

## MODELAGEM MILP-*FUZZY* PARA O DIMENSIONAMENTO DE REDE DE ACESSO SMC COM DADOS IMPRECISOS DE CUSTO E DEMANDA

MARCOS ANTÔNIO DE SOUSA<sup>1,2</sup>, FÁBIO JÚNIOR C. DE SOUZA<sup>1</sup>,  
FLÁVIO HENRIQUE TELES VIEIRA<sup>1</sup>, FERNANDO FERREIRA DE MELO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação - EMC, Universidade Federal de Goiás - UFG  
Av. Universitária, nº 1488, Qd.86, Bl. A, 3º piso, Salas 6 e 8, St. Leste Universitário, Goiânia – GO, Brasil.

<sup>2</sup>Departamento de Engenharia - ENG, Pontifícia Universidade Católica de Goiás - PUC-GOÍÁS  
Av. Universitária, nº 1440, Área III, Bloco G, Sala 108, Goiânia-GO, Brasil.

E-mails: marcos@emc.ufg.br, fabio\_jr91@hotmail.com, flavio@emc.ufg.br, fernando.melo@emc.ufg.br

### 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 SMC. 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, que possibilita flexibilidade para 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 de aluguel de rede são apresentados e suas implicações são discutidas.

**PALAVRAS CHAVE.** Sistema móvel celular, sistema SDH, otimização, modelagem *fuzzy*.

**Área principal.** PO em Telecomunicações e Sistemas de Informação.

### ABSTRACT

One of the main marketing strategies adopted by MTS (Mobile Telecommunication Systems) operators to upgrade the capacity of its BTS (Base Station) interconnection network has been renting the transmission links from other carriers. This technological support can be provided with the SDH (Synchronous Digital Hierarchy) technologies and optical fiber. This paper presents a case study for the design of the SDH network to interconnect BTS-MSCs (Mobile Switching Center) in a MTS. This work uses a Mixed Integer Linear Programming Model (MILP) as support in decision-making. 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 dimensioning of the network is carried out assuming imprecise forecasts of demand and cost. The technical-economic evaluation is oriented to minimize cost and it is based on the concept of fuzzy numbers. Results of computational experiments of network rental are presented and their implications are discussed.

**KEYWORDS.** Cellular system, SDH system, optimization, fuzzy modeling.

**Main area.** OR in Telecommunications and Information Systems.

## 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 evoluiu para plataformas multimídia com capacidade de acesso a múltiplos serviços de dados (Alencar, 2004). Paralelo a evolução dos aparelhos segue o progresso das redes de comunicação móvel. 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. O objetivo é oferecer vários tipos de serviços, privilegiando os de acesso banda larga à internet.

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 as 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. Rouskas et al. (2008), Gaivoronski e Zoric (2008), 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 *links* de transmissão para o problema de interconexão de Estações Rádio Base – ERB (*Base Transceiver Station* – BTS) com a Central de Comutação e Controle – CCC (*Mobile Switching Center* - MSC), levando em consideração a imprecisão de 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 *links* de transmissão SDH. A

imprecisão é incorporada através do uso de números *fuzzy* trapezoidais (Pedrycz e Gomide, 1998).

A seção 2 apresenta os principais elementos de um sistema de comunicação móvel celular. A configuração da tecnologia SDH para a oferta de *links* de interconexão de ERBs com a CCC é descrita na seção 3. A seção 4 mostra o modelo de Programação Linear Inteira Mista, utilizado como ferramenta de apoio na tomada de decisão, além do tratamento dos dados imprecisos. O estudo de caso com simulação computacional encontra-se na seção 5. E, por fim, a seção 6 é dedicada aos comentários finais.

## 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

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

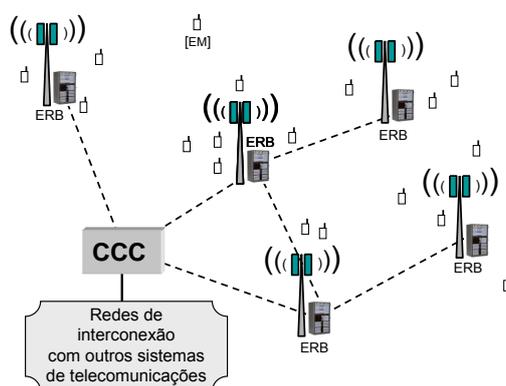


Figura 1 – Elementos de um sistema de comunicação móvel celular.

