



COPPE/UFRJ

ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO PARA O PROBLEMA DE
PLANEJAMENTO DE REDES CELULARES DE TERCEIRA GERAÇÃO

Michele da Silva Sousa

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas e Computação, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Sistemas e Computação.

Orientadores: Nelson Maculan Filho

José Andre de Moura Brito

Rio de Janeiro

Março de 2010

ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO PARA O PROBLEMA DE
PLANEJAMENTO DE REDES CELULARES DE TERCEIRA GERAÇÃO

Michele da Silva Sousa

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE SISTEMAS E COMPUTAÇÃO.

Examinada por:

Prof. Nelson Maculan Filho, D. Habil.

Prof. José Andre de Moura Brito, D.Sc.

Prof. Adilson Elias Xavier, D.Sc.

Prof. Paulo Roberto de Oliveira, D.Sc.

Prof. Carlile Campos Lavor, D.Sc.

Prof. Flávio Marcelo Tavares Montenegro, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2010

Sousa, Michele da Silva

Algoritmos de Otimização para o Problema de Planejamento de Redes Celulares de Terceira Geração/Michele da Silva Sousa. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010.

XIII, 128p. 29, 7cm.

Orientadores: Nelson Maculan Filho

José Andre de Moura Brito

Tese (doutorado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia de Sistemas e Computação, 2010.

Referências Bibliográficas: p. 121 – 128.

1. Redes celulares 3G. 2. Metaheurísticas. 3. Programação Inteira Mista. I. Maculan Filho, Nelson *et al.*. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Sistemas e Computação. III. Título.

Agradecimentos

A Deus que me mostrou o caminho e iluminou os meus passos.

Aos meus queridos pais Getulio e Ana, pelo amor e incentivo.

A minha querida irmã Mônica pelo apoio e ajuda nos momentos difíceis.

Aos meus orientadores Nelson Maculan Filho e José André de Moura Brito, pela dedicação e paciência demonstrado no acompanhamento deste trabalho.

Ao professor Flávio Marcelo Tavares Montenegro, pela dedicação e colaboração na execução deste trabalho.

Aos professores Paulo Roberto de Oliveira, Adilson Elias Xavier e Carlile Campos Lavor, por participarem da minha banca.

Ao professor Antonio Capone da Politecnico di Milano pelo interesse apresentado durante o desenvolvimento desta tese.

A pesquisadora Katia C. Lage dos Santos que cedeu o gerador de intâncias utilizado neste trabalho.

As minhas amigas Ana Luzia, Fátima, Isabela, Sayonarah e Talita, pela ativa participação e ajuda.

A todos os amigos, pela força e confiança depositados nos meus objetivos.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO PARA O PROBLEMA DE
PLANEJAMENTO DE REDES CELULARES DE TERCEIRA GERAÇÃO

Michele da Silva Sousa

Março/2010

Orientadores: Nelson Maculan Filho

José Andre de Moura Brito

Programa: Engenharia de Sistemas e Computação

O planejamento de redes de telefonia celular de terceira geração (redes 3G) e, conseqüentemente, a disponibilização de múltiplos serviços para os usuários de uma rede, corresponde a um problema de otimização de difícil solução. A resolução de tal problema está intrinsecamente associada com a localização de um conjunto de estações rádio base (ERBs) e com o controle da potência de transmissão na rede. O presente trabalho propõe um conjunto, de algoritmos que combinam os conceitos das metaheurísticas GRASP, VNS, ILS e Algoritmos Genéticos. Tais algoritmos foram utilizados conjuntamente com uma formulação de programação inteira, com o objetivo de solucionar o problema de redes 3G. Resultados computacionais para instâncias de pequeno, médio e grande porte são apresentados e discutidos. Análises probabilísticas são expostas com a finalidade de avaliar o desempenho destes algoritmos.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

OPTIMIZATION ALGORITHMS FOR THE PROBLEM OF THIRD
GENERATION CELLULAR NETWORKS

Michele da Silva Sousa

March/2010

Advisors: Nelson Maculan Filho

José Andre de Moura Brito

Department: Systems Engineering and Computer Science

The planning of third-generation cellular networks (3G networks) and, consequently, the provision of multiple services, corresponds to an optimization problem of difficult solution. The resolution of such problem is intrinsically associated to the location of a radio station set (ERBs) and to the broadcasting power of the network. This thesis proposes a set of algorithms that combine the concepts of GRASP, VNS, ILS and Genetic Algorithms. These algorithms were used together with an integer programming formulation, with the aim of solving the problem of 3G networks. Computational results for small, medium and large size instances are presented and discussed. Probabilistic analysis are developed in order to evaluate the performance of these algorithms.

Conteúdo

1	Introdução	1
2	Conceitos Básicos de Telefonia Celular	8
2.1	Histórico dos Sistemas de Telefonia Celular	8
2.2	Sistema de Telefonia Móvel de Terceira Geração	10
2.3	Conceitos Básicos de Telefonia Celular	14
2.3.1	Estrutura do Sistema Celular	15
2.3.2	Área de Cobertura e o Conceito de Célula	17
2.3.3	Antenas utilizadas no Sistema Celular	20
2.3.4	Propagação de Sinais	20
3	O Problema de Planejamento de Redes de Terceira Geração	22
3.1	Descrição do Problema que será Abordado	22
3.2	Panorama do Problema	25

3.3	Formulação de Programação Inteira Mista Considerando UMTS	33
4	Algoritmos Propostos	43
4.1	Metaheurísticas	44
4.1.1	GRASP	46
4.1.2	VNS	48
4.1.3	ILS	49
4.1.4	Algoritmos Genéticos	51
4.2	Algoritmos	57
4.2.1	GRASP	58
4.2.2	ILS	74
4.2.3	Algoritmo Genético (AG)	79
5	Resultados Computacionais	83
5.1	Geração dos Dados	84
5.2	Resultados dos Algoritmos para Instâncias com um Único Serviço	87
5.2.1	Análise das Soluções	88
5.3	Resultados dos Algoritmos para Instâncias com Múltiplos Serviços	96
5.3.1	Análise das Soluções	96
5.4	Análise Probabilística	103
5.4.1	Instâncias com Um Único Serviço	104
5.4.2	Instâncias com Múltiplos Serviços	111

6	Conclusões	116
6.1	Trabalhos Futuros	119

Lista de Figuras

2.1	Rede UMTS	14
2.2	Estrutura Básica de um Sistema Celular	16
2.3	Exemplo de Cobertura de uma Região	19
4.1	Representação do ILS	50
4.2	Pseudocódigo do Algoritmo ILS	51
4.3	Método do Torneio	53
4.4	Método da Roleta Viciada	54
4.5	Ilustração do Cruzamento de Um Ponto	55
4.6	Ilustração do Cruzamento de Dois Pontos	56
4.7	Ilustração do Cruzamento Uniforme	56
4.8	Preenchimento do Vetor de Potências	60
4.9	Conjuntos de ERBs Ativas e Inativas - GRVNS1	63
4.10	Ilustração da Aplicação do Procedimento de Perturbação	63
4.11	Ilustração da Aplicação do Procedimento de Substituição de Duas ERBs Ativas por Uma ERB Inativa - GRVNS1	64
4.12	Conjuntos de ERBs Ativas e Inativas - GRVNS2	66
4.13	Ilustração da Aplicação do Procedimento de Substituição de Duas ERBs Ativas por Uma ERB Inativa - GRVNS2	67

4.14	Conjuntos de ERBs Ativas e Inativas - GRVNS2	68
4.15	Ilustração da Aplicação do Procedimento de Substituição de Três ERBs Ativas por Duas ERB Inativas - GRVNS2	69
4.16	Conjuntos de ERBs Ativas e Inativas - GRVNS3	72
4.17	Ilustração da Aplicação do Procedimento de Substituição de Duas ERBs Ativas por Uma ERB Inativa - GRVNS3	72
4.18	Algumas Possíveis Soluções Iniciais	75
4.19	Lista L - ILS	76
4.20	Substituições Efetuadas na Busca Local - ILS	76
4.21	Ilustração da Aplicação do Procedimento de Perturbação - ILSPERT1	77
4.22	Ilustração da Aplicação do Procedimento de Perturbação - ILSPERT2	79
4.23	Ilustração do Cruzamento de Dois Pontos	80
4.24	Ilustração do Cruzamento Uniforme	81
5.1	Ilustração de um Conjunto de CDs e Locais Candidatos à Instalação das ERBs	85
5.2	Análise Gráfica dos Resultados dos Algoritmos para Um Único Serviço	102
5.3	Análise Gráfica dos Resultados dos Algoritmos para Múltiplos Serviços	102
5.4	Comparação entre os algoritmos - 70 CDs e 40 ERBs - Alvo Fácil	105
5.5	Comparação entre os algoritmos - 70 CDs e 40 ERBs - Alvo Médio	106
5.6	Comparação entre os algoritmos - 70 CDs e 40 ERBs - Alvo Difícil	106

5.7	Comparação entre os algoritmos - 160 CDs e 40 ERBs - Alvo Fácil	107
5.8	Comparação entre os algoritmos - 160 CDs e 40 ERBs - Alvo Médio	108
5.9	Comparação entre os algoritmos - 160 CDs e 40 ERBs - Alvo Difícil	108
5.10	Comparação entre os algoritmos - 250 CDs e 60 ERBs - Alvo Fácil	109
5.11	Comparação entre os algoritmos - 250 CDs e 60 ERBs - Alvo Médio	110
5.12	Comparação entre os algoritmos - 250 CDs e 60 ERBs - Alvo Difícil	110
5.13	Comparação entre os algoritmos - 40 CDs, 20 ERBs e 4 serviços - Alvo Fácil	111
5.14	Comparação entre os algoritmos - 40 CDs, 20 ERBs e 4 serviços - Alvo Médio	112
5.15	Comparação entre os algoritmos - 40 CDs, 20 ERBs e 4 serviços - Alvo Difícil	113
5.16	Comparação entre os algoritmos - 250 CDs, 50 ERBs e 4 serviços - Alvo Fácil	114
5.17	Comparação entre os algoritmos - 250 CDs, 50 ERBs e 4 serviços - Alvo Médio	114
5.18	Comparação entre os algoritmos - 250 CDs, 50 ERBs e 4 serviços - Alvo Difícil	115

Lista de Tabelas

4.1	Cromossomos e suas Aptidões	53
5.1	Resultados da Formulação obtidos pelo LINGO e pelos Algoritmos, utilizando um único serviço	90
5.2	Percentuais de Soluções Ótimas e Soluções Viáveis	93
5.3	Tempos dos Algoritmos - Um único serviço	95
5.4	Valor do SIR_{alvo} para o enlace reverso	96
5.5	Resultados obtidos pelo LINGO e pelos Algoritmos, utilizando múltiplos serviços	98
5.6	Percentuais de Soluções Ótimas e Soluções Viáveis	100
5.7	Alvos das instâncias com um único serviço	103
5.8	Alvos das instâncias com múltiplos serviços	104

Capítulo 1

Introdução

A telefonia celular, no decorrer das últimas décadas e especialmente em anos mais recentes, vem tendo um grande crescimento não apenas no que concerne ao número de usuários a serem atendidos, mas também aos tipos de serviços oferecidos a estes.

A primeira rede de comunicação celular [1] foi planejada e desenvolvida pelo Bell Labs, nos Estados Unidos, em 1947. Contudo, os experimentos em serviços de telefonia celular só começaram em 1978.

A primeira geração de sistemas de telefonia celular [14] caracterizou-se pela utilização da tecnologia analógica. Nos sistemas celulares de primeira geração [36], a largura da banda era compartilhada, sendo dividida entre os usuários através da alocação de canais de frequência distintos. Essa tecnologia é denominada FDMA (*Frequency Division Multiple Access*).

A segunda geração (2G), que foi caracterizada pela tentativa de padronização do sistema de telefonia celular, surgiu no início da década de noventa [14] e se baseou na utilização da tecnologia digital.

Para efetuar essa padronização [14] [40], a Europa introduziu o GSM (*Global System for Mobile Communications*), que se tornou o sistema de maior sucesso em todo o mundo. Nos sistemas celulares de segunda geração [36], duas tecnologias dominantes emergiram: o TDMA (*Time Division Multiple Access*) e o CDMA (*Code Division Multiple Access*).

A terceira geração (3G) está atualmente sendo desenvolvida [1], tendo como intuito principal possibilitar a convergência das tecnologias celular e de telefonia sem fio (*cordless*) em um sistema de comunicação pessoal único, no qual o terminal (telefone celular) possa ser usado em diversos ambientes. O sistema de telefonia móvel de terceira geração [23] [40] é o UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*). É formado por um conjunto de padrões bem especificados e válidos em todo o mundo. A interface aérea com maior aceitação para a terceira geração possui tecnologia WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*). Embora seja baseado na tecnologia CDMA, o WCDMA possui uma maior largura de banda (aproximadamente 5 MHz para a onda portadora) do que o seu antecessor (CDMA). A utilização do WCDMA permite taxas de transmissão mais altas para os usuários, o que, por sua vez, possibilita o atendimento de vários serviços da rede de uma forma mais rápida e eficiente.

O planejamento de redes de telefonia celular de terceira geração baseadas na Interface área WCDMA depende diretamente da resolução simultânea de dois problemas, quais sejam: a localização de estações rádio-base (ERBs) e o controle da potência de transmissão. No que concerne à localização, dado um conjunto de locais candidatos à instalação de um conjunto de ERBs, deve-se selecionar um subconjunto de ERBs de custo mínimo. Com relação ao controle de potência, a transmissão de um usuário pode ser percebida como

um ruído (qualquer tipo de perturbação externa que, quando exercida sobre um sinal, ocasiona sua distorção) pelos demais. Logo, há a necessidade de se controlar a potência de transmissão de cada usuário, de forma a minimizar o ruído total na rede. A técnica de controle de potência utilizada no problema a ser tratado nesta tese 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 pela ERB) e a interferência total a que este sinal está sujeito.

A pesquisa bibliográfica que auxiliou o desenvolvimento deste trabalho nos conduziu ao estudo e à utilização de uma formulação de programação inteira mista proposta por Franqueira [14]. Tal formulação representa bem os aspectos relevantes para o planejamento da capacidade da rede, como a localização das ERBs, o controle de potência e a demanda por múltiplos serviços (voz, internet, etc) com diferentes requisitos de qualidade do sinal em termos do SIR. 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 ou a flutuação rápida da potência de transmissão, é praticamente negligenciado.

Além da utilização dessa formulação, propõe-se no presente trabalho um conjunto de algoritmos implementados a partir do estudo das metaheurísticas GRASP, VNS, ILS e Algoritmos Genéticos. Tais algoritmos produziram soluções ótimas ou de boa qualidade para uma variada gama de instâncias do problema estudado.

A presente tese está dividida da seguinte forma: No capítulo 2, são apresentados alguns conceitos de redes de telefonia celular. A apresentação desses conceitos tem por finalidade facilitar o entendimento do problema que é o objeto de estudo deste trabalho. No capítulo 3, apresentamos a formulação de programação linear inteira mista, proposta por Franqueira [14]. Essa formulação sofreu uma pequena alteração, qual seja, o acréscimo de uma nova restrição. Ainda nesse capítulo, faz-se uma exposição das várias abordagens que têm sido desenvolvidas para a resolução do problema. No capítulo 4, primeiramente são apresentados os principais conceitos das metaheurísticas GRASP, VNS, ILS e Algoritmos Genéticos. Em seguida, apresentamos os algoritmos que foram implementados a partir do estudo dessas metaheurísticas. Tais algoritmos diferenciam-se, basicamente, pelas estratégias de busca local consideradas, pelas estratégias de seleção das soluções e pelo mecanismo de perturbação aplicado sobre as soluções. No decorrer deste trabalho, foram desenvolvidos oito algoritmos, a saber:

- GRASP com Busca Local Simples (GRBLS) - onde se verifica a possibilidade de retirar cada ERB (Estação Rádio Base) ativa na rede, isto é, cada ERB do conjunto solução, realocando-se os seus centros de demanda para as ERBs restantes do conjunto solução.
- GRASP com VNS híbrido 1 (GRVNS1) - caracterizado por trocas de $v + 1$ ERBs ativas, pertencentes ao conjunto solução (ERBs na rede), por v ERB(s) inativa(s).
- GRASP com VNS híbrido 2 (GRVNS2) - caracterizado pelas trocas de $v + 1$ ERBs ativas, pertencentes ao conjunto solução, por v ERB(s) inativa(s) que cobre(m) mais centros de demanda (melhor cobertura).

Ressalta-se que, para selecionar as ERBs ativas, deve-se considerar que a soma das coberturas das $v + 1$ ERBs ativas deve ser menor ou igual à soma das coberturas das v ERBs inativas.

- GRASP com VNS híbrido 3 (GRVNS3) - caracterizado pelas trocas de $v + 1$ ERBs ativas, pertencentes ao conjunto solução, por v ERB(s) inativa(s) cuja probabilidade de cobertura dos centros de demanda esteja(m) entre as 5 maiores da rede. Ressalta-se que, para selecionar as ERBs ativas, deve-se considerar que soma das probabilidades de cobertura das $v + 1$ ERBs ativas deve ser menor ou igual à soma das probabilidades de cobertura das v ERB(s) inativa(s).
- ILS com procedimento de Perturbação 1 (ILSPERT1) - a Busca Local é caracterizada pela definição de uma lista L formada pelas k ERBs que cobrem os centros de demanda na rede. As ERBs que estão em L são colocadas em ordem decrescente, isto é, das ERBs que cobrem mais centros de demanda para as ERBs que cobrem menos centros. A partir da lista L , selecionamos $x\%$ das ERBs que cobrem menos CDs e substituímos cada uma delas por ERBs que pertencem aos $y\%$ da lista L que cobrem mais CDs. A perturbação é caracterizada pela seleção de t posições do vetor solução e pela substituição das ERBs correspondentes a essas posições por ERBs selecionadas aleatoriamente.
- ILS com procedimento de Perturbação 2 (ILSPERT2) - o ILSPERT2 se diferencia do ILSPERT1 pelo tipo de perturbação empregada. Ou seja, na perturbação 2 seleciona-se aleatoriamente uma posição do vetor solução e verifica-se se é possível substituir a ERB associada a essa posição por uma ERB ativa ou inativa também selecionada aleatoriamente. Com a aplicação desse procedimento é possível que o número

de ERBs ativas aumente ou diminua.

- Algoritmo Genético - Nesse algoritmo, cada cromossomo foi definido como um vetor de I posições correspondentes aos centros de demanda da rede, sendo associado a cada posição desse vetor um valor entre 1 e J (número de ERBs candidatas). A seleção dos cromossomos para a geração seguinte foi efetuada a partir da aplicação do método do torneio. Foram implementados dois operadores de cruzamento (dois pontos e uniforme), um operador de mutação e um operador de diversificação. Além disso, também foi considerada uma estratégia de elitismo, de forma a garantir que a melhor solução da geração atual sempre fosse incluída na geração seguinte. Os dois operadores de cruzamento foram utilizados separadamente, originando duas versões do algoritmo, denominadas respectivamente AG1 e AG2.

Todos os algoritmos citados tratam da localização de ERBs e do controle de potência, além de considerar a demanda por múltiplos serviços.

Finalmente, no capítulo 5, apresenta-se um conjunto de resultados computacionais (tempos de processamento e valores das soluções) obtidos a partir da aplicação dos algoritmos e do pacote de otimização LINGO em 88 instâncias, geradas a partir de um gerador proposto por [52]. Cada instância gerada para a realização dos experimentos computacionais corresponde a uma área retangular (área de interesse) formada por um conjunto de quadrados, os quais estão associados aos centros de demanda (CDs) da rede. Em tal área de interesse, é simulada a distribuição de uma certa quantidade de demanda para os CDs e de locais candidatos à instalação das ERBs. Além disso, com o intuito de possibilitar um outro tipo de avaliação do desempenho desses

algoritmos, análises probabilísticas são apresentadas. Concluindo nossa exposição, temos algumas considerações sobre o trabalho realizado nesta tese, bem como propostas para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Conceitos Básicos de Telefonia Celular

O presente capítulo aborda alguns conceitos principais associados às redes de telefonia celular. A apresentação de tais conceitos facilitará o entendimento do problema específico, a ser abordado no capítulo seguinte, cuja solução será proposta neste trabalho. Inicialmente, faremos um breve histórico dos sistemas de telefonia celular de primeira e segunda gerações. Em seguida, será feita uma descrição detalhada das características da rede de terceira geração, no que concerne à sua estrutura e ao seu funcionamento.

2.1 Histórico dos Sistemas de Telefonia Celular

A primeira rede de comunicação celular [1] foi planejada e desenvolvida pelo Bell Labs, nos Estados Unidos, em 1947. Contudo, os experimentos com serviços de telefonia celular só tiveram início em 1978. O primeiro país a oferecer o serviço de telefonia celular foi a Suécia, em 1981, embora a

empresa americana Motorola tivesse patenteado a tecnologia de comunicação celular em 1973. Apesar de seu lançamento em 1979, em Chicago, só em 1984 é que o sistema foi completamente instalado na América.

A primeira geração de sistemas de telefonia celular [14] caracterizou-se pela utilização da tecnologia analógica. Na Europa e no Japão, além da tecnologia analógica, existiam vários sistemas de telefonia celular que eram incompatíveis entre si (essa variedade de sistemas de telefonia também viria a caracterizar a terceira geração nessas regiões). Sendo assim, a padronização se fazia necessária para permitir a comunicação entre as várias redes.

Nos sistemas celulares de primeira geração [36], a largura da banda (intervalo entre duas frequências) era compartilhada, sendo dividida entre os usuários através da alocação de canais de frequência distintos. Essa tecnologia é denominada FDMA (*Frequency Division Multiple Access*).

A segunda geração (2G) surgiu no início da década de noventa [6] [14] e se baseou na utilização da tecnologia digital, visto que já havia um ambiente favorável para a implantação da comunicação digital e por essa ser mais econômica do que a analógica. A segunda geração foi também caracterizada pela tentativa de uma padronização do sistema de telefonia celular.

Para efetuar tal padronização [6] [14] [51], a Europa introduziu o GSM (*Global System for Mobile Communications*), que se tornou o sistema de maior sucesso em todo o mundo, e o Japão introduziu, em 1991, o PDC (*Pacific Digital Cellular*). Nos Estados Unidos, diferentemente da Europa e do Japão, a primeira geração (analógica) foi representada somente pelo padrão AMPS (*Advanced Mobile Phone System*), enquanto a segunda geração (digital) foi representada por três padrões. Destes, os dois primeiros foram os

padrões IS-54 e IS-95, lançados respectivamente em 1991 e 1993. O terceiro padrão foi o GSM1900, introduzido no mercado através do leilão de uma nova faixa do espectro de frequências, em torno de 1.900 MHz, realizado pela FCC (*Federal Communications Commission*).

A partir disso, duas tecnologias dominantes emergiram nos sistemas celulares de segunda geração [36]: o TDMA (*Time Division Multiple Access*) e o CDMA (*Code Division Multiple Access*). O TDMA é um sistema que funciona dividindo um canal de frequência em até seis intervalos de tempo distintos. Cada usuário ocupa um espaço de tempo específico na transmissão, o que impede problemas de interferência. No CDMA, a largura de banda inteira disponível para um serviço é compartilhada por todos os usuários do sistema.

Atualmente, está sendo desenvolvida a terceira geração (3G) [1], com o intuito de possibilitar a convergência das tecnologias celular e de telefonia sem fio (*cordless*) em um sistema de comunicação pessoal único, no qual um aparelho celular pode ser usado em diversos ambientes. É importante ressaltar que o uso de terminais portáteis em nível mundial define uma característica fundamental da tecnologia 3G, que é a mobilidade do terminal. O sistema de telefonia móvel de terceira geração será descrito em detalhes na seção seguinte.

2.2 Sistema de Telefonia Móvel de Terceira Geração

O sistema de telefonia móvel de terceira geração [1] visa a uma integração em nível mundial das comunicações pessoais.

Os principais objetivos dos sistemas 3G são [54] [1]:

- uso de terminais portáteis, de pequenas dimensões, e sistemas com alto grau de similaridade entre seus projetos;
- incorporação de uma variedade de sistemas com disponibilidade de serviços de telefonia e de dados, assim como qualidade e confiabilidade comparáveis às da rede fixa;
- compatibilidade de serviços com as redes fixa, móvel, aeronáutica e marítima;
- interligação de usuários móveis a outros usuários, móveis ou fixos, considerando as redes de telecomunicações existentes;
- estrutura modular, para possibilitar um crescimento ordenado e otimizado;
- arquitetura aberta, facilitando a introdução tanto dos avanços e desenvolvimentos associados com novas tecnologias quanto de novas aplicações.

O sistema de telefonia móvel de terceira geração [23] [40] é o UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*), padronizado pelo ETSI (*European Telecommunications Standard Institute*). É também considerado, pelo ITU (*International Telecommunications Union*), entre os padrões da família IMT-2000 (*International Mobile Telephone padrão 2000*). É formado por um conjunto de padrões bem especificados e válidos em todo mundo. O objetivo do sistema UMTS [1] [11] é prover uma multiplicidade de serviços, para abranger desde a comunicação de voz, passando por telefonia de vídeo, até

a transferência de dados em alta velocidade, com qualidade equivalente á de uma rede fixa. Esse padrão [51] é chamado de universal porque os múltiplos serviços baseados na Internet têm alcance global, sendo preciso uma total inter-operação entre sistemas instalados em diversas regiões e países.

Coforme mencionado anteriormente, o sistema de terceira geração [14] [36] necessita de uma interface aérea universal (UMTS). A interface aérea [6] [51] com maior aceitação para a terceira geração utiliza o WCDMA (*Wide-band Code Division Multiple Access*) como padrão principal. O WCDMA é baseado no padrão CDMA, possuindo, contudo, uma maior largura de banda (aproximadamente 5 MHz para a onda portadora), o que permite taxas de transmissão mais altas para os usuários. Sua especificação foi definida em um projeto de cooperação (*3GPP - 3rd Generation Partnership Project*) do qual participam órgãos de padronização da Europa, do Japão, da Coréia, dos Estados Unidos e da China. Suas principais características são apresentadas em [44], [14] e [51].

Na interface rádio WCDMA [14], a potência de transmissão deve ser ajustada de maneira inversamente proporcional à distância efetiva da unidade móvel (celular) até a antena, isto é, ao ganho de propagação real do sinal, sendo o ganho de propagação correspondente á predição de sinais eletromagnéticos utilizados na comunicação entre as estações e as partes móveis do sistema (celulares).

O controle de potência equilibra as oscilações de canal decorrentes do efeito de sombreamento (*shadowing*). Tal efeito corresponde a uma variação lenta na potência das ondas eletromagnéticas que ocorre quando o usuário está atrás de um obstáculo (construção, montanha, etc) muito maior do que

o comprimento de onda do sinal de rádio. Além desse efeito, também pode ocorrer o desvanecimento (*fading*), que é o enfraquecimento da intensidade do sinal em consequência dos múltiplos caminhos seguidos pela onda eletromagnética do emissor até o receptor.

Levando em consideração a arquitetura da rede, o sistema UMTS [14][51] é constituído por uma série de elementos de rede lógicos, cada qual com suas funcionalidades específicas. Estes podem ser divididos em três grupos:

1) O Equipamento de usuários (UE), que é o terminal [51] que permite a comunicação entre o usuário e o sistema. É formado por duas partes [14]: o equipamento móvel (ME), que é o terminal de rádio usado para comunicação com a rede UTRAN (*UMTS Terrestrial Radio Access Network*) e o USIM (*UMTS Subscriber Identity Module*), que é um smartcard que armazena a identidade do usuário, as chaves de autenticação e criptografia e algumas informações sobre a assinatura do serviço.

2) A Rede Núcleo - CN (*Core Network*), cuja principal função [14] é fazer a comutação, o roteamento e trânsito para tráfego entre usuários. A CN também contém um banco de dados e as funções de gerenciamento da rede.

3) A Rede UMTS de Acesso por Rádio (UTRAN), que é formada [14] pela ERB e pelo RNC (*Radio Network Controller*), que controla os recursos de rádio em seu domínio e constitui o ponto de acesso de todos os serviços que a UTRAN fornece à CN (Core Network).

