ALOCAÇÃO OTIMIZADA DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO PARA O PROBLEMA DE INTERCONEXÃO DE ERBS EM UM SMC - UM ESTUDO DE CASO

Marcos Antônio DeSousa
Escola de Engenharia Elétrica e de Computação – EEEC, Universidade Federal de Goiás – UFG
Av. Universitária, n. 1488, Qd. 86, Bl. A, 3º Piso, Sala 08, CEP 74605-010, Goiânia-GO, Brasil
marcos@eeec.ufg.br

Carlos M. F. Carlson
Faculdade de Tecnologia de São José de Rio Preto (FATEC Rio Preto)
prof.carlos@fatecriopreto.edu.br

RESUMO

A oferta de tecnologias inovadoras e o crescimento da demanda por novos serviços, especialmente aqueles com taxas de acesso mais elevadas, fazem do planejamento da rede de acesso um estágio importante na evolução dos sistemas celulares. Diversas opções tecnológicas de sistemas de transmissão já estão disponíveis e escolher a melhor entre elas é um grande desafio para os planejadores da rede. Este trabalho apresenta um estudo de caso para o planejamento estratégico da interconexão de estações rádio base em uma rede móvel celular. A alocação e o dimensionamento dos equipamentos de transmissão são feitos admitindo-se previsões de demanda imprecisa para os serviços. A avaliação tecnologia-econômica é orientada à maximização de receita e está baseada no conceito de número *fuzzy* triangular. Uma aplicação do método é mostrada e suas implicações são discutidas.

PALAVRAS CHAVE. Rede móvel celular, planejamento estratégico, número *fuzzy*.

ABSTRACT

The offer of innovative technologies and the growth of demands to new services, especially the higher access rates ones, do the access network planning an important stage in the cellular systems evolution. Several technological options of transmission systems are already available and to choose the best among them is a big challenge for network planners. This paper presents a case study for strategic planning of the interconnection of base stations in a cellular mobile network. The allocation and sizing of transmission equipments are made admitting inexact forecast on service's demand values. The tech-economical evaluation is driven by max-revenue criterion and is based on the concept of triangular fuzzy number. An application of the method is showed and their implications are discussed.

KEYWORDS. Cellular mobile network, strategic planning, fuzzy number.

1. Introdução

O setor de telecomunicações móveis celulares está em constante desenvolvimento, permitindo que novas tecnologias possam surgir no mercado, proporcionando assim, uma melhoria nos serviços oferecidos ao cliente. Adotar um plano de evolução do sistema sempre significa investir grandes volumes de recursos financeiros e, naturalmente, correr riscos. O intervalo decorrido entre o instante do planejamento e a realização do plano põe à prova o comportamento da demanda esperada, as previsões de receita e as estimativas de custo. Os avanços tecnológicos, por sua vez, podem ensejar ou exigir alterações no que foi originalmente planejado.

À medida que aumenta a variedade de serviços, aumenta também a indefinição sobre a quantidade de usuários que os serviços podem atingir. Como esta indefinição atinge principalmente a configuração de atendimento, dimensionar os equipamentos destes sistemas é uma tarefa relevante. Estimar a demanda é uma tarefa complexa e de resultados nem sempre satisfatórios.

Os modelos matemáticos que podem ser desenvolvidos para o planejamento de sistemas de telecomunicações são fortemente dependentes de dados de demanda (Rouskas et al., 2008; Casap et al., 2007; Bienstok et al., 2006). Entretanto, muitos destes dados não são precisamente conhecidos no momento da confecção do plano. Isto acontece não somente com a demanda, mas também com outros dados necessários aos modelos. Naturalmente, esta incerteza pode influenciar a maneira pela qual o plano é obtido. Desta forma, espera-se do plano que ele seja robusto (isto é, o plano deve continuar rentável, mesmo que as previsões de demanda sejam imprecisas). Portanto, o planejador precisa de sistemas de apoio à decisão que sejam capazes de lidar com imprecisão.

Como primeira conseqüência dos dados imprecisos de demanda, os termos independentes (das restrições) dos modelos baseados nesses dados não são mais fixos. A maneira de resolver o problema matemático, agora não mais "exato", pode mudar consideravelmente. A idéia natural é tentar manter o problema passível de solução incorporando ao mesmo tempo aspectos da imprecisão no sentido de flexibilizar o modelo e torná-lo mais fiel ao ambiente que pretende retratar. As técnicas mais usadas são a programação estocástica (Albuquerque, 2008) e a aplicação de conceitos de conjuntos nebulosos (Pedrycz e Gomide, 1998).

Uma abordagem por programação estocástica pressupõe aleatoriedade com respeito aos valores dos dados de demanda que se pretende usar. Claramente este não é o caso dos problemas de planejamento aqui tratados. A evolução tecnológica é previsível no horizonte de tempo compreendido pelo planejamento. O efeito sobre a demanda também é previsível: em geral, os serviços faixa-estreita tendem à estabilidade (como, por exemplo, o serviço de telefonia), enquanto os serviços faixa-larga, com tarifas elevadas inicialmente, experimentam redução de custo ao mesmo tempo em que procuram "conquistar" usuários dos serviços faixa-estreita.

Outro aspecto importante para o planejamento é a interdependência entre os serviços, cuja representação por conceitos estocásticos pode não ser simples. Além disso, obter funções de distribuição de probabilidade geralmente é um processo caro do ponto de vista computacional. Abordagens construídas em bases estocásticas e diretamente relacionadas ao planejamento de sistemas de telecomunicações podem ser vistas em Bolia e Kulkarni (2008) e Gaivoronski e Zoric (2008).

