

# Planejamento de Redes Celulares de Terceira Geração Utilizando Algoritmo Genético Multiobjetivo e Pesquisa Tabu

Gleicy A. Cabral, Katia C. Lage dos Santos e Geraldo Robson Mateus

**Resumo**—Neste trabalho são propostos dois algoritmos baseados nas heurísticas Pesquisa Tabu e Algoritmos Genéticos Multiobjetivo para solucionar o problema do planejamento de redes celulares de terceira geração. A comparação entre os resultados alcançados pelo software comercial de otimização CPLEX e pelas heurísticas mostram que estas são capazes de obter boas soluções para instâncias de médio porte.

**Palavras-Chave**—Redes celulares, UMTS, WCDMA, otimização, controle de potência, múltiplos serviços, heurísticas, Pesquisa Tabu, algoritmos genéticos.

**Abstract**—In this paper we propose two algorithms based on Tabu Search and Multi-objective Genetic Algorithms heuristics to the problem in planning of third generation cellular networks. The comparison between our results and the solutions obtained using the optimization commercial software CPLEX shows that the heuristics can obtain good solutions to medium size instances.

**Keywords**—Cellular networks, UMTS, WCDMA, optimization, power control, multiple services, heuristics, Tabu Search, genetic algorithms.

## I. INTRODUÇÃO

A telefonia celular é um dos serviços que mais crescem no mundo. No Brasil, por exemplo, um terço da população brasileira, aproximadamente, possui aparelhos celulares [12]. Este fato está trazendo ao mercado de telecomunicações mudanças significativas no que se refere às funcionalidades oferecidas, como a disponibilidade de roaming internacional e o acesso à internet móvel de banda larga. A denominada terceira geração (3G) de redes celulares tem sido implantada para satisfazer as requisições dessa nova demanda do mercado.

Uma rede celular, basicamente, é composta pelas unidades móveis, estações rádio-base (ERBs) e centrais de comutação móvel (*Mobile Switching Center* - MSC). As unidades móveis são equipamentos transmissores e receptores de rádio, utilizados pelos usuários, para o acesso aos serviços disponibilizados pelas operadoras de telefonia celular. As ERBs são transmissores e receptores de rádio por meio das quais as estações móveis são conectadas à rede de telefonia fixa. As ERBs estão conectadas às centrais de comutação móvel por meio de uma rede de cabos. As MSCs são responsáveis pela comutação e roteamento de chamadas, bem como conexões de dados com outras redes.

Gleicy A. Cabral, Katia C. Lage dos Santos e Geraldo Robson Mateus, Departamento de Ciência da Computação, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, E-mails: gleicy@dcc.ufmg.br, katia@dcc.ufmg.br, mateus@dcc.ufmg.br.

Neste trabalho, são consideradas as redes celulares de terceira geração UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*) [1]. UMTS é padronizado pelo ETSI (*European Telecommunications Standard Institute*). As redes UMTS possuem como interface aérea a tecnologia WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*) que emprega o método de acesso CDMA (*Code Division Multiple Access*) baseado em seqüência direta e/ou salto de frequências. Uma das características das redes UMTS é a disponibilidade de serviços que combinem voz, dados, vídeo etc.

Um dos primeiros problemas para o projeto de uma rede celular refere-se à quantidade e à localização das ERBs a serem instaladas. O custo de uma ERB é muito alto, por isso, ao oferecer serviços de comunicação sem fio, uma operadora deseja instalar o menor número de estações rádio-base que consiga atender, com qualidade, a toda a demanda da área de cobertura. Determinados os locais de instalação de estações rádio-base, torna-se necessário definir as potências de transmissão de forma eficiente, atendendo a demanda e reduzindo as interferências.

O objetivo deste trabalho, portanto, é solucionar o problema de planejamento de redes celulares de terceira geração, considerando a localização de estações rádio-base, o controle de potência de transmissão e múltiplos serviços. Este problema é NP-difícil e, para resolver instâncias de médio e grande porte em tempo hábil, torna-se necessária a utilização de heurísticas. Os métodos de solução propostos neste trabalho são baseados nas heurísticas Pesquisa Tabu e Algoritmos Genéticos Multiobjetivo.