#### 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, reproduzidores de vídeo, entre outros.

#### Equipamentos de Transmissão

A interconexão entre as ERBs e a CCC é realizada através de *links* 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 Interconexão 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 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 *link* e 1+1 com reserva de *link*. A sua capacidade pode ser ampliada com a adição de novos módulos, mesmo com o equipamento estando em operação.

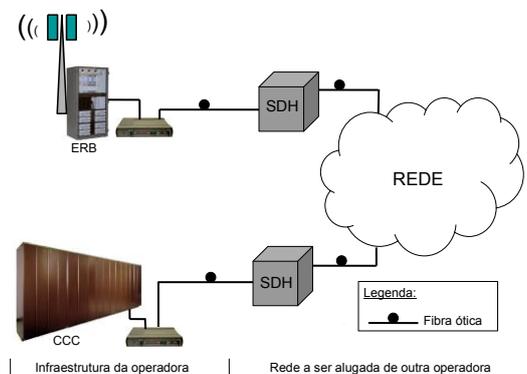


Figura 2 – Interconexão ERBs-CCC utilizando sistemas SDH.

A Figura 2 representa o cenário mercadológico avaliado neste trabalho, onde a operadora de comunicação móvel celular pretende interligar as suas ERBs com a CCC através de *links* alugados de outra operadora de rede. A possibilidade de aluguel de rede existe porque os sistemas SDH possuem capacidade de transmissão muito mais elevada do que aquelas necessárias para atender as demandas das ERBs. Existindo folga no seu sistema a operadora de rede pode disponibilizar *links* para outras operadoras. Especificações técnicas mais detalhadas sobre os *modems* SDH, ver Asga (2013).

### 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 *links* são divididos em duas parcelas: uma em função da capacidade do *link* SDH, a outra em função do comprimento do enlace.

#### 4.1. Representação da Rede

A área geográfica de uma cidade de médio é dividida em células. Cada célula recebe um nó de ERB que deve necessariamente estar conectada a CCC por meio de *links* 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 *links* 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.

##### Links 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 *link* 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 (PLIM) que utiliza a abordagem nó-arco (Bazaraa, 1990). O problema pode ser formulado conforme a seguir (Desousa et al., 2013). A Tabela 1 apresenta a nomenclatura da modelagem.

Tabela 1 - Nomenclatura (Parâmetros *fuzzy* são apresentados com til  $\tilde{}$ )

Conjuntos		Variáveis de Decisão	
$A_e$	Arcos de escoamento de demanda (diretos + indiretos)	$X_{ijn}$	Variável binária – representa a escolha ou não do <i>link</i> SDH de capacidade $[n]$ candidato no arco $[i,j] \in A_e$
$O_{SDH}$	Modularidades (capacidades) dos <i>links</i> SDH candidatos	$Y_{ab}$	Variável real – representa o fluxo de demanda atendido pelo arco $[a,b] \in A_e$ saindo de $[a]$ e chegando em $[b]$
$O_{ERB}$	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 <i>link</i> SDH de modularidade $[n]$ candidato no $[i,j] \in A_e$		

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

Sujeito a :

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

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

O modelo de otimização 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 *link* 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 *link* SDH escolhido seja capaz de atender a demanda escoada pelo arco.

#### 4.3. Representação dos Dados Imprecisos

Tanto o custo de aluguel de link quanto a 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 *link* 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 3. O valor médio ( $V_m$ ) representa o valor de maior pertinência.

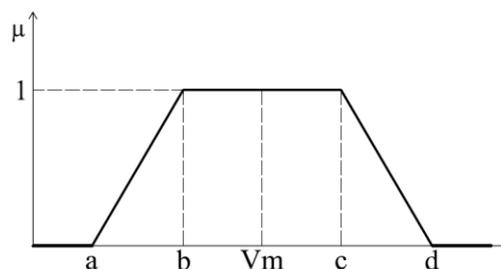


Figura 3 – Modelagem Trapezoidal – Função de Pertinência.

