

INFRA-ESTRUTURA DE REDES MÓVEIS: LOCALIZAÇÃO ÓTIMA DE EQUIPAMENTOS PARA O SMP

Ítalo Paiva¹ (*) J.R.F. Formigoni (**) Maria Silvina Medrano (**)
Carlos M.F. Carlson (***) Raul V. Ribeiro (*)

(*) Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP

(**) CPqD Telecom & IT Solutions

(***) UNIRP – Centro Universitário de Rio Preto (em visita ao LAAS/CNRS – France)

¹ Departamento de Engenharia de Sistemas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP
e-mail : italo@densis.fee.unicamp.br

Resumo

Até o final de 2001, as empresas operadoras que venceram os leilões nas bandas D e E no Brasil implantarão redes que utilizam a tecnologia GSM/GPRS e que suportarão o Serviço Móvel Pessoal (SMP). Por sua vez, redes que utilizarão a banda C serão implantadas no primeiro semestre de 2002. Tais implantações ocorrerão no curto prazo e demandarão investimentos significativos em infra-estrutura de redes. Metodologias de planejamento e ferramentas de apoio à decisão poderão auxiliar as empresas operadoras e os fornecedores de equipamentos nas etapas de implantação e de expansão das redes. O presente trabalho apresenta um modelo matemático que realiza a localização otimizada dos principais nós da rede que suporta o SMP. Adicionalmente, é apresentada uma aplicação do modelo visando a implantação de uma rede para atendimento uma cidade de médio a grande porte no Brasil.

1. Introdução

O número de assinantes para serviços sem fio, tanto no Brasil como no exterior, tem crescido de forma exponencial. Até o final de 2000, a maior parte das empresas operadoras ofereciam basicamente três tipos de serviços: voz, dados em baixas taxas (até 14,4 Kbps) e mensagens curtas (até 200 bytes). A partir de meados de 2000, observou-se um esforço dos fornecedores e das empresas operadoras para a instalação e colocação em operação comercial dos sistemas 2,5G, os quais suportam taxas mais altas (144 kbps) para transmissão de dados por pacotes, possibilitando portanto acesso mais rápido à Internet. Dentre estes sistemas podem ser citados o GPRS (*General Packet Radio System*) [1], considerado uma evolução do GSM (*Global System for Mobile Communication*) e o cdma2000 1X [2], considerado uma evolução do sistema CDMA (*Code Division Multiple Access*) americano.

A médio prazo, ou seja, de 12 a 24 meses, entrará em operação a terceira geração de sistemas móveis (3G), a qual viabilizará a transmissão de dados em taxas mais elevadas (móvel a 144 kbps, baixa mobilidade a 384 kbps e 2 Mbps em ambiente “indoor”). Para um sistema ser considerado de terceira geração, ele deve atender aos requisitos de capacitação do IMT-2000 (*International Mobile Telecommunication - 2000*), os quais são descritos na

recomendação Q.1701 do ITU-T [3]. Atualmente existem duas propostas de sistemas para suportar os serviços de terceira geração: o UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) [4,5] e o cdma2000 [2,6]. No Brasil, espera-se que os sistemas 2,5G sejam instalados a partir de meados deste ano. Não existe data definida para a instalação das redes de 3G no país.

A partir do segundo semestre de 2001 as empresas operadoras vencedoras dos leilões para as bandas D e E no Brasil estarão implantando as redes para suporte ao Serviço Móvel Pessoal (SMP) [7]. Em função da faixa de frequência alocada para oferecimento do serviço (1,8 GHz), a tecnologia candidata a suportá-lo é o GSM. Objetivando o oferecimento de serviços por pacotes, espera-se que essas empresas implantem o sistema GPRS juntamente com o GSM.

A implantação das redes ocorrerá no curto prazo e demandará elevados investimentos em infra-estrutura de redes. Consequentemente, faz-se necessária a utilização de metodologias de planejamento para suportar as empresas operadoras e fornecedores de equipamentos na localização e dimensionamento dos equipamentos a um custo mínimo, atendendo a demanda estimada com níveis aceitáveis de qualidade de serviço.