Na literatura, o problema abordado aqui também é tratado em [2] e [3]. Em [2], é apresentado o problema de planejamento de redes celulares de terceira geração, considerando a localização das estações rádio-base, o controle de potência e um único serviço (voz). São propostos três métodos heurísticos para resolução deste problema (algoritmo Guloso Add, algoritmo Guloso Remove e Pesquisa Tabu). Em [3], diferentemente de [2], considera-se a demanda por múltiplos serviços. Neste trabalho, para solução de instâncias do problema de pequeno porte, foi utilizado o pacote comercial de otimização CPLEX [4] e, para médias e grandes instâncias, foi utilizada a heurística de relaxação Lagrangeana associada ao método de subgradientes.

O restante deste trabalho é organizado como apresentado a seguir. O modelo matemático para o problema é apresentado na seção 2. Na seção 3, são apresentados os algoritmos de solução desenvolvidos. Na seção 4, estão os testes realizados

para avaliar os algoritmos propostos. E, na seção 5, estão as conclusões e trabalhos futuros.

## II. O MODELO MATEMÁTICO

No problema de planejamento de redes celulares de terceira geração, considerando a localização das estações rádio-base, o controle de potência e múltiplos serviços (P3GMS) [3], a área a ser coberta está dividida em um conjunto  $I$  de pequenas regiões chamadas centros de demanda (CDs). Todos os centros de demanda, a princípio, devem ser atendidos em qualquer solução viável. As estações rádio-base (ERBs) podem ser instaladas em um conjunto  $J$  de locais candidatos. A cada local  $j \in J$  está associado um custo total de instalação  $f_j$ . Se o CD  $i$  é coberto pela possível ERB a ser instalada no local candidato  $j$ , então  $c_{ij} = 1$ , senão  $c_{ij} = 0$  ( $c$  é a matriz de cobertura). Para viabilizar o atendimento, o número de ERBs ativas deve ser superior a um valor  $C$  mínimo. O conjunto de serviços a serem atendidos pela rede é denominado  $S$ . Em cada centro de demanda  $i \in I$  pode haver demanda por serviços  $s \in S$ , representados por  $S_i$ . O número previsto de conexões simultaneamente ativas de um serviço  $s$  no CD  $i$  é dado por  $a_i^s$ . Este pode ser obtido em função da demanda de tráfego  $d_i$ , ou seja,  $a_i = \phi(d_i)$ .

O SIR (*Signal-to-Interference Ratio*) é um valor utilizado para avaliar a qualidade do sinal transmitido. De forma simplificada, o SIR corresponde à divisão da potência de transmissão pelo ruído total percebido (ruído dentro do CD + ruído entre os CDs + ruído térmico ( $\eta_j$ )). Entretanto, pelo fato das redes UMTS utilizarem uma interface aérea WCDMA, o fator de espalhamento do sinal (*Spreading Factor* - SF) é considerado no cálculo dos valores de SIR adotados neste trabalho e que também têm sido usados na literatura (SIR = SF\*(potência/ruído)). O mecanismo de controle de potência utilizado pelo modelo apresentado a seguir é baseado em  $SIR_{alvo}$ . Este mecanismo de controle de potência consiste em ajustar as potências de transmissão de modo a manter a qualidade do sinal recebido, expressa em termos de SIR, igual a um valor pré-determinado  $SIR_{alvo}$  [11]. Os valores das potências de transmissão também não podem exceder um certo valor, denominado  $P_{max}$ . O P3GMS apresentado aqui foi formulado, considerando o enlace reverso (unidade móvel  $\rightarrow$  estação rádio-base). No entanto, o modelo pode ser estendido para considerar a comunicação nos dois sentidos. Foi considerado também o ganho de propagação entre a ERB  $j$  e o CD  $i$  igual ao ganho de  $i$  para  $j$ , representado por  $g_{ij}$ , como um valor conhecido.

Por simplicidade, assume-se que todas as estações rádio-base são idênticas e capazes de atender a todos os serviços de  $S$ , isto é, não existe qualquer restrição ao atendimento de um CD  $i$  por uma ERB  $j$  além da manutenção da qualidade do sinal em termos de SIR. A solução do P3GMS consiste em diferenciar as potências de transmissão de acordo com o serviço que elas visam atender, e em selecionar um subconjunto de locais candidatos para instalação de estações rádio-base a mínimo custo e atribuir a eles os CDs, visando o atendimento da demanda e o respeito aos requisitos de qualidade de serviço. O problema pode ser formulado a partir das seguintes variáveis de decisão:

$y_j = 1$ , se uma estação rádio-base está instalada no local candidato  $j$ ; 0 caso contrário.

