

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE SISTEMAS

## **PLANEJAMENTO OTIMIZADO PARA A INFRA- ESTRUTURA DE REDES DE COMUNICAÇÕES MÓVEIS**

ITALO AMARAL PAIVA

Orientador:

Prof. Dr. Vinícius Amaral Armentano

Banca Examinadora:

Prof Dr. Carlos Magnus Carlson Filho

Dra. Maria Silvina Medrano

Prof Dr. Raul Vinhas Ribeiro

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade  
de Engenharia Elétrica e de Computação como parte  
dos requisitos exigidos para a obtenção do título de

Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Automação.

**06 de Junho de 2002**

## **Resumo**

Este trabalho aborda o problema de planejamento da infra-estrutura de redes de comunicações móveis. Esta infra-estrutura envolve os seguintes elementos físicos: Base Transceiver Station (BTS), Base Station Controller (BSC) e Mobile Switching Center (MSC). A localização e o número de BTSs é dado, e o tráfego gerado nestas é enviado para as BSCs e em seguida para as MSCs. Existem vários locais candidatos para a instalação das BSCs e das MSCs. O problema consiste em determinar o número e a localização destes elementos, suas capacidades e a topologia de interconexão entre BTSs e BSCs, e entre BSCs e MSCs, de modo a minimizar os custos fixos de instalação e os custos de transmissão entre os elementos. Para tal, é desenvolvido um modelo matemático de otimização combinatória que é resolvido através de um pacote comercial. Para problemas de grande porte, a utilização destes pacotes pode se tornar inviável devido ao tempo computacional. Por isto, são sugeridos métodos heurísticos que produzem soluções de boa qualidade em um tempo computacional satisfatório.

## **Abstract**

This work addresses the infrastructure design for a mobile communication network. This infrastructure contains the following elements: Base Transceiver Station (BTS), Base Station Controller (BSC) and Mobile Switching Center (MSC). The location and the number of BTSs are given, and the generated traffic is sent to the BSCs and next to the MSCs. There are several candidate locations to install the BSCs and the MSCs. The problem consists of determining the number and location of these elements, their capacities and the interconexion topology between the BTSs and the BSCs, and between the BSCs and the MSCs, in such a way as to minimize the fixed installation costs and the transmission costs between the elements. For this, a combinatorial optimization mathematical model is developed and solved by commercial software. For large-scale problems, the use of this software can become infeasible due to the computational time. For this reason, heuristics methods are proposed in order to obtain high quality solutions in a reasonable computational time.

## **Dedicatória**

Dedico esta dissertação a toda a minha família, que desde de o início me apoiou na realização deste sonho.

## **Agradecimentos**

Gostaria de agradecer a todos os profissionais e amigos que participaram do desenvolvimento deste trabalho. Em primeiro lugar ao prof. Vinícius que acreditou, que mesmo à distância, eu seria capaz de concluir este trabalho. O mesmo agradecimento eu faço ao prof. Carlos Magnus, que apesar de nunca termos nos encontrado, me auxiliou e indicou os primeiros passos na área de telecomunicações.

O mesmo agradecimento eu faço ao Reynaldo, Silvina e Marcos, que com toda paciência do mundo ajudaram a gerar importantes resultados para este trabalho, além do tema estudado nesta tese.

Indiretamente, eu agradeço ao prof. Miguel Taube e ao Carlos Formigari, pela colaboração em me liberar para trabalhar na tese. E finalmente a todos os amigos do Densis.

# Sumário

<b>RESUMO .....</b>	<b>II</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>II</b>
<b>DEDICATÓRIA .....</b>	<b>III</b>
<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>IV</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>VII</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>VIII</b>
<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 OBJETIVO .....	1
1.2 COMPOSIÇÃO DA TESE .....	2
<b>CAPÍTULO 2 - SISTEMAS MÓVEIS CELULARES – UMA VISÃO GERAL .....</b>	<b>4</b>
2.1 EVOLUÇÃO DA TELEFONIA CELULAR NO MUNDO .....	4
2.1.1 Técnicas Duplex .....	6
2.1.2 Arquitetura de Múltiplo Acesso .....	6
2.2 ELEMENTOS BÁSICOS DE UMA REDE .....	8
2.2.1 Unidade Móvel .....	10
2.2.2 Base Transceiver Station (BTS) .....	10
2.2.3 Base Station Controller (BSC) .....	10
2.2.4 Mobile Switching Center (MSC) .....	10
2.3 REDES CELULARES DE SEGUNDA GERAÇÃO (2G) E GERAÇÃO 2,5 .....	11
2.3.1 D-AMPS .....	12
2.3.2 GSM .....	12
2.3.3 cdmaOne .....	13
2.3.4 GPRS .....	13
2.4 TERCEIRA GERAÇÃO (3G) .....	13
2.5 PLANEJAMENTO DE REDES MÓVEIS CELULARES .....	14
<b>CAPÍTULO 3 - MODELO MATEMÁTICO .....</b>	<b>16</b>
3.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA .....	16
3.2 MODELO DE FLUXOS EM REDES .....	17
3.3 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA .....	18
3.4 UTILIZAÇÃO DO MODELO .....	24
3.5 CENÁRIOS ESTUDADOS .....	25
3.6 CENÁRIOS ESTUDADOS .....	27
3.7 ANÁLISE DAS SOLUÇÕES .....	28
3.8 CONCLUSÕES .....	29
<b>CAPÍTULO 4 - HEURÍSTICA CONSTRUTIVA E DE MELHORIA .....</b>	<b>31</b>
4.1 HEURÍSTICA CONSTRUTIVA .....	32
4.1.1 Localização das BSCs e Conexão (1ª. Etapa) .....	35
4.1.2 Conexão BSC-MSC (2ª. Etapa de Conexões) .....	40
4.2 HEURÍSTICA DE MELHORIA .....	44
4.3 ESTUDO DE CASO .....	48
4.3.1 Descrição dos Cenários .....	48
4.4 ANÁLISE DAS SOLUÇÕES .....	49

<b>CAPÍTULO 5 - APLICAÇÃO DO MÉTODO GRASP .....</b>	<b>51</b>
5.1 DESCRIÇÃO DO MÉTODO .....	51
5.2 LISTA RESTRITA DE CANDIDATOS (LRC).....	53
5.3 GRASP REATIVO.....	55
5.4 DETERMINAÇÃO DE $\alpha$ E A APLICAÇÃO DO GRASP REATIVO .....	56
5.5 PROCEDIMENTOS HEURÍSTICOS.....	58
5.6 APLICAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS HEURÍSTICOS .....	60
<b>CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES .....</b>	<b>64</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>68</b>

## Lista de Tabelas

### TABELA

TABELA 3.1: CUSTO E CAPACIDADE DAS BSCs.....	25
TABELA 3.2: CUSTO E CAPACIDADE DAS MSCs.....	25
TABELA 4.1: CONFIGURAÇÃO DOS CASOS.....	48
TABELA 4.2: CUSTO E CAPACIDADE DAS BSCs.....	49
TABELA 4.3: CUSTO E CAPACIDADE DAS MSCs.....	49
TABELA 5.1: NÚMERO DE ITERAÇÕES QUE DEFINEM O CRITÉRIO DE PARADA PARA OS DIFERENTES CONJUNTOS DE CASOS.....	56
TABELA 5.2: DESVIO MÉDIO OBTIDO COM A APLICAÇÃO DA META-HEURÍSTICA GRASP VARIANDO O PARÂMETRO $\alpha$ .....	57
TABELA 5.3: RESULTADOS OBTIDOS COM A APLICAÇÃO DA META-HEURÍSTICA GRASP REATIVO.....	58
TABELA 5.4: VALORES MÉDIOS DOS DESVIOS E OS INTERVALOS DE TEMPOS DE EXECUÇÃO OBTIDOS COM A APLICAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS I AO VII.....	61
TABELA 5.5: VALORES MÉDIOS DOS DESVIOS DOS CASOS OBTIDOS COM A APLICAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS III.....	63
TABELA 5.6: VALORES MÉDIOS DOS DESVIOS DOS CASOS OBTIDOS COM A APLICAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS IV.....	63
TABELA 5.7: VALORES MÉDIOS DOS DESVIOS DOS CASOS OBTIDOS COM A APLICAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS V.....	63

# Lista de Figuras

## FIGURA

FIGURA 2.1: CONCEITO CELULAR. ....	6
FIGURA 2.2: UTILIZAÇÃO DO ESPECTRO NO FDMA. ....	7
FIGURA 2.3: UTILIZAÇÃO DO ESPECTRO NO TDMA. ....	8
FIGURA 2.4: EXEMPLO DE UMA REDE TELEFONIA MÓVEL CELULAR (GSM). ....	9
FIGURA 3.1: REPRESENTAÇÃO EM GRAFO SENDO AS DEMANDAS INDICADAS PARA CADA BTS. ....	17
FIGURA 3.2: CUSTOS DOS SISTEMAS DE TRANSMISSÃO POR CANAL E1. ....	26
FIGURA 3.3: LOCALIZAÇÃO DAS BSCs E MSCs CANDIDATAS E BTSS CONSIDERADAS. ....	27
FIGURA 3.4: SOLUÇÃO OBTIDA PARA O CENÁRIO 1. ....	28
FIGURA 3.5: SOLUÇÃO OBTIDA PARA O CENÁRIO 2. ....	29
FIGURA 4.1: PSEUDO-CÓDIGO DA HEURÍSTICA CONSTRUTIVA. ....	34
FIGURA 4.2: PSEUDO-CÓDIGO DA CLASSIFICAÇÃO DAS BTSS. ....	34
FIGURA 4.3: PSEUDO-CÓDIGO DA CONEXÃO DAS BTSS CRÍTICAS. ....	35
FIGURA 4.4: EXEMPLO DA IDENTIFICAÇÃO DE UMA BTS CRÍTICA E SUA CONEXÃO À REDE. ....	36
FIGURA 4.5: PSEUDO-CÓDIGO DA CONEXÃO DAS BTSS VIÁVEIS. ....	37
FIGURA 4.6: PSEUDO-CÓDIGO DO CÁLCULO DOS CUSTOS DE CONEXÕES DAS BTSS ÀS BSCs. ....	38
FIGURA 4.7: EXEMPLO DE UMA CONEXÃO DE UMA BTS VIÁVEL. ....	39
FIGURA 4.8: EXEMPLO DE UMA BTS VIÁVEL QUE SE TORNOU CRÍTICA. ....	40
FIGURA 4.9: PSEUDO-CÓDIGO DA CONEXÃO DAS BSCs. ....	41
FIGURA 4.10: EXEMPLO DA DISTRIBUIÇÃO DOS ELEMENTOS DE UMA REDE MÓVEL. ....	42
FIGURA 4.11: SOLUÇÃO ÓTIMA (CUSTO = 19560). ....	43
FIGURA 4.12: SOLUÇÃO DA HEURÍSTICA CONSTRUTIVA (CUSTO = 20645,8). ....	44
FIGURA 4.13: SOLUÇÃO COM BUSCA LOCAL (CUSTO = 20119,3). ....	47
FIGURA 4.14: COMPARAÇÃO ENTRE A HEURÍSTICA CONSTRUTIVA E A HEURÍSTICA DE MELHORIA. ....	50
FIGURA 5.1: PSEUDO-CÓDIGO DO GRASP. ....	52
FIGURA 5.2: PSEUDO-CÓDIGO DA ETAPA CONSTRUTIVA DO GRASP. ....	53
FIGURA 5.3: PSEUDO-CÓDIGO DA ETAPA DE BUSCA LOCAL DO GRASP. ....	53
FIGURA 5.4: RESULTADOS OBTIDOS NA PRIMEIRA E SEGUNDA ETAPA PARA UM CASO UTILIZANDO O MÉTODO GRASP ( $\alpha = 0,4$ ) EM AMBAS AS ETAPAS. ....	59
FIGURA 5.5: VALORES MÉDIOS OBTIDOS PARA OS PRINCIPAIS PROCEDIMENTOS. ....	62



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Objetivo

Recentemente houve a privatização dos serviços de telecomunicações. Uma grande revolução ocorreu nesta área levando várias empresas estrangeiras especializadas neste segmento a se interessarem pelo grande potencial existente no Brasil. A privatização dividiu as telefonias fixas e as celulares em várias regiões. Uma lei impôs que uma mesma empresa seria proibida de explorar tanto a telefonia fixa e móvel em uma mesma região. Isto fez com que algumas optassem por terem os direitos da telefonia fixa em uma região e os da de celulares em outra.

A telefonia celular passa por um processo de grande demanda. A facilidade de se obter uma linha em um sistema onde cada cliente pode fazer uma ligação de qualquer lugar e ser localizado rapidamente, fez com que vários negócios pudessem ser criados. Pessoas de baixa renda se viram em condições, de finalmente, conseguirem uma linha telefônica.

Está sendo implantada a nova rede para linhas de celulares, onde as faixas (bandas) já foram leiloadas. Algumas empresas já dispõem de tal tecnologia porque já a implantaram para participarem das bandas A e B. Outras estão interessadas em participar destas áreas aonde ainda não possuem bases. A partir do momento que estas entrarem em um mercado onde não possuem infra-estrutura, é necessário um planejamento de como irão oferecer atendimento ao público. Uma das opções seria alugar equipamento das operadoras já existentes, contudo isto pode despender muito capital no longo prazo. Outra opção seria a implantação de seus próprios equipamentos.

De acordo com a demanda de cada região, é possível determinar a localização das estações de base para onde serão direcionadas as ligações feitas pelos celulares. Para haver uma ligação entre estas estações é necessária a implantação de Base Station Controllers

(BSC) e de Mobile Switching Centers (MSC) que direcionam tanto as ligações entre celulares, como entre celulares e a rede fixa.

Isto envolve um problema complexo de localização, determinação de capacidade e conexão entre os centros acima citados. Várias técnicas já foram utilizadas em outros planejamentos feitos para algumas redes no Brasil. O propósito deste trabalho é modelar matematicamente esta rede. Para problemas de dimensão relativamente pequena o modelo é resolvido em curto espaço de tempo por um software de otimização. Para problemas de dimensão maior este tempo torna-se muito elevado, o que nos levou a desenvolver métodos heurísticos capazes de produzir soluções satisfatórias em um curto espaço de tempo.

## **1.2 Composição da Tese**

O trabalho é dividido em capítulos onde são apresentados vários conceitos e tecnologias que compõem o ramo de telecomunicações, até chegar na apresentação e aplicação de métodos para resolver o problema abordado.

O capítulo 2 introduz a rede que compõe a telefonia móvel celular. Inicialmente, é apresentado um pouco da história desta rede, citando as suas primeiras aplicações e o avanço alcançado após a entrada de empresas privadas, introduzindo uma visão mais voltada às oportunidades de negócio. As tecnologias de acesso e os elementos físicos que compõem esta rede são apresentados, colocando ao leitor todas as tecnologias aplicadas a este tipo de rede atualmente. Finalizando este capítulo, o leitor tem a visão geral dos passos necessários para a criação de uma rede móvel celular e a definição de qual destes passos será o alvo de técnicas de melhoria abordado neste trabalho.

No capítulo 3 é feita a representação do problema através de um modelo matemático. A partir da estrutura que possibilita a comunicação entre os vários usuários da rede, há a necessidade de instalação e conexão dos elementos que a compõem. Uma representação matemática é sugerida, assim como a aplicação em um caso representando a rede de uma cidade de porte médio para grande.

No capítulo 4 são desenvolvidas uma heurística construtiva e uma heurística de melhoria para o problema abordado, enquanto que no capítulo 5 é implementada a meta-heurística GRASP para obter soluções de melhor qualidade. Neste capítulo são mostrados resultados computacionais e análise destes.

O capítulo 6 contém os comentários finais, resultados obtidos, e proposta de futuros trabalhos que poderão ser atingidos com a aplicação da metodologia sugerida em outras áreas.

## Capítulo 2

### Sistemas Móveis Celulares – Uma Visão Geral

As empresas operadoras que venceram os leilões nas bandas D e E no Brasil estão em fase de implantação das redes que utilizam a tecnologia GSM/GPRS e que suportarão o Serviço Móvel Pessoal (SMP). Tais implantações ocorrerão no curto prazo e demandarão investimentos significativos em infra-estrutura de redes.

No mercado atual existem diversas tecnologias disponíveis para serem aplicadas na instalação de uma rede de telefonia móvel celular, e para cada uma delas há elementos que devem ser instalados para que haja a comunicação entre os usuários desta rede.

Com o crescimento da Internet, as antigas tecnologias de telefonia estão sendo adaptadas para o grande mercado que esta rede virtual pode proporcionar com diversos serviços e entretenimento. Este capítulo descreve as tecnologias disponíveis no mercado, assim como os elementos que compõem uma rede móvel celular. Cada operadora de telefonia celular define qual a tecnologia que será utilizada, sendo assim necessário um planejamento da montagem desta futura rede. Este planejamento é abordado no capítulo 3.

#### 2.1 Evolução da telefonia celular no mundo

No final do século dezanove, surgiram os primeiros transmissores e receptores localizados em laboratórios e capazes de transmitir sinais por alguns metros. Logo após, foi desenvolvida tecnologia para fazer a comunicação entre barcos e uma estação terrestre. Esta nova tecnologia surgiu como meio alternativo para a comunicação à distância, antes feita apenas através de cartas ou telégrafo.

Os primeiros serviços a utilizarem a comunicação via rádio foram os órgãos de segurança pública tais como a polícia, o corpo de bombeiros, conservação de florestas, dentre outros. Logo em seguida, a iniciativa privada iniciou sua utilização a partir da

aplicação da comunicação via rádio nos meios comerciais, com a finalidade de gerar mais negócios e entretenimento.

