

MODELAGEM MILP-FUZZY 0-1 PARA A AVALIAÇÃO DE RISCO NO DIMENSIONAMENTO DE ENLACES SDH - CENÁRIOS COM PREVISÃO IMPRECISA DE DEMANDA E CUSTO

MARCOS A. DESOUSA^{1,2}, FÁBIO J. C. SOUZA¹, FERNANDO F. MELO¹, FLÁVIO. H. T. VIEIRA¹, ÁLISSON A. CARDOSO¹

¹*Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação – Universidade Federal de Goiás
Av. Universitária, n. 1488, Qd. 86, Bloco A, 3º Piso, St. Leste Universitário, Goiânia-GO, Brasil.*

²*Departamento de Engenharia - ENG, Pontifícia Universidade Católica de Goiás - PUC-Goiás
Av. Universitária, nº 1440, Área III, Bloco G, Sala 100, Goiânia-GO, Brasil.*

*E-mails: marcos@emc.ufg.br, fabio_jr91@hotmail.com,
fernando.melo@emc.ufg.br, flavio@emc.ufg.br, alsnac@gmail.com*

Abstract — One of the main marketing strategies adopted by SMC operators, to upgrade the capacity of its BTS interconnection network has been renting the transmission links from other carriers. This technological support can be provided using the SDH technologies and optical fiber. This paper presents a case study for the design of SDH network in the BTS-MSD interconnection network in a SMC. The study uses as support in decision-making a Mixed Integer Linear Programming Model (MILP). The methodology allows a high degree of interactivity with the planner, which allows flexibility to analyze various aspects of the compromise between service and technology, demand and cost. The design of the network is done assuming imprecise forecasts demand and cost. The technical-economic evaluation is oriented to minimize cost and is based on the concept of fuzzy numbers. Results of computational experiments for scenarios rental network are presented and their implications are discussed.

Keywords — Cellular system, SDH system, optimization, fuzzy modelling.

Resumo — Uma das principais estratégias de mercado adotadas pelas operadoras de sistemas de telecomunicações móveis celular, para atualizar a capacidade da sua rede de interconexão de ERBs, tem sido alugar seus enlaces de transmissão de outras operadoras de rede. Este aporte tecnológico pode ser garantido através das tecnologias SDH e fibra ótica. Este artigo apresenta um estudo de caso para o dimensionamento da rede SDH de interconexão ERBs-CCC em um sistema móvel celular. O estudo utiliza como suporte no processo decisório um modelo de Programação Linear Inteira Mista (MILP). A metodologia permite um alto grau de interatividade com o planejador, flexibilidade que possibilita analisar variados aspectos do compromisso entre serviço e tecnologia, demanda e custo. O dimensionamento da rede é feito admitindo-se previsões imprecisas de demanda e custo. A avaliação técnico-econômica é orientada à minimização de custo e está baseada no conceito de números *fuzzy*. Resultados de experimentos computacionais para cenários de aluguel de rede são apresentados e suas implicações são discutidas.

Palavras-chave — Sistema móvel celular, sistemas SDH, Otimização, Modelagem *Fuzzy*.

1 Introdução

A área de tecnologia voltada para o setor de telecomunicações móveis vem sofrendo um crescente desenvolvimento desde a realização da primeira chamada a partir de um aparelho portátil em 1973. A unidade móvel evolui para plataformas multimídia com capacidade de acesso a múltiplos serviços de dados (Alencar, 2004). O cenário atual são os sistemas de quarta geração (4G) que prometem transmissões de dados a altíssimas velocidades. Contudo, a tecnologia 4G, no Brasil, ainda é novidade. Com isso, os sistemas de terceira geração (3G) dominam o mercado das comunicações móvel celular no país. Estes tipos de sistemas estão sendo implantados progressivamente pelas operadoras de acordo com a demanda de usuários.

Essas tecnologias são ofertadas através das operadoras de telefonia por meio de contratos de prestação de serviços, que podem contemplar o fornecimento de tecnologia para a viabilização do produto final e/ou a comercialização de equipamentos. Por outro lado, o cliente pode fazer a escolha de acordo com as suas necessidades. Menor preço, melhor qualidade e maior velocidade de transmissão são algumas condições a serem avaliadas.