Os elementos de cada conjunto são mostrados na figura 2.1.

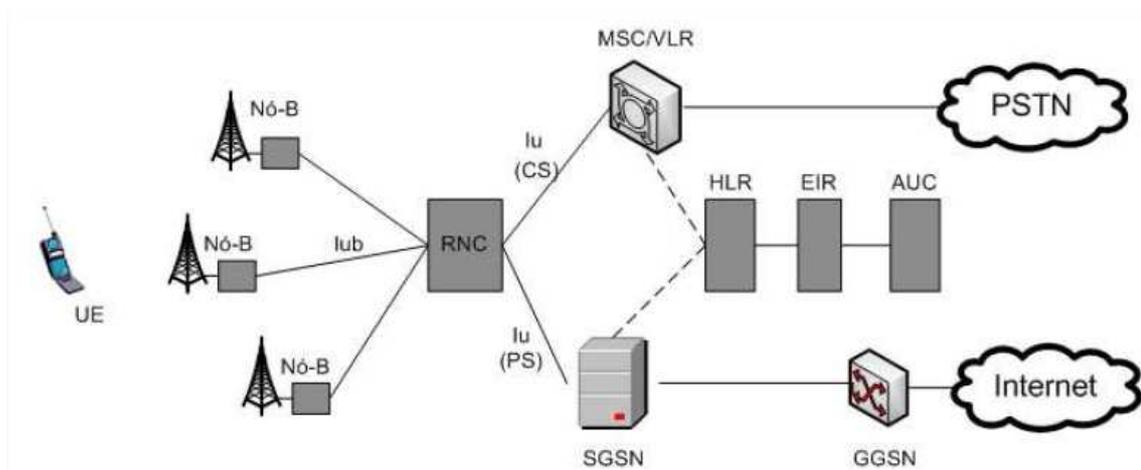


Figura 2.1: Rede UMTS

Fonte: Rueda [51]

Uma das principais características do sistema UMTS [14] [1] é a sua capacidade de suportar taxas de transmissão mais altas, de até 384 kbps em conexões por circuitos. Em decorrência dessas elevadas taxas, a implantação de inúmeros serviços, como aparelhos que suportam o acesso rápido à Internet, as câmeras digitais e a reprodução de músicas e vídeos, entre outros, já é uma realidade, o que não ocorria na segunda geração.

2.3 Conceitos Básicos de Telefonia Celular

A presente seção traz uma descrição detalhada da estrutura do sistema de telefonia celular, cobrindo suas principais características de funcionamento. Tal descrição auxiliará no entendimento e equacionamento do problema de planejamento de redes de telefonia celular de terceira geração. Especificamente, em relação a esse problema, será tratada a questão da localização de ERBs e do controle de potência.

2.3.1 Estrutura do Sistema Celular

Um sistema de telefonia celular é composto pela Rede de Telefonia Pública Comutada (RTPC), que atende aos telefones fixos, por uma Rede de Telefonia Móvel, associada à Central de Controle e Comutação (CCC), e por algumas Estações de Rádio Base (ERBs), além dos telefones celulares (TCs) (figura 2.2). A CCC comunica-se com as ERBs por meio de circuitos de voz e dados. Os circuitos de voz são representados, na figura 2.2, pela linha contínua e os circuitos de dados são representados pela linha tracejada.

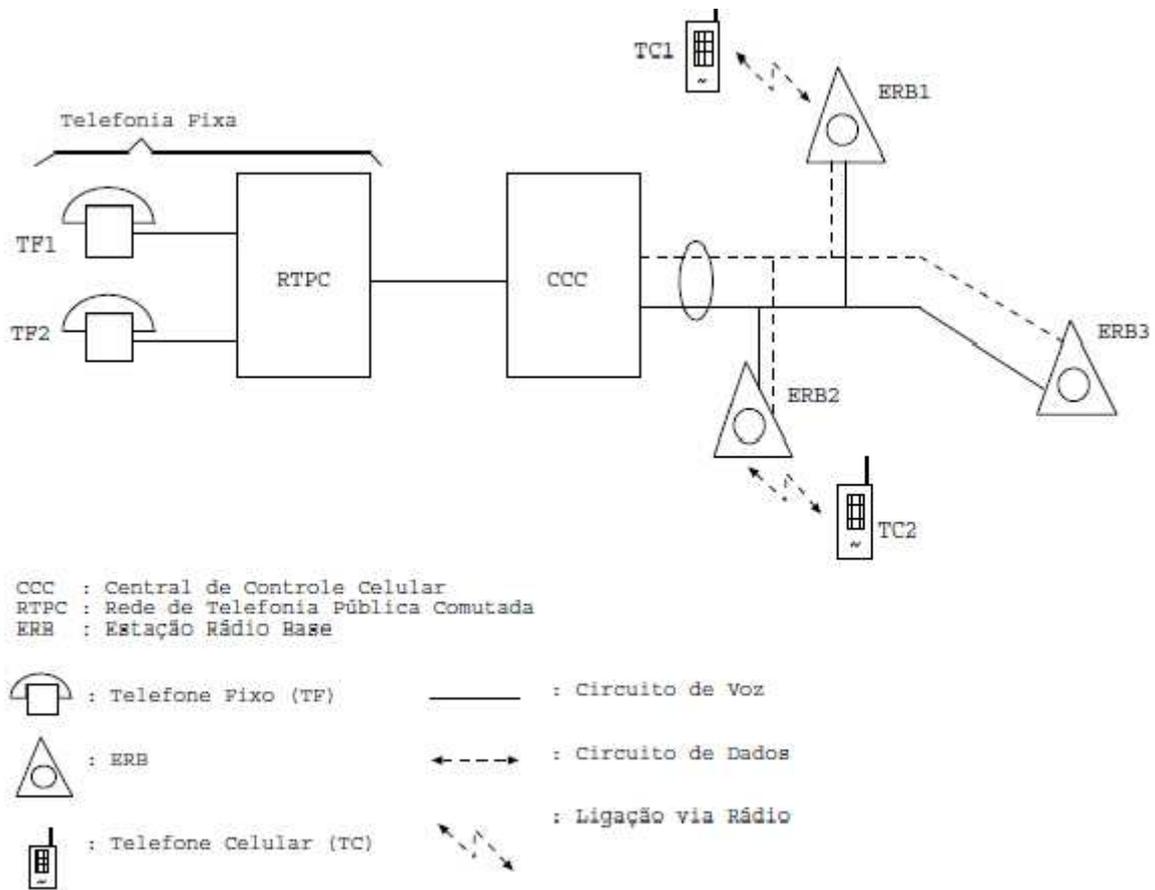


Figura 2.2: Estrutura Básica de um Sistema Celular

Fonte: Brito [10]

A estrutura observada na figura 2.2 oferece muitas vantagens. A presença de uma rede de ERBs espalhadas em uma região, cidade, etc, proporciona uma menor distância média entre estas e os telefones celulares. Com isso, a potência necessária para transmissão é menor, permitindo que as frequências empregadas na transmissão possam ser reutilizadas por estas ERBs [58] [40] e aumentando, assim, o número de usuários atendidos pelo sistema. A baixa potência de transmissão [58] permite o emprego de telefones celulares de peso e tamanho reduzidos, além de aumentar a duração da carga da bateria.

Cada ERB está conectada, por uma linha física dedicada, a uma Central de Controle e Comutação (CCC) que, por sua vez, está conectada a uma Rede de Telefonia Pública Comutada (RTPC). A CCC é responsável pelo controle de várias ERBs e pela monitoração de chamadas e do processo de *handover* [43] [58], que é um mecanismo que se caracteriza pela mudança automática de chamada à medida que o usuário se desloca de uma célula (área geográfica coberta por uma ERB) 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 [40] quando o telefone celular se afasta em demasia da ERB com a qual está em contato ou quando o telefone celular entra em uma região de sinal fraco, produzindo dificuldades na comunicação.

A conexão entre uma ERB e uma unidade móvel é disponibilizada por um canal de comunicação. Nos sistemas mais antigos, havia um canal específico para cada usuário. Entretanto, para os novos sistemas baseados, por exemplo, no WCDMA, a largura de banda inteira disponível a um serviço é compartilhada por todos os usuários do sistema. Com isso, é fundamental um eficiente controle da potência de transmissão.

O deslocamento de longa distância, com mudança de área metropolitana, exige também o redirecionamento de chamadas via *roaming*, mecanismo que permite a um telefone celular operar fora de sua área de habilitação, como, por exemplo, em outra cidade. O roaming (visitante) [43] [58] acontece quando um telefone celular entra na área de cobertura de um outro sistema celular, controlado por uma Central de Controle e Comutação de uma operadora diferente daquela em que normalmente opera. Para que o roaming seja executado, é necessário que o usuário habilite essa opção, uma vez que este tipo de procedimento envolve custos extras no sistema. É necessário, também, que a operadora de origem e a operadora visitada pertençam ambas à rede nacional de *roaming*, responsável pela troca de todas as informações necessárias entre as Centrais de Controle e Comutação.

2.3.2 Área de Cobertura e o Conceito de Célula

O projeto de um sistema celular [1] consiste na divisão da área a ser atendida pelos serviços de telefonia móvel em áreas menores, permitindo a utilização de transmissores de baixa potência e um emprego eficiente do espectro por meio do reuso de frequência.

Uma determinada 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 [10] 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 unidades móveis. Em outro sentido, a célula corresponde à área de abrangência de uma ERB, ou seja, a todo ponto onde o sinal de rádio emitido pela ERB

é aceitável. Entende-se por aceitável o sinal que esteja acima de um limite inferior padrão, de forma a não ser prejudicado por ruídos e interferências provenientes de outros transmissores. O ruído pode ser definido como todo e qualquer tipo de perturbação externa que, quando exercida sobre um sinal, ocasiona sua distorção.

As células não têm forma definida. Idealmente, seriam circulares, mas, na prática, podem assumir formas totalmente irregulares, dependendo do relevo e da topografia da área. Para fins conceituais e de simplificação, nos modelos de cobertura de rádio foi adotada a geometria dos hexágonos para representar as células, pois o efeito gráfico de um hexágono permite uma análise fácil do sistema celular.

No sistema de telefonia celular, o termo “área de cobertura” refere-se à área geográfica em que uma unidade móvel (celular) pode ser atendida pelo equipamento de rádio de alguma ERB do sistema (figura 2.3). Para cada área geográfica [58] com uma certa demanda por serviços, são efetuadas, pelo setor de planejamento da companhia, medidas de qualidade de sinal. Através dessas medidas, pode-se definir o número necessário de ERBs que serão instaladas na respectiva área. O alcance dos sinais de rádio emitidos por cada uma destas ERBs depende das características do meio de propagação (construções, montanhas, etc), dos tipos e das alturas das antenas que irão compor cada ERB e da potência de transmissão dessas antenas.

O nível de alcance desses sinais define o que chamamos de raio de cobertura das ERBs. Quando o raio de cobertura da ERB é pequeno [40], o alcance dos sinais de rádio emitidos pela ERB está limitado a uma área de poucos quilômetros ou até de metros, ou seja, os usuários só podem se utilizar

2.3.3 Antenas utilizadas no Sistema Celular

Uma antena [1] é definida como um dispositivo por meio do qual se pode radiar ou captar ondas de rádio.

As antenas são utilizadas como transmissores e receptores de sinais de rádio, sendo projetadas em função dos comprimentos de onda a serem utilizados. Assim, pequenos comprimentos de onda, ou frequências elevadas, exigem antenas menores, enquanto que grandes comprimentos de onda, ou baixas frequências, tornam necessário o uso de antenas maiores. Essa relação [43] pode, entretanto, ser modificada pelo uso de indutores, capazes de reduzir as dimensões exigidas das antenas.

No sistema celular são utilizadas as antenas omnidirecionais e adaptativas. As omnidirecionais transmitem sinais em todas as direções simultaneamente, ao passo que, nas antenas adaptativas [1], a potência radiada é direcionada para locais específicos, por meio de estruturas de elementos radiantes conhecidos como arranjos, de forma otimizada. Um arranjo de antena é um conjunto de elementos em alguma forma geométrica apropriada, de modo que as características desejadas sejam obtidas.

2.3.4 Propagação de Sinais

Um dos principais problemas no desenvolvimento de sistemas móveis é prever qual será o comportamento dos sinais eletromagnéticos utilizados na comunicação entre as estações e as partes móveis do sistema. Com isso, se faz necessário utilizar modelos matemáticos que permitam simular o comportamento dos sinais eletromagnéticos, de forma a permitir, aos projetistas,

testar várias configurações de sistema até encontrar uma que satisfaça os requisitos funcionais, bem como de desempenho e de custos.

Um modelo matemático para predição de sinais [40] deve combinar, de uma forma equilibrada, as características do ambiente de propagação da onda, tais como a presença de folhagens, edificações e montanhas, para ambientes externos, e a presença de móveis, pessoas e divisórias, no caso de ambientes internos. Além disso, devem ser considerados os três mecanismos de propagação da onda: reflexão, difração e refração.

Caso se construa um modelo muito completo, procurando considerar todos os itens que influenciam a propagação do sinal, corre-se o risco de desenvolver um modelo muito complicado e de difícil solução. Porém, o uso de modelos muito simplificados pode levar o projetista a erros durante a fase de planejamento do sistema. Com isso, o projetista deve selecionar, de antemão, qual é o grau mais adequado de detalhamento do processo de propagação de sinais em seu projeto.

Capítulo 3

O Problema de Planejamento de Redes de Terceira Geração

O presente capítulo traz uma descrição do problema de Planejamento de Redes Celulares de Terceira Geração, expondo de forma concisa as várias abordagens que têm sido desenvolvidas para a sua resolução. Em especial, apresenta-se uma formulação de Programação Linear Inteira Mista, proposta por Franqueira [14], que considera o *Universal Mobile Telecommunication System* (UMTS). Tal formulação foi utilizada em uma parte dos experimentos computacionais realizados nessa tese.

3.1 Descrição do Problema que será Abordado

O planejamento de redes de terceira geração [14] pode ser mapeado em um problema que combina a localização de estações de rádio base (ERBs) e o controle das potências de transmissão. No que concerne a localização, dado um conjunto de locais candidatos à instalação de um conjunto de ERBs,

em uma região geográfica em estudo [1], deve-se selecionar um subconjunto de ERBs de custo mínimo e instalá-las, 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 de custos na aquisição e na instalação das ERBs é importantíssima. Não havendo alguma otimização em tal processo, pode-se instalar muitas ERBs em uma determinada região. Tal situação não é desejável, pois pode acarretar elevados gastos por parte das operadoras. Essas, por sua vez, já investiram em uma fase posterior, grandes quantias nos leilões de faixas de frequências destinadas aos serviços de redes de terceira geração.

Com relação ao controle de potência, cabe observar que em um sistema UMTS os canais não são separados em frequências ou em tempo, como nos sistemas mais antigos [14] [6], e a transmissão de um usuário pode ser percebida como um ruído pelos demais. Isso ocorre na mesma célula ou em células adjacentes (células vizinhas). 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. A técnica de controle de potência [2, 3, 4, 5, 6] [14] que será objeto de estudo deste trabalho, conjuntamente com o problema de localização das ERBs, se baseia em uma estimativa para o valor do SIR (*Signal-to-Interference Ratio*). O SIR é dado por uma 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:

$$SIR = SF \frac{P_{recebida}}{(1 - \alpha)I_{intra} + I_{inter} + \eta} \quad (3.1)$$

Nessa 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 (capacidade) de espalhamento do sinal específica da rede UMTS, de 3.84 MHz, e R (*Hertz*) corresponde à taxa de transmissão do serviço em questão, isto é, representa em números o serviço utilizado, por exemplo: serviço de voz, vídeo, transmissão de dados; $P_{recebida}$ é a potência recebida pela ERB do sinal emitido pela unidade móvel; I_{intra} é a interferência causada por transmissões na mesma célula (interferência intra-célula). Tal interferência depende da quantidade de centros de demanda atendidos por uma determinada estação rádio base; I_{inter} é a interferência gerada pelas células circunvizinhas (interferência inter-células); α 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 significa que os sinais de duas conexões distintas em uma mesma célula não geram interferência um no outro; η = ruído térmico, medindo $-130db = 10^{-13}W$, como proposto em [14] e [5].

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. Observa-se ainda que a qualidade do sinal é garantida pela manutenção do SIR_{alvo} em um valor maior ou igual a um patamar mínimo $SIR_{alvo} \geq SIR_{min}$.

3.2 Panorama do Problema

A finalidade dessa seção é efetuar uma explanação concisa sobre os vários estudos que têm sido desenvolvidos para a resolução do problema de planejamento de redes de terceira geração. Tal explanação fornecerá o embasamento necessário para o entendimento das dificuldades e das limitações associadas resolução desse problema. A seguir, apresentamos os principais trabalhos encontrados no decorrer de nossa pesquisa bibliográfica.

O trabalho de Mateus [40] fornece uma visão geral da problemática da computação móvel, apresentando os seus fundamentos, alguns dos problemas já resolvidos e problemas que ainda estão em aberto. Cobre os aspectos de infra-estrutura, tecnologias e metodologias existentes.

Guimarães [23] fornece uma ampla visão dos sistemas de comunicação móvel de terceira geração, incluindo a evolução dos sistemas de segunda geração em direção à terceira geração.

Galota et al. [17] abordam a complexidade de se determinar a localização de ERBs otimamente, de forma a suprir uma demanda específica de tráfego em uma rede CDMA (*Code Division Multiple Access*). Apresentam um problema de localização de ERBs simplificado, isto é, definem, sobre o plano euclidiano, um conjunto de coordenadas (x,y) associadas aos locais candidatos à instalação das estações e ao posicionamento das unidades móveis. Nessa abordagem, busca-se maximizar a área coberta pelas estações e minimizar a interferência intra-célula e o custo de manutenção das estações, sendo a distância o fator determinante para que uma unidade possa ser atendida por uma dada ERB. Finalmente, provam que versões simplificadas do problema,

como a versão apresentada nesse estudo, pertencem à classe dos problemas NP-difíceis.

Amaldi *et al.* [2, 3, 4, 5, 6] estudaram algumas formulações de programação inteira e algoritmos (heurísticos e metaheurísticos) que produzem soluções que correspondem às melhores decisões no processo de seleção das ERBs. Tais formulações estão relacionadas ao Problema de Localização de Facilidades não Capacitado [63]. Além disso, duas técnicas de controle de potência foram utilizadas para mensurar a qualidade do sinal. A primeira técnica consiste no controle de potência baseado em potência-alvo, isto é, a potência recebida do sinal de interesse é, por definição, igual a potência-alvo. A segunda é baseada no controle de potência associado ao SIR_{alvo} , que consiste no ajuste das potências de transmissão de modo a manter o sinal recebido igual a um valor pré determinado, que é expresso em termos do SIR . Estabelecem que uma ERB pode ser instalada em um local qualquer de um conjunto de locais candidatos fornecidos. A área a ser coberta é dividida em pontos de teste. Por sua vez, cada ponto de teste pode ser considerado como um centróide que concentra uma determinada quantidade de tráfego, onde um determinado nível de serviço (medido nos termos do SIR) deve ser garantido.

Os algoritmos de otimização descritos nos trabalhos de Amaldi *et al.* [2, 3, 4, 5, 6] minimizam o custo total de instalação das ERBs (considerando os locais candidatos) e a potência total de transmissão. Um parâmetro é utilizado na ponderação entre o custo de instalação das ERBs e a soma das potências de transmissão das unidades móveis. Tais algoritmos foram implementados com base no estudo de heurísticas gulosas [63] e Busca Tabu [63]. Em instâncias de médio e grande porte (400 a 750 pontos de teste), a

Busca Tabu produziu resultados superiores aos das heurísticas gulosas.

Em [7] Amaldi *et al* apresentam um modelo de programação matemática para o problema de planejamento de redes celulares 3G, considerando o *downlink* (enlace reverso, ou seja, sinal da unidade móvel para a antena), *uplink* (enlace direto, ou seja, sinal da antena para unidade móvel) e as configurações relevantes das ERBs, ou seja, a altura, a inclinação e a orientação de antenas de setores (espécie de antena direcional com uma forma de setor padrão de radiação). O canal piloto, que serve como uma referência de demodulação (processo que recupera a informação adicionada a uma onda) para os receptores móveis e para as medidas de nível de *handover*, também foi levado em consideração. Discutem que, com as duas técnicas de controle de potência (controle de potência baseado em potência-alvo e *SIR*) no *uplink*, as potências recebidas por uma ERB, enviadas por todas as unidades móveis na célula, estão em um mesmo nível. A única diferença é que a potência alvo usa o mesmo nível de potência para todas as ERBs, enquanto o *SIR* ajusta o nível de potência recebida pela ERB de acordo com a interferência inter-célula, enquanto que no *downlink* ambas as técnicas apresentam um comportamento bem diferente, isto é, a interferência causada pelas conexões de usuários em uma mesma ERB é bastante diferente.

Os autores também analisaram o impacto da configuração das antenas sobre o tráfego e a qualidade da conexão. Por exemplo, a interferência em cada célula de uma antena de três-setores depende de sua orientação horizontal, que pode ser otimizada considerando a distribuição do tráfego. O algoritmo proposto no trabalho foi baseado na metaheurística Busca Tabu. Para testar o algoritmo proposto, foram consideradas instâncias obtidas a partir de um gerador de instâncias que simula uma distribuição do tráfego em áreas

urbanas cercadas por áreas suburbanas. O algoritmo também gera locais candidatos, que serão selecionados pelos serviços prestados, considerando a quantidade de tráfego na área. Os resultados dos experimentos tiveram por objetivo demonstrar a eficácia do algoritmo implementado e o impacto de algumas formulações. A análise desse impacto foi feita levando em consideração os modelos propostos, ou seja, o modelo completo e o modelo simplificado. Ambos consideram as restrições que abrangem as configurações das ERBs e as características do tráfego. O diferencial entre os modelos é que no modelo simplificado há somente a utilização do controle de potência baseado em potência-alvo e/ou a utilização do *uplink*, enquanto que o modelo completo abrange todas as restrições já mencionadas.

Tutschku *et al.* [59] apresentam uma ferramenta de planejamento de rede de rádio móvel que é baseada no estudo de uma abordagem integrada do projeto. Essencialmente, tal ferramenta analisa a distribuição espacial do tráfego previsto, situado em um sistema celular. Além disso, o estudo propõe a divisão do planejamento de uma rede de telefonia celular em quatro áreas principais, quais sejam: transmissão de rádio, usuário móvel, alocação de recursos e arquitetura do sistema.

Einsinbltter *et al.* [13] desenvolveram uma formulação de programação inteira mista que otimiza a configuração e a localização de ERBs em um sistema UMTS, considerando todas as restrições relevantes ao projeto. Ou seja, a função objetivo abrange o custo da rede e a qualidade do serviço, e as restrições incluem o controle de potência nos sinais diretos e reversos.

O modelo utiliza o controle de potência orientado à manutenção de um valor alvo de SIR para o enlace direto (sinal da antena para unidade móvel)

e reverso (sinal da unidade móvel para a antena). A formulação encapsula, também, limites mínimo e máximo para a potência de transmissão. As unidades móveis são representadas de forma individualizada, não existindo a restrição de que todas devam ser atendidas. Um subconjunto de códigos de espalhamento é atribuído a cada ERB, assim como é atribuído um certo consumo de códigos de espalhamento a cada unidade móvel, o qual depende da taxa de transmissão do serviço utilizado. As restrições do SIR são formuladas para cada assinante, permitindo que sejam levados em conta os serviços demandados por esses assinantes.

Contudo, de acordo com os autores, tal formulação se mostrou razoavelmente complexa, devido à dimensão dos problemas impactar diretamente no número de variáveis. Isto é, o elevado número de variáveis imposta pela formulação impossibilitou a aplicação do modelo em problemas reais. Para contornar tal dificuldade, os autores propõem o estudo de métodos da pesquisa operacional que tornem viável a aplicação da formulação.

Kalvenes *et al.* [36] apresentaram uma formulação de programação inteira que considera a maximização do planejamento de redes celulares, ou seja, visa maximizar o lucro obtido pela instalação e operação da rede. Em tal formulação, são fornecidos um conjunto de locais candidatos à instalação das ERBs e os custos associados. Também são fornecidos os centros de demanda dos clientes, com a demanda correspondente para o tráfego, e o potencial de rendimento das unidades móveis, nas quais as capacidades estão alocadas nos pontos de demanda. Com base nesses dados, a formulação pode ser utilizada para determinar a seleção dos locais nos quais serão instaladas as ERBs e a capacidade de serviço da rede resultante. A implementação e a resolução dessa formulação foi efetuada através da utilização do pacote

comercial CPLEX.

Acrescenta-se, ainda, que para a resolução de instâncias de grande porte, isto é, instâncias que refletem a realidade, foi definido um esquema de priorização da ramificação de variáveis, sendo tal esquema considerado na aplicação do método Branch and Bound. Primeiramente, considerou-se que deveriam ser ramificadas as variáveis que determinam a localização das ERBs, seguida da introdução de duas restrições do problema: (i) uma restrição que determina que as unidades móveis devem ser atendidas pela ERB mais próxima em termos de ganho de propagação e (ii) uma restrição que determina que a maior contribuição para a interferência na comunicação de um usuário é causada pelas transmissões dentro de sua própria célula.

Diversos experimentos foram realizados, demonstrando a eficiência do modelo proposto.

Franqueira [14] propôs uma formulação de programação inteira mista para o planejamento de redes celulares de terceira geração, considerando a localização de estações rádio base, o controle de potência e os múltiplos serviços com taxas de transmissão e requisitos de qualidade diferenciados. O modelo matemático proposto considera o mecanismo de controle de potência baseado em SIR_{alvo} . Tendo em vista que a resolução de tal formulação está associada ao problema de localização de facilidades não capacitado, ou seja, a um problema NP-difícil, pacotes comerciais não foram capazes de resolver instâncias de médio e grande porte (instâncias que refletem a realidade).

Sendo assim, na expectativa de resolver instâncias maiores, considerando a formulação proposta, foi aplicada a técnica de Relaxação Lagrangeana[41] [15, 16] para a determinação de limites inferiores de boa qualidade. O método

de subgradiente foi utilizado para calcular os multiplicadores de Lagrange que maximizam o problema relaxado (*Lagrangeano Dual*). O limite superior (solução viável) foi determinado através de uma heurística Lagrangeana.

O autor ainda estudou a restrição de proximidade, que estabelece que cada centro de demanda deve ser atendido por sua ERB ativa mais próxima em termos de ganho de propagação. Isto faz com que o ponto de otimalidade seja deslocado, isto é, a solução ótima obtida nesse problema é uma solução viável para o problema original. A adição dessa restrição torna o modelo mais fácil de resolver, permitindo que instâncias de médio e grande porte sejam resolvidas por pacotes comerciais.

Santos *et al.* [52, 53] combinaram a formulação de Franqueira [14] e a utilização das metaheurísticas GRASP e algoritmos genéticos. Os algoritmos implementados a partir do estudo dessas metaheurísticas resolvem o problema de redes 3G considerando dois níveis, quais sejam: um primeiro nível que consiste da seleção de ERBs que serão ativadas e um segundo nível que consiste na associação dos CDs as ERBs ativas. Os resultados obtidos foram melhores que os apresentados por Franqueira [14].

Visando à minimização da potência das ERBs e à maximização simultânea da capacidade disponível no sistema e da quantidade de usuários com cobertura, Rueda [51] apresentou um modelo matemático de otimização baseado no artigo de Siomina [55]. O trabalho propõe um conjunto de algoritmos elaborados a partir de um estudo das metaheurísticas Algoritmo Genético (AG), Simulated Annealing (SA) e Busca Direta (DS). Para a avaliação dos algoritmos foram utilizados dados disponibilizados pelo projeto MOMENTUM [42]). Mais especificamente, a metodologia foi aplicada

a uma rede real (dados da cidade de Lisboa).

Os algoritmos atingiram os seguintes objetivos estabelecidos previamente: a redução da potência máxima de transmissão da ERB j ; o aumento da capacidade média das ERBs; o aumento da cobertura, considerando as limitações impostas por um sistema de terceira geração.

