



SPOLM 2009

ISSN 2175-6295

Rio de Janeiro- Brasil, 05 e 06 de agosto de 2009.

## 019/2009 - ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO PARA O PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DE REDES CELULARES 3G

**Michele da Silva Sousa**

COPPE/UFRJ – Programa de Engenharia de Sistemas e Computação  
email: [michele\\_ssousa@yahoo.com.br](mailto:michele_ssousa@yahoo.com.br)

**José André de Moura Brito**

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - Diretoria de Pesquisas - DPE  
Coordenação de Métodos e Qualidade – COMEQ  
Av. Chile , 500 – 10º andar, Rio de Janeiro, RJ.  
email: [jose.m.brito@ibge.gov.br](mailto:jose.m.brito@ibge.gov.br)

**Flávio Marcelo Tavares Montenegro**

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - Diretoria de Pesquisas - DPE  
Coordenação de Métodos e Qualidade – COMEQ  
Av. Chile , 500 – 10º andar, Rio de Janeiro, RJ.  
email: [fmontenegro@ibge.gov.br](mailto:fmontenegro@ibge.gov.br)

**Nelson Maculan**

COPPE/UFRJ – Programa de Engenharia de Sistemas e Computação  
email: [maculan@cos.ufrj.br](mailto:maculan@cos.ufrj.br)

### RESUMO

O planejamento de redes de telefonia celular de terceira geração (3G), baseadas na interface aérea WCDMA, é um problema que combina a localização das estações rádio base (ERBs) e o controle da potência, em múltiplos serviços, baseada em uma estimativa para o valor do *SIR* (*Signal-to-Interference Ratio*), que é a razão entre a potência do sinal de interesse (potência recebida) e a interferência total a que ele está sujeito. No presente trabalho, são apresentados algoritmos que combinam conceitos das metaheurísticas GRASP e VNS, com o objetivo de solucionar o problema de redes 3G. Resultados computacionais para instâncias de médio e grande porte são apresentados e discutidos.

**PALAVRAS CHAVE: Redes celulares 3G, Metaheurísticas e Programação Inteira. MH**

### ABSTRACT

The planning of third generation cellular networks (3G), based in aerial interface WCDMA, is a problem that combines the localization of radio base stations (BS) and the control of power, in multiple services, with basis on an estimate of the SIR value (Signal-to-Interference Ratio), that is the ratio between the power of the interest signal (received power) and the total interference over it. In the present work, algorithms that combine concepts of metaheuristics GRASP and VNS are presented, aiming to solve the third generation network problem. Computational results for medium and large size instances are presented and discussed.

**KEYWORDS: Cellular Networks, Integer Programming and Metaheuristics. MH**

## 1. INTRODUÇÃO

No decorrer dos últimos anos, a telefonia celular vem apresentando um grande crescimento no que concerne ao número de usuários e aos tipos de serviços e facilidades oferecidos. Este desenvolvimento é usualmente entendido como uma sequência de fases, ou gerações, caracterizadas de acordo com os padrões de tecnologia envolvidos em cada uma.

A primeira geração de sistemas de telefonia celular [10] caracterizou-se pela tecnologia analógica FDMA (*Frequency Division Multiple Access*). Em tais sistemas [14], a largura da banda era compartilhada entre os usuários mediante alocação de canais de frequência distintos. Já a segunda geração (2G), surgida no início da década de noventa [10], fazia o uso de tecnologia digital.

A atual geração (3G) busca a convergência das tecnologias de celular e de telefonia sem fio (*cordless*) em um sistema de comunicação pessoal único, no qual a unidade móvel evolui para plataformas multimídia com capacidade de acesso a múltiplos serviços de dados [1]. O sistema de telefonia móvel de terceira geração [15] é o UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*), formado por um conjunto de padrões válidos em todo mundo. Incorpora uma interface aérea caracterizada pela tecnologia WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*). O WCDMA é baseado na tecnologia CDMA (*Code Division Multiple Access*), diferenciando-se, contudo, pela maior largura de banda, permitindo taxas de transmissão mais altas e possibilitando a implantação de serviços multimídia.

Dentro deste escopo, temos o problema de planejamento de redes celulares de terceira geração, que combina a localização das estações rádio base (ERBs) e o controle da potência de transmissão. No que concerne à localização, dado um conjunto  $J$  de locais candidatos à instalação de um conjunto de ERBs, deve-se selecionar um subconjunto de locais nos quais as ERBs instaladas possam atender à demanda da rede com custo mínimo. Com respeito ao controle de potência, deve-se controlar a transmissão de cada usuário, evitando-se, desta forma, uma interferência para os demais usuários da rede, ou seja, deve-se minimizar a interferência (ruído).

De acordo com a literatura, poucos resultados de impacto foram conseguidos para a resolução do problema de planejamento de redes de terceira geração.

O desenvolvimento deste trabalho parte de uma formulação de programação inteira mista, proposta por Franqueira [10], que combina a localização das ERBs e o controle de potência, levando em conta múltiplos serviços, com diferentes requisitos de qualidade de sinal. A formulação considera dois níveis: um de sistema e outro estático. O primeiro nível indica que o funcionamento do enlace de rádio frequência do telefone celular não é retratado de forma detalhada. Já no segundo nível, o comportamento dinâmico do sistema, ou seja, a mobilidade dos usuários, a execução dos algoritmos de alocação de recursos e/ou uma variação rápida da potência de transmissão são praticamente negligenciados.

Considerando essa formulação, propõe-se no presente trabalho um conjunto de algoritmos implementados a partir do estudo das metaheurísticas GRASP e VNS. Tais algoritmos produziram soluções ótimas ou de boa qualidade para diversas instâncias do problema estudado.

Este trabalho está dividido conforme se segue. Na seção 2, são apresentados alguns conceitos de redes de telefonia celular. Na seção 3, apresentamos a formulação de

programação linear inteira mista, proposta por Franqueira [10]. Esta formulação sofreu uma pequena alteração, isto é, acrescentamos uma restrição. Ainda nessa seção, exporemos as várias abordagens que têm sido desenvolvidas para a resolução deste problema. Na seção 4, apresentamos os algoritmos baseados nas metaheurísticas GRASP e VNS desenvolvidos para o problema, considerando algumas variações. Concluindo, são apresentados alguns resultados computacionais obtidos a partir da aplicação dos algoritmos e da formulação.