Já conceitos de conjuntos nebulosos (conjuntos *fuzzy*) e números nebulosos (números *fuzzy*) têm sido bastante utilizados em situações de incerteza. Sahinidis (2004) organizou um *survey* com vários trabalhos sobre este assunto. Cantão (2003) também é uma boa referência para problemas não-lineares com parâmetros *fuzzy*. De fato, os conjuntos nebulosos parecem oferecer a simplicidade dos intervalos e, ao mesmo tempo, incorporar aspectos possibilísticos. Em outras palavras, permitem expressar preferências (maior expectativa de efetivação) sobre alguns dos valores em relação a outros.

Neste artigo é realizado um estudo de caso com um modelo de Programação Linear Inteira Mista *(Mixed Integer Linear Problem* – MILP) (Bazaraa, 1990), implementado para auxiliar no planejamento de sistemas de acesso móvel celular (SMC). Em particular, são avaliados a alocação e o dimensionamento de sistemas de transmissão para o problema de interconexão de Estações Rádio Base – ERB (*Base Transceiver Station – BTS*) com a Central de Controle e Comutação – CCC (*Mobile Switching Center - MSC*), quando existe imprecisão a respeito dos dados de demanda dos serviços. É adotado para o desenvolvimento deste estudo o modelo matemático proposto em DeSousa et al (2006).

Na seção 2, o modelo é referido de maneira a evidenciar os dados imprecisos. A proposta de resolução para o modelo com números *fuzzy* triangulares é discutida na seção 3. A seção 4 apresenta o estudo de caso realizado. E, por fim, a seção 5 é dedicada aos comentários finais.

2. O Modelo Matemático com Demanda Imprecisa

O modelo matemático é desenvolvido para obter uma solução de rede mais adequada em termos de tecnologia, condições orçamentárias e capacidade de atendimento para diversos perfis de clientes, em termos de demanda e qualidade dos serviços previstos.

O objetivo é escolher a melhor alocação de equipamentos de transmissão para a interconexão de ERBs com a CCC. A otimização é efetuada de forma a se obter a máxima receita dos serviços oferecidos. As demandas imprecisas são representadas pelos termos independentes de algumas restrições de serviço, sem influência na modelagem específica das soluções tecnológicas candidatas. Supõe-se que os custos e a modularidade dos equipamentos são precisamente conhecidos. Para maior facilidade de acompanhamento, o modelo é reescrito a seguir, com o cuidado de indicar a existência de imprecisão quanto aos valores de demanda:

$$\text{Maximizar} \quad \mathrm{R}(y) = \sum_{(s,i)\in A_E} r_{si} Y_{si} \tag{1}$$

Sujeito a:

$$\sum_{(i,j)\in A}\sum_{n\in H_{ij}}\left[(\varphi_{ij}^{H_{eq},n}+\varphi_{ij}^{H_r,n}.l_{ij}).\sum_{k\in\psi}2^k.X_{ijnk}\right]+\sum_{(i,j)\in A}\sum_{n\in O_{ij}}(\varphi_{ij}^{O_{eq},n}+\varphi_{ij}^{O_r,n}.l_{ij}).Z_{ijn}+$$
$$\sum_{(s,i)\in A}\sum_{n\in R_{ij}}(\varphi_{ij}^{R_{eq},n}+\varphi_{ij}^{R_r,n}.l_{ij}).W_{ijn}\le L \tag{2}$$

$$\sum_{i\in I\text{-}I_S} Y_{si} + Yesc_s = \tilde{d}_s \ , \ \forall\, s\in I_S \tag{3}$$

$$\sum_{j\in J_1} Y_{ij} - \sum_{j\in J_2\text{-}I_S} Y_{ji} - \sum_{s\in I_s} fc_s.Y_{si} = 0\,,\ \forall\, i\in I\text{-}I_S \tag{4}$$

$$\sum_{n\in H_{ij}}\left[cap_{ij}^{X,n}.\sum_{k\in\psi}2^k.X_{ijnk}\right]+\sum_{n\in M_{ij}}cap_{ij}^{Z,n}.Z_{ijn}+\sum_{n\in R_{ij}}cap_{ij}^{W,n}.W_{ijn}\ \ge Y_{ij}\ge 0\,,\forall(i,j)\in A \tag{5}$$

$$X_{ijnk}=0,\forall\ l_{ij}>l_{max} \tag{6}$$

$$\sum_{j\in J_1}\sum_{n\in H_{ij}}\left[cap_{ij}^{X,n}.\sum_{k\in\psi}2^k.X_{ijnk}\right]-\sum_{s\in I_s}fc_s.Y_{si}\le 0\,,\forall i\in I-I_s \tag{7}$$

<u>Controle de atendimento de demanda por ERB</u>

$$Y_{si}\ge \tilde{d}min_{si}\,,\ \forall\, s\in I_S\,,\forall\, i\in I\text{-}I_S \tag{8}$$

$$Y_{si}\le \tilde{d}max_{si}\,,\forall\, s\in I_S\,,\forall\, i\in I\text{-}I_S \tag{9}$$

<u>Controle de atendimento de demanda por SERVIÇO</u>

$$Y_{si} \leq \widetilde{d}max_{si}\ , \forall s \in I_S\ , \forall i \in I - I_S \quad (10)$$

$$Yesc_s \leq (\widetilde{d}_s - \widetilde{d}min_s)\ , \quad \forall s \in I_S \quad (11)$$

Onde:

