



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Rafael Saraiva Campos

**Localização de terminais móveis utilizando correlação
de assinaturas de rádio-frequência**

Rio de Janeiro

2010

Rafael Saraiva Campos

**Localização de terminais móveis utilizando correlação
de assinaturas de rádio-frequência**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Sistemas Inteligentes.

Orientador: Prof. Dr. Lisandro Lovisolo

Rio de Janeiro

2010

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CEH/A

C198	<p>Campos, Rafael Saraiva. Localização de terminais móveis utilizando correlação de assinaturas de rádio-frequência / Rafael Saraiva Campos. - 2010. 135 f.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Lisandro Lovisolo. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Engenharia.</p> <p>1. Radiofrequência. 2. Sistema de comunicação móvel. I. Lovisolo, Lisandro. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Engenharia. III. Título.</p>
cw	CDU 621.39

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação.

Assinatura

Data

Rafael Saraiva Campos

**Localização de terminais móveis utilizando correlação
de assinaturas de rádio-frequência**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Sistemas Inteligentes.

Aprovado em: 13 de Julho de 2010

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Lisandro Lovisolo, D.Sc. (Orientador)

Faculdade de Engenharia - UERJ

Prof. Dr. Marcelo Gonçalves Rubinstein

Faculdade de Engenharia - UERJ

Prof. Dr. Júlio Cesar Rodrigues Dal Bello

Faculdade de Engenharia - UFF

Prof. Dr. Marco Antonio Grivet Mattoso Maia

Faculdade de Engenharia - PUC

Prof. Dr. Paulo Sergio Ramirez Diniz

Faculdade de Engenharia - UFRJ

Rio de Janeiro

2010

AGRADECIMENTO

Agradeço ao meu orientador e amigo, Prof. Dr. Lisandro Lovisolo, que renovou em mim a confiança e o entusiasmo necessários para, após oito anos de longa espera, retornar à vida acadêmica, conduzindo-me, com determinação e dedicação incomuns, do início ao fim do primeiro passo nessa direção: a obtenção do título de Mestre em Ciências. Não considero exagero afirmar que, não o tivesse conhecido, esse objetivo jamais se teria realizado. Mais do que apoio técnico e educacional - ambos magistral e continuamente por ele oferecidos - o Prof. Lisandro concedeu-me algo ainda mais raro: incentivo. Incentivo pela sua dedicação ímpar ao exercício da nobre tarefa de educar, incentivo pelo seu exemplo de habilidade técnica e retidão moral, incentivo pela sua ação resoluta e correta. Ao Prof. Lisandro atribuo os eventuais méritos deste trabalho, eximindo-o das inevitáveis falhas.

*I tried to look too far ahead
and saw the road go to my past instead*

Rob Halford

RESUMO

CAMPOS, Rafael Saraiva. *Localização de Terminais Móveis utilizando Correlação de Assinaturas de Rádio-Frequência*. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, 2010.

Nesta dissertação são analisados métodos de localização baseados na rede, com destaque para os métodos de correlação de assinaturas de rádio-frequência (DCM - *Database Correlation Methods*). Métodos baseados na rede não requerem modificações nos terminais móveis (MS - *Mobile Stations*), sendo portanto capazes de estimar a localização de MS legados, i.e., sem suporte específico a posicionamento. Esta característica, associada a alta disponibilidade e precisão dos métodos DCM, torna-os candidatos viáveis para diversas aplicações baseadas em posição, e em particular para a localização de chamadas para números de emergência - polícia, defesa civil, corpo de bombeiros, etc. - originadas de telefones móveis celulares. Duas técnicas para diminuição do tempo médio para produção de uma estimativa de posição são formuladas: a filtragem determinística e a busca otimizada utilizando algoritmos genéticos. Uma modificação é realizada nas funções de avaliação utilizadas em métodos DCM, inserindo um fator representando a inacurácia intrínseca às medidas de nível de sinal realizadas pelos MS. As modificações propostas são avaliadas experimentalmente em redes de telefonia móvel celular de segunda e terceira gerações em ambientes urbanos e suburbanos, assim como em redes locais sem fio em ambiente *indoor*. A viabilidade da utilização de bancos de dados de correlação (CDB - *Correlation Database*) construídos a partir de modelagem de propagação é analisada, bem como o efeito da calibração de modelos de propagação empíricos na precisão de métodos DCM. Um dos métodos DCM propostos, utilizando um CDB calibrado, teve um desempenho superior ao de vários outros métodos DCM publicados na literatura, atingindo em área urbana a precisão exigida dos métodos baseados na rede pela regulamentação FCC (*Federal Communications Commission*) para o serviço E911 (*Enhanced 911*).