## 2. CONCEITOS BÁSICOS DE TELEFONIA CELULAR

A finalidade de um sistema de telefonia celular [15] é permitir a comunicação entre dois telefones móveis ou entre telefones móveis e telefones fixos. Para isso, é utilizado um sistema composto por: (1) uma Rede de Telefonia Pública Comutada (RTPC), que atende aos telefones fixos, (2) uma Rede de Telefonia Móvel, associada à Central de Controle e Comutação (CCC), e (3) algumas Estações de Rádio Base (ERBs), além dos telefones celulares (TCs). A CCC comunica-se com as ERBs por meio de circuitos de voz e dados.

A CCC é responsável pelo controle de várias ERBs e pela monitoração de chamadas e do processo de *handover*, que é um mecanismo que se caracteriza pela mudança automática de chamada, à medida que o usuário se desloca de uma célula para outra. Em outras palavras, o enlace de rádio frequência do telefone celular é redirecionado para uma ERB mais próxima, com a finalidade de melhorar a transmissão. O *handover* é necessário [15] quando o telefone celular se afasta em demasia da ERB pela qual está sendo atendido ou quando entra em uma região de sinal fraco.

A conexão entre uma ERB e uma unidade móvel é disponibilizada por um canal de comunicação. Para os novos sistemas baseados no WCDMA, a largura de banda inteira disponível a um serviço é compartilhada por todos os usuários do sistema, tornando fundamental uma eficiente distribuição de frequências entre as ERBs.

### **O Conceito de Célula e Área de Cobertura**

A região ou área de cobertura geográfica [1] a ser atendida pelo serviço móvel celular é dividida em sub-regiões, que são chamadas células. A célula é a área geográfica coberta por uma ERB (estação de rádio base). Uma ERB é caracterizada pela presença de uma ou mais antenas fixas, instaladas em torres, e tem o objetivo de atender, dentro de sua área de cobertura, às demandas provenientes de outras ERBs ou de unidades móveis (celulares).

No sistema de telefonia celular, o termo "área de cobertura" refere-se à área geográfica em que uma unidade móvel pode ser atendida por alguma ERB do sistema.

### **O Problema de Planejamento de Redes Celulares de Terceira Geração**

O problema de planejamento de redes de terceira geração combina dois subproblemas: a localização de estações de rádio base (ERBs) e o controle de potência (considerando múltiplos serviços com taxas de transmissão e requisitos de qualidade diferenciados). No que concerne à localização, dado um conjunto  $J$  de locais candidatos à instalação das ERBs em uma região geográfica em estudo [1], deve-se selecionar um subconjunto de custo mínimo, observando as seguintes condições: a cobertura da área em estudo, o atendimento da demanda e a exploração eficiente do espectro de frequências no sistema UMTS. A minimização do número de ERBs instaladas é importantíssima. Não havendo alguma otimização neste processo, pode-se instalar um número elevado de ERBs em uma determinada região, acarretando em elevados gastos desnecessários para as operadoras.

Quanto ao controle de potência, cabe observar que em um sistema UMTS a transmissão de um usuário pode ser percebida como uma interferência pelos demais. Isto ocorre na mesma célula ou em células adjacentes. Logo, há a necessidade de se controlar a potência de transmissão de cada usuário, de forma a minimizar o ruído total na rede, isto é, a interferência na rede. Uma técnica comumente aplicada ao controle de potência se baseia em

uma estimativa para o valor do SIR (*Signal-to-Interference Ratio*), que é a razão entre a potência do sinal de interesse (potência recebida) e a interferência total a que ele está sujeito. O SIR pode ser representado pela seguinte equação:

$$SIR = SF \frac{P_{recebida}}{(1-\alpha)I_{int\ ra} + I_{int\ er} + \eta} \quad (1)$$

Nesta equação, temos que:

- $SF$  é o fator de espalhamento do sinal (*spreading factor*), dado por  $W/R$ , onde  $W$  (Hertz) corresponde à largura de banda de espalhamento do sinal específica da rede UMTS, de 3.84 (MHz), e  $R$  (Hertz) à taxa de transmissão do serviço em questão;
- $P_{recebida}$  é a potência recebida pela ERB do sinal emitido pela unidade móvel;
- $I_{int\ ra}$  é a interferência causada por transmissões na mesma célula (interferência intracélula). Tal interferência depende da quantidade de centros de demanda atendidos por uma determinada estação rádio base;
- $I_{int\ er}$  é a interferência gerada pelas células circunvizinhas (interferência intercélulas);
- $\alpha$  ( $0 \leq \alpha \leq 1$ ) é o fator de ortogonalidade, que indica o quanto um sinal de uma conexão (ligação entre a unidade móvel e a ERB) pode ser ortogonal em relação ao sinal de uma outra conexão, sendo  $\alpha = 1$  a ortogonalidade perfeita, o que implica em que os sinais de duas conexões distintas em uma mesma célula não causam interferência um no outro;
- $\eta$  é o ruído térmico, que mede  $-130dB$  (*decibéis*) =  $10^{-13}W$ , como proposto em [10].

A potência de transmissão é ajustada de modo a manter o  $SIR$  igual a um valor alvo, definido por  $SIR_{alvo}$ . A potência recebida de cada unidade móvel depende, em última instância, da potência emitida por todas as outras unidades. Dessa forma, há uma limitação na capacidade do sistema. A qualidade do sinal é garantida pela manutenção do  $SIR_{alvo}$  em um valor maior ou igual a um patamar mínimo  $SIR_{Alvo} \geq SIR_{Min}$ .

### 3. PANORAMA DO PROBLEMA

Esta seção apresenta uma explanação concisa dos principais estudos que têm sido desenvolvidos para a resolução do problema de planejamento de redes de terceira geração.

Iniciamos mencionando Galota *et al.* [11], que abordam a complexidade de se determinar a localização ótima de ERBs, de forma a suprir a uma demanda específica de tráfego em uma rede CDMA (*Code Division Multiple Access*).

Formulações de programação inteira, relacionadas ao clássico Problema de Localização de Facilidades não Capacitado [15], e algoritmos que apontam decisões no processo de localização das ERBs são estudados por Amaldi *et al.* [2, 3, 4]. A formulação de otimização tem dois objetivos: minimizar o custo total de instalação e favorecer as atribuições de pontos de teste às ERBs, utilizando a menor potência total.

Einsenblätter *et al.* [6] desenvolveram uma formulação matemática que otimiza a configuração e a localização de ERBs em um sistema UMTS. Os autores consideraram todas as restrições práticas relevantes ao projeto, como por exemplo, restrições para a localização de ERBs, restrição do SIR para o Enlace Reverso (sinal da unidade móvel para a antena) e restrição do SIR para o Enlace Direto (sinal da antena para unidade móvel). Contudo, de acordo com os autores, tal formulação se mostrou razoavelmente complexa (muitas variáveis e restrições), o que impossibilitou sua aplicação para a solução de problemas reais.