O presente trabalho apresenta um modelo matemático de programação inteira mista para a localização e dimensionamento dos principais elementos da rede suporte ao SMP. Juntamente com um modelo de interconexão dos nós [8,9], ele compõe uma metodologia para o planejamento da infra-estrutura de redes móveis.

Na próxima seção descrevem-se os elementos básicos dos sistemas GSM e GPRS. Na seção 3 fazem-se algumas considerações sobre o planejamento de redes móveis celulares. Na seção 4 é apresentado o modelo matemático desenvolvido, enquanto na seção 5 são listados e analisados os resultados do estudo de caso. Finalmente, na seção 6 são apresentadas as conclusões do trabalho, assim como propostas de futuros trabalhos.

2. Elementos Básicos da Rede GSM/GPRS

O sistema GSM é composto pelas estações móveis (MS – *Mobile Station*) e componentes fixos (BTS, BSC e MSC, dentre outros). A Figura 1 ilustra os principais elementos da parte fixa da rede.

A parte móvel é composta basicamente pelos terminais móveis (o terminal celular), os quais originam e terminam as chamadas e pelo SIM (*Subscriber Identity Module*), que determina o número de diretório e as chamadas bilhetadas para o usuário. O SIM consiste de um circuito impresso que é inserido pelo usuário no terminal.

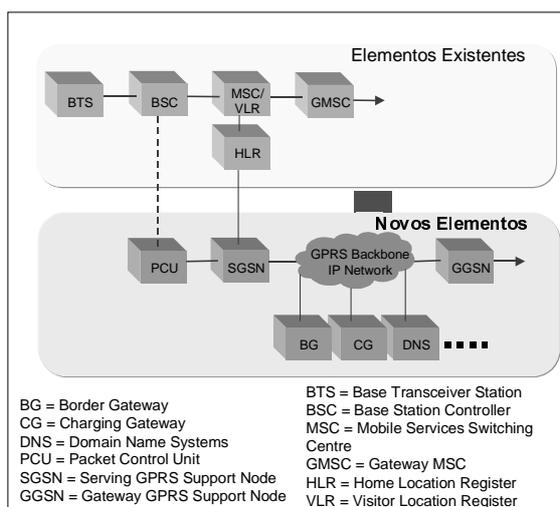


Figura 1: Sistema GSM/GPRS.

A BTS (*Base Transceiver Station*) provê conectividade entre a rede fixa e a estação móvel através da interface aérea. A BSC (*Base Station Controller*) faz o controle das BTS. A MSC (*Mobile Service Switching Centre*)/GMSC (*Gateway MSC*) é responsável pelas funcionalidades relacionadas com a comutação de circuitos e interconexão com a rede fixa. O HLR (*Home Location Register*) é uma base de dados que armazena os dados de assinantes relacionados a procedimentos como registro na rede, serviços, tarifação, etc. O VLR (*Visitor Location Register*), geralmente localizado na MSC, armazena os dados oriundos do HLR dos assinantes visitantes.

No GSM existe uma funcionalidade denominada TRAU (*Transcoding Rate and Adaptation Unit*), responsável pela compressão (64 para 16 kbps) e descompressão dos sinais de voz, cuja localização afeta diretamente a modelagem da rede. Quanto mais perto da MSC a TRAU estiver instalada, menor será o gasto com a rede de transmissão. No modelo proposto considera-se que a TRAU está localizada na MSC.

Como ilustra a Figura 1, a rede GPRS atua como um sistema sobreposto à rede GSM, demandando a instalação de um novo “core network” destinado a suportar os serviços comutados por pacotes. Os principais elementos desse sistema são os nós SGSN e GGSN [1]. O SGSN (*Serving GPRS Support Node*) é um nó de serviço que realiza as seguintes funções: autenticação e autorização, controle de admissão, transferência e roteamento de pacotes, gerenciamento de mobilidade e dos enlaces e tarifação.

O GGSN é uma interface com as redes de pacotes e com outras redes móveis. Ele contém informações de roteamento para os usuários GPRS conectados à rede.