$x_{ij} = 1$ , se o CD  $i$  é atendido pela ERB instalada no local candidato  $j$ ; 0 caso contrário.

$p_{ij}^{\uparrow s}$  é a variável de decisão real que representa a potência transmitida no enlace reverso pelo CD  $i \in I$  em direção à ERB  $j \in J$ , relativa ao serviço  $s \in S$ .

A formulação matemática do P3GMS é:

$$\min \sum_{j \in J} f_j y_j + \lambda \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{s \in S_i} a_i^s p_{ij}^{\uparrow s} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j \in J} c_{ij} x_{ij} \geq 1, \quad \forall i \in I \quad (2)$$

$$\sum_{j \in J} y_j \geq C \quad (3)$$

$$x_{ij} \leq y_j, \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (4)$$

$$x_{ij} \left( \sum_{m \in I} \sum_{n \in J} \sum_{q \in S} a_m^q p_{mn}^{\uparrow q} g_{mj} - p_{ij}^{\uparrow s} g_{ij} + \eta_j \right) \leq \frac{p_{ij}^{\uparrow s} g_{ij}}{SIR_{alvo}^s}, \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall s \in S_i \quad (5)$$

$$\sum_{j \in J} p_{ij}^{\uparrow s} \geq P_{min}^{is}, \quad \forall i \in I, \forall s \in S_i \quad (6)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (7)$$

$$y_j \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in J \quad (8)$$

$$0 \leq p_{ij}^{\uparrow s} \leq P_{max}, \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall s \in S_i \quad (9)$$

Fazendo uma análise sucinta do modelo apresentado, a função objetivo busca minimizar o custo total de instalação das antenas e a potência transmitida pelo conjunto de unidades móveis ( $p_{ij}^{\uparrow s}$ ). O parâmetro  $\lambda$  foi inserido para fazer um ajuste de unidades, uma vez que o custo de instalação das estações rádio-base é expresso em unidades monetárias e as potências de transmissão das unidades móveis são expressas em Watts.

Do conjunto de restrições, a exigência de cobertura de toda área em estudo por pelo menos uma estação rádio-base e da utilização de um número mínimo  $C$  de ERBs necessárias para atender a demanda estão representadas, respectivamente, por (2) e (3). Mas, para que um centro de demanda  $i$  possa ser atribuído a uma estação  $j$ , é necessário que esta tenha sido instalada, ou seja, deve ser uma estação ativa. Esta relação é tratada pela restrição (4). As restrições de SIR para cada tipo de serviço  $s$  são tratadas em (5). Ou seja, para cada par  $(i, j)$  e um serviço  $s$ , a relação entre a potência de transmissão e o somatório das potências interferentes da rede deve ser maior que  $SIR_{alvo}^s$ . O cumprimento dos valores mínimo e máximo da potência de transmissão em um canal de comunicação é garantido pelas restrições (6) e (7).

As restrições de SIR dadas são não lineares, mas podem ser linearizadas pela introdução de um conjunto de parâmetros  $M_j$ :

$$\sum_{m \in I} \sum_{n \in J} \sum_{q \in S} a_m^q p_{mn}^{\uparrow q} g_{mj} - p_{ij}^{\uparrow s} g_{ij} + \eta_j \leq \frac{p_{ij}^{\uparrow s} g_{ij}}{SIR_{alvo}^s} + M_j(1 - x_{ij}), \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall s \in S_i \quad (10)$$

$$M_j = \sum_{m \in I} \sum_{q \in S} a_m^q P_{max} g_{mj}, \quad \forall j \in J \quad (11)$$

### III. ALGORITMOS DE SOLUÇÃO

O problema de planejamento de redes celulares de terceira geração, considerando a localização das estações rádio-base, o controle de potência e múltiplos serviços é NP-difícil, uma vez que o problema de localização não-capacitado (PLNC) está embutido na formulação do P3GMS. Uma possível prova pode ser encontrada em [3].

Por ser um problema NP-difícil, as melhores soluções exatas conhecidas do P3GMS tomam tempo exponencial, o que na prática é inviável.