Kalvenes *et al.* [14] apresentam uma formulação de programação inteira para maximizar o lucro obtido pela instalação e operação de uma rede celular. Nessa formulação são fornecidos: um conjunto de locais candidatos à instalação de ERBs com seus respectivos

custos, os centros de demandas dos clientes e correspondentes demandas para o tráfego, e o potencial de rendimento (ganho monetário) para cada unidade móvel com capacidade de alocação em cada centro de demanda. Baseado nesses dados, a formulação pode ser utilizada para determinar a seleção dos locais em que serão instaladas as ERBs e a capacidade do serviço (conexões realizadas) da rede resultante.

Franqueira [10] propôs uma formulação de programação inteira mista considerando a localização de estações de rádio base, o controle de potência e os múltiplos serviços com taxas de transmissão e requisitos de qualidade diferenciados. Tendo em vista que tal formulação está associada ao problema de localização de facilidades não capacitado, um problema clássico de otimização NP-difícil, os pacotes comerciais não são capazes de resolver instâncias de médio e grande porte (com razoável número de centros de demanda e ERBs). Com a expectativa de tratar instâncias maiores, foi aplicada a técnica de Relaxação Lagrangeana [9] para a determinação de limites inferiores e superiores para o problema.

Visando simultaneamente à minimização da potência das ERBs e à maximização da capacidade disponível no sistema e da quantidade de usuários com cobertura, sem perda de qualidade no serviço oferecido, Rueda [18] apresentou um modelo matemático de otimização baseado no artigo de Siomina [19] e implementou dois algoritmos baseados nas metaheurísticas Algoritmo Genético e *Simulated Annealing*. Para avaliação dos algoritmos, foram utilizados dados disponibilizados pelo projeto MOMENTUM [16]. Os algoritmos atingiram os objetivos propostos, isto é, reduzir a potência máxima de transmissão da ERB  $j$ ; aumentar a média dos valores da razão de capacidade entre a ERB  $j$  e o centro de demanda (CD)  $i$ ; aumentar a cobertura para um sistema de terceira geração.

Bechelane et al. [5] apresentaram dois modelos de programação inteira mista para o problema de planejamento de redes celulares 3G, considerando a localização das ERBs e o uso dos mecanismos de controle de potência nos enlaces direto e reverso e no canal piloto. Foi implementado um algoritmo genético. Os resultados obtidos foram comparados com os de Santos et al. (2005), constatando-se que a introdução do controle de potência no enlace direto resulta em menores potências de transmissão.

### 3.1 FORMULAÇÃO CONSIDERANDO O SISTEMA UMTS

Conforme descrito anteriormente, o sistema UMTS supõe a demanda por múltiplos serviços com diferentes requisitos de qualidade do sinal em termos do SIR.

A formulação assume que todas as ERBs são idênticas (mesmo número e tipo de antenas) e capazes de atender a todos os serviços em um conjunto de serviços ( $S$ ) oferecidos na rede, não existindo qualquer restrição ao atendimento de um centro de demanda (CD)  $i$  ( $i \in I$ ) por uma ERB  $j$  ( $j \in J$ ), além da manutenção da qualidade do sinal para o enlace reverso.

Foi assumido que cada CD  $i$  tem demanda diferente de zero para pelo menos um serviço  $s \in S$ . Seja, então,  $S_i$  o conjunto dos serviços utilizados pelo CD  $i$ , para os quais  $a_i^s > 0$ , sendo  $a_i^s$  o número de conexões ativas para o serviço  $s$  no centro de demanda  $i$ .

De acordo com os múltiplos serviços disponibilizados, será necessário diferenciar as potências de transmissão. Sendo assim, define-se uma variável de decisão real  $p_{ij}^{\uparrow s}$ , que representará a potência transmitida no enlace reverso pelo CD  $i \in I$  em direção à ERB  $j \in J$  para o serviço  $s \in S_i$ .

Sejam:

- $f_j$  o custo de instalação de uma ERB no local candidato  $j$ ;
- $x_{ij}$  a variável de decisão que assumirá o valor 1, se o centro de demanda  $i$  for atendido pela ERB  $j$  e 0, caso contrário;

- $y_j$  a variável de decisão que assumirá o valor 1, se uma ERB for instalada no local candidato  $j$  e 0, caso contrário;
- $p_{ij}^{\uparrow s}$  a variável que representa a potência real de transmissão no enlace reverso a partir do centro de demanda  $i$  para a ERB  $j$ , visando ao atendimento do serviço  $s$ ;
- $c_{ij}$  o parâmetro que indica se a ERB instalada no local  $j$  pode atender ao centro de demanda  $i$ ;
- $C$  o número mínimo de locais candidatos a selecionar;
- $\eta_j$  o ruído térmico percebido no local  $j$ ;
- $a_m^q$  o número de conexões ativas para o serviço  $q$  no centro de demanda  $m$ ;
- $g_{ij}$  o ganho de propagação no enlace entre o centro de demanda  $i$  e o local candidato  $j$ ;
- $P_{max}$  a potência de transmissão máxima permitida no canal;
- $P_{min}^{is}$  a potência de transmissão mínima necessária para o CD  $i$  e para o serviço  $s$ .

$$\text{Minimizar} \quad \sum_{j \in J} f_j y_j + \lambda \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} a_i^s p_{ij}^{\uparrow s} \quad (2)$$

$$\text{Sujeito a:} \quad \sum_{j \in J} c_{ij} x_{ij} \geq 1, \quad \forall i \in I \quad (3)$$

$$\sum_{j \in J} y_j \geq C \quad (4)$$

$$x_{ij} \leq y_j, \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (5)$$

$$p_{ij}^{\uparrow s} \leq x_{ij}, \quad \forall i \in I, \forall j \in J \text{ e } \forall s \in S_i \quad (6)$$

$$x_{ij} \left( \sum_{m \in I} \sum_{n \in J} \sum_{q \in S} a_m^q p_{mn}^{\uparrow q} g_{mj} - p_{ij}^{\uparrow s} g_{ij} + \eta_j \right) \leq \frac{p_{ij}^{\uparrow s} g_{ij}}{SIR_{alvo}^s} \quad (7)$$

$$\forall i \in I, j \in J \text{ e } s \in S_i$$

$$\sum_{j \in J} p_{ij}^{\uparrow s} \geq P_{min}^{is}, \quad \forall i \in I \text{ e } s \in S_i \quad (8)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \quad \forall i \in I \text{ e } j \in J \quad (9)$$

$$y_j \in \{0,1\}, \quad \forall j \in J \quad (10)$$

$$0 \leq p_{ij}^{\uparrow s} \leq P_{max} \quad \forall i \in I, j \in J \text{ e } s \in S_i \quad (11)$$

onde  $\lambda$  é um parâmetro utilizado na ponderação entre o custo de instalação das ERBs e a soma das potências de transmissão das unidades móveis, sendo o custo expresso em unidades monetárias e a soma das potências expressa em Watts.