Com o aumento do número de usuários desta rede, começou a ocorrer à limitação do número de canais e a alta interferência de sinais. Isto gerou a necessidade de investimentos em novas tecnologias a fim de melhorar a qualidade do serviço e aumentar o número de usuários com acesso a ela.

Um grande problema que existia nos primórdios da telefonia celular estava relacionado com o grande tamanho dos transmissores e receptores que inviabilizavam a sua utilização em estações móveis. Com o aprimoramento da tecnologia, foi possível a sua utilização em carros que utilizavam a energia de suas baterias para gerar sinais e manter uma comunicação com outros celulares. Estes investimentos geraram novos equipamentos (menores) e novas maneiras de como podem ser enviados os dados que transitam via rádio.

A rede de telefonia celular era inicialmente composta por uma antena de recepção e transmissão localizada em algum ponto relativamente alto, capaz de cobrir uma área de dezenas de quilômetros de raio. Porém, isto despense uma enorme quantidade de energia e é ineficaz quando se pensa na capacidade de canais que podem ser disponíveis para esta antena. A Figura 2.1 ilustra esta mudança.

O problema de capacidade e qualidade da comunicação celular pode ser resumido em uma idéia básica: *reuso de frequência*, ou seja, os mesmos canais podem ser utilizados por antenas diferentes e distantes suficientemente a fim de evitar a chamada *interferência cocanal*.

*Sistema celular antigo*

*Sistema celular atual*

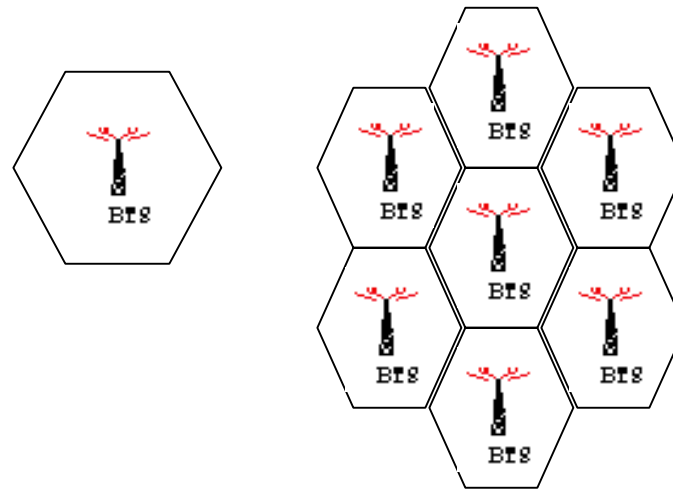


FIGURA 2.1: CONCEITO CELULAR.

### 2.1.1 Técnicas Duplex

Semelhante ao que acontece com as transmissões de estações de rádio e de televisão, um único canal de comunicação somente pode ser utilizado para a transmissão de informações em um sentido. Por isso a comunicação do tipo *duplex* necessita de dois canais para que a conexão possa ser feita. Os padrões que definem como estes canais são divididos são os seguintes:

- ◆ Frequency Division Duplex (FDD), ou divisão por frequência;
- ◆ Time Division Duplex (TDD), ou divisão por tempo;

### 2.1.2 Arquitetura de Múltiplo Acesso

Com o intuito de maximizar o número de usuários utilizando a mesma área de cobertura sem haver o problema de interferência devido à utilização simultânea da mesma frequência, foram desenvolvidas tecnologias de *vários acessos*:

## **FDMA**

Na transferência de sinais pelo método de acesso FDMA, cada canal ocupa uma portadora com frequência distinta das demais. A Figura 2.2 ilustra uma faixa do espectro. Cada faixa contém um número limitado de canais, diretamente relacionado ao tamanho da banda, dentre os quais existem alguns canais de controle e o resto utilizado para voz.

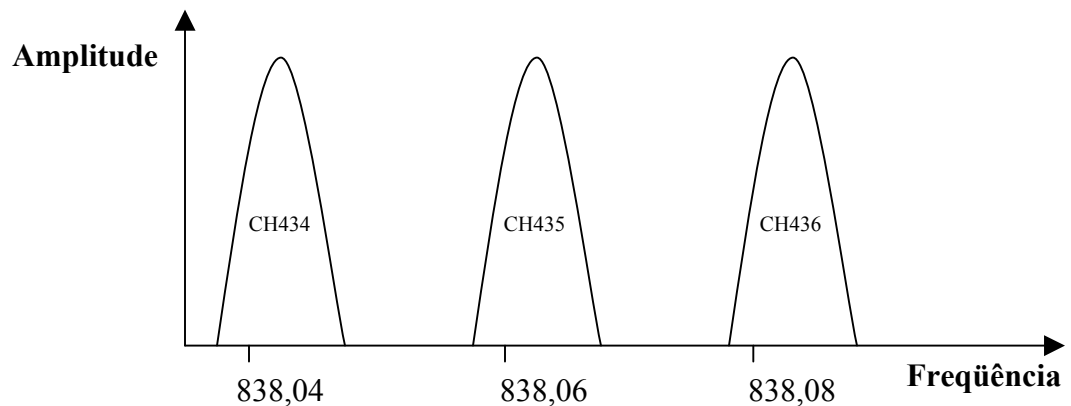


FIGURA 2.2: UTILIZAÇÃO DO ESPECTRO NO FDMA.

## **TDMA**

No método TDMA cada canal envia e recebe sinais de diferentes usuários ao mesmo tempo, porém para que isto seja possível estas informações são passadas em intervalos de tempo distintos. A cada instante uma mensagem é transmitida para um usuário, permanecendo em silêncio até chegar a sua vez novamente. Com isso é necessário um algoritmo eficiente de codificação da fala e modulação para que esta interrupção não atrapalhe a comunicação entre os usuários (Dornan 2001). A Figura 2.3 mostra a representação da divisão no TDMA

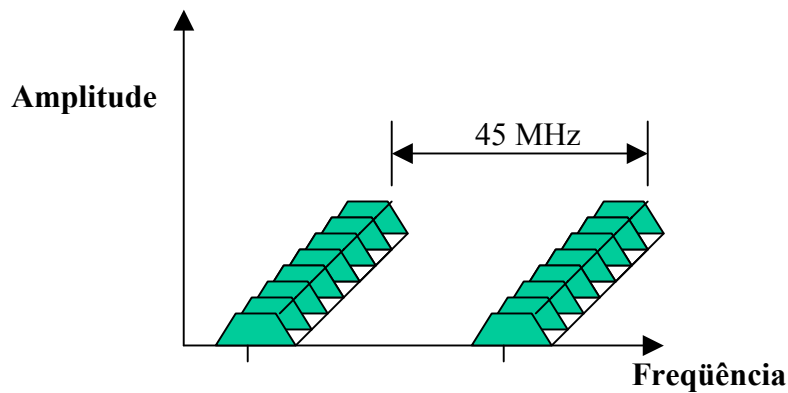


FIGURA 2.3: UTILIZAÇÃO DO ESPECTRO NO TDMA.

## CDMA

Tecnologia desenvolvida a partir da 2<sup>a</sup>. Guerra Mundial para evitar a identificação do conteúdo das mensagens, o método CDMA gerava vários ruídos aleatórios que na realidade eram decifrados apenas pelo receptor. Isto foi possível por causa do desenvolvimento da tecnologia *Spread Spectrum* (espalhamento espectral). O tipo de *Spread Spectrum* utilizado pelos aparelhos celulares é o *DSSS* (Direct Sequence Spread Spectrum) que utiliza largura de banda de 1,25 MHz (Dornan 2001).

No sistema CDMA, cada banda pode ser ocupada por diferentes usuários, mas o que diferencia os sinais é utilização de ondas (sinais) ortogonais, que sendo desta forma, evitam que haja a interferência entre eles quando cruzados (Yang 1998).

## **2.2 Elementos básicos de uma rede**

A estrutura que compõe toda a rede de telefonia celular deve ser capaz de fazer a conexão entre os assinantes da rede fixa e móvel, mantendo a qualidade e as informações necessárias para que sejam feitas estatísticas e taxações de cada assinante.

Cada célula é essencialmente um centro de comunicação de rádio, onde o assinante estabelece uma chamada através de uma *BTS* (antena). O sinal gerado pelo assinante é passado para uma *MSC* que irá enviá-lo para a rede fixa ou para outra rede móvel.



A grande vantagem do aparelho móvel celular é o fato do usuário poder se locomover, porém para que isto seja possível é necessário que ele esteja em uma área coberta por uma célula (antena). Quando este usuário ultrapassa o limite de transmissão desta célula, o sistema imediatamente contacta a *MSC* para identificar a nova célula de auxílio ao usuário. O processo de troca de estação base responsável por este sinal é chamado de *handoff* ou *handover*, porém isto só é possível se a célula vizinha contiver canais disponíveis para que a chamada seja alocada. A locomoção de um assinante para fora da área atendida por sua operadora causa um *roaming*, ou seja, a *MSC* responsável pela transmissão e recepção do sinal do assinante deve ser modificada.

A quantidade de estações base que são instaladas em uma determinada área determina a sua cobertura. Diversos fatores influenciam nesta tomada de decisão, como as características topográficas, a frequência de operação, altura das antenas, e principalmente o tráfego gerado na região (demanda de envio de sinais).

A área de cobertura de cada célula é dimensionada através do cálculo da demanda de assinantes que necessitam fazer as suas ligações. Como a faixa de frequência é dividida em vários canais e cada um é alocado para um número limitado de acessos, quanto maior a área coberta, maior o número de assinantes contidos na célula, podendo ocasionar um número de canais insuficientes para atender todos os usuários que desejam realizar uma conexão na rede ao mesmo tempo.

A Figura 2.4 ilustra os elementos de uma rede de telefonia móvel celular.

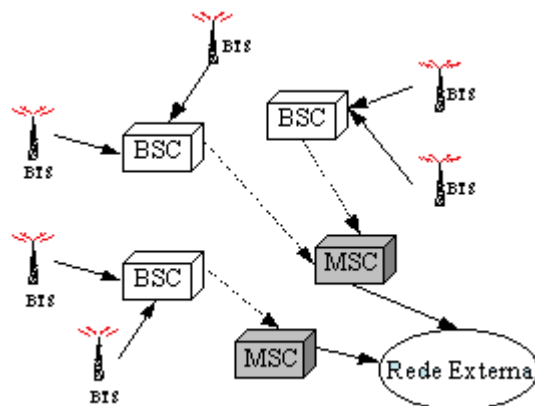


FIGURA 2.4: EXEMPLO DE UMA REDE TELEFONIA MÓVEL CELULAR (GSM).

### **2.2.1 Unidade Móvel**

Este elemento é o equipamento terminal do assinante e é responsável pela comunicação com as células. Ele opera no sistema *full-duplex* e há 45 MHz de isolamento entre a faixa de envio e a de recepção para proteger a interferência dos canais alocados. Cada aparelho tem um número de identificação que é passado para as MSCs quando há uma tentativa de conexão com a rede móvel.

### **2.2.2 Base Transceiver Station (BTS)**

Este elemento se localiza no centro de cada célula e é o responsável por receber e retransmitir as mensagens para as unidades móveis. Ela é instalada em prédios ou morros e contém várias antenas em sua estrutura.

### **2.2.3 Base Station Controller (BSC)**

Responsável pelo recebimento dos sinais vindos das BTSs conectadas à BSC ou envio das informações vindas de outras BTSs, direcionadas para as BTSs conectadas a esta BSC. Este elemento da rede é instalado a alguns quilômetros das BTSs permitindo que várias se conectem a uma BSC. Esta conexão pode ser feita por via terrestre (cabos de cobre ou fibra óptica) ou rádio.

### **2.2.4 Mobile Switching Center (MSC)**

A MSC é o componente da rede móvel celular responsável pelo rastreamento de usuários e pelo envio de chamadas, quando necessário (Dornan 2001). Outras funções relacionadas às MSCs são seguintes:

- ◆ Oferecer suporte para as mais diversas tecnologias como *AMPS*, *TDMA*, *CDPD* e *CDMA* (descritas a seguir).
- ◆ Realizar a conexão com a rede fixa.
- ◆ Identificar o registro do assinante que está fazendo a chamada (Home Location Register – HLR).
- ◆ Manter informações sobre os assinantes que estejam fazendo o processo de roamings (Visitor Location Register - VLR).
- ◆ Realizar processamentos de chamadas.
- ◆ Taxar e medir a ligações.

Cada usuário é cadastrado em uma MSC, chamada de MSC *local*, que armazena todos os dados relativos ao usuário.

### **2.3 Redes Celulares de Segunda Geração (2G) e Geração 2,5**

A segunda geração de celulares utiliza o sistema comunicação digital. Ao contrário da primeira geração que utiliza sinais analógicos. Os sistemas digitais maximizam a utilização do espectro utilizando os métodos TDMA e CDMA, além do FDMA. As principais vantagens do sistema digital são:

- Resistência a ruído;
- Resistência à linha cruzada;
- Correção de erros
- Regeneração de sinais;
- Sinais criptografados (maior segurança).

Os sistemas 2,5G aproveitam a rede 2G com o intuito de proporcionar altas transferências de dados por meio de modificações das redes digitais (2G).

Diferentemente do que ocorre com o padrão de *circuito comutado* utilizado nos padrões da 2G, ocupado constantemente por um usuário quando é feita uma conexão deste com a rede móvel, a geração 2,5 introduz o conceito de *comutação por pacotes*, que conecta em um mesmo canal vários usuários, porém alternando a transmissão de informações de acordo com a necessidade de cada usuário, otimizando a eficiência da utilização de cada canal. Este método de envio de informações é realizado através do empacotamento de informações que um canal que poderia estar sendo utilizado para outras aplicações quando ocioso.

A seguir são descritas algumas tecnologias classificadas como 2G e 2,5G.

### **2.3.1 D-AMPS**

Esta tecnologia foi desenvolvida para ser compatível com o AMPS. O D-AMPS (Digital Advanced Mobile Phone System) utiliza os mesmos canais de frequência, contudo divide cada canal em seis *time slots*, gerando assim um melhor aproveitamento do espectro.

### **2.3.2 GSM**

No início dos anos 80, a Europa utilizava o padrão analógico com padrões distintos para cada região, o que impossibilitava a continuação da transmissão caso houvesse um deslocamento do usuário da área onde estava cadastrado (roaming). Foi a partir deste momento que se começou a pensar em um padrão que integrasse todos os países da Europa. Em 1991 surgiu o GSM (Global System for Mobile Communications) utilizando a tecnologia digital propiciada pelo método de acesso TDMA. Este padrão começou a operar na faixa 890-915 MHz na transmissão de recepção e 935-960 MHz na transmissão da unidade móvel para a estação radio base, divididos em faixas de 200 Khz.

A velocidade de transmissão que o GSM proporciona, e a segurança nas transmissões como na cobrança correta das tarifas, fizeram com que este sistema rapidamente se popularizasse. A taxa de interferência em relação aos sistemas anteriores caiu pela metade, ocasionando um aumento de eficiência em relação ao uso do espectro e no número de estações base que podem cobrir um assinante.

### **2.3.3 cdmaOne**

Tentando obter uma alternativa mais eficiente que o AMPS e ao mesmo tempo concorrendo com a solução encontrada pelos europeus (GSM), os Estados Unidos, mais precisamente a Qualcomm, desenvolveu um novo padrão que utilizava a tecnologia CDMA. Com esta tecnologia era possível a ampliação do número de usuários que poderiam se conectar a rede ao mesmo tempo, utilizando faixas de tamanho 1,25 MHz sendo diferenciados através de códigos distintos.

### **2.3.4 GPRS**

Um dos sistemas classificado como pertencente à geração 2,5 é o GPRS, proporcionando ao usuário uma taxa de transferência de até 115,2 kbps. Esta rede utiliza a comutação por pacotes, aproveitando o espectro para o envio de dados e voz de uma maneira mais eficiente do que a que ocorre na geração 2G. Esta rede compartilha da interface aérea e a parte fixa são acrescentados outros elementos.

## **2.4 Terceira Geração (3G)**

Visando o máximo de oportunidades que a Internet pode proporcionar, uma nova geração de sistemas celulares, chamada de terceira geração (3G), foi desenvolvida. O termo 3G foi definido originalmente como sendo qualquer padrão capaz de fornecer aos usuários

móveis o desempenho das redes ISDN ou superior (144 kbps) (Dornan 2001). Independente do equipamento que o usuário esteja utilizando, estes padrões devem fornecer velocidades ISDN a todos eles (Ojanperä 1998; Holma 2000).

O ITU (International Telecommunications Union), órgão internacional responsável pelo espectro de rádio, vinculado às Nações Unidas como agência, determinou através do IMT-2000 (International Mobile Telecommunications) a seguinte representação da rede mundial até o ano 2000 (ITU-T 2000):

- Sistema capaz de transferir dados a uma taxa de 2000 kbps;
- Faixa de frequência na região de 2 GHz para todas as novas tecnologias.

Estes requisitos não foram atingidos até o momento, e nem todos os países alocaram a faixa sugerida para a 3G. Contudo, vários serviços foram requeridos para que futuramente um sistema seja considerado 3G:

- **Voz:** qualidade igual ou superior à oferecida pela rede fixa;
- **Mensagens:** sistema parecido com os equipamentos *paging*;
- **Comutação de dados por pacotes:** mesma tecnologia utilizada pela geração 2,5;
- **Meio de multimídia:** serviços utilizando as aplicações disponíveis na Internet.