Bechelane *et al.* [9] apresentaram dois modelos de programação inteira mista para o problema de planejamento de redes celulares 3G. Nesses modelos são consideradas a localização das estações rádio base e a utilização dos mecanismos de controle de potência nos enlaces direto, reverso e no canal piloto. Acrescentou-se a essa proposta um algoritmo genético com as abordagens mono e multi-objetivo [60]. Os autores esclareceram que a abordagem comumente utilizada nesse tipo de problema é a mono-objetivo, pois o tratamento de múltiplos objetivos é feito por meio de uma soma ponderada, de acordo com a importância de cada objetivo. Já a abordagem multi-objetivo fornece um conjunto de soluções ótimas para o problema (Pareto-ótimo). Com base neste conjunto ótimo, o projetista da rede celular pode escolher aquela que melhor se adapte à sua aplicação específica.

Os resultados obtidos foram comparados com os de Santos *et al.* [52], constatando-se que a introdução do controle de potência no enlace direto resulta em menores potências de transmissão. Com relação ao canal piloto, concluíram que o controle de potência no canal piloto apresenta bons resultados em instâncias pequenas, pois o número de ERBs ativadas e a potência de transmissão total no enlace reverso foram considerados menores quando comparados aos resultados sem a utilização desse canal.

Todavia, no caso das instâncias de maior porte, o controle de potência

no canal piloto gerou inviabilidades na formulação. Observaram que o canal piloto introduz bastante interferência no enlace direto.

3.3 Formulação de Programação Inteira Mista Considerando UMTS

Apresentaremos a seguir, em detalhes, a formulação de programação inteira mista proposta por Franqueira [14]. Tal formulação equaciona o problema de planejamento de telefonia celular de terceira geração, encapsulando aspectos tais como a localização das ERBs e o controle de potência, além de considerar a demanda por múltiplos serviços com diferentes requisitos de qualidade do sinal em termos de *SIR*.

Após a análise desta formulação, verificou-se a necessidade de acrescentar uma nova restrição. Tal restrição garante que uma potência de transmissão recebida no enlace reverso será diferente de zero, se essa for alocada a um centro de demanda i atendido por uma ERB j . Essa restrição será apresentada juntamente com o modelo de Franqueira [14].

A formulação considera dois níveis: um de sistema e outro estático. O primeiro nível indica que o funcionamento do enlace de rádio não é retratado de forma detalhada, pois se considera relevante somente o seu desempenho, estimado a partir de informações obtidas por simulação ou medidas reais. O segundo nível significa que o comportamento dinâmico do sistema é praticamente negligenciado, ou seja, a formulação não considera a mobilidade dos usuários, a execução dos algoritmos de alocação de recursos de rádio ou a flutuação rápida da potência de transmissão. Acrescenta-se, ainda, que tal formulação cobre bem os aspectos relevantes para o planejamento da capaci-

dade da rede, como:

- a localização das ERBs, que tem a finalidade de minimizar a quantidade de ERBs a serem instaladas;
- o controle de potência, que permite que cada unidade móvel emita a potência mínima necessária para que seu sinal seja recebido pela ERB com a qualidade desejada;
- a demanda por múltiplos serviços, com diferentes requisitos de qualidade de sinal em termos de SIR, que torna possível a oferta de serviços com taxas de transmissão mais elevadas, o que é a principal característica da terceira geração.

Apresentamos a seguir uma explicação detalhada sobre cada uma das restrições dessa formulação.

Restrições da Formulação Estudada

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. Além disso, não existe qualquer restrição ao atendimento de um centro de demanda (CD) i por uma ERB j , além da manutenção da qualidade do sinal em termos de SIR para o enlace reverso.

Foi assumido que cada centro de demanda i tem uma demanda diferente de zero para pelo menos um dos serviços $s \in S$. Seja, então, S_i o conjunto dos

serviços utilizados por um centro de demanda (CD), para os quais $a_i^s > 0$, sendo, a_i^s o número esperado de conexões ativas para o serviço s no centro de demanda i .

De acordo com os múltiplos serviços disponibilizados na rede, será necessário diferenciar as potências de transmissão. Levando-se isso em conta, define-se uma variável de decisão real $p_{ij}^{\uparrow s}$, que representará a potência transmitida no enlace reverso pelo centro de demanda $i \in I$ em direção à ERB $j \in J$ para o serviço $s \in S_i$, sendo o enlace reverso correspondente ao sinal transmitido da unidade móvel para as antenas.

Após os esclarecimentos acima, podemos finalmente apresentar as principais restrições que compõem a formulação.

i) **Restrição do SIR para o Enlace Reverso**

A restrição do SIR para o enlace reverso foi desenvolvida a partir da restrição de qualidade de sinal. Foi assumido que o fator de ortogonalidade não precisa ser considerado ($\alpha = 0$), pois não há diferença significativa entre as interferências intra e inter-células. Sendo assim, deve-se contabilizar a interferência total causada por todas as conexões ativas e subtrair o sinal de interesse. A ausência de diferenças expressivas entre as interferências citadas se deve ao uso de códigos de espalhamento pseudo-aleatórios. Um código de espalhamento é um número binário (gerado a partir do produto entre o sinal digital a ser transmitido e uma sequência de bits pseudo-aleatórios) ou sinal resultante, com muito mais bits/segundo que o sinal original (sinal digital a ser transmitido). Os sinais espalhados em frequência são sobrepostos um ao outro dentro da mesma largura de banda. Um receptor deve ser capaz de separar os sinais transmitidos, decodificando-os para cada sequência de

espalhamento. Sendo assim, o sinal deve ser determinístico, isto é, conhecido pelo transmissor e pelo receptor, daí seguindo o termo pseudo-aleatório. Tal processo gera perturbações que fazem com que as interferências não possuam diferenças significativas.

A restrição do *SIR* para o enlace reverso, considerando que as variáveis $p_{ij}^{\uparrow s}$ individualizam as potências de transmissão emitidas por cada centro de demanda $i \in I$ e por cada local candidato $j \in J$, é representada da seguinte maneira:

$$\frac{p_{ij}^{\uparrow s} g_{ij}}{\sum_{m \in I} \sum_{n \in J} \sum_{q \in S} a_m^q p_{mn}^{\uparrow q} g_{mj} - p_{ij}^{\uparrow s} g_{ij} + \eta_j} \geq SIR_{alvo}^s x_{ij}, \forall i \in I, j \in J, s \in S_i \quad (3.2)$$

Nesta restrição, temos que:

x_{ij} é uma variável de decisão que assumirá valor 1, se o centro de demanda i for atendido pela ERB instalada no local candidato $j \in J$, e zero em caso contrário;

$p_{ij}^{\uparrow s}$ é a variável ($p_{ij}^{\uparrow s} \in \mathfrak{R}$) que representa a potência de transmissão no enlace reverso a partir do centro de demanda $i \in I$ para a ERB j visando ao atendimento do serviço $s \in S_i$;

g_{ij} é o ganho de propagação (definido previamente) no enlace entre o centro de demanda $i \in I$ e o local candidato $j \in J$;

a_m^q é o número de conexões ativas para o serviço q no centro de demanda m ;

η_j é o ruído térmico percebido no local candidato $j \in J$.

As restrições (3.2) asseguram que a razão entre a potência de transmissão no enlace reverso e o somatório das potências interferentes seja maior ou igual ao valor do SIR_{alvo}^s definido para cada serviço. O numerador da fração representa a potência recebida na ERB j para o sinal transmitido pelo CD i relativo ao serviço s . O somatório triplo no denominador representa a interferência percebida na ERB j em decorrência de todas as transmissões intra e inter-células. Da interferência total, o sinal de interesse é subtraído.

ii) Restrição do Valor Mínimo da Potência de Transmissão

Para cada centro de demanda $i \in I$ e cada serviço $s \in S_i$ é necessário que pelo menos uma potência de transmissão no enlace reverso $p_{ij}^{\uparrow s}$ seja maior que zero, de forma a garantir o atendimento da demanda. Contudo, o modelo estabelece um limite mais restritivo ao valor mínimo da potência de transmissão emitida em cada centro de demanda. Tal limite é dado pelo seguinte quociente $\frac{SIR_{alvo}^s \eta_j}{\max_{j \in J} (g_{ij})}$, que representa a potência de transmissão mínima necessária para o centro de demanda i e para o serviço s , qualquer que seja a ERB que os atenda.

A restrição do valor mínimo da potência utilizada é definida na equação abaixo,

$$\sum_{j \in J} p_{ij}^{\uparrow s} \geq P_{min}^{is}, \forall i \in I \text{ e } s \in S. \quad (3.3)$$

$P_{min}^{\uparrow is}$ = potência de transmissão mínima necessária para o CD i e para o serviço s .

iii) Restrição do Número Mínimo de ERBs a Instalar

É possível estimar um limite inferior C para o número de ERBs que devem estar ativas em qualquer solução viável do problema, desde que se conheça os ganhos de propagação ou o tráfego na região em estudo. Essa restrição pode ser representada por:

$$\sum_{j \in J} y_j \geq C \quad (3.4)$$

y_j = variável de decisão que assume valor 1 se uma ERB j for instalada no local candidato $j \in J$ e 0 em caso contrário;

C = número mínimo de locais candidatos que devem ser selecionados para a instalação de ERBs .

Finalmente, após todas essas considerações, apresentaremos a formulação matemática do problema de planejamento de redes celulares de terceira geração que serviu de base para o desenvolvimento de nosso trabalho, juntamente com o acréscimo da restrição (3.9) mencionada anteriormente.

Seja:

f_j = custo de instalação de uma ERB no local candidato j ;

x_{ij} = variável de decisão que assume valor um se o centro de demanda i for atendido pela ERB j e zero em caso contrário;

y_j = variável de decisão que assume valor um se uma ERB for instalada no local candidato j e zero em caso contrário;

$p_{ij}^{\uparrow s}$ = variável que representa a potência real de transmissão no enlace reverso

a partir do centro de demanda i para a ERB j visando o atendimento do serviço s ;

c_{ij} = parâmetro que indica se a ERB instalada em j pode atender ao centro de demanda i ;

η_j = ruído térmico percebido no local j ;

a_m^q = número de conexões ativas para o serviço q no CD i ;

g_{ij} = ganho de propagação no enlace entre o CD i e o local candidato j ;

P_{max} = potência de transmissão máxima permitida no canal;

Deseja-se:

(P1) :

$$\text{minimizar} \quad z = \sum_{j=1} \sum_{j \in J} f_j y_j + \lambda \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{j \in S_i} a_i^s p_{ij}^{\uparrow s} \quad (3.5)$$

sujeito a :

$$\sum_{j \in J} c_{ij} x_{ij} \geq 1 \quad \forall i \in I \quad (3.6)$$

$$\sum_{j \in J} y_j \geq C \quad (3.7)$$

$$x_{ij} \leq y_j \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (3.8)$$

$$p_{ij}^{\uparrow s} \leq x_{ij} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall s \in S_i \quad (3.9)$$

$$x_{ij} \left(\sum_{m \in I} \sum_{n \in J} \sum_{q \in S} a_m^q p_{mn}^{\uparrow q} g_{mj} - p_{ij}^{\uparrow s} g_{ij} + \eta_j \right) \leq \frac{p_{ij}^{\uparrow s} g_{ij}}{SIR_{alvo}^s} \quad (3.10)$$

$$\forall i \in I, \forall j \in J, \forall s \in S_i$$

$$\sum_{j \in J} p_{ij}^{\uparrow s} \geq P_{min}^{is}, \forall i \in I, \forall s \in S \quad (3.11)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (3.12)$$

$$y_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J \quad (3.13)$$

$$0 \leq p_{ij}^{\uparrow s} \leq P_{max} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall s \in S_i \quad (3.14)$$

Temos que

λ = parâmetro utilizado na ponderação do custo de instalação das ERBs com relação à soma das potências de transmissão das unidades móveis. O custo é expressado em unidades monetárias, e a soma das potências é expressada em Watts;

A função objetivo (3.5) busca minimizar o custo total de instalação das ERBs e a potência transmitida pelo conjunto de unidades móveis. As restrições (3.6) garantem que os centros de demandas sejam cobertos por pelo menos uma ERB. A restrição (3.7) garante um conjunto de ERBs ativas que atenda a toda a demanda da rede. As restrições (3.8) garantem que uma ERB j ficará ativa se for utilizada para atender a um CD i . As restrições (3.9) 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 (3.10) 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. As restrições (3.11) impõem um valor mínimo para as potências de transmissão. As restrições de integralidade (3.12) e (3.13) garantem que as variáveis apenas podem assumir valores inteiros no intervalo $[0,1]$. Finalmente, as restrições (3.14) definem o intervalo de valores válidos para as potências de transmissão associadas às variáveis reais $p_{ij}^{\uparrow s}$.

As restrições do SIR apresentadas em (3.10), na formulação, são não lineares. Para que seja possível resolvê-las utilizando um pacote de otimização, essas restrições devem ser linearizadas, ou seja, as restrições

(3.10) podem ser escritas como:

$$\sum_{m \in I} \sum_{n \in J} \sum_{q \in S} a_m^q p_{mn}^{\uparrow q} g_{mj} - p_{ij}^{\uparrow s} g_{ij} + \eta_j \leq \frac{p_{ij}^{\uparrow s} g_{ij}}{SIR_{alvo}^s} + M_j(1 - x_{ij}) \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall s \in S_i \quad (3.15)$$

considerando valores suficientemente altos para M_j . Conforme proposto em [36] e [14], o parâmetro M_j pode ser:

$$\sum_{m \in I} \sum_{q \in S} a_m^q p_{max}^q g_{mj} \quad \forall j \in J \quad (3.16)$$

No modelo apresentado, 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 a execução da formulação (5, 10, 24 horas), possivelmente serão obtidas apenas soluções viáveis ou até mesmo nenhuma solução.

Dependendo, então, da dimensão do problema, ou seja, considerando uma instância com muitos centros de demanda a serem atendidos e muitas ERBs candidatas, a obtenção de uma solução ótima ou até mesmo viável pode ficar

comprometida se utilizarmos apenas a formulação descrita.

Dessa forma, com objetivo de produzir soluções viáveis e ótimas, em um tempo de processamento inferior ao da formulação, propõe-se neste trabalho um conjunto de algoritmos . Tais algoritmos foram implementados a partir do estudo das metaheurísticas GRASP, VNS, ILS e Algoritmos Genéticos (descritas no cap. 4).

Capítulo 4

Algoritmos Propostos

Conforme observado nos capítulos anteriores, o problema de planejamento de redes celulares de terceira geração é um problema de difícil solução. Em decorrência disso, diferentes metodologias (vide capítulo 3) têm sido aplicadas para a resolução do mesmo, buscando encontrar soluções viáveis de boa qualidade, em um tempo computacional viável.

Inicialmente, poder-se-ia pensar na aplicação de uma formulação exata, para a obtenção de soluções exatas para esse problema. Todavia, conforme já discutido no capítulo 3, as formulações propostas na literatura apresentam um substancial aumento do número de variáveis e restrições à medida em que se aumenta a dimensão do problema, ou seja, o número de ERBs a serem instaladas e o número de centros de demanda a serem atendidos. Tal fato torna inapropriada a aplicação de uma formulação exata ou de um método de enumeração exaustiva para a resolução de instâncias de médio e grande porte, uma vez que a obtenção de uma solução ótima, ou até mesmo uma solução apenas viável, para o problema pode consumir um tempo de processamento muito grande (da ordem de semanas, meses, anos, etc).

Sendo assim, de forma a contornar a complexidade intrínseca a esse problema e, conseqüentemente, resolver instâncias de tamanho variado, optou-se pela utilização de um conjunto de metaheurísticas bem conhecidas na literatura. Mais especificamente, foram implementados nesta tese algoritmos baseados nas metaheurísticas [?] GRASP, VNS, Algoritmos Genéticos e ILS, cujos detalhes de implementação para o problema proposto serão apresentados neste capítulo. Para tanto, iniciaremos esta apresentação com uma exposição concisa dessas metaheurísticas, apresentando, em seguida, os detalhes de como estas foram implementadas, neste trabalho, na resolução do problema de planejamento de redes celulares 3G.

4.1 Metaheurísticas

Uma técnica que encontra boas soluções para um determinado tipo de problema, com custo computacional razoável, sem ser capaz de garantir a otimalidade é chamada de heurística. As heurísticas são ferramentas úteis e atrativas para a resolução de diversos problemas de otimização, especialmente aqueles de alta complexidade computacional [22].

As últimas décadas têm sido marcadas pelo surgimento de várias heurísticas de uso geral. Tais heurísticas, comumente chamadas de metaheurísticas, podem ser utilizadas para a resolução de uma imensa gama de problemas de otimização. Mais especificamente, as metaheurísticas vêm sendo desenvolvidas pelo menos desde os anos 80, sendo tal termo inicialmente utilizado por Glover [18] em 1986.

Enquanto as heurísticas tradicionais param, em geral, no primeiro ponto de ótimo local encontrado, as heurísticas que utilizam os paradigmas das

metaheurísticas possuem mecanismos que possibilitam escapar de tais pontos, que usualmente são ótimos locais “pobres”. Isto é, os valores associados a tais ótimos normalmente possuem um *gap* alto em relação ao ótimo global (solução ótima). As propriedades que garantem o interesse prático e teórico de uma metaheurística são listadas a seguir [27]:

Simplicidade - a metaheurística deve ser baseada em um claro e simples princípio, que deve ser largamente aplicável;

Coerência - todos os passos da metaheurística para um problema em particular devem seguir naturalmente os princípios das metaheurísticas;

Eficiência - metaheurísticas para problemas particulares podem fornecer soluções ótimas ou próximas do ótimo para todas, ou quase todas, as instâncias consideradas;

Eficácia - metaheurísticas para problemas particulares devem levar um tempo computacional razoável para fornecer soluções ótimas, próximas do ótimo ou soluções viáveis de boa qualidade;

Robustez - o desempenho das metaheurísticas deve ser consistente sobre uma variedade de instâncias;

Facilidade de utilização - metaheurísticas devem ser bem definidas, fáceis de entender e, principalmente, fáceis de utilizar. Isso implica que devem possuir poucos ou se possível nenhum parâmetro.

Inovação - preferivelmente, os princípios das metaheurísticas e/ou sua eficiência e eficácia devem conduzir a novos tipos de aplicações (metaheurísticas híbridas).

Entre as inúmeras referências que tratam de metaheurísticas, destacamos as seguintes: Reeves [?], Johnson e Mcgeoch [35], Glover [21], Hansen e Ribeiro [26], Glover e Kochenberger [22] e Ibaraki [33].

4.1.1 GRASP

O GRASP é uma metaheurística que foi desenvolvida por Feo e Resende [48] no final dos anos 80 e aplicada, primeiramente, ao Problema de Recobrimento [63]. Em 1995, Feo e Resende [49] apresentaram o primeiro tutorial a respeito do GRASP e, em 1998, Resende [50] apresentou um exame do método básico e suas aplicações.

O GRASP [49] é um procedimento iterativo constituído por duas fases:

- na primeira fase, ou fase de construção, obtém-se uma solução viável x_0 ;
- na segunda fase, denominada busca local, investiga-se uma vizinhança de x_0 até que seja encontrada uma solução viável de qualidade superior a x_0 .

O resultado do GRASP é dado pela melhor solução após um número n predeterminado de iterações nas quais são aplicados os procedimentos de construção e de busca local.

Uma vizinhança $V(x_0)$ [49] de uma solução x_0 é um conjunto de soluções que podem ser obtidas a partir de x_0 através da inserção, mudança de posição ou remoção de um elemento de x_0 .

Na fase de construção [49], uma solução é iterativamente construída, elemento por elemento. Observe-se que, em cada iteração dessa fase, há uma lista de candidatos (LC) formada por todos os elementos que podem ser incorporados na solução parcial x_0 e que não provocam a inviabilidade do problema.

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

Uma forma de possibilitar uma maior variabilidade nas soluções [49] obtidas, consiste em definir uma lista de candidatos restrita (*LCR*). A *LCR* é formada pelos melhores elementos avaliados na *LC* através da função g , quais sejam, aqueles que, quando incorporados a solução parcial x_0 , produzem um acréscimo mínimo (caso de minimização). Este processo representa o aspecto guloso do GRASP, pois têm-se sempre os melhores elementos para serem incorporados na solução. No trabalho de Feo e Resende (1995) [49] são propostos dois esquemas para a construção da *LCR*: (i) um inteiro k é fixado e os k melhores candidatos, ordenados na *LC* segundo algum critério, são selecionados para compor a *LCR* e (ii) em cada iteração da fase de construção, denota-se respectivamente por \underline{g} e \bar{g} o menor e o maior acréscimos provocados pela inserção de um elemento $t \in LC$ na solução, segundo a função gulosa $g(\cdot)$. A partir da utilização dessa função e dos valores \underline{g} e \bar{g} , a *LCR* é definida da seguinte forma:

$$LCR = \{t \in LC | g(t) \leq \underline{g} + \varphi(\underline{g} - \bar{g}), \text{ onde } \varphi \in [0, 1]\}.$$

Quando $\varphi = 0$, o procedimento de construção torna-se guloso, pois a

LCR tem apenas um elemento, e quando $\varphi = 1$, produz-se uma solução aleatória, tendo em vista que a LCR terá todos os elementos da LC .

Na fase de busca local, há uma tentativa de melhora da solução inicial x_0 obtida na primeira fase, tendo em vista que essa ainda não é necessariamente uma solução de boa qualidade para o problema. A busca local consiste na substituição da solução x_0 pela melhor solução x'_0 encontrada na vizinhança de x_0 [49]. A solução obtida a partir do GRASP será a melhor das soluções obtidas em todas as iterações.

Ainda na fase de construção, pode-se introduzir o procedimento de filtro. Ou seja, em vez de se construir apenas uma solução inicial, são construídas p soluções iniciais, selecionando-se a de melhor qualidade para a aplicação da busca local. A utilização de tal procedimento permite a eliminação de soluções iniciais de baixa qualidade.

4.1.2 VNS

O algoritmo VNS (*Variable Neighborhood Search*), proposto por Hansen e Mladenovic [24], é uma metaheurística que busca uma exploração eficiente do espaço de soluções viáveis através de uma troca sistemática de estruturas de vizinhança. O VNS se diferencia das outras metaheurísticas baseadas em métodos de busca local por não seguir uma trajetória. Ao invés disso, exploram-se vizinhanças gradativamente mais distantes da solução corrente, focalizando a busca numa região em torno de uma nova solução se e somente se ocorrer um movimento que produza uma redução (supondo um problema minimização) no valor da função objetivo.

O algoritmo de busca local implementado no VNS [24, 25] deve realizar

uma seqüência de modificações em uma vizinhança de uma solução x_0 , procurando melhorar o valor da função objetivo até que um ótimo local seja encontrado. Contudo, em muitos casos, o ótimo local está distante do ótimo global, ou seja, possui um *gap* alto. Dessa forma, torna-se necessário analisar o valor da função objetivo em outras vizinhanças a fim de encontrar soluções melhores.

No algoritmo VNS básico [24, 25], seleciona-se aleatoriamente uma solução $x'_0 \in V_k(x_0)$ e submete-se tal solução a uma busca local. Se a busca local fracassar na obtenção de uma solução de valor melhor do que aquele da solução atual, incrementa-se a ordem da vizinhança corrente e, dessa forma, passa-se a explorar a solução em outra vizinhança V_{k+1} . Em caso contrário, se a busca local encontrar uma solução de valor melhor do que a solução corrente na vizinhança V_k , atualiza-se a solução e a ordem da vizinhança volta a ser igual a 1 (retomamos a vizinhança V_1). Esse processo é repetido até que algum critério de parada seja satisfeito.

4.1.3 ILS

A metaheurística ILS (*Iterated Local Search*) [37], cuja origem remonta ao trabalho de Baxter [8], consiste, essencialmente, na aplicação iterativa de um procedimento de busca local em uma solução inicial (ótimo local), que é previamente obtida a partir da aplicação de um procedimento aleatório de construção ou considerando uma heurística de construção gulosa. O êxito dessa metaheurística depende diretamente do método de busca local implementado, do critério de perturbação aplicado sobre a solução corrente e do critério de aceitação das soluções, estando tais critérios intrinsecamente associados com o problema a ser resolvido.

Para descrever a metaheurística ILS [37], deve-se, primeiramente, definir os seguintes elementos: S conjunto de todas as soluções viáveis, s uma solução candidata ou simplesmente uma solução e S^* um conjunto mais restrito que S que possua soluções s^* de melhor qualidade (ótimos locais). Deseja-se explorar S^* , considerando uma “trajetória” que possibilite a passagem de uma solução s^* para uma nova solução, independente de esta solução ser o vizinho mais próximo. A partir da solução corrente s^* , primeiramente aplica-se uma mudança ou perturbação, a qual conduz a uma solução intermediária s' pertencente a S . Então, o procedimento de busca local é aplicado em s' , e encontra-se uma solução $s^{*'}$ em S^* . Caso a solução satisfaça o teste de aceitação, ela se torna o próximo elemento na trajetória descrita em S^* . Senão, retorna-se a s^* .

A figura 4.1 ilustra a metaheurística ILS. Começando com um mínimo local s^* , aplica-se uma perturbação conduzindo para uma solução s' . Após a aplicação da busca local, encontra-se um novo mínimo local $s^{*'}$ que pode ser melhor que s^* .

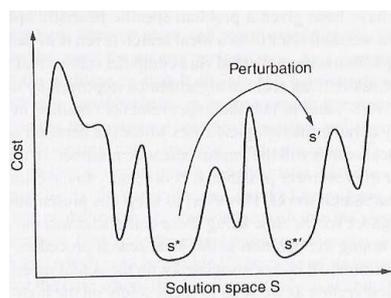


Figura 4.1: Representação do ILS

O procedimento de busca local iterativo [37] conduz a uma boa amostragem sobre o conjunto de soluções, ou seja, produz novas soluções, em geral, de boa qualidade. Tal fato é decorrente de um “ajuste” das perturbações considerando as especificidades do problema. As perturbações não

podem ser nem tão pequenas (pouca alteração na estrutura da solução) e nem tão grandes (muita alteração na estrutura da solução). Se elas forem muito pequenas [37], s' frequentemente pertencerá à região de atração de s^* e, com isso, poucas novas soluções de S^* serão exploradas. Do contrário, se as perturbações forem muito grandes [37], s' pertencerá a uma região aleatória, e será necessário reiniciar o algoritmo.

- 1) Defina uma solução inicial s_0
- 2) $s^* \leftarrow BuscaLocal(s_0)$
- 3) enquanto (critério de parada não for satisfeito) faça
 - a) $s' \leftarrow Perturbação(s^*)$
 - b) $s^{*' } \leftarrow BuscaLocal(s')$
 - c) $s^* \leftarrow CritérioAceitação(s^*, s^{*' })$
- 4) retorne a solução s^*

Figura 4.2: Pseudocódigo do Algoritmo ILS

4.1.4 Algoritmos Genéticos

Os algoritmos genéticos, criados por Holland [32] em 1975, baseiam-se na teoria da evolução de Darwin, onde os indivíduos mais capacitados sobrevivem e geram descendentes com suas características hereditárias.

Em linhas gerais, um algoritmo genético [61] parte de uma população inicial de cromossomos gerados aleatoriamente, faz a avaliação de cada um, seleciona os melhores e aplica sobre esses cromossomos manipulações genéticas, como cruzamento e mutação, com a finalidade de criar uma nova população. Esse conjunto de procedimentos pode ser adaptado para resolver qualquer problema de otimização.

Inicialmente, para a aplicação do AG, define-se um vetor ou uma *string*

para representar um cromossomo (solução viável). Em seguida, gera-se uma população inicial [61] formada por m cromossomos (C_1, C_2, \dots, C_m), que correspondem a um pequeno subconjunto do espaço total de soluções do problema.