Nesta formulação, a função objetivo (2) busca minimizar o custo total de instalação das ERBs e a potência transmitida pelo conjunto de unidades móveis. As restrições (3) garantem que os centros de demandas sejam cobertos por pelo menos uma ERB. A restrição (4) garante um conjunto de ERBs ativas que atenda a toda a demanda da rede. As restrições (5) garantem que uma ERB  $j$  ficará ativa se ela for utilizada para atender a um CD  $i$ . As restrições (6) garantem que uma potência só poderá receber um valor diferente de zero, se for associada a um CD coberto por uma ERB ativa. As restrições (7) asseguram que se um CD  $i$  é

atendido pelo local candidato  $j$ , então o valor do SIR da conexão resultante será suficientemente elevado, ou seja, excederá o valor do  $SIR_{alvo}$  definido para cada serviço, e as restrições (8) impõem um valor mínimo para as potências de transmissão. As restrições de integralidade (9) e (10) garantem que as variáveis apenas podem assumir valores inteiros no intervalo  $[0,1]$ . Finalmente, as restrições (11) definem o intervalo de valores válidos para as potências de transmissão associadas às variáveis reais  $p_{ij}^{\uparrow s}$ .

#### 4. ALGORITMOS

No modelo apresentado em (3.1), o número de variáveis binárias é da ordem de  $(|I| \cdot |J| + |J|)$ , sendo o primeiro termo correspondente à variável  $x_{ij}$  e o segundo termo a  $y_j$ . O número de variáveis reais é da ordem de  $|I| \cdot |J| \cdot |S|$ , devido às potências  $p_{ij}^{\uparrow s}$ . O número total de variáveis é da ordem de  $(|I| \cdot |J| \cdot |S| + |I| \cdot |J| + |J|)$ . Assim, dependendo do número de CDs e de locais candidatos à instalação das ERBs, pode-se ter que resolver um problema com milhares ou milhões de variáveis, o que implicará na efetiva utilização da formulação apenas para instâncias de tamanho moderado. Para instâncias maiores, mesmo fixado um razoável tempo para execução da formulação (5, 10, 24 horas), possivelmente, serão obtidas apenas soluções viáveis ou até mesmo nenhuma solução.

Com a perspectiva de resolver instâncias maiores e produzir soluções de qualidade razoável em um tempo computacional menor, quando comparado ao da formulação, foram desenvolvidos neste trabalho novos algoritmos que utilizam os conceitos das metaheurísticas GRASP e VNS. Os algoritmos implementados trabalham em duas fases, determinando, primeiramente, o número de ERBs a serem ativadas e, em seguida, a potência de transmissão no enlace reverso a partir do CD  $i$  para a sua respectiva ERB  $j$  atendendo o serviço  $s$ .

A partir da aplicação dos novos algoritmos, temos como resultado as potências de transmissão, a seleção de um conjunto de ERBs e os seus respectivos CDs, produzindo, desta forma, uma solução ótima ou de boa qualidade para o problema estudado.

##### 4.1 GRASP

O procedimento GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*), desenvolvido por Feo e Resende [7, 8], tem sido aplicado com sucesso em uma série de problemas de otimização combinatória. É constituído por uma fase de construção, na qual se obtém uma solução viável  $x_0$ , seguida pela fase de busca local, onde se investiga uma vizinhança de  $x_0$ , até que seja encontrado um ótimo local, de qualidade superior ao obtido na fase de construção. O resultado do GRASP é dado pela melhor solução obtida após um número  $n$  pré-determinado de iterações completas de construção e busca local.

Na fase de construção, uma solução é iterativamente construída elemento a elemento, ou seja, em cada iteração desta fase, temos uma lista de candidatos ( $LC$ ) com todos os elementos que podem ser incorporados na solução parcial  $x_0$ , sem provocar inviabilidade.

Definida a  $LC$ , deve-se avaliar todos os seus elementos através de uma função gulosa  $g(\cdot)$ , associada ao custo de se adicionar um novo elemento  $t \in LC$  na solução parcial  $x_0$ .

Para conferir maior variabilidade às soluções, pode-se definir uma lista de candidatos restrita ( $LCR$ ), formada pelos elementos da  $LC$  com melhor valor de  $g$ , quais sejam, aqueles que ao serem incorporados em  $x_0$  produzem um acréscimo mínimo (caso de minimização).

Este processo representa o aspecto *guloso* do GRASP, pois temos sempre os melhores elementos para serem incorporados na solução. Um possível esquema para a construção da  $LCR$  (vide Feo e Resende [8]) consiste em cada iteração da fase de construção, definir  $\underline{g}$  e  $\bar{g}$ , respectivamente, como o menor e o maior acréscimos provocados pela

inserção de um elemento  $t \in LC$  na solução  $x_0$ , segundo a função gulosa  $g(\cdot)$ . A partir da utilização desta função e dos valores  $\underline{g}$  e  $\bar{g}$ , definimos:  $LCR = \{t \in LC \mid g(t) \leq \underline{g} + \alpha(\bar{g} - \underline{g})\}$ ,  $\alpha \in [0,1]$ . Quando  $\alpha = 0$ , o procedimento de construção torna-se *guloso*, pois a  $LCR$  tem apenas um elemento, e quando  $\alpha = 1$ , produzimos uma solução aleatória, tendo em vista que a  $LCR$  terá todos os elementos da  $LC$ . Na segunda fase, de busca local, procura-se melhorar a solução inicial  $x_0$  obtida na primeira fase. A busca local consiste em substituir  $x_0$  pela melhor solução  $x_0'$  encontrada na vizinhança de  $x_0$  [7].

Objetivando produzir melhores soluções na busca local, introduz-se o chamado procedimento de filtro, que consiste em produzir  $q$  soluções na fase de construção e, dentre estas, escolher a melhor para busca local.

## 4.2 VNS

O VNS (*Variable Neighborhood Search*), proposto por Mladenovic e Hansen [13], busca uma exploração eficiente do espaço de soluções através de uma troca sistemática de estruturas de vizinhança. O VNS explora vizinhanças gradativamente mais distantes da solução corrente, focalizando a busca numa região em torno de uma nova solução, se e somente se um movimento de melhoria (na função objetivo) é realizado.