3. Planejamento de Redes Móveis Celulares

O planejamento otimizado de redes móveis celulares é uma atividade complexa, necessitando portanto de metodologias e ferramentas de apoio, tanto para fornecedores como para as empresas operadoras [10]. Em função desta complexidade, o planejamento pode ser decomposto em várias etapas, tais como: definição dos serviços a serem fornecidos, definição do sistema que suportará tais serviços, caracterização do tráfego por serviço, predição de cobertura e cálculo da infra-estrutura da rede. A cada uma destas etapas podem estar associadas uma ou mais ferramentas de apoio.

Tanto para a parcela da rede que suporta a comutação de circuitos, quanto para a parcela que suporta a comutação de pacotes, a etapa de determinação da infra-estrutura de rede pode ser dividida nas seguintes atividades:

- *Simulação do tráfego*: utilizando ferramentas de simulação de rede, como por exemplo o OPNET [11], realiza-se a simulação do tráfego com o objetivo de determinar a demanda entre os nós da rede.
- *Localização dos nós*: uma vez determinada a demanda entre os nós, utiliza-se um modelo matemático de otimização para localizar e dimensionar os nós, tais como as MSCs e BSCs.
- *Interconexão dos nós*: com os resultados obtidos nas atividades anteriores, um outro modelo matemático de otimização realiza a interconexão entre os nós, considerando as tecnologias disponíveis.

O item a seguir descreve o modelo de localização dos nós. A referência [8] apresenta um modelo matemático para a interconexão ótima BTS-BSC-MSC. A referência [9] trata do mesmo problema, assumindo porém que os valores de demanda não são precisamente conhecidos, o que é tratado através do conceito de conjuntos nebulosos.

4. Descrição do Modelo

4.1 O Problema

O problema consiste em determinar a localização dos nós da infra-estrutura da rede celular, mais especificamente da BSC e da MSC, de forma a minimizar o custo da implantação dessa infra-estrutura.

Como descrito na seção 2, a infra-estrutura da rede celular é composta de diversos elementos. Entretanto, os elementos mais relevantes dos pontos de vista funcional e de custo são as BTSs, BSCs, MSCs e os equipamentos de transmissão. Tais elementos serão considerados na modelagem do problema.

Numa rede celular, todo o tráfego gerado nas BTSs é direcionado para uma BSC e, em seguida, para uma MSC. Em alguns casos, o tráfego gerado em uma BTS é encaminhado para outra BTS e a partir daí para uma BSC e, em seguida, para uma

MSC. De qualquer forma, todo o tráfego é encaminhado para as MSCs. Essa particularidade permite que um grafo orientado seja usado para representar a infra-estrutura da rede celular.

4.2 Modelo de Grafos

O grafo representativo da infra-estrutura da rede celular é composto por:

- *Nós de demanda:* são nós onde as demandas são geradas. Neste modelo esses nós representam as BTSs;
- *Nós sumidouros:* são nós para os quais é direcionado todo o tráfego gerado nas BTSs. Representam as MSCs;
- *Nós de transbordo:* são nós que recebem o tráfego dos nós de demanda (BTSs) e o encaminham para os nós sumidouros (MSCs). Representam as BSCs.
- *Arcos de interconexão BTSs - BSCs e BSCs - MSCs:* são as opções de conexão entre os elementos da rede.

A estrutura do grafo utilizado é apresentada na Figura 2.

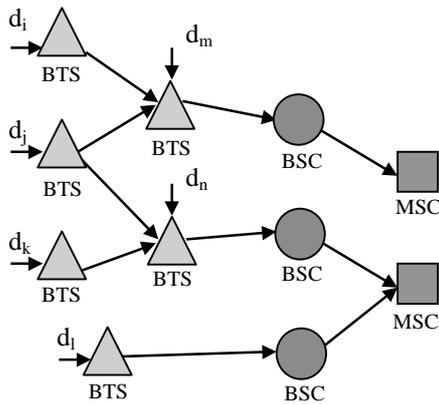


Figura 2: Representação da rede em grafos.