Para cada cromossomo da população, deve-se calcular o valor de $f_i = f(S_i), \forall i = 1, \dots, m$, que corresponde à função objetivo. A partir desse valor, obtém-se a *aptidão* do cromossomo, que pode ser definida como $1/f_i$, no caso de um problema de minimização, ou o próprio valor da função objetivo f_i , no caso de um problema de maximização. Obtidas as aptidões para todos os cromossomos da população, aplicam-se, então, os operadores genéticos, na seguinte ordem [61]:

1. Reprodução dos melhores cromossomos (seleção) [61] - Baseado nos valores de f_i , os melhores cromossomos (menor valor de f_i - problema de minimização) são selecionados e duplicados em substituição aos piores. Normalmente, para a seleção dos cromossomos, utiliza-se um dos métodos descritos a seguir:

Método do Torneio [46] - Consiste, inicialmente, em selecionar de maneira aleatória t cromossomos ($t < m$) da população atual e escolher dentre estes o melhor (o de maior aptidão). Sendo assim, a chance de o pior cromossomo ser selecionado para a aplicação dos procedimentos de mutação ou de *crossover* é este cromossomo ser o único de um torneio ($t = 1$) ou as (t) soluções selecionadas terem o mesmo valor da função objetivo. Esse procedimento deve ser, então, aplicado m vezes, de forma a compor uma nova população.

Cromossomo	Aptidão
C_1	160
C_2	200
C_3	180
C_4	200
C_5	190
C_6	150

Tabela 4.1: Cromossomos e suas Aptidões

Exemplo: A tabela 4.1 ilustra os cromossomos que compõem uma população e suas respectivas aptidões (f_i).

A figura 4.3 exemplifica a aplicação do método torneio (para $t = 3$) na população da tabela 4.1. Nessa figura, cada retângulo contém os cromossomos selecionados aleatoriamente na população atual e o cromossomo (com melhor aptidão) que foi escolhido para compor a nova população.

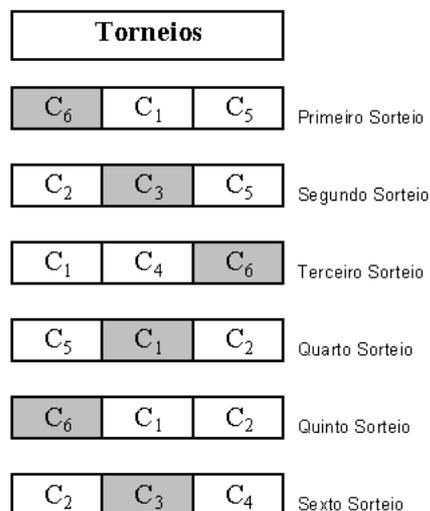


Figura 4.3: Método do Torneio

A aplicação do método do torneio produz a nova população abaixo:

$C_6, C_3, C_6, C_1, C_6, C_3$

Método da roleta viciada [46] - Consiste em fazer com que cada cromossomo C_i seja copiado um número de vezes proporcional ao valor de sua aptidão. Ou seja, os cromossomos com menores valores na função objetivo (problema de minimização) têm uma maior probabilidade de seleção do que os cromossomos com os maiores valores da função objetivo. Conseqüentemente, os cromossomos com baixa probabilidade de seleção tendem a ser eliminados, pois é pouco provável que alguma cópia desses cromossomos seja realizada.

A figura 4.4 ilustra a aplicação do método da roleta, utilizando novamente, a população exemplo da tabela 4.1

O tamanho de cada fatia do gráfico é proporcional à aptidão do cromossomo. Sendo assim, os cromossomos são selecionados aleatoriamente, dando maiores chances de seleção aos cromossomos mais aptos (com melhor aptidão).

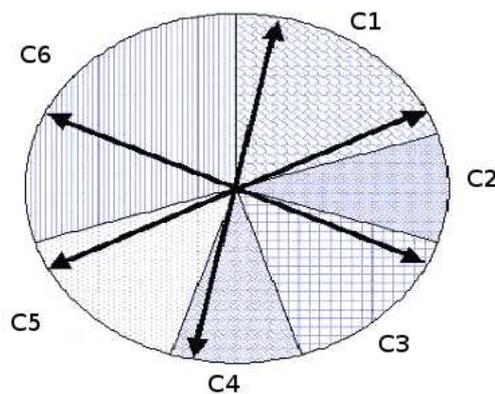


Figura 4.4: Método da Roleta Viciada

Finalmente tem-se o resultado da roleta:

C_1 , C_1 , C_3 , C_4 , C_5 , C_6

Elitismo [46] - Consiste em selecionar o cromossomo com a melhor aptidão e inserí-lo na população da próxima geração, logo após a aplicação dos operadores genéticos (cruzamento e mutação). O elitismo garante que o melhor indivíduo da próxima geração seja melhor ou igual ao da geração anterior.

2. Cruzamento (*crossover*)[61] - É uma recombinação das estruturas genéticas da população que possibilita a diversificação no espaço de soluções. O operador *crossover* (tradicional) escolhe aleatoriamente dois cromossomos e troca partes do seu padrão genético (alguns gens). Apresentamos a seguir os três operadores de cruzamento clássicos.

Cruzamento de Um Ponto [46]: Depois de selecionados dois cromossomos, um ponto de corte é selecionado. Um ponto de corte corresponde a uma posição entre dois genes de um cromossomo. Cada cromossomo com n posições contém exatamente $n - 1$ pontos de corte. Cada ponto determina uma possível separação entre as duas partes do cromossomo.

Exemplo: A figura 4.5 ilustra dois cromossomos (C_i e C_j), provenientes de uma seleção aleatória, sobre os quais é aplicado o cruzamento de um ponto. O cromossomo C'_i (derivado de C_i) é formado através da concatenação da parte esquerda de C_j com a parte direita de C_i . De igual forma, o cromossomo C'_j é formado através da concatenação da parte esquerda de C_i com a parte direita de C_j .



Figura 4.5: Ilustração do Cruzamento de Um Ponto

Cruzamento de Dois Pontos [46]: Depois de selecionados dois cromossomos, dois pontos de corte são selecionados (duas posições). O conteúdo dos cromossomos é trocado entre os dois pontos.

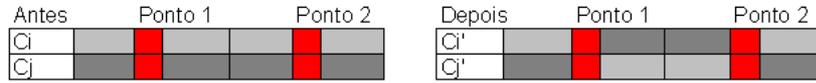


Figura 4.6: Ilustração do Cruzamento de Dois Pontos

Cruzamento Uniforme [46]: Consiste na recombinação dos cromossomos segundo um padrão geral. Não utiliza pontos de cruzamento, mas determina, através de um parâmetro global, qual a probabilidade de cada uma das posições dos cromossomos serem trocadas.

Exemplo: A figura 4.7 ilustra dois cromossomos (C_i e C_j), provenientes de uma seleção aleatória.

No cruzamento uniforme, considerando um cromossomo com n posições, gera-se uma máscara (vetor) com n valores aleatórios (zeros ou uns). As posições dessa máscara correspondem às posições dos cromossomos C_i e C_j . Para cada posição com valor igual a um na máscara, trocam-se os valores correspondentes em C_i e C_j . Para as posições com valor zero na máscara, não ocorrem trocas. A figura 4.7 representa esse procedimento.

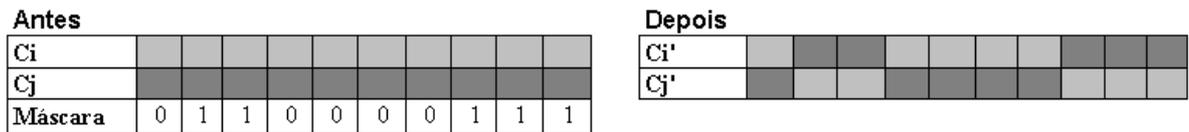


Figura 4.7: Ilustração do Cruzamento Uniforme

3. **Mutação** [61]- Consiste em uma perturbação que é aplicada em uma pequena parcela dos cromossomos visando a modificação de alguns de seus

gens (partes de uma solução). Esse procedimento permite a regeneração de soluções (cromossomos) que tenham sido eliminadas da população em virtude da aplicação dos procedimentos de cruzamento e de reprodução.

Após a execução de todos esses procedimentos, obtém-se uma nova população, sobre a qual deve-se repetir a avaliação da função objetivo para cada cromossomo e a aplicação dos operadores genéticos, sendo tal processo repetido por um certo número de gerações.

Normalmente, são adotados um ou mais dos seguintes critérios de parada para a execução de um AG [61]:

- Número máximo gerações - Repetir os passos (1, 2, 3) por um número de vezes pré-determinado.
- Tempo máximo de processamento.
- Número máximo iterações sem melhoria no valor da função objetivo.

A solução produzida por um AG é obtida a partir da última população gerada, da qual é selecionada a melhor solução, isto é, o cromossomo associado ao menor (maior) valor da função objetivo do problema de minimização (maximização [61]).

4.2 Algoritmos

Com a perspectiva de resolver instâncias de tamanho variado (pequeno, médio e grande porte) 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, VNS, ILS e Algoritmos Genéticos. Os algoritmos GRASP e VNS trabalham em duas fases, determinando, primeiramente, o número de ERBs a serem ativadas e os locais onde devem ser alocadas, e em seguida, determinam os CDs que cada ERB atende, enquanto que os algoritmos ILS e Algoritmos Genéticos, trabalham em uma única fase, isto é, associam cada CD a uma ERB capaz de servi-lo.

A partir da aplicação dos novos algoritmos, temos como resultado as potências de transmissão, a seleção de um conjunto de ERBs e a informação de a quais ERBs cada um dos CDs estão alocados.

4.2.1 GRASP

A presente seção traz uma descrição de quatro algoritmos GRASP. O primeiro algoritmo GRASP tem uma busca local simples, e os demais incorporam em suas buscas locais três versões do VNS. O procedimento implementado na fase de construção, e que é comum aos quatro algoritmos, tem os seguintes passos:

Procedimento de Construção:

Passo 1: Definir uma lista de candidatos (LC) a partir de todas as $|J|$ ERBs que podem ser instaladas na rede.

Passo 2: Construir uma 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 da LC para compor a rede. Em cada iteração desta fase, para toda ERB $j \in LC$, define-se

$g(j) = 1/M_j$, sendo M_j o número de CDs cobertos pela ERB j . Calculando-se \underline{g} , \bar{g} e fixando $\varphi = 0.5$, é possível construir a LCR (vide seção 4.1.1).

Passo 3: Selecionar aleatoriamente uma ERB da LCR para compor o conjunto solução, definido por C_{ERB} . A aleatoriedade é usada para conferir variabilidade às soluções produzidas nessa fase.

Passo 4: Atualizar a LC , removendo-se a ERB que foi adicionada ao conjunto das ERBs ativas (C_{ERB}). Os passos (2), (3) e (4) 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 com a ERB j ($j \in C_{ERB}$) com o maior ganho de propagação g_{ij} , de forma a garantir uma melhor qualidade para os serviços prestados aos CDs.

Passo 5: Calcular a potência de transmissão a ser alocada a partir de cada CD i para a sua respectiva ERB j , para o atendimento do serviço s . Essas potências são obtidas a partir da discretização de intervalos que têm como limites as potências mínima e máxima referentes a cada serviço s .

Conseqüentemente, é construído, para cada tipo de serviço s , um vetor p com w posições, atribuindo-se à primeira posição o valor da potência mínima ($p_1 = p_{min}$) disponibilizada para o serviço s , calculada mediante a resolução do seguinte quociente: $\frac{SIR_{alvo}^s \eta_j}{\max_{j \in J} (g_{ij})}$ (vide cap. 3).

As demais posições $(2, 3, \dots, r, \dots, w)$ desse vetor são preenchidas utilizando-se a equação $p_r = p_{min} + (r - 1) \cdot (p_{max} - p_{min}) / w - 1$. De forma a trabalhar com potências pequenas, o valor do parâmetro w foi fixado em 1000.

Na figura abaixo (4.8) temos a ilustração do preenchimento do vetor de potências para o serviço do tipo 3 e $w = 50$.

1	2	3	...	50
Pot min	Pot min + incremento	Pot min + 2* incremento		Pot min + 49* incremento

Figura 4.8: Preenchimento do Vetor de Potências

Passo 6: Verificar se as restrições do SIR (3.10) 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_r . O valor do SIR da conexão de um CD i atendido pela ERB j deve exceder o valor do SIR_{alvo} definido para cada tipo de serviço. Sendo assim, para cada restrição (3.10) não satisfeita, deve-se verificar qual serviço precisa de uma potência maior para atender ao valor do SIR. Uma vez determinado qual é este serviço, utiliza-se o valor de potência que está armazenado na próxima posição do vetor de discretização relacionado ao mesmo. Tal procedimento é repetido até que todas as restrições (3.10) sejam satisfeitas ou até que sejam utilizadas todas as potências do vetor de potências sem a satisfabilidade das restrições (3.10).

Passo 7: Caso o valor máximo de potência seja utilizado e ainda assim as restrições (3.10) não sejam satisfeitas, inclui-se uma nova ERB na solução do problema. A ERB escolhida será aquela que cobrir o maior número de CDs (já cobertos). Isso permitirá que alguns dos CDs atendidos por outras ERBs do conjunto solução possam ser desvinculados destas e alocados à nova ERB escolhida. Tal realocação possibilita uma redução dos valores das potências de transmissão. A cada inclusão de uma nova ERB, retorna-se ao início do passo 6. Esse procedimento é repetido até que todas as restrições (3.10)

sejam satisfeitas.

É importante ressaltar que, na fase de construção, foi introduzido o procedimento de filtro. Ou seja, foram construídas r soluções iniciais na construção, selecionando-se, dentre elas, a melhor solução para a aplicação da busca local.

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

Passo 0: Aplicar o procedimento de construção e definir o conjunto de ERBs ativas C_{ERB} .

Passo 1: Para cada ERB do conjunto solução C_{ERB} , verificar a possibilidade de retirá-la, realocando-se os seus centros de demanda para as ERBs restantes de C_{ERB} , sem violar as restrições (3.6), (3.7) e (3.8). O passo 1 é repetido até que não seja possível retirar ERBs da solução.

Passo 2: Considerando o conjunto de ERBs (C_{ERBS}) após a(s) possíveis realocações(s), recalculam-se as potências de transmissão (Passos 6 e 7 do procedimento de construção).

Algoritmo (2): GRASP com VNS híbrido 1 (GRVNS1)

Passo 0: Aplicar o procedimento de construção e definir o conjunto de ERBs ativas C_{ERB} .

Passo 1: Aplicar a busca local descrita nos passos 2, 3 e 4 a cada iteração múltipla de 5 do algoritmo e aplicar a busca local do GRBLS nas demais iterações.

Passo 2: Definir o número máximo de vizinhanças como sendo igual a dois.

Passo 3: Definir $r = 1$ (indica que a r -ésima ERB será selecionada) de C_{ERB}

Passo 4: Efetuar uma perturbação na solução atual, ou seja, selecionar a ERB que está na posição r de C_{ERB} e selecionar a primeira ERB inativa que mantém a rede viável (possibilita o cumprimento das restrições (3.6), (3.7), (3.8) e (3.10)).

Passo 5: Caso não haja nenhuma ERB inativa que mantenha a rede viável, seleciona-se a próxima ERB ativa de C_{ERB} ($r = r + 1$) e retorna-se ao passo 4. Caso contrário, substitui-se a ERB ativa da posição r de C_{ERB} por esta ERB inativa (rede viável), executando-se, em seguida, o passo 6.

Os passos 4 e 5 são executados até que todas as trocas de ERBs ativas por ERBs não ativas tenham sido testadas, ou até que seja encontrada a primeira ERB inativa que mantenha a rede viável. A perturbação tem o objetivo de substituir ERBs que cobrem poucos CDs por ERBs que cobrem um número maior de CDs, para com isso viabilizar a retirada de alguma ERB do conjunto solução.

As figuras a seguir ilustram a aplicação da perturbação (passos 4 e 5) na solução atual C_{ERB}), considerando cinco ERBs, sendo três ativas e duas inativas.

ERB ativas		
2	4	5

ERB inativas	
1	3

Figura 4.9: Conjuntos de ERBs Ativas e Inativas - GRVNS1

A figura 4.10 apresenta um exemplo onde foi necessário efetuar quatro tentativas de troca (perturbações) de uma ERB ativa por uma ERB inativa. Ou seja, somente na quarta tentativa (perturbação) produziu-se uma nova solução viável, formada pelas ERBs 2, 3 e 5. Nas tentativas anteriores, foi considerado que a troca da ERB ativa 2 pelas ERBs inativas 1 e 3 não produziu uma rede viável, sendo este fato também observado na troca da ERB ativa 4 pela ERB inativa 1.

ERBs Ativas				
Antes da Troca	2	4	5	1ª Tentativa de Troca
Depois da Troca	1	4	5	
Antes da Troca	2	4	5	2ª Tentativa de Troca
Depois da Troca	3	4	5	
Antes da Troca	2	4	5	3ª Tentativa de Troca
Depois da Troca	2	1	5	
Antes da Troca	2	4	5	4ª Tentativa de Troca
Depois da Troca	2	3	5	

Figura 4.10: Ilustração da Aplicação do Procedimento de Perturbação

Passo 6: A primeira vizinhança é caracterizada pela seleção de duas ERBs ativas e uma ERB inativa. Inicialmente, são gerados todos os m subconjuntos de ERBs ativas tomadas duas a duas de C_{ERB} .

Passo 7 (Busca na vizinhança 1): Em seguida, busca-se entre esses m subconjuntos, o primeiro subconjunto de ERBs ativas que, ao serem

substituídas por uma das ERBs inativas (em C_{ERB}), produzam uma nova solução que seja viável e que tenha o custo inferior ao da solução atual (ou seja, uma solução que satisfaça as restrições (3.6), (3.7), (3.8) e (3.10) e cujo valor correspondente ao número de ERBs ativas somadas às potências de transmissão - recalculadas - seja inferior ao da solução atual).

Passo 8: Caso tal solução seja obtida, substitui-se a solução atual pela nova solução e atualiza-se o valor da função objetivo.

A figura 4.11 apresenta um exemplo onde foi necessário efetuar quatro tentativas de trocas (busca na vizinhança 1) de duas ERBs ativas por uma ERB inativa. Partindo-se dos conjuntos de ERBs ativas e inativas da figura 4.9, somente na quarta tentativa (busca) produziu-se uma nova solução viável formada pelas ERBs 3 e 4. Nas tentativas anteriores, a substituição do subconjunto de ERBs ativas 2 e 4 pelas ERBs inativas 1 e 3, na solução atual, não produziu uma rede viável, sendo esse fato também observado na substituição do subconjunto de ERBs ativas 2 e 5 pela ERB inativa 1.

ERBs Ativas				
Antes da Troca	2	4	5	1ª Tentativa de Troca (Inviável)
Depois da Troca	1	-	5	
Antes da Troca	2	4	5	2ª Tentativa de Troca (Inviável)
Depois da Troca	3	-	5	
Antes da Troca	2	4	5	3ª Tentativa de Troca (Inviável)
Depois da Troca	1	4	-	
Antes da Troca	2	4	5	4ª Tentativa de Troca (Viável)
Depois da Troca	3	4	-	

Figura 4.11: Ilustração da Aplicação do Procedimento de Substituição de Duas ERBs Ativas por Uma ERB Inativa - GRVNS1

Passos 9 e 10 (Busca na Vizinhança 2): Análogos aos passos 7 e 8,

mas trocam-se três ERBs ativas por duas não ativas. Ou seja, são gerados todos os m subconjuntos de ERBs ativas tomadas três a três e todos os n subconjuntos de ERBs inativas tomadas duas a duas. Em seguida, busca-se, o primeiro subconjunto de ERBs ativas que, ao serem substituídas pelo primeiro subconjunto de ERBs inativas, produzam uma nova solução que seja viável.

Algoritmo (3): GRASP com VNS híbrido 2 (GRVNS2)

Passo 1: Aplicar o procedimento de construção e definir o conjunto de ERBs ativas C_{ERB} .

Passo 2: Definir o número máximo de vizinhanças igual a cinco ($v = 5$). A primeira vizinhança é caracterizada pela escolha de uma ERB inativa (que cobre mais CDs) que é candidata a substituir duas ERBs ativas. Analogamente, para uma vizinhança v ($v = 2, \dots, 5$), são selecionadas v ERBs inativas (que cobrem mais centros de demanda) que são candidatas a substituir $v + 1$ ERBs ativas.

Passo 3: Selecionar, na primeira vizinhança, todas as ERBs não ativas que cobrem o maior número de CDs (maior cobertura). Em seguida, seleciona-se dentre as k ERBs ativas pertencentes C_{ERB} duas ERBs que cubram o menor número de CDs.

Passo 4: Substituir as ERBs ativas (passo 3) por cada uma das ERBs inativas com a maior cobertura.

Passo 5: Buscar a primeira ERB inativa (entre as ERBs inativas que cobrem o maior número de CDs) que produza uma nova solução viável de

custo inferior ao da solução atual.

Passo 6: Caso seja encontrada uma ERB inativa no passo 5, atualiza-se o valor da função objetivo e a solução (C_{ERB}), o que implica, por sua vez, em substituir as duas ERBs ativas que cobrem o menor número de CDs pela ERB inativa que cobre o maior número de CDs. Havendo ou não sucesso em tal busca, executa-se uma nova busca na vizinhança seguinte.

O procedimento de busca na vizinhança 1 (passos anteriores) é ilustrado nas figuras a seguir. Nesse exemplo foram consideradas dez ERBs, sendo que quatro estão ativas e seis estão inativas. Observe que as ERBs inativas 7, 8 e 10 cobrem o maior número de CDs (cobertura igual a 6). As duas ERBs ativas com menor cobertura são a 2 e a 4 (coberturas iguais a 4 e 3).

ERBs ativas			
2	4	5	6

Qtd. de CDs cobertos pelas ERBs ativas			
4	3	5	8

ERBs inativas					
1	3	7	8	9	10

Qtd. de CDs cobertos pelas ERBs inativas					
3	2	6	6	4	6

Figura 4.12: Conjuntos de ERBs Ativas e Inativas - GRVNS2

A figura 4.13 apresenta um exemplo onde foi necessário efetuar duas tentativas de trocas (busca na vizinhança 1) de duas ERBs ativas por uma ERB inativa. Ou seja, uma nova solução viável formada pelas ERBs 8, 5 e 6, foi produzida na segunda tentativa (busca). Na primeira tentativa, a substituição do subconjunto de ERBs ativas 2 e 4 pela ERB inativa 7, na solução atual, não produziu uma rede viável.

ERBs Ativas					
Antes da Troca	2	4	5	6	1 ^a Tentativa de Troca (Inviável)
Depois da Troca	7	-	5	6	
Antes da Troca	2	4	5	6	2 ^a Tentativa de Troca (Viável)
Depois da Troca	8	-	5	6	

Figura 4.13: Ilustração da Aplicação do Procedimento de Substituição de Duas ERBs Ativas por Uma ERB Inativa - GRVNS2

Passo 7: A segunda vizinhança é caracterizada pela seleção de todas ERBs não ativas que cobrem o maior e o segundo maior número de CDs (maior cobertura e segunda maior cobertura). Inicialmente, são definidos dois conjuntos de ERBs inativas. O primeiro conjunto (C_{I1}) possui todas as ERBs com a maior cobertura e o segundo conjunto (C_{I2}) possui todas as ERBs com a segunda maior cobertura. Em seguida, verifica-se dentre as k ERBs ativas as três estações que cobrem o menor número de CDs.

Passo 8: Substituir as três ERBs ativas (passo 7) por cada dupla de ERBs inativas, onde uma dupla é composta por uma ERB de C_{I1} e uma ERB de C_{I2} .

Passo 9: Buscar a primeira dupla de ERBs inativas que produza uma nova solução viável que tenha o custo inferior ao da solução atual.

Passo 10: Caso seja encontrada uma dupla de ERBs inativas no passo 9, atualiza-se o valor da função objetivo e a solução (C_{ERB}), o que implica, por sua vez, em substituir as três ERBs ativas que cobrem o menor número de CDs pela dupla de ERBs inativas que cobrem o maior e o segundo maior número de CDs. Havendo ou não sucesso em tal busca, executa-se uma nova busca na vizinhança três. (passo seguinte)

O procedimento de busca na vizinhança 2 (passos 7, 8 e 9) é ilustrado na figura a seguir. Observe que as ERBs inativas 7 e 10 cobrem o maior número de CDs (cobertura igual a 6) e as ERBs 2 e 9 cobrem o segundo maior número de CDs (cobertura igual a 4). As três ERBs ativas 8,5 e 6 cobrem respectivamente 5, 8 e 6 centros de demanda.

ERBs ativas		
8	5	6
Qtd. de CDs cobertos pelas ERBs ativas		
6	5	8

ERBs inativas						
1	2	3	4	7	9	10
Qtd. de CDs cobertos pelas ERBs inativas						
3	4	2	3	6	4	6

Figura 4.14: Conjuntos de ERBs Ativas e Inativas - GRVNS2

A figura 4.15 apresenta um exemplo onde foi necessário efetuar três tentativas de trocas (busca na vizinhança 2) de três ERBs ativas por uma dupla de ERBs inativas, ou seja, uma nova solução viável formada pelas ERBs 10 e 2, foi produzida na terceira tentativa (busca). Nas tentativas anteriores, a substituição do subconjunto de ERBs ativas 8, 5 e 6 pelas ERBs inativas 7 e 2, na solução atual, não produziu uma rede viável, o que foi também observado na substituição do subconjunto de ERBs ativas 8, 5 e 6 pelas ERBs inativas 7 e 9.

ERBs Ativas				
Antes da Troca	8	5	6	1ª Tentativa de Troca (Inviável)
Depois da Troca	7	2	-	
Antes da Troca	8	5	6	2ª Tentativa de Troca (Inviável)
Depois da Troca	7	9	-	
Antes da Troca	8	5	6	3ª Tentativa de Troca (Viável)
Depois da Troca	10	2	-	

Figura 4.15: Ilustração da Aplicação do Procedimento de Substituição de Três ERBs Ativas por Duas ERB Inativas - GRVNS2

Passos 11, 12, 13 e 14: Análogos aos passos 7, 8, 9 e 10, diferenciando-se apenas pela escolha de três ERBs inativas (maior, segunda maior e terceira maior cobertura) que substituíram as quatro ERBs ativas (dentre as k) que cobrem o menor número de CDs.

Passos 15, 16, 17 e 18: Análogos aos passos 7, 8, 9 e 10, diferenciando-se apenas pela escolha de quatro ERBs inativas (maior, segunda maior, terceira maior e quarta maior cobertura) que substituíram as cinco ERBs ativas (dentre as k) que cobrem o menor número de CDs.

Passos 19, 20, 21 e 22: nálogos aos passos 7, 8, 9 e 10, considerando a seleção de cinco ERBs inativas (da maior até a quinta maior cobertura).

Caso o número ERBs inativas selecionadas por uma vizinhança (para substituir as ERBs de C_{ERB}) seja maior ou igual ao número de ERBs em C_{ERB} , essa e as vizinhanças posteriores não serão visitadas.

Algoritmo (3): GRASP com VNS híbrido 3 (GRVNS3)

Passo 1: Aplicar o procedimento de construção e definir o conjunto de ERBs ativas C_{ERB} .

Passo 2: Calcula-se a probabilidade de cobertura de todas as ERBs (ativas e inativas). Essa probabilidade corresponde ao quociente entre o número de CDs cobertos por uma ERB e o total de CDs. Em seguida, são definidos dois conjuntos que possuem, respectivamente, as probabilidades de coberturas correspondentes às ERBs ativas e inativas.

Passo 3: Definir o número máximo de vizinhanças igual a cinco ($v = 5$). A primeira vizinhança é caracterizada pela escolha de uma ERB inativa (cuja probabilidade de cobertura esteja entre as cinco maiores) que é candidata a substituir duas ERBs ativas (cujas probabilidades de coberturas, somadas, resultem em uma probabilidade de cobertura menor ou igual àquela da ERB inativa selecionada). Analogamente, ao considerar uma vizinhança v ($v = 2, \dots, 5$), são selecionadas v ERBs inativas (cuja probabilidade de cobertura esteja entre as 5 maiores) que são candidatas a substituírem $v + 1$ ERBs ativas (cujas probabilidades de coberturas, somadas, resultem em uma probabilidade de cobertura menor ou igual a soma das probabilidades das ERB inativas selecionadas).