O algoritmo de busca local deve realizar uma sequência de modificações em uma vizinhança de uma solução, procurando melhorar o valor da função objetivo, até que um ótimo local seja encontrado. Contudo, como em geral o ótimo local está distante do global, busca-se analisar o valor da função objetivo em outras vizinhanças, a fim de encontrar soluções melhores. Para tanto, aumenta-se a vizinhança, buscando-se soluções mais distantes da solução corrente e, desta forma, o VNS escapa de ótimos locais.

No algoritmo VNS básico [13], seleciona-se aleatoriamente uma solução  $x_0' \in V_k(x_0)$  na  $k$ -ésima vizinhança da solução corrente, submetendo-a a uma busca local. Se a busca local não obtiver uma solução melhor que a atual, incrementamos a ordem da vizinhança corrente e, assim, passamos a explorar a solução em outra vizinhança  $V_{k+1}$ . Caso contrário, atualizamos a solução e reduzimos a ordem da vizinhança a 1 (vizinhança  $V_1$ ). Este processo se repete até algum critério de parada ser satisfeito.

## 4.3 ALGORITMOS PROPOSTOS

Nesta seção, detalhamos três algoritmos heurísticos propostos neste trabalho, diferenciando-se pelo tipo de busca local empregada. A fase de construção, comum às três propostas, segue os seguintes passos:

### Fase de Construção:

**Passo 0:** A lista de candidatos ( $LC$ ) é constituída por todas as ERBs que podem ser instaladas na rede.

**Passo 1:** Constrói-se a lista de candidatos restrita ( $LCR$ ), formada por algumas ERBs da  $LC$ . Através de uma função  $g(\cdot)$ , avalia-se o ganho obtido, em termos de cobertura, ao selecionar-se uma ERB  $j \in LC$  para compor a rede. Em cada iteração desta fase, para toda ERB  $j \in LC$ , definimos  $g(j) = 1/M_j$ , sendo  $M_j$  o número de CDs cobertos pela ERB  $j$ . Calculando-se  $\underline{g}$ ,  $\bar{g}$  e fixando  $\alpha = 0.5$ , define-se a  $LCR$  (vide seção 4.1).

**Passo 2:** Seleciona-se aleatoriamente uma ERB da  $LCR$  para compor o conjunto solução, definido por  $C_{ERB}$ . A aleatoriedade confere variabilidade às soluções produzidas nesta fase.

**Passo 3:** Atualiza-se a  $LC$  removendo a ERB que foi adicionada à solução ( $C_{ERB}$ ).

Os passos (1), (2) e (3) são repetidos até que todos os centros de demanda (CDs) estejam cobertos por pelo menos uma das ERBs da solução. Caso um CD  $i$  seja coberto por



mais de uma ERB da solução, deve-se associá-lo à ERB  $j$  ( $j \in C_{ERB}$ ) com maior ganho de propagação  $g_{ij}$ , de forma a garantir uma melhor qualidade dos serviços prestados aos CDs.

**Passo 4:** Calcula-se a potência de transmissão a ser alocada a partir do CD  $i$  para a sua respectiva ERB  $j$  atendendo o serviço  $s$ . Essas potências são obtidas a partir da discretização das potências mínimas referentes a cada serviço, ou seja, para cada tipo de serviço  $s$ , é construído um vetor  $p$  com  $j$  posições, atribuindo-se à primeira posição e à última, respectivamente, os valores da potência mínima ( $p_{\min}$ ) e da potência máxima ( $p_{\max}$ ) disponibilizadas para o serviço. As demais posições (2,3,...,i, ...,j) deste vetor são preenchidas usando-se a equação:  $p_i = p_{\min} + (p_{\max} - p_{\min})/q$ , onde  $q$  é o número de divisões.

Em seguida, verificamos se as restrições do SIR (7) são satisfeitas, levando em conta cada um dos serviços disponibilizados e considerando que tenha sido atribuído ao centro de demanda  $i$  o menor valor associado a  $p_i$ . O valor do SIR da conexão de um CD  $i$  atendido pela ERB  $j$  deve exceder o valor do  $SIR_{alvo}$  definido para cada serviço. Sendo assim, para cada restrição (7) não satisfeita, deve-se verificar qual serviço precisa de uma potência maior para atender ao valor do SIR. Uma vez determinado qual é esse serviço, passa-se para a próxima posição do vetor de discretização relacionado ao mesmo, repetindo-se esse processo até que todas as restrições (7) sejam satisfeitas.

#### **Algoritmo (1): GRASP com Busca Local Simples (GRBLS)**

Para cada ERB do conjunto solução  $C_{ERB}$  (fase de construção), verifica-se a possibilidade de retirá-la, realocando-se os seus centros de demanda para as ERBs restantes de  $C_{ERB}$ , sem violar as restrições (3), (4) e (5). Repete-se o processo enquanto for possível retirar ERBs da solução. Ao final, recalculam-se as potências de transmissão (Passo 4 da fase de construção).

#### **Algoritmo (2): GRASP com VNS 1 (GRVNS1)**

**Passo 1:** A cada iteração múltipla de 5 do algoritmo, aplica-se a busca local descrita nos passos 2, 3 e 4, nas demais iterações, a busca local do GRBLS.

**Passo 2:** Aplica-se um procedimento VNS, no qual a primeira vizinhança se caracteriza pela troca de uma ERB ativa ( $C_{ERB}$ ) por uma não ativa. Após cada troca, caso as restrições (3), (4) e (5) sejam satisfeitas, calcula-se a potência de transmissão a ser alocada a partir do CD  $i$  para a sua respectiva ERB  $j$  no atendimento do serviço  $s$ . O cálculo da potência de transmissão é o mesmo do passo 4 do algoritmo de construção. Em seguida, caso o valor da função objetivo tenha sido reduzido, atualizamos o conjunto de ERBs ativas e o valor da função objetivo. Este processo se repete até que todas as trocas de ERBs ativas por ERBs não ativas tenham sido testadas.

**Passo 3:** Trocar duas ERBs ativas por uma não ativa. Se as restrições (3), (4) e (5) permanecem satisfeitas, calculam-se as potências de transmissão e atualiza-se o valor da função objetivo, caso este tenha sido reduzido. Este processo se repete até que todas as combinações tenham sido testadas.