Devido à estrutura do grafo, no qual o tráfego gerado nos nós de demanda é encaminhado para outros nós, deve-se adotar uma unidade de demanda e fluxo para todo o grafo. Neste trabalho, optou-se por adotar canais E1 (2048 kbps) como unidade de demanda.

4.3 Formulação Matemática

A partir do grafo acima, pode-se formular um modelo matemático de *Programação Linear Mista com Variáveis 0-1*, que utiliza a abordagem nó-arco [12]. O objetivo principal é encontrar a localização das BSCs e MSCs, de modo a minimizar o custo da implantação da infra-estrutura da rede.

As principais componentes do modelo são:

- *Função objetivo* (1): é o custo total da infra-estrutura celular, que será minimizado;

- *Restrições de satisfação de demanda nas BTSs* (2): garantem o balanço de fluxo em todos os nós que representam as BTSs;
- *Restrições de satisfação de demanda nas BSCs* (3): garantem que todo o fluxo que chega a cada BSC é direcionado para uma MSC.
- *Restrições de capacidade das BSCs* (4): são restrições que limitam o fluxo que chega a cada BSC de acordo com sua capacidade.
- *Restrições de capacidade das MSCs* (5): são restrições que limitam o fluxo que chega a cada MSC de acordo com sua capacidade.
- *Restrições Adicionais:* são restrições (não apresentadas neste trabalho) relacionadas por exemplo a características da topologia, unicidade de comunicação e permissão de fluxo.

Matematicamente o problema pode ser escrito como:

Minimizar

$$\begin{aligned} & \sum_{m \in M, tm \in Tm} L_MSC(m, tm) * \alpha(m, tm) + \\ & \sum_{bc \in B, tb \in Tb} L_BSC(bc, tb) * \beta(bc, tb) + \\ & \sum_{(bs, baux) \in \theta} Fl_BTS(bs, baux) * \mu * dist_BTS(bs, baux) + \\ & \sum_{(bs, bc) \in \gamma} Fl_BSC(bs, bc) * \mu * dist_BSC(bs, bc) + \\ & \sum_{(bc, m) \in \kappa} Fl_MSC(bc, m) * \mu * dist_MSC(bc, m) \end{aligned} \quad (1)$$

Sujeito a

$$Dem(bs) + \sum_{(bsaux, bs) \in \Gamma} Fl_BTS(baux, bs) = \sum_{(bs, baux) \in \Gamma} Fl_BTS(bs, baux) + \sum_{(bs, bc) \in \gamma} Fl_BSC(bs, bc), \forall bs \in C, \quad (2)$$

$$\sum_{bs \in C} Fl_BSC(bs, bc) = \sum_{m \in M} Fl_MSC(bc, m), \forall bc \in B, \quad (3)$$

$$\sum_{(bs, bc) \in \gamma} Fl_BSC(bs, bc) \leq \sum_{bc \in Q, tb} L_BSC(bc, tb) * cap_BSC(bc, tb), \forall bc \in B, \quad (4)$$

$$\sum_{bc \in Q} Fl_MSC(bc, m) \leq \sum_{tm} L_MSC(m, tm) * cap_MSC(m, tm), \forall m \in M, \quad (5)$$

onde:

M: conjunto dos nós candidatos à instalação de MSCs;

T_M: conjunto dos tipos (padrões) de MSC disponíveis;

L_{MSC}(m, tm): variável binária de decisão associada à instalação em m da MSC cuja modularidade é tm;

α(m, tm): custo fixo associado à instalação em m da MSC cuja modularidade é tm;

B: conjunto dos nós candidatos à instalação de BSCs;

T_B : conjunto dos tipos (padrões) de BSC disponíveis;

$L_BSC(bc, tb)$: variável binária de decisão associada à instalação em bc da BSC cuja modularidade é tb ;

$\beta(bc, tb)$: custo fixo associado à instalação em bc da BSC cuja modularidade é tb ;

θ : conjunto dos arcos que ligam duas BTSs;

$Fl_BTS(bs, bsaux)$: variável real associada ao fluxo da BTS bs para a BTS $bsaux$ (em canais E1);