#### 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:

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

Sujeito a:

$$\sum_{[k,i] \in A_e} Y_{ki} - \sum_{[j,k] \in A_e} Y_{jk} \leq \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{D_{ka} + D_{kb}}{2} + \left( 1 - \frac{\alpha}{2} \right) \cdot \frac{D_{kc} + D_{kd}}{2} \quad \forall k \in O_{ERB} \quad (5)$$

$$\sum_{[k,i] \in A_e} Y_{ki} - \sum_{[j,k] \in A_e} Y_{jk} \geq \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{D_{kc} + D_{kd}}{2} + \left( 1 - \frac{\alpha}{2} \right) \cdot \frac{D_{ka} + D_{kb}}{2} \quad \forall k \in O_{ERB} \quad (6)$$

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

Deve ser observado que o fator (ou grau) de confiança,  $\alpha = 0$ , representa o maior intervalo no número *fuzzy*, isto é, menor confiança. A variação do fator de confiança permite analisar diferentes cenários, ou seja, diferentes possibilidades de demanda prevista. À medida que o fator de confiança,  $\alpha$ , 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 3).

## 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 4 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 prevista para ser atendida em cada nó de ERB. As demandas *fuzzy* (em canais E1) são listadas na Tabela 2.

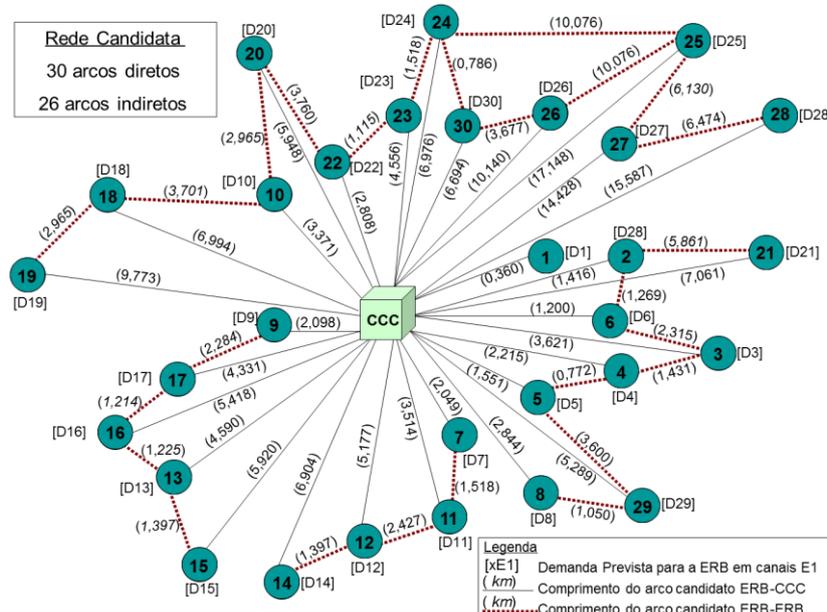


Figura 4 – Rede candidata com 30 nós de ERB e 56 arcos.

Tabela 2 – Demanda imprecisa prevista para cada nó de ERB.