**Passo 4:** Análogo ao passo 3, mas trocam-se três ERBs ativas por duas não ativas.

#### **Algoritmo (3): GRASP com VNS 2 (GRVNS2)**

**Passo 1:** Idêntico ao passo 1 do GRVNS1.

**Passo 2:** Selecionamos, na primeira vizinhança, todas as ERBs não ativas, verificando dentre estas aquela que cobre o maior número de CDs. Em seguida, selecionamos dentre as  $k$  ERBs ativas duas ERBs que cubram o menor número de CDs, substituindo-as pela ERB inativa com a maior cobertura. Após cada troca, caso as restrições (3), (4) e (5) sejam satisfeitas, calculam-se as potências de transmissão (passo 4 do algoritmo de construção). Em seguida, havendo redução no valor da função objetivo, atualizamos a solução e o valor da função. Este processo se repete até que todas as ERBs inativas que cobrem a mesma quantidade de CDs (maior número de CDs) tenham sido testadas.

**Passo 3:** Seleccionamos na segunda vizinhança todas as ERBs não ativas, verificando dentre estas as ERBs que cobrem a primeira e a segunda maior quantidade de CDs. Em seguida, verificamos dentre as  $k$  ERBs ativas as três estações que cobrem o menor número de CDs, substituindo-as pelas ERBs inativas com a primeira e a segunda maior cobertura de CDs. Após cada troca, verificamos novamente se as restrições (3), (4) e (5) são satisfeitas, calculamos as potências de transmissão e atualizamos o valor da função objetivo caso este tenha sido reduzido. Este processo se repete até que todas as ERBs inativas que cobrem a mesma quantidade de CDs (maior e segundo maior número de CDs) tenham sido testadas.

**Passo 4:** Análogo ao passo 3, diferenciando-se apenas pela escolha de três ERBs dentre todas as ERBs inativas que substituíram as 4 ERBs ativas (dentre as  $k$ ) que cobrem o menor número de CDs. Atualizamos o valor da função objetivo, caso este tenha sido reduzido, e repetimos o processo até que todas as ERBs inativas que cobrem a mesma quantidade de CDs (maior, segundo maior e terceiro maior número de CDs) tenham sido testadas.

**Passo 5:** Análogo aos passos 3 e 4, diferenciando-se apenas pela escolha de quatro ERBs dentre todas as ERBs inativas, repetindo-se o processo até que todas as ERBs inativas que cobrem a mesma quantidade de CDs tenham sido testadas.

**Passos 5, 6 e 7:** Análogos aos passos 3 e 4, considerando, respectivamente, a seleção de três, quatro e cinco ERBs inativas dentre as cinco com maior probabilidade de cobertura.

## 5. RESULTADOS COMPUTACIONAIS

A presente seção contém resultados para um conjunto de instâncias utilizadas pelos algoritmos e pela formulação de Franqueira [10], que sofreu uma pequena alteração, qual seja, a inclusão de uma restrição, que garante que uma potência  $p_{ij}$  só poderá receber valor diferente de zero se esta for associada a um CD  $i$ , coberto por uma ERB  $j$ . Os algoritmos propostos foram desenvolvidos em linguagem C, e a formulação foi implementada, utilizando o pacote de otimização LINGO (versão 7). Em particular, neste pacote foi utilizado o método de Branch and Bound [20] para resolução da formulação. Os resultados foram obtidos em uma máquina com processador Pentium Core 2 Duo de 1.73 GHz, 2 GB de memória RAM e sistema operacional Windows XP. As instâncias utilizadas neste trabalho foram obtidas a partir de um gerador aleatório de problemas, para o qual são fornecidos os seguintes parâmetros de entrada: a quantidade de locais candidatos para a instalação de ERBs, o comprimento e a largura de cada CD, o comprimento e a largura da área a ser coberta, o número de classes de serviços e o percentual de centros de demanda. Maiores detalhes sobre a geração de dados podem ser obtidos no trabalho de Franqueira [10].

Em relação aos parâmetros da formulação, atribuiu-se 1,0 ao custo de instalação das ERBs ( $f_j$ ) e  $-130 \text{ dB} = 10E - 13 \text{ W}$  ao ruído térmico ( $\eta_j$ ) percebido em cada uma das antenas para todo local candidato  $j \in J$ . A demanda ( $s$ ) em cada CD  $i \in I$  foi fixada em 1. A potência máxima ( $P_{\max}$ ) de transmissão foi fixada em  $30 \text{ dB} = 1 \text{ W}$  e  $\lambda = 1$ . Estes valores fixados foram empregados em outros trabalhos da literatura. Os ganhos de propagação do sinal ( $g_{ij}$ ) foram calculados através de um modelo de redes celulares de terceira geração, válidos para frequências de 1.5 a 2.0 GHz [12].

### 5.1 RESULTADOS

A tabela 1 contém informações sobre instâncias com 1 serviço. Nesta tabela, a coluna 1 representa a instância com o número de CDs e ERBs. As colunas 2, 3 e 4 contêm a solução da formulação (valor da função objetivo), as ERBs ativas e o tempo de processamento (em segundos). Observe-se que o tempo máximo de processamento da formulação foi fixado em 12 horas. Os resultados dos algoritmos GRBLS, GRVNS1, GRVNS2, são apresentados respectivamente pelos quartetos de colunas (5, 6, 7, 8), (9, 10, 11, 12) e (13, 14, 15, 16). Cada

quarteto mostra o valor da função objetivo, as ERBs ativas, o tempo  $T$  de processamento (em segundos) e o  $Gap$ , que foi definido como:  $100 * | sol_{algoritmo} - sol_{formulação} | / sol_{formulação}$

Na execução dos algoritmos, fixamos o número de iterações em 100, o número de filtros em 20 e o valor do parâmetro  $\alpha$  em 0.5.

Observando os resultados obtidos para as 60 instâncias com 1 serviço, utilizadas neste trabalho, podemos fazer as seguintes considerações:

- A formulação atingiu o ótimo global em 45 (75%) das 60 instâncias e pelo menos um dos algoritmos produziu o ótimo global para as mesmas instâncias, com dispêndio de tempo em geral menor do que o da formulação;
- O GRBLS encontrou a solução ótima em 80% das instâncias resolvidas pela formulação e uma solução melhor em 40 % das instâncias não resolvidas (em 12 horas, pelo LINGO);
- O GRVNS1 encontrou a solução ótima em 93,33% das instâncias resolvidas. Em 73,33% das instâncias não resolvidas, encontrou soluções melhores e, nas demais instâncias (26,67 %), encontrou soluções iguais à do LINGO, em um tempo computacional menor;
- O GRVNS2 encontrou a solução ótima em 97,78% das instâncias resolvidas. Considerando as instâncias não resolvidas pelo LINGO (12 horas), o GRVNS2 encontrou soluções melhores em 40%, soluções iguais em 53,33% e soluções piores em 6,67% dos casos;
- O GRVNS1 é o mais estável, pois apresenta resultados melhores ou iguais ao da formulação para todas as instâncias não resolvidas pelo LINGO, contudo o GRVNS2 apresenta um maior número de soluções ótimas para as instâncias resolvidas pela formulação.