Uma heurística é uma técnica que procura boas soluções com um custo computacional razoável. A solução encontrada por um método heurístico, além de poder ser uma boa solução aproximada para o problema, pode funcionar como um limite superior e ser utilizado na avaliação da qualidade de uma solução obtida. Neste trabalho, são propostos dois diferentes métodos heurísticos baseados nas meta-heurísticas Pesquisa Tabu e Algoritmo Genético Multiobjetivo.

Nas subseções a seguir são descritos os métodos heurísticos implementados neste trabalho.

#### A. Pesquisa Tabu

O algoritmo de Pesquisa Tabu consiste em, dada uma solução inicial  $X$ , definir um conjunto de elementos vizinhos a esta solução  $V(H, X)$ , e verificar se uma nova solução  $x$ , utilizando elementos de  $V(H, X)$ , aproxima-se mais da solução ótima [8]. O conjunto  $H$  é composto por pares de elementos, sendo que, um elemento do par corresponde a uma ERB  $j$  e o outro elemento do par ao número da iteração a partir da qual  $j$  pode voltar a fazer parte do conjunto solução. Este valor é determinado somando-se o número da iteração atual ao número  $u$  de iterações que uma ERB  $j$  que deixou o conjunto solução deve esperar até poder voltar a participar do mesmo. O conjunto  $H$  funciona como uma memória das últimas iterações. A eficiência da Pesquisa Tabu depende do modo como o conjunto  $V(H, X)$  é definido e quão bem ele explora a estrutura atual da solução.

Cada iteração do algoritmo Pesquisa Tabu é dividida em duas fases: construção e busca local. A fase de construção consiste em determinar uma solução viável para o problema. A fase de busca local consiste em verificar se melhores soluções são alcançadas quando ERBs que estão fora do atual conjunto solução são ativadas, em decorrência da desativação de ERBs presentes na atual solução. O algoritmo pára quando o número máximo de iterações definido para uma dada execução é atingido. O resultado final apresentado corresponde à melhor solução obtida após todas as iterações.

A cada iteração da fase de construção é escolhida uma ERB a ser instalada e, em seguida, determinam-se as potências de transmissão entre os centros de demanda e as ERBs que atendem estes respectivos centros de demanda e, então, é verificado se as restrições (6), (7), (10) e (11) do modelo apresentado na seção II estão sendo atendidas. A ERB a ser ativada é escolhida aleatoriamente de uma lista com  $p$  ERBs. Dois critérios diferentes são utilizados para escolher as ERBs que irão compor a lista: se existem centros de demanda ainda não cobertos pela atual solução, as ERBs escolhidas serão aquelas que puderem cobrir o maior número de centros de demanda ainda não cobertos. Caso contrário, as ERBs escolhidas serão aquelas que cobrirem o maior número de CDs já cobertos. A fase de construção termina quando o valor para a função objetivo, seção II - equação (1), encontrado na iteração  $t$  é maior que o encontrado na iteração  $t - 1$  e todas as restrições foram atendidas na iteração  $t - 1$  e estão sendo atendidas na iteração  $t$ . Cabe ressaltar que a solução obtida ao fim da fase de construção é a solução encontrada na iteração  $t - 1$ .

No contexto deste trabalho, os CDs são retângulos dentro da área de cobertura e as ERBs são pontos que correspondem às coordenadas  $(x, y)$  dos cantos inferiores direitos dos CDs. Dessa forma, uma ERB à esquerda de outra possui o mesmo valor que esta para  $x$  e valor menor para  $y$ . Assim, na fase de busca local, para cada ERB  $j$  pertencente ao conjunto solução encontrado na fase de construção, é verificado se existe uma ERB candidata  $k$  que não pertença ao conjunto solução e que esteja à esquerda da ERB  $j$ , assim como também à direita, acima e abaixo da ERB  $j$ , a uma distância máxima  $d$ . A ERB  $j$  é desativada e a ERB  $k$  ativada. Então, é verificado se esta nova solução atende a todas as restrições do problema e se ela é menor que a melhor solução. Em caso afirmativo, a melhor solução agora será igual à nova solução obtida. Caso contrário, retoma-se a solução inicial em que  $j$  está ativa e  $k$  desativada.