$R(y)$: receita total dos serviços oferecidos;

A_E : conjunto de arcos de escoamento de demanda, que conectam os nós de serviço aos nós de ERB;

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

r_{si} : receita unitária do serviço *s* oferecido ao nó de ERB *i*;

A : conjunto de arcos conectanto nós ERB-ERB ou nós ERB-CCC;

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

ψ : conjunto dos números naturais não-negativos {0,1,2,3 …};

X_{ijnk}: variável binária, de ordem *k*, associada à escolha do sistema de *modem* HDSL, tipo *n*, candidato no arco $(i, j) \in A$;

$\varphi_{ij}^{Heq,n}$: custo do sistema de *modems* HDSL (equipamentos), tipo *n*, candidato no arco $(i, j) \in A$;

$\varphi_{ij}^{Hr,n}$: custo do sistema de *modems* HDSL (cabos e dutos), tipo *n*, candidato no arco $(i, j) \in A$;

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

Z_{ijn} : variável binária associada à escolha do sistema de *modems* ópticos, tipo *n*, candidato no arco $(i, j) \in A$;

$\varphi_{ij}^{Oeq,n}$: custo do sistema de *modems* ópticos (equipamentos), tipo *n*, candidato no arco $(i, j) \in A$;

$\varphi_{ij}^{Or,n}$: custo do sistema de *modems* ópticos (cabos e dutos), tipo *n*, candidato no arco $(i, j) \in A$;

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

W_{ijn} : variável binária associada à escolha do sistema rádio microondas, tipo *n*, candidato no arco $(i, j) \in A$;

$\varphi_{ij}^{Req,n}$: custo do sistema rádio microondas (equipamentos), tipo *n*, candidato no arco $(i, j) \in A$;

$\varphi_{ij}^{Rr,n}$: custo do sistema rádio microondas (repetidores e amplificadores), tipo *n*, candidato no arco $(i, j) \in A$;

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

L : orçamento previsto;

I : conjunto de todos os nós da rede, exceto o nó da CCC;

I_S : conjunto dos nós de serviço (um para cada serviço previsto pelo planejador);

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

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

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

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

fc_s : fator de conversão de taxa de transmissão do serviço;

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

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

$cap_{ij}^{W,n}$: capacidade do sistema de rádio microondas, tipo *n*, candidato no arco $(i, j) \in A$;

l_{max} : comprimento máximo permitido para um enlace utilizando *modem* HDSL;

$\tilde{d}_s$: demanda total prevista (imprecisa) do serviço *s*, entrando na rede pelo nó de serviço $s \in I_S$;

$\tilde{d}min_{si}$: demanda mínima prevista (imprecisa) para o serviço *s*, no nó de ERB $i \in I\text{-}I_S$;

$\tilde{d}max_{si}$: demanda máxima prevista (imprecisa) para o serviço *s*, no nó de ERB $i \in I\text{-}I_S$;

$\tilde{d}min_s$: demanda mínima prevista (imprecisa) do serviço *s*, a ser atendida pela rede, entrando pelo nó de serviço $s \in I_S$.

Os principais componentes deste modelo matemático são:

– ***Função Objetivo*** (1): é a receita total dos serviços oferecidos pela rede, a ser maximizada.

– ***Restrição de Limite de Orçamento*** (2): assegura que o custo total de alocação e dimensionamento dos equipamentos de transmissão não ultrapasse o orçamento previsto. A primeira parcela refere-se ao custo da solução HDSL (*High-data-rate Digital Subscriber Line)*. A segunda parcela contabiliza o custo com sistemas de *modems* ópticos. A terceira parcela refere-se ao custo dos rádios microondas.

– ***Restrições de Satisfação de Demanda*** (3) e (4): garantem o balanço de fluxo em todos os nós do grafo (ERBs), exceto para o nó da CCC, por ser uma equação redundante. A restrição sobre o orçamento significa que parte da demanda pode não ser atendida. *Arcos de Escape* são utilizados para contabilizar a demanda reprimida. Devido à diversidade encontrada nas taxas de transmissão dos serviços, pode ser necessário utilizar alguns coeficientes de conversão (fc_s) na matriz de incidência.

– ***Restrições Técnicas de Capacidade*** (5): ocorrem em cada arco previsto pelo planejador. É a garantia de que a capacidade total dos sistemas de *modems* HDSL + *modems* ópticos + rádio microondas alocados seja superior ao fluxo de demanda escoado pelo arco.

– ***Restrições de Alcance para o Sistema HDSL*** (6): obriga a escolha de *modems* HDSL apenas para aqueles arcos com comprimento no máximo igual ao suportado pela tecnologia.

– ***Restrições de Topologia para o Sistema HDSL*** (7): proíbe a formação de rotas alternativas onde se tenha o compartilhamento de demandas, oriundas de ERBs distintas, em um arco utilizando apenas *modems* HDSL.

– ***Restrições de Atendimento***: a fim de assegurar preferências de atendimento, bem como conseguir um melhor controle da demanda a ser atendida, há a necessidade de colocar limites para os fluxos a serem escoados pelos arcos da rede. Este controle pode ser feito de duas maneiras (deve ser observado que o controle de atendimento da demanda máxima é feito de forma idêntica nos dois casos: as inequações (9) são iguais as inequações (10); a diferença encontra-se no perfil de atendimento mínimo: inequações (8) e (11)):

i) *Controle de Atendimento de Demanda por ERB* (8) e (9): controla a demanda a ser atendida em cada ERB, individualmente. Este controle torna-se interessante diante de contratos administrativos que exigem garantias de atendimento mínimo para uma determinada área ou um cliente em especial; ou

ii) *Controle de Atendimento de Demanda por SERVIÇO* (10) e (11): este procedimento é utilizado quando se deseja garantir o atendimento mínimo do serviço, independente do nó de ERB. Neste contexto, como o objetivo do modelo é maximizar a receita gerada pelos serviços oferecidos continua havendo a possibilidade de se escolher os nós de ERB mais "rentáveis", porém com a liberdade de, inclusive, excluir (deixar de atender totalmente) os nós de ERB menos "rentáveis", o que não se consegue no *Controle de Atendimento de Demanda por ERB*.