Passo 4: Selecionar, na primeira vizinhança, dentre as ERBs não ativas, uma ERB cuja probabilidade de cobertura esteja entre as cinco maiores. Em seguida, são selecionadas duas ERBs ativas cuja soma das probabilidades de cobertura seja menor ou igual a probabilidade de cobertura da ERB inativa selecionada.

Passo 5: Substituir no máximo 20 duplas de ERBs ativas (passo 4) pela ERB inativa selecionada no passo 4. Essas duplas fazem parte de um conjunto formado por todas as combinações de ERBs ativas tomadas duas a duas, cuja soma de suas probabilidades de coberturas seja menor ou igual

à probabilidade de cobertura da ERB selecionada. Caso a quantidade de elementos do conjunto seja maior que 20, então as duplas a serem substituídas são escolhidas aleatoriamente nesse conjunto.

Passo 6: Buscar a primeira dupla de ERBs ativas (passo 4) que, ao serem substituídas pela ERB inativa (selecionada no passo 4), produzam uma nova solução viável que tenha o custo inferior ao da solução atual.

Passo 7: Caso seja encontrada uma dupla de ERBs ativas a serem substituídas pela ERB inativa, atualiza-se o valor da função objetivo e da solução (C_{ERB}), o que implica, por sua vez, em substituir as duas ERBs ativas cuja a soma das probabilidades de cobertura seja menor ou igual à probabilidade de cobertura da ERB inativa selecionada. Havendo ou não sucesso em tal busca, executa-se uma nova busca na vizinhança seguinte.

O procedimento de busca na vizinhança 1 (passos anteriores) é ilustrado nas figuras a seguir. Nesse exemplo, foram considerados 15 CDs e dez ERBs, sendo que quatro estão ativas e seis estão inativas. Observe que as ERBs inativas que possuem as 5 maiores probabilidades de coberturas são: 1 (20%), 7 (40%), 8 (40%), 9 (27%) e 10 (67%).

ERBs ativas			
2	4	5	6

Qtd. de CDs cobertos pelas ERBs ativas			
4	3	2	8

Probabilidade de cobertura das ERBs ativas			
27%	20%	13%	53%

ERBs inativas					
1	3	7	8	9	10

Qtd. de CDs cobertos pelas ERBs inativas					
3	2	6	6	4	10

Probabilidade de cobertura das ERBs inativas					
20%	13%	40%	40%	27%	67%

Figura 4.16: Conjuntos de ERBs Ativas e Inativas - GRVNS3

A figura 4.17 apresenta um exemplo onde foi necessário efetuar duas tentativas de trocas (busca na vizinhança 1) de duas ERBs ativas por uma ERB inativa selecionada aleatoriamente entre as 5 maiores probabilidades de cobertura. Apenas na segunda tentativa (busca) produziu-se uma nova solução viável formada pelas ERBs 2, 8 e 6.

ERBs Ativas					
Antes da Troca	2	4	5	6	1 ^a Tentativa de Troca (Inviável)
Depois da Troca	8	4	-	6	
Antes da Troca	2	4	5	6	2 ^a Tentativa de Troca (Viável)
Depois da Troca	2	8	-	6	

Figura 4.17: Ilustração da Aplicação do Procedimento de Substituição de Duas ERBs Ativas por Uma ERB Inativa - GRVNS3

Passo 8: A segunda vizinhança é caracterizada pela seleção de duas ERBs não ativas, cujas probabilidades de coberturas estejam entre as 5 maiores. Em seguida, verifica-se dentre as k ERBs ativas, três ERBs cuja soma das probabilidades de cobertura seja menor ou igual à soma das probabilidades de cobertura das duas ERBs inativas selecionadas.

Passo 9: Substituir no máximo 20 triplas de ERBs ativas (passo 8) pelas duas ERBs inativas que foram selecionadas no passo 8 em função da soma de suas probabilidades.

Passo 10: Buscar a primeira tripla de ERBs ativas (passo 8) que ao serem substituídas pelas duas ERBs inativas (passo 8) produzam uma nova solução viável de custo inferior ao da solução atual.

Passo 11: Caso seja encontrado uma tripla de ERBs inativas no passo 9, atualiza-se o valor da função objetivo e a solução (C_{ERB}). Havendo ou não sucesso em tal busca, executa-se uma nova busca na vizinhança seguinte.

Passos 12, 13, 14 e 15: Análogos aos passos 8, 9, 10 e 11, diferenciando-se apenas pela escolha de três ERBs inativas cujas probabilidades de coberturas estejam entre as 5 maiores. Essas substituíram as quatro ERBs ativas (entre as k) cuja soma das probabilidades de cobertura seja menor ou igual à soma das probabilidades de cobertura das três ERBs inativas selecionadas.

Passos 16, 17, 18 e 19: Análogos aos passos 8, 9, 10 e 11, diferenciando-se apenas pela escolha de 4 ERBs inativas (probabilidades de coberturas estejam entre as 5 maiores) que substituíram cinco ERBs ativas (dentre as k) cuja soma das probabilidades de cobertura seja menor ou igual à soma das probabilidades de cobertura das quatro ERBs inativas selecionadas.

Passos 20, 21, 22 e 23: Análogos aos passos 8, 9, 10 e 11, considerando a seleção das cinco ERBs inativas que possuem as 5 maiores probabilidades de coberturas.

4.2.2 ILS

A partir do estudo da metaheurística ILS, foram implementados dois procedimentos de perturbação, um procedimento de construção, um procedimento de busca local e um procedimento de aceitação. A combinação desses procedimentos produziu dois algoritmos ILS que se diferenciam pela aplicação dos procedimentos de perturbação.

Procedimento de Construção da Solução Inicial:

Para a construção de uma solução inicial, utilizou-se um vetor com $|I|$ componentes que correspondem aos centros de demanda (CD), sendo atribuído a cada componente (CD) um valor aleatório entre 1 e $|J|$ (número de ERBS) que corresponde ao número da ERB à qual um centro de demanda será alocado. Tal solução é construída de forma a garantir que todo CD seja coberto por pelo menos uma ERB (restrições 3.6, 3.7 e 3.8 são cumpridas). Considerando tal procedimento, são geradas q soluções iniciais (vetores), selecionando-se, dentre essas, a solução que cobre todos os CDs com o menor quantitativo de ERBs.

A figura 4.18 ilustra algumas possíveis soluções iniciais que podem ser geradas, para $|I| = 5$ e $|J| = 3$. Para solução 1, por exemplo, a ERB 1 é alocada aos CDs 2 e 5, a ERB 2 é alocada ao CD 1 e a ERB 3 é alocada aos CDs 3 e 4.

Ainda com relação a essa figura, observa-se que podem ser geradas soluções viáveis que não incluam todas as ERBs, como no caso das soluções 2 e 4. Tal fato é naturalmente desejável, tendo em vista a necessidade de reduzir os custos de instalação das ERBs na rede.

Solução 1	2	1	3	3	1
Solução 2	2	1	2	2	1
Solução 3	1	1	2	3	1
Solução 4	3	1	1	3	1

Figura 4.18: Algumas Possíveis Soluções Iniciais

Diferentemente do procedimento de construção do algoritmo GRASP, no caso do algoritmo ILS o cálculo e a alocação das potências são realizados no procedimento de busca local.

Procedimento de Busca Local:

Passo 1: Definir o conjunto de ERBs ativas C_{ERB} associado com o vetor solução obtido após a aplicação do procedimento de construção ou de perturbação.

Passo 2: Definir uma lista L formada pelas ERBs contidas em C_{ERB} , colocando as ERBs em L em ordem decrescente do número de centros de demanda que são cobertos por cada uma, ou seja, da maior para a menor cobertura.

Passo 3: Definir duas listas formadas a partir de L : a lista L_{maior} , que possui as x primeiras ERBs que cobrem mais CDs, e a lista L_{menor} , que possui as y ERBs que cobrem menos CDs, sendo os valores de x e y , respectivamente, 50% e 40% do total de posições do vetor L .

Passo 4: Substituir no vetor L cada elemento (ERB) da lista L_{menor} pelos elementos (ERBs) da lista L_{maior} . A cada substituição de uma ERB t pertencente a L_{menor} por uma ERB l pertencente a L_{maior} , verifica-se se os CDs que eram associados a ERB t são cobertos pela ERB l .

Tal solução construída sempre será viável, ou seja, há a garantia de que todo CD seja coberto por pelo menos uma ERB (restrições 3.6, 3.7 e 3.8 são cumpridas).

As figuras a seguir ilustram o passo 4, considerando 6 CDs e 3 ERBs ativas.

Vetor Solução (contém as ERBs que cobrem os CDs relacionados ao índice do vetor)					
3	2	3	2	4	3

Vetor C_{ERB} (ERBs ativas associadas ao vetor solução)		
2	3	4

Vetor L (contém ERBs de C_{ERB} , em ordem decrescente)		
3	2	4

50% (ERBs que cobrem mais CDs) 40% (ERBs que cobrem menos CDs)

Figura 4.19: Lista L - ILS

A figura 4.20 mostra duas tentativas de substituição na busca local, ou seja, redução do conjunto de ERBs ativas. Na primeira substituição, tenta-se alocar para a ERB 3 os CDs inicialmente cobertos pela ERB 4. Mas, supondo que a ERB 3 não pode cobrir tais CDs, efetua-se a segunda substituição utilizando a ERB 2 no lugar da ERB 4. Nesse caso, a ERB 2 pode cobrir tais CDs, o que implica na atualização do vetor solução e do vetor C_{ERB} .

3	2	4	Vetor L inicial
3	2	3	Após substituição 1 ^a
3	2	2	Após substituição 2 ^a

Figura 4.20: Substituições Efetuadas na Busca Local - ILS

Passo 5: Considerando a nova solução obtida no passo 4, calcular 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 análogo ao cálculo descrito nos passos 6 e 7 da fase de construção do GRASP.

Procedimento de Perturbação - ILSPERT1

Passo 1: Selecionar aleatoriamente t (correspondente a um percentual de 5% de I) posições do vetor solução atual e substituir as ERBs correspondentes a essas posições por ERBs selecionadas aleatoriamente (mantendo a viabilidade da solução). Para cada ERB a ser substituída, verifica-se se alguma das demais ERBs ativas ou inativas mantém a viabilidade da rede.

A figura abaixo traz o exemplo de um vetor solução que possui 40 posições, ou seja, 40 CDs. Sendo assim, com a aplicação da perturbação, serão substituídas 2 posições do vetor solução (em azul).

Mais especificamente, serão substituídas as ERBs pertencentes às posições 4 e 38 (CDs 4 e 38). Tais posições são escolhidas aleatoriamente. Na primeira substituição, aloca-se na posição 4 a ERB 26 (em cinza), selecionada aleatoriamente. Na segunda substituição, tenta-se alocar na posição 38 a ERB 16 (em cinza), mas, supondo que a ERB 16 não pode cobrir o CD 38, efetua-se uma nova substituição, ou seja, aloca-se na posição 38 a ERB 7 (em cinza).

5	7	14	3	18	1	...	24	18	3
5	7	14	26	18	1	...	24	18	3
5	7	14	26	18	1	...	16	18	3
5	7	14	26	18	1	...	7	18	3

Figura 4.21: Ilustração da Aplicação do Procedimento de Perturbação - ILSPERT1

Procedimento de Perturbação - ILSPERT2

Passo 1: Selecionar aleatoriamente uma posição do vetor solução e verificar se é possível substituir a ERB associada a essa posição por uma ERB ativa ou inativa também selecionada aleatoriamente (mantendo a viabilidade da solução). Em seguida, torna-se a selecionar uma posição do vetor solução e verifica-se se é possível substituir a ERB associada a essa posição por uma ERB ativa ou inativa selecionada aleatoriamente. Esse processo se repete 200 vezes.

Passo 2: Atualizar a solução atual se a quantidade de ERBs associadas ao vetor solução resultante da aplicação do passo 1 diminuir ou aumentar em uma unidade. A figura abaixo ilustra o procedimento de perturbação, considerando que o vetor solução atual (em azul) possua 40 posições, ou seja, 40 CDs.

Observa-se que a primeira tentativa de substituição não produziu uma rede viável. Sendo assim, a substituição da ERB 7 pela ERB 4 (em cinza) não é possível. Na segunda tentativa, foi selecionada a posição 48, que está associada à ERB 24. Esta será substituída pela ERB 36 (em cinza), pois essa substituição resultou em uma rede viável. A terceira tentativa também resultou em uma rede viável, e com isso a ERB 18 foi substituída pela ERB 13 (em cinza). O processo continua até que sejam executadas 200 tentativas. É importante ressaltar que, no exemplo, a quantidade de ERBs ativas aumentou em uma unidade, conseqüentemente o vetor solução será atualizado.

5	7	14	26	18	1	...	24	18	3
5	4	14	26	18	1	...	24	18	3
5	7	14	26	18	1	...	36	18	3
5	7	14	26	13	1	...	36	18	3
⋮									
5	7	14	26	13	1	...	36	18	3

Figura 4.22: Ilustração da Aplicação do Procedimento de Perturbação - ILSPERT2

De forma a dar uma maior variabilidade à solução perturbada, os passos 1 e 2 são aplicados 10 vezes, sendo considerada na vez seguinte, para a nova perturbação, a solução perturbada na vez anterior. Ao final das 10 perturbações, seleciona-se a última solução perturbada que tenha mais uma ou menos uma ERB em relação à solução inicial (antes da perturbação).

4.2.3 Algoritmo Genético (AG)

Geração da População - Inicialmente, para representar cada cromossomo (solução viável), optou-se pela utilização de um vetor com $|I|$ posições, sendo cada posição correspondente a um centro de demanda. Em seguida, atribuiu-se, a cada posição desse vetor, um valor aleatório entre 1 e $|J|$ (número de ERBs disponíveis para instalação). Considerando a definição do vetor solução, são gerados m vetores (cromossomos) de forma a definir uma população inicial. Essa população corresponde a um pequeno conjunto de soluções viáveis pertencentes ao espaço de solução do problema. É importante ressaltar que todas as soluções geradas satisfazem as restrições do problema ((3.6), (3.7) e (3.8)).

Reprodução - Para gerar uma nova população é aplicado o método do torneio. Ou seja, são selecionados t cromossomos da população atual, avaliando-se, entre estes, qual é o cromossomo que possui a menor quan-

tidade de ERBs cobrindo os CDs (melhor cromossomo). Tal cromossomo é adicionado na nova população. Assim, de forma a obter uma nova população, tal procedimento deve ser aplicado m vezes.

É importante ressaltar que também adotou-se uma estratégia de elitismo durante a reprodução. Dessa forma, caso o melhor cromossomo da população atual não esteja na nova população, seleciona-se aleatoriamente um valor entre 1 e m (posição do cromossomo) e substitui-se o cromossomo nessa posição pelo melhor cromossomo.

Cruzamento Uma vez definida uma probabilidade de cruzamento p_{cr} diferente de zero, sorteia-se um valor real r pertencente ao intervalo $(0,1)$. Caso $r < p_{cr}$, são selecionados aleatoriamente dois cromossomos C_i e C_j da população. Estes cromossomos selecionados podem ser alterados mediante a aplicação do cruzamento de dois pontos ou do cruzamento uniforme. Após cada cruzamento verifica-se se as restrições (3.6), (3.7) e (3.8) são satisfeitas, caso contrário repete-se o cruzamento, ou seja, novos pontos de corte são determinados, no caso de cruzamento de dois pontos e uma nova máscara é gerada no caso de cruzamento uniforme.

1. (Cruzamento de dois pontos): São gerados aleatoriamente dois valores p_i e p_f entre 1 e I . Tais valores, estão respectivamente associados à posição inicial e à posição final dos cromossomos C_i e C_j . Ou seja, nesse intervalo, as ERBs do primeiro cromossomo passarão para o segundo e vice-versa. Na figura abaixo temos uma ilustração desse tipo cruzamento.

C_i (antes)	1	2	3	1	2	1	1	3	1	2	C_i (depois)	1	2	3	2	3	2	3	3	1	2
C_j (antes)	1	1	3	2	3	2	3	1	2	1	C_j (depois)	1	1	3	1	2	1	1	1	2	1

Figura 4.23: Ilustração do Cruzamento de Dois Pontos

2. (Cruzamento Uniforme): Para cada CD, ou seja, cada posição do cromossomo, gera-se um número entre 0 e 1. Se for gerado o valor maior ou igual 0.5 a máscara receberá valor um, então, entre os dois cromossomos selecionados C_i e C_j , a ERB do primeiro cromossomo passará para o segundo e vice-versa. Caso seja gerado um valor menor que 0.5 a máscara receberá valor zero, sendo assim os CDs permanecem alocados as suas respectivas ERBs. A figura abaixo ilustra o cruzamento uniforme, considerando $|I| = 10$.

C_i (antes)	1	2	3	1	2	1	1	3	1	2	C_i (depois)	1	1	3	1	2	1	1	1	2	1
C_j (antes)	1	1	3	2	3	2	3	1	2	1	C_j (depois)	1	2	3	2	3	2	3	3	1	2
Máscara	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1											

Figura 4.24: Ilustração do Cruzamento Uniforme

Os cruzamentos foram utilizados separadamente. Ou seja, para as instâncias testadas, primeiramente o algoritmo foi executado com o cruzamento de dois pontos e depois com o cruzamento uniforme.

Mutação

Define-se uma probabilidade de mutação p_{mt} . Em seguida, fazendo o produto $t_c = |I| * m * p_{mt}$, obtém-se o total de genes a serem alterados na população.

Após esse cálculo, são sorteados t_c valores no intervalo entre 1 e $|I| * m$. Para cada valor selecionado, aplica-se a equação a seguir, de forma a determinar qual cromossomo e qual gen (CD) será alterado:

A equação

$$(Valor_sorteado - 1)/|I| = quociente + resto \quad (4.1)$$

O cromossomo a ser selecionado é então obtido por $quociente + 1$ e o gen é dado por $resto + 1$ da divisão (4.1). Nesta equação, o valor sorteado varia de 1 até a quantidade total de genes na população. Sendo assim, os valores sorteados (e subtraídos de uma unidade), quando divididos pelo tamanho do cromossomo e acrescidos de uma unidade, abrangem toda a população de cromossomos. Conseqüentemente, o resto acrescido de uma unidade nos fornece o gen do cromossomo selecionado. Deve-se ressaltar que o gen só será atualizado se a nova ERB for viável, ou seja, se a nova ERB cobrir o CD representado pelo gen selecionado.

Diversificação

A cada g iterações do algoritmo genético, são gerados aleatoriamente l cromossomos que irão substituir os l piores cromossomos (com mais ERBs ativas) da solução corrente.

Ao final de cada iteração do algoritmo, ou seja, após a aplicação dos procedimentos de reprodução, cruzamento, mutação, elitismo e de diversificação, 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 . A forma de calcular a potência de transmissão é análoga àquela dos passos 6 e 7 da fase de construção do GRASP, sendo aplicada em cada um dos cromossomos que compõem a população.

Após o cálculo das potências e a totalização do número de ERBs ativas em cada solução, é possível definir qual é a melhor solução da população corrente. Caso tal solução seja melhor do que melhor solução obtida até a geração anterior, atualiza-se essa solução.

Capítulo 5

Resultados Computacionais

O presente capítulo contém os resultados computacionais obtidos a partir da aplicação dos algoritmos (descritos no capítulo quatro) e da formulação de Franqueira [14] (capítulo três) em um conjunto de instâncias geradas artificialmente. Tal formulação sofreu uma pequena alteração, qual seja, a inclusão de uma restrição associada com a alocação de potência. Essa restrição garante que uma potência p_{ij} só assumirá um valor diferente de zero se esta for alocada a um CD i , coberto por uma ERB j ativa.

Inicialmente, faz-se uma descrição do programa gerador de instâncias e dos parâmetros utilizados para sua execução. A utilização do gerador foi necessária, uma vez que as companhias de celular normalmente não disponibilizam os dados de suas redes por questões de segurança.

Complementando o capítulo, são apresentadas tabelas com resultados da formulação obtidos com o pacote de otimização LINGO e os algoritmos, seguidas de análises do desempenho dos algoritmos no que diz respeito aos valores das soluções e aos seus tempos de processamento.

Os algoritmos propostos foram desenvolvidos em linguagem C e a formulação foi implementada utilizando o pacote de otimização LINGO (versão 7). Sendo que todos os experimentos computacionais foram realizados em uma máquina dotada de um processador Pentium Core 2 Duo de 1.73 GHz, com 2 GB de memória RAM e sistema operacional Windows XP.

5.1 Geração dos Dados

Cada instância gerada para a realização dos experimentos computacionais desse trabalho corresponde a uma área retangular (área de interesse). Tal área de interesse é formada por um conjunto de quadrados onde é simulada uma distribuição de $|I|$ CDs e $|J|$ locais candidatos à instalação das ERBs. Por questões de simplificação, todos os CDs têm o mesmo comprimento e a mesma largura (utilizamos $C = 0,1$ Km e $L = 0,1$ Km).

Em cada CD o vértice superior esquerdo de cada quadrado fornece sua posição, isto é, o par ordenado (x,y) do canto superior esquerdo. Os locais candidatos à instalação das ERBs são pontos dentro da área de interesse e os vértices inferiores direitos (par ordenado (x,y)) dos CDs determinam suas posições. Maiores detalhes sobre a geração de dados podem ser obtidos nos trabalhos de Franqueira [14] e Santos [52]. A figura 5.1 ilustra uma região de interesse, considerando vinte CDs e três locais candidatos à instalação de ERBs.

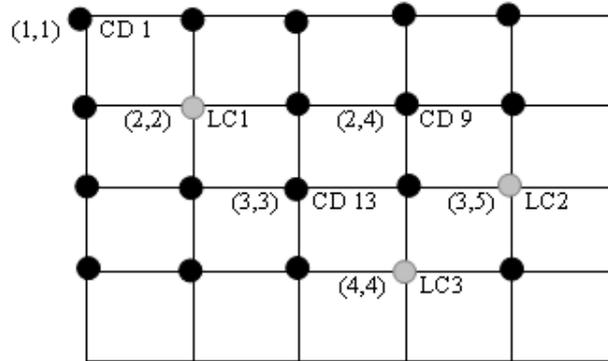


Figura 5.1: Ilustração de um Conjunto de CDs e Locais Candidatos à Instalação das ERBs

Observe que:

- o CD 1 ocupa a posição (1,1) e possui um local candidato (LC1) à instalação de uma ERB na posição (2,2);
- o CD 9 ocupa a posição (2,4) e possui um local candidato (LC2) à instalação de uma ERB na posição (3,5);
- o CD 13 ocupa a posição (3,3) e possui um local candidato (LC3) à instalação de uma ERB na posição (4,4).

Além da definição dos CDs e dos locais candidatos à instalação das ERBs, o gerador fornece os ganhos de propagação de sinal g_{ij} , isto é, define a intensidade do campo eletromagnético entre uma ERB j e um centro de demanda i . Esses ganhos foram calculados a partir da aplicação do modelo de Okumura-Hata (também implementado no gerador). Primeiramente, Okumura [45] realizou em Tóquio medidas para frequências de até 1.920 MHz e posteriormente Hata [28] ajustou estas medidas em um modelo matemático, com equações válidas para frequências no intervalo de 150 a 1.000 MHz. Este

modelo foi adaptado pela COST-231 [12], para um modelo aplicável a redes celulares de terceira geração, ou seja, válido em frequências de 1,5 a 2,0 GHz.

A fórmula de COST-Hata [12] que fornece a perda do sinal é representada pela equação abaixo:

$$A_{ij} = 46,3 + 33,9 \log F - 13,82 \log H_b - C(H_m) + (44,9 - 6,55 \log H_b) \log w_{ij} + k \quad (5.1)$$

Nessa equação, temos a perda por atenuação A_{ij} em *db*. Onde k é um parâmetro, F é a frequência do sinal em MHz, H_b e H_m são, respectivamente, as alturas das antenas da ERB e das unidades móveis, ambas em metros. $C(H_m)$ é a função de ganho da antena da unidade móvel em db e w_{ij} é a distância entre o CD i e a ERB j em quilômetros.

A função $C(H_m)$ é definida pela equação:

$$C(H_m) = (1,1 \log F - 0,7)H_m - (1,56 \log F - 0,8) \quad (5.2)$$

e k pode assumir valores iguais a zero ou 3 dB. O valor de k será igual a 0 quando a área de interesse é urbana ou é formada por cidades de porte médio. E no caso de centros metropolitanos, k assume valor 3.

Finalmente, o ganho de propagação é definido por:

$$g_{ij} = \frac{1}{10^{\frac{A_{ij}}{10}}} \quad (5.3)$$

Seguindo as configurações propostas em Amaldi *et al* [5], foram adotados os seguintes valores para esses parâmetros:

$$k = 0, \quad H_b = 10\text{m}, \quad H_m = 1,0\text{m}, \quad F = 2,0\text{GHz}$$

Esse modelo de propagação foi utilizado de forma a possibilitar a geração de instâncias artificiais que foram utilizadas na formulação e nos algoritmos.

No que concerne aos parâmetros da formulação, atribuiu-se 1,0 ao custo de instalação das ERBs (f_i) e $-130 \text{ db} = 10E - 13 W$ ao ruído térmico η_j percebido em cada uma das antenas para cada local candidato $j \in J$. Será assumido que cada CD solicita apenas um serviço, ou seja, $|S_i = 1| \forall i \in I$ e que cada CD i representa a demanda por uma única conexão, isto é, $a_i^s = 1$. A potência máxima (P_{max}) de transmissão foi fixada em $30\text{db} = 1W$ e o fator λ , correspondente ao parâmetro utilizado na ponderação do custo de instalação das ERBs e da soma das potências de transmissão das unidades móveis, foi fixado em 1. Sendo assim, λ privilegia a minimização do custo de instalação das ERBs. Esses valores fixados foram empregados em outros trabalhos da literatura, como por exemplo em [6], [14], [52].

5.2 Resultados dos Algoritmos para Instâncias com um Único Serviço

Nesta seção, temos a apresentação e a análise dos resultados computacionais obtidos a partir da aplicação dos algoritmos propostos para a resolução do Problema de Planejamento de Redes 3G.

Para instâncias com um único serviço utilizou-se o valor do

$SIR_{Alvo} = 0,03125$, que corresponde ao valor utilizado em Amaldi *et al* [5].

Cada um dos algoritmos GRASP foi executado 100 vezes, considerando o número de filtros igual 20 e o valor do parâmetro φ (associado com a LCR) igual a 0,5.

No caso dos algoritmos ILS, o número de iterações foi fixado em 5000 e foram construídas 100 soluções iniciais pelo procedimento de geração. Sendo escolhida, dentre essas, a melhor solução para a aplicação do procedimento de busca local.

Para a execução do AG, o número de gerações foi fixado em 5000, o tamanho da população foi de 100 e os percentuais de cruzamento e mutação foram de respectivamente 50% e 5%. A diversificação foi aplicada na população a cada 50 gerações do algoritmo. Sendo assim, são selecionados os 20% piores cromossomos da população, que são substituídos por cromossomos obtidos pelo procedimento de geração da população.

Todos os parâmetros utilizados nos algoritmos GRASP, ILS e Genéticos foram ajustados, e conseqüentemente fixados, a partir de experimentos realizados em um subconjunto de instâncias com um serviço e com múltiplos serviços.

5.2.1 Análise das Soluções

A tabela 5.1 contém os resultados da formulação obtidos pelo LINGO e pelos algoritmos, para um conjunto de 60 instâncias, considerando apenas um tipo de serviço. Para a execução da formulação através do LINGO foi fixado o

tempo máximo de processamento de 12 horas. Os valores em vermelho nessa tabela indicam que a formulação produziu apenas um ótimo local no período de 12h. Os valores sublinhados indicam os menores tempos de processamento consumidos para a resolução de cada uma das instâncias.