ERB	Demanda (em canais E1)				ERB	Demanda (em canais E1)			
	a	b	c	d		a	b	c	d
$\tilde{D}_1$	17,50	21,25	28,75	32,50	$\tilde{D}_{16}$	13,30	16,15	21,85	24,70
$\tilde{D}_2$	12,60	15,30	20,70	23,40	$\tilde{D}_{17}$	8,40	10,20	13,80	15,60
$\tilde{D}_3$	11,20	13,60	18,40	20,80	$\tilde{D}_{18}$	8,40	10,20	13,80	15,60
$\tilde{D}_4$	9,10	11,05	14,95	16,90	$\tilde{D}_{19}$	9,10	11,05	14,95	16,90
$\tilde{D}_5$	11,90	14,45	19,55	22,10	$\tilde{D}_{20}$	12,60	15,30	20,70	23,40
$\tilde{D}_6$	12,60	15,30	20,70	23,40	$\tilde{D}_{21}$	8,40	10,20	13,80	15,60
$\tilde{D}_7$	7,70	9,35	12,65	14,30	$\tilde{D}_{22}$	17,50	21,25	28,75	32,50
$\tilde{D}_8$	18,20	22,10	29,90	33,80	$\tilde{D}_{23}$	21,00	25,50	34,50	39,00
$\tilde{D}_9$	11,90	14,45	19,55	22,10	$\tilde{D}_{24}$	12,60	15,30	20,70	23,40
$\tilde{D}_{10}$	12,60	15,30	20,70	23,40	$\tilde{D}_{25}$	24,50	29,75	40,25	45,50
$\tilde{D}_{11}$	7,00	8,50	11,50	13,00	$\tilde{D}_{26}$	7,70	9,35	12,65	14,30
$\tilde{D}_{12}$	12,60	15,30	20,70	23,40	$\tilde{D}_{27}$	8,40	10,20	13,80	15,60
$\tilde{D}_{13}$	8,40	10,20	13,80	15,60	$\tilde{D}_{28}$	10,50	12,75	17,25	19,50
$\tilde{D}_{14}$	17,50	21,25	28,75	32,50	$\tilde{D}_{29}$	9,80	11,90	16,10	18,20
$\tilde{D}_{15}$	11,20	13,60	18,40	20,80	$\tilde{D}_{30}$	14,00	17,00	23,00	26,00

A tecnologia de transmissão considerada é a SDH. O custo de aluguel de link SDH (em valor relativo ao 16xE1) está indicado na Tabela 3. Observa-se que o custo de aluguel de *link*, devido à sua imprecisão, também foi modelado como número *fuzzy* trapezoidal. A capacidade dos equipamentos candidatos é admitida como sendo conhecida, onde 16xE1 representa dezesseis canais de transmissão de 2,048 Mbps. 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 nó (ou arco) que nunca será escolhido para fazer parte de uma rota seja candidato e aumente o número de variáveis a serem analisadas.

Tabela 3 – Capacidade e custo impreciso de aluguel para os *links* SDH candidatos.

Link SDH	Capacidade (em canais E1)	Custo $\tilde{C}_n$			
		a	b	c	d
Link16	16	0,700	0,850	1,150	1,300
Link21	21	0,910	1,105	1,495	1,690
Link42	42	1,540	1,870	2,530	2,860
Link63	63	2,100	2,550	3,450	3,900

## 5.2. Resultados

Variando-se o fator de confiança,  $\alpha$ , é possível obter uma margem de mapeamento da instabilidade do mercado, abrangendo variações de demanda de fluxo e de preço de aluguel de equipamento, 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®.

Por ser um problema de minimização, e devido à forma como foram modeladas as novas restrições, a curva de defuzzyficação acaba por retornar o menor valor do intervalo *fuzzy* em análise. Desta maneira, o aumento no valor de  $\alpha$  aumenta também o valor da demanda prevista e, conseqüentemente, o custo total da rede, conforme indicado na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultado das simulações para diferentes valores do grau de confiança ( $\alpha$ ).

Grau de Confiança (%)	Custo Total	Arcos Diretos	Arcos Indiretos	Link 16	Link 21	Link 42	Link 63	Folga Total	Complexidade	
									SIMPLEX	Branch-and-Bound
0	41,78575	28	2	23	5	2	0	109	425	33
10	41,78575	28	2	23	5	2	0	100	431	2
20	42,77380	27	3	22	5	3	0	101	362	0
30	45,70480	27	3	22	2	6	0	139	999	246
40	45,70480	27	3	22	2	6	0	132	721	155
50	45,94285	29	2	24	2	5	0	90	1640	384
60	47,74285	29	2	18	8	5	0	145	1400	409
70	47,74285	29	2	18	8	5	0	135	482	89
80	48,34285	29	2	16	10	5	0	129	428	9
90	48,34285	29	2	16	10	5	0	122	414	9
100	48,34285	29	2	16	10	5	0	120	242	0

Verifica-se que houve maior utilização de *links* 16xE1, devido à ordem de grandeza dos valores de demanda prevista em cada nó de ERB. Pode-se observar, também, que o cenário que teve maior dificuldade para encontrar a solução ótima e, conseqüentemente, maior esforço computacional, foi aquele para o grau de confiança de 50%. Para esta previsão de demanda, a topologia da rede alocada é a que apresenta menor folga total, 90xE1.