Palavras-chave: Métodos de localização baseados na rede. Assinatura de rádio-frequência. Banco de dados de correlação. Filtragem determinística. Espaço de correlação. Terminal móvel.

ABSTRACT

This work analyzes network based positioning methods, in particular the fingerprinting or database correlation methods. Network based methods do not require mobile station upgrading or replacement, thereby being capable of locating legacy mobile stations, i.e., without any specific positioning related features. This characteristic, coupled with the high availability and precision of fingerprinting methods, make them viable candidates for several location based applications, especially for the positioning of cellular mobile phones originating emergency calls - for police, fire brigade, etc. Two techniques to reduce the average positioning fix time are proposed: deterministic filtering and genetic algorithms optimized search. A modification is proposed in database correlation methods evaluation functions, by inserting a factor representing the inherent inaccuracy in the signal strength measurement made by the mobile station. The proposed improvements are experimentally evaluated in second and third generation cellular networks in urban and suburban environments, as well as in indoor wireless local area networks. The viability of using correlation databases built from propagation modeling is evaluated, as well as the effect of empirical propagation models calibration in the fingerprinting location precision. One of the proposed fingerprinting techniques, using a calibrated correlation database, achieved a performance superior to several other published fingerprinting methods, reaching in an urban area the precision requirements set by the Federal Communications Commission for network based methods providing the Enhanced 911 emergency location service.

Keywords: Network based location methods. Radio-frequency fingerprints. Correlation database. Deterministic filtering. Correlation space. Mobile station.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Áreas Preditas de Melhor Servidor de Três Setores.	25
Figura 2 - Linhas de Posição Lineares.	29
Figura 3 - Multi-lateração Circular.	30
Figura 4 - Multi-lateração Hiperbólica.	34
Figura 5 - Método do Ângulo de Chegada.	35
Figura 6 - Centróide Simples.	37
Figura 7 - Centróide da Seção de Anel Circular.	38
Figura 8 - Método de Localização Híbrido AOA+RTT.	40
Figura 9 - Fluxograma de Requisição de Localização Originada pelo MS.	46
Figura 10 - Superfície da Área de Serviço representada como uma Matriz.	52
Figura 11 - Perfil do Relevo com Altura de Prédios.	53
Figura 12 - Cálculo da Altura Efetiva da Antena da BTS.	54
Figura 13 - Mapa de RSS para uma Célula.	55
Figura 14 - Sub-amostragem de um CDB estruturado como uma Grade Uniforme. ...	57
Figura 15 - Rota de Calibração.	58
Figura 16 - Redução do Espaço de Correlação com Filtragem Determinística.	63
Figura 17 - Distância Euclidiana entre Assinaturas de RF no Espaço de RSS.	66
Figura 18 - Representação da Topologia da ANN com Três Entradas por Célula.	72
Figura 19 - Representação da Topologia da ANN com Duas Entradas por Célula. ...	72
Figura 20 - Probabilidade de Erro Circular.	76
Figura 21 - Rotas de Coleta GSM.	81
Figura 22 - Treinamento das ANNs para Localização GSM <i>Outdoor</i>	86
Figura 23 - Comparação dos Métodos de Localização Utilizando GA na Região 1. ...	88
Figura 24 - Comparação do Tempo para Produzir uma Estimativa de Posição.	89
Figura 25 - Cardinalidade dos Conjuntos \mathcal{B} e \mathcal{D} no Método <i>DcmFull</i>	91
Figura 26 - Distribuição dos Valores Medidos de TA.	91
Figura 27 - Rota de Coleta e Posições Estimadas pelo Método <i>DcmFull</i> na Região 1. ...	92
Figura 28 - Precisão do Método <i>DcmFull</i> em Função de r_S	93
Figura 29 - Precisão Experimental dos Métodos <i>DcmFull</i> , <i>DcmAnn</i> e <i>DcmGaNew</i>	96