Os dados imprecisos, portanto, aparecem nas equações (3), que fornecem o balanço de fluxo de demanda em cada nó de serviço; nas inequações (8) e (9), que gerenciam o controle de atendimento de demanda por nó de ERB; e nas inequações (10) e (11), que auxiliam no gerenciamento do controle de atendimento de demanda por serviço. Números *fuzzy* triangulares são utilizados para representar estes dados incertos (Pedrycz e Gomide, 1998).

3. Resolução do Modelo com Demanda *Fuzzy*

A presença de números *fuzzy* nas restrições do modelo MILP pode alterar substancialmente o procedimento de resolução. Há a necessidade de se transformar os números *fuzzy* de maneira a permitir o seu tratamento. Este processo é denominado "*defuzzyficação*", e consiste em encontrar um "valor de trabalho" para o número *fuzzy* tratado. São adotadas aqui as chamadas "funções de classificação", que transformam números *fuzzy* em números reais (os quais são passíveis de ordenação).

Sob esta idéia, resolver o problema "*Fuzzy*-MILP", com variáveis 0-1, em relação aos termos independentes:

$$\begin{aligned} &\text{Max } \mathbf{c}x \\ &\text{s.a. } \mathbf{A}x \le \tilde{\mathbf{b}},\ x \ge 0,\ \underline{x} \in \{0,1\}^k \end{aligned} \tag{12}$$

Onde:

$\mathbf{c} \in \mathbf{R}^{1 \times n}$;

$\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{m \times n}$;

$\tilde{b} \in \tilde{\mathbf{Z}}$, sendo $\tilde{b}$ um vetor com parâmetros (coeficientes) *fuzzy* e $\tilde{\mathbf{Z}}$ um conjunto *fuzzy* sobre $\mathbf{R}$;

$\underline{x} \in \{0,1\}^k$ (para algum *k*, tal que $1 \le k \le n-1$), sendo $\underline{x}$ um sub-vetor de x contendo aqueles elementos que precisam ser binários.

É o mesmo que resolver o problema não-*fuzzy:*

$$\begin{aligned} &\text{Max } \mathbf{c}x \\ &\text{s.a. } \mathbf{A}x \le f(\tilde{\mathbf{b}}),\ x \ge 0,\ \underline{x} \in \{0,1\}^k \end{aligned} \tag{13}$$

Onde:

$f : \tilde{\mathbf{Z}} \to \mathbf{R}$.

Nos casos tratados aqui, x representa todas as variáveis de fluxo de demanda (*Y* e *Yesc*) e $\underline{x}$ todas as variáveis responsáveis pela alocação e dimensionamento dos equipamentos de transmissão e infra-estrutura. As restrições com demanda imprecisa (3), (8) e (9) ou (10) e (11) formam um subconjunto de restrições do modelo (17) indicado acima.

O problema de "classificação" de números *fuzzy* foi extremamente estudado na literatura e uma grande coleção de métodos foi desenvolvida para resolvê-los (Campos e Verdegay, 1989; Bortolan e Degani, 1985). A seguir são listadas duas "funções de classificação" para o caso particular dos números *fuzzy* triangulares:

a) Equivalente de Yager:

$$f_Y(\tilde{d}_{si}) = D_{si(eq)} = D_{si} + \frac{1}{4}\left(\bar{d}_{si} + \underline{d}_{si} - 2D_{si}\right) \tag{14}$$

Onde: $\underline{d}_{si}$ = demanda mínima prevista; D_{si} = demanda média prevista (com maior possibilidade de ocorrência) e $\bar{d}_{si}$ =demanda máxima prevista.

Este equivalente consiste na definição de uma "função de classificação" que mapeia cada número *fuzzy* triangular em um número real ($f : \tilde{\mathbf{Z}} \to \mathbf{R}$). A linearidade do MILP é mantida, pois os números *fuzzy* são substituídos por valores reais (não-*fuzzy*) que lhes são equivalentes.

b) Equivalente de Adamo:

$$f_\alpha(\tilde{d}_{si}) = D_{si} + \left(\bar{d}_{si} - D_{si}\right)\cdot(1-\alpha) \tag{15}$$

Onde: $\alpha \in [0, 1]$; D_{si} = demanda média prevista (com maior possibilidade de ocorrência) e

$\bar{d}_{si}$ = demanda máxima prevista (com menor possibilidade de ocorrência.

Neste equivalente o número *fuzzy* triangular é reduzido a um intervalo do qual se toma o limitante superior como valor de trabalho. Este tipo de abordagem requer solução paramétrica para o problema MILP. A solução passa a ser α-dependente.