A Tabela 4 também indica que existem três distintas topologias para a rede. Cada uma dela é detalhada a seguir.

#### Topologia de Rede 1 (com $\alpha$ entre 0 e 10%)

A topologia da rede a ser alugada é apresentada na Figura 5. Nela são indicadas a demanda prevista em cada nó ERB (para  $\alpha = 0\%$ ), a demanda escoada em cada arco escolhido e a capacidade do *link* SDH alocado. 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 *links* de capacidade 63xE1. Apenas duas ERBs foram atendidas por rotas alternativas, cada uma com uma capacidade de 16xE1. Devido à modularidade dos *links* candidatos, outro ponto importante a ser considerado é a folga existente na rede, que ficou entre 109xE1 ( $\alpha = 0\%$ ) e 110xE1 ( $\alpha = 10\%$ ).

#### Topologia de Rede 2 (com $\alpha$ entre 20 e 40%)

A Figura 6 mostra a topologia de atendimento. 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 (ERBs 20, 24 e 29), mostrando 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 *links* 63xE1.

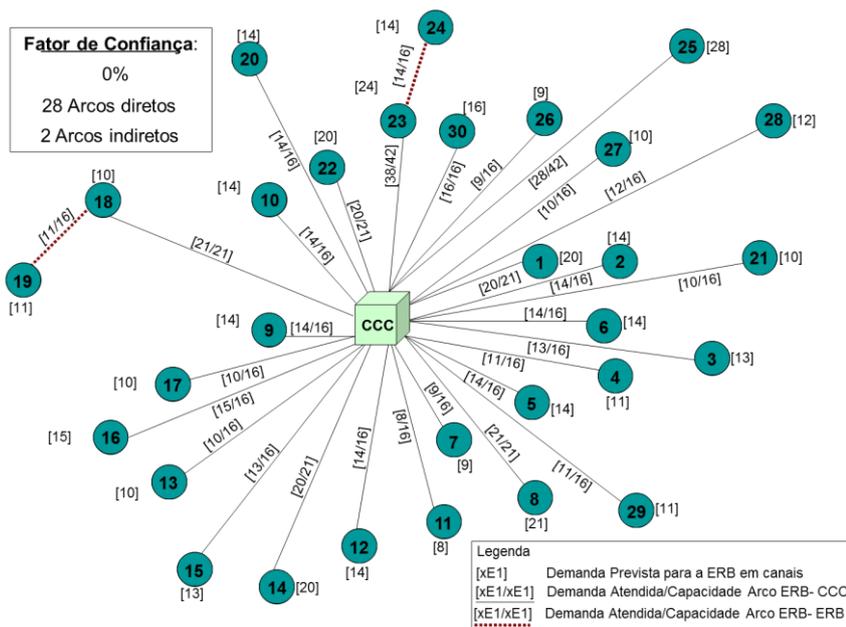


Figura 5 – Topologia de rede 1 possível de ser alugada, com grau de confiança de 0%.

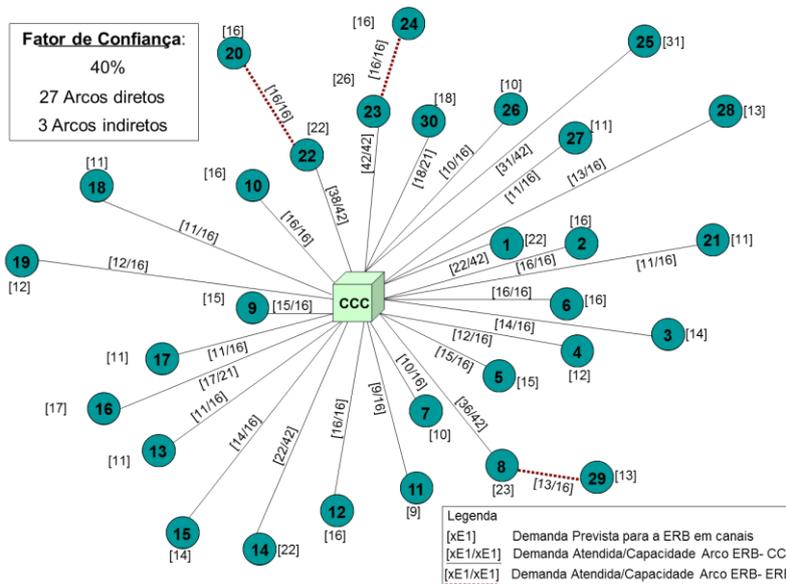


Figura 6 – Topologia de rede 2 possível de ser alugada, com grau de confiança de 40%.