Dimensionar os equipamentos destes sistemas de forma a atender uma demanda variável de usuários

torna-se uma tarefa complexa. À medida que se aumenta a diversidade de serviços, aumenta também a indefinição sobre a quantidade de usuários que os serviços podem atingir. Isto torna a demanda um dado impreciso e difícil de ser estimado.

Nos sistemas de comunicação móvel celular, as Estações Radio-Base (ERBs) devem estar conectadas com a Central de Comutação e Controle (CCC), seja para trafegar dados de gerência ou dados de usuários. Assim, o crescimento de demanda obriga a rede de interconexão ERBs-CCC a estar em constante atualização na sua capacidade de transmissão.

Para tentar acompanhar as mudanças tecnológicas algumas empresas operadoras de comunicação móvel optam por alugar os enlaces de empresas operadoras de telefonia fixa que, por outro lado, enxergam esta necessidade como uma nova oportunidade de mercado. A implantação de uma rede cabeada costuma ser bastante onerosa e demorada. Consequentemente, o dimensionamento destas redes acaba sendo feito de forma a permitir atualizações tecnológicas preferencialmente nas extremidades (nós de acesso e/ou de comutação), evitando modificações no cabeamento. Este plano de negócios é amparado pela tecnologia de transmissão SDH (Hierarquia Digital Síncrona) e pelo cabeamento ótico (Jeszensky, 2004).

A comercialização dos serviços pelas operadoras de comunicação móvel precisa levar em consideração estes aspectos mercadológicos. O porte dos problemas, a velocidade das transformações e as inúmeras possibilidades a analisar exigem metodologias de planejamento consistentes, flexíveis e apoiadas em ferramentas computacionais. Os valores significativos geralmente envolvidos neste tipo de situação tornam desejável o uso de modelos matemáticos de otimização. Bolia e Kulkarni (2008), Kasap et al. (2007) e, Niyato e Hossain (2006) são exemplos de trabalhos que utilizam modelos de otimização para avaliar o problema de alocação de recursos em redes sem fio. Os modelos matemáticos desenvolvidos são fortemente dependentes de dados de demanda e custo. Entretanto, muitos destes dados não são precisamente conhecidos no momento da elaboração do plano.

Neste artigo é realizado um estudo de caso com um modelo de Programação Linear Inteira Mista (*Mixed Integer Linear Problem – MILP*), implementado para auxiliar no planejamento de redes de comunicação móvel. Em suma, são avaliados a alocação e o dimensionamento de enlaces de transmissão para o problema de interconexão de Estações Rádio Base (ERB) com a Central de Comutação e Controle (CCC), levando em consideração a imprecisão nos dados de custo e demanda.

É adotado para o desenvolvimento deste estudo o modelo matemático proposto em DeSousa et al. (2013), com algumas adaptações. A avaliação é feita a partir do ponto de vista da operadora de comunicação móvel celular que deseja alugar os enlaces de transmissão SDH. A imprecisão é incorporada através do uso de números *fuzzy* trapezoidais (Pedrycz e Gomide, 1998).

2 O Sistema de Acesso Móvel Celular

A finalidade de um sistema de comunicação móvel celular é permitir a comunicação entre duas Estações Móveis (EM) ou entre uma EM e as redes fixas de telefonia e internet.

2.1 Elementos do Sistema de Comunicação Móvel Celular

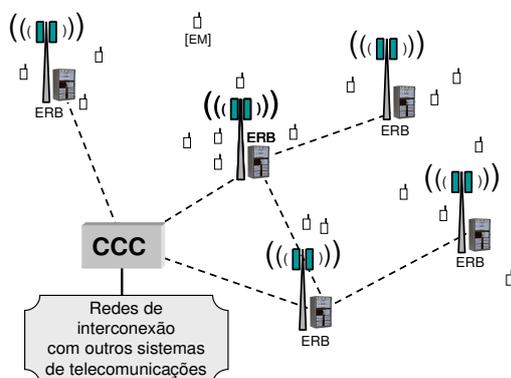


Figura 1 – Sistema de comunicação móvel celular (elementos).