Pode-se observar que diferentes "funções de classificação" têm efeitos distintos sobre os problemas MILP. No caso (a) os valores obtidos para as demandas são exatos. O Modelo (12), após a aplicação da Equação (14) nas Restrições (3), (8) e (9) ou (10) e (11), é uma saída simplificadora para a questão, mas tem o inconveniente de apresentar uma solução exata (*crisp*) para um problema com dados *fuzzy*. Já o caso (b) torna o problema tratável sem prescindir da imprecisão sobre os dados usados. A parametrização traz o problema para um domínio de resolução mais simples sem perder todas as características de imprecisão originais. Uma outra vantagem evidente desta abordagem reside no fato da solução do problema também depender do parâmetro α. A solução pode ser interpretada, em cada caso, a partir do significado desse parâmetro.

Neste trabalho, a solução paramétrica de Adamo é a considerada. O parâmetro α indica o grau de confiança do planejador nos valores dos dados utilizados. Nos problemas aqui tratados, a variação do parâmetro permite analisar diferentes possibilidades para o valor considerado como demanda dos serviços previstos.

Obedecida a linearidade da função de Adamo para números *fuzzy* triangulares, as restrições (3), (8), (9), que é idêntica à (10), e (11), que modelam a demanda imprecisa, tornam-se, respectivamente:

$$\sum_{i \in I-I_S} Y_{si} + Yesc_s = D_s + (\bar{d}_s - D_s).(1-\alpha)\,,\ \forall\, s \in I_S \tag{16}$$

$$Y_{si} \geq Dmin_{si} + (\bar{d}min_{si} - Dmin_{si}).(1-\alpha)\,, \forall s \in I_S, \forall i \in I - I_S \tag{17}$$

$$Y_{si} \leq Dmax_{si} + (\bar{d}max_{si} - Dmax_{si}).(1-\alpha)\,, \forall s \in I_S, \forall i \in I - I_S \tag{18}$$

$$Yesc_s \leq \{[D_s + (\bar{d}_s - D_s).(1-\alpha)] - [Dmin_s + (\bar{d}min_s - Dmin_s).(1-\alpha)]\},\ \ \forall s \in I_S \tag{19}$$

O MILP original com as restrições de serviço (3), (8) e (9) ou (10) e (11) substituídas pelas restrições de (16) a (19) é paramétrico. Agora, é possível fazer uma análise técnico-econômica (configuração de atendimento dos serviços, alocação e dimensionamento de equipamentos de transmissão, custo, receita, etc.) para diferentes possibilidades de valor de demanda prevista para cada serviço (ou, diferentes graus de confiança nesse valor), em cada nó de ERB e/ou de nó de serviço.

4. Estudo de Caso

4.1. Dados

Os parâmetros do modelo foram escolhidos de forma a refletir dados reais, tanto quanto possível. Para verificar a aplicação do modelo é utilizado o *Controle de Atendimento de Demanda por ERB* - equações (16) e inequações (17) e (18). As instâncias foram geradas em linguagem C e resolvidas com o solver CPLEX (CPLEX, 1999). A Figura 1 apresenta a rede candidata, que contém 1 CCC e 15 ERBs. Estão indicados também o comprimento dos 15 arcos ERB-CCC (diretos, do arco 1 ao 15) e dos 13 arcos ERB-ERB (indiretos, do arco 16 ao 28) possíveis de serem instalados.

Três tecnologias de transmissão são consideradas: *modem* HDSL (*High-data-rate Digital Subscriber Line*), *modem* óptico e rádio microondas. O custo (em valor relativo ao do *modem* HDSL) e a capacidade dos equipamentos candidatos são admitidos como sendo perfeitamente conhecidos e estão indicados na Tabela 1. A capacidade de atendimento de cada tecnologia é dada em canais E1, onde 2xE1 representa dois canais de transmissão de 2,048 Mbps. Apenas os dutos dos sistemas HDSL e dos *modems* ópticos já se encontram instalados (custo=0).

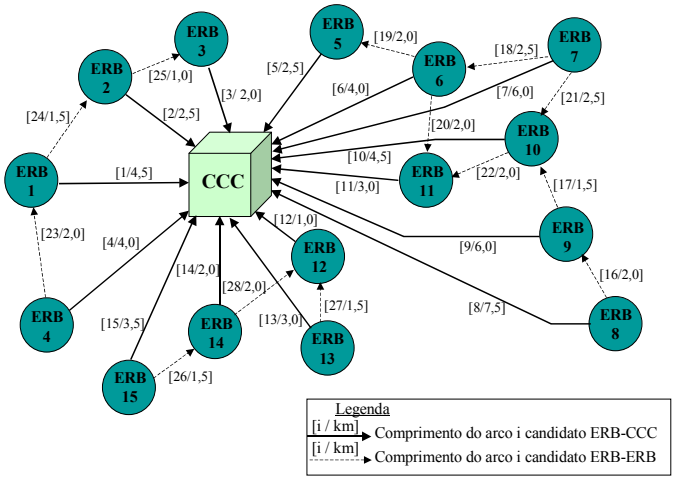

Figura 1 - Rede candidata.

Tabela 1 - Informações sobre as tecnologias de transmissão candidatas.

Sistema candidato	**Custos**					
	Equipamentos				**Infra-estrutura** (/km)	
	1xE1	2xE1	4xE1	8xE1	Dutos	Cabos
HDSL	1,00	-	-	-	4,17	4,30
Óptico	1,00	1,50	1,75	2,00	5,00	3,80
Rádio	-	8,50	13,50	20,00	0	0

O planejamento do sistema é feito com o objetivo de oferecer dois tipos de serviço (hipotéticos), um que exige canais de transmissão a 64 Kbps (Serviço 1) e outro a 144 Kbps (Serviço 2). A análise técnico-econômica é subordinada à imprecisão dos dados de demanda prevista em cada ERB (Tabela 2). Os números *fuzzy* triangulares utilizados para representar estas demandas são todos simétricos. Admite-se que o parâmetro de confiabilidade α, de cada serviço, é o mesmo para todas as ERBs. Neste estudo de caso, o fator de atendimento mínimo, de cada serviço em cada ERB, e a receita unitária (valor relativo) são considerados como conhecidos e "precisos", e estão indicados no final da Tabela 2.