### Topologia de Rede 3 (com $\alpha$ entre 50 e 100%)

A topologia de rede 3, possível de ser alugada, encontra-se na Figura 7. Os valores de demanda indicados são para um grau de confiança de 100%. Conforme listado na Tabela 4, esta topologia com 29 arcos diretos e 2 indiretos, apresenta variações no seu custo total devido às mudanças de modularidade dos *links* SDH, consequência imediata do crescimento da demanda, com o aumento do grau de confiança. Nesta topologia, também não foi alocado nenhum *link* 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.

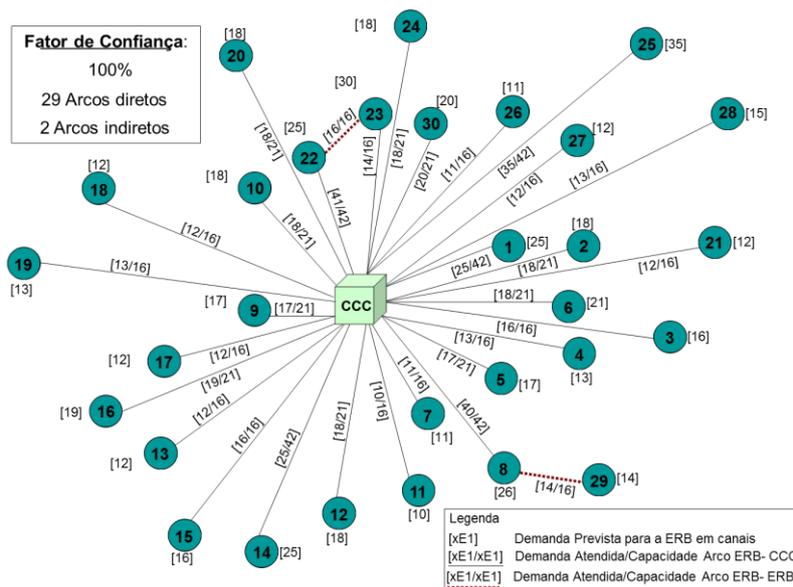


Figura 7 – Topologia de rede 3 possível de ser alugada, com grau de confiança de 100%.

## 6. Conclusão

O mercado de comunicação móvel celular está cada vez mais competitivo e tem levado as operadoras do setor a buscar novas formas de planejar suas redes, minimizando os custos e maximizando as receitas. A competitividade deste mercado vai além da escolha da tecnologia de acesso, passando pela fidelidade do cliente e agregando novos serviços e facilidades. A transmissão de dados, em velocidades crescentes, tem sido cada vez mais o alvo de interesse por parte das operadoras SMC. A capacidade de atendimento da infraestrutura de interconexão de ERBs em um sistema de comunicação móvel deve estar em constante atualização. A possibilidade de aluguel de rede é uma alternativa que também deve ser avaliada pela operadora do sistema.

Uma proposta de planejamento estratégico foi apresentada. O objetivo principal é a minimização de custos de aluguel para a infraestrutura de interconexão de ERBs em um sistema móvel celular. O dimensionamento de *links* de transmissão SDH é a atividade mais explorada. A rede é vista como um grafo, e a modelagem é traduzida como um problema de programação linear inteira mista, o qual obedece a restrições técnicas de demanda e capacidade. Os dados imprecisos de demanda e custo são modelados como números *fuzzy* trapezoidais. Os cenários estudados 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 *Fuzzy-MILP* permitiu associar diferentes soluções a distintos níveis de imprecisão sobre os dados. Desta forma, foi possível entender 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* apresentado. Destaca-se a possibilidade de classificação de redes, permitindo ao planejador selecionar aquela(as) 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 *link* utilizados 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.

### 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., Willey, 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 do Usuário*, Versão 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 Ericsson: <<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.
- 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, Maryland, USA.
- 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.
- 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.