Uma rede móvel celular é composta dos elementos indicados na Figura 1. Informações mais detalhadas podem ser obtidas em Jeszensky (2004) e Garg (2007). Onde:

Central de Comutação e Controle (CCC) – *Mobile Switching Center (MSC)*

A CCC é o “coração” do sistema, sendo basicamente computadores de alta capacidade de processamento, que usam pacotes de softwares projetados para endereçar aplicações específicas de telecomunicações. A CCC é responsável pelo processamento das chamadas, monitoração, tarifação, conexão com outros sistemas de telecomunicações, entre outras funções.

Estação Rádio Base (ERB) – *Base Transceiver Station (BTS)*

O termo “Estação Rádio Base” é utilizado para nomear um conjunto de equipamentos que realizam a interface aérea entre o assinante e o sistema. O equipamento de rádio tem potência limitada, o que restringe a sua área geográfica de atendimento, chamada de célula. Para garantir o acesso ao usuário, a ERB é composta de fontes de energia, sistemas de emergência (baterias e grupos geradores), sistema de controle da estação, transceptores de rádio frequência, amplificadores de potência e sistema irradiante.

Estação Móvel (EM) – *Mobile Station (MS)*

A estação móvel é um equipamento de rádio que é formado por uma unidade transceptora que transmite e recebe o sinal de RF (radiofrequência). Essa unidade móvel tem potência limitada e normalmente são fabricadas de acordo com as configurações de acesso do sistema. Atualmente, podem ter agendas, organizadores de compromissos, *palmtops*, máquina fotográfica, reprodutores de vídeo, entre outros.

Equipamentos de Transmissão

A interconexão entre as ERBs e a CCC é realizada através de enlaces de canais E1 (sistema de transmissão bidirecional com taxa básica de 2,048Mbps). Dependendo da localização das ERBs em relação a CCC e da demanda de usuários prevista para ser atendida em cada ERB, os canais E1 que serão utilizados para a interconexão podem ser implantados pela própria operadora de comunicação móvel ou serem alugados de outra operadora de telecomunicações que já possua infraestrutura de rede nas localidades a serem cobertas pelas ERBs. A modelagem matemática para o planejamento estratégico da infraestrutura de interconexão entre ERBs, e destas com a CCC, é parte integrante deste trabalho.

3 Tecnologia para a conexão entre ERBs e a CCC

A solução tecnológica mais utilizada para interconectar ERBs entre si e ERBs com a CCC em um sistema de comunicação móvel celular tem sido os sistemas SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*) transmitindo sobre fibra ótica. Outras soluções também podem ser encontradas no mercado, tais como:

modems SHDSL (*Symmetric high-speed digital subscriber line* ou Linha Digital Simétrica de Assinante de Alta Velocidade) (Digitel, 2013) e rádio micro-ondas (Ericsson, 2013).

3.1. Modem Ótico

A solução de transmissão utilizando fibra ótica permite maior largura de banda, ou seja, maior quantidade de informações por unidade de tempo. Sendo uma solução ponto-a-ponto possui maior alcance, é imune a interferências eletromagnéticas e possui maior confiabilidade.

Levando em consideração a constituição modular e o sistema de gerenciamento, os sistemas SDH podem ser classificados em várias versões de capacidade, como por exemplo, 16xE1, 21xE1, 42xE1, 63xE1 ou 252xE1, nas configurações 1+0, ou seja, sem reserva de enlace e 1+1 com reserva de enlace. A sua capacidade pode ser ampliada com a adição de novos módulos, mesmo com o equipamento estando em operação.

4 Modelagem do Problema

O objetivo do estudo é alocar e dimensionar os equipamentos na rede de interconexão de ERBs e ao mesmo tempo buscar uma solução economicamente viável. A demanda a ser atendida em cada célula (ERB), o comprimento dos enlaces, as rotas alternativas para escoamento de demanda e as limitações de modularidade (capacidade) dos equipamentos SDH também fazem parte do processo de decisão. Os custos de aluguel de enlaces são divididos em duas parcelas: uma em função da capacidade do enlace SDH, a outra em função do comprimento do enlace.

