

Planejamento de Redes Celulares de Terceira Geração Utilizando Algoritmos Genéticos e Heurísticas Gulosas

Katia C. Lage dos Santos¹, Gleicy A. Cabral¹, Geraldo Robson Mateus¹

¹Departamento de Ciência da Computação – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)
Avenida Antônio Carlos, 6627 - Pampulha – 31270-010 – Belo Horizonte – MG – Brasil

{katia,gleicy,mateus}@dcc.ufmg.br

Abstract. *This paper presents a mixed-integer programming model for the planning of third generation cellular networks, considering base station location, power control and multiple services. This problem is NP-Hard and we use heuristics to solve medium and large size instances in a reasonable time. In this context, we propose two different algorithms: a greedy heuristic and a genetic algorithm. Comparing with related works good solutions are obtained considering the demand for a single or multiple services.*

Resumo. *Este trabalho apresenta um modelo de programação inteira mista para o planejamento de redes celulares de terceira geração, considerando a localização de estações rádio-base, controle de potência e múltiplos serviços. O problema resultante é NP-difícil e, por este motivo, para resolver instâncias de médio e grande porte em tempo hábil, torna-se necessária a utilização de heurísticas. Neste trabalho, são propostos dois diferentes algoritmos: uma heurística gulosa e um algoritmo genético. Comparando com trabalhos relacionados, foram obtidos bons resultados considerando a demanda por um único ou múltiplos serviços.*

1. Introdução

Nos últimos anos, o crescimento dos usuários de serviços de comunicação sem fio tem sido explosivo, trazendo ao mercado de telecomunicações mudanças significativas no que se refere às funcionalidades oferecidas. Dentre esse novo conjunto de funcionalidades estão a disponibilidade de *roaming* internacional, qualidade superior de voz e vídeo, serviços com tarifação sensível à localização e acesso à internet móvel de banda larga. A denominada terceira geração (3G) de redes celulares promete e tem sido implementada para satisfazer as requisições dessa nova demanda do mercado.

Uma rede celular, basicamente, é composta pelas unidades móveis, estações rádio-base (ERBs) e a CN (*Core Network*). As unidades móveis são equipamentos, utilizados pelos usuários, para o acesso aos serviços disponibilizados pelas operadoras de telefonia celular. As estações rádio-base são transmissores e receptores de rádio por meio das quais os equipamentos móveis são conectados à rede fixa de telefonia (*Public Switching Telephone Network* - PSTN) via CN. Elas também são responsáveis pelo processamento da interface aérea, como codificação do canal, adaptação da taxa de transmissão, espalhamento do sinal etc. As ERBs estão conectadas às centrais de comutação móvel

(*Mobile Switching Center* - MSC) pertencentes à CN. A CN é parte da rede de acesso e nela estão os equipamentos responsáveis pela comutação e roteamento de chamadas, bem como conexões de dados com outras redes.

A primeira geração de redes celulares (1G) utilizava sistemas analógicos. Cada país implantava o seu sistema e, pela escassez de padronização, os sistemas eram, em geral, incompatíveis entre si. A segunda geração (2G), já digital, buscou a padronização, a nível continental, que permitisse a mobilidade entre várias redes. Atualmente, as redes celulares estão em transição da segunda para a terceira geração. A terceira geração (3G) é caracterizada por uma comunicação celular de alcance mundial.

Neste trabalho, são consideradas as redes celulares de terceira geração UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*) [Samukic 1998]. UMTS é padronizado pelo ETSI (*European Telecommunications Standard Institute*) e aceito pela ITU (*International Telecommunications Union*) entre os padrões da família IMT-2000 (*International Mobile Telephone*, padrão 2000). 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. As frequências alocadas para sistemas de terceira geração ficam em torno de 2 GHz. Uma das características das redes UMTS é a disponibilidade de serviços que combinem voz, dados, vídeo etc.

No planeamento de redes 3G podem ser avaliados diversos aspectos, como a localização das estações rádio-base dentro da área de cobertura, os mecanismos de controle de potência de transmissão das unidades móveis e estações rádio-base, o convívio com redes de segunda geração e múltiplos serviços (voz, dados, vídeo etc.). Além destes, pode-se considerar ainda o *Cell Breathing* (fenômeno de aumento no nível de ruído e conseqüente redução no raio de atendimento) e mecanismos de *Soft Handover* (uma unidade móvel pode estar conectada a duas ou mais estações rádio-base simultaneamente ou a dois setores de uma mesma estação). Neste trabalho serão considerados os aspectos referentes à localização das estações rádio-base, o controle de potência e a coexistência de múltiplos serviços.

Os modelos adotados para o planeamento de redes celulares de segunda geração não são adequados para o planeamento de redes 3G, pois naqueles é priorizado o atendimento de toda a área considerada, o chamado problema de cobertura, em detrimento dos requisitos de qualidade na prestação dos serviços. Além disso, os mecanismos de controle de potência e a distribuição do tráfego, fundamentais no planeamento de redes 3G, não são considerados.