Figura 30 - Precisão de Diversos Métodos de Localização.	97
Figura 31 - Efeito do Primeiro Passo da Filtragem Determinística na Precisão.	98
Figura 32 - Erro Médio do Método <i>DcmFull</i> versus Valor de TA na Região 2.	99
Figura 33 - Efeito da Calibração na Precisão do Método <i>DcmFull</i> na Região 1.	100
Figura 34 - Área de Melhor Servidor Preditada do Setor 9 na Região 1.	101
Figura 35 - Área de Melhor Servidor Preditada do Setor 53 na Região 1.	101
Figura 36 - Precisão do Método <i>DcmFull</i> em Dois Setores da Região 1.	102
Figura 37 - Tela do <i>NetStumbler</i>	109
Figura 38 - Espaçamento entre os Pontos de Coleta WiFi.	109
Figura 39 - Treinamento da ANN para Localização WiFi <i>Indoor</i>	112
Figura 40 - Precisão de Localização <i>Indoor</i> de Diversos Métodos.	113
Figura 41 - Estimativas de Posição no Teste <i>Indoor</i>	114
Figura 42 - Precisão de Localização <i>Indoor</i> em Condições <i>Cross-Device</i>	115
Figura 43 - Efeito do Parâmetro δ na Precisão em Condições <i>Cross-Device</i>	115
Figura 44 - Precisão do Método CID+RTT em Condições LOS.	120
Figura 45 - Precisão dos Métodos <i>DcmFull</i> e CID+RTT em Condições NLOS.	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quadro Sinótico dos Métodos de Localização.....	44
Tabela 2 - Coeficientes do Modelo de Okumura-Hata.	53
Tabela 3 - Rotas de Coleta em Redes GSM.	80
Tabela 4 - Métodos DCM Avaliados no Teste GSM <i>Outdoor</i>	83
Tabela 5 - Configuração GA	83
Tabela 6 - Características dos CDBs	84
Tabela 7 - Valores Ótimos de N e K	85
Tabela 8 - Efeito da Filtragem de Média Móvel na Precisão do Método <i>DcmFull</i>	92
Tabela 9 - Erro de Localização dos Métodos Baseados em Centróides.	94
Tabela 10 - Erro de Localização dos Métodos <i>DcmFull</i> , <i>DcmSad</i> e <i>DcmSpear</i>	95
Tabela 11 - Métodos DCM Avaliados no Teste WiFi <i>Indoor</i>	110
Tabela 12 - Valores Empíricos de Parâmetros NLOS.....	119

LISTA DE SIGLAS

3GPP	Third Generation Partnership Project
AGPS	Assisted Global Positioning System
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
ANN	Artificial Neural Network
AOA	Angle of Arrival
AP	Access Point
BCCH	Broadcast Control Channel
BSC	Base Station Controller
BSIC	Base Station Identity Code
BTS	Base Transmission Station
CDB	Correlation Database
CDF	Cumulative Distribution Function
CEP	Circular Error Probability
CGALIES	Coordination Group on Access to Location Information by Emergency Services
CGI	Cell Global Identifier
CI	Cell Identifier
CID	Cell Identity
DCM	Database Correlation Method
DEM	Digital Elevation Model
E911	Enhanced 911
EIRP	Effective Isotropic Radiated Power
EOTD	Enhanced Observed Time Difference
ETSI	European Telecommunication Standards Institute
FCC	Federal Communications Commission
FDD	Frequency Division Duplex
GA	Genetic Algorithms
GDOP	Geometric Dilution of Precision
GPS	Global Positioning System