4.1. Representação da Rede

A área geográfica de uma cidade de médio porte é dividida em células. Cada célula recebe um nó de ERB que deve necessariamente estar conectada a CCC por meio de enlaces de rede SDH. Os principais elementos desta representação são:

Nós de ERBs

Os nós de ERBs são pontos concentradores e geradores de demanda (em canais E1) para o atendimento da demanda local. Estes nós devem estar fisicamente associados a um equipamento de transmissão SDH. Cada nó é identificado pelo número da ERB, por exemplo, o nó ERB $[i]$ está associado a uma ERB qualquer de número $[i]$, e o nó CCC está associado a uma única CCC. Esta modelagem pode ser generalizada para números maiores de CCCs.

Os nós ERB $[i]$ devem escoar toda a demanda gerada e recebida de outros nós de ERB de modo que toda demanda prevista para ser atendida pelo sistema chegue à CCC.

Arcos de Escoamento de Demanda

Os arcos de escoamento que ligam todos os nós de ERB entre si e a CCC são definidos por índices $[i,$

$j]$, que representam respectivamente as ERB de origem $[i]$ e destino $[j]$. O fluxo de demanda escoado por estes arcos é utilizado para definir a capacidade dos enlaces de transmissão a serem alugados da operadora de rede SDH.

Embora a tecnologia SDH permita a implementação da topologia de atendimento em anel, a modelagem desenvolvida aqui contempla duas possibilidades de atendimento para os arcos de escoamento:

- *Arcos diretos*: arcos $[i, j]$ que ligam individualmente todas as ERBs à CCC;

- *Arcos indiretos*: arcos $[i, j]$ que ligam as ERBs entre si, formando assim rotas alternativas de atendimento.

Enlaces Candidatos

O fluxo de demanda escoado pelos arcos da rede é utilizado para garantir o atendimento das necessidades de demanda da empresa contratante. O menor custo total de aluguel é o objetivo principal do modelo de otimização. Este custo depende da capacidade do enlace escolhido e das tarifas cobradas pelo aluguel dos sistemas de transmissão SDH e da rede ótica, os quais são diretamente influenciados pelo fluxo de demanda nestes arcos de escoamento. A tecnologia SDH utilizando o modo de transmissão STM-1 (*Synchronous Transport Module level - 1*), com taxa de transmissão de 155,52 Mbps, permite quatro configurações de atendimento: 16xE1, 21xE1, 42xE1 e 63xE1 (Asga, 2013).

4.2. Formulação Matemática

O modelo matemático utilizado é um problema de Programação Linear (binária) Inteira Mista (MILP 0-1) que utiliza a abordagem nó-arco (Bazaraa, 1990). O problema pode ser formulado conforme segue (Desousa et al., 2013). A Tabela 1 apresenta a nomenclatura da modelagem.

Tabela 1 – Nomenclatura.

Conjuntos		Variáveis de Decisão	
A_e	Arcos de escoamento de demanda (diretos + indiretos)	X_{ij} n	Variável binária – representa a escolha ou não do enlace SDH de capacidade $[n]$ candidato no arco $[i,j] \in A_e$
O_{SDH}	Modularidades (capacidades) dos enlaces SDH candidatos	Y_{ij}	Variável real – representa o fluxo de demanda atendido pelo arco $[a,b] \in A_e$ saindo de $[i]$ e chegando em $[j]$
O_{ERB}	Nós de ERB da rede		
Parâmetros			
\tilde{C}_n	Custo impreciso de aluguel do sistema de transmissão SDH de capacidade $n \in O_{SDH}$		
\tilde{D}_k	Demanda imprecisa prevista, em canais E1, para ser atendida em cada nó $[k] \in O_{ERB}$		
l_{ij}	Comprimento do arco $[i, j] \in A_e$		
r	Custo de aluguel de rede ótica (por km)		
Cap_{ij}^n	Capacidade do enlace SDH de modularidade $[n]$ candidato no arco $[i,j] \in A_e$		

$$\text{Min} \sum_{[i,j] \in A_e} \sum_{[n] \in O_{SDH}} (\tilde{C}_n + r.I_{ij}) X_{ijn} \quad (1)$$

Sujeito a :

$$\sum_{[k,i] \in A_e} Y_{ki} - \sum_{[j,k] \in A_e} Y_{jk} = \tilde{D}_k \quad \forall k \in O_{ERB} \quad (2)$$

$$\sum_{[n] \in O_{SDH}} \text{Cap}_{ij}^n X_{ijn} \geq Y_{ij}, \quad \forall [i,j] \in A_e \quad (3)$$

O modelo é composto por:

Função Objetivo (1): refere-se ao custo gerado pelo aluguel da rede de interconexão SDH. É calculada somando-se os custos de aluguel de enlace escolhido para o escoamento da demanda dos nós de ERB, até o nó de CCC.