μ : custo, por unidade de comprimento de arco, do sistema de transmissão (para cada canal E1);

$dist_BTS(bs, bsaux)$: comprimento do arco $(bs, bsaux) \in \theta$;

χ : conjunto dos arcos que ligam uma BTS a uma BSC;

$Fl_BSC(bs, bc)$: variável real associada ao fluxo da BTS bs para a BSC bc (em canais E1);

$dist_BSC(bs, bc)$: comprimento do arco $(bs, bc) \in \chi$;

κ : conjunto dos arcos que ligam uma BSC a uma MSC;

$Fl_MSC(bc, m)$: variável real associada ao fluxo da BSC bc para a MSC m (em canais E1);

$dist_MSC(bc, m)$: comprimento do arco $(bc, m) \in \kappa$;

C: conjunto dos nós que abrigam BTSs;

$Dem(bs)$: demanda (em canais E1) na BTS bs ;

$cap_BSC(bc, tb)$: capacidade da BSC cuja modularidade é tb , quando instalada em bc ;

$cap_MSC(m, tm)$: capacidade da MSC cuja modularidade é tm , quando instalada em m ;

4.4 Utilização do Modelo

O planejamento da infra-estrutura de rede móvel deve ser posterior à etapa de predição de cobertura, na qual são localizadas as BTSs que atenderão a demanda da área planejada. A quantidade de BTSs e sua localização constituem dados de entrada para o planejamento da infra-estrutura. Além destes, o planejador deve fornecer os custos dos equipamentos (BSCs e MSCs), de transmissão (aluguel de canais E1, por exemplo) e de infra-estrutura de instalação.

De acordo com as características da área em estudo, o planejador deverá escolher alguns pontos candidatos à instalação de BSCs e de MSCs. Em seguida, ele deverá propor alternativas de interconexão das BTSs às BSCs e das BSCs às MSCs, constituindo várias topologias de atendimento à demanda. Esses procedimentos podem ser feitos de forma manual ou, em certa medida, incorporados a um gerador automático de propostas baseado em métodos heurísticos. É preciso lembrar que se trata de um problema combinatório e um número de candidatos (nós e arcos) maior corresponderá a uma grande quantidade de expressões e de variáveis de decisão no problema matemático.

Uma vez resolvido o problema, o planejador tem uma definição da quantidade e da localização das MSCs e BSCs. A próxima etapa do trabalho é realizar a interconexão dos nós de forma mais detalhada, considerando, se possível, as diferentes tecnologias de transmissão. Para isso, podem ser utilizados os modelos propostos por DeSousa et al. em [8,9].

5. Estudo de Caso

5.1 Descrição da Rede

Afim de exemplificar a aplicação do modelo, utilizou-se uma rede correspondente à de uma cidade de porte médio para grande para os padrões brasileiros. Essa rede é composta por 43 BTSs com demandas variando de 1 a 4 canais E1.

Tanto para as BSCs como para as MSCs, consideraram-se três modularidades de equipamentos. Os custos e as capacidades desses elementos são apresentados nas Tabelas 1 (BSCs) e 2 (MSCs).

Modularidade	Capacidade (em canais E1)	Custo de instalação da BSC - $\beta(bc, tb)$
TB1	32	15
TB2	16	10
TB3	8	7,5

Tabela 1: Custo e capacidade das BSCs.

Modularidade	Capacidade (em canais E1)	Custo de instalação da MSC - $\alpha(m, tm)$
TM1	120	250
TM2	80	200
TM3	40	150

Tabela 2: Custo e capacidade das MSCs.

Em relação aos custos dos sistemas de transmissão, considerou-se que esses elementos são alugados pela empresa operadora e que o custo varia em função da distância como apresentado na Figura 3. O custo do aluguel de um canal E1 é adotado como custo de referência.