## 2.5 Planejamento de Redes Móveis Celulares

O planejamento otimizado de redes móveis celulares é uma atividade complexa, necessitando portanto de metodologias e ferramentas de apoio, tanto para fornecedores como para as empresas operadoras (Dravida 1998). Em função desta complexidade, o planejamento pode ser decomposto em várias etapas, tais como: definição dos serviços a

serem fornecidos, definição do sistema que suportará tais serviços, caracterização do tráfego por serviço, predição de cobertura e cálculo da infra-estrutura da rede. A cada uma destas etapas podem estar associadas uma ou mais ferramentas de apoio.

Tanto para a parcela da rede que suporta a comutação de circuitos (2G), quanto para a parcela que suporta a comutação de pacotes (2,5G e 3G), a etapa de determinação da infra-estrutura de rede pode ser dividida nas seguintes atividades:

- *Simulação do tráfego*: utilizando ferramentas de simulação de rede, como por exemplo o OPNET (Chang 1999), realiza-se a simulação do tráfego com o objetivo de determinar a demanda entre os nós da rede e a localização das BTSs tentando maximizar a sua utilização.
- *Localização dos nós*: uma vez determinada a demanda entre os nós, utiliza-se um modelo matemático de otimização para localizar e dimensionar os nós, tais como as MSCs e BSCs.
- *Interconexão dos nós*: com os resultados obtidos nas atividades anteriores, um outro modelo matemático de otimização realiza a interconexão entre os nós, considerando as tecnologias disponíveis (DeSousa 2000).

O trabalho corrente aborda a etapa de *Localização de nós* e o capítulo a seguir, descreve o modelo representando uma rede de segunda geração.

## Capítulo 3

### Modelo Matemático

Este capítulo apresenta um modelo matemático de otimização para o problema abordado neste trabalho. O modelo é então utilizado para gerar soluções ótimas para alguns cenários de uma rede correspondente a uma cidade de porte médio para grande.

#### 3.1 Descrição do Problema

Como descrito no capítulo anterior, a infra-estrutura da rede celular é composta de diversos elementos, e os mais relevantes dos pontos de vista funcional e de custo são as BTSs, BSCs, MSCs e os equipamentos de transmissão. Tais elementos são considerados na modelagem do problema.

O problema consiste em planejar a infra-estrutura da rede celular de forma a minimizar o custo total de implantação. Este custo está associado à localização e dimensionamento das BSCs e da MSCs e à interconexão entre estes elementos e entre as BTSs e as BSCs. Esta interconexão está limitada por uma distância máxima que limita o alcance de transmissão de informações entre dois elementos da rede, que difere da tecnologia adotada. A definição de qual tecnologia será instalada para interconectar cada elemento da rede é abordada em outros trabalhos, sendo neste ignorada.

Numa rede celular, todo o tráfego gerado nas BTSs é direcionado para as BSCs e, em seguida, para as MSCs. Em alguns casos, o tráfego gerado em uma BTS é encaminhado para outra BTS e a partir daí para uma BSC e, em seguida, para uma MSC. De qualquer forma, todo o tráfego é encaminhado para as MSCs. Essa particularidade permite que um grafo orientado (Bazaraa 1990) seja usado para representar a infra-estrutura da rede celular.



## 3.2 Modelo de Fluxos em Redes

O grafo representativo da infra-estrutura da rede celular é composto por:

*Nós de demanda:* são nós onde as demandas são geradas. Neste modelo esses nós representam as BTSs.

*Nós sumidouros:* são nós para os quais é direcionado todo o tráfego gerado nas BTSs; representam as MSCs.

*Nós de transbordo:* são nós que recebem o tráfego dos nós de demanda (BTSs) e o encaminham para os nós sumidouros (MSCs); representam as BSCs.

*Arcos de interconexão BTSs - BSCs e BSCs - MSCs:* são as opções de conexão entre os elementos da rede.

A estrutura do grafo utilizado é apresentada na Figura 3.1.

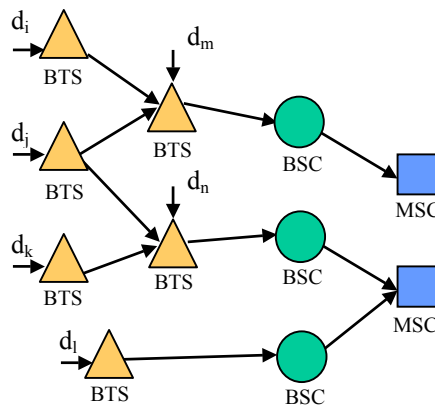


FIGURA 3.1: REPRESENTAÇÃO EM GRAFO SENDO AS DEMANDAS INDICADAS PARA CADA BTS.

Neste trabalho, optou-se por adotar canais E1 (2048 kbps) como unidade de demanda gerada quando o assinante está conectado na rede. Estas informações devem ser transmitidas pela rede, passando pelas BSCs até chegarem às MSCs.

### 3.3 Formulação Matemática

A partir do grafo acima, pode-se formular um modelo matemático de *Programação Linear Mista com Variáveis 0-1*.

**Função objetivo**: custo total de implantação de MSCs e BSCs, assim como o custo de conexão (aluguel de canais  $El$ ) entre as BTSs, da BTS até as BSCs, e finalmente entre as BSCs e MSCs.

Minimizar o custo da rede =

$$\sum_{j \in J, m \in M} F_j^m z_j^m + \sum_{i \in I, b \in B} G_i^b y_i^b + \sum_{(t, t') \in \theta} \gamma_{tt'} \xi_{tt'} u_{tt'} + \sum_{(t, i) \in X} \psi_{ti} \phi_{ti} x_{ti} + \sum_{(i, j) \in K} \rho_{ij} \pi_{ij} v_{ij}$$

sujeito a:

**Existência de fluxo entre as BTSs**: a transferência de dados de uma BTS para outra BTS fica condicionada à existência de fluxo neste arco.

$$u_{tt'} \leq N \cdot g_{tt'}, \quad \forall (t, t') \in \theta$$

**Unicidade da comunicação entre a BTS e outro elemento (BTS ou BSC)**: uma BTS deve enviar informações para apenas um elemento (BTS ou BSC).

$$\sum_{t' \in T} g_{tt'} + \sum_{i \in I} f_{ti} = 1, \quad \forall t \in T$$

**Balaceamento de fluxo nos nós BTSs:** esta restrição exige que uma solução transfira todos os feixes que se encontram na BTS. A primeira parcela informa a quantidade de demanda da BTS em questão, adicionada das informações originadas de outras BTSs que são enviadas para esta BTS. A segunda parcela é composta por variáveis informando o destino (outra BTS ou BSC) da demanda gerada na BTS;

$$D_t + \sum_{t' \in T} u_{t't} = \sum_{t' \in T} u_{tt'} + \sum_{i \in I} x_{ti}, \quad \forall t \in T$$

**Existência de fluxo entre as BTSs e as BSCs:** a transferência de dados de uma BTS para uma BSC fica condicionada à existência de fluxo neste arco.

$$x_{ti} \leq N.f_{ti}, \quad \forall (t, i) \in X$$

**Limitação das BSC:** A quantidade de informação que cada BSC pode receber é condicionada à capacidade do padrão escolhido para ser implantado.

$$\sum_{t \in T} x_{ti} \leq \sum_{b \in B} y_i^b Capb_i^b, \quad \forall i \in I$$

**Unicidade do padrão para cada BSC instalada**

$$\sum_{b \in B} y_i^b \leq 1, \quad \forall i \in I$$

**Balaceamento de Fluxo nos nós BSCs:** todo o fluxo de feixes que passa por uma determinada BSC é transferido para alguma MSC.

$$\sum_{t \in I} x_{ti} = \sum_{j \in J} v_{ij}, \quad \forall i \in I$$

**Unicidade da comunicação entre as BSCs e a MSC:** assim como as BTSs, as BSCs são obrigadas a se comunicarem com apenas uma MSC.

$$\sum_{j \in J} h_{ij} \leq 1, \quad \forall i \in I$$

**Existência de fluxo entre as BSCs e as MSCs:** a transferência de dados de uma BSC para uma MSC fica condicionada à existência de fluxo neste arco.

$$v_{ij} \leq N \cdot h_{ij}, \quad \forall (i, j) \in K$$

**Limitação das MSC:** A quantidade de informação que cada MSC pode receber é condicionada à capacidade do padrão escolhido para ser implantado.

$$\sum_{i \in I} v_{ij} \leq \sum_{m \in M} z_j^m \text{Cap}m_j^m, \quad \forall j \in J$$

**Unicidade do padrão determinado para cada MSC instalada**

$$\sum_{m \in M} z_j^m \leq 1, \quad \forall j \in J$$

onde:

♦ **Conjuntos:**

***T*** : conjunto dos nós associados às BTSs;

***I*** : conjunto dos nós candidatos à instalação de uma BSC;

***J*** : conjunto dos nós candidatos à implantação de uma MSC;

***B*** : conjunto contendo os padrões associados (diferentes tecnologias com capacidades e custos distintos) de BSC que podem ser instaladas;

***M*** : conjunto contendo os padrões associados (diferentes tecnologias com capacidades e custos distintos) de MSC que podem ser instaladas;

***θ*** : conjunto de arcos do grafo associando as BTSs que podem ser conectadas a outras BTSs;

***X*** : conjunto de arcos do grafo associando as BTSs que podem ser conectadas às BSCs;

***K*** : conjunto de arcos do grafo associando as BSCs que podem ser conectadas às MSCs.

◆ **Parâmetros:**

$F_j^m$  : custo fixo associado à implantação de uma MSC  $j$  de padrão  $m$ ;

$G_i^b$  : custo fixo associado à implantação de uma BSC  $i$  de padrão  $b$ ;

$\gamma_{tt'}$  : custo associado ao metro linear de feixe no arco  $(t, t') \in \theta$ ;

$\xi_{tt'}$  : comprimento (distância) do arco  $(t, t') \in \theta$ ;

$\psi_{ii}$  : custo associado ao metro linear de feixe no arco  $(t, i) \in \chi$ ;

$\varphi_{ii}$  : comprimento (distância) do arco  $(t, i) \in \chi$ ;

$\rho_{ij}$  : custo associado ao metro linear de feixe no arco  $(i, j) \in \kappa$ ;

$\pi_{ij}$  : comprimento (distância) do arco  $(i, j) \in \kappa$ ;

$D_t$  : demanda de feixes para cada estação base  $t$ ;

$Capb_i^b$  : capacidade de feixes que podem ser escoados até a BSC  $i$  utilizando o padrão  $b$ ;

$Capm_j^m$  : capacidade de feixes que podem ser escoados até a MSC  $j$  utilizando o padrão  $m$ ;

$N$  : número real grande.

◆ **Variáveis:**

$z_j^m$  : variável binária associada à implantação de uma MSC  $j$  de capacidade definida pelo padrão  $m$ ;

$y_i^b$  : variável binária associada à implantação de uma BSC  $i$  de capacidade definida pelo padrão  $b$ ;

$u_{tt'}$  : variável real não negativa associada ao fluxo que escoar da BTS  $t$  até outra BTS  $t'$ ;

$x_{ti}$  : variável real não negativa associada ao fluxo que escoar da BTS  $t$  até a BSC  $i$ ;

$v_{ij}$  : variável real não negativa associada ao fluxo que escoar da BSC  $i$  até a MSC  $j$ ;

$g_{tt'}$  : variável binária associada ao fluxo no arco  $(t,t') \in \theta$ , sendo 1 caso haja fluxo de dados, e 0, caso contrário;

$f_{ti}$  : variável binária associada ao fluxo no arco  $(t,i) \in \mathbf{X}$ , sendo 1 caso haja fluxo de dados, e 0, caso contrário;

$h_{ij}$  : variável binária associada ao fluxo no arco  $(i,j) \in K$ , sendo 1 caso haja fluxo de dados, e 0, caso contrário.

### 3.4 Utilização do Modelo

O planeamento da infra-estrutura de uma rede móvel deve ser posterior à etapa de predição de cobertura, na qual são localizadas as BTSs que atenderão a demanda da área planejada. A quantidade de BTSs e sua localização constituem dados de entrada para o planeamento da infra-estrutura. Além destes, o planeador deve fornecer os custos dos equipamentos (BSCs e MSCs), de transmissão (aluguel de canais E1, por exemplo) e de infra-estrutura de instalação.

De acordo com as características da área em estudo, o planeador deverá escolher alguns pontos candidatos à instalação de BSCs e de MSCs. Em seguida, ele deverá propor alternativas de interconexão das BTSs às BSCs e das BSCs às MSCs, constituindo várias topologias de atendimento à demanda. Esses procedimentos podem ser feitos de forma manual ou, em certa medida, incorporados a um gerador automático de propostas baseado em métodos ótimos ou heurísticos.

Uma vez resolvido o problema, o planeador tem uma definição do número e da localização das MSCs e BSCs. A próxima etapa do trabalho é realizar a interconexão dos nós de forma mais detalhada, considerando, se possível, as diferentes tecnologias de transmissão. Para isso, podem ser utilizados os modelos propostos por DeSousa (2000) e DeSousa (2001).



### 3.5 Cenários Estudados

A fim de exemplificar a aplicação do modelo, utilizou-se uma rede correspondente à de uma cidade de porte médio para grande para os padrões brasileiros. Essa rede é composta por 43 BTSs com demandas variando de 1 a 4 canais E1.

Tanto para as BSCs como para as MSCs, consideraram-se três modularidades de equipamentos. Os custos e as capacidades desses elementos são apresentados nas Tabelas 3.1 e 3.2.

TABELA 3.1: CUSTO E CAPACIDADE DAS BSCs.

Modularidade	Capacidade (em canais E1) $Capb_i^b$	Custo de instalação da BSC - $G_i^b$
TB1	32	15
TB2	16	10
TB3	8	7,5

TABELA 3.2: CUSTO E CAPACIDADE DAS MSCs.

Modularidade	Capacidade (em canais E1) $Capm_j^m$	Custo de instalação da MSC - $F_j^m$
TM1	120	250
TM2	80	200
TM3	40	150

Em relação aos custos dos sistemas de transmissão, considerou-se que esses elementos são alugados pela empresa operadora e que o custo varia em função da distância, independente dos elementos que estão sendo conectados e da tecnologia que está sendo

instalada. Isto é ilustrado na Figura 3.2. O custo do aluguel de um canal E1 é adotado como custo de referência.

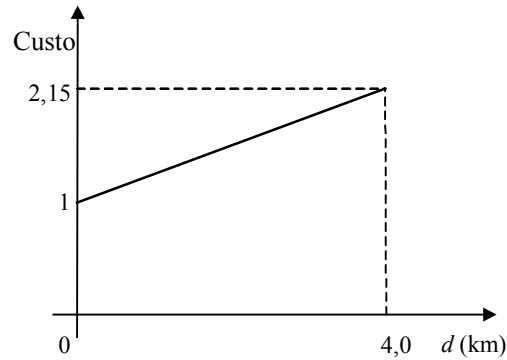


FIGURA 3.2: CUSTOS DOS SISTEMAS DE TRANSMISSÃO POR CANAL E1.

A Figura 3.3 ilustra a rede usada como exemplo. Foram considerados 5 locais candidatos a BSCs e outros 5 candidatos a MSC. Para as BTSs localizadas na parte central, foram adotadas demandas que variam de 2 a 4 canais E1 e, nas demais, apenas 1 canal E1.

Utilizou-se a linguagem de programação matemática AMPL e o pacote de otimização CPLEX<sup>®</sup> para, respectivamente, construir o modelo e resolver o problema matemático associado.

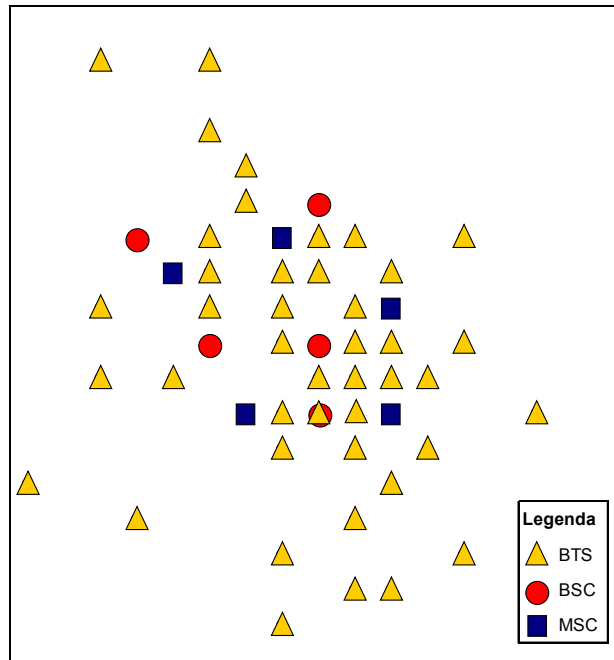


FIGURA 3.3: LOCALIZAÇÃO DAS BSCs E MSCs CANDIDATAS E BTSS CONSIDERADAS.

### 3.6 Cenários Estudados

Diversos estudos podem ser realizados a partir do modelo proposto. Utilizando os dados de rede e das tecnologias descritas acima, apresenta-se aqui o resultado de um estudo composto por 2 cenários contendo cada um 2.119 variáveis binárias (15 variáveis  $z_j^m$ , 15  $y_i^b$ , 1849  $g_{it}$ , 215  $f_{ii}$  e 25  $h_{ij}$ ):

- *Cenário 1*: considera-se que as BTSs já estão instaladas, mas as MSCs, as BSCs e as conexões não estão. As demandas apresentadas às BTSs correspondem ao tráfego gerado numa cidade de porte médio para grande no presente momento. O total das demandas nas BTSs é de 54 canais E1.
- *Cenário 2*: considera-se que a demanda gerada nas BTSs aumentará em média 50% em relação ao cenário 1 no período de 3 anos. Esse valor representa a projeção de demanda neste período (<http://www.mc.gov.br>). Admite-se também que as BSCs e MSCs da solução do cenário 1 já estão instaladas. O total das demandas nas BTSs é de 82 canais E1.