#### B. Algoritmo Genético Multiobjetivo

No modelo para o P3GMS apresentado na seção 2, há dois objetivos a serem minimizados: o custo de instalação das ERBs e a potência de transmissão do sinal. Observa-se que ao ser minimizado o número de estações a serem instaladas, tendem a serem atribuídas potências de transmissão mais elevadas para que o atendimento da demanda seja realizado. Ou seja, ambos os objetivos são conflitantes, o que justifica a aplicação da técnica multiobjetivo com o intuito de obter soluções que sejam boas em ambos os critérios.

A partir de um conjunto de soluções iniciais da instância submetida (população inicial) e enquanto o critério de parada não é atendido, o AG Multiobjetivo implementado consiste na realização, nesta ordem, dos procedimentos de avaliação de cada indivíduo da população de acordo com cada um dos dois objetivos, classificação da população em fronteiras dominantes, elitização, cálculo da distância crowding para cada fronteira, cálculo da função de ajuste acumulada e aplicação dos operadores de seleção, crossover e mutação. A operação de elitização consiste na seleção de algumas soluções do conjunto Pareto-ótimo, que possuem o melhor valor de fitness, para

fazer parte da próxima geração. Os operadores genéticos aplicados consistem no Princípio da Roleta, o Partially-Matched Crossover [9] e a mutação aleatória.

A representação de um indivíduo (cromossomo ou solução viável) foi realizada através de uma codificação binária. Cada cromossomo é visto como um arranjo binário que representa o conjunto de locais candidatos (genes) à instalação das ERBs. Um gene assume o valor 1 caso a estação esteja ativa (instalada no local candidato correspondente) e 0 caso esteja inativa (não instalada). Associados a cada gene com valor 1, ficam indicados os CDs atendidos.

Para a geração da população inicial utiliza-se um gerador de números pseudoaleatórios, para selecionar uma ERB inativa. A partir da entrada correspondente a esta estação na matriz de cobertura  $c_{ij}$ , são atribuídos a ela todos os CDs ainda não atendidos por estações já ativas. Se não for possível cumprir os requisitos de qualidade com os atuais valores de potência, o valor desta variável é acrescido continuamente até que os requisitos de qualidade sejam cumpridos. Entretanto, se o novo valor da potência for superior ao da potência máxima, a última atribuição realizada é desfeita. Uma outra ERB é então ativada e o processo de atribuição dos CDs restantes às estações ativas é reiniciado.

IV. RESULTADOS COMPUTACIONAIS

Esta seção descreve os experimentos realizados com o objetivo de validar o modelo matemático apresentado na seção 2 e avaliar as estratégias de solução expostas na seção 3. Tanto o gerador aleatório de problemas, capaz de criar instâncias distintas a partir de um conjunto de parâmetros de entrada, quanto os algoritmos de solução foram desenvolvidos na linguagem C e executados em uma máquina com processador de 2.4 GHz e 1024 MB de memória RAM e sistema operacional Linux. Nesta mesma máquina, também foram realizados testes com o pacote comercial de otimização CPLEX 9.0, comumente utilizado na solução de problemas de programação linear inteira.

A. Gerador de Instâncias

Cada instância foi definida, sem perda de generalidade, sobre uma área retangular de lados L x W, em quilômetros, na qual estão os centros de demanda e locais candidatos a instalação de ERBs definidos para a dada instância.

O custo de instalação das estações rádio-base foi considerado constante, isto é,  $f_j = f = 1,0$  para todo local candidato  $j \in J$ . Da mesma maneira, assumiu-se que  $\eta_j = \eta = -130\text{dB} = 10^{-13}$ . A demanda em cada CD  $i \in I$  foi considerada unitária, isto é,  $a_i^s = 1$ . A potência máxima de transmissão foi fixada em  $P_{\text{max}} = 30\text{dB} = 1\text{W}$ . O número mínimo C de ERBs necessárias para atender a demanda foi definido como sendo igual a 1 para todas as instâncias. Visando considerar a minimização do custo de instalação das ERBs juntamente à minimização da potência de transmissão e tendo em vista os valores acima, adotou-se  $\lambda = 1$ . Os ganhos de propagação do sinal ( $g_{ij}$ ) foram calculados utilizando a COST-231 [7], que é uma adaptação do modelo de Okumura-Hata aplicável a redes celulares de terceira geração. Maiores detalhes sobre este modelo podem ser obtidos em [5] e [6].