Restrições de satisfação de demanda (2): garantem o balanço de fluxo de demanda em todos os nós do grafo (ERBs), exceto para o nó da CCC, por ser uma equação redundante.

Restrições de capacidade técnica para a tecnologia SDH (3): ocorrem em cada arco previsto pelo planejador para escoar a demanda das ERBs. Esta restrição assegura que a capacidade do enlace SDH escolhido seja capaz de atender a demanda escoada pelo arco.

4.3. Representação dos Dados Imprecisos

Tanto o custo de aluguel de enlace quanto à demanda a ser atendida em cada ERB são parâmetros difíceis de estimar com precisão por serem influenciados por vários fatores tais como flutuação de preços de mercado, surgimento de novas tecnologias que atraem novos consumidores, entre outros. Uma vez que a variação destes fatores afeta o dimensionamento da rede, estes se tornam pontos cruciais no processo de decisão. Diante desta situação, optou-se por modelar estes parâmetros utilizando números *fuzzy*, abrangendo assim, uma faixa de valores possíveis resultando em simulações mais realísticas e com maior flexibilidade.

A cada uma das demandas das ERBs (\tilde{D}_k) e, também, dos custos de enlace SDH (\tilde{C}_n) foi associado um número *fuzzy*: $\tilde{D}_k = (d_a, d_b, d_c, d_d)$ e $\tilde{C}_n = (c_a, c_b, c_c, c_d)$, que definem o intervalo de variação do dado. Empregou-se uma função de pertinência trapezoidal simétrica, conforme apresentado na Figura 2. O valor médio (V_m) representa o valor de maior pertinência.

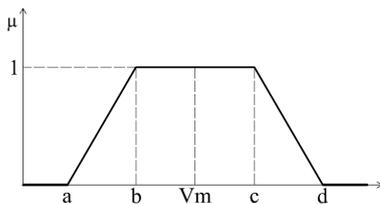


Figura 2 – Modelagem Trapezoidal – Função de Pertinência.

4.4. Resolução do Modelo com Demanda e Custo Fuzzy

Para utilizar o número *fuzzy* nas simulações é necessário transformá-lo em um número *crisp*. Existem várias técnicas para defuzzificação (Pedrycz e Gomide, 1998). Contudo, neste trabalho, para os dados de demanda, optou-se por substituir o número *fuzzy* por um valor que permita resolver o problema de forma mais simples sem perder as características de imprecisão do número *fuzzy*. O método consiste em obter um número *crisp* a partir de uma função de parametrização, na qual um fator de confiança, $\alpha \in [0,1]$, expressa o quão preciso são os dados de demanda. Na função objetivo, a defuzzificação do parâmetro custo de aluguel é feita considerando a função “valor esperado” para um número *fuzzy* trapezoidal. Maiores detalhes destas abordagens podem ser encontradas em Madronero et al. (2012) e Peidro et al. (2010). O novo modelo de otimização *crisp* auxiliar fica:

$$\text{Min} \sum_{[i,j] \in A_e} \sum_{[n] \in O_{SDH}} \left(\frac{C_{na} + C_{nb} + C_{nc} + C_{nd} + r.I_{ij}}{4} \right) X_{ijn} \quad (4)$$

Sujeito a:

$$\sum_{[k,i] \in A_e} Y_{ki} - \sum_{[j,k] \in A_e} Y_{jk} \leq \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{D_{ka} + D_{kb}}{2} + \quad (5)$$

$$\left(1 - \frac{\alpha}{2} \right) \cdot \frac{D_{kc} + D_{kd}}{2} \quad \forall k \in O_{ERB}$$

$$\sum_{[k,i] \in A_e} Y_{ki} - \sum_{[j,k] \in A_e} Y_{jk} \geq \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{D_{kc} + D_{kd}}{2} + \quad (6)$$

$$\left(1 - \frac{\alpha}{2} \right) \cdot \frac{D_{ka} + D_{kb}}{2} \quad \forall k \in O_{ERB}$$

$$\sum_{[n] \in O_{SDH}} \text{Cap}_{ij}^n X_{ijn} \geq Y_{ij}, \quad \forall [i,j] \in A_e \quad (7)$$