### 3.7 Análise das Soluções

As Figuras 3.4 e 3.5 ilustram as soluções obtidas para os cenários 1 e 2, respectivamente. As soluções necessitaram de aproximadamente 5 minutos para serem geradas em uma máquina PC Pentium II 233 MHz.

Pode-se observar na Figura 3.4, que na solução obtida para o cenário 1 há uma concentração do tráfego em duas MSCs passando por duas BSCs. Verifica-se que cada BSC conecta-se à MSC mais próxima e que os elementos BSC e MSC escolhidos são as de maior capacidade. Esta escolha pode ser explicada pelo fato de que o acréscimo de custo fixo em relação aos canais E1 que a MSC e a BSC suportam, diminui à medida que aumenta a capacidade total.

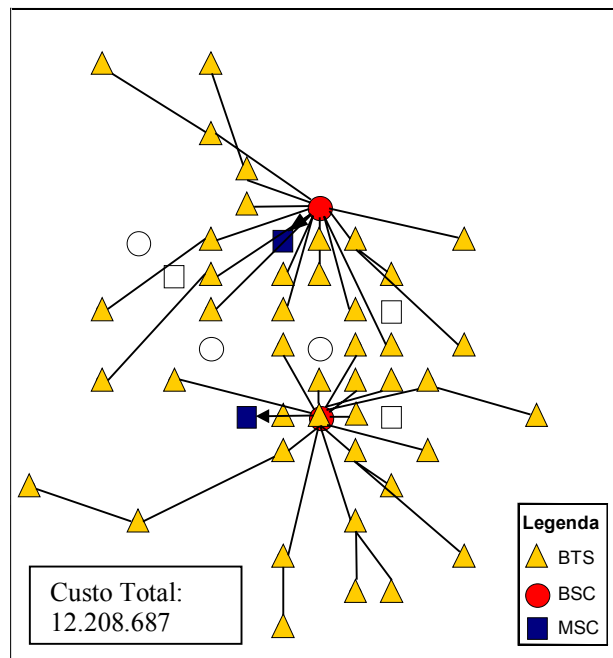


FIGURA 3.4: SOLUÇÃO OBTIDA PARA O CENÁRIO 1.

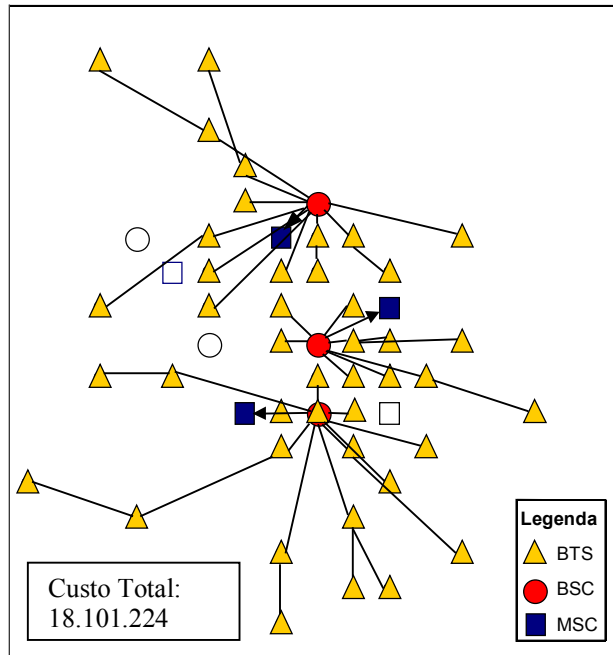


FIGURA 3.5: SOLUÇÃO OBTIDA PARA O CENÁRIO 2.

No cenário 2, ao aumento da demanda corresponde um aumento no número de BSCs e MSCs, sempre seguindo o comportamento de se conectar aos elementos mais próximos, como no cenário 1. A nova rede é composta de três BSCs e três MSCs, todas de modularidade 1, ou seja, a com maior capacidade.

### 3.8 Conclusões

Do ponto de vista computacional, o desempenho do modelo em resolvedores comerciais é bastante condicionado pelo número de variáveis de decisão e de restrições. Nos casos apresentados neste capítulo, a ferramenta computacional demonstrou rapidez na resolução dos casos. Todavia nos casos extremos, considerando uma região contendo várias cidades, o número de variáveis aumenta consideravelmente devido ao excessivo número de locais candidatos à instalação de novos elementos (BSC e MSC), e assim as respostas podem ficar lentas e há a pertinência de se utilizar métodos heurísticos para se alcançar

uma solução satisfatória num tempo aceitável. No próximo capítulo são propostas heurísticas para o problema abordado.

## Capítulo 4

### Heurística Construtiva e de Melhoria

O problema abordado neste trabalho é um problema complexo de projeto em redes envolvendo a localização de dois tipos de facilidades (BSCs e MSCs), determinação da capacidade destas facilidades, e a determinação da topologia de conexão entre os elementos da rede. Problemas de localização e métodos de resolução são apresentados em (Mirchandani e Francis, 1990) e Daskin (1995). Current et al. (2001) apresentam uma resenha com o desenvolvimento da área. Em problemas clássicos de localização, tais como localização de facilidades com restrição de capacidade e fluxo em rede com custo fixo nos arcos a topologia da rede é dada. No entanto, como destacado por Melkote e Daskin (2000), problemas que combinam a localização de facilidades e projeto de redes são úteis para modelar situações onde *tradeoffs* entre custos de instalação de facilidades, custos de projeto de redes e custos de operação devem ser feitos. Estas situações ocorrem, por exemplo, em sistemas de telecomunicações, energia, transporte e distribuição. Este enfoque é muito recente e segue uma tendência geral em diversas áreas (por exemplo, *supply chains*) de construir modelos que relacionem diversos tipos de decisão. Melkote e Daskin (2000, 2001) apresentam modelos matemáticos para problemas sem e com restrição de capacidade das facilidades, que são resolvidos em softwares comerciais.

O problema tratado neste trabalho possui a mesma combinação acima mencionada, com uma decisão adicional que consiste em determinar a capacidade das facilidades. É óbvio que uma solução ótima para um modelo matemático que integra decisões só pode ser obtida para problemas de tamanho relativamente pequeno, e no caso de problemas de médio e grande parte deve-se recorrer a métodos heurísticos para a obtenção de uma solução sub-ótima em tempo computacional viável.

Neste capítulo são propostas uma heurística construtiva e uma heurística de melhoria, criadas para representar a rede enunciada no capítulo anterior. Os resultados

obtidos neste capítulo servirão de auxílio para a aplicação de uma meta-heurística tratada no próximo capítulo.

## 4.1 Heurística Construtiva

A seguir, é descrita uma heurística que constrói uma solução factível de partida para uma heurística de melhoria descrita na próxima seção. A construção desta solução inicial é feita em duas etapas. A primeira trata da conexão das BTSs entre si e das BTSs com as BSCs. A segunda trata o problema de conexão das BSCs até as MSCs. Para a descrição das heurísticas considere a seguinte notação:

*Conjuntos:*

- $T$  : conjunto contendo todas as BTSs;
- $\delta$  : subconjunto de  $T$  tal que o local candidato à instalação da BSC mais próxima exceda a distância máxima permitida para a conexão entre dois elementos da rede;
- $\varepsilon$  : subconjunto de  $T$  tal que o local candidato à instalação da BSC mais próxima não exceda a distância máxima permitida;
- $I$  : conjunto contendo todos os locais candidatos à instalação de uma BSC;
- $J$  : conjunto contendo todos os locais candidatos à instalação de uma MSC;
- $B$  : conjunto contendo os padrões (diferentes tecnologias com capacidades e custos distintos) de BSC que podem ser instaladas;
- $M$  : conjunto contendo os padrão de MSC que podem ser instaladas;

◆ *Parâmetros:*



- $\alpha$  : custo unitário de transmissão de uma unidade de demanda;
- $D_t$  : demanda da BTS  $t$ ;
- $d_{tt'}$  : distância da BTS  $t$  à BTS  $t'$ ;
- $\varphi_{ti}$  : distância da BTS  $t$  à BSC  $i$ ;
- $\pi_{ij}$  : distância da BSC  $i$  até a MSC  $j$ ;
- $G_i^b$  : custo de instalação da BSC  $i$  com o padrão  $b$ ;
- $F_j^m$  : custo de instalação da MSC  $j$  com o padrão  $m$ ;

### ***Variáveis***

- $S_i$  : variável indicando quantas unidades de demanda estão sendo atendidas pela BSC  $i$ ;
- $R_j$  : variável indicando quantas unidades de demanda estão sendo atendidas pela MSC  $j$ .

O valor de ambas as variáveis é incrementado durante a heurística construtiva a cada conexão de um novo elemento. O valor destas variáveis determinará a necessidade ou não de ampliação da capacidade das BSCs e MSCs.

A heurística construtiva é dividida em duas etapas. A primeira conecta as BTSs às BSCs e a segunda define a conexão entre as BSCs e MSCs. A primeira etapa é composta por três procedimentos (classificação e conexão das BTSs) e a segunda por um procedimento (conexão das BSCs), como mostra a Figura 4.1.

## Heurística Construtiva: Procedimentos

```
Custo_atual  $\leftarrow$  0;  
Executa Classificação das BTSs;  
Executa Conexão das BTSs Críticas;  
Executa Conexão das BTSs Viáveis;  
Executa Conexão das BSCs;
```

FIGURA 4.1: PSEUDO-CÓDIGO DA HEURÍSTICA CONSTRUTIVA.

O primeiro passo da primeira etapa é identificar quais BTS não podem se conectar diretamente a alguma BSC devido à distância máxima de conexão entre dois elementos. As BTSs que não podem se conectar a uma BSC, chamadas de BTSs *críticas*, são então conectadas a outras BTSs que podem se conectar pelo menos a uma BSC. Estas últimas BTSs são chamadas de BTSs *viáveis*. Esta classificação das BTSs é mostrada na Figura 4.2.

## Procedimento: Classificação das BTSs

```
Para cada BTS  $t \in T$   
  Identificar a BSC  $i \in I$  mais próxima;  
fim do para;  
  Ordena o vetor por ordem decrescente de  $\varphi_{ii}$ ;  
Para cada BTS  $t \in T$   
  Se  $\varphi_{ii} > \text{distância\_limite}$  (BTS Crítica)  
     $\delta \leftarrow \delta + \text{BTS } i$ ;  
  Caso contrário (BTS Viável)  
     $\varepsilon \leftarrow \varepsilon + \text{BTS } i$ ;  
  fim do Se;  
fim do Para;
```

FIGURA 4.2: PSEUDO-CÓDIGO DA CLASSIFICAÇÃO DAS BTSs.

A ordenação acima divide as BTSs em dois grupos: *críticas* em primeiro lugar e a seguir as *viáveis*.

#### 4.1.1 Localização das BSCs e Conexão (1ª. Etapa)

##### Conexão das BTSs Críticas ( $\delta$ )

Cada BTS  $t \in \delta$  é conectada à BTS  $t' \in T$  mais próxima, não necessariamente uma BTS *viável*, e sua demanda adicionada à demanda da BTS  $t$ :

$$D_{t'} = D_{t'} + D_t$$

e o custo de conexão definido por

$$\text{custo} = \alpha * d_{tt'} * D_t$$

A ordenação de forma decrescente das distâncias das BTSs às BSCs mais próximas permite que as BTSs mais distantes se “aproximem” das BSCs, isto é, suas demandas sejam agregadas às BTSs mais próximas de alguma BSC, como é ilustrado na Figura 4.3.

### Procedimento: Conexão das BTSs Críticas

**Para** cada BTS  $i \in \delta$  faça  
  Identificar a BTS  $t' \in T$  mais próxima;  
  Conectar a BTS  $t$  à BTS  $t'$ ;  
   $D_{t'} \leftarrow D_{t'} + D_t$ ;  
  Custo\_atual  $\leftarrow$  Custo\_atual +  $\alpha * d_{tt'} * D_t$ ;  
   $\delta \leftarrow \delta - \text{BTS } t$ ;  
**fim do para**;

FIGURA 4.3: PSEUDO-CÓDIGO DA CONEXÃO DAS BTSs CRÍTICAS.

A Figura 4.4 ilustra a identificação de uma BTS *crítica* (BTS 1), pois não há a possibilidade de conexão com nenhuma BSC (BSC 1 e 2) diretamente, forçando a conexão da BTS 1 com a BTS 2 ou a BTS 3 para que sua demanda seja enviada para uma destas BSCs.

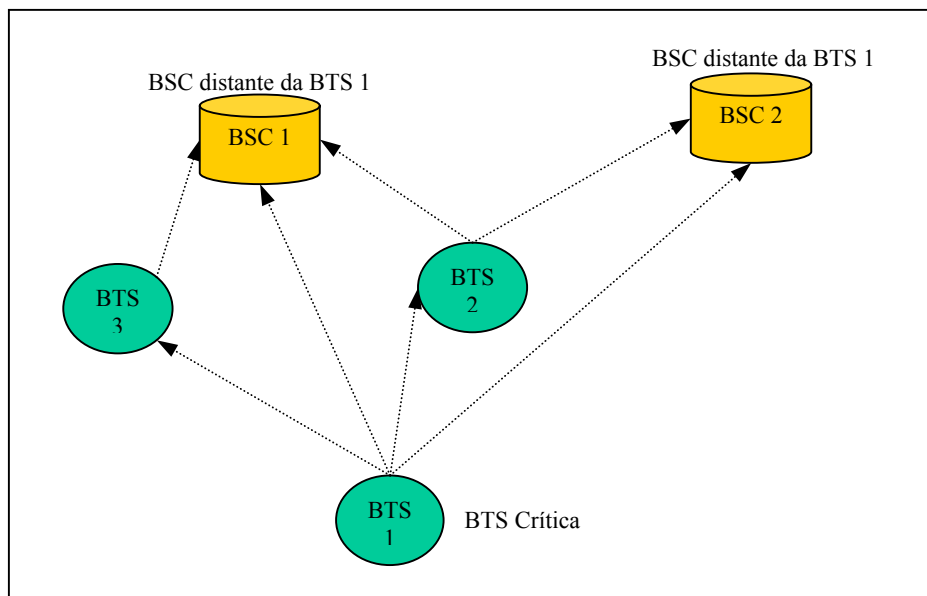


FIGURA 4.4: EXEMPLO DA IDENTIFICAÇÃO DE UMA BTS CRÍTICA E SUA CONEXÃO À REDE.

### **Conexão das BTSs Viáveis ( $\epsilon$ )**

A ordem de conexão destas BTSs segue o mesmo critério mencionado para as *BTSs críticas* (por distância). Definida esta ordem de conexão, as variáveis  $S_i$  são zeradas indicando que todas as BSCs candidatas estão desinstaladas. A Figura 4.5 ilustra o procedimento de conexão destas BTSs

## Procedimento: Conexão das BTSs Viáveis

```
 $S_i \leftarrow 0;$   
Para cada BTS  $t \in \mathcal{E}$  faça  
  Executa Cálculo dos Custos (BTS t);  
  Se não há uma BSC que possa ser conectada (BTS se torna Crítica)  
     $\mathcal{E} \leftarrow \mathcal{E} - \text{BTS } t;$   
     $\delta \leftarrow \delta + \text{BTS } t;$   
    Executa Conexão de BTSs Críticas;  
  Caso contrário  
    Conectar a BTS  $t$  à BSC  $i \in I$  (BSC com menor custo)  
     $S_i \leftarrow S_i + D_t;$   
     $\text{Custo\_atual} \leftarrow \text{Custo\_atual} + \alpha * \varphi_{ii} * D_t;$   
    Atualização da Capacidade da BSC;  
     $\mathcal{E} \leftarrow \mathcal{E} - \text{BTS } i;$   
fim do Se;  
fim do Para;
```

FIGURA 4.5: PSEUDO-CÓDIGO DA CONEXÃO DAS BTSS VIÁVEIS.

Cada elemento da lista de BTSs é conectado a uma BSC, porém é necessário que sejam avaliados três custos que estão relacionados à situação de cada BSC no momento de cada inserção de uma BTS e a definição da modularidade da BSC de acordo com a demanda da BTS que será inserida:

i) BSC não foi instalada:

$$\text{Custo 1} = \alpha * D_t * \varphi_{ii} + G_i^b;$$

ii) BSC foi instalada, e conexão da BTS não força a ampliação da estrutura (mudança de padrão) da BSC:

$$\text{Custo 2} = \alpha * D_t * \varphi_{ii};$$

iii) BSC foi instalada, porém a conexão da BTS força a ampliação da estrutura (mudança de padrão) da BSC:

$$\text{Custo 3} = \alpha * D_t * \varphi_{ii} + (G_i^{b\_escolhida} - G_i^{b\_anterior})$$

A Figura 4.6 ilustra o procedimento que calcula os custos de conexão para cada situação.