A coluna 1 dessa tabela tem a identificação de cada instância (com o número de CDs e ERBs). A coluna dois têm o valor da melhor solução (sol_{melhor}) encontrada pelo LINGO e pelos oito algoritmos. Os resultados da formulação obtidos pelo LINGO e pelos algoritmos GRASP (GRBLS, GRVNS1, GRVNS2, GRVNS3), ILS (ILSPERT1 e ILSPERT2) e Genéticos (AG1 e AG2) são apresentados respectivamente pelas colunas duplas (3,4), (5,6), (7,8) até (19,20). Cada dupla mostra o *Gap* e o tempo T de processamento (em segundos). Para o cálculo do gap foi utilizada a seguinte equação:

$$100 * |sol_{algoritmo\ ou\ LINGO} - sol_{melhor}| / sol_{melhor} \quad (5.4)$$

O *Gap* é uma medida de desempenho que indica o quanto uma solução viável qualquer está distante da melhor solução encontrada por um dos algoritmos ou pela formulação.

Tabela 5.1: Resultados da Formulação obtidos pelo LINGO e pelos Algoritmos, utilizando um único serviço

Instâncias	Sol _{met} hor	LINGO		GRBLS		GRVNS1		GRVNS2		GRVNS3		ILSPERT1		ILSPERT2		AG1		AG2	
		Gap	T	Gap	T	Gap	T	Gap	T	Gap	T	Gap	T	Gap	T	Gap	T	Gap	T
CD 50 ERB 10	18,229	0,00%	0	0,00%	1	0,00%	1	0,00%	0	0,00%	1	0,00%	2	0,00%	0	0,00%	0	0,00%	2
CD 50 ERB 20	17,229	0,00%	2	0,00%	0	0,00%	2	0,00%	0	0,00%	1	0,00%	2	0,00%	7	0,00%	7	0,00%	1
CD 50 ERB 30	17,229	0,00%	5	0,00%	1	0,00%	2	0,00%	1	0,00%	1	0,00%	2	0,00%	8	0,00%	8	11,61%	6
CD 70 ERB 30	22,721	0,00%	8	4,40%	1	0,00%	2	0,00%	2	0,00%	2	0,00%	4	0,00%	6	0,00%	6	0,00%	6
CD 70 ERB 40	22,721	0,00%	1549	0,00%	3	0,00%	8	0,00%	3	0,00%	2	0,00%	4	0,00%	12	0,00%	12	13,20%	8
CD 80 ERB 30	25,967	0,00%	12	0,00%	2	0,00%	5	0,00%	2	0,00%	1	0,00%	3	0,00%	6	0,00%	6	7,70%	7
CD 80 ERB 40	22,967	0,00%	864	0,00%	2	0,00%	2	0,00%	1	0,00%	1	0,00%	4	0,00%	6	0,00%	6	17,42%	9
CD 90 ERB 10	26,213	0,00%	2	0,00%	1	0,00%	1	0,00%	1	0,00%	1	0,00%	4	0,00%	5	0,00%	5	0,00%	7
CD 90 ERB 20	28,213	0,00%	6	0,00%	1	0,00%	2	0,00%	1	0,00%	1	0,00%	6	0,00%	6	0,00%	6	7,09%	8
CD 90 ERB 30	26,213	0,00%	17	0,00%	1	0,00%	4	0,00%	1	0,00%	2	0,00%	4	0,00%	7	0,00%	7	15,26%	8
CD 90 ERB 40	28,213	0,00%	6	3,54%	3	0,00%	167	0,00%	2	0,00%	3	3,54%	7	7,09%	8	10,63%	8	3,54%	17
CD 90 ERB 50	27,213	0,00%	5195	0,00%	4	3,67%	11	0,00%	4	0,00%	4	3,67%	15	3,67%	8	14,70%	8	18,37%	11
CD 100 ERB 10	28,459	0,00%	2	0,00%	1	0,00%	2	0,00%	1	0,00%	1	0,00%	3	0,00%	5	0,00%	5	0,00%	7
CD 100 ERB 20	30,459	0,00%	7	0,00%	2	0,00%	5	0,00%	3	0,00%	2	0,00%	7	0,00%	6	0,00%	6	3,28%	9
CD 100 ERB 30	30,459	0,00%	19	0,00%	1	0,00%	4	0,00%	2	0,00%	2	0,00%	4	3,28%	7	6,57%	7	6,57%	10
CD 100 ERB 40	30,459	0,00%	60	0,00%	3	0,00%	9	0,00%	3	0,00%	3	0,00%	4	3,28%	9	9,85%	9	13,13%	11
CD 100 ERB 50	29,459	3,39%	43200	0,00%	3	0,00%	1	0,00%	3	0,00%	4	0,00%	5	3,39%	10	20,37%	10	20,37%	12
CD 110 ERB 20	31,705	0,00%	16	0,00%	0	0,00%	2	0,00%	1	0,00%	1	0,00%	4	3,15%	7	15,77%	7	9,46%	9
CD 110 ERB 30	32,705	0,00%	2131	0,00%	2	0,00%	7	0,00%	2	0,00%	2	0,00%	6	3,06%	8	15,29%	8	12,23%	10
CD 110 ERB 40	31,705	0,00%	1322	0,00%	2	3,15%	15	0,00%	3	0,00%	2	3,15%	10	3,15%	9	15,77%	9	22,08%	12
CD 120 ERB 20	34,951	0,00%	6	0,00%	2	0,00%	4	0,00%	2	0,00%	2	0,00%	6	0,00%	8	11,44%	8	11,44%	10

Tabela 5.1

Instâncias	Sol_methor	LINGO		GRBLS		GRVNS1		GRVNS2		GRVNS3		ILSPERT1		ILSPERT2		AG1		AG2	
		Gap	T	Gap	T	Gap	T	Gap	T	Gap	T	Gap	T	Gap	T	Gap	T	Gap	T
CD 120 ERB 30	33,951	0,00%	268	2,95%	2	0,00%	4	2,95%	2	2,95%	3	0,00%	8	2,95%	9	20,62%	9	20,62%	12
CD 120 ERB 40	33,951	0,00%	11216	0,00%	2	0,00%	6	0,00%	3	0,00%	4	0,00%	10	5,89%	11	20,62%	11	20,62%	13
CD 140 ERB 20	40,443	0,00%	17	0,00%	1	0,00%	2	0,00%	2	0,00%	2	0,00%	11	2,47%	10	14,84%	10	14,84%	12
CD 140 ERB 30	40,443	0,00%	100	0,00%	3	0,00%	18	0,00%	4	0,00%	3	0,00%	9	0,00%	12	24,73%	12	24,73%	14
CD 140 ERB 40	40,443	4,96%	43200	0,00%	3	0,00%	17	0,00%	4	0,00%	4	0,00%	17	2,47%	13	24,73%	13	24,73%	16
CD 140 ERB 50	40,443	2,47%	43200	0,00%	5	0,00%	16	0,00%	4	0,00%	4	0,00%	14	2,47%	14	32,14%	14	32,14%	17
CD 150 ERB 20	44,689	0,00%	15	0,00%	7	0,00%	17	0,00%	9	0,00%	8	0,00%	10	2,24%	10	11,19%	10	11,19%	13
CD 150 ERB 30	47,689	0,00%	34	0,00%	12	0,00%	85	0,00%	15	0,00%	12	0,00%	9	0,00%	13	16,78%	13	16,78%	16
CD 150 ERB 40	44,689	0,00%	83	0,00%	5	0,00%	25	0,00%	6	0,00%	6	0,00%	11	2,24%	15	29,09%	15	29,09%	18
CD 150 ERB 50	41,689	0,00%	43200	0,00%	4	0,00%	9	0,00%	4	0,00%	4	0,00%	14	4,80%	17	43,18%	17	43,18%	21
CD 160 ERB 20	46,935	0,00%	18	0,00%	7	0,00%	16	0,00%	8	0,00%	8	0,00%	14	0,00%	11	10,65%	11	10,65%	14
CD 160 ERB 30	46,935	0,00%	63	0,00%	3	0,00%	15	0,00%	4	0,00%	4	0,00%	10	0,00%	14	23,44%	14	23,44%	17
CD 160 ERB 40	46,935	0,00%	7239	0,00%	5	0,00%	112	0,00%	6	0,00%	6	0,00%	11	2,13%	16	31,96%	16	31,96%	19
CD 160 ERB 50	45,935	2,18%	43200	0,00%	5	0,00%	12	2,18%	6	0,00%	5	0,00%	19	2,18%	19	45,72%	19	45,72%	22
CD 170 ERB 20	48,181	0,00%	31	2,08%	3	0,00%	49	0,00%	4	2,08%	3	0,00%	15	2,08%	12	14,53%	12	14,53%	16
CD 170 ERB 30	48,181	0,00%	304	2,08%	3	0,00%	14	0,00%	4	2,08%	6	0,00%	20	2,08%	15	29,06%	15	29,06%	18
CD 170 ERB 40	48,181	2,12%	43200	2,12%	4	0,00%	13	2,12%	5	2,12%	4	2,12%	20	2,24%	18	40,27%	18	40,27%	22
CD 170 ERB 50	49,181	2,07%	43200	2,07%	5	0,00%	69	2,07%	2	2,07%	3	2,07%	25	2,07%	20	45,66%	20	45,66%	24
CD 180 ERB 20	50,427	0,00%	39	0,00%	6	0,00%	15	0,00%	8	0,00%	7	0,00%	15	0,00%	13	15,86%	13	15,86%	17
CD 180 ERB 30	51,427	0,00%	51	0,00%	3	0,00%	27	0,00%	5	0,00%	5	0,00%	21	0,00%	15	23,33%	15	23,33%	19
CD 180 ERB 40	50,427	2,02%	43200	2,02%	4	0,00%	12	0,00%	4	0,00%	3	0,00%	25	6,07%	20	48,56%	20	48,56%	24
CD 180 ERB 50	51,427	0,00%	43200	0,00%	6	0,00%	41	0,00%	6	0,00%	5	0,00%	24	3,89%	21	42,78%	21	42,78%	27
CD 190 ERB 20	52,673	0,00%	32	3,80%	11	1,86%	2	0,00%	3	3,80%	11	0,00%	16	0,00%	13	17,09%	13	17,09%	17
CD 190 ERB 30	52,673	0,00%	222	0,00%	3	0,00%	12	0,00%	4	0,00%	5	0,00%	22	5,70%	16	26,58%	16	26,58%	21

Tabela 5.1

Instâncias	Soluções	LINGO		GRBLS		GRVNS1		GRVNS2		GRVNS3		ILSPERT1		ILSPERT2		AG1		AG2	
		Gap	T	Gap	T	Gap	T	Gap	T	Gap	T	Gap	T	Gap	T	Gap	T	Gap	T
CD 190 ERB 40	54,673	0,00%	43200	3,80%	5	0,00%	239	1,90%	6	3,80%	4	0,00%	34	3,80%	21	41,77%	21	43,67%	25
CD 190 ERB 50	53,673	1,90%	43200	1,90%	6	0,00%	64	1,90%	6	1,90%	5	1,90%	34	1,90%	23	47,46%	23	45,56%	28
CD 200 ERB 20	58,919	0,00%	25	0,00%	19	0,00%	29	0,00%	21	0,00%	20	0,00%	18	0,00%	13	1,70%	13	1,70%	17
CD 200 ERB 30	53,919	0,00%	71	0,00%	8	0,00%	33	0,00%	11	0,00%	9	0,00%	19	0,00%	16	24,11%	16	18,55%	19
CD 200 ERB 40	60,919	0,00%	106	0,00%	26	0,00%	363	0,00%	32	0,00%	27	0,00%	21	0,00%	20	21,34%	20	22,98%	25
CD 200 ERB 50	57,919	1,73%	43200	0,00%	8	0,00%	107	0,00%	9	0,00%	9	0,00%	32	1,73%	26	43,16%	26	46,62%	31
CD 200 ERB 60	60,919	0,00%	394	0,00%	14	0,00%	198	0,00%	16	0,00%	12	0,00%	45	1,64%	29	44,32%	29	32,83%	31
CD 200 ERB 70	57,919	0,00%	383	0,00%	16	0,00%	75	0,00%	18	0,00%	16	1,73%	38	3,45%	30	51,80%	30	51,80%	36
CD 220 ERB 30	53,919	0,00%	71	0,00%	8	0,00%	33	0,00%	10	0,00%	8	15,75%	84	19,46%	20	41,71%	20	41,71%	24
CD 220 ERB 40	59,411	0,00%	43200	0,00%	4	0,00%	19	0,00%	7	0,00%	4	0,00%	30	3,37%	23	37,03%	23	37,03%	29
CD 220 ERB 50	62,411	0,00%	43200	0,00%	7	0,00%	121	0,00%	8	0,00%	9	0,00%	45	4,81%	28	43,26%	28	43,26%	32
CD 220 ERB 60	61,411	8,42%	43200	3,37%	8	0,00%	1581	3,37%	8	3,37%	9	0,00%	44	8,42%	33	60,59%	33	62,28%	38
CD 250 ERB 40	75,149	0,00%	158	0,00%	22	0,00%	489	0,00%	27	0,00%	22	0,00%	61	0,00%	27	21,29%	27	21,29%	33
CD 250 ERB 50	78,149	0,00%	256	0,00%	74	0,00%	2041	0,00%	87	0,00%	74	0,00%	54	0,00%	33	25,59%	33	23,03%	38
CD 250 ERB 60	73,149	0,00%	358	0,00%	16	0,00%	341	0,00%	21	0,00%	18	1,37%	57	0,00%	75	39,65%	75	42,38%	43

Observando os resultados obtidos para as 60 instâncias utilizadas nesse trabalho (tabela 5.1), temos que o LINGO 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 do LINGO;

Ainda considerando as 60 instâncias, o algoritmo GRVNS1 produziu as melhores soluções em 95% das instâncias, quando comparado com os resultados do LINGO e com os demais algoritmos. Em contrapartida, o algoritmo AG2 foi o que produziu as piores soluções com percentual de 7%.

A partir da análise dessa tabela, pode-se montar uma tabela resumo onde são apresentados os percentuais de soluções ótimas dos algoritmos em relação ao total de soluções ótimas produzidas pelo LINGO. E nas colunas seguintes, temos os percentuais de soluções melhores, iguais e piores de cada um dos algoritmos em relação ao total de soluções viáveis produzidas pelo LINGO.

Algoritmo	Soluções	Soluções Viáveis		
	Ótimas	Melhores	Iguais	Piores
GRBLS	80%	40%	53%	7%
GRVNS1	93%	73%	27%	0%
GRVNS2	96%	40%	53%	7%
GRVNS3	89%	47%	47%	7%
ILSPERT1	87%	40%	53%	7%
ILSPERT2	47%	7%	40%	53%
AG1	11%	0%	0%	100%
AG2	9%	0%	0%	100%

Tabela 5.2: Percentuais de Soluções Ótimas e Soluções Viáveis

Observando essa tabela, os algoritmos GRVNS1 e GRVNS2 foram os que apresentaram as melhores performances, produzindo a solução ótima em respectivamente 93% e 96% das instâncias para as quais o LINGO encontrou o ótimo global. Ainda considerando as soluções ótimas, os algoritmos AG1 e

AG2 tiveram as piores performance com percentuais de 11% e 9% de soluções ótimas.

No caso das soluções viáveis, o algoritmo GRVNS1 foi o que apresentou o maior percentual (73%) de soluções viáveis melhores que as soluções viáveis do LINGO. Além disso, os algoritmos GRVNS2 e ILSPERT1 tiveram performances iguais (com percentual de 53%) no caso de soluções viáveis iguais as soluções produzidas pelo LINGO.

Finalmente, no caso de soluções viáveis piores do que as soluções viáveis produzidas pelo LINGO, os algoritmos ILS2, AG1 e AG2 foram os que tiveram as piores performances, com percentuais de respectivamente 53%, 100% e 100%.

Dos oito algoritmos implementados, o único que não produziu soluções viáveis piores do que as soluções do LINGO foi o GRVNS1.

Uma possível explicação para a baixa performance dos algoritmos AG1 e AG2, no que concerne aos valores soluções, está associada a utilização de operadores tradicionais (de cruzamento e de mutação). Os demais algoritmos incorporam procedimentos de busca local e perturbação mais sofisticados, o que tende a produzir soluções de qualidade superior as soluções do AG1 e do AG2. Futuramente, pode-se tentar melhorar as soluções obtidas utilizando procedimentos de cruzamento e mutação modificados. Pode-se, por exemplo, combinar o cruzamento com procedimentos de busca local (BL) e combinar a mutação com novas perturbações.

Finalmente, na tabela 5.3, temos um resumo dos tempos de processamento. Mais especificamente, são apresentados o tempo mínimo, o tempo

que corresponde ao 1º quartil (25% das instâncias com tempos ordenados), o tempo médio, o tempo mediano, o tempo que corresponde ao 3º quartil (75% das instâncias com os tempos ordenados) e o tempo máximo.

LINGO / Algoritmos	Tempos					
	Mínimo	Q1	Mediano	Média	Q3	Máximo
LINGO	0	17,75	132	11346,38	19212	43200
GRBLS	0	2	3,5	6,48	7	74
GRVNS1	1	4	15	109,95	52,75	2041
GRVNS2	0	2	4	7,45	8	87
GRVNS3	1	2	4	6,83	8	74
ILSPERT1	2	6	14	18,2	22,5	84
ILSPERT2	0	8	13	15,2	20	75
AG1	0	8	13	15,2	20	75
AG2	1	10	17	17,63	24	43

Tabela 5.3: Tempos dos Algoritmos - Um único serviço

A partir da análise dessa tabela, podemos fazer algumas considerações, quais sejam:

Os algoritmos GRBLS, GVNS2 e GRVNS 3 apresentaram tempos de processamento médio e mediano bem similares. Esse tempos foram inferiores aos dos demais algoritmos.

Os algoritmos GRBLS, GVNS2 e GRVNS 3 consumiram um tempo máximo de 8 segundos para resolver 75% das instâncias (Q3). No caso dos algoritmos ILS e Genéticos, tal tempo ficou entre 20 e 24 segundos.

O algoritmo GRVNS1 apresenta um tempo médio superior aos dos demais (quase da ordem de um minuto). Tal fato é possivelmente decorrente do tipo de procedimento de busca local implementado.

Um fato naturalmente esperado foi de que os tempos de processamento médio e mediano, associados ao 3º quartil do LINGO, foram bem superiores aos tempos correspondentes dos oito algoritmos.

5.3 Resultados dos Algoritmos para Instâncias com Múltiplos Serviços

Nessa seção, temos a apresentação e a análise dos resultados computacionais obtidos a partir da aplicação dos algoritmos propostos em instâncias que têm quatro tipos de serviços com taxas de transmissão e requisitos de qualidade diferenciados. Sendo assim, tem-se como considerar, no planejamento da rede celular, o impacto da demanda por esses serviços.

O valor do SIR_{alvo} que será utilizado nas restrições de qualidade do sinal, é apresentado na tabela 5.4. Esses valores foram utilizados em [14] e [52].

Serviço	SIR_{alvo}
Voz	0,006195
Dados 1	0,020982
Dados 2	0,041113
Dados 3	0,114815

Tabela 5.4: Valor do SIR_{alvo} para o enlace reverso

A determinação da demanda para cada um dos serviços foi feita através de uma distribuição percentual da demanda entre os serviços. Ou seja, o serviço de voz recebeu 50% da demanda, os demais serviços receberam 30% (Dados 1), 15% (Dados 2) e, 5% (Dados 3). Totalizando assim 100% da demanda. Esses valores também foram utilizados em [14], [52] e [9].

Os valores dos parâmetros utilizados nos algoritmos foram idênticos aos utilizados para instâncias com um único serviço.

5.3.1 Análise das Soluções

A tabela 5.5 contém os resultados da aplicação do pacote de otimização LINGO e dos algoritmos para um conjunto de 28 instâncias, considerando 4

tipos de serviços. Para a execução do LINGO, do mesmo modo que em um único serviço, o tempo máximo de processamento foi fixado em 12 horas. Os asteriscos indicam que o LINGO não produziu nem ao menos uma solução viável. Os valores sublinhados indicam os menores tempos de processamento consumidos para a resolução de cada uma das instâncias.

A tabela 5.5 tem o mesmo formato da tabela utilizada em um único serviço. Ou seja, a coluna 1 dessa tabela tem a identificação de cada instância (com o número de CDs, ERBs e tipos de serviços). A coluna dois têm o valor da melhor resolução (sol_{melhor}) encontrada considerando os resultados obtidos com LINGO e com os oito algoritmos. Os resultados do LINGO e dos algoritmos GRASP (GRBLS, GRVNS1, GRVNS2, GRVNS3), ILS (ILSPERT1 e ILSPERT2) e Genéticos (AG1 e AG2) são apresentados respectivamente pelas colunas duplas (3,4), (5,6), (7,8) até (19,20). Cada dupla mostra o *Gap* e o tempo T de processamento (em segundos).

Tabela 5.5: Resultados obtidos pelo LINGO e pelos Algoritmos, utilizando múltiplos serviços

Instâncias	<i>Sol.methor</i>	LINGO		GRBLS		GRVNS1		GRVNS2		GRVNS3		ILSPERT1		ILSPERT2		AG1		AG2	
		Gap	T	Gap	T	Gap	T	Gap	T	Gap	T	Gap	T	Gap	T	Gap	T	Gap	T
CD 30 ERB 10 S 4	9,857	0,00%	4	0,000%	1	0,00%	1	0,000%	1	0,000%	2	0,000%	6	10,145%	26	0,000%	2	0,000%	2
CD 40 ERB 20 S 4	9,123	0,00%	61	0,000%	1	0,00%	1	0,000%	0	0,000%	1	0,000%	3	0,000%	42	43,845%	3	32,884%	3
CD 50 ERB 10 S 4	11,919	0,00%	11	0,000%	1	0,00%	2	0,000%	2	0,000%	2	0,000%	4	0,000%	37	0,000%	2	8,390%	4
CD 50 ERB 20 S 4	11,943	*	*	0,000%	2	0,00%	2	0,000%	1	0,000%	2	0,000%	5	8,173%	56	16,546%	5	16,546%	4
CD 50 ERB 30 S 4	11,932	*	*	0,000%	1	0,00%	2	0,000%	2	0,000%	2	0,000%	4	0,000%	65	41,798%	4	25,036%	5
CD 60 ERB 40 S 4	14,185	*	*	0,000%	3	0,00%	5	0,000%	2	0,000%	6	0,000%	6	7,050%	88	35,249%	6	35,249%	7
CD 70 ERB 30 S 4	15,980	*	*	0,000%	2	0,00%	3	0,000%	1	0,000%	2	0,000%	6	6,258%	82	18,773%	5	25,031%	6
CD 70 ERB 40 S 4	15,987	*	*	0,000%	2	0,00%	4	0,000%	2	0,000%	14	0,000%	6	6,211%	104	56,646%	10	56,646%	12
CD 70 ERB 50 S 4	17,981	*	*	0,000%	5	0,00%	7	0,000%	4	0,000%	9	0,000%	9	11,119%	230	22,242%	7	22,242%	9
CD 80 ERB 30 S 4	17,246	*	*	0,000%	1	0,00%	2	0,000%	1	0,000%	1	0,000%	6	5,798%	165	17,395%	6	23,194%	7
CD 80 ERB 50 S 4	19,284	*	*	4,987%	5	0,00%	6	0,000%	6	0,000%	5	0,000%	8	4,987%	243	20,544%	8	20,544%	10
CD 90 ERB 50 S 4	20,042	*	*	0,000%	4	0,00%	11	0,000%	4	0,000%	4	4,990%	8	9,979%	175	24,948%	8	24,948%	11
CD 100 ERB 20 S 4	24,308	*	*	0,000%	23	0,00%	32	0,000%	28	0,000%	24	0,000%	10	4,114%	213	4,114%	8	4,114%	9
CD 100 ERB 50 S 4	21,333	*	*	0,000%	4	0,00%	6	0,000%	6	0,000%	5	0,000%	7	4,568%	163	23,318%	10	28,005%	13
CD 110 ERB 50 S 4	25,104	*	*	0,000%	10	0,00%	16	0,000%	5	0,000%	8	0,000%	10	7,967%	123	27,884%	12	19,917%	13
CD 120 ERB 50 S 4	42,617	*	*	2,346%	21	0,00%	37	2,346%	36	2,346%	28	0,000%	16	9,386%	214	63,855%	42	53,969%	42
CD 130 ERB 50 S 4	66,925	*	*	0,000%	59	0,00%	333	0,000%	117	1,494%	240	0,000%	23	2,988%	243	37,355%	94	35,861%	99
CD 140 ERB 50 S 4	30,432	*	*	3,283%	13	0,00%	23	0,000%	13	0,000%	6	0,000%	12	9,855%	198	42,715%	18	55,859%	22
CD 150 ERB 50 S 4	31,227	*	*	0,000%	9	0,00%	15	0,000%	15	0,000%	16	0,000%	10	6,405%	210	60,845%	21	54,440%	24
CD 160 ERB 50 S 4	34,493	*	*	0,000%	12	0,00%	32	0,000%	16	0,000%	26	0,000%	12	5,798%	321	60,882%	27	60,882%	30
CD 170 ERB 50 S 4	36,289	*	*	0,000%	8	0,00%	15	0,000%	21	0,000%	18	2,756%	12	5,511%	339	63,380%	30	66,136%	34

Tabela 5.5

Instâncias	Sol.melhor	LINGO		GRBLS		GRVNS1		GRVNS2		GRVNS3		ILSPERT1		ILSPERT2		AG1		AG2	
		Gap	T	Gap	T	Gap	T	Gap	T	Gap	T	Gap	T	Gap	T	Gap	T	Gap	T
CD 180 ERB 50 S 4	37,555	*	*	2,663%	13	0,00%	25	2,663%	15	2,663%	10	5,326%	14	10,651%	213	63,906%	32	66,569%	37
CD 190 ERB 40 S 4	39,351	*	*	2,541%	15	0,00%	27	2,541%	11	2,541%	12	0,000%	13	7,624%	213	53,366%	31	55,907%	35
CD 190 ERB 50 S 4	39,371	*	*	2,488%	15	0,00%	34	2,488%	19	2,488%	10	2,488%	13	7,568%	341	65,986%	37	63,446%	40
CD 200 ERB 40 S 4	47,617	*	*	0,000%	349	0,00%	799	0,000%	405	0,000%	335	0,000%	17	0,000%	378	31,501%	33	27,301%	24
CD 200 ERB 50 S 4	39,619	*	*	0,000%	101	0,00%	320	0,000%	115	0,000%	103	0,000%	9	0,000%	300	60,573%	35	65,621%	42
CD 220 ERB 50 S 4	41,678	*	*	0,000%	17	0,00%	26	0,000%	12	0,000%	21	0,000%	10	4,799%	388	62,383%	40	64,782%	46
CD 250 ERB 50 S 4	47,536	*	*	0,000%	153	0,00%	386	0,000%	182	0,000%	158	0,000%	13	0,000%	347	67,317%	61	63,110%	63

Observando os resultados obtidos para as 28 instâncias com 4 serviços utilizadas nesse trabalho (tabela 5.5), temos que o LINGO atingiu o ótimo global em apenas 3 (10,7%) das 28 instâncias. Além disso, cinco dos oito algoritmos produziram o ótimo global para as mesmas instâncias, com dispêndio de tempo, menor do que o do LINGO.

Considerando as 28 instâncias, o algoritmo GRVNS1 produziu as melhores soluções em 100% das instâncias, quando comparado com os resultados do LINGO e com os demais algoritmos. Em contrapartida, o algoritmo AG2 foi o que produziu as piores soluções com percentual de 4%.

A partir da análise da tabela 5.5, montou-se uma tabela resumo, igual a tabela 5.2 apresentada na seção anterior. Sendo assim, na tabela 5.6 são apresentados os percentuais de soluções ótimas dos algoritmos em relação ao total de soluções ótimas produzidas pelo LINGO. E nas colunas seguintes, temos os percentuais de soluções iguais e piores de cada um dos algoritmos em relação ao GRVNS1, pois este foi o algoritmo que apresentou a melhor performance, ou seja, obteve uma solução melhor ou igual a dos demais algoritmos em 100% dos casos.