GSM	Global System for Mobile Telecommunications
GTD	Geometric Time Difference
KNN	K Nearest Neighbors
LA	Location Area
LAC	Location Area Code
LCS	Location Services
LLOP	Linear Line of Position
LMU	Location Management Unit
LOP	Line of Position
LOS	Line of Sight
MAC	Medium Access Control
MGRS	Military Grid Reference System
MS	Mobile Station
MSE	Mean Squared Error
NLOS	Non-Line of Sight
NMR	Network Measurement Report
OTD	Observed Time Difference
RAN	Radio Access Network
RF	Radio Frequency
RMS	Root Mean Squared
RSS	Received Signal Strength
RTD	Real Time Difference
RTT	Round Trip Time
RXLEV	Received Signal Level
SACCH	Slow Associated Control Channel
SAD	Sum of Absolute Differences
SMLC	Serving Mobile Location Center
SSID	Service Set Identity
TA	Timing Advance
TDOA	Time Difference of Arrival
TOA	Time of Arrival
UHF	Ultra High Frequency

VHF	Very High Frequency
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
UTDOA	Uplink Time Difference of Arrival
UTM	Universal Transverse Mercator
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WiFi	Wireless Fidelity

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	17
1	CLASSIFICAÇÃO DOS MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO	22
1.1	Conceitos Básicos	22
1.1.1	<u>Setor ou Célula</u>	22
1.1.2	<u>Posição de um Setor</u>	23
1.1.3	<u>Setor Melhor Servidor</u>	23
1.1.4	<u>Setor Vizinho</u>	23
1.1.5	<u>Setor de Referência ou Setor Âncora</u>	24
1.1.6	<u>BTS Melhor Servidora</u>	24
1.1.7	<u>BTS Vizinha</u>	24
1.1.8	<u>BTS de Referência ou BTS Âncora</u>	24
1.1.9	<u>Área Preditada de Melhor Servidor de um Setor</u>	24
1.1.10	<u>Tempo de Propagação Ida e Volta entre o MS e a BTS Servidora</u>	25
1.2	Classificação segundo o Método de Cálculo	25
1.2.1	<u>Identidade da Célula</u>	26
1.2.2	<u>Triangulação</u>	26
1.2.2.1	Multi-lateração Circular utilizando RTT	27
1.2.2.2	Multi-lateração Circular utilizando Atenuação de Propagação	30
1.2.2.3	Multi-lateração Hiperbólica	32
1.2.2.4	Multi-angulação	35
1.2.3	<u>Centróides</u>	36
1.2.3.1	Centróide Simples	36
1.2.3.2	Centróide Ponderado	36
1.2.3.3	Centróide da Seção de Anel Circular	38
1.2.3.4	Centróide da Área Preditada de Melhor Servidor utilizando RTT	38
1.2.4	<u>Correlação de Assinaturas de Rádio-Frequência</u>	39
1.2.5	<u>Híbridos</u>	39
1.3	Classificação segundo a Participação do MS	41
1.3.1	<u>Baseado na Rede</u>	41

1.3.2	<u>Assistido pelo MS</u>	41
1.3.3	<u>Baseado no MS</u>	42
1.4	Classificação segundo a Quantidade Mínima de Setores Necessária para a Localização	42
1.4.1	<u>1 Setor</u>	43
1.4.2	<u>2 Setores</u>	43
1.4.3	<u>3 Setores</u>	43
1.5	Quadro Sinótico	43
2	MÉTODOS DE CORRELAÇÃO DE ASSINATURAS DE RF	45
2.1	Assinaturas de Rádio-Frequência	47
2.2	Banco de Dados de Correlação	48
2.2.1	<u>Estrutura do CDB</u>	48
2.2.1.1	Grade Uniforme	49
2.2.1.2	Lista Indexada	49
2.2.2	<u>Construção do CDB</u>	49
2.2.2.1	Medidas de Campo	50
2.2.2.2	Modelagem de Rádio-Propagação	50
2.2.2.3	Calibração do CDB obtido por Modelagem utilizando Medidas de Campo..	56
2.2.2.4	Interpolando Valores Preditos e Medidos	59
2.3	Técnicas para Reduzir o Espaço de Correlação	60
2.3.1	<u>Filtragem Determinística</u>	61
2.3.1.1	Primeiro Passo de Filtragem	61
2.3.1.2	Segundo Passo de Filtragem	61
2.3.1.3	Terceiro Passo de Filtragem	62
2.3.2	<u>Busca Otimizada utilizando Algoritmos Genéticos</u>	63
2.4	Correlação de Assinaturas de Rádio-Frequência	65
2.4.1	<u>Distância no Espaço N-Dimensional de RSS</u>	66
2.4.1.1	Caso Particular	67
2.4.1.2	Caso Geral com Termo de Penalidade	67
2.4.2	<u>Redes Neurais Artificiais</u>	71
2.4.3	<u>Coefficiente de Correlação de Spearman</u>	73