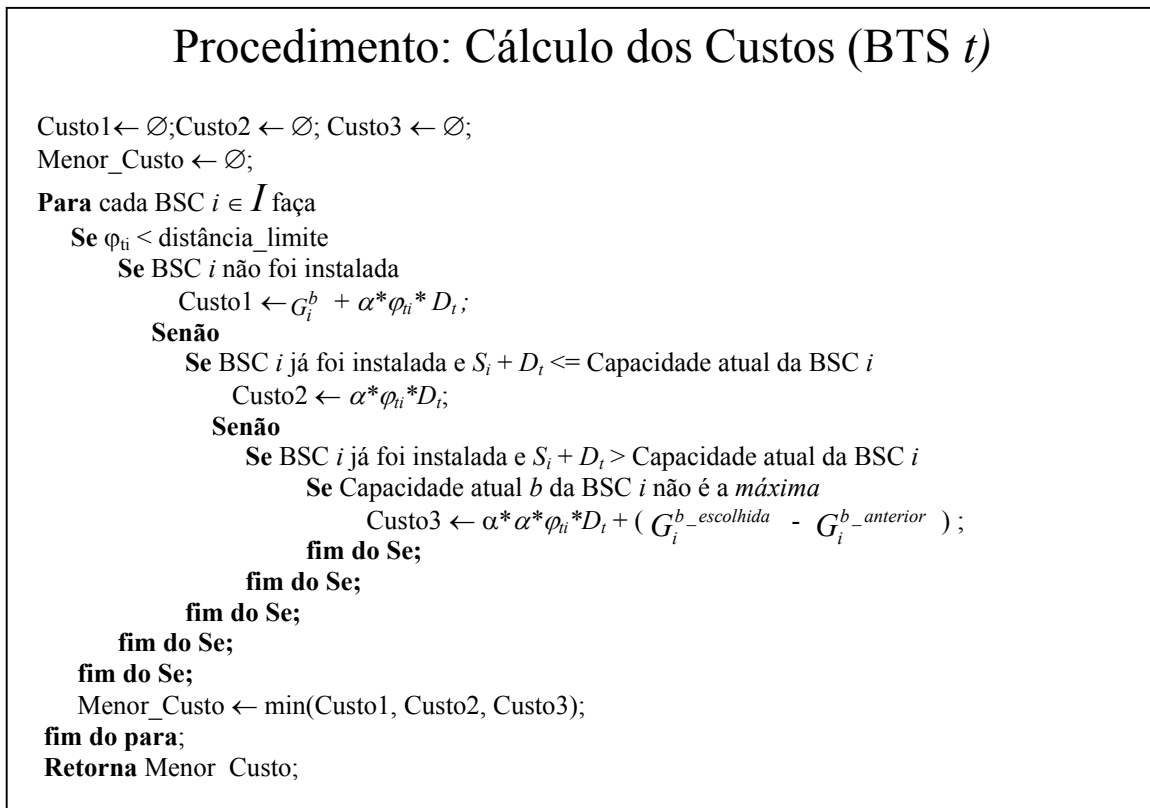


FIGURA 4.6: PSEUDO-CÓDIGO DO CÁLCULO DOS CUSTOS DE CONEXÕES DAS BTSS ÀS BSCs.

A Figura 4.7 mostra um passo do procedimento de conexão de uma BTS de demanda 2 em uma rede onde existem 4 BSCs. As BSCs 1, 2 e 3 podem ser conectadas à BTS em questão, porém a conexão com a BSC 4 é impossível devido a restrição de distância máxima. Os padrões definidos para as BSCs 2 e 3 no momento da conexão da BTS tem capacidades de receber 8 canais  $E1$  e ambas podem ser ampliadas caso a conexão da BTS force a isto.

Para o caso da BSC 1, ainda não instalada, o custo relacionado a esta conexão é o *custo 1*. A conexão com a BSC 2 não necessita que o padrão desta BSC seja modificado (ampliado), pois o incremento da demanda da BTS analisada não excede a capacidade do padrão atual da BSC 2 ( $5+2 < 8$ ). Neste caso o custo a ser calculado é o *custo 2*. E finalmente, a conexão relacionada à BSC 3 terá o seu padrão modificado (aumento de capacidade) por causa do excesso de canais conectados à BSC 3 com o atual padrão ( $7+2 > 8$ ), sendo assim necessário o cálculo do *custo 3*.

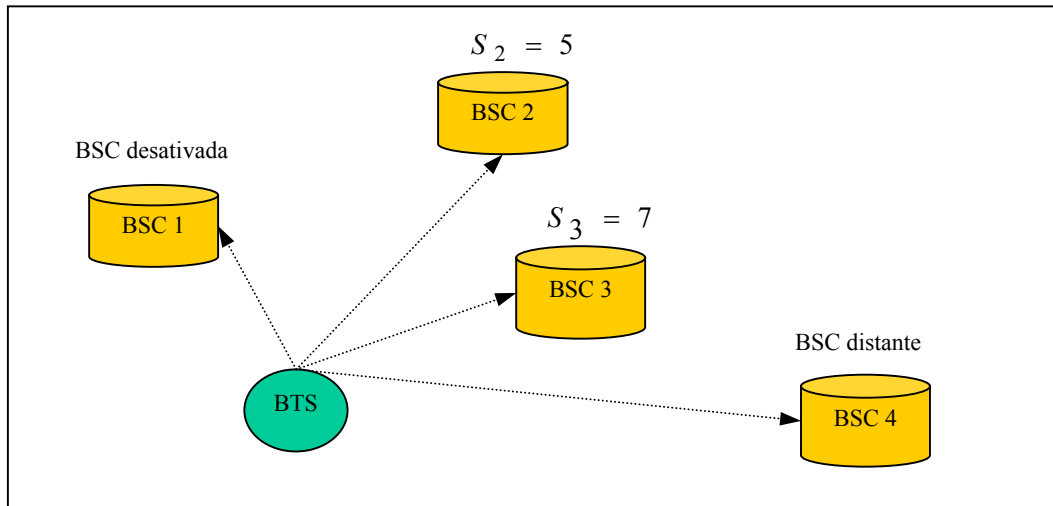


FIGURA 4.7: EXEMPLO DE UMA CONEXÃO DE UMA BTS VIÁVEL.

A cada passo tenta-se conectar uma BTS *viável* a uma BSC. No entanto, é possível que esta BTS, inicialmente viável, não possa se conectar a nenhuma BSC, pois todas as candidatas estão com a capacidade máxima atingida.

Neste caso, esta BTS deixa de ser *viável* e se transforma em uma BTS *crítica*. Esta BTS então deve ser conectada a outra BTS, verificando se esta BTS já está conectada a um ramo da rede que está conectado a uma BSC, e caso isto seja verdadeiro, verificar o custo de conexão e ampliação da capacidade desta BSC, caso isto seja possível e necessário.

Por este motivo, as BTSs mais distantes são conectadas em primeiro lugar. Isto visa minimizar as chances da heurística construtiva não encontrar uma solução factível.

A Figura 4.8 ilustra o passo de conexão da BTS 1, classificada no início do procedimento como sendo uma BTS *viável*, pois poderia se conectar à BSC 1, 2 ou 3. Estas BSCs já se encontram com suas capacidades máxima atingidas (32) no momento que a BTS

1 está sendo analisada, não podendo ser ampliadas. Neste caso a BTS 1 se torna uma BTS crítica, e assim sendo é necessário que ela seja conectada a outra BTS. Pela figura, a única possibilidade é a conexão com a BTS 2 para então tentar atingir a BSC 4.

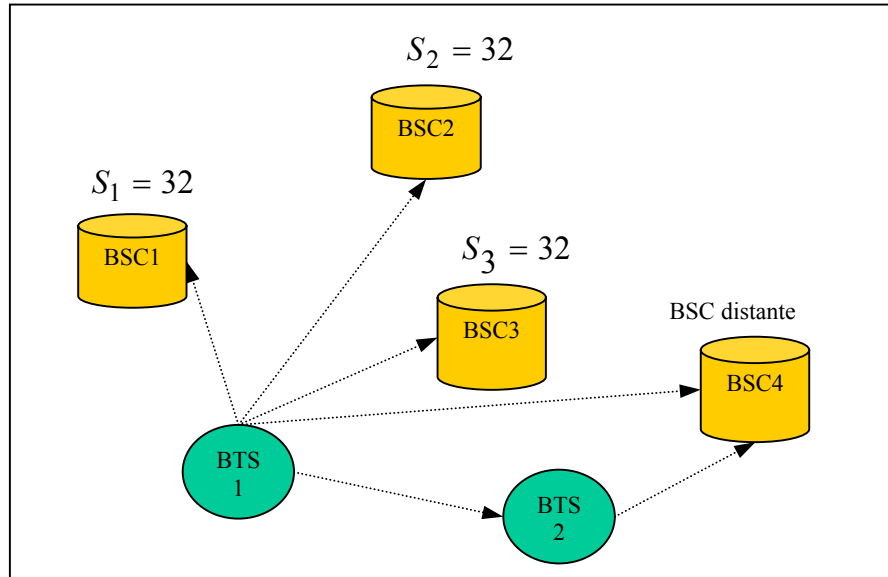


FIGURA 4.8: EXEMPLO DE UMA BTS VIÁVEL QUE SE TORNOU CRÍTICA.

#### 4.1.2 Conexão BSC-MS (2ª. Etapa de Conexões)

Dada uma conexão factível das BTSs às BSCs, a variável  $S_i$  indica a demanda que precisa ser escoada até as MSCs. O critério para a construção da lista que indicará qual a ordem de conexão das BSCs às MSCs é o mesmo utilizado para a conexão das *BTS viáveis*, ou seja, para cada BSC é definida a MSC mais próxima, e depois criada uma lista de BSC por ordem decrescente de distância que serão conectadas à rede. Este procedimento é ilustrado pela Figura 4.9.



## Procedimento: Conexão das BSCs

**Para** cada BSC  $i$  instaladas na 1a. Etapa  
 Executa *Cálculo dos Custos (BSC  $i$ )*;  
 Conectar a BSC  $i$  à MSC  $j \in J$  (MSC com menor custo)  
      $R_j \leftarrow R_j + S_i$ ;  
     Custo\_atual  $\leftarrow$  Custo\_atual +  $\alpha * \pi_{ij} * S_i$ ;  
     Atualização da Capacidade da MSC;  
**fim do Para**;

FIGURA 4.9: PSEUDO-CÓDIGO DA CONEXÃO DAS BSCs.

De forma análoga, a conexão de BSCs e MSCs depende de três situações relativas ao estado das MSCs no momento da conexão das BSCs sendo a modularidade da MSC definida de acordo com a demanda da BSC a ser conectada:

i) MSC não foi instalada:

$$\text{Custo 1} = \alpha * S_i * \pi_{ij} + F_j^m ;$$

ii) MSC foi instalada, e a conexão da BSC não força a ampliação da estrutura (mudança de padrão) da MSC :

$$\text{Custo 2} = \alpha * S_i * \pi_{ij} ;$$

iii) MSC foi instalada, porém a conexão da BSC força a ampliação da estrutura (mudança de padrão) da MSC:

$$\text{Custo 3} = \alpha * S_i * \pi_{ij} + (F_j^{m\_escolhida} - F_j^{m\_anterior} )$$

A avaliação dos custos e a tomada de decisão que deve ser feita segue os mesmos padrões da conexão das *BTSs viáveis* descritas anteriormente.

A Figura 4.10 ilustra uma rede contendo 40 *BTSs* definidas, 8 locais candidatos para a instalação das *BSCs* e 8 locais para as *MSCs*. As capacidades e custos são os mesmos mencionados nas Tabelas 3.1 e 3.2 no final do capítulo anterior.

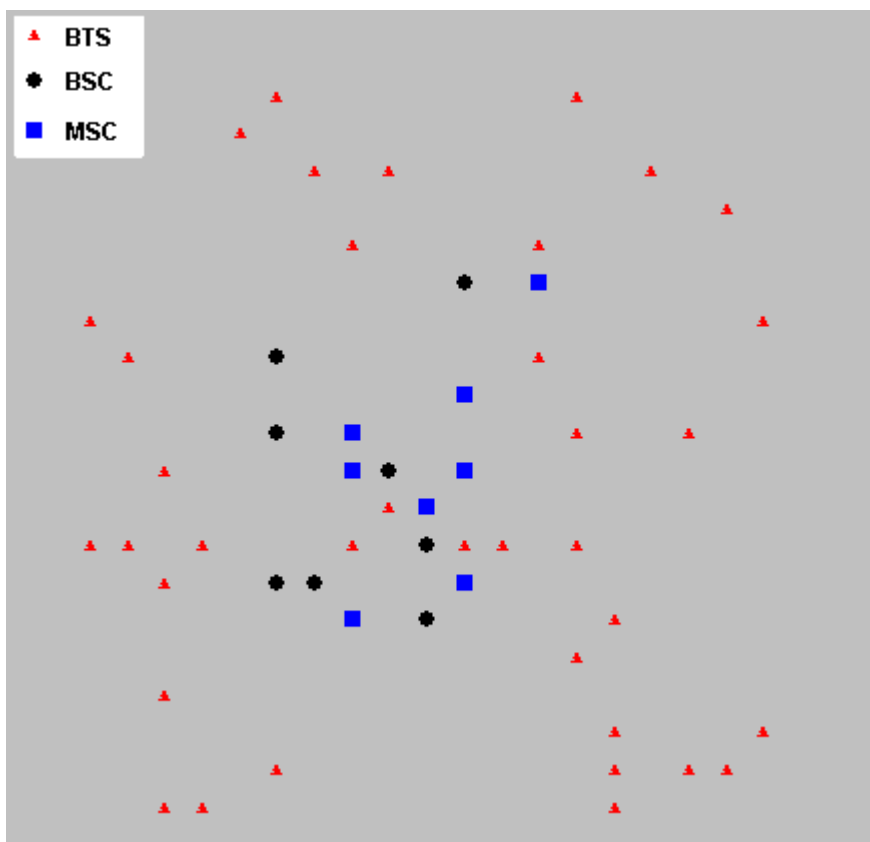


FIGURA 4.10: EXEMPLO DA DISTRIBUIÇÃO DOS ELEMENTOS DE UMA REDE MÓVEL.

A Figura 4.11 mostra a rede com menor custo para o cenário apresentado obtida através do solver Cplex.

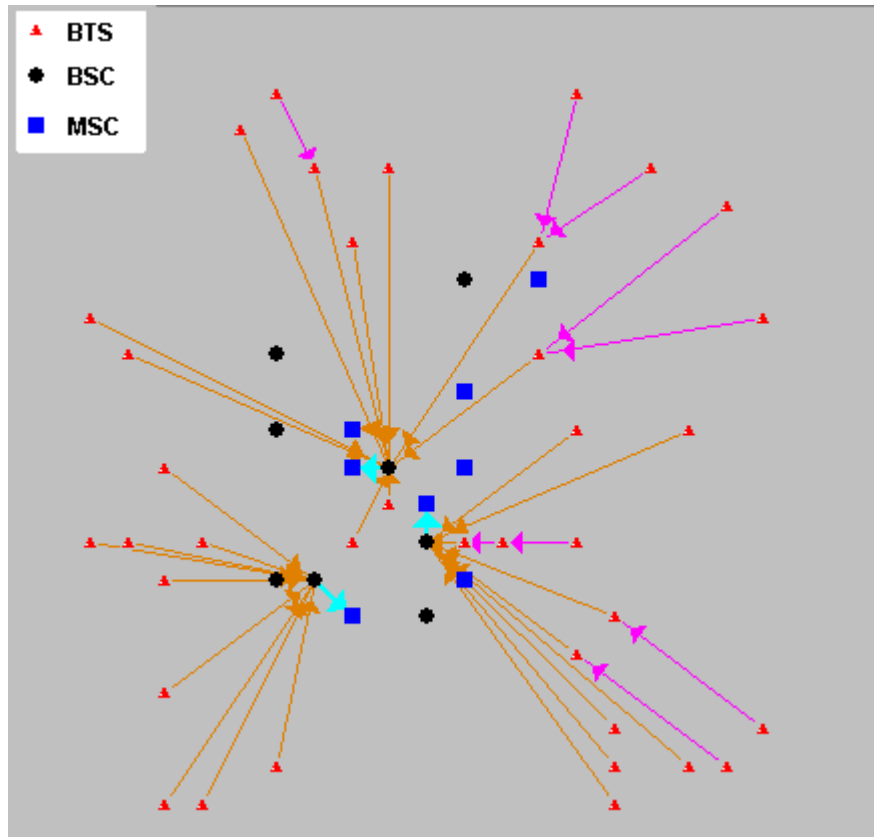


FIGURA 4.11: SOLUÇÃO ÓTIMA (CUSTO = 19560).

A Figura 4.12 mostra o resultado da heurística construtiva aplicada à rede enunciada da Figura 4.11. A rede obtida designou 3 BSCs e 3 MSCs para serem instaladas, semelhante com o que aconteceu com a melhor solução ilustrada na Figura 4.11. Contudo o conjunto de BSCs e MSCs escolhidas é diferente da solução ótima e a estrutura de conexão destes elementos obtida pela heurística construtiva faz com que todas as BTSs se conectem diretamente com as BSCs (inexistência de BTSs *críticas*).

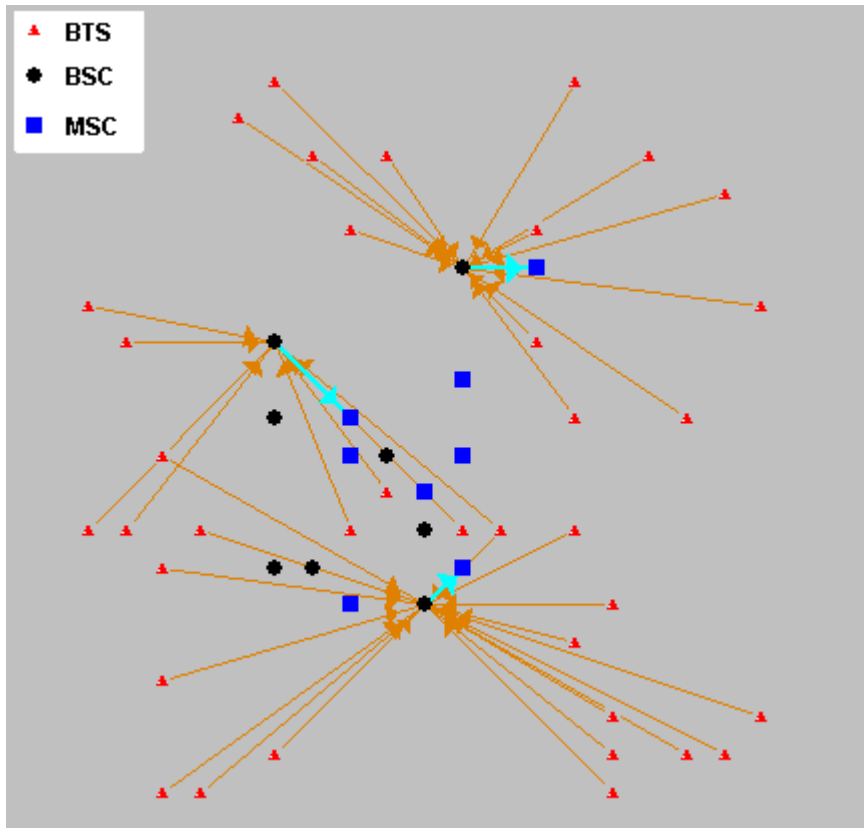


FIGURA 4.12: SOLUÇÃO DA HEURÍSTICA CONSTRUTIVA (CUSTO = 20645,8).

## 4.2 Heurística de Melhoria

A solução obtida através da heurística construtiva é usada como ponto de partida para uma busca em vizinhança. Uma solução  $x'$  é vizinha da solução  $x$  se pode ser atingida a partir de  $x$  através de uma operação denominada *movimento*. A *vizinhança* de  $x$  consiste de todos os pontos  $x'$  atingíveis pelo movimento. Escolhe-se na vizinhança uma solução  $x'$  tal que  $f(x') < f(x)$  onde  $f$  é a função a ser minimizada. Caso essa solução exista, repete-se a busca em vizinhança a partir de  $x'$ . A busca em vizinhança termina quando para uma solução  $x^*$ , não existe nenhuma solução vizinha com valor de função objetivo menor que  $f(x^*)$ , e a solução  $x^*$  é denominada mínimo local. Busca em vizinhança é largamente utilizada em otimização combinatória na forma descrita acima ou como parte de meta-heurísticas tais como busca tabu (Glover 1997), simulated annealing (Aarts 1997),

algoritmos evolucionários (Hertz e Kobler 2000), GRASP (Resende e Ribeiro 2002) e variable neighborhood search (Hansen e Mladenovic 2001).

### ***Definição da vizinhança***

A solução que indica as BSCs instaladas através da heurística construtiva pode ser representada como um vetor unidimensional com elementos 0 (BSC não instalada) e 1 (BSC instalada). Seja

$Z_i$  : vetor unidimensional de tamanho definido pelo número total de candidatos a instalação de uma BSC;

$P$  : conjunto de todas as BSCs instaladas;

$Q$  : conjunto de todas as BSCs que não foram instaladas.

Uma vizinhança usual em problemas de otimização com variáveis binárias, e utilizada neste trabalho, é descrita a seguir.

***Definição da vizinhança.*** Seja  $i \in P$  e  $j \in Q$ , ou seja, o local  $i$  contém uma BSC instalada ( $Z(i) = 1$ ) e o local  $j$  uma BSC desativada ( $Z(j) = 0$ ). Um vizinho desta solução é representado por  $Z(j) = 1$  e  $Z(i) = 0$ .

Procedimentos de inserção e eliminação de facilidades são descritos por (Jacobsen 1983) para o problema clássico de localização de facilidades com restrições de capacidade. A seguir são definidos estes procedimentos, entretanto adaptados ao problema aqui tratado.

**a) Insere BSC**

- Insere a BSC  $j$  ( $Z(j) = 1$ ) na solução atual;
- Verifica-se quais BTSs conectadas a outras BSCs teriam seus custos reduzidos em relação à distância se fossem conectadas à BSC  $j$ ;
- Conecta-se estas BTSs à BSC  $j$  atualizando toda a estrutura de custos relacionada às capacidades das BSCs (mudança de padrões). Este custo será utilizado no passo  $b$  a seguir;

**b) Elimina BSC**

- Exclui a BSC  $i$  ( $Z(i) = 0$ ) na solução atual (obtida no passo  $a$ );
- Verifica quais BTSs estão conectadas à BSC  $i$ ;
- Conecta estas BTSs às outras BSCs (inclusive à BSC  $j$  instalada anteriormente) utilizando o mesmo procedimento descrito na seção 4.1.

Utilizando este procedimento de busca local com escolha da troca com menor custo (*best improvement*), este é calculado assim:

- Para cada  $j \in \mathbf{Q}$  calcula-se o valor da solução após a inserção desta BSC;
- Para cada  $i \in \mathbf{P}$  calcula-se o valor da solução após a eliminação desta BSC com a BSC  $j$  instalada;

Verifica-se se o valor da solução encontrada no procedimento é melhor que o valor da solução atual. Em caso afirmativo, repete-se todo o processo anterior, caso contrário um mínimo local foi encontrado e o processo é finalizado.

Depois de terminado este procedimento, é iniciado então todo o procedimento de conexão das BSCs até as MSCs como descrito na seção 4.1.3. Após a construção da solução, é feita uma busca local na mesma.

A Figura 4.13 mostra o resultado da heurística de melhoria aplicada à rede da Figura 4.12. A busca local na primeira etapa determinou a mudança de conexão de algumas BTSs às BSCs definidas pela heurística construtiva. Esta mudança ocasionou também a retirada de uma BSC e a instalação de uma nova. A segunda etapa não modificou o conjunto de MSCs após a busca local..

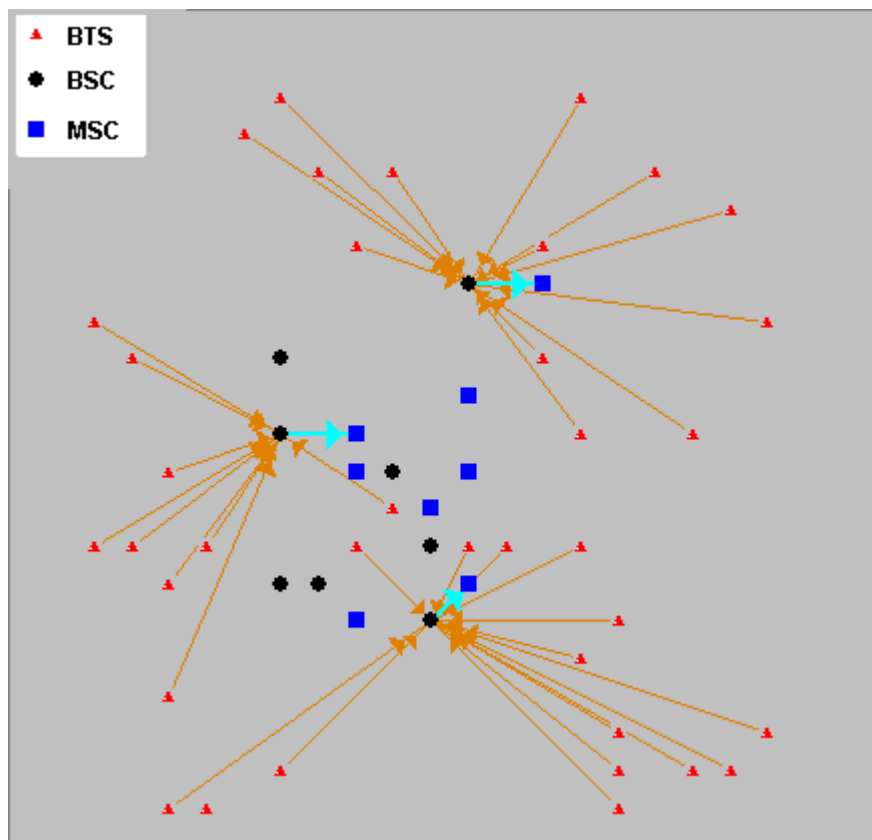


FIGURA 4.13: SOLUÇÃO COM BUSCA LOCAL (CUSTO = 20119.3).

## 4.3 Estudo de Caso

### 4.3.1 Descrição dos Cenários

As heurísticas foram testadas em cinco conjuntos de problemas contendo cinco cenários cada um. Foi estabelecido o custo fixo de fluxo por unidade de demanda em 5,735 e a distância limite como sendo 10 unidades de distância. Foram testadas duas estratégias para cada caso gerado. A primeira estratégia aplica a heurística construtiva em ambas etapas sem a busca local, diferentemente da segunda estratégia que buscava o mínimo local em cada uma das etapas.

Cada conjunto de problemas contém a quantidade de elementos descritos na Tabela 4.1.

TABELA 4.1: CONFIGURAÇÃO DOS CASOS

<b>Conjuntos</b>	<b># BTSs</b>	<b># BSCs (locais candidatos)</b>	<b># MSCs (locais candidatos)</b>
Conjunto 1	20	4	4
Conjunto 2	25	5	5
Conjunto 3	30	6	6
Conjunto 4	35	7	7
Conjunto 5	40	8	8

Os custos e capacidades das BSCs e MSCs são idênticos para todos os cenários e são apresentados nas Tabelas 4.2 (BSCs) e 4.3 (MSCs)



TABELA 4.2: CUSTO E CAPACIDADE DAS BSCs.

Modularidade	Capacidade	Custo de instalação da BSC – $G_i^b$
TB1	32	300
TB2	16	200
TB3	8	150

TABELA 4.3: CUSTO E CAPACIDADE DAS MSCs.

Modularidade	Capacidade	Custo de instalação da MSC - $F_j^m$
TM1	120	5000
TM2	80	4000
TM3	40	3000

Cada cenário foi gerado (determinação da localização dos elementos na rede) em um plano cartesiano 20X20 (pontos discretizados) e as demandas das BTSs foram geradas aleatoriamente dentro de um intervalo entre 1 e 4 unidades (canais  $EI$ ). Cada local candidato à instalação de uma BSC e MSC foi gerado aleatoriamente neste plano cartesiano.

#### 4.4 Análise das Soluções

Estas heurísticas foram implementadas utilizando Cbuilder 5 em uma máquina PC Pentium II 233 mHz. Os resultados obtidos mostraram um desvio médio em relação à solução ótima de 22,87% (heurística construtiva) utilizando a primeira estratégia e 21,88 (heurística construtiva com a de melhoria em cada etapa) com a segunda estratégia. O

número de iterações necessárias para obtenção do mínimo local na segunda estratégia variou de 5 a 8 na primeira etapa de conexões, dependendo do tamanho do problema. Na maioria dos casos a segunda etapa de conexões alcançou o mínimo local utilizando apenas a heurística construtiva.

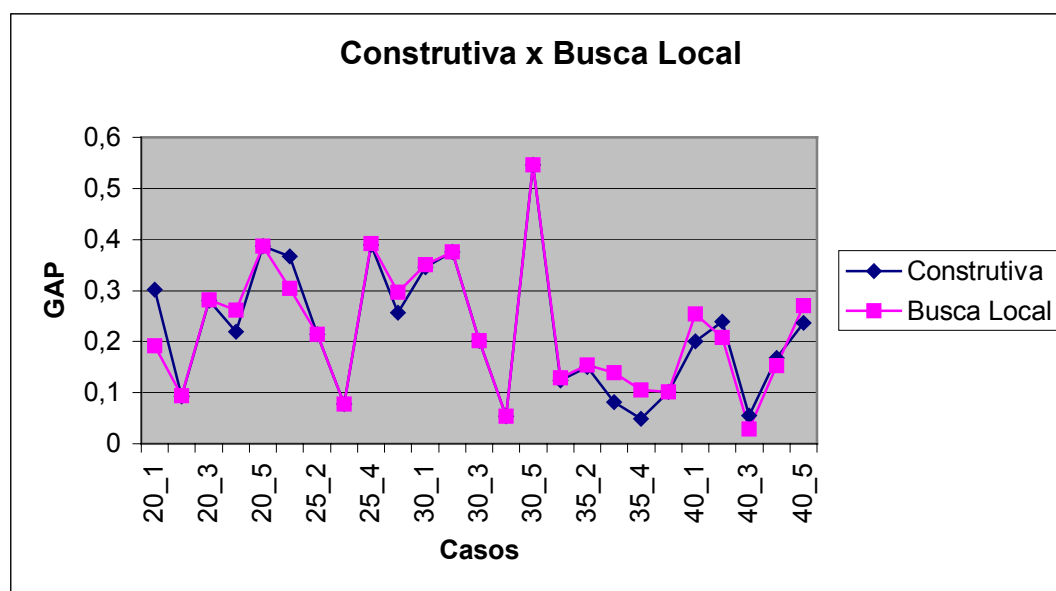


FIGURA 4.14: COMPARAÇÃO ENTRE A HEURÍSTICA CONSTRUTIVA E A HEURÍSTICA DE MELHORIA.

Os resultados obtidos demonstram que a busca local não obteve um ganho significativo em relação à heurística construtiva, ilustrado na Figura 4.14. Isto se deve ao fato do procedimento ser dividido em duas etapas e dos maiores valores dos custos destes casos estarem contidos nas conexões da segunda etapa (BSC-MSC). A primeira etapa das conexões (BTS-BSC) gera uma solução que é utilizada pela segunda etapa de conexões (BSC-MSC) que a partir deste momento gera uma solução final.

As conclusões mencionadas neste capítulo servem como base para os procedimentos descritos no próximo capítulo.

## Capítulo 5

### Aplicação do Método GRASP

Como mencionado no capítulo anterior, a busca em vizinhança termina em um ótimo local com relação à vizinhança explorada. Para superar o problema de otimalidade local em otimização combinatória, surgiram na década de 80 as meta-heurísticas, que são heurísticas estruturadas com componentes definidos a partir do problema que se quer resolver. Estes componentes procuram diversificar a busca no espaço de soluções e intensificar a busca em regiões que contém soluções de alta qualidade. Boas implementações de meta-heurísticas levam a soluções de alta qualidade em tempo computacional exequível. As meta-heurísticas mais bem sucedidas em otimização combinatória são simulated annealing (van Laarhoven e Aarts 1987) busca tabu (Glover 1997), algoritmos genéticos (Michalewicz, 1996; Hertz 2000), e GRASP (Feo e Resende, 1995; Resende e Ribeiro 2001). O livro editado por Aarts e Lenstra (1997) apresenta o desenvolvimento de meta-heurísticas e diversas aplicações. Neste capítulo utilizam-se os componentes da meta-heurística GRASP para o desenvolvimento de vários procedimentos heurísticos que fazem uso da heurística construtiva e da busca em vizinhança apresentadas no capítulo anterior. Esta meta-heurística foi escolhida por se adequar muito bem ao enfoque de duas etapas que estamos utilizando para resolver o problema de localização e dimensionamento de uma rede de comunicações móveis.

#### 5.1 Descrição do Método

GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure) é uma meta-heurística desenvolvida por Feo e Resende (1995) para resolver problemas combinatórios. Em um artigo recente, Resende e Ribeiro (2001) descrevem desenvolvimentos no método, métodos híbridos e diversas aplicações.

O GRASP é uma meta-heurística de múltiplos reinícios caracterizado por uma fase construtiva e uma fase de melhoria onde se aplica uma busca local para se obter um ótimo local. A Figura 5.1 mostra todos os procedimentos que constituem o GRASP. A fase construtiva consiste de uma heurística de construção gulosa que a cada passo da construção ordena os elementos candidatos a serem inseridos de acordo com o custo incremental causado pela inserção do elemento. No nosso caso, a heurística construtiva na etapa 1 analisa a possibilidade de conexão de uma BTS com todas as BSCs. Estas alternativas de conexão são ordenadas em ordem crescente de custo incremental. A partir desta ordenação, usa-se um parâmetro para limitar o grau de acréscimo do custo incremental. Isto define uma lista restrita de candidatos (LRC) e um elemento candidato é escolhido com uma dada distribuição de probabilidade. Neste caso, temos uma heurística construtiva probabilística, ao invés de uma heurística gulosa que sempre escolhe o elemento a ser inserido na solução parcial que cause o menor custo incremental. Uma iteração neste método consiste da construção de uma solução através da heurística construtiva probabilística, seguida da busca local que termina em um ótimo local, descritas pelas Figuras 5.2 e 5.3, respectivamente. O melhor ótimo local é guardado durante a execução do método e em geral, usa-se o número de iterações como critério de parada.

```
Procedimento: GRASP (Max Iter)  
Para cada  $k = 1, \dots, \text{Max\_Iter}$  faça  
    Solução  $\leftarrow$  Heurística_Construtiva_Aleatória;  
    Solução  $\leftarrow$  Busca_Local(Solução);  
    Atualizar_Solução(Solução, Melhor_Solução)  
Fim do para  
Retorna Melhor_Solução;
```

FIGURA 5.1: PSEUDO-CÓDIGO DO GRASP.