A variação do fator de confiança permite analisar diferentes cenários, ou seja, diferentes possibilidades de demanda prevista. Deve ser observado que o fator $\alpha = 0$ representa o maior intervalo no número *fuzzy*, isto é, menor confiança. À medida que o fator de confiança, α , aproxima-se de 1, o intervalo de demanda previsto diminui. Com $\alpha = 1$, o termo independente dos conjuntos de restrições (5) e (6) alcançam o mesmo valor V_m (Figura 2).

5 Estudo de Caso

5.1. Dados Gerais

O estudo é feito para uma rede composta por 30 nós de ERBs que necessitam de conexão com uma CCC. As ERBs podem ser interconectadas com a CCC com enlaces diretos ou através de rotas alternativas por meio de arcos entre as ERBs.

A Figura 3 apresenta a rede candidata. São apresentadas as seguintes informações: o comprimento dos 30 arcos diretos ERB-CCC e dos 26 arcos indiretos ERB-ERB, possíveis de serem escolhidos, e os índices de referência para cada valor de demanda

fuzzy trapezoidal prevista para ser atendida em cada nó de ERB.

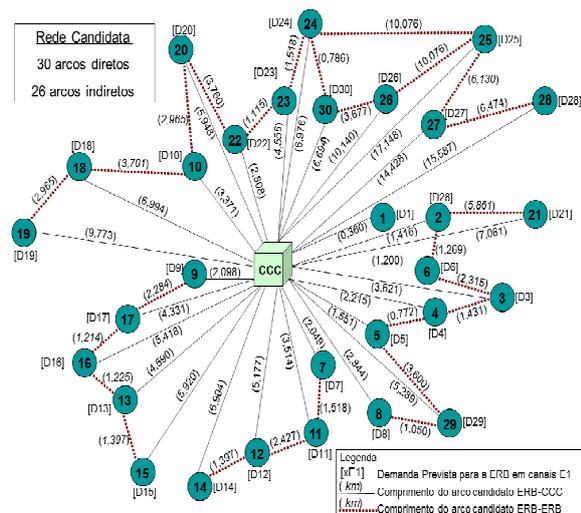


Figura 3 – Rede candidata com 30 nós de ERB e 56 arcos.

Tabela 2 – Capacidade e custo impreciso de aluguel para os enlaces SDH candidatos.

Enlace SDH	Capac. (xE1)	Custo \tilde{C}_n			
		a	b	c	d
L16	16	0,700	0,850	1,150	1,300
L21	21	0,910	1,105	1,495	1,690
L42	42	1,540	1,870	2,530	2,860
L63	63	2,100	2,550	3,450	3,900

A tecnologia de transmissão considerada é a SDH. O custo de aluguel de enlace, devido à sua imprecisão, também foi modelado como número fuzzy trapezoidal (Tabela 2). A capacidade dos equipamentos candidatos é admitida como sendo conhecida. O custo de aluguel da rede ótica também é admitido como conhecido e vale 0,05/km.

As rotas alternativas necessitam de conhecimento prévio da rede (experiência do planejador), de forma a se evitar que um arco que nunca será escolhido para fazer parte de uma rota seja candidato e aumente o número de variáveis a serem analisadas e, invariavelmente, a complexidade computacional.

5.2. Resultados

Variando-se o fator de confiança, α , é possível obter uma margem de mapeamento da instabilidade do mercado, abrangendo variações de demanda de fluxo e de preço de aluguel de rede, tornando a modelagem e a aplicação mais realista.

Os cenários gerados a partir desta variação do fator de confiança têm como objetivo avaliar o comportamento da rede a ser alugada e verificar se a imprecisão nos dados pode gerar mudanças de topologia da rede. Para a simulação computacional foram utilizados os seguintes recursos computacionais: linguagem de programação matemática AMPL® (Fourer et al., 2002), para a elaboração do modelo matemático, e o pacote de otimização CPLEX® (Cplex,

1999), ambos manipulados em microcomputadores no ambiente Windows 7®.