4.2. Análise dos Resultados

O procedimento de resolução obedeceu a seguinte ordem de execução:

1 – Para se ter uma estimativa de orçamento, encontrou-se primeiramente a configuração de rede, pelo critério de minimização de custo, capaz de atender todas as demandas previstas, resultantes de cada grau de confiança considerado;

2 – Para cada uma das soluções obtidas anteriormente foi imposta uma queda de 15% no orçamento. A rede foi novamente dimensionada, objetivando a receita máxima.

Para a condição de demanda mínima, um corte de 15% no orçamento não permite obter uma solução de rede factível pelo critério de maximização de receitas. Isto ocorre porque no controle de demanda por nó de ERB, mesmo que a previsão de demanda seja baixa, exige-se que seja alocado pelo menos um *link* em cada ERB, nem que seja para atender a sua demanda mínima obrigatória. Como a demanda a ser atendida é baixa, até mesmo a solução de custo mínimo (que atende toda a demanda prevista) exige equipamentos de baixa hierarquia (Figura 2). Nestas condições, o orçamento fica bastante restritivo, fazendo com que o corte de 15% inviabilize uma configuração de rede que atenda todas as ERBs.

Tabela 2 - Informações sobre os serviços previstos.

ERB	**Demanda** (em número de canais - usuários)					
	Serviço 1			Serviço 2		
	$\underline{d}_{si}$	D_{si}	$\overline{d}_{si}$	$\underline{d}_{si}$	D_{si}	$\overline{d}_{si}$
1	11	18	25	7	13	19
2	10	21	32	6	11	16
3	10	15	20	5	9	13
4	8	16	24	7	12	17
5	12	18	24	10	15	20
6	16	23	30	4	12	20
7	18	26	34	6	10	14
8	9	14	19	5	9	13
9	13	20	27	7	11	15
10	18	24	30	9	12	15
11	11	20	29	6	10	14
12	13	18	23	7	12	17
13	13	19	25	5	10	15
14	7	16	25	4	8	12
15	8	14	20	11	14	17
Total	177	282	387	99	168	237
Atendimento mínimo (%)		50			50	
Receita unitária		0.1			0.2	

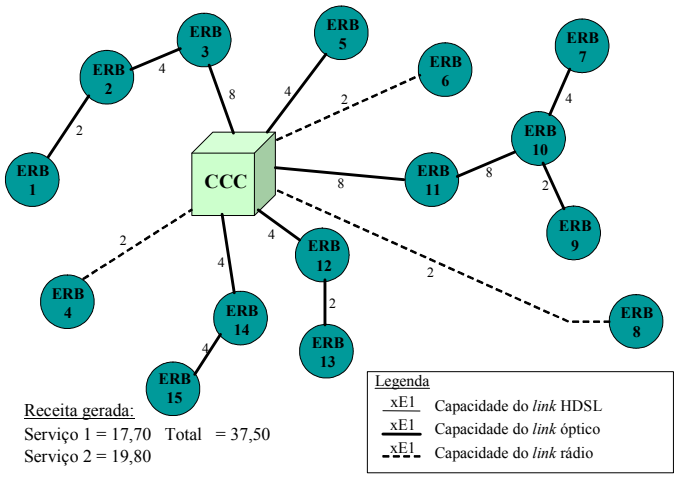

Figura 2 – Configuração da rede para $\underline{d}_{si}$ (solução de custo mínimo).

As configurações de atendimento obtidas da aplicação do critério de maximização de receita podem ser averiguadas a partir das Figuras 3 e 4. Elas também indicam a contribuição de cada serviço na receita gerada, bem como a perda de receita em relação ao cenário de custo mínimo correspondente (aquele com atendimento pleno da demanda). Em ambas as redes o serviço 2 foi o mais penalizado.

A tecnologia utilizando *modems* ópticos mantém-se predominante. Mas deve-se ressaltar que a estrutura de custos adotada, a qual reflete a configuração da rede existente, é uma componente importante na escolha das tecnologias.

É interessante notar que a abordagem de maximização de receita torna-se mais eficiente (veja a relação receita/custo) para as situações com previsão de demanda mais otimista ($\overline{d}_{si}$). Nestas condições, a hierarquia dos equipamentos alocados tende a ser maior, o que permite um melhor compartilhamento baseado no ganho de escala.

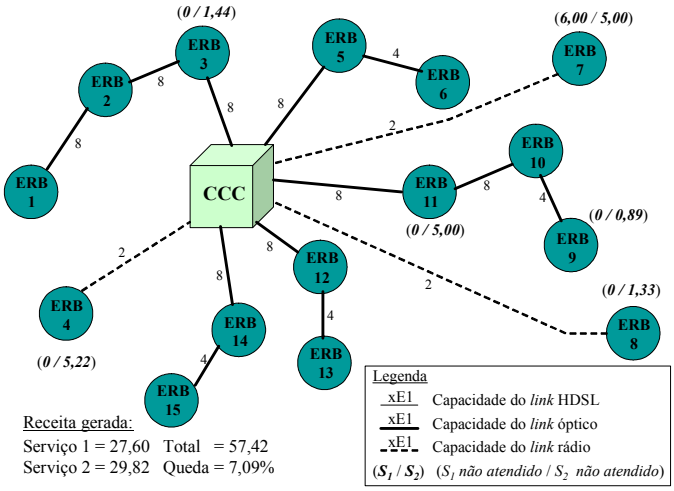

Figura 3 - Configuração da rede para D_{si} (com uma queda de 15% no orçamento).