3	CRITÉRIOS PARA AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE LOCALI- ZAÇÃO	75
3.1	Acurácia	75
3.2	Precisão	76
3.3	Erro de Localização Ponderado	77
3.4	Complexidade	77
3.5	Disponibilidade	78
4	AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE MÉTODOS DCM EM RE- DES GSM	80
4.1	Campanha de Coleta de Assinaturas de RF	80
4.2	Configuração dos Métodos Avaliados	82
4.2.1	<u>Métodos DCM</u>	82
4.2.2	<u>Valores Ótimos de K nos Métodos $DcmFull$, $DcmSad$ e $DcmSpear$</u>	82
4.2.3	<u>Valor Ótimo de N no Método $DcmFull$</u>	84
4.2.4	<u>Topologia e Treinamento das ANNs</u>	85
4.2.5	<u>Outros Métodos</u>	86
4.3	Comparação das Técnicas de Redução do Espaço de Correlação ..	86
4.3.1	<u>Métodos $DcmGaOld$ e $DcmGaNew$</u>	87
4.3.2	<u>Métodos $DcmFull$ e $DcmGaNew$</u>	89
4.4	Filtragem de Média Móvel	90
4.5	Resolução Planar do CDB	93
4.6	Precisão Experimental	94
4.6.1	<u>Centróides</u>	94
4.6.2	<u>Métodos $DcmFull$, $DcmSad$ e $DcmSpear$</u>	95
4.6.3	<u>Métodos $DcmFull$, $DcmAnn$ e $DcmGaNew$</u>	95
4.6.4	<u>Diversos Métodos</u>	95
4.7	Efeito do Primeiro Passo da Filtragem Determinística na Pre- cisão do Método $DcmFull$	97
4.8	Efeito da Calibração dos Modelos de Propagação na Precisão do Método $DcmFull$	99
4.9	Comparação com Resultados Publicados na Literatura	102

4.9.1	<u>Métodos de Multi-Lateração</u>	102
4.9.2	<u>Métodos utilizando ANNs</u>	104
4.9.3	<u>Métodos DCM utilizando CDBs baseados em Medidas</u>	105
4.9.4	<u>Métodos DCM utilizando CDBs baseados em Modelagem de Propagação</u> ..	106
5	AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE MÉTODOS DCM EM RE-	
	DES WIFI	108
5.1	Campanha de Coleta de Assinaturas de RF	108
5.2	Configuração dos Métodos Avaliados	109
5.2.1	<u>Métodos DCM</u>	109
5.2.2	<u>Topologia e Treinamento da ANN</u>	111
5.3	Avaliação do Erro de Localização em Condições <i>Single-Device</i>	111
5.4	Avaliação do Erro de Localização em Condições <i>Cross-Device</i>	113
5.5	Comparação com Resultados Publicados na Literatura	114
6	ANÁLISE COMPARATIVA DOS MÉTODOS DCMFULL E CID+	
	RTT	117
6.1	Avaliação Semi-Empírica em Rede WCDMA 850 MHz	118
6.2	Resultados da Simulação	120
	CONCLUSÃO	122
	REFERÊNCIAS	126

INTRODUÇÃO

A localização de terminais em redes de telefonia móvel celular tem sido alvo, nos últimos anos, de crescente interesse das operadoras de serviços de comunicação móvel, de fornecedores de plataformas de *software* e *hardware*, de órgãos reguladores de telecomunicações e dos usuários. Esse interesse tem-se intensificado com o desenvolvimento de diversas aplicações baseadas na localização dos terminais móveis nessas redes.