Tabela 3 - Resultado das simulações para diferentes valores do grau de confiança (α).

α (%)	Custo Total	AD	AI	L16	L21	L42	FT	Complexidade	
								SP	BB
0	41,78	28	2	23	5	2	109	425	33
10	41,78	28	2	23	5	2	100	431	2
20	42,77	27	3	22	5	3	101	362	0
30	45,70	27	3	22	2	6	139	999	246
40	45,70	27	3	22	2	6	132	721	155
50	45,94	29	2	24	2	5	90	1640	384
60	47,74	29	2	18	8	5	145	1400	409
70	47,74	29	2	18	8	5	135	482	89
80	48,34	29	2	16	10	5	129	428	9
90	48,34	29	2	16	10	5	122	414	9
100	48,34	29	2	16	10	5	120	242	0

Por ser um problema de minimização, e devido à forma como foram modeladas as novas restrições, a curva de defuzzificação acaba por retornar o menor valor do intervalo fuzzy em análise. Desta maneira, o aumento no valor de α faz crescer também o valor da demanda fuzzy prevista e, conseqüentemente, o custo total da rede a ser alocada. A Tabela 3 mostra os resultados obtidos: o grau de confiança (α); o custo total de aluguel da rede; a quantidade de arcos diretos (AD) e indiretos (AI) escolhidos; a quantidade de enlaces de capacidade L_i ; a folga total (FT) da rede em canais E1 – valor que representa o somatório das folgas existentes em cada enlace previsto; e a complexidade computacional em número de iterações Simplex (SP) e Branch-and-Bound (BB).

Verifica-se que houve maior utilização de enlaces 16xE1, devido à ordem de grandeza dos valores de demanda prevista em cada nó de ERB. Além disso, o cenário que teve maior dificuldade para encontrar a solução ótima, ou seja, maior esforço computacional, ($\alpha = 50\%$) foi também o que apresentou menor folga total, 90xE1. A Tabela 3 também indica que existem três distintas topologias para a rede, a saber:

Topologia de Rede 1 (com α entre 0 e 10%)

Nesta topologia, observa-se que o dimensionamento dos enlaces privilegiou o atendimento através de arcos que ligam as ERBs diretamente com a CCC, condição que inibiu a escolha de enlaces de capacidade 63xE1. Apenas duas ERBs foram atendidas por rotas alternativas. Devido à modularidade dos enlaces candidatos, outro ponto importante a ser considerado é a folga existente na rede, que ficou entre 109xE1 ($\alpha = 0\%$) e 100xE1 ($\alpha = 10\%$).

Topologia de Rede 2 (com α entre 20 e 40%)

Neste cenário já é possível perceber o impacto causado pela variação da demanda prevista para ser atendida em cada nó de ERB. Nota-se que houve um aumento de 9,38% no custo total. Além disso, houve alterações na topologia da rede a ser alugada. O número de arcos indiretos passou de 2 para 3, mostran-

do que, com o aumento do fluxo de demanda, alguns arcos indiretos, antes descartados, podem apresentar-se bastante atrativos. Observa-se ainda que não houve utilização de enlaces 63xE1.

Topologia de Rede 3 (com α entre 50 e 100%)

Conforme listado na Tabela 3, esta topologia com 29 arcos diretos e 2 indiretos, apresenta variações no seu custo total devido às mudanças de modularidade dos enlaces SDH, consequência imediata do crescimento da demanda, com o aumento do grau de confiança. Nesta topologia, também não foi alocado nenhum enlace de 63xE1.

Tanto a folga quanto a complexidade computacional não apresentam um padrão de comportamento bem definido diante do aumento da demanda, nem mesmo uma relação entre si, sendo obtida a menor folga (90xE1) e a maior folga (145xE1) para os dois cenários com maior complexidade computacional.

6 Conclusão

O objetivo principal da metodologia de planejamento estratégico apresentada neste trabalho foi a minimização de custos de aluguel para a infraestrutura de interconexão de ERBs em um sistema móvel celular. Os dados imprecisos de demanda e custo são modelados como números *fuzzy* trapezoidais. Os resultados obtidos permitiram verificar que a imprecisão nestes dados de entrada pode se tornar um fator crucial para a escolha da topologia da rede, uma vez que a mesma é diretamente influenciada pela demanda e pelos custos.