Algoritmo	Soluções Ótimas	Soluções dos Algoritmos Iguais	Soluções dos Algoritmos Piores
GRBLS	100%	76%	25%
GRVNS1	100%	*	*
GRVNS2	100%	84%	16%
GRVNS3	100%	80%	20%
ILSPERT1	100%	84%	16%
ILSPERT2	67%	16%	84%
AG1	67%	0%	100%
AG2	33%	0%	100%

Tabela 5.6: Percentuais de Soluções Ótimas e Soluções Viáveis

Observando essa tabela, os algoritmos GRVNS1, GRVNS2, GRVNS3, ILSPERT1 foram os que obtiveram a melhor performance, produzindo a resolução ótima em 100% das instâncias para as quais o LINGO encontrou o ótimo global. Ainda considerando as soluções ótimas, o algoritmo AG2 obteve a pior performance com percentual de 33%.

Para as instâncias em que o LINGO não produziu soluções viáveis, os algoritmos GRVNS2 e ILSPERT1 tiveram performances iguais (com percentual de 84%).

Por fim, no caso de soluções viáveis piores do que as soluções viáveis produzidas pelo algoritmo GRVNS1, os algoritmos ILS2, AG1 e AG2 foram os que tiveram as piores performances, com percentuais de respectivamente 84%, 100% e 100%.

No que concerne aos valores das soluções, a performance dos quatro algoritmos GRASP e do ILSPERT1 foi semelhante para instâncias de um serviço e para as instâncias de múltiplos serviços. Para uma melhor visualização, será apresentado nas figuras 5.2 e 5.3, o percentual de soluções ótimas obtidas por cada algoritmo GRASP e pelo ILSPERT1 em relação aos resultados obtidos pelo LINGO (um único serviço) e em relação ao algoritmo GRVNS1 (múltiplos serviços).

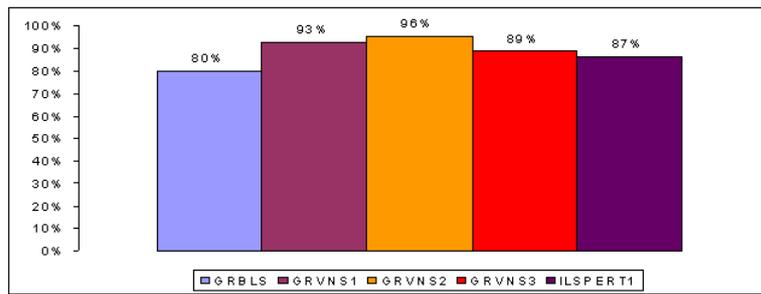


Figura 5.2: Análise Gráfica dos Resultados dos Algoritmos para Um Único Serviço

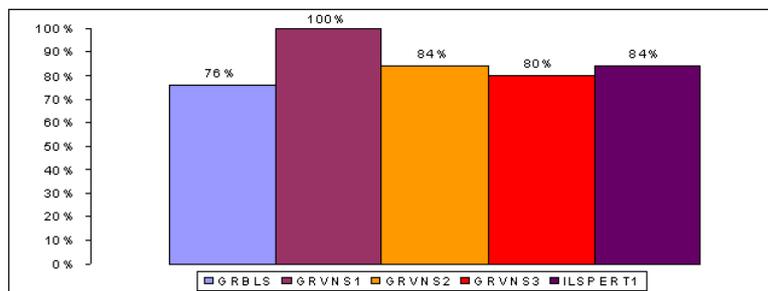


Figura 5.3: Análise Gráfica dos Resultados dos Algoritmos para Múltiplos Serviços

Observa-se, através da figura 5.2, que o algoritmo que apresenta o maior número de soluções ótimas é o GRVNS2 (96%). Contudo, os algoritmos GRVNS1, GRVNS3 e ILSPERT1 apresentam bons resultados, isto é, todos possuem mais de 86% de soluções ótimas.

Conforme visto na tabela 5.6 e novamente verificado na figura 5.3, o algoritmo GRVNS1 possui as melhores soluções, isto é, para todas as instâncias obteve soluções melhores ou iguais as dos demais algoritmos. Sendo assim, ele foi representado no gráfico com 100% de aproveitamento e serviu de base para a verificação da performance dos demais algoritmos.

5.4 Análise Probabilística

Ainda com o objetivo de avaliar o desempenho dos algoritmos propostos nesse trabalho, efetuamos uma análise probabilística [49] considerando três instâncias (porte pequeno, médio e grande) para um único serviço e 2 instâncias (porte pequeno e grande) para múltiplos serviços. As instâncias utilizadas nessa seção foram selecionadas do conjunto de 60 instâncias com um único serviço e do conjunto de 28 instâncias com múltiplos serviços.

Para cada uma das instâncias, executamos 200 vezes cada um dos oito algoritmos propostos e calculamos a solução média, isto é, calculamos a média das soluções observadas nas 200 iterações dos algoritmos.

A análise probabilística foi baseada em três alvos (alvo Fácil, alvo Médio e alvo Difícil) obtidos a partir da média das soluções de cada um dos algoritmos. O alvo Fácil é dado pela pior solução média de um dos algoritmos propostos, o alvo Médio é dado pela média das soluções médias dos algoritmos propostos e o alvo Difícil é dado pela melhor solução média de um dos algoritmos propostos.

Nas tabelas (5.7) e (5.8), temos respectivamente, os alvos definidos para as instâncias com um único serviço e múltiplos serviços.

Alvo	CD 70 ERB 40	CD 160 ERB 40	CD 250 ERB 60
Fácil	26,536	63,986	105,049
Médio	23,718	51,908	81,476
Difícil	22,721	46,935	73,149

Tabela 5.7: Alvos das instâncias com um único serviço

Alvo	CD 40 ERB 20 Serviço 4	CD 250 ERB 50 Serviço 4
Fácil	12,770	79,181
Médio	10,053	55,836
Diffícil	9,123	48,101

Tabela 5.8: Alvos das instâncias com múltiplos serviços

Determinado os três alvos, em relação a um único serviço e múltiplos serviços, a análise foi elaborada da seguinte forma: cada algoritmo foi executado 100 vezes para cada instância selecionada. No momento em que o algoritmo encontrava uma solução menor ou igual ao alvo pré-determinado, o tempo era inserido em uma lista L e uma nova execução se iniciava. Ou seja, um novo critério de parada foi inserido para cada algoritmo.

Após a conclusão das 100 iterações de cada algoritmo, ordenamos crescentemente os tempos armazenados em L . Para cada tempo de processamento t_i obtido associamos a probabilidade $p_i = (i - \frac{1}{2})/100$. Em seguida os pontos $z_i = (t_i, p_i)$ foram plotados em um gráfico, estabelecendo uma distribuição de probabilidade empírica do tempo que cada algoritmo consome para alcançar ao alvo pré-determinado.

Caso o algoritmo não atinja o alvo em 100 execuções consecutivas, conclui-se que este não pode atingí-lo, o que o faz ficar fora da análise para tal alvo.

5.4.1 Instâncias com Um Único Serviço

Observe que nos gráficos (figuras 5.4 até 5.12) associados com a análise probabilística das instâncias testadas com um único serviço, temos plotados os tempos de processamento dos algoritmos e as suas respectivas probabilidades de atingir os alvos. Ressaltamos que quanto mais à esquerda estiver a curva associada a um algoritmo, melhor será o seu desempenho.

Instância com 70 CDs e 40 ERBs

Os algoritmos ILSPERT1 e ILSPERT2 têm quase 100% de chance de atingir o alvo fácil em torno de 1 segundo. No caso dos algoritmos GRASP (GRBLS, GRVNS1, GRVNS2 e GRVNS3) o mesmo percentual é atingido em até 3, 8, 4 e 6 segundos respectivamente. Os algoritmos AG1 e AG2 possuem, respectivamente, 84% e 83% de chance de atingir o alvo fácil. Essas informações são ilustradas na figura 5.4.

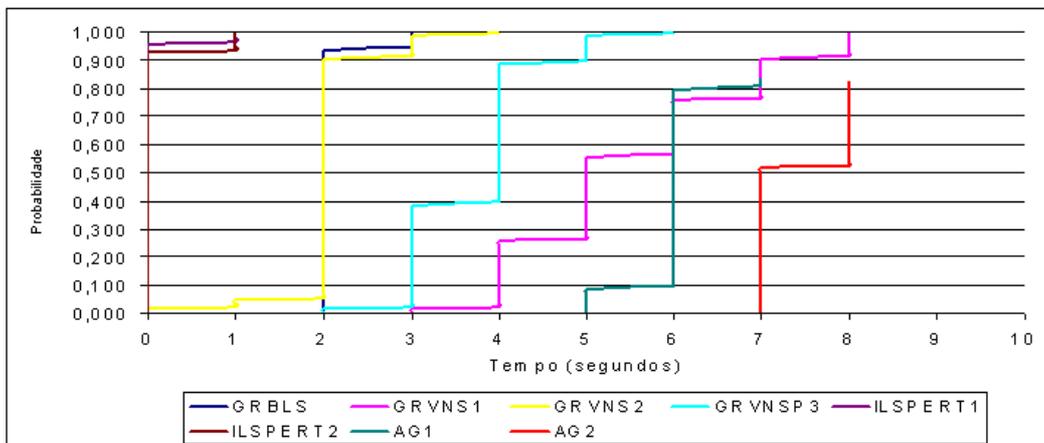


Figura 5.4: Comparação entre os algoritmos - 70 CDs e 40 ERBs - Alvo Fácil

Observe (figura 5.5), que para um tempo em torno de 8 segundos, a chance de que os algoritmos GRBLS, GRVNS1, GRVNS2, GRVNS3, ILSPERT1 e ILSPERT2 encontrem o alvo médio é de 100%. Contudo, os algoritmos AG1 e AG2 não atingiram tal alvo.

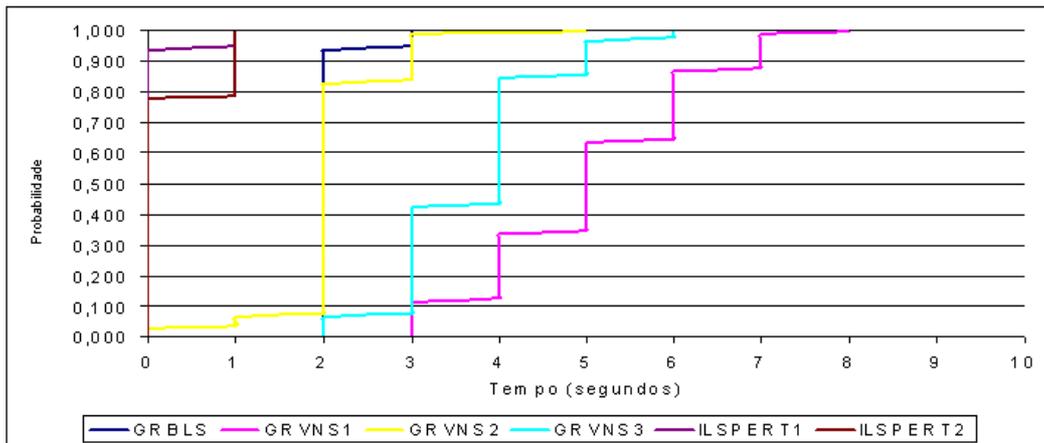


Figura 5.5: Comparação entre os algoritmos - 70 CDs e 40 ERBs - Alvo Médio

Considerando o alvo difícil, a chance de que os algoritmos GRBLS, GRVNS1 e GRVNS2 atinjam tal alvo no tempo de aproximadamente 10 segundos é de 100%. Elevando este tempo para 28 segundos, o ILSPERT2 tem o mesma chance de atingir o alvo. Os algoritmos GRVNS3 e ILSPERT1 não atingiram o alvo difícil em todas as suas execuções (100). Sendo assim, possuem 99% e 97% de chance, com tempos respectivamente de 5 e 6 segundos. Essas informações são ilustradas na figura 5.6.

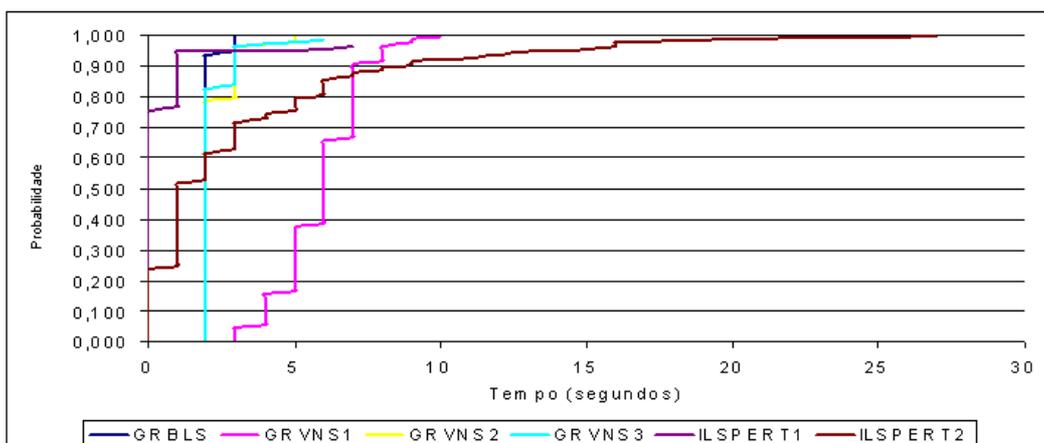


Figura 5.6: Comparação entre os algoritmos - 70 CDs e 40 ERBs - Alvo Difícil

Instância com 160 CDs e 40 ERBs

No tempo de aproximadamente 1 segundo, os algoritmos ILSPERT1 e ILSPERT2 têm 100% de chance de alcançarem o alvo fácil. Os algoritmos GRBLS, GRVNS2 e GRVNS3 atingem o mesmo alvo com 100% de chance em torno de 6 segundos. O GRVNS1 demanda um tempo maior para alcançar 100%, isto é, são necessários 78 segundos. Os algoritmos AG1 e AG2 têm respectivamente 57% e 64% de chance de atingir o alvo fácil (vide figura 5.7).

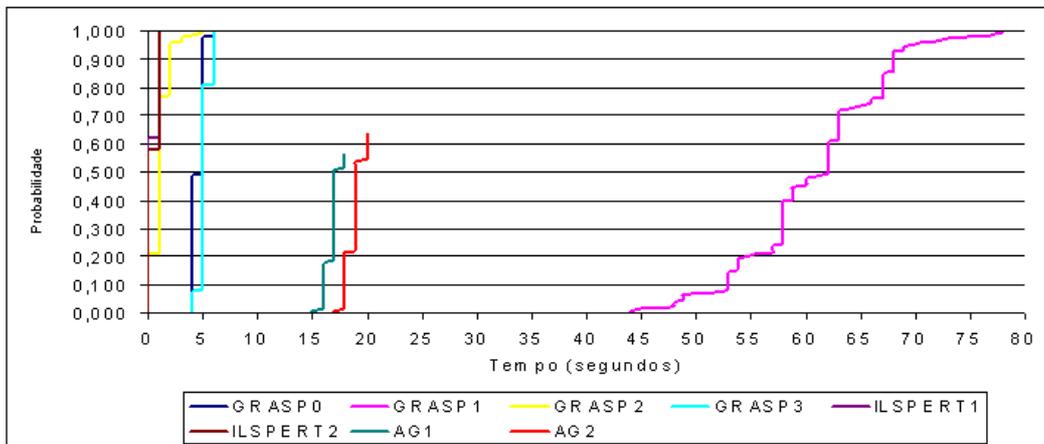


Figura 5.7: Comparação entre os algoritmos - 160 CDs e 40 ERBs - Alvo Fácil

A figura 5.8 ilustra o desempenho dos algoritmos considerando o alvo médio. Os algoritmos GRBLS, GRVNS1, GRVNS2, GRVNS3, ILSPERT1 e ILSPERT2 encontraram o alvo médio em todas as suas execuções. Com exceção do GRVNS1, que atinge o alvo médio em até 78 segundos, os demais algoritmos alcançam o alvo em torno de 8 segundos. É importante ressaltar que o ILSPERT1, atingiu o alvo no tempo de aproximadamente 1 segundo e que os algoritmos AG1 e AG2 não atingiram o alvo médio.

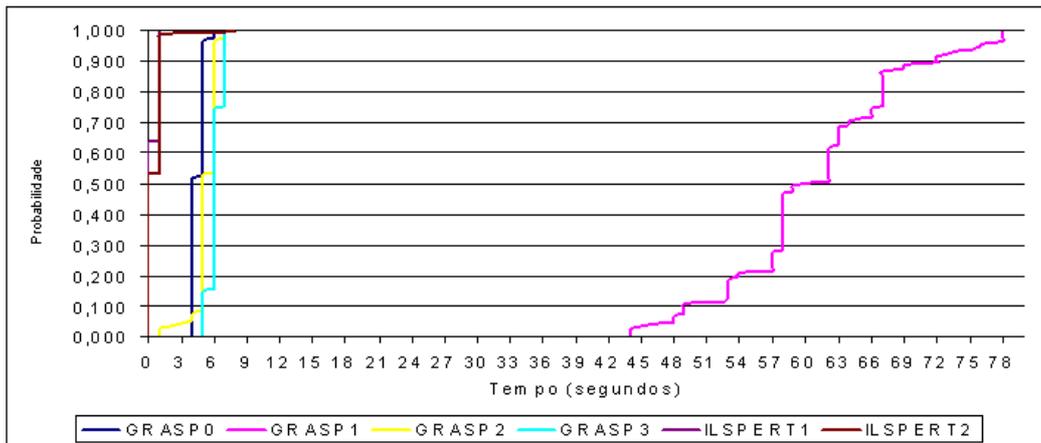


Figura 5.8: Comparação entre os algoritmos - 160 CDs e 40 ERBs - Alvo Médio

Ao considerarmos o alvo difícil, a chance de que os algoritmos GRBLS, GRVNS2 e GRVNS3 atinjam tal alvo no tempo de aproximadamente 8 segundos é de 100%. Elevando este tempo para 123 segundos, o GRVNS1 tem a mesma chance de atingir o alvo. Os algoritmos ILSPERT1 e ILSPERT2 possuem, respectivamente, 99% e 1% de chance, com tempos de até 32 e 237 segundos. Essas informações são ilustradas na figura 5.9.

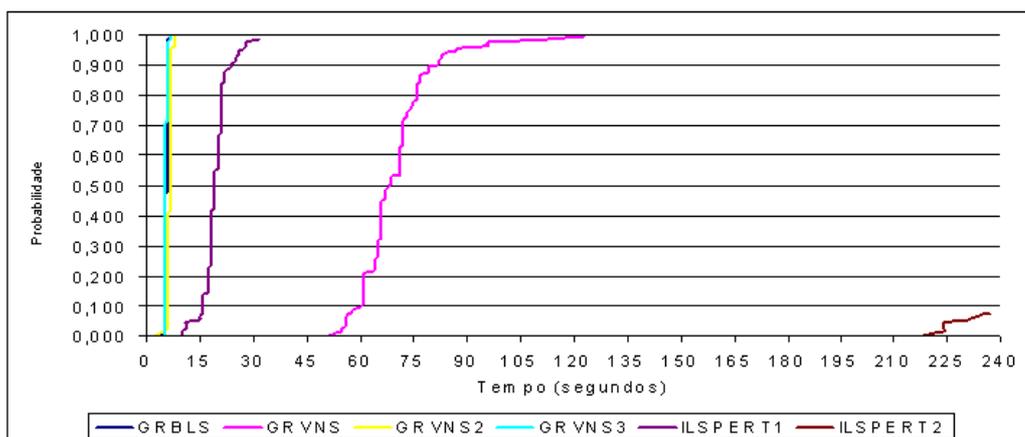


Figura 5.9: Comparação entre os algoritmos - 160 CDs e 40 ERBs - Alvo Difícil

Instância com 250 CDs e 60 ERBs

Tanto os algoritmos GRASP, quanto os algoritmos ILS têm 100% de chance de atingir o alvo fácil. Os algoritmos que tiveram o melhor desempenho foram o ILSPERT1 e o ILSPERT2 com um tempo de 3 segundos. Para os algoritmos GRASP GRBLS, GRVNS2 e GRVNS3 o tempo foi da ordem de 28 segundos. E o algoritmo GRVNS1 necessitou de até 629 segundos para atingir esse mesmo alvo com 100% de chance. Os algoritmos genéticos AG1 e AG2 apresentaram, respectivamente, 63% e 82% de chance de atingir o alvo fácil. Essas informações são ilustradas na figura 5.10.

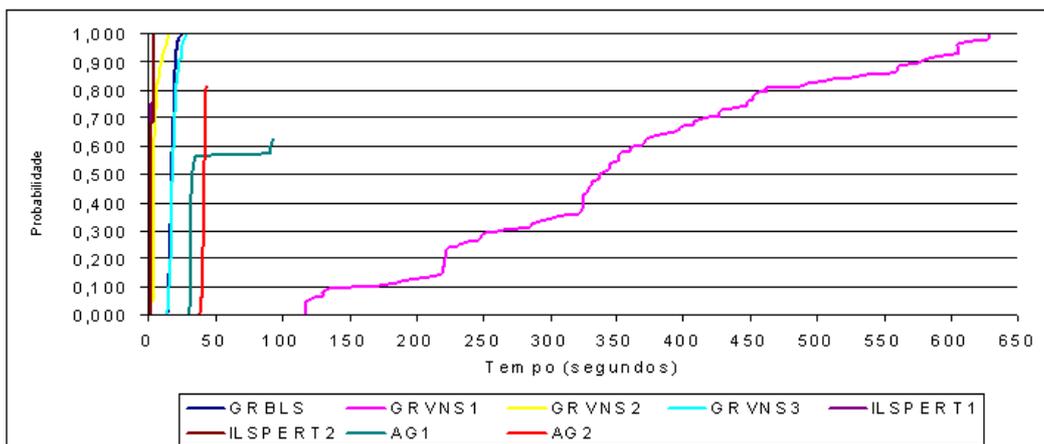


Figura 5.10: Comparação entre os algoritmos - 250 CDs e 60 ERBs - Alvo Fácil

Considerando um tempo de até 29 segundos (figura 5.11), temos que os algoritmos GRBLS, GRVNS2, GRASP3, ILSPERT1 e ILSPERT2 têm 100% de chance de atingir o alvo médio. O algoritmo GRVNS1 atinge esse mesmo percentual em um tempo de até 641 segundos. Os algoritmos AG1 e AG2 não atingiram o alvo médio.

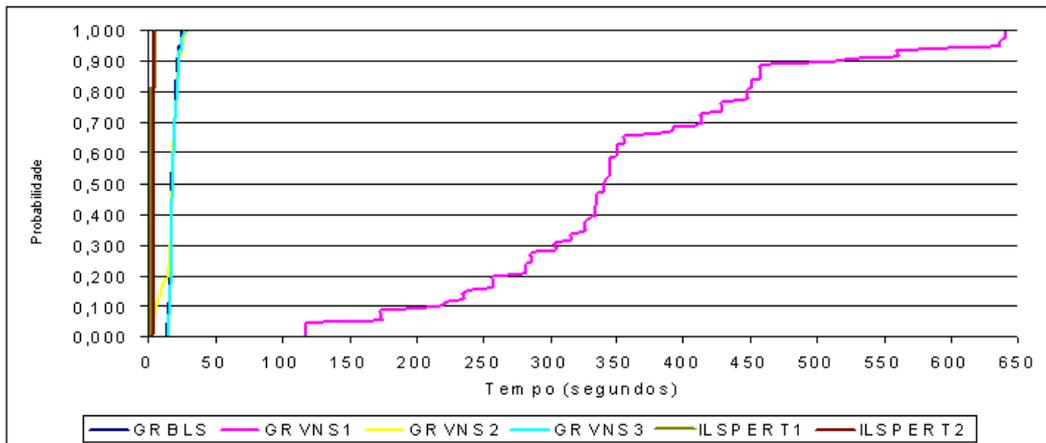


Figura 5.11: Comparação entre os algoritmos - 250 CDs e 60 ERBs - Alvo Médio

Considerando o alvo difícil, somente os algoritmos GRVNS1 e GRVNS2 têm 100% de chance de atingir tal alvo, com tempo em torno de 789 segundos para o GRVNS1 e 156 segundos para o GRVNS2. Os algoritmos GRVNS1 e GRVNS3 têm 71% e 72% de chance de atingir o alvo difícil. Enquanto que os algoritmos ILSPERT1 e ILSPERT2 têm 11% e 7%.

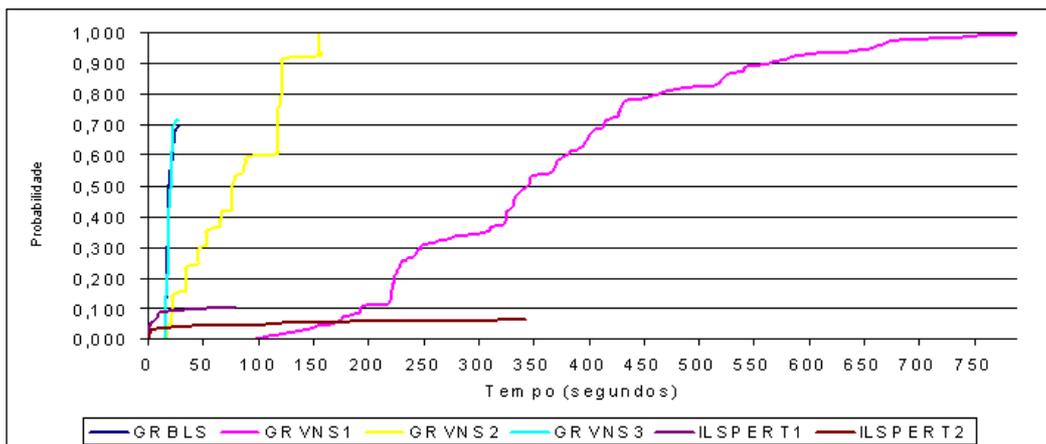


Figura 5.12: Comparação entre os algoritmos - 250 CDs e 60 ERBs - Alvo Difícil

5.4.2 Instâncias com Múltiplos Serviços

Considerando os gráficos (figuras 5.13 até 5.17) referentes a análise probabilística das instâncias testadas com múltiplos serviços, temos plotados os tempos de processamento dos algoritmos propostos e suas probabilidades de atingir os alvos.

Instância com 40 CDs, 20 ERBs e 4 serviços

A chance de que os algoritmos atinjam o alvo fácil em torno de 4 segundos é de aproximadamente 70%. Considerando os algoritmos GRBLS, GRVNS2, GRVNS3, ILSPERT1 e ILSPERT2, a chance de atingir o alvo fácil em torno de 1 segundo é de 100%. O algoritmo GRVNS2 necessita de 2 segundos para 100% de chance. Os algoritmos AG1 e AG2 possuem, respectivamente, 83% e 70% de chance de atingir o alvo fácil. Essas informações são ilustradas na figura 5.13.

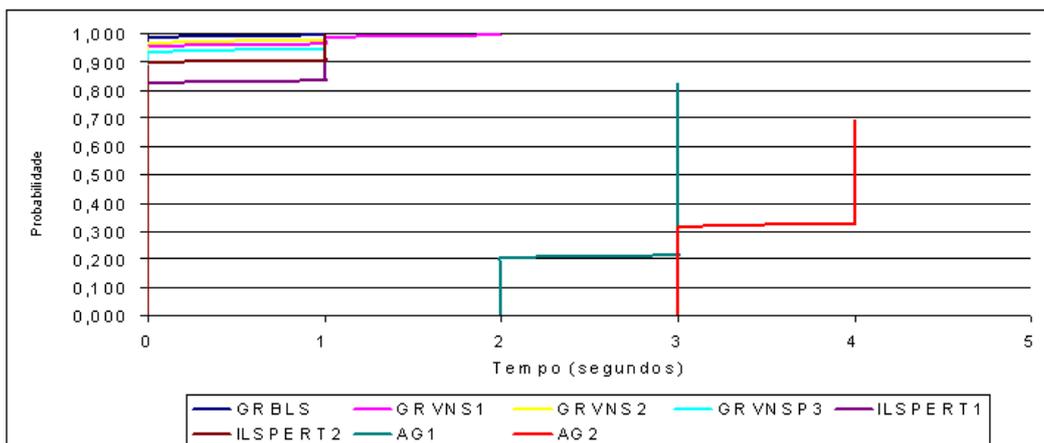


Figura 5.13: Comparação entre os algoritmos - 40 CDs, 20 ERBs e 4 serviços - Alvo Fácil

Observe (figura 5.14), que para um tempo em torno de 3 segundos, a chance de que os algoritmos GRBLS, GRVNS1, GRVNS2, GRVNS3, ILSPERT1 encontrem o alvo médio é de 100%. Aumentando o tempo para 38 segundos, o ILSPERT2 também tem 100% de chance. Contudo, os algoritmos AG1 e AG2 não atingiram o alvo médio.