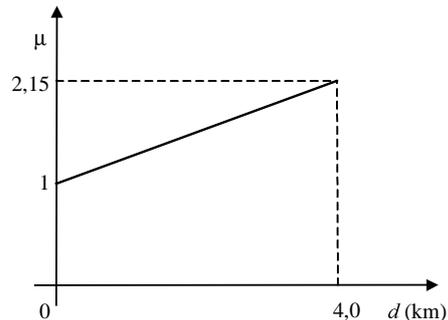


Figura 3: Custos dos sistemas de transmissão por canal E1.

A Figura 4 ilustra a rede usada como exemplo. Foram considerados 5 locais candidatos a BSCs e outros 5 candidatos a MSC. Para as BTSs localizadas na parte central, foram adotadas

demandas que variam de 2 a 4 canais E1 e, nas demais, apenas 1 canal E1.

Utilizou-se a linguagem de programação matemática AMPL e o pacote de otimização CPLEX® para, respectivamente, construir o modelo e resolver o problema matemático associado.

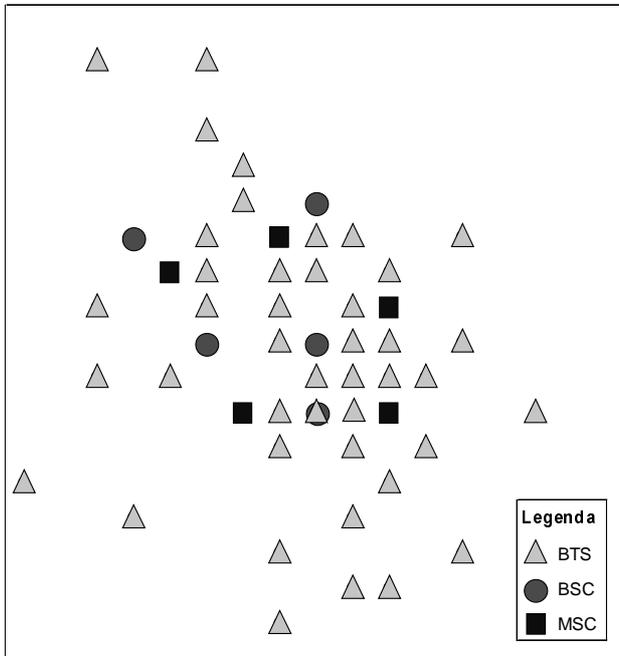


Figura 4: Localização das BSCs e MSCs candidatas e BTSs consideradas.

5.2 Cenários Estudados

Diversos estudos podem ser realizados a partir do modelo proposto. Utilizando os dados de rede e das tecnologias descritas acima, apresenta-se aqui o resultado de um estudo composto por 2 cenários:

- *Cenário 1:* considera-se que as BTSs já estão instaladas mas as MSCs, as BSCs e as conexões não estão. As demandas apresentadas às BTSs correspondem ao tráfego gerado numa cidade de porte médio para grande no presente momento. O total das demandas nas BTSs é de 54 canais E1.
- *Cenário 2:* considera-se que a demanda gerada nas BTSs aumentará em média 50% em relação ao cenário 1 no período de 3 anos. Esse valor representa a projeção de demanda para esse período [13]. Admite-se também que as BSCs e MSCs da solução do cenário 1 já estão instaladas. O total das demandas nas BTSs é de 82 canais E1.

5.3 Análise das Soluções

As Figuras 5 e 6 ilustram as soluções obtidas para os cenários 1 e 2, respectivamente.

Pode-se observar, na Figura 5, que na solução obtida para o cenário 1 há uma concentração do tráfego em duas MSCs

passando por duas BSCs. Verifica-se que cada BSC conecta-se à MSC mais próxima e que os elementos BSC e MSC escolhidos são de modularidade 1, ou seja, de maior capacidade. Esta escolha pode ser explicada pelo fato de que o custo, em relação aos canais E1 que a MSC e a BSC suportam, diminui à medida que aumenta a capacidade total.