**Tabela 1 – Resultados da Formulação e dos Algoritmos, utilizando 1 serviço**

Instancias	Formulação			GRBSL				GRVNS1				GRVNS2			
	Fobj	Erbs	T	Fobj	Erbs	T	Gap	Fobj	Erbs	T	Gap	Fobj	Erbs	T	Gap
CD_ERB_50_10	18.229	7	0	18.229	7	1	0.00%	18.229	7	1	0.00%	18.229	7	0	0.00%
CD_ERB_50_20	17.229	6	2	17.229	6	0	0.00%	17.229	6	2	0.00%	17.229	6	0	0.00%
CD_ERB_50_30	17.229	6	5	17.229	6	1	0.00%	17.229	6	2	0.00%	17.229	6	1	0.00%
CD_ERB_70_30	22.721	7	8	23.721	8	1	4.40%	22.721	7	2	0.00%	22.721	7	2	0.00%
CD_ERB_70_40	22.721	7	1549	22.721	7	3	0.00%	22.721	7	8	0.00%	22.721	7	3	0.00%
CD_ERB_80_30	25.967	8	12	25.967	8	2	0.00%	25.967	8	5	0.00%	25.967	8	2	0.00%
CD_ERB_80_40	22.967	5	864	22.967	5	2	0.00%	22.967	5	2	0.00%	22.967	5	1	0.00%
CD_ERB_90_10	26.213	6	2	26.213	6	1	0.00%	26.213	6	1	0.00%	26.213	6	1	0.00%
CD_ERB_90_20	28.213	8	6	28.213	8	1	0.00%	28.213	8	2	0.00%	28.213	8	1	0.00%
CD_ERB_90_30	26.213	6	17	27.213	7	1	3.81%	26.213	6	4	0.00%	26.213	6	1	0.00%
CD_ERB_90_40	28.213	8	6	29.213	9	3	3.54%	28.213	8	167	0.00%	29.213	9	2	0.00%
CD_ERB_90_50	27.213	7	5195	28.213	8	4	3.67%	28.213	8	11	3.67%	27.213	7	4	0.00%
CD_ERB_100_10	28.459	6	2	28.459	6	1	0.00%	28.459	6	2	0.00%	28.459	6	1	0.00%
CD_ERB_100_20	30.459	8	7	30.459	8	2	0.00%	30.459	8	5	0.00%	30.459	8	3	0.00%
CD_ERB_100_30	30.459	8	19	30.459	8	1	0.00%	30.459	8	4	0.00%	30.459	8	2	0.00%
CD_ERB_100_40	30.459	8	60	30.459	8	3	0.00%	30.459	8	9	0.00%	30.459	8	3	0.00%
CD_ERB_100_50	30.459	8	43200	29.459	7	3	3.28%	29.459	7	1	3.28%	29.459	7	3	3.28%
CD_ERB_110_20	31.705	7	16	31.705	7	0	0.00%	31.705	7	2	0.00%	31.705	7	1	0.00%
CD_ERB_110_30	32.705	8	2131	32.705	8	2	0.00%	32.705	8	7	0.00%	32.705	8	2	0.00%
CD_ERB_110_40	31.705	7	1322	32.705	8	2	3.15%	32.705	8	15	3.15%	31.705	7	3	0.00%
CD_ERB_120_20	34.951	8	6	34.951	8	2	0.00%	34.951	8	4	0.00%	34.951	8	2	0.00%
CD_ERB_120_30	33.951	7	268	34.951	8	2	2.95%	33.951	7	4	0.00%	34.951	8	2	2.95%
CD_ERB_120_40	33.951	7	11216	33.951	7	2	0.00%	33.951	7	6	0.00%	33.951	7	3	0.00%
CD_ERB_140_20	40.443	9	17	40.443	9	1	0.00%	40.443	9	2	0.00%	40.443	9	2	0.00%
CD_ERB_140_30	40.443	9	100	40.443	9	3	0.00%	40.443	9	18	0.00%	40.443	9	4	0.00%
CD_ERB_140_40	42.443	11	43200	40.443	9	3	4.71%	40.443	9	17	4.71%	40.443	9	4	4.71%
CD_ERB_140_50	41.443	10	43200	40.443	9	5	2.41%	40.443	9	16	2.41%	40.443	9	4	2.41%
CD_ERB_150_20	44.689	11	15	44.689	11	7	0.00%	44.689	11	17	0.00%	44.689	11	9	0.00%
CD_ERB_150_30	47.689	14	34	47.689	14	12	0.00%	47.689	14	85	0.00%	47.689	14	15	0.00%
CD_ERB_150_40	44.689	11	83	44.689	11	5	0.00%	44.689	11	25	0.00%	44.689	11	6	0.00%
CD_ERB_150_50	41.689	8	43200	41.689	8	4	0.00%	41.689	8	9	0.00%	41.689	8	4	0.00%
CD_ERB_160_20	46.935	11	18	46.935	11	7	0.00%	46.935	11	16	0.00%	46.935	11	8	0.00%
CD_ERB_160_30	46.935	11	63	46.935	11	3	0.00%	46.935	11	15	0.00%	46.935	11	4	0.00%
CD_ERB_160_40	46.935	11	7239	46.935	11	5	0.00%	46.935	11	8	0.00%	46.935	11	6	0.00%
CD_ERB_160_50	46.935	11	43200	45.935	10	5	2.13%	45.935	10	12	2.13%	46.935	11	6	0.00%
CD_ERB_170_20	48.181	10	31	49.181	11	3	2.08%	48.181	10	49	0.00%	48.181	10	4	0.00%
CD_ERB_170_30	48.181	10	304	49.181	11	3	2.08%	48.181	10	14	0.00%	48.181	10	4	0.00%
CD_ERB_170_40	48.181	10	43200	48.181	10	4	0.00%	47.181	9	13	2.08%	48.181	10	5	0.00%
CD_ERB_170_50	49.181	11	43200	49.181	11	5	0.00%	48.182	10	69	2.03%	49.181	11	2	0.00%
CD_ERB_180_20	50.427	10	39	50.427	10	6	0.00%	50.427	10	15	0.00%	50.427	10	8	0.00%
CD_ERB_180_30	51.427	11	51	51.427	11	3	0.00%	51.427	11	27	0.00%	51.427	11	5	0.00%
CD_ERB_180_40	50.427	10	43200	50.427	10	4	0.00%	49.427	9	12	1.98%	49.427	9	4	1.98%
CD_ERB_180_50	51.427	11	43200	51.427	11	6	0.00%	51.427	11	41	0.00%	51.427	11	6	0.00%
CD_ERB_190_20	52.673	10	32	54.673	12	11	3.80%	53.673	11	2	1.86%	52.673	10	3	0.00%
CD_ERB_190_30	52.673	10	222	52.673	10	3	0.00%	52.673	10	12	0.00%	52.673	10	4	0.00%
CD_ERB_190_40	52.673	10	43200	54.673	12	5	3.80%	52.673	10	239	0.00%	53.673	11	6	1.90%
CD_ERB_190_50	53.673	11	43200	53.673	11	6	0.00%	52.673	10	64	1.86%	53.673	11	6	0.00%
CD_ERB_200_20	58.919	14	25	58.919	14	19	0.00%	58.919	14	29	0.00%	58.919	14	21	0.00%
CD_ERB_200_30	53.919	9	71	53.919	9	8	0.00%	53.919	9	33	0.00%	53.919	9	11	0.00%
CD_ERB_200_40	60.919	16	106	60.919	16	26	0.00%	60.919	16	363	0.00%	60.919	16	32	0.00%
CD_ERB_200_50	58.919	14	43200	57.919	13	8	1.70%	57.919	13	107	1.70%	57.919	13	9	1.70%
CD_ERB_200_60	60.919	16	394	60.919	16	14	0.00%	60.919	16	198	0.00%	60.919	16	16	0.00%
CD_ERB_200_70	57.919	13	383	57.919	13	16	0.00%	57.919	13	75	0.00%	57.919	13	18	0.00%
CD_ERB_220_30	53.919	9	71	53.919	9	8	0.00%	53.919	9	33	0.00%	53.919	9	10	0.00%
CD_ERB_220_40	59.411	10	43200	59.411	10	4	0.00%	59.411	10	19	0.00%	59.411	10	7	0.00%
CD_ERB_220_50	62.411	13	43200	62.411	13	7	0.00%	62.411	13	121	0.00%	62.411	13	8	0.00%
CD_ERB_220_60	64.411	15	43200	61.411	12	8	4.66%	61.411	12	114	4.66%	61.411	12	8	4.66%
CD_ERB_250_40	75.149	19	158	75.149	19	22	0.00%	75.149	19	489	0.00%	75.149	19	27	0.00%
CD_ERB_250_50	78.149	22	256	78.149	22	74	0.00%	78.149	22	2041	0.00%	78.149	22	87	0.00%
CD_ERB_250_60	73.149	17	358	73.149	17	16	0.00%	73.149	17	341	0.00%	73.149	17	21	0.00%