B. Experimentos

Os experimentos discutidos nesta seção foram criados a partir de classes de instâncias de dois diferentes tamanhos, conforme mostra a Tabela I. Para cada classe, foram geradas três instâncias distintas do problema, utilizadas nos testes.

TABELA I  
CONFIGURAÇÃO DAS INSTÂNCIAS UTILIZADAS NOS EXPERIMENTOS.

Classe	L x W (km x km)	Nº de centros de demanda	Nº de locais candidatos
I	0,50 x 0,50	50	10
II	1,0 x 1,0	100	20

O número máximo de iterações utilizado na execução do algoritmo Pesquisa Tabu foi igual a 50, o valor de  $p$  utilizado foi igual a 5, a distância máxima  $d$  da busca local foi 200 m e o número mínimo de iterações  $u$  que uma ERB desativada deveria ficar fora do conjunto solução foi igual a 2. No caso do Algoritmo Multiobjetivo, o tamanho da população é igual 5 e as taxas de crossover e mutação são, respectivamente, iguais a 0,6 e 0,008. Este conjunto de valores foi o melhor encontrado, ponderando qualidade da solução e tempo de execução, a partir da realização de testes preliminares, utilizando diferentes valores para os parâmetros. Ainda para o AG, a melhor solução considerada é aquela que apresenta o menor número de ERBs ativas e menor valor do somatório das potências, nesta ordem de avaliação.

Para todos os algoritmos, os resultados apresentados, nas tabelas das subseções a seguir, correspondem a uma única execução das instâncias de teste.

1) *Experimentos com único serviço:* Para os experimentos com único serviço, foi adotado um valor de SIRalvo igual a 0,020982.

A Tabela II apresenta os resultados obtidos pelo pacote de otimização comercial CPLEX, comumente utilizado para solução deste tipo de problema, para as instâncias das classes I. O CPLEX não conseguiu resolver, no período de 5 (cinco) horas, nenhum dos problemas da classe II. A primeira coluna da tabela contém a identificação da instância. A seguir, são apresentados os valores de limite inferior e limite superior (melhor valor encontrado para a função objetivo em 5 horas de processamento). A terceira coluna mostra quais são as ERBs ativas. A quarta coluna informa qual o gap de dualidade (diferença entre os limites superior e inferior) alcançado ao final do processamento. O tempo de execução em segundos completa a tabela.

TABELA II  
RESULTADOS DA EXECUÇÃO DO CPLEX PARA ÚNICO SERVIÇO.

Id	LI	LS	ERBs	Gap (%)	Tempo (s)
I <sub>1</sub>	2,048114	2,077981	6, 8	1,44	18.000,03
I <sub>2</sub>	2,032057	2,084454	5, 6	2,51	18.000,04
I <sub>3</sub>	2,028580	2,080075	3, 10	2,48	18.000,04

A Tabela III apresenta os resultados obtidos pelo algoritmo Pesquisa Tabu para as instâncias das classes I e II.

TABELA III

RESULTADOS DA EXECUÇÃO DO ALGORITMO PESQUISA TABU PARA ÚNICO SERVIÇO.

Id	LS	ERBs	Tempo (s)
I <sub>1</sub>	2,091064	4, 6	8, 39
I <sub>2</sub>	2,103130	2, 6	10,04
I <sub>3</sub>	2,091064	3, 10	8,34
II <sub>1</sub>	4,647606	7, 11, 14, 15	163,64
II <sub>2</sub>	4,524667	2, 10, 11, 12	140,37
II <sub>3</sub>	4,801034	9, 15, 16, 20	174,06

Analisando os dados das Tabelas II e III, verifica-se que o valor médio das soluções, o número de ERBs ativadas e o tempo médio de solução cresce com o aumento das dimensões do problema. Isto ocorre porque, com o aumento da área de cobertura, as potências de transmissão se elevam e mais ERBs são ativadas para garantir um serviço de qualidade. Além disso, ocorre um aumento no número de variáveis e, conseqüentemente, da necessidade de serem realizadas mais computações para a determinação da solução. Comparando a qualidade das soluções obtidas, observa-se que o CPLEX obtém melhores soluções que o algoritmo Pesquisa Tabu, pois ativa o mesmo número de ERBs, porém são atribuídas potências de transmissão inferiores. Entretanto, as soluções da Tabela III estão próximas às da Tabela II, sendo aquelas obtidas em um tempo computacional bem inferior.