### Procedimento: Heurística Construtiva Aleatória

Solução  $\leftarrow \emptyset$ ;  
Avalia o custo incremental de cada BTS candidata através do Procedimento  
*Cálculo dos Custos (BTS t)*;  
**Enquanto** Solução não está completa **faça**  
**Para** cada  $t=1,\dots,\text{Num\_BTSs}$  **faça**  
    Cria lista LRC;  
    Seleciona a BTS  $s$  aleatoriamente;  
    Solução  $\leftarrow$  Solução  $\cup \{s\}$ ;  
    Reavalia o custo incremental;  
**Fim do para**

FIGURA 5.2: PSEUDO-CÓDIGO DA ETAPA CONSTRUTIVA DO GRASP.

### Procedimento: Busca Local (Solução)

**Enquanto** Solução não for o ótimo local **faça**  
    Encontre  $s' \in \text{Vizinhança } f(s') < f(\text{Solução})$ ;  
    Solução  $\leftarrow s'$ ;  
**Fim do enquanto**;  
**Retorna** Solução;

FIGURA 5.3: PSEUDO-CÓDIGO DA ETAPA DE BUSCA LOCAL DO GRASP.

## 5.2 Lista Restrita de Candidatos (LRC)

Seja  $\mathbf{E}$  o conjunto contendo os elementos que não foram inseridos na solução e  $c(\sigma)$ ,  $\sigma \in \mathbf{E}$ , o valor incremental da inserção de cada elemento na solução. Seja também o parâmetro  $\alpha \in [0,1]$ , e os valores  $c^{\min}$  e  $c^{\max}$  indicando o menor e maior valor incremental da inserção de um elemento na rede dentre todos os elementos candidatos a serem inseridos, respectivamente. A LRC é composta dos elementos tais que seus custos incrementais esteja incluídos no seguinte intervalo:

$$c(x) \in [c^{\min}, c^{\min} + \alpha(c^{\max} - c^{\min})]$$

Note que  $\alpha = 0$ , define uma heurística construtiva gulosa, enquanto  $\alpha = 1$  conduz ao grau máximo de aleatorização. Uma vez definida a LRC, é necessário atribuir uma distribuição de probabilidades para seus elementos. Este aspecto é discutido a seguir.

### ***Funções Bias***

Em grande parte dos trabalhos envolvendo GRASP, utiliza-se uma distribuição uniforme para selecionar um elemento da LRC. Mais recentemente, Bresina (1996) sugeriu e testou outras distribuições de probabilidade para favorecer a escolha de alguns elementos de LRC. Essas distribuições estão baseadas na posição (rank) dos elementos de LRC ordenados por ordem crescente de custo incremental. Bresina propôs as seguintes funções de bias:

- *Linear bias*                                       $\text{bias}(r) = 1/(r+1)$ , para  $r \in \text{LCR}$
- *Log bias*     $\text{bias}(r) = (\log/(r+1))^{-1}$ , para  $r \in \text{LCR}$
- *Exponencial bias*                                       $\text{bias}(r) = e^{-r}$ , para  $r \in \text{LCR}$
- *Uniform bias*     $\text{bias}(r) = 1$ , para  $r \in \text{LCR}$

A partir de uma função de bias a probabilidade  $\pi(\sigma)$  de selecionar um elemento  $\sigma$  é dada por:

$$\pi(\sigma) = \frac{\text{bias}(r(\sigma))}{\sum_{\sigma' \in \text{LCR}} \text{bias}(r(\sigma'))}.$$

### ***Probabilidade Adaptativa***

As funções descritas anteriormente não relacionam o valor do custo incremental da inserção de cada elemento com a probabilidade de atribuída a eles. De forma análoga a Fleurent e Glover (1999), esta informação é usada para definir as probabilidades, que são

adaptativas no sentido que dependem do problema teste em questão e não envolvem funções de bias.

Seja  $\mathcal{S} = \{\sigma_1, \dots, \sigma_k\}$  a lista restrita de candidatos. A probabilidade de seleção do elemento  $\sigma_i$  a ser incluído na solução é dada por:

$$p(\sigma_i) = \frac{1/c(\sigma_i)}{\sum_{z=1}^k 1/c(\sigma_z)}$$

Note que a probabilidade de seleção de um elemento é tanto maior quanto menor for seu custo incremental.

### 5.3 GRASP Reativo

Um valor fixo do parâmetro  $\alpha$  para todas as iterações de GRASP pode não ser adequado. De um modo geral um valor alto de  $\alpha$  tende a provocar uma diversificação na busca, enquanto um valor pequeno tenta induzir a uma intensificação na busca. Prais e Ribeiro (2000) propuseram uma forma de ajustar periodicamente este parâmetro de acordo com o custo das soluções obtidas, caracterizando um processo adaptativo, denominado GRASP Reativo.

O método propõe a utilização de um conjunto  $A = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m\}$  de valores pré-definidos para  $\alpha$ . Inicialmente, as probabilidades de escolha dos valores são iguais com valor  $p_i = 1/m$  para todo  $i$ . Estas probabilidades são alteradas periodicamente da seguinte maneira. Seja  $f^*$  o valor da melhor solução encontrada até o momento e seja  $h_i$  a média dos custos obtidos com o valor  $\alpha_i$ . Calcula-se então os valores:

$$q_i = f^* / h_i$$

e as probabilidades  $p_i$  são atualizadas da seguinte forma:

$$p_i = \frac{q_i}{\sum_j q_j}$$

## 5.4 Determinação de $\alpha$ e a aplicação do GRASP Reativo

Para cada conjunto de casos criado no capítulo anterior, a Tabela 5.1 mostra o número de iterações para a parada do método, em função do tamanho dos casos.

TABELA 5.1: NÚMERO DE ITERAÇÕES QUE DEFINEM O CRITÉRIO DE PARADA PARA OS DIFERENTES CONJUNTOS DE CASOS.

Conjunto	# de iterações
20	250
25	200
30	150
35	100
40	50

A Tabela 5.2 mostra os resultados obtidos. Estes resultados demonstram um ganho considerável de qualidade em relação a simples aplicação das heurísticas construtiva (gulosa) e de melhoria ( $\alpha = 0$ ).

Em nenhum caso a heurística construtiva obteve melhores resultados que os obtidos pelo GRASP e o tempo de execução do algoritmo para cada grupo de casos exigiu menos que 2 minutos.

A Tabela 5.2 mostra que valor  $\alpha = 0,4$  proporciona os melhores resultados e este valor é utilizado em outras versões heurísticas a seguir.



TABELA 5.2: DESVIO MÉDIO OBTIDO COM A APLICAÇÃO DA META-HEURÍSTICA GRASP VARIANDO O PARÂMETRO  $\alpha$ .

Caso	Construtiva	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8
20_1	19,12%	18,52%	18,52%	18,52%	18,52%	18,52%
20_2	9,35%	5,99%	5,99%	7,09%	5,99%	7,09%
20_3	28,14%	17,10%	17,10%	17,10%	17,10%	17,10%
20_4	26,21%	0,31%	0,31%	0,53%	0,72%	0,53%
20_5	38,67%	5,67%	12,66%	5,44%	15,10%	15,10%
25_1	30,41%	2,67%	2,67%	3,19%	2,96%	5,41%
25_2	21,43%	0,13%	0,13%	0,27%	0,13%	0,27%
25_3	7,82%	5,44%	5,66%	5,33%	5,66%	5,66%
25_4	39,17%	7,83%	7,63%	6,31%	4,33%	7,80%
25_5	29,68%	11,17%	11,02%	8,85%	11,02%	9,42%
30_1	35,06%	6,07%	6,71%	6,71%	6,71%	5,87%
30_2	37,63%	1,75%	1,85%	1,75%	1,83%	3,34%
30_3	20,23%	2,47%	2,07%	0,46%	2,78%	2,59%
30_4	5,36%	3,58%	3,58%	3,81%	4,39%	3,28%
30_5	54,66%	4,49%	4,46%	4,46%	4,49%	4,59%
35_1	12,94%	5,30%	3,95%	4,37%	4,76%	3,95%
35_2	15,36%	9,05%	9,42%	9,65%	13,79%	11,38%
35_3	13,85%	4,86%	8,11%	9,12%	6,26%	6,82%
35_4	10,53%	7,98%	5,06%	4,50%	5,29%	9,30%
35_5	10,09%	5,26%	3,57%	5,26%	6,48%	8,78%
40_1	25,37%	6,82%	5,69%	7,44%	9,18%	11,00%
40_2	20,81%	14,13%	12,46%	5,62%	13,44%	10,07%
40_3	2,86%	1,10%	2,72%	1,61%	1,57%	2,86%
40_4	15,28%	1,86%	0,63%	0,88%	1,46%	2,19%
40_5	27,01%	13,20%	15,82%	13,98%	13,64%	13,43%
<b>Média dos Desvios</b>	22,28%	6,51%	6,71%	6,09%	7,10%	7,45%
<b>Desvio Padrão</b>	12,59%	4,98%	5,26%	4,82%	5,37%	4,96%

A Tabela 5.3 exibe os resultados obtidos com cada método de busca e demonstra que a utilização do GRASP com parâmetro  $\alpha = 0,4$  é superior se comparado à busca local simples (capítulo 5), Reativo Construtiva (aleatorização utilizando a técnica do GRASP Reativo sem a busca local) e ao GRASP Reativo. A execução do GRASP Reativo gerou em média, resultados piores e um tempo de execução 10% maior que o melhor método.

TABELA 5.3: RESULTADOS OBTIDOS COM A APLICAÇÃO DA META-HEURÍSTICA GRASP REATIVO.

Caso	Busca Local	alfa = 0.4	Reativo Construtiva	Reativo GRASP
20_1	18,52%	18,52%	20,09%	18,52%
20_2	5,99%	7,09%	20,29%	5,99%
20_3	17,10%	17,10%	25,27%	17,10%
20_4	0,31%	0,53%	0,72%	0,31%
20_5	5,67%	5,44%	18,11%	5,91%
25_1	2,67%	3,19%	10,69%	3,35%
25_2	0,13%	0,27%	0,39%	0,27%
25_3	5,44%	5,33%	5,52%	5,66%
25_4	7,83%	6,31%	10,68%	7,64%
25_5	11,17%	8,85%	12,06%	11,17%
30_1	6,07%	6,71%	7,17%	6,70%
30_2	1,75%	1,75%	3,81%	1,74%
30_3	2,47%	0,46%	1,56%	1,73%
30_4	3,58%	3,81%	7,59%	4,39%
30_5	4,49%	4,46%	8,34%	3,21%
35_1	5,30%	4,37%	9,14%	5,38%
35_2	9,05%	9,65%	14,81%	12,81%
35_3	4,86%	9,12%	10,12%	4,02%
35_4	7,98%	4,50%	9,70%	7,69%
35_5	5,26%	5,26%	6,83%	6,48%
40_1	6,82%	7,44%	8,70%	5,80%
40_2	14,13%	5,62%	15,34%	10,14%
40_3	1,10%	1,61%	3,04%	0,60%
40_4	1,86%	0,88%	0,58%	1,66%
40_5	13,20%	13,98%	14,15%	10,46%
Media	6,51%	6,09%	9,79%	6,35%
Desvio	4,98%	4,82%	7%	4,85%

## 5.5 Procedimentos Heurísticos

Os resultados obtidos na Tabela 5.3 indicaram não haver uma correlação entre a qualidade da solução obtida na primeira etapa com a qualidade da solução resultante após a execução da segunda etapa. Boas soluções geradas na primeira etapa podem gerar soluções completas ruins como evidenciado na Figura 5.4. O gráfico exemplifica um caso executado com critério de parada de 50 iterações. A cada triângulo que representa o custo da segunda etapa (custo total) corresponde um retângulo associado ao custo da primeira etapa.

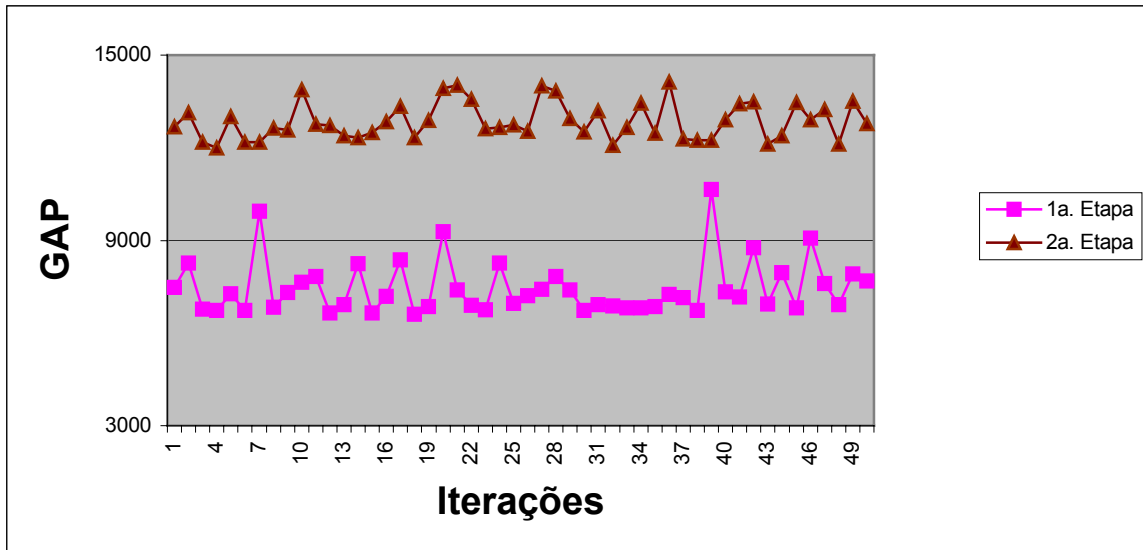


FIGURA 5.4: RESULTADOS OBTIDOS NA PRIMEIRA E SEGUNDA ETAPA (CADA PONTO DA PRIMEIRA ETAPA É VERTICALMENTE RELACIONADO COM UM DA SEGUNDA) PARA UM CASO UTILIZANDO O MÉTODO GRASP ( $\alpha = 0,4$ ) EM AMBAS AS ETAPAS.

A não existência de uma correlação da qualidade de soluções obtidas na primeira etapa e na segunda etapa, aliada ao fato de que os maiores custos situam-se na segunda etapa de conexões (BSC-MSC), indica a necessidade de explorar procedimentos heurísticos alternativos baseados nas heurísticas construtiva e de melhoria (busca local) apresentados no capítulo 4, e na heurística construtiva aleatorizada, que corresponde à primeira fase do método GRASP. Estes procedimentos são descritos a seguir.

**I) Construtiva em BSC e MSC**

Aplicação da heurística construtiva descrita no capítulo anterior em ambas as etapas (BSC e MSC) sem a busca local.

**II) Construtiva e busca local em BSC e MSC**

Aplicação da heurística construtiva e busca local descritas no capítulo anterior em ambas as etapas (BSC e MSC).

### III) **Construtiva aleatorizada em BSC e MSC**

Aplicação da primeira fase do método GRASP em ambas as etapas (BSC e MSC).

### IV) **Construtiva aleatorizada em BSC, e construtiva e busca local nas MSCs**

Aplicação da primeira fase do método GRASP na primeira etapa (BSC). Em seguida é aplicada a heurística construtiva e busca local definidas no capítulo anterior na segunda etapa de conexões (MSC).

### V) **Construtiva aleatorizada em BSC e GRASP nas MSCs**

Aplicação da primeira fase do método GRASP na primeira etapa (BSC) e de GRASP (construtiva aleatorizada e busca local) na segunda etapa de conexões (MSC).

### VI) **GRASP em BSC e MSC**

Aplicação do GRASP (construtiva aleatorizada e busca local) em ambas as etapas (BSC e MSC).

### VII) **GRASP em BSC e construtiva e busca local em MSC**

Aplicação de GRASP (construtiva aleatorizada e busca local) na primeira etapa de conexões (BSC), seguido da aplicação da heurística construtiva e busca local definidas no capítulo anterior na segunda etapa de conexões (MSC).

## **5.6 Aplicação dos Procedimentos Heurísticos**

Seguindo a mesma metodologia utilizada para a geração dos casos no capítulo anterior, porém aumentando consideravelmente o número de elementos na rede, novos conjuntos de casos foram gerados. O número de BTSs instaladas variou de 100 a 200, e o

de BSCs e MSCs, de 10 a 20 locais candidatos para a instalação. As soluções ótimas destes problemas foram obtidas utilizando uma máquina Pentium II 700 MHz. O software utilizado foi o AIMMS/Cplex e o tempo necessário para a obtenção das soluções ótimas variou entre 2 horas a 18 horas.

Os procedimentos descritos na seção anterior foram aplicados a todos os casos. De um modo geral, a busca local na primeira etapa necessitou de um tempo muito maior que na segunda etapa, devido ao maior número de vizinhanças a serem exploradas na primeira etapa até atingir o ótimo local.

A Tabela 5.4 mostra os resultados obtidos após a execução dos procedimentos descritos anteriormente. Os desvios mostrados nesta tabela significam a média dos resultados obtidos de todas as funções *bias* descritas anteriormente.

TABELA 5.4: VALORES MÉDIOS DOS DESVIOS E OS INTERVALOS DE TEMPOS DE EXECUÇÃO OBTIDOS COM A APLICAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS I AO VII.