A aplicação do modelo MILP-*Fuzzy* 0-1 permitiu associar diferentes soluções a distintos níveis de imprecisão sobre os dados. Desta forma, foi possível avaliar o impacto causado pela imprecisão de custo, e pela variação da demanda prevista em cada nó de ERB, sobre a topologia da rede planejada.

A ferramenta computacional apresenta-se, portanto, como um facilitador para o processo de decisão durante o dimensionamento e a avaliação de risco no planejamento da infraestrutura de interconexão de ERBs em um sistema de comunicação móvel celular. A flexibilidade quanto a variações nos cenários possíveis de serem contemplados é uma das principais virtudes do sistema de apoio à decisão MILP-*Fuzzy* 0-1 apresentado. Destaca-se a possibilidade de classificação de redes, permitindo ao planejador selecionar aquela(s) que atende(m) as suas exigências de demanda prevista.

Como extensões deste trabalho destacam-se: avaliar os efeitos da utilização de um parâmetro que meça o grau de confiança para os custos de enlace utilizados na função objetivo; desenvolver um algoritmo para uma escolha mais criteriosa dos valores pontuais dos níveis de confiança nos dados de demanda; propor uma solução multi-paramétrica que permita uma avaliação com níveis de confiança diferenciados para cada região da rede estudada.

Referências Bibliográficas

- Alencar, M.S. (2004). *Telefonia Celular Digital*. Ed. Érica, 2004.
- Asga (2013). Especificações Técnicas de Modems Óticos. Website do fabricante AsGa: <<http://www.asga.com.br/produtos.html>> Acessado em 10/06/12.
- Bazaraa, M.S., Jarvis, J.J. e Sherali, H.D. (1990). *Linear Programming and Network Flows*. 2a ed., Wiley, New York.
- Bolia, N. e Kulkarni, V. (2008). Index policies for resource allocation in wireless networks. *Procs. of the 9th INFORMS Telecommunications Conference*. College Park, Maryland, USA.
- Cplex (1999). *ILOG CPLEX – Manual Usuário 6.5*.
- DeSousa, M.A., Vieira, F.H.T., Carlson, C.M.F., Gonçalves, B.H.P. e Costa, V.H.T. (2013). Sistema de Apoio à Decisão MILP-*Fuzzy* para o Planejamento de Redes de Acesso em Telecomunicações. *Meta-heurísticas em Pesquisa Operacional*, por H.S. Lopes, L.C.A. Rodrigues, M.T.A. Steiner (Eds.). Ed. Omnipax, pp. 401-417.
- Digitel (2013). Especificações Técnicas de Modems SHDSL. Website do fabricante Digitel: <<http://www.digitel.com.br/pt/produtos>> Acessado em 29/05/12.
- Ericsson (2013). Especificações Técnicas de Sistemas de Rádio Microondas. Website do fabricante: <<http://www.ericsson.com/ourportfolio/products/microwave-networks>> Acessado em 03/04/12.
- Fourer, R., Gay, D.M. e Kernighan, B.W. (2002). *AMPL - A Modeling Language for Mathematical Programming*. 2a Edição.
- Garg, V. K. (2007). *Wireless Communications and Networking*. Elsevier.
- Jeszensky, P. J. E. (2004). *Sistemas Telefônicos*. Ed. Manole, Barueri-SP.
- 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*. Vol. 43, issue 2, pp. 375-389.
- Madronero, D.M., Mula, J. e Jiménez, M. (2012). A modified approach based on ranking *fuzzy* numbers for *fuzzy* integer programming with equality constraints. *6th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management*. Vigo, pp. 375-382.
- Niyato, D. e Hossain, E. (2006). A queuing-theoretic and optimization-based model for radio resource management in IEEE 802.16 broadband wireless networks. *IEEE Transactions on Computer*. Vol. 55, n. 11, pp.1473-1488.
- Pedrycz, W. e Gomide, F. (1998). *An Introduction to Fuzzy Sets: Analysis and Design*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Peidro, D., Mula, J., Jiménez, M., Mar Botella, M. (2010). A *fuzzy* linear programming based approach for tactical supply chain planning in an uncertainty environment. *European Journal of Operational Research*, 205, pp. 65–80.