2) *Experimentos com múltiplos serviços:* Um dos principais diferenciais da formulação P3GMS apresentada neste trabalho é permitir a representação da oferta dos serviços com taxas de transmissão e requisitos de qualidade diferenciados, permitindo que o impacto da demanda por esses serviços seja considerado no planejamento da rede celular. A tabela IV apresenta as características dos serviços utilizados nos experimentos.

TABELA IV

PARÂMETROS DE QUALIDADE E DISTRIBUIÇÃO DA DEMANDA PARA CADA CLASSE DE SERVIÇO.

Serviço	Taxa de transmissão (kbps)	SIR <sub>alvo</sub>	Demanda (%)
Voz	12,2	0,020982	50
Dados 1	64	0,031250	30
Dados 2	144	0,041113	15
Dados 3	384	0,114815	5

As Tabelas V e VI apresentam os resultados obtidos pelo CPLEX e pelo algoritmo Pesquisa Tabu, respectivamente, para o cenário com múltiplos serviços. Da mesma forma, foram realizados experimentos com as instâncias das classes I e II, porém o CPLEX não conseguiu resolver, no período de 5 (cinco) horas, nenhum dos problemas da classe II. Na tabela VI, a terceira coluna refere-se ao somatório das potências expressa em Watt. Este valor foi obtido subtraindo-se o número total de ERBs ativas do valor do limite superior (LS). Isso é feito porque o custo de instalação de todas as ERBs é igual a 1.

Comparando os dados das Tabelas II e V, é possível

TABELA V

RESULTADOS DA EXECUÇÃO DO CPLEX PARA MÚLTIPLOS SERVIÇOS.

Id	LI	LS	ERBs	Gap (%)	Tempo (s)
I <sub>1</sub>	2,024953	3,263815	1,5	37,96	18.000,03
I <sub>2</sub>	2,037244	4,832816	6,7,9	57,85	18.000,02
I <sub>3</sub>	2,044426	3,258013	6,10	37,25	18.000,03

TABELA VI

RESULTADOS DA EXECUÇÃO DO ALGORITMO PESQUISA TABU PARA MÚLTIPLOS SERVIÇOS.

Id	LS	Potência	ERBs	Tempo (s)
I <sub>1</sub>	3,082459	1,082459	7,9	34,44
I <sub>2</sub>	3,143534	0,143534	2,6,7	34,97
I <sub>3</sub>	2,510613	0,510613	6,10	32,92
II <sub>1</sub>	9,437562	1,437562	1,3,11,15,16,17,18,20	943,00
II <sub>2</sub>	8,062237	1,062237	1,3,4,5,8,12,14	1.062,93
II <sub>3</sub>	7,830808	1,830808	5,9,13,16,18,20	887,71

observar que a mudança no perfil da demanda, de único serviço para múltiplos serviços, refletiu-se no aumento do valor médio das soluções se comparado com os resultados para único serviço. Isso ocorre porque os valores de SIR<sub>alvo</sub> para os serviços de dados são maiores que os valores para os serviços de voz, implicando em valores mais elevados para as potências de transmissão. Em decorrência disso, torna-se necessário um aumento do número médio de ERBs ativadas para garantir a qualidade do sinal transmitido e evitar valores de potência excessivamente elevados.

Comparando os valores dos limites superiores apresentados nas Tabelas V e VI, observa-se que o algoritmo Pesquisa Tabu encontra os melhores valores de limite superior para as instâncias testadas. O tempo médio de execução deste algoritmo aumentou para o cenário com múltiplos serviços. Entretanto, o tempo médio execução do referido método ainda é bem inferior ao tempo de execução do CPLEX.

Com o intuito de avaliar a eficiência da Pesquisa Tabu frente ao modelo com múltiplos objetivos apresentado na seção 2, foram realizados testes com o Algoritmo Genético Multiobjetivo para o cenário de múltiplos serviços. A Tabela VII apresenta os resultados obtidos.

TABELA VII

RESULTADOS DA EXECUÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO PARA MÚLTIPLOS SERVIÇOS.