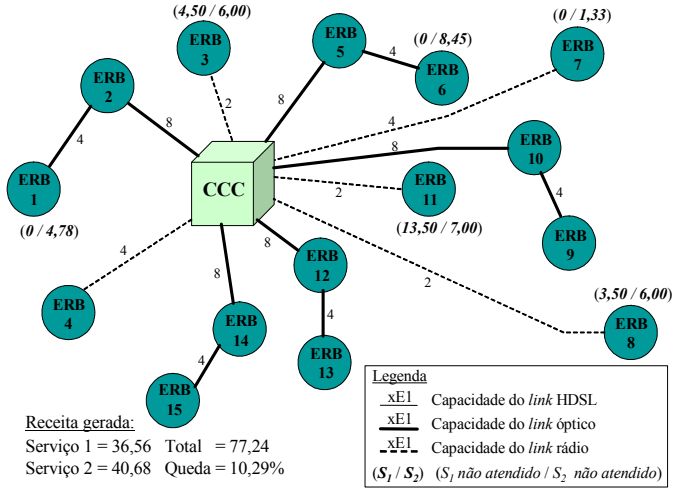

Figura 4 - Configuração da rede para $\bar{d}_{si}$ (com uma queda de 15% no orçamento).

Deve ser observado também que as mudanças de topologia são evidentes. Na condição de demanda esperada (Figura 3) as ERBs 3 e 11 possuem alta importância estratégica, apesar de terem perda de demanda. Os *links* destas ERBs com a CCC funcionam também como rota de passagem para a demanda de outras quatro ERBs (1, 2, 9 e 10). Já na previsão de demanda máxima, a configuração de atendimento escolhida opta por não escolher estas duas ERBs como rota alternativa para escoar a demanda das outras ERBs. Se o planejador optar por candidatar equipamentos com hierarquias acima de 8xE1, talvez esta mudança de topologia não seja tão radical. Esta estratégia parece ser bastante conveniente para situações com alta demanda por serviços banda-larga, que são os cenários esperados para os sistemas de comunicação móvel celular de Terceira Geração (3G).

As receitas obtidas para alguns valores intermediários de demanda (em função dos níveis de confiança) são apresentadas na Figura 5. Para facilitar a análise são indicados também os valores de receita para a condição de atendimento total. Em geral, quando a confiança sobre os valores de demanda diminui ($\alpha \rightarrow 0$), a receita aumenta, indicando o atendimento de um número maior de usuários.

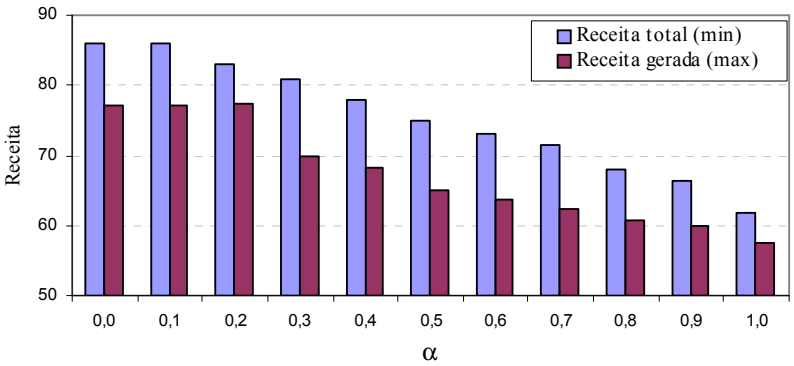

Figura 5 - Receitas geradas.

A distribuição da receita entre os serviços e a sua porcentagem de perda em relação ao total são indicadas na Figura 6. O atendimento dos serviços é, obviamente, penalizado quando o orçamento é reduzido. O corte de 15% no orçamento gera, em média, uma receita reprimida em torno de 11% do total previsto. Para a maior parte do intervalo de α, o serviço 2 teve (em valores absolutos) maiores perdas de receita que o serviço 1.

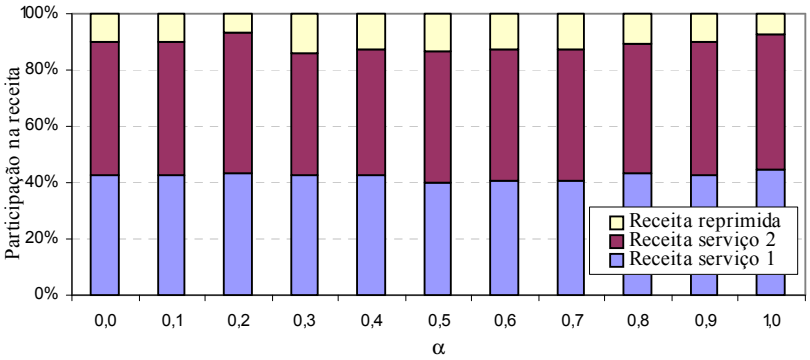

Figura 6 - Distribuição da receita.

5. Conclusão

Neste trabalho foram discutidas maneiras de incorporar imprecisão a respeito dos dados de demanda dos serviços em um modelo de planejamento para a interconexão de ERBS em um sistema móvel celular. A competição entre sistemas HDSL, *modems* ópticos e rádio microondas foi avaliada.

