistas contendo enlaces ponto-a-ponto e rotas que passam por pontos intermediários, nos quais são agregadas demandas de mais de uma BTS.

7. CONCLUSÕES E FUTUROS TRABALHOS

A evolução da rede celular atual para a rede de terceira é uma realidade de curto e médio prazo, tanto para as empresas operadoras como para os fabricantes de equipamentos. Grandes investimentos serão gastos na implantação de novos equipamentos e infra-estrutura da rede.

As indefinições quanto à tecnologia a ser utilizada, aos serviços a serem oferecidos e o elevado custo de implantação torna a evolução da rede um problema bastante complexo. Consequentemente, será necessário o uso de ferramentas de planejamento e de projeto para auxiliar as empresas prestadoras de serviço e os fabricantes de equipamento na evolução deste tipo de rede.

Dependendo da estratégia adotada pela empresa prestadora de serviço, a evolução pode ser focada na abordagem de minimização de custos ou maximização de receitas. Para as duas abordagens a utilização de modelos matemáticos de otimização têm se mostrado interessante, uma vez que os resultados obtidos são melhores que os obtidos por métodos manuais ou heurísticos.

O modelo proposto neste trabalho apresenta duas características importantes:

- Flexibilidade para contemplar novas tecnologias para conexão BTS-MSB/BCS. O objetivo de torná-lo flexível é a possibilidade de utilizá-lo, com poucas modificações, no planejamento da infra-estrutura da rede celular de terceira geração;
- Possibilidade de contemplar diferentes estruturas de custo – essa característica é bastante conveniente pois possibilita que uma prestadora de serviço obtenha soluções de mínimo custo tanto para o cenário de implantação de uma rede, como para o cenário aluguel de canais de uma outra empresa operadora. O modelo permite ainda soluções mistas, com parte da rede implantada e o restante alugada.

Como futuros trabalhos, prevê-se a adaptação do modelo às redes de terceira geração e o desenvolvimento de uma metodologia de planejamento da evolução desta rede, onde seriam tratados os seguintes problemas:

- *Localização otimizada do conjunto BSC/MSB;*
- *Interconexão otimizada das BTS às BSC;*
- *Dimensionamento da rede de sinalização necessária para suportar os serviços oferecidos pela rede móvel.*

8. REFERÊNCIAS

- [1] DRAVIDA et al., "Narrowband and Broadband Infrastructure Design for Wireless Networks", IEEE Communication Magazine, pp. 72-78, May 1998.
- [2] GALLENGER, MD., SNYDER, R.A., "Mobile Telecommunications Networking with IS-41", Editora McGraw-Hill, 1ª edição, 1997.
- [3] HIRSCHFELD, H. "Engenharia Econômica e Análise de Custos", Editora Atlas, 6ª Edição, São Paulo, 1998.
- [4] BAZARAA, J. J., JARVIS, J.J., SHERALI, H.D., "Linear Programming and Network Flows", 2ª ed., Wiley, New York, 1990.
- [5] CARLSON, C. M. F. "Sistemas de Telecomunicações: Planejamento da Rede Externa em Situações de Incerteza", Tese de Doutorado FEEC-UNICAMP, novembro 1998.
- [6] DeSousa, M. A. , CARLSON, C. M. F. FORMIGONI, J. R. F. , RIBEIRO, R. V., "Planejamento da Rede de Acesso Orientado à Maximização de Receitas", Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações - SBT99, p. 389-394, Vila Velha, ES - Brasil, Setembro.