Id	Potência	ERBs	Nº de iterações	Tempo (s)
I <sub>1</sub>	0,191122	2, 3, 5	20	414,81
I <sub>2</sub>	0,412805	6, 7, 10	20	482,58
I <sub>3</sub>	0,997574	7, 8	20	370,01
II <sub>1</sub>	2,377218	5, 10, 12, 13, 14, 17, 20	20	20753,84
II <sub>2</sub>	1,070948	2, 3, 6, 11, 12, 16	20	22251,83
II <sub>3</sub>	1,400275	4, 5, 8, 9, 10, 13, 17	20	21177,92

Comparando os resultados apresentados nas Tabelas VI e VII, é possível constatar que para algumas instâncias, como exemplo  $I_2$ , a Pesquisa Tabu obteve boas soluções em ambos os critérios (número de ERBs e potência). O AG Multiobjetivo não foi capaz de sempre obter melhores soluções que a Pesquisa Tabu, apesar desta utilizar uma abordagem mono-objetivo, pois o número de iterações do AG definido para execução dos experimentos foi relativamente pequeno.

## V. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Esse trabalho apresentou o problema de planejamento de redes celulares de terceira geração, considerando a localização das estações rádio-base, o controle de potência e múltiplos serviços. O problema resultante é NP-difícil e, para solucioná-lo, foram desenvolvidos dois algoritmos: Pesquisa Tabu e Algoritmo Genético Multiobjetivo.

A terceira geração das redes celulares é um assunto relativamente recente, que vem atraindo atenção crescente na última década. Os problemas relacionados ao planejamento de novas redes vêm amadurecendo à medida que avança o processo de padronização e o interesse das operadoras na implantação da nova infra-estrutura e na disponibilização dos novos serviços. Dado esse cenário, esse trabalho contém algumas contribuições relacionadas com a proposição de métodos de solução para o problema de planejamento de redes celulares de terceira geração.

Os experimentos realizados indicam que os algoritmos implementados são capazes de solucionar rapidamente as instâncias das duas classes definidas, enquanto que o CPLEX foi capaz de solucionar apenas as instâncias de menor porte. Os resultados mostraram que, para o cenário de múltiplos serviços, o algoritmo Pesquisa Tabu encontrou melhores soluções e em menor tempo que o CPLEX. Além disso, para alguns casos, este algoritmo também conseguiu melhores soluções que o AG.

Como trabalho futuro, está prevista a realização de testes com base em dados realísticos de redes de grande porte disponibilizados por outros grupos de estudo deste problema, a exemplo o projeto Momentum [10]. Também serão feitas simulações de tráfego nas redes a partir da consideração de aspectos dinâmicos da mesma, como a movimentação dos usuários.

## REFERÊNCIAS

- [1] Samukic, A., *UMTS Universal Mobile Telecommunications System: Development of Standards for the Third Generation*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 47(4):1099-1104, 1998.
- [2] Amaldi, E., Capone, A. and Malucelli, F., *Planning UMTS Base Station Location: Optimization Models with Power Control and Algorithms*. Rapporto Interno N. 2001.91. Politécnico di Milano, Dipartimento di Elettronica e Informazione, Milano, Itália, 2001.
- [3] Franqueira, R., *Planejamento de Redes Celulares de Terceira Geração Considerando Localização de Estações Rádio-Base, Controle de Potência e Múltiplos Serviços*. Master's thesis, Departamento de Ciência da Computação, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2003.
- [4] ILOG S/A. ILOG CPLEX 7.0. *User's Manual*. ILOG S/A, Agosto 2000. <http://www.ilog.com/products/cplex>
- [5] Okumura, T., Ohmori, E., and Fukuda, K., *Field Strength and its Variability in VHF and UHF Land Mobile Service.*, Review Electrical Communications Laboratory 16, p. 825-873, 1968.
- [6] Hata, M., *Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Service*, In: IEEE Transactions on Vehicular Technology 29, p. 317-325, 1980.
- [7] Commission of European Communities. *Urban Transmission Loss Models for Mobile Radio in the 900 and 1800 MHz Bands*, European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research EURO-COST 231 TD 91, setembro 1991.
- [8] Reeves, C. R. *Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems*, Halsted Press, 1993.
- [9] Goldberg, D. E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley, Reading MA, 1989.
- [10] Projeto Momentum. <http://momentum.zib.de>
- [11] Tutschku, K., *Demand-based Radio Network Planning of Cellular Mobile Communication Systems*. In: IEEE INFOCOM'98, volume3, p. 1054-1061, 1998.
- [12] Folha Online. <http://www.folha.uol.com.br>, acessado em janeiro de 2005.