Foram apresentados dois métodos para o tratamento da imprecisão, baseados na modelagem *fuzzy*. A diferença entre eles é a maneira pela qual o problema é efetivamente resolvido quando apresenta números *fuzzy* nos termos independentes das restrições. Em uma abordagem, as demandas *fuzzy* são substituídas por valores não-*fuzzy*. Na outra, o substituto do número *fuzzy* é parametrizado. Foi dada maior atenção a esta segunda abordagem.

O modelo utilizado no estudo de caso permite analisar o planejamento da rede de forma bastante flexível e realista. O ambiente multi-serviço, com a abordagem de maximização de receitas, acrescido do tratamento de imprecisão de dados quanto ao cenário mercadológico para os serviços, permite acompanhar a evolução do sistema em situações mais adequadas à competitividade existente no setor.

Uma ferramenta de planejamento desenvolvida de acordo com a modelagem discutida aqui pode ser útil sob duas perspectivas. Primeiro, ajudar fabricantes de equipamentos a prever o impacto geral de adicionar novos serviços e funções em seus produtos. Segundo, auxiliar empresas provedoras de serviço na busca de plantas de rede mais lucrativas. A ferramenta

possibilitaria a seleção dos serviços mais rentáveis ao mesmo tempo em que respeitaria as condições financeiras de investimento da empresa.

A aplicação do modelo *Fuzzy*-MILP permitiu associar diferentes soluções a distintos níveis de certeza sobre os dados. Dessa forma, foi possível entender o impacto causado pela variação de demanda sobre a rede planejada, e determinar os valores de receita em função dessas mudanças. Como resultados de planejamento podem ser destacadas as seguintes observações, para a maioria dos cenários avaliados: a tecnologia utilizando *modems* ópticos foi a mais atrativa; a estrutura de custos adotada impossibilitou a escolha da tecnologia HDSL em todas as previsões de demanda avaliadas; e o oferecimento do serviço 2 foi o mais penalizado com a restrição orçamentária.

Como extensões deste trabalho podem-se destacar:

- Melhorias na modelagem: considerar os efeitos de uma receita unitária variável na função objetivo; desenvolver um algoritmo para uma escolha mais criteriosa dos valores pontuais dos níveis de confiança nos dados de demanda; implementar uma solução multi-paramétrica para permitir uma avaliação com níveis de confiança diferenciados para cada região da rede estudada;
- Estudos de Caso: simular o modelo através do *Controle de Atendimento de Demanda por Serviço*; adicionar novos serviços banda-larga e sistemas de transmissão com maior capacidade; definir critérios de penalização para aquelas demandas reprimidas escoadas pelos arcos de escape; verificar o desempenho computacional do modelo para diferentes instâncias.

Referências Bibliográficas

Albuquerque, J. P. A. (2008). *Probabilidade, Variáveis Aleatórias e Processos Estocásticos*. Ed. Interciencia.

Bazaraa, M.S., Jarvis, J.J. e Sherali, H.D. (1990). *Linear Programming and Network Flows*. 2a ed., Willey, New York.

Bienstock, D., Raskina, O., Saniee, I. e Wang, Q. (2006). Combined network design and multiperiod pricing: modeling, solution techniques, and computation. *Operations Research*, vol. 24, n. 2, pp. 261-276.

Bolia, N. e Kulkarni, V. (2008). Index policies for resource allocation in wireless networks. *Procs. of the 9th INFORMS Telecommunications Conference*. College Park, Marylang, USA.

Bortolan, G. e Degani, R. (1985). A review of some methods for ranking fuzzy subsets. *Fuzzy Sets and Systems*, n. 15, pp. 1-19.

Campos, L. e Verdegay, J.L. (1989). Linear programming problems and ranking of fuzzy numbers. *Fuzzy Sets and Systems*, n. 32, pp. 1-11.

Cantão, L.A.P. (2003). *Programação Não-Linear com Parâmetros Fuzzy: Teoria e Algoritmos*. Tese de Doutorado, FEEC-UNICAMP, Campinas-SP.

CPLEX (1999). *ILOG CPLEX - Manual do Usuário*, Versão 6.5.

DeSousa, M.A., Carlson, C.M.F., Machado, J.T. e R.V. Ribeiro (2006). Uma abordagem *fuzzy* para a avaliação técnico-econômica de redes de acesso. *Revista Controle e Automação*, Vol. 17, No 2, 226-244.

Gaivoronski, A.A. e Zoric, J. (2008). Evaluation and design of business models for collaborative provision of advanced mobile data services: a portfolio theory approach. *Procs. of the 9th INFORMS Telecommunications Conference*. College Park, Marylang, USA.

Kasap, N., Aytug, H. e Erenguc, S.S. (2007). Provider selection and task allocation issues in networks with different QoS levels and all you can send pricing. *Decision Support Systems*. Volume 43, Issue 2, pp. 375-389.

Pedrycz, W. e Gomide, F. (1998). *An Introduction to Fuzzy Sets: Analysis and Design*. MIT Press, Cambridge, MA.

Rouskas, A. N. Kikilis, A.A. e Ratsiatos, S.S. (2008). A game theoretical formulation of integrated admission control and pricing in wireless networks. *European Journal of Operational Research*. vol. 191, n. 3, pp.1175-1188.

Sahinidis, N.V. (2004). Optimization under uncertainty: state-of-the-art and opportunities. *Computer &* Chemical *Engineering* 28 (6-7), pp. 971-983.