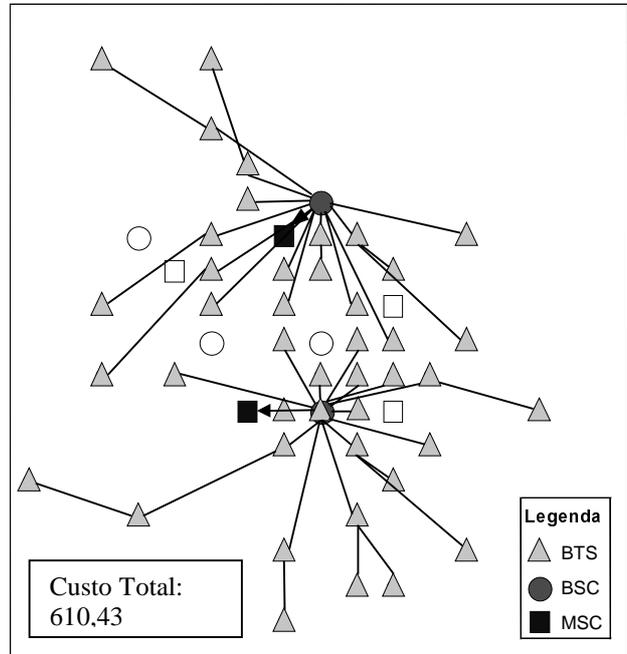


Figura 5: Solução obtida para o Cenário 1.

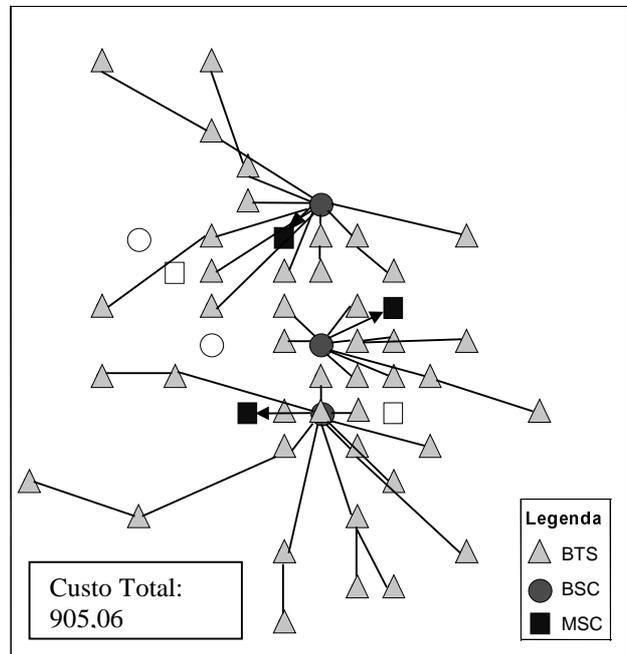


Figura 6: Solução obtida para o Cenário 2.

No cenário 2, ao aumento da demanda corresponde um aumento no número de BSCs e MSCs, sempre seguindo o comportamento

de se conectar aos elementos mais próximos, como no cenário 1. A capacidade dos elementos desta nova rede é de três BSCs e três MSCs, todas de modularidade 1.

6. Conclusões e Futuros Trabalhos

Neste artigo foi apresentado um modelo de programação linear inteira mista para a alocação e dimensionamento de redes que suportam o SMP, as quais estão sendo implantadas no Brasil. Em particular, procura-se localizar os nós da infra-estrutura da rede celular (BSCs e MSCs) sob o critério de custo mínimo. O modelo é parte de uma metodologia de planejamento de redes de 2,5G e 3G que está em desenvolvimento na Fundação CPqD.

Um estudo de caso sobre uma rede de grande porte foi relatado. Dois cenários, considerando a demanda verificada atualmente e a previsão de crescimento da demanda a médio prazo, foram discutidos.

Do ponto de vista computacional, o desempenho do modelo em resolvidores comerciais é bastante condicionado pela quantidade de variáveis de decisão e pelas topologias consideradas. Nos casos extremos, as respostas podem ficar lentas e deve-se discutir a pertinência de se utilizar alguma técnica heurística para se alcançar uma solução satisfatória demandando um tempo também satisfatório. Neste sentido, novas técnicas podem aplicadas a este tipo de problema, que se enquadra em uma classe de problemas chamados NP-difícil [14], onde a convergência para a solução ótima não pode ser estimada. Com a finalidade de se obter boas soluções em um espaço de tempo aceitável, a utilização de meta-heurísticas poderia ser uma técnica capaz de atingir este objetivo. Estas técnicas mostraram bons resultados em vários tipos de problemas NP-difícil e como o problema abordado neste trabalho é considerado um problema de localização, que já foi estudado em diversas abordagens, uma adaptação para este problema em telecomunicações poderia gerar bons resultados.