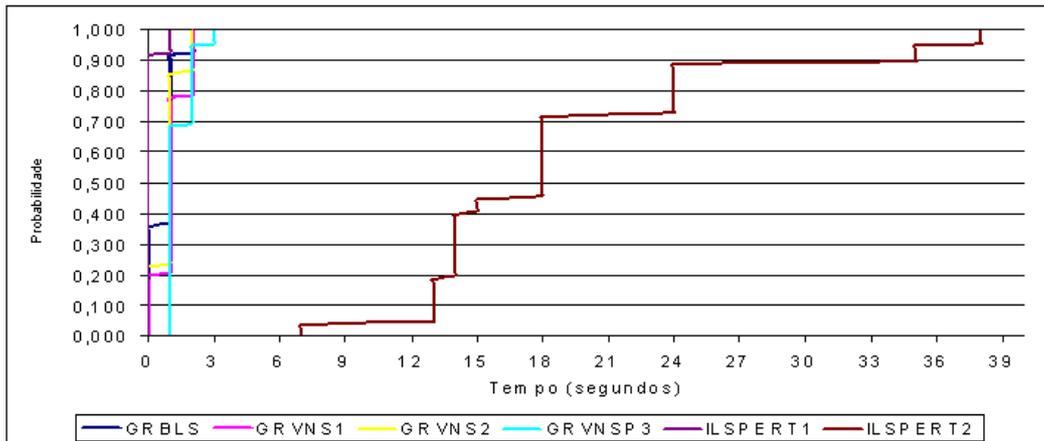


Figura 5.14: Comparação entre os algoritmos - 40 CDs, 20 ERBs e 4 serviços - Alvo Médio

Considerando o alvo difícil, os algoritmos GRBLS, GRVNS1, GRVNS2, GRVNS3, ILSPERT1 e ILSPERT2 atingiram o alvo difícil com 100% de chance, no tempo de aproximadamente 3 segundos. Aumentando o tempo para 64 segundos, o ILSPERT2 também tem 100% de chance. Essas informações são ilustradas na figura 5.15.

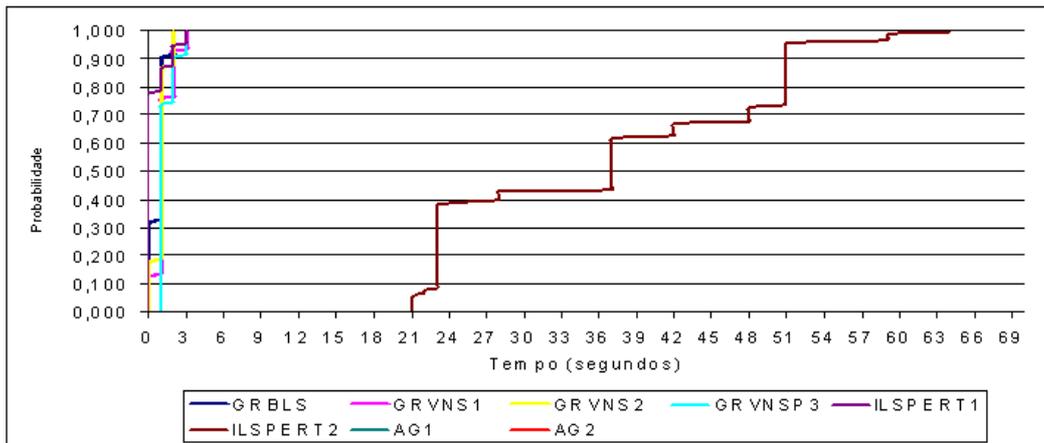


Figura 5.15: Comparação entre os algoritmos - 40 CDs, 20 ERBs e 4 serviços - Alvo Difícil

Instância com 250 CDs, 50 ERBs e 4 serviços

No tempo de aproximadamente 12 segundos os algoritmos ILSPERT1 e ILSPERT2 têm 100% de chance de alcançar o alvo fácil. Ao considerar o mesmo alvo e 100% de chance, os algoritmos GRBLS e GRVNS2 consumiram aproximadamente 15 segundos e o algoritmo GRVNS1 consumiu até 635 segundos. Os algoritmos AG1 e AG2 possuem, respectivamente, 70% e 81% de chance de atingir o alvo fácil. Essas informações são ilustradas na figura 5.16.

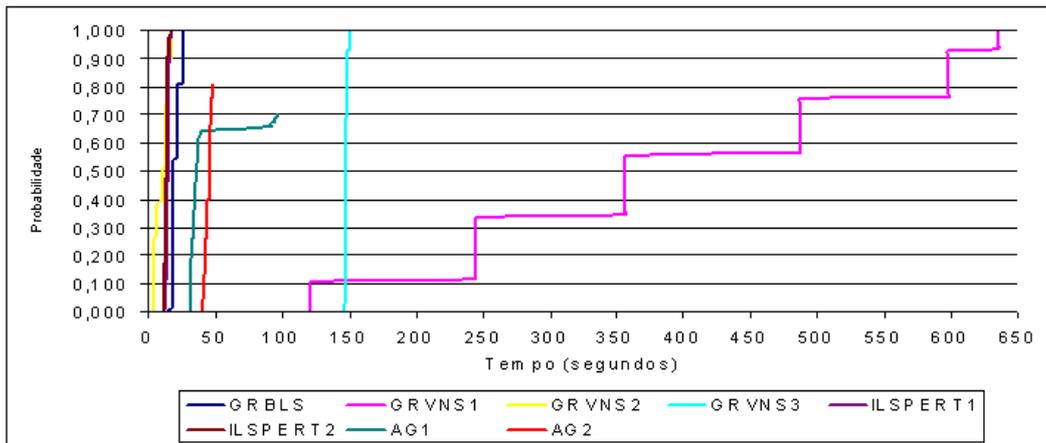


Figura 5.16: Comparação entre os algoritmos - 250 CDs, 50 ERBs e 4 serviços - Alvo Fácil

Considerando o tempo de 12 segundos (figura 5.17), temos que o algoritmo ILSPERT1 tem 100% de chance de atingir o alvo médio. Aumentando esse tempo para 121 segundos, o GRVNS2 também tem 100% de chance. O GRVNS1 tem 100% de chance de alcançar o alvo médio no tempo de até 647 segundos. Os algoritmos GRBLS, GRVNS3 e ILSPERT2 têm 94%, 95% e 85% de chance de atingir o alvo médio. Ressalta-se que os algoritmos AG1 e AG2 não atingiram o alvo médio.

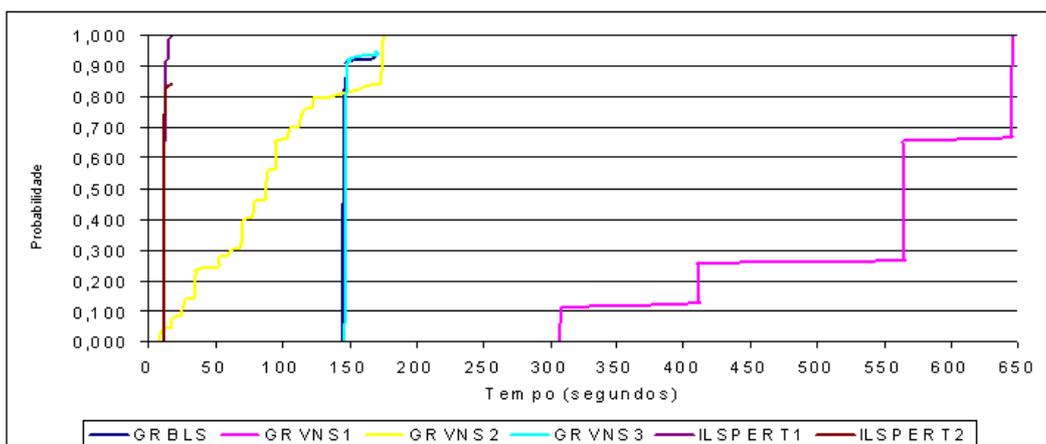


Figura 5.17: Comparação entre os algoritmos - 250 CDs, 50 ERBs e 4 serviços - Alvo Médio

Considerando o alvo difícil, nenhum algoritmo tem 100% de chance. Os melhores resultados foram obtidos pelo algoritmo GRBLS com 77% de chance em 171 segundos, pelo GRVNS1 com 87% de chance em 651 segundos, pelo GRVNS2 com 83% de chance com 182 segundos e pelo GRVNS3 com 79% de chance em 175 segundos. Os algoritmos ILS apresentaram um percentual de atingir o alvo inferior a 50%.

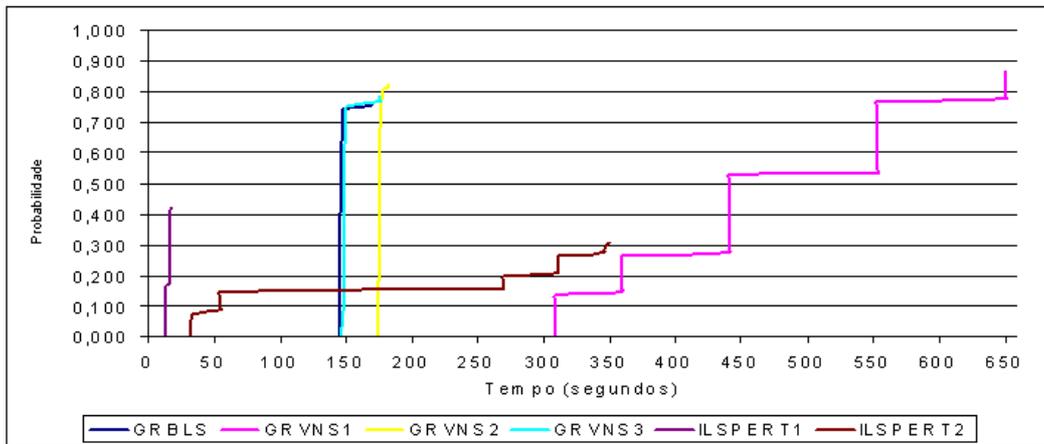


Figura 5.18: Comparação entre os algoritmos - 250 CDs, 50 ERBs e 4 serviços - Alvo Difícil

Capítulo 6

Conclusões

O presente trabalho de tese trouxe uma nova proposta de resolução para o problema de planejamento de redes 3G. Mais especificamente, foram implementados oito algoritmos com base no estudo das metaheurísticas GRASP, VNS, ILS e Algoritmos Genéticos.

Tais algoritmos incorporam diferentes procedimentos de busca local e de construção, que ao serem combinados, possibilitaram a determinação de um conjunto de ERBs ativas (na rede) e das potências de transmissão que foram alocadas aos centros de demanda.

Além dos algoritmos, utilizou-se uma formulação exata com a introdução de uma nova restrição, a qual garante que uma potência de transmissão recebida no enlace reverso, será diferente de zero, se essa for alocada a um centro de demanda i atendido por uma ERB j .

Para a avaliação e comparação dos resultados produzidos pela formulação e pelos oito algoritmos, foi utilizado um conjunto de 88 instâncias (60 instâncias de um serviço e 28 instâncias de múltiplos serviços). Todas as

instâncias utilizadas foram obtidas a partir de um gerador disponibilizado por Santos [52].

Apresentamos a seguir as contribuições que foram obtidas nesse trabalho de tese:

- Os algoritmos de otimização apresentaram uma boa performance (exceção do AG) quanto aos resultados obtidos (para instâncias com um serviço), pois pelo menos um produziu o ótimo global para as instâncias, cuja a formulação foi capaz de resolver em um período de até 12h. Além disso, tanto os algoritmos GRASP quanto os algoritmos ILS, produziram, em geral, soluções viáveis melhores do que as da formulação. Tais soluções foram produzidas às expensas de um tempo de computação razoavelmente menor do que a da formulação.
- Todos os algoritmos implementados incorporaram um procedimento para cálculo das potências de transmissão, mediante a utilização de um vetor de potências. Essas potências são obtidas a partir de uma discretização de intervalos que têm como limites as potências mínima e máxima referentes a cada serviço s . Com a inclusão desse procedimento, foi possível definir não apenas o conjunto de ERBs a serem alocadas ao CDs, mas também um conjunto de potências utilizadas entre os CDs e as ERBs. A inclusão de tal procedimento representa uma boa alternativa e um avanço, tendo em vista que os procedimentos encontrados na literatura, obtêm as potências de transmissão através do quociente entre r_j^s e g_{ij} , onde r_j^s é obtido através da resolução de um sistema de equações lineares, sobre as restrições do SIR (ver [6] e [14]). Contudo o sistema obtido a partir das restrições gera muitas soluções inviáveis

para o problema (potências negativas), sendo necessário o aumento da quantidade de ERBs ativas. Utilizando os vetores de potências não temos o problema de encontrar potências negativas. E a inclusão de uma nova ERB ativa ocorre somente se as restrições não forem satisfeitas para potência máxima permitida na rede. É importante ressaltar que as operadoras priorizam a minimização de instalações de ERBs.

- Entre as metaheurísticas propostas destaca-se o ILS, que obteve bons resultados e ainda não tinha sido empregado no Problema de Planejamento de Redes Celulares 3G, segundo a literatura estudada.
- Os algoritmos GRASP apresentaram as melhores performances, com resultados ótimos ou de boa qualidade para todas as 88 instâncias testadas. Os algoritmos GRVNS1 e GRVNS2 foram os que apresentaram os melhores resultados.
- Considerando um único serviço, os algoritmos GRVNS1, GRVNS2, GRVNS3 e ILSPERT1 apresentaram os melhores desempenhos, ou seja, produziram acima de 86% de soluções ótimas. Enquanto os algoritmos ILSPERT2, AG1 e AG2 apresentaram os piores desempenhos, abaixo de 46% de soluções ótimas. Tais percentuais foram obtidos em relação ao total de soluções ótimas da formulação.
- Com relação às soluções viáveis, em instâncias com um único serviço, o GRVNS1 apresentou o melhor desempenho, pois para cada solução viável produzida pela formulação obteve uma solução melhor ou igual.
- Para múltiplos serviços os algoritmos GRBLS, GRVNS1, GRVNS2, GRVNS3 e ILSPERT1, encontraram as melhores soluções viáveis. Os

algoritmos ILSPERT2, AG1 e AG2, como em um único serviço, apresentaram os piores desempenhos.

- Diferentemente dos algoritmos propostos na literatura, que trabalham em dois níveis (o primeiro nível corresponde aos locais candidatos a alocação de ERBs e o segundo nível representa os CDs que cada ERB atende), o ILS e o AG apresentaram uma estrutura que associa diretamente o CD a uma ERB capaz de servi-lo, ou seja trabalham em um único nível. Os algoritmos GRASP propostos nesse trabalho, assim como os da literatura, trabalham em dois níveis.
- Os algoritmos se mostraram capazes de chegar a uma solução viável ou ótima para todas as instâncias que utilizaram múltiplos serviços. Entre esses algoritmos destaca-se o GRVNS1, que apresentou o melhor desempenho, para as instâncias em que a formulação não produziu nem ao menos uma solução viável. Ou seja, produziu soluções viáveis melhores ou iguais as dos demais algoritmos.

A partir destas considerações, concluímos que os algoritmos propostos nesse trabalho podem servir como uma boa alternativa para resolução do Problema de Planejamento de Redes Celulares 3G tanto para um serviço, quanto para múltiplos serviços.

6.1 Trabalhos Futuros

- Adaptar os algoritmos para considerar o enlace direto e as configurações relevantes das ERBs (altura, inclinação e orientação das antenas) e em

seguida, realizar testes com as instâncias utilizadas em [6];

- Realizar testes com instâncias baseadas em uma rede real (projeto MOMENTUM [42]);
- Adaptar os algoritmos propostos para que estes possam ser utilizados em simulações que empreguem informações de redes celulares 3G em funcionamento no Brasil;
- Adaptar os algoritmos para que se possa executar simulações considerando aspectos de dinamicidade do sistema [9]. Ou seja, considerar a mobilidade dos usuários e as condições de propagação do sinal durante uma ligação.
- Tentar melhorar a qualidade das soluções produzidas pelos algoritmos GRASP através da inserção de um procedimento de reconexão por caminhos [19] na fase de busca local.
- Implementar novas versões do AG combinando os procedimentos de cruzamento e de mutação tradicionais (implementados nessa tese) com procedimentos de busca local e perturbação mais sofisticados.
- Implementar a formulação no CPLEX ou no XPRESS, de forma a utilizar o valor das soluções viáveis produzidas pelos algoritmos GRASP como um *upper bound* inicial para os algoritmos utilizados pelos *solvers*.

Referências Bibliográficas

- [1] Alencar, M. S., *Telefonia Celular Digital. Érica*, pgs.149-400, 2004.
- [2] Amaldi, E., Capone, A., Malucelli, F., “Base station configuration and location problems in UMTS networks”. *In Proceedings of the 9th International Conference on Telecommunication* , pgs. 341-348, Dallas, EUA, Março 2001.
- [3] Amaldi, E., Capone, A., Malucelli, F., “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*, pgs. 1-8, Roma, Itália, Setembro 2001.
- [4] Amaldi, E., Capone, A., Malucelli, F., “Improved models and algorithms for UMTS radio planning”. *IEEE Vehicular Technology Conference*, 2(54) : 920 – 924, 2001.
- [5] Amaldi, E., Capone, A., Malucelli, F., “Planning UMTS Base Station Location: Optimization Models with Power Control and Algorithms”. *Rapporto Interno N. 2001.91*, Politecnico di Milano - Dipartimento di Elettronica e Informazione, Milano, Italia, 2001.

- [6] Amaldi, E., Capone, A., Malucelli, F. “Optimizing base station siting in UMTS networks”. *IEEE Vehicular Technology Conference*, 4(53) : 2828–2832, 2001.
- [7] Amaldi, E., Capone, A., Malucelli, F.,. “Radio planning and coverage optimization of 3G cellular networks”, *Wireless Networks*, vol. 14, pgs. 435-447, 2008.
- [8] Baxter, J., “Local Optima Avoidance in Depot Location”, *Journal of the Operational Research Society*, vol. 32, 1981.
- [9] Bechelane, C.O., Mateus, G. R., “Planejamento e simulação de redes celulares de terceira geração com controle de potência e múltiplos serviços”. *XL Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, João Pessoa, 2008.
- [10] Brito, J., *Uma proposta de suavização para o problema de localização de estações de rádio base*. Tese de Doutorado, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2004.
- [11] Cheung, J. C. S., Beach, M. A., Mcgeehan, J. P., “Network Planning for the Third-Generation Mobile Radio System”. *IEEE Communications Magazine*, pgs. 54-59, 1994.
- [12] COST 231, “Urban transmission loss models for mobile radio in the 900- and 1,800 MHz bands (Revision 2)”, *COST 231 TD(90)119 Rev. 2*, Holanda, setembro 1991.
- [13] Eisenblütter, A., Fügenschuh, A., Koch, T., Koster, A., Martin, A., Pfender, T., Wegel, O., Wessäly, R., “Modelling Feasible Network Configurations for UMTS”. *Telecommunications Network Design and Management*, pgs. 1-22, Kluwer, 2003.

- [14] 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, junho de 2003.
- [15] Fisher, M. L., “The Lagrangean Relaxation Method for Solving Integer Programming Problem”. *Management Science* 27, pgs. 1-18, 1981.
- [16] Fisher, M. L., “An Application Oriented Guide to Lagrangean Relaxation”. *Interfaces* 15, pgs. 10-21, 1985.
- [17] Galota, M., GlaBer, C., Leibnitz, K., Reith, S., Tran-Gia, P., Vollmer, H., Wagner, K., “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*, pgs. 1-8, Roma, Itália, Julho 2001.
- [18] Glover, F., “Future paths for integer programming and links to artificial intelligence”. *Comput. Operational*, pgs. 533-549. 1986.
- [19] Glover, F., Laguna, M., Marti, R., “Fundamentals of Scatter Search and Path Relinking”. *Control and Cybernetics*, vol. 29, n. 3, pgs. 653-684, 2000.
- [20] Glover, F., “New Ejection Chain and Alternating Path Methods for Traveling Salesman Problems”. Sharda, R. (Ed.); Balci, O. (Ed.); Zenios, S. (Ed.). *Computer Science and Operations Research: New Developments in Their Interfaces*. Cambridge: Elsevier, pgs. 449-509, 1992.
- [21] Glover, F., “Scatter Search and Path Relinking”. Corne, D. (Ed.), Dorigo, M. (Ed.); Glover, F. (Ed.). *New Ideas in Optimization*. Maidenhead: McGraw Hill, pgs. 297-319, 1999.

- [22] Glover, F., Kochenberger, G A. *Handbook of Metaheuristic*, 1. ed. Norwell: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [23] Guimarães, D. A., “Sistema de Comunicação Móvel de Terceira Geração”. *Telecomunicações - Revista Científica Periódica do Instituto Nacional de Telecomunicações - INATEL* 04, pgs. 1-23, Maio 2001.
- [24] Hansen, P., Mladenovic, N., “Variable Neighborhood Search for the p-Median”, *Location Science*, v. 5, pgs. 207-226, 1998.
- [25] Hansen, P., Mladenovic, N., Perez-Brito, D., “Variable Neighborhood Decomposition Search”, *Journal of Heuristics*, Vol. 7, pgs. 335-350, 2001.
- [26] Hansen, P., Ribeiro, C., “Essays and Surveys in Metaheuristics”. Boston: Springer, 2001.
- [27] Pardalos, P., Resende, M., *Handbook of Applied Optimization*. Oxford University Press, pgs. 221-234, 2002.
- [28] Hata, M., “Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Service”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 29, 3, pgs. 17-325, 1980.
- [29] Held, M. and Karp, R.M., “The travelling-salesman problem and minimum spanning trees”. *Operations Research* 18, pgs. 1138-1162, 1970.
- [30] Held, M. and Karp, R.M., “The travelling-salesman problem and minimum spanning trees: Part II”. *Mathematical Programming* 1, pgs. 6-25, 1971.
- [31] Holland, J. H., *Adaptation in natural artificial systems*. University of Michigan Press. 1975.

- [32] Horst, R., Pardalos, P., Thoai, N., “Introduction to a Global Optimization”. *John Wiley and Sons, Inc.*, Holanda, 1995.
- [33] Ibaraki, T., Nonobe, K., Yagiura, M., *Metaheuristics: Progress as Real Problem Solvers*. Boston: Springer, 2005.
- [34] Johnson, E., Nenhauser, G., Savelsbergh, M., “Progress in Linear Programming Based Branch and Bound Algorithms: An Exposition”. *INFORMS Journal on Computing* 12, 2000.
- [35] Johnson, D. S., Mcgeoch, L.A. *The Traveling Salesman Problem: A Case Study in Local Optimization, Local Search in Combinatorial Optimization*, E. H. L. Aarts and J.K. Lenstra (Ed.), John Wiley and Sons Ltd, pgs. 215-310, 1997.
- [36] Kalvenes, J., Kennington, J., Olinick, E. “Base Station Location and Service Assignments in W-CDMA Networks”. *Tech. Rep. 02-EMIS-03, School of Engineering, Souther Methodist University, Texas, EUA, Outubro 2002*.
- [37] Lourenço, H. R., Martin, O., Sttzle, T., “Iterated Local Search”. In F. Glover and G. Kochenberger (eds), *Handbook of Metaheuristics*, Norwell: Kluwer Academic Publishers. pgs. 321-353, 2002.
- [38] Linderoth, J., Savelsbergh, M., “A Computational Study of Search Strategies for Mixed Integer Programming”, *INFORMS Journal on Computing*, Vol. 11, pgs. 173-187, 1999.
- [39] MacDonald, V., “The Cellular Concept”. *Bell System Technical Journal* 58, vol. 1, pgs. 15-41, Janeiro 1979.

- [40] Mateus, G., “Introdução a Computação Móvel”, 11^a *Escola de Computação*, 1998.
- [41] Maculan, N., Lucena, A., “Otimização Linear e Inteira”, Notas de aula, *UFRJ/COPPE/SISTEMAS*, 2000.
- [42] Momentum, Momentum Project, 2003. <http://momentum.zib.de>.
- [43] Nascimento, Juarez, *Telecomunicações*. 2^a edição, 2000.
- [44] Ojanperä, T., Prasad, R., “Wideband CDMA for third generation mobile communications”. *Artech House*, 1998.
- [45] Okumura, T., Ohmori, E., Fukuda, K., “Field Strength and its Variability in VHF and UHF Land Mobile Service”. *Review Electrical Communications Laboratory 16*, pgs. 825-873, 1968.
- [46] Pacheco, M., “Algoritmos Genéticos: Princípios e Aplicações”. *Laboratório de Inteligência Computacional Aplicada, DEE, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - Brasil*, 2005.
- [47] Reeves, C., “Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems”. *Blackwell Scientific Publications*, 1993.
- [48] Rezende, M. G. C., Feo, T. A., “A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problem”. *Operations Research Letters*, vol. 8, pgs. 67-71, 1989
- [49] Rezende, M. G. C., Feo, T. A., “Greedy Randomized Adaptive Search Procedures”. *Journal of Global Optimization*, pgs. 1-27, 1995.
- [50] Rezende, M. G. C., “Computing approximate solutions of the maximum covering problem using GRASP”. *J. of Heuristics*, vol. 4, pgs. 161-171, 1998.

- [51] Rueda, S. E., *Otimização de Sistemas Celulares de 3a Geração - Uma Abordagem Utilizando Algoritmos Genéticos*. Dissertação de Mestrado, IME, Rio de Janeiro, RJ, 2008.
- [52] Santos, K. C., Mateus, G. R., “Planejamento de Redes Celulares de Terceira Geração Utilizando Algoritmos Genéticos e Heurísticas Gulosas”. *23o. Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*, Fortaleza. 2005.
- [53] Santos, K. C., Mateus, G. R., “Meta-heurísticas Mono e Multi-objetivo para o Planejamento de Redes Celulares de Terceira Geração”. *Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, Gramado, 2005.
- [54] Sector, I. T. S., “Service Objectives and Principles for Future Public Land Mobile Telecommunication Systems”. Drafty recommendation f.115, *International Telecommunications Union - ITU*, 1994.
- [55] Siomina, I., Värbrand, P., Yuan, D., “Optimization of Pilot Power for Load Balancing in WCDMA Networks”. *IEEE Communications Society - Globecom*, 2004.
- [56] Sousa, M., Brito, J., Montenegro, F., “Algoritmos de otimização para o problema de planejamento de Redes Celulares de Terceira Geração”. *INGEPRO*, v. 1, pgs. 96-108, 2009.
- [57] Sousa, M., Brito, J., Montenegro, F., Maculan, N., “Algoritmo de otimização para o problema de planejamento de Redes Celulares de Terceira Geração”. *Anais do XL Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, João Pessoa, PB, 2008.
- [58] Stuber, Gordon, L., *Principles of Mobile Communications*. 2^a edição, Kap, 2000.

- [59] Tutschku, K., Leibnitz, K., Phuoc Tran-Gia., “ICEPT - An integrated cellular network planning tool”. *IEEE Vehicular Technology Conference*, 2(47) : 765 – 769, 1997.
- [60] Takahashi, R. H. C., Otimização escalar e vetorial. Notas de Aulas, Departamento de Matemática, Universidade Federal de Minas Gerais, 2003. [http://www.mat.ufmg.br / ~ taka/otev04.pdf](http://www.mat.ufmg.br/~taka/otev04.pdf).
- [61] Viana, V., “Meta-heurísticas e Programação Paralela em Otimização Combinatória”. *UFC edições*. pgs. 126-151, 1998.
- [62] Viterbi, A. M., Viterbi, A. J., “Erlang Capacity of a Power Controlled CDMA System”. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 11, pgs. 892-900, 1993.
- [63] WOLSEY, L. A., *Integer Programming*. Wiley-Interscience publication, 1998.