Na literatura, o problema de planeamento de redes celulares de terceira geração também é tratado em [Eisenblätter et al 2002], [Tutschku 1998], [Amaldi et al 2001] e [Franqueira 2003]. A modelagem de um problema de planeamento de rede UMTS foi analisada detalhadamente em [Eisenblätter et al 2002], com uma boa discussão sobre o tópico. Entretanto, pelo fato da formulação resultante ser muito complexa e ter um número elevado de variáveis de decisão, os autores não apresentaram um método de solução para o problema tratado. Em [Tutschku 1998], os usuários são modelados através do uso de Nós de Demanda (*Demand Nodes*), que representam o centro de uma área pequena tendo uma

demanda de tráfego conhecida. Isto foi explorado em muitos trabalhos e também é explorado em nossa formulação. Entretanto, o trabalho apresentado em [Tutschku 1998] está focado na demanda de tráfego e não considera a interferência. Em [Amaldi et al 2001], 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). Utiliza-se uma potência alvo como mecanismo de controle de potência. Em [Franqueira 2003], é apresentada a formulação matemática do problema de planejamento de redes celulares de terceira geração, considerando a localização de estações rádio-base, controle de potência e múltiplos serviços. Neste trabalho, para solução de instâncias do problema de pequeno porte, foi utilizado o pacote comercial de otimização CPLEX [ILOG 2000] e, para médias e grandes instâncias, foi utilizada a heurística de relaxação Lagrangeana associada ao método de subgradientes.

Comparando este trabalho com os principais trabalhos relacionados, verifica-se que, em [Amaldi et al 2001] é apresentado um modelo considerando apenas um único serviço. Em [Franqueira 2003] a modelagem considera múltiplos serviços, porém as heurísticas para obtenção do limite superior buscam apenas satisfazer as restrições do modelo. No trabalho aqui proposto, diferentemente de [Amaldi et al 2001], são considerados múltiplos serviços e mecanismo de controle de potência baseado no SIR (*Signal-to-Interference Ratio*). Em comparação com [Franqueira 2003], são apresentadas duas heurísticas novas que geram melhores limites superiores.

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 Guloso e Genético desenvolvidos. Na seção 4, estão os testes realizados para avaliar os algoritmos propostos. E, na seção 5, estão as conclusões e trabalhos futuros.

2. O Modelo Matemático

No problema de redes celulares de terceira geração, considerando a localização das estações rádio-base, o controle de potência e múltiplos serviços (P3GMS) [Franqueira 2003], a área a ser coberta é dividida em um conjunto I de pequenas regiões chamadas centros de demanda (CDs). Todos os CDs, 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 , que depende do local, da região e dos equipamentos necessários. Se o CD i é coberto pela possível ERB a ser instalada no local candidato j , então a entrada da matriz de cobertura c_{ij} é igual a 1, senão $c_{ij} = 0$. 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 (η_j). Entretanto, pelo fato das redes UMTS utilizarem uma interface aérea WCDMA, o fator de espalhamento do sinal (SF) é considerado no cálculo dos valores de SIR adotados neste trabalho e que também têm sido usados na literatura ($SIR = SF^*(\text{potência/ruído})$). 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} [Tutschku 1998]. Os valores das potências de transmissão também não podem exceder um certo valor, denominado P_{max} , nem ser inferior a potência mínima $P_{\text{min}}^{\text{is}}$. O P3GMS apresentado aqui foi formulado considerando o enlace reverso (unidade móvel – 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 elas 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 deve ser 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}^{is} 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:

$$\text{Min } \sum_{j \in J} f_j y_j + \lambda \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{s \in S_i} a_i^s p_{ij}^{\text{is}} \quad (2.1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j \in J} c_{ij} x_{ij} \geq 1, \forall i \in I \quad (2.2)$$

$$\sum_{j \in J} y_j \geq C \quad (2.3)$$

$$x_{ij} \leq y_j, \forall i \in I, \forall j \in J \quad (2.4)$$

$$x_{ij} (\sum_{m \in I} \sum_{n \in J} \sum_{q \in S} a_m^q p_{mn}^{\text{iq}} g_{mj} - p_{ij}^{\text{is}} g_{ij} + \eta_j) \leq p_{ij}^{\text{is}} g_{ij} / SIR_{\text{alvo}}^s, \forall i \in I, \forall j \in J \text{ e } \forall s \in S_i \quad (2.5)$$

$$\sum_{j \in J} p_{ij}^{\text{is}} \geq P_{\text{min}}^{\text{is}}, \forall i \in I, \forall s \in S_i \quad (2.6)$$

$$0 \leq p_{ij}^{\text{is}} \leq P_{\text{max}}, \forall i \in I, \forall j \in J, \forall s \in S_i \quad (2.7)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \forall i \in I, \forall j \in J \quad (2.8)$$

$$y_j \in \{0,1\}, \forall j \in J \quad (2.9)$$

Fazendo uma análise sucinta do modelo apresentado, na função objetivo é minimizado o custo total de instalação das antenas e a potência transmitida pelo conjunto de unidades

móveis ($p_{ij}^{\hat{s}}$). O parâmetro λ 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 (2.2) e (2.3). 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 (2.4). As restrições de SIR para cada tipo de serviço s são tratadas em (2.5). 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 (2.6) e (2.7).