O modelo apresentado contempla a rede de circuitos, ou seja, a rede GSM. Uma evolução deste trabalho será a adaptação do mesmo para a localização dos nós da rede de pacotes GPRS. Foram duas as razões de se implementar primeiramente o modelo para a rede de circuitos. A primeira é baseada nas implantações dos sistemas GPRS que estão sendo feitas em países da Europa, como por exemplo, Portugal e Áustria, onde a expectativa de tráfego na rede de pacotes é muito baixa para o curto prazo e, conseqüentemente, essas empresas estão colocando somente um nó SGSN e um nó GGSN. Isso significa que a quantidade de investimento na rede de circuitos, no curto prazo, será muito maior. A segunda razão está na dificuldade de caracterizar os equipamentos SGSN e GGSN em termos de custo e modularidade. Por serem equipamentos associados a tecnologias novas, tem-se dificuldade de se obter essas informações, uma vez que elas são consideradas, neste primeiro momento, estratégicas.

As arquiteturas de referência dos sistemas 3G, assim como os serviços a serem suportados, apresentam uma complexidade muito maior quando comparadas com os sistemas 2G. Considerando essa complexidade e o fato das empresas operadoras não estarem familiarizadas com a tecnologia de

comutação de pacotes, a qual é fortemente utilizada nos sistemas UMTS e cdma2000, pode-se concluir que o planejamento para implantação e evolução das redes móveis 3G será um grande desafio. Conseqüentemente, as empresas operadoras, e também os fornecedores de equipamento, necessitarão de metodologias de apoio ao planejamento, as quais serão fortemente baseadas em modelos de simulação e de otimização, assim como em modelos de análise econômica.

Referências

- [1] 3GPP TS 22.060 – 10/1999: “General Packet Radio Service (GPRS) stage 1”, 1999.
- [2] Garg, V. K., “IS-95 CDMA and cdma2000 – Cellular System Implementation”, Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, 1999.
- [3] ITU-T Recommendations Q.1701 – 03/99 – “Framework for IMT-2000 networks”.
- [4] Holma, H. e Toskala, A. “WCDMA for UMTS – Radio Access for Third Generation Mobile Communications”, John Wiley & Sons, West Sussex, England, 2000.
- [5] 3GPP TS 23.002 – 04/2001: “Network Architecture” (Release 4), 2001.
- [6] 3GPP2 P.R0001 – 07/2000: “Wireless IP: Architecture Based on IETF Protocols”, 2000.
- [7] ANATEL – Anexo à Resolução 245 – “Regulamento do Serviço Móvel Pessoal - SMP”, Dezembro de 2000.
- [8] DeSousa, M. A. et al. “Planejamento Otimizado da Infra-estrutura da Rede Celular”, XVIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, Gramado, RS, Setembro de 2000.
- [9] DeSousa, M. A. et al. “Cellular Networks Infrastructure – an Optimized Planning”, 9th International Conference on Telecommunication System – Modeling and Analysis, Dallas, pp. 331-340, Março 2001.
- [10] Dravida et al., “Narrowband and Broadband Infrastructure Design for Wireless Networks”, IEEE Communication Magazine, pp. 72-78, Maio 1998.
- [11] Chang, X., “Network Simulations with OPNET”, Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference, pp. 307-314, 1999.
- [12] Bazaraa, J. et al., “Linear Programming and Network Flows”, 2^a ed., Wiley, New York, 1990.
- [13] <http://cf.bol.com.br/ofmdi.htm?url=http://www.mc.gov.br/>
- [14] Glover, F. et al., “New Advances Wedding Optimization and Simulation”, Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference, pp. 255-260, 1999.