\*Valores em vermelho – formulação não atingiu o ótimo global, \*\*Valores em azul – solução do algoritmo melhor do que a da formulação

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Alencar, M. S., *Telefonia Celular Digital*. Érica, 149 - 400, 2004.
- [2] Amaldi, E., Capone, A., Malucelli, F. ( 2001), Base station configuration and location problems in UMTS networks. *In Proceedings of the 9th International Conference on telecommunication Systems*, Dallas, USA, 341-348.
- [3] Amaldi, E., Capone, A., Malucelli, F. (2001), Discrete models and algorithms for the capacitated location problems arising in UMTS network planning. *In Proceedings of the 5th International Workshop on Discrete Algorithms and Methods for Mobile Computing and Communications ACM DIAL-M*, Rome, Italy, 1-8.
- [4] Amaldi, E., Capone, A., Malucelli, F. ( 2001), Improved models and algorithms for UMTS radio planning. *IEEE Vehicular Technology Conference*, 2 (54) , 920 - 924.

- [5] **Bechelane, C.O., Mateus, G. R.** (2008), Planejamento e simulação de redes celulares de terceira geração com controle de potência e múltiplos serviços. *In XL Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2008, João Pessoa*. Anais do 40o. Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional.
- [6] **Einsenblätter, A., Fügenschuh, A., Koch, T., Koster, A., Martin, A., Pfender, T., Wegel, O., Wessäly, R.** (2002), Modelling Feasible Network Configurations for UMTS. *Technical Report ZIB-Repor 02-16*, Konrad- Zuse- Zentrum für Informationstechnik.
- [7] **Feo, T., Resende, M.** (1989), A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problem. *Operations Research*, 8(2), 67-71.
- [8] **Feo, T., Resende, M.** (1995), Greedy randomized adaptive search procedures. *J. Global Optimization* 6, 109-133.
- [9] **Fisher, M. L.** (1981), The Lagrangean Relaxation Method for Solving Integer Programming Problem. *Management Science*, 27, 1-18.
- [10] **Franqueira, R. V. L.**, Planejamento de Redes Celulares de Terceira Geração Considerando Localização de Estações Rádio-Base, Controle de Potência e Múltiplos Serviços. *Dissertação de Mestrado*, DCC-UFMG, Belo Horizonte, MG, 2003.
- [11] **Galota, M., GlaBer, C., Leibnitz, K., Reith, S., Tran-Gia, P., Vollmer, H., Wagner, K.** (2001), A polynomial Time Approximation Scheme for Base station positioning in UMTS networks. *In 5th International Workshop on Discrete Algorithms and Methods for Mobile Computing and Communications*. Roma, Itália, 1-8.
- [12] **Hata, M.** (1980), Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Service, *In: IEEE Transactions on Vehicular Technology* 29, 3, 17-325.
- [13] **Hansen, P., Mladenovic, N., Perez-Brito, D.**, “Variable Neighborhood Decomposition Search”, *GERAD*, 1998.
- [14] **Kalvenes, J., Kennington, J., Olinick, E.** (2002), Base Station Location and Service Assignments in W-CDMA Networks. *Tech. Rep. 02-EMIS-03*, School of Engineering, Souther Methodist University, Texas, EUA.
- [15] **Mateus, G.**, Introdução a Computação Móvel, *11a Escola de Computação*, 1998.
- [16] **MOMENTUM**. Momentum Project, 2003. <http://momentum.zib.de>.
- [17] **Okumura, T.; Ohmori, E. AND Fukuda, K.** (1968), Field Strength and its Variability in VHF/UHF Land Mobile Service. *Review Electrical Communications Laboratory* 16, 825-873.
- [18] **Rueda, S. E.**, Otimização de Sistemas Celulares de 3ª Geração - Uma Abordagem Utilizando Algoritmos Genéticos. *Dissertação de Mestrado*, IME, Rio de Janeiro, RJ, 2008.
- [19] **Siomina, I. e Yuan, D.** (2004), Optimization of Pilot Power for Load Balancing in WCDMA Networks, *IEEE Communications Society - Globecom*.
- [20] **Wolsey, L. A.**, Integer Programming. *Wiley-Interscience publication*, 1998.