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

$$\sum_{m \in I} \sum_{n \in J} \sum_{q \in S} a_m^q p_{mn}^{\hat{q}} g_{mj} - p_{ij}^{\hat{s}} g_{ij} + \eta_j \leq p_{ij}^{\hat{s}} g_{ij} / SIR_{alvo}^s + M_j(1 - x_{ij}), \forall i \in I, \forall j \in J, \forall s \in S \quad (2.10)$$

$$M_j = \sum_{m \in I} \sum_{q \in S} a_m^q p_{max}^q g_{mj}, \forall j \in J \quad (2.11)$$

3. Algoritmo de Solução

O problema resultante do planejamento de redes celulares de terceira geração, considerando a localização das estações rádio-base, o controle de potência e múltiplos serviços (P3GMS) é NP-difícil. Em decorrência disso, as melhores soluções exatas conhecidas 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.

Nesta seção, são apresentados dois algoritmos. As subseções 3.1 e 3.2 descrevem métodos heurísticos para solução do P3GMS que empregam, respectivamente, uma técnica Gulosa e um Algoritmo Genético.

3.1. Algoritmo Guloso

Um algoritmo Guloso, partindo da iteração zero em que o conjunto solução é vazio, incorpora a cada iteração $t = 1, 2, \dots$ um novo elemento ao conjunto solução, de maneira que, o ganho com a incorporação deste elemento seja máximo [Reeves 1993].

No algoritmo implementado, o controle das potências de transmissão é tratado à parte da minimização dos custos de instalação das estações rádio-base. Na primeira etapa do algoritmo, uma técnica gulosa é usada para realizar a minimização dos custos de instalação. Já a heurística para o controle das potências de transmissão é aplicada a cada solução gerada na primeira etapa do algoritmo.

A minimização dos custos de instalação leva em consideração a relação entre o menor custo e a maior cobertura, ou seja, são ativadas as estações rádio-base que proporcionam maior cobertura da área considerada e que possuem os menores custos de instalação. O método de controle de potências verifica se as restrições de controle de potência e qualidade do sinal são atendidas para a solução em questão. Se não forem, a solução é descartada. Caso uma solução de máxima cobertura não atenda às restrições de controle de potência e qualidade do sinal, então a área de cobertura pode ser minimizada.

A seguir são apresentados todos os passos do algoritmo implementado, considerando o controle das potências de transmissão e a minimização dos custos de instalação das estações rádio-base.

Passo 1: No início da execução do algoritmo Guloso, o conjunto solução é vazio e o valor da melhor solução encontrada é considerado infinito ou suficientemente elevado.

Passo 2: Neste passo é escolhida uma ERB para compor o conjunto solução. Dois métodos diferentes são usados para esta escolha:

1. Caso a cobertura de toda a área considerada no problema não tenha sido alcançada ainda, ou seja, o número de ERBs pertencentes ao conjunto solução é menor que o número mínimo de ERBs a serem ativadas, a ERB escolhida será aquela que apresentar o menor valor para a razão entre custo de instalação da ERB e a quantidade de centros de demanda ainda não cobertos.
2. Caso todos os centros de demanda já estejam sendo cobertos pela atual solução, a ERB escolhida será aquela que cobrir o maior número de CDs já cobertos. Isso possibilitará que alguns dos CDs atendidos pelas outras ERBs do conjunto solução possam ser desvinculados destas e associados à nova ERB escolhida, reduzindo, assim, os valores das potências de transmissão.

Passo 3: Neste passo, é feita a distribuição dos centros de demanda entre as ERBs pertencentes ao conjunto solução. O critério para associação de um centro de demanda (CD) i a uma ERB j é baseado no valor do ganho de propagação entre o CD i e a ERB j (g_{ij}). Para um dado centro de demanda i , avalia-se os valores dos ganhos de propagação entre este CD e todas as ERBs ativas no momento. O centro de demanda i será associado à ERB j para o qual resulta o maior valor de ganho de propagação (g_{ij}).

Passo 4: Neste passo, determinam-se as potências de transmissão entre os centros de demanda e as ERBs que atendem estes respectivos centros de demanda.

Passo 5: Neste passo, aplica-se o método de controle de potências de transmissão e qualidade de sinal. As restrições consideradas são 2.6, 2.7, 2.10 e 2.11, apresentadas na seção 2.

Passo 6: Neste ponto do algoritmo, chega-se ao fim de uma iteração e uma das situações a seguir ocorre:

1. Se o número de iterações for igual ao número máximo de iterações definido para esta execução do algoritmo, apresenta-se a solução atual como melhor solução encontrada e encerra-se a execução.
2. Se o número de ERBs do conjunto solução é maior que o número mínimo de ERBs a serem ativadas e as restrições de potência e qualidade do sinal estão sendo atendidas e o valor da solução encontrada nesta iteração é maior que a encontrada na iteração anterior, encerra-se também a execução do algoritmo. Porém, a solução final, neste caso, será a solução encontrada na iteração anterior.
3. Se nenhum dos casos citados anteriormente foram verificados, volta-se ao passo 2 e uma nova iteração do algoritmo se inicia.

3.2. Algoritmo Genético

Os Algoritmos Genéticos são caracterizados pela evolução de um conjunto de soluções-tentativas (população), segundo regras estocásticas de busca e combinação que levam de uma população a seguinte numa seqüência de gerações [Takahashi 2003]. O Algoritmo Genético desenvolvido neste trabalho emprega a abordagem mono-objetivo. Esta, por sua vez, é caracterizada pela existência de uma única função objetivo para avaliação da qualidade de uma solução para o problema de entrada. A partir das soluções iniciais da instância submetida, são realizados repetidamente, nesta ordem, os procedimentos de avaliação, classificação e aplicação dos operadores genéticos enquanto o critério de parada não é atendido. Segue uma descrição sucinta da forma como esses componentes foram implementados para solução do P3GMS.

A representação de um indivíduo (também chamado cromossomo ou solução viável do problema) foi realizada através de uma codificação binária em dois níveis. No primeiro nível, cada cromossomo é visto como um arranjo binário que representa o conjunto de locais candidatos (genes) à instalação das estações rádio-base. Um gene assume o valor 1 caso a estação esteja ativa (instalada no local candidato correspondente e atendendo a pelo menos um centro de demanda) e 0 caso esteja inativa (não instalada). Associado a cada gene, segundo nível da representação, está indicado os centros de demanda atendidos pela ERB ativa correspondente. O conjunto formado pelos CDs a serem atendidos é representado por um arranjo de números binários. Num gene, as posições do arranjo correspondente aos CDs atendidos pela ERB correspondente assumem o valor 1 e as demais têm valor 0.

A geração das soluções viáveis iniciais (população inicial de indivíduos) emprega uma estratégia gulosa. Utilizando um gerador de números pseudoaleatórios é selecionada uma estação rádio-base inativa. A partir da entrada correspondente a esta estação na matriz de cobertura, são atribuídos a ela todos os CDs ainda não atendidos por estações já ativas. Além deste fato, para atribuir um centro de demanda a uma estação, é necessário verificar se a potência de transmissão encontra-se entre os valores mínimo e máximo permitidos e se o cumprimento dos requisitos de qualidade são respeitados. Tal processo é repetido até que todos os CDs, que podem ser atendidos, sejam atribuídos a uma única estação. A fim de atender a todas as restrições impostas pelo modelo, ao final deste processo de atribuição dos centros de demanda às estações rádio-base, é verificado se há um número mínimo de

estações ativas. Em caso afirmativo, é realizada a avaliação da população inicial gerada. Caso contrário, é selecionada uma estação ativa e uma inativa. A partir da matriz de cobertura desta, são atribuídas a ela alguns dos CDs anteriormente atendidas pela estação ativa. Em seguida, a estação é ativada. Da mesma forma, este processo é repetido até que o número mínimo de estações ativas seja atingido.

O cálculo da função de avaliação (*fitness*) corresponde ao somatório ponderado do custo de instalação das estações ativas e da potência de transmissão em toda a rede, para um dado indivíduo. Com esta ponderação é possível priorizar a minimização do custo em detrimento da potência de transmissão, e vice-versa. A partir do valor da função de avaliação de cada indivíduo, é realizada a classificação da população atual. Para isto, é utilizado o método seleção para ordenação dos indivíduos.

A operação de seleção implementada corresponde ao chamado Princípio da Roleta [Arroyo e Armentano 2001]. Neste método, cada indivíduo da população é representado na roleta proporcionalmente ao valor de sua função de avaliação. Assim, aos indivíduos com maior *fitness* é dada uma porção maior da roleta, enquanto aos de *fitness* mais baixo é dada uma porção relativamente menor da roleta. Finalmente, a roleta é girada um determinado número de vezes, dependendo do tamanho da população, e são escolhidos, como indivíduos que participarão da próxima geração, aqueles sorteados na roleta.

O cruzamento dos indivíduos (*crossover*), anteriormente selecionados, é realizado por meio de um operador conhecido na literatura como PMX (*Partially-Matched Crossover*) [Goldberg 1989]. Dados os cromossomos pais, no primeiro nível da representação adotada o operador copia parte dos genes de um dos pais diretamente na mesma posição do filho. As posições restantes se completam com os valores que ainda não tenham sido utilizados. Dessa forma, os centros de demanda não serão atribuídos a mais de uma estação.

O operador de mutação implementado inicialmente utiliza o gerador de números pseudoaleatórios para selecionar um indivíduo da população inicial. Deste indivíduo são selecionadas aleatoriamente uma estação rádio-base ativa e outra inativa. Se esta atender a todas as restrições do problema, ela é ativada e passa a atender os CDs daquela inicialmente ativa (que se torna inativa na seqüência). Assim como o cruzamento, este operador é aplicado sobre a população atual de acordo com um percentual fornecido ao algoritmo (taxas de *crossover* e mutação).

Alguns dos melhores indivíduos, com melhor valor de *fitness*, são selecionados para permanecer na população das gerações seguintes. Esta seleção é denominada elitização e os indivíduos selecionados segundo este critério formam a população elite.

O critério adotado para finalizar a busca por uma solução do problema consiste em verificar se um número máximo de iterações (gerações) foi atingido.

4. Resultados Obtidos

Esta seção descreve os experimentos realizados com o objetivo de validar o modelo matemático do P3GMS 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, executando o sistema operacional Linux.

4.1. Gerador de Instâncias

Cada instância foi definida, sem perda de generalidade, sobre uma área retangular de lados L x W , em quilômetros, na qual foram distribuídos $|I|$ centros de demanda e $|J|$ locais candidatos a instalação de antenas. Cada CD foi considerado como um retângulo dentro da área de interesse e sua posição é dada pelo par ordenado (x,y) do canto superior esquerdo. Todos os CDs têm o mesmo comprimento e a mesma largura, sendo que estes dados são parâmetros de entrada para o gerador. Os locais candidatos são pontos dentro da área de interesse e suas posições são dadas pelo par ordenado (x,y) e estas correspondem às coordenadas dos cantos inferiores direitos dos CDs.

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 o ruído térmico e de outras fontes percebido em todas as antenas é igual, ou seja, $\eta_j = \eta = -130$ 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 $P_{\max} = 30$ dB $= 1$ W. 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 a partir do modelo de Okumura-Hata. A origem deste modelo está nas medidas realizadas por Okumura em Tóquio [Okumura et al 1968] para frequências de até 1.920 MHz e posteriormente ajustadas a um modelo matemático por Hata [Hata 1980]. Devido à limitação no intervalo de frequências (150 a 1000 MHz), o modelo original foi adaptado pela COST-231 [COST 1991], resultando em um modelo válido em frequências de 1,5 a 2,0 GHz e, portanto, aplicável a redes celulares de terceira geração.

4.2. Experimentos

Os experimentos discutidos nesta seção foram criados a partir de classes de instâncias de diferentes tamanhos, conforme mostra a Tabela 1. Para cada classe, foram geradas três instâncias distintas do problema, utilizadas nos testes.

| Classe | L x W (km x km) | I | J |
|--------|-----------------|-----|----|
| I | 0,5 x 0,5 | 50 | 10 |
| II | 1,0 x 1,0 | 100 | 20 |
| III | 1,0 x 1,0 | 200 | 40 |

Tabela 1. Configuração das instâncias utilizadas nos experimentos.

O número mínimo C de ERBs necessárias para atender a demanda é calculado, para uma dada instância, em uma fase de pré-processamento. Antes de resolver uma instância do problema com algoritmo guloso ou genético, verifica-se qual o número mínimo de ERBs que garante o atendimento a toda área de cobertura. O valor de C é calculado através da matriz de cobertura c_{ij} , e nos experimentos realizados, C foi sempre igual a 1.

4.2.1 Experimentos com um Único Serviço

Com o intuito de comparar os resultados obtidos com a utilização do modelo matemático do P3GMS apresentado para único serviço (segunda geração das redes celulares) e múltiplos serviços (terceira geração das redes celulares), foram realizados alguns testes para o cenário com um único serviço. Para estes experimentos, foi adotado um valor de SIR_{alvo} igual a 0,020982.

As Tabelas 2 e 3 apresentam os resultados obtidos pelo algoritmo Guloso e pelo Genético, respectivamente, para as instâncias das classes I, II e III. A primeira coluna da tabela contém a identificação da instância. A seguir, é apresentado o valor da função objetivo alcançado ao final do processamento. A terceira coluna mostra o número de ERBs ativas na solução e a quarta coluna mostra quais são as ERBs ativas. O tempo de execução em segundos e o número de iterações do algoritmo completam a tabela.

| ID | Solução | Nº de ERBs | ERBs Ativadas | Tempo (s) | Iterações |
|------------------|----------|------------|---------------|------------|-----------|
| I ₁ | 1,077714 | 1 | 1 | 0,00073004 | 2 |
| I ₂ | 1,214978 | 1 | 1 | 0,00075197 | 2 |
| I ₃ | 1,238921 | 1 | 1 | 0,00074887 | 2 |
| II ₁ | 3,442824 | 1 | 1 | 0,00295615 | 2 |
| II ₂ | 3,442822 | 1 | 1 | 0,00296402 | 2 |
| II ₃ | 3,700749 | 2 | 1, 2 | 0,00418711 | 3 |
| III ₁ | 4,718522 | 3 | 1, 2, 3 | 0,03314614 | 4 |
| III ₂ | 5,032825 | 2 | 1, 2 | 0,02488017 | 3 |
| III ₃ | 5,010730 | 2 | 1, 2 | 0,02492809 | 3 |

Tabela 2. Resultados da execução do algoritmo Guloso para único serviço.

| ID | Solução | Nº de ERBs | ERBs Ativadas | Tempo (s) | Iterações |
|------------------|----------|------------|---------------|-----------|-----------|
| I ₁ | 1,077713 | 1 | 4 | 10,741015 | 20 |
| I ₂ | 1,077713 | 1 | 5 | 9,238596 | 20 |
| I ₃ | 1,077713 | 1 | 4 | 9,229154 | 20 |
| II ₁ | 3,442822 | 1 | 1 | 13,653613 | 10 |
| II ₂ | 3,442822 | 1 | 7 | 14,174990 | 10 |
| II ₃ | 4,199899 | 1 | 2 | 16,353798 | 10 |
| III ₁ | 5,873065 | 1 | 30 | 39,489668 | 5 |
| III ₂ | 5,873065 | 1 | 11 | 35,195250 | 5 |
| III ₃ | 7,445276 | 1 | 37 | 34,285810 | 5 |

Tabela 3. Resultados da execução do algoritmo Genético para único serviço.

Analisando os dados das Tabelas 2 e 3, verifica-se que o valor médio das soluções cresce com o aumento das dimensões do problema. Para as instâncias da classe I, o valor médio da solução é igual a 1,177204 para o Guloso e 1,077713 para o Genético. Para as instâncias da classe II, este valor é igual a 3,528798 (Guloso) e 3,695181 (Genético). Para classe III, esse valor é igual a 4,920692 (Guloso) e 6,397153 (Genético). Com o aumento das dimensões das instâncias, verifica-se, para o algoritmo Guloso, um aumento dos valores das soluções e do número médio de ERBs ativas. 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. No algoritmo Genético, o aumento das dimensões do problema resultou apenas no aumento dos valores das soluções. Este cenário justifica-se pelo fato de que para realizar o atendimento de uma maior demanda pelo serviço, sem necessitar de aumentar os custos com

novos investimentos na infraestrutura da rede, são requeridas potências de transmissão mais elevadas. Observando os tempos de resposta, percebe-se que ambas as técnicas apresentaram um aumento desta métrica com o crescimento do problema. Este comportamento decorre do aumento no número de variáveis e, conseqüentemente, da necessidade de serem realizadas mais computações para a determinação da solução. Nota-se ainda que o número de iterações do algoritmo genético diminuiu conforme a classe da instância (I, II ou III), mas aumentou no caso do algoritmo guloso. Isto se deve ao fato do número de iterações no algoritmo genético corresponder ao número médio de gerações decorridas para obter a melhor solução em termos das métricas avaliadas. Já, no algoritmo guloso, o número total de iterações cresce em função do aumento da complexidade da instância submetida pelo fato deste algoritmo ativar uma ERB a cada iteração.

4.2.2 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. A determinação da demanda por cada um dos serviços foi feita através da definição de cenários. Cada cenário corresponde a uma certa distribuição da demanda entre os serviços, em termos percentuais. A Tabela 4 apresenta os valores de SIR_{alvo} para cada tipo de serviço considerado e os cenários definidos.

| Serviço | SIR_{alvo} | Cenário 1 | Cenário 2 |
|---------|--------------|-----------|-----------|
| Voz | 0,020982 | 90% | 50% |
| Dados 1 | 0,031250 | 6% | 30% |
| Dados 2 | 0,041113 | 3% | 15% |
| Dados 3 | 0,114815 | 1% | 5% |

Tabela 4. SIR_{alvo} e cenários de distribuição da demanda entre os diversos serviços.

As Tabelas 5 e 6 apresentam os resultados obtidos com os algoritmos Guloso e Genético, respectivamente, utilizando as instâncias I, II e III e considerando o cenário 1.

| ID | Solução | Nº de ERBs | ERBs Ativadas | Tempo (s) | Iterações |
|------------------|----------|------------|---------------|------------|-----------|
| I ₁ | 1,138224 | 1 | 1 | 0,00144506 | 2 |
| I ₂ | 1,308282 | 1 | 1 | 0,00144696 | 2 |
| I ₃ | 1,334027 | 1 | 1 | 0,00142908 | 2 |
| II ₁ | 3,699478 | 1 | 3 | 0,00735497 | 2 |
| II ₂ | 3,750858 | 1 | 6 | 0,00740099 | 2 |
| II ₃ | 3,623099 | 2 | 3, 18 | 0,01071692 | 3 |
| III ₁ | 6,057370 | 2 | 2, 7 | 0,06769204 | 3 |
| III ₂ | 4,945679 | 2 | 2, 9 | 0,06823397 | 3 |
| III ₃ | 5,577934 | 3 | 9, 13, 24 | 0,13017011 | 4 |

Tabela 5. Resultados da execução do algoritmo Guloso para o cenário 1.

| ID | Solução | Nº de ERBs | ERBs Ativadas | Tempo (s) | Iterações |
|-----------------|----------|------------|---------------|------------|-----------|
| I ₁ | 1,113795 | 1 | 10 | 87,191910 | 20 |
| I ₂ | 1,161094 | 1 | 3 | 89,197888 | 20 |
| I ₃ | 1,112707 | 1 | 5 | 89,888862 | 20 |
| II ₁ | 3,699478 | 1 | 3 | 165,104846 | 10 |
| II ₂ | 3,551292 | 1 | 17 | 173,217971 | 10 |
| II ₃ | 3,797040 | 1 | 18 | 164,682210 | 10 |

| | | | | | |
|------------------|----------|---|--------|------------|---|
| III ₁ | 9,619385 | 2 | 21, 30 | 434,224955 | 5 |
| III ₂ | 8,935588 | 2 | 3, 34 | 441,561245 | 5 |
| III ₃ | 8,241663 | 2 | 9, 11 | 404,488647 | 5 |

Tabela 6. Resultados da execução do algoritmo Genético para o cenário 1.

O cenário 1 representa uma alta demanda por serviços de voz (90%) e um grau muito menor, porém não inexistente, de demanda por serviços de dados (10%). Observando os dados da Tabela 5, nota-se que o valor médio das soluções foi maior que os encontrados nos experimentos de único serviço (voz), contudo, o número médio de ERBs ativas manteve-se constante. A explicação para este fato é que a substituição de 10% da demanda por serviços de voz por 10% de demanda por serviços de dados fez com que as potências de transmissão se elevassem, uma vez que os serviços de dados requerem uma qualidade maior do sinal (SIR_{alvo} maior). Entretanto, esta combinação de serviços de voz e dados não foi suficiente para provocar um aumento do número de ERBs ativas no algoritmo Guloso. Os resultados obtidos com o Genético, Tabela 6, também apresentam um aumento quanto ao valor médio das soluções, justificado pela demanda por serviços de dados, e quanto ao número médio de ERBs ativas nas instâncias da classe III. Apesar deste último comportamento evidenciar uma maior sensibilidade do algoritmo Genético quanto ao aumento da complexidade do problema, o número médio de ERBs ativas obtidas com este foi inferior ao do Guloso. Cabe observar que ambas as heurísticas apresentaram um acréscimo não exponencial no tempo de execução, comparando os resultados com um único e com múltiplos serviços, apesar do aumento da complexidade do problema.

As Tabelas 7 e 8 apresentam os resultados obtidos pelas heurísticas para o cenário 2, em que 50% da demanda é por chamadas de voz e os outros 50% são divididos entre os diversos serviços de dados.

| ID | Solução | Nº de ERBs | ERBs Ativadas | Tempo (s) | Iterações |
|------------------|----------|------------|---------------|------------|-----------|
| I ₁ | 1,487609 | 1 | 1 | 0,00144410 | 2 |
| I ₂ | 1,490691 | 1 | 1 | 0,00145197 | 2 |
| I ₃ | 1,692773 | 1 | 1 | 0,00144792 | 2 |
| II ₁ | 4,313141 | 2 | 1, 5 | 0,01081586 | 3 |
| II ₂ | 4,586148 | 2 | 1, 4 | 0,00777578 | 3 |
| II ₃ | 4,076201 | 2 | 1, 2 | 0,00773501 | 3 |
| III ₁ | 7,103759 | 3 | 7, 34, 35 | 0,13048816 | 4 |
| III ₂ | 7,494902 | 3 | 21, 25, 40 | 0,13216710 | 4 |
| III ₃ | 7,014050 | 4 | 5, 8, 21, 38 | 0,16209412 | 5 |

Tabela 7. Resultados da execução do algoritmo Guloso para o cenário 2.

| ID | Solução | Nº de ERBs | ERBs Ativadas | Tempo (s) | Iterações |
|------------------|-----------|------------|---------------|------------|-----------|
| I ₁ | 1,180498 | 1 | 2 | 90,213651 | 20 |
| I ₂ | 1,169339 | 1 | 2 | 102,717901 | 20 |
| I ₃ | 1,146635 | 1 | 2 | 93,188728 | 20 |
| II ₁ | 5,910767 | 3 | 6, 10, 16 | 183,169957 | 10 |
| II ₂ | 5,735060 | 2 | 3, 14 | 166,232585 | 10 |
| II ₃ | 6,600377 | 2 | 1, 12 | 171,980110 | 10 |
| III ₁ | 11,900510 | 2 | 15, 29 | 419,343138 | 5 |
| III ₂ | 12,930472 | 3 | 6, 18, 25 | 424,332652 | 5 |
| III ₃ | 11,756347 | 2 | 32, 35 | 401,546117 | 5 |

Tabela 8. Resultados da execução do algoritmo Genético para o cenário 2.