A localização de chamadas para números de emergência - polícia, bombeiros, defesa civil - originadas em telefones móveis celulares constitui a aplicação mais crítica. A possibilidade de localizar uma vítima de sequestro, ou um automóvel acidentado em uma estrada, traz benefícios óbvios, reduzindo o tempo de resposta das autoridades e aumentando a probabilidade de salvar vidas. Tamanha relevância levou órgãos reguladores de telecomunicações em diversos países a definir requisitos mínimos de disponibilidade e acurácia na localização dos terminais móveis originando chamadas de emergência e que deverão ser atendidos pelas operadoras de telefonia móvel celular.

Do ponto de vista das operadoras, a possibilidade de localizar os terminais móveis gera a oportunidade de oferecer serviços de valor agregado baseados em localização. Há uma grande variedade de serviços de localização (LCS - *Location Services*) disponíveis atualmente, que de modo geral podem ser agrupados nas seguintes categorias [1]:

- Localização de chamadas de emergência: localização de chamadas para a polícia, bombeiros, defesa civil, etc. [2] [3] [4] [5];
- Tarifação baseada em posição: define-se uma área doméstica, onde a tarifação do usuário é mais baixa (muitas vezes equivalente à telefonia fixa); ao originar ou receber chamadas fora dessa área, o usuário é tarifado normalmente [6];
- Rastreamento de pessoas e veículos: permite monitoração de frotas, monitoração de força de trabalho [7], localização de veículos roubados, monitoração de pessoas com necessidade específicas (crianças, idosos e portadores de necessidades especiais) [8] [9] [10];
- Serviços de informação baseados em posição: páginas amarelas, propaganda baseada em posição, previsão do tempo na área onde o usuário está localizado, etc. [11];
- Entretenimento: localização de grupos de amigos, jogos, etc. [12].

As operadoras também podem utilizar a informação de localização do terminal móvel (MS - *Mobile Station*) para otimizar o desempenho da rede, melhorando a eficiência de *handover* e *paging*. O *handover* é a transferência de uma chamada em curso de uma estação rádio-base para outra, com o objetivo de permitir a continuidade da chamada à medida que o usuário desloca-se entre as áreas de cobertura de estações vizinhas. O *paging* é envio de mensagens por difusão (*broadcast*) para um conjunto de estações atendendo a área onde o MS registrou-se na rede pela última vez. Em redes de telefonia móvel celular, o *handover* e o *paging* são procedimentos críticos em termos de consumo de recursos na interface rádio, influenciando diretamente diversos indicadores-chave de desempenho. Assim, o uso de informações de localização do MS para melhorar a eficiência destes procedimentos pode otimizar a capacidade e a qualidade da rede de acesso rádio [13].

Nos Estados Unidos da América do Norte, o FCC (*Federal Communications Commission*) especificou requisitos de precisão para o serviço E911 (*Enhanced 911*), destinado a localizar chamadas para o número de emergência 911 originadas de terminais móveis celulares [2]. Na primeira fase, iniciada em 1996, a posição estimada de um MS seria igual à localização da estação rádio-base servidora. Na segunda fase, iniciada em 2001, os seguintes requisitos de precisão para a localização dos MS foram definidos:

- Para métodos baseados na rede: 100 metros para 67% das chamadas e 300 metros para 95% das chamadas;
- Para métodos baseados no terminal: 50 metros para 67% das chamadas e 150 metros para 95% das chamadas.

A definição de métodos baseados na rede e baseados no terminal é feita na Seção 1.3.