<b>Casos/Procedimentos</b>	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>	<b>IV</b>	<b>V</b>	<b>VI</b>	<b>VII</b>
<b>100</b>	22%	31%	17%	20%	15%	21%	21%
<b>125</b>	16%	15%	11%	12%	11%	14%	15%
<b>150</b>	20%	19%	9%	15%	9%	15%	15%
<b>180</b>	25%	23%	15%	18%	15%	21%	23%
<b>200</b>	18%	18%	11%	15%	11%	17%	18%
<b>Desvio Médio</b>	<b>20%</b>	<b>21%</b>	<b>12%</b>	<b>16%</b>	<b>12%</b>	<b>18%</b>	<b>18%</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>3,5%</b>	<b>6,2%</b>	<b>3,3%</b>	<b>3,1%</b>	<b>2,7%</b>	<b>3,3%</b>	<b>3,6%</b>
<b>Intervalo de Tempo (min)</b>	<b>0,1 - 1,0</b>	<b>0,5 - 2</b>	<b>6 - 15</b>	<b>6 - 15</b>	<b>9 - 17</b>	<b>9 - 30</b>	<b>9 - 30</b>

Os procedimentos I e II necessitaram apenas de uma execução por se tratarem de um procedimento determinístico.

Analisando a qualidade das soluções obtidas, os procedimentos determinísticos (I e II) obtiveram soluções quase sempre piores que os outros procedimentos. Os procedimentos que se destacaram pela qualidade das soluções foram os procedimentos III, IV e V. Estes procedimentos juntos obtiveram os melhores valores em 80% dos casos.

O fato de não haver uma correlação entre as duas etapas de conexões é enfatizado pelos resultados relacionados aos procedimentos VI e VII que foram os piores dentre os

procedimentos não determinísticos. A figura 5.5 ilustra os resultados obtidos com cada procedimento.

Uma análise do tempo necessário para a execução de cada um dos procedimentos mostra também que os procedimentos III, IV e V ficaram bem abaixo dos procedimentos VI e VII, pois não utilizam busca local na primeira etapa. O procedimento V contém busca local na segunda etapa de conexões e por isso exigiu um tempo maior que os procedimentos III e IV.

Os procedimentos que contêm busca local na segunda etapa de conexões não obtiveram quase nenhuma melhoria, isto é, a solução construída na segunda etapa é um ótimo local ou está muito próxima deste.

As análises demonstram que a estratégia de conexão em duas etapas para o problema abordado é bem mais eficiente quando não se procura encontrar o ótimo local na primeira etapa. Outro ponto a ser enfatizado é que nesta estratégia de duas etapas é fundamental uma diversificação das soluções geradas na primeira etapa para a obtenção de soluções de boa qualidade na segunda etapa. Neste sentido, a primeira fase do método GRASP é fundamental para o sucesso deste tipo de estratégia, como atestam os procedimentos de melhor desempenho, a saber, III, IV e V.

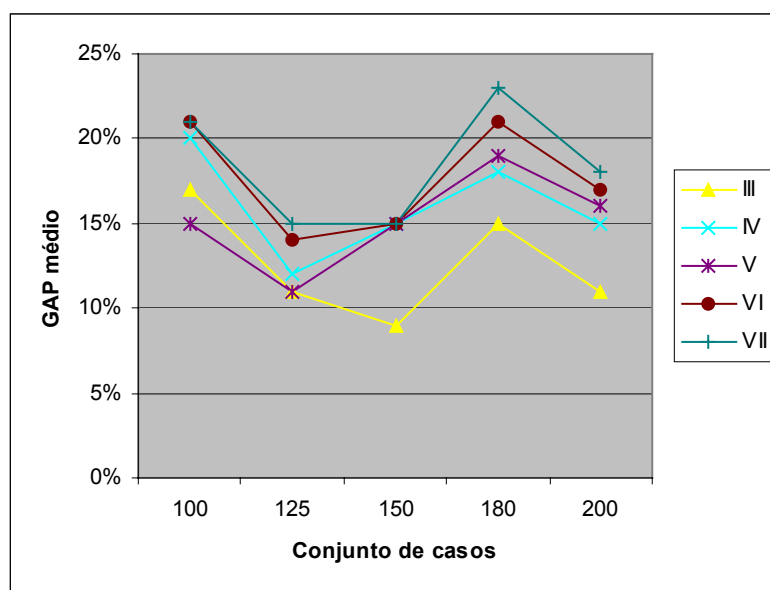


FIGURA 5.5: VALORES MÉDIOS OBTIDOS PARA OS PRINCIPAIS PROCEDIMENTOS.

As Tabelas 5.5, 5.6 e 5.7 apresentam o desempenho dos procedimentos III, IV e V, em termos das distribuições de probabilidades usada na primeira fase de GRASP para seleccionar um elemento da lista restrita de candidatos. As distribuições adaptativa e inversa apresentaram os melhores resultados na maioria dos casos. As funções *bias* que obtiveram os melhores resultados foram, em sua maioria, a *inversa* e a adaptativa de probabilidade sugerida neste trabalho anteriormente.

TABELA 5.5: VALORES MÉDIOS DOS DESVIOS DOS CASOS OBTIDOS COM A APLICAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS III.

Casos	Uniforme	Adaptativa	Inversa	Logaritmo	Exponencial
100	14,1%	10,2%	13,8%	21,0%	19,2%
125	9,0%	8,4%	8%	9,3%	17,1%
150	8,6%	8,7%	10%	17,1%	15,9%
180	15%	13,2%	16,2%	19,4%	16,4%
200	12%	10,1%	10,2%	20,3%	18,9%
<b>Desvio Médio</b>	<b>11,74%</b>	<b>10,12%</b>	<b>11,64%</b>	<b>17,42%</b>	<b>17,50%</b>

TABELA 5.6: VALORES MÉDIOS DOS DESVIOS DOS CASOS OBTIDOS COM A APLICAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS IV.

Casos	Uniforme	Adaptativa	Inversa	Logaritma	Exponencial
100	20,2%	12,5%	22,9%	22,0%	20,6%
125	18,4%	7,4%	14,7%	10,7%	10,1%
150	19,6%	6,7%	17,0%	16,1%	14,9%
180	19,6%	15,2%	18,3%	18,4%	20,4%
200	18,6%	10,2%	13,0%	16,7%	17,9%
<b>Desvio Médio</b>	<b>19,28%</b>	<b>10,40%</b>	<b>17,18%</b>	<b>16,78%</b>	<b>16,78%</b>

TABELA 5.7: VALORES MÉDIOS DOS DESVIOS DOS CASOS OBTIDOS COM A APLICAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS V.

Casos	Uniforme	Adaptativa	Inversa	Logaritma	Exponencial
100	13,1%	10,2%	13,6%	21,0%	19,2%
125	9,0%	8,3%	7,8%	9,3%	17,1%
150	8,5%	8,7%	10%	16,1%	15,9%
180	15%	13,2%	16,2%	19,4%	13,4%
200	12%	10,0%	10,2%	19,3%	18,9%
<b>Desvio Médio</b>	<b>11,52%</b>	<b>10,08%</b>	<b>11,56%</b>	<b>17,02%</b>	<b>16,90%</b>

## Capítulo 6

### Conclusões

A telefonia no Brasil passa por um grande processo de mudança devido à privatização ocorrida no setor. A telefonia fixa mostrou estar mais estruturada devido ao tempo e expansão que a sua rede sofreu. No caso da telefonia celular ocorre o inverso. Apesar de no Brasil as antigas empresas públicas já terem implantado algumas redes celulares, estas não alcançaram amplamente todas as classes, ou até mesmo todos os clientes com potencial de consumo.

Após a privatização várias operadoras entraram no mercado brasileiro iniciando uma disputa acirrada pelos melhores clientes (mais rentáveis) oferecendo os mais variados serviços, que nos primórdios da telefonia celular se baseavam apenas em funções departamentais relacionadas à polícia e outras áreas governamentais. Ao mesmo tempo, várias indústrias que fabricam componentes para a criação desta rede instalaram fábricas que produzem as mais sofisticadas tecnologias. Coube então a estas operadoras decidir qual tecnologia aplicar e a partir deste momento instalar toda a rede de telefonia móvel celular.

Apesar do negócio de telefonia móvel celular ser muito rentável, este inicialmente exige um alto investimento na compra e instalação de conexões e elementos para implantar toda esta rede. De acordo com simulações e cálculos sofisticados de previsão de demanda visando um retorno para este investimento, estas operadoras perceberam que havia a necessidade de um planejamento sofisticado tentando agregar todos os elementos que compõem esta rede de tal forma que este planejamento auxiliasse na melhor tomada de decisão.

Os passos que são necessários para a definição de uma rede celular são poucos, porém a complexidade de qual é a melhor decisão a ser tomada em cada um destes passos, não encontra hoje ferramentas capazes de solucionar vários problemas relativos a esta área.



O trabalho apresentado supôs que a demanda de sinais gerada pelos aparelhos celulares estava definida, cabendo um planejamento de como localizar os elementos que dão suporte a este fluxo de informações.

A determinação da localização dos elementos desta rede gera um amplo espaço de soluções que na prática inviabilizam um planejador de definir a melhor solução sem a aplicação de uma ferramenta matemática que lhe dê suporte que integre todas as restrições e variáveis que compõem este problema.

No trabalho apresentado foi representada a modelagem matemática de parte da rede de telefonia móvel celular, inserindo as restrições relativas à topologia da rede assim como o dimensionamento dos elementos que dão suporte a toda demanda gerada pelo fluxo de dados vinda dos usuários.

O problema consiste em planejar a infra-estrutura da rede celular de forma a minimizar o custo total de implantação. Este custo está associado à localização e dimensionamento das BSCs e da MSCs e à interconexão entre estes elementos e entre as BTSs e as BSCs. Esta interconexão está limitada por uma distância máxima que impossibilita a transmissão de informações entre dois elementos da rede.

O modelo matemático, executado com o auxílio de resolvidores sofisticados, obteve soluções satisfatórias para casos onde a rede que se pretende implantar refere-se a uma região contendo poucos elementos a serem instalados. Este modelo quando testado em redes relativamente grandes, como a definição de qual a localização ideal de uma MSC em um estado, despendeu um tempo tecnicamente inviável.

Inicialmente foi proposta uma heurística construtiva visando obter uma solução factível. Esta heurística construtiva dividiu o problema em duas etapas, sendo a primeira relacionada à conexão das BTS entre si e com as BSCs. A segunda completa o fluxo total de informações na rede conectando as BSCs às MSCs.

Depois de definida a vizinhança é aplicada uma heurística de melhoria (busca local), tentando obter o mínimo local, contudo Os resultados obtidos pela pura aplicação destes métodos determinísticos não foram satisfatórios.

Utilizando conceitos vindos da meta-heurística GRASP, que é composta basicamente de uma heurística construtiva probabilística seguida de uma heurística de

busca local, propiciaram a utilização das heurísticas citadas anteriormente. A aleatoriedade contida na fase de construção da solução propiciou a diversificação das soluções e sendo assim, a exploração de regiões que dificilmente seriam alcançadas através de heurísticas determinísticas.

Foram criados cenários representando uma rede de telefonia móvel celular (número de elementos candidatos para cada fase e custos de instalação e conexão entre os elementos) e neles testados sete procedimentos. Entre eles estavam as heurísticas determinísticas (construtiva e busca local), passando por métodos utilizando partes do GRASP, até finalmente chegar à aplicação da meta-heurística em si.

O parâmetro  $\alpha=0,4$  mostrou-se ser o melhor valor para ser aplicado nos procedimentos que utilizaram casos maiores e também para a comparação com o GRASP Reativo. Estes resultados mostraram que não há uma correlação em se obter uma solução satisfatória na primeira etapa, gera boas soluções na segunda etapa, e que para os casos estudados a busca de melhoria na segunda etapa pouco contribuiu para melhorar a solução encontrada após a heurística construtiva.

Após a aplicação dos sete procedimentos, a mesma análise pode ser obtida para os procedimentos que utilizavam a aleatorização na primeira etapa de conexões, e que obtiveram os melhores resultados se comparados às heurísticas que utilizaram o GRASP.

Outro aspecto ressaltado neste trabalho é a definição da função que determina como a aleatoriedade da heurística construtiva é realizada. A função sugerida neste trabalho que relaciona o valor do impacto do incremento de um elemento na rede com a probabilidade de ser escolhido para ser inserido na rede, obteve na maioria das vezes os melhores resultados.

Este trabalho possibilitou a criação de uma ferramenta capaz de auxiliar na tomada de decisão de um dos passos do planejamento de uma rede de telefonia celular. Esta ferramenta, conjuntamente com as desenvolvidas para realizar o dimensionamento da demanda e a tecnologia a ser aplicada (cobre, fibra óptica ou rádio) entre os elementos da rede possibilitam o desenvolvimento de uma ferramenta computacional com um custo viável, apenas aplicando técnicas já conhecidas na literatura.

Da mesma forma, o trabalho apresentado pode sugerir aplicações em diversas áreas onde há a necessidade de conexão e dimensionamento de elementos de uma rede.

Um dos pontos a serem explorados em trabalhos futuros é a estratégia de como fazer a conexão dos elementos da rede. Neste trabalho foi sugerida a divisão do problema em duas etapas, utilizando a solução encontrada em uma e aplicando como ponto inicial para a segunda. Contudo outras estratégias poderiam gerar melhores soluções se buscassem estudar a estrutura dos dados (custos relacionados à rede) à priori ou dinamicamente, e em seguida definirem os casos que pode ser feita uma reavaliação da solução obtida e a volta para a etapa anterior visando melhorar a solução.

## Referências Bibliográficas

- Aarts, E.H.L., Korst, J.H.M. & P.J.M. van Laarhoven (1997), Simulated Annealing, em *Local Search in Combinatorial Optimization*, E. Aarts e J.K. Lenstra (editores).
- Bazaraa, J. J., Jarvis, J.J., Sherali, H.D. (1990), *Linear Programming and Network Flows*, 2nd ed., Willey, New York.
- Bresina, S. L. (1996), Heuristic-biased stochastic sampling, *Proceedings of the AAAI-96*, 1, p. 271-278.
- Chang, X. (1999), Network Simulations with OPNET, *Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference*, p. 307-314, 1999.
- Current, J., Daskin, M. & Schilling, D. (2001), Discrete Network Location Models, em *Facility Location Theory: Applications and Methods*, Z. Drezner and H. Hamacher eds..
- Daskin (1995), M. S. *Network and Discrete Location Models*, Wiley, New York, 1995.
- DeSousa, M. A., Formigoni, J.R. F., Bergamaschi, M. A., Branquinho, O.C., Yamamoto, J.S., Carlson, C.O.M.F. (2000), Planejamento Otimizado da Infraestrutura da Rede Celular, *Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, Gramado, RS.
- DeSousa, M. A., Medrano, M.S., Formigoni, J.R. F., Bergamaschi, M. A., Branquinho, O.C., Yamamoto, J.S., Carlson, C. M.F. (2001), Cellular Networks Infrastructure – an Optimized Planning, *Proceedings of the 9th International Conference on Telecommunication System – Modeling and Analysis*, Dallas, p. 331-340, March.
- Dornan, A. (2001), *Wireless Communication – O Guia Essencial de Comunicação Sem Fio*, Ed. Campus, 2001.

- Dravida et. al. (1998), Narrowband and Broadband Infrastructure Design for Wireless Networks, *IEEE Communication Magazine*, p. 72-78, May 1998.
- Faruque, S. (2000), *Cellular Mobile Systems Engineering*, Mobile Communications Series, p. 17-51.
- Feo, T.A. & e Resende (1995), M.G.C., Greed Randomized Adaptive Search Procedures, *Journal of Global Optimization*, 6, p. 109-133, 1995.
- Fleurent, C. & Glover, F. (1999), Improved constructive multistart strategies for the quadratic assignment problem using adaptive memory, *Inform Journal on Computing* 11, p. 198-204.
- Glover, F. & Laguna, M., (1997) *Tabu Search*, Kluwer.
- Hansen, P. & Mladenovic, N. (2001), Variable neighborhood search: Principles and applications, *European Journal of Operational Research*, 130, p. 449-467.
- Hertz, A. & Kobler, D. (2000), A framework for the description of evolutionary algorithms, *European Journal of Operational Research*, 126, p. 1-12.
- Holma, H. e Toskala, A. (2000), WCDMA for UMTS – Radio Access for Third Generation Mobile Communications, *John Willey & Sons*, West Sussex, England.
- ITU-T Recommendations Q.1701 – 03/99 (2000) – *Framework for IMT-2000 networks*.
- Jacobsen, S. K. (1983), Heuristics for the capacitated plant location model, *European Journal of Operational Research* 12, p. 253-261.
- Melkote, S., Daskin M. (2000), An Integrated Model of Facility Location and Transportation Network Design, aceito para publicação em *Transportation Research*.
- Melkote, S., Daskin M. (2001), Capacitated Facility Location/Network Design Problems, *European Journal of Operational Research* 19, 481-495.
- Michalewicz, Z. (1985), *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, 3rd edition, Springer-Verlag.

- Mirchandani, P. B., Francis R. L. (editores) *Discrete Location Theory*, Wiley, New York, 1990.
- Ojanperä, T. (1998), An Overview of Third-Generation Wireless Personal Communications: A European Perspective, *IEEE Personal Communications*.
- Prais, M. e Ribeiro, C.C. (2000), Reactive GRASP: An Application to a Matrix Decomposition Problem in TDMA Traffic Assignment. *Inform Journal on Computing*, 21, p 164-176.
- Resende, M.G.C. (2001), Greedy Randomized Adaptative Search Procedures (GRASP), *Encyclopedia of Optimization*, Kluwer Academic Press, 2001.
- Resende, M.G.C. e Ribeiro C.C. (2002), Greedy Randomized Adaptative Search Procedures, em *Handbook of Applied Optimization*, P.M. Pardalos and M.G.C. Resende, Eds. Oxford University Press.
- van Laarhoven, P.J.M., Aarts, E.H.L. 1987, *Simulated Annealing: Theory and Applications*, Kluwer.
- Yang, S. C. (1998), CDMA RF SYSTEM ENGINEERING, *Artech House Publishers*.