É possível observar que a mudança no perfil da demanda, maior demanda por serviços de dados, refletiu-se no aumento do valor médio das soluções se comparado com os resultados para o cenário 1 de ambas as heurísticas implementadas. Isso ocorre porque o aumento da demanda por serviços de dados implica em valores mais elevados para as potências de transmissão. Os valores de SIR_{alvo} para os serviços de dados são maiores que os valores para os serviços de voz. Dessa maneira, os resultados obtidos apresentaram um aumento do número médio de ERBs ativadas, para garantir a qualidade do sinal transmitido e evitar valores de potência elevados. O tempo médio de execução para o cenário 2 aumentou em relação ao cenário 1 para ambos os algoritmos. Entretanto, o algoritmo Guloso, de uma forma geral, revela-se mais interessante que o algoritmo Genético sob o aspecto de tempo, uma vez que, em todos os experimentos realizados, o tempo de execução ficou abaixo de 200 ms.

5. Conclusões e Trabalhos Futuros

Esse trabalho apresentou um modelo de programação inteira mista para o problema de planejamento de redes celulares de terceira geração, considerando a localização das estações rádio-base e os mecanismos de controle de potência. A formulação apresentada estende as restrições utilizadas para o planejamento de redes de segunda geração ao considerar a demanda por múltiplos serviços, com taxas de transmissão e requisitos de qualidade do sinal, em termos de SIR, diferenciados.

O problema resultante é NP-difícil e sua aplicação a situações reais de planejamento resulta em instâncias de grande porte. Para solucionar estas em tempo hábil, torna-se necessária a utilização de heurísticas. Neste trabalho, foram desenvolvidos dois algoritmos para solucionar o P3GMS (Genético e Guloso).

Os experimentos realizados indicam que ambos os métodos implementados são capazes de solucionar rapidamente as três classes de instâncias de diferentes tamanhos. A definição de diferentes cenários, variando o percentual de demanda dos serviços de voz e dados, para os experimentos com múltiplos serviços, revela que quanto maior o número de conexões requisitadas para serviços com taxas de transmissão mais altas, maior o número de ERBs necessárias para assegurar a qualidade desejada ou maior será a potência de transmissão de sinal. Os resultados comparativos mostraram que o algoritmo Genético realizou um planejamento mais eficaz da rede, sob a métrica relativa ao custo de instalação das estações rádio-base. O algoritmo Guloso, por sua vez, apresentou resultados próximos ao do Genético, num tempo computacional bem inferior ao deste.

Com o intuito de obter melhores limites superiores para o problema, como trabalhos futuros, serão implementadas as heurísticas GRASP e Pesquisa Tabu a partir do que já foi implementado para o algoritmo Guloso. Para avaliar o algoritmo Genético mono-objetivo e buscar uma melhora das soluções obtidas, será definido um algoritmo Genético Multiobjetivo para o P3GMS. Também é prevista a implementação da heurística da relaxação Lagrangeana para gerar limites inferiores para o problema. A relaxação Lagrangeana é aplicada ao P3GMS em [Franqueira 2003], no entanto, neste trabalho, os limites superiores são gerados por meio de heurísticas que, basicamente, recuperam a viabilidade de soluções. Dessa forma, a nossa

proposta é aplicar a relaxação Lagrangeana, utilizando as heurísticas gulosa e genética como geradoras de melhores limites superiores.

Referências

- Samukic, A. (1998) “UMTS Universal Mobile Telecommunications System: Development of Standards for the Third Generation”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 47(4):1099-1104.
- Amaldi, E., Capone, A. and Malucelli, F. (2001) “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, Milão, Itália.
- Franqueira, R. (2003) “Planejamento de Redes Celulares de Terceira Geração Considerando Localização de Estações Rádio-Base, Controle de Potência e Múltiplos Serviços”, Master’s thesis. DCC – UFMG, Belo Horizonte, MG.
- Eisenblätter, A., Fügenschuh, A., Koch, T., Koster, A., Martin, A., Pfender, T., Wegel, O. and Wessäly, R. (2002) “Modelling Feasible Network Configurations for UMTS”, Technical Report ZIB-Report 02-16, Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik.
- Tutschku, K. (1998) “Demand-based Radio Network Planning of Cellular Mobile Communication Systems”, In: IEEE INFOCOM’98, volume3, p. 1054-1061.
- ILOG S/A. ILOG CPLEX 7.0 – User’s Manual. ILOG S/A. <http://www.ilog.com/products/cplex>, Agosto.
- Arroyo, J. and Armentano, V. (2001) “Um Algoritmo Genético para Problemas de Otimização Combinatória Multiobjetivo”, In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 33. Campos do Jordão, SP.
- Okumura, T., Ohmori, E., and Fukuda, K. (1968) “Field Strength and its Variability in VHF and UHF Land Mobile Service”, Review Electrical Communications Laboratory 16, p. 825-873.
- Hata, M. (1980) “Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Service”, In: IEEE Transactions on Vehicular Technology 29, p. 317-325.
- Commission of European Communities. (1991) “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.
- Reeves, C. R., Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems, Halsted Press, 1993.
- Goldberg, D. E., Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, Addison-Wesley, Reading MA, 1989.
- Takahashi, R. H. C. Otimização Escalar e Vetorial - Notas de aulas, Departamento de Matemática, Universidade Federal de Minas Gerais, 2003.