A Comunidade Econômica Européia adotou uma regulamentação para a localização de chamadas para o número de emergência pan-europeu 112, definida pelo Grupo de Coordenação do Acesso a Informações de Localização pelos Serviços de Emergência (CGALIES - *Coordination Group on Access to Location Information by Emergency Services*), que atuou de 2000 a 2002. O CGALIES não especificou requisitos de precisão. A localização das chamadas de emergência é obrigatória, com a melhor precisão possível, desde 2003 [3].

Em resposta a estas exigências, órgãos normativos internacionais de padrões de telefonia móvel celular abordaram a questão da localização. O ETSI (*European Telecommunication Standards Institute*) listou uma série de métodos de localização recomendados

para redes celulares GSM (*Global System for Mobile Telecommunications*) [14]. Analogamente, o 3GPP (*Third Generation Partnership Project*) definiu métodos de localização para redes celulares UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*) com acesso rádio WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*) [15].

Independentemente do padrão de acesso rádio adotado, as redes sem fio dispõem de informações de localização dos terminais registrados. Estas informações inerentes, usualmente de baixa resolução, são necessárias para permitir o *paging*, roteamento de pacotes e continuidade de chamada durante o *handover*. Por exemplo, em redes celulares GSM sem nenhum suporte específico a LCS, a melhor resolução para a localização de um MS em modo *idle* - i.e., que não está participando de uma chamada - é a região correspondente a uma área de localização (LA - *Location Area*), que é uma zona de *paging* dentro da região atendida por uma controladora de estações rádio-base (BSC - *Base Station Controller*). Para um MS em modo ativo - i.e., conectado, participando de uma chamada - nessa mesma rede, é possível identificar o setor que atende o terminal, e estimar a posição do MS a partir da área geográfica coberta pelo setor. Estas informações podem ser utilizadas por métodos de localização para produzir estimativas de posição mais acuradas, sem a necessidade de modificações nos MS. Por não exigirem terminais modificados, estes métodos são classificados como métodos baseados na rede e podem atender a 100% da base de assinantes [16].

No Brasil, a ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações) ainda não exige que operadoras de telefonia móvel celular localizem as chamadas para números de emergência originadas em suas redes. Contudo, tal exigência pode tornar-se realidade num futuro próximo. Neste cenário, as operadoras deverão ser capazes de estimar a posição de qualquer MS originando uma chamada de emergência.

Dos cerca de 4 bilhões de celulares em uso no mundo atualmente [17], apenas 163 milhões têm receptor GPS (*Global Positioning System*) [18], ou seja, aproximadamente 4% do total de aparelhos. Este percentual médio inclui os países desenvolvidos do hemisfério norte, logo, no Brasil, a penetração de terminais com GPS provavelmente é muito inferior a este valor. Estes dados indicam que, no Brasil, onde aproximadamente 90% dos celulares em uso são GSM [19], é essencial aprimorar métodos baseados na rede para a localização de MS legados de segunda geração - i.e., sem qualquer tipo de suporte específico a LCS. Contudo, a utilidade dessas soluções não está restrita a este cenário particular.

Estes métodos também podem estender a disponibilidade de serviços LCS, produzindo estimativas de posição quando outros mais acurados - como GPS ou GPS Assistido (AGPS - *Assisted GPS*) - estiverem indisponíveis devido a limitações sistêmicas - por exemplo, no interior de edificações ou em áreas urbanas densas, onde a recepção de sinais GPS é muitas vezes inviável [16] [20].

Considerando a relevância dos métodos de localização aplicáveis a terminais legados em redes de segunda geração, particularmente para a localização de chamadas de emergência, esta dissertação tem como objetivo avaliar as alternativas para implementação de tais métodos, selecionando aquela que melhor atende aos seguintes requisitos:

- Método baseado na rede;
- Quantidade mínima de setores para a localização igual a 1;
- Suportar localização em redes celulares de segunda geração;
- Tempo reduzido para *positioning fix*;
- Utilizar sinalização pré-existente;
- Dispensar instalação de elementos na rede de acesso rádio.

Após a seleção do tipo de método de localização, serão propostos melhoramentos para permitir alcançar os requisitos de precisão definidos pelo FCC E911 para métodos baseados na rede.

No Capítulo 1 é feita uma classificação dos métodos de localização em redes móveis celulares, utilizando apenas três critérios essenciais: o método de cálculo, o grau de participação do terminal móvel na produção da estimativa de posição e a quantidade mínima de setores de referência necessários para a localização.

No Capítulo 2, a classe de métodos de localização por correlação de assinaturas de rádio-frequência é apresentada, sendo feita a identificação e caracterização de seus elementos constituintes básicos. Contribuições para a redução do espaço de correlação - utilizando algoritmos genéticos e filtragem determinística - são formuladas. Propõe-se a inserção, no processo de correlação de assinaturas de rádio-frequência, do erro intrínseco à medida de nível de sinal recebido pelo MS, através de modificações na função de avaliação.

No Capítulo 3 são apresentadas as métricas ou critérios utilizados para a avaliação do desempenho de métodos de localização. Os conceitos de acurácia, precisão, complexidade e disponibilidade são definidos. Uma métrica de avaliação da precisão, baseada nos requisitos do FCC E911, é proposta.

Nos Capítulos 4 e 5, o desempenho de métodos de correlação de assinaturas de rádio-frequência, utilizando as contribuições apresentadas no Capítulo 2, é experimentalmente avaliado em testes de campo em dois tipos de rede - GSM e WiFi (*Wireless Fidelity*) 802.11b/g - e em dois tipos de ambiente - *indoor* e *outdoor*, respectivamente.

No Capítulo 6, o método de multi-lateração circular utilizando atraso de propagação, amplamente citado na literatura, é avaliado através de medidas de campo e simulações computacionais, em redes celulares de terceira geração. Para que a avaliação seja mais realista, uma modelagem do atraso adicional de propagação devido à ausência de visada direta entre o MS e as estações rádio-base de referência é utilizada.

1 CLASSIFICAÇÃO DOS MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO

Neste capítulo apresenta-se uma classificação dos métodos de localização bidimensional de MS em redes de telefonia móvel celular. Esta classificação simplificada utiliza apenas três critérios: o método de cálculo, o grau de participação do MS no cálculo de posição e o número mínimo de setores requerido para estimar a localização do MS. Estes critérios constituem o conjunto mínimo necessário para permitir uma avaliação comparativa das diversas soluções de localização disponíveis atualmente. Há, contudo, diversas taxonomias mais abrangentes na literatura [20] [21] [22], não restritas a redes celulares, que utilizam esses e outros parâmetros para a classificação. Por exemplo, algumas taxonomias agrupam os métodos de localização em função do tipo de ambiente (*indoor* ou *outdoor*) onde são aplicáveis [21]. Esta divisão não é seguida aqui, pois diversos métodos, como os de correlação de assinaturas de rádio-frequência, identidade da célula, etc., podem ser aplicados em ambos os ambientes [23].

1.1 Conceitos Básicos

Alguns conceitos que serão utilizados na descrição dos métodos de localização precisam ser previamente definidos.

1.1.1 Setor ou Célula

É uma subdivisão lógica, de *hardware* e de rádio-propagação de uma estação rádio-base (BTS - *Base Transmission Station*): *lógica*, pois a cada setor pode ser atribuído um identificador lógico distinto, como por exemplo o identificador global de célula (CGI - *Cell Global Identifier*) em redes GSM; de *hardware*, pois a cada setor pode ser alocada uma parcela do *hardware* (amplificadores, filtros, canalização) da BTS; de *rádio-propagação*, pois a cada setor podem ser alocados sistemas irradiantes distintos (antenas, cabos, conectores, etc.) e a cobertura eletromagnética de cada setor pode atender áreas geograficamente diferentes.

1.1.2 Posição de um Setor

A posição de um setor é definida pelas coordenadas geográficas da antena transmissora desta célula. Assim, por distância entre o MS e uma dada célula, entende-se a distância euclidiana entre o MS e a projeção, no plano, da antena transmissora desta célula. A antena da célula ou setor é o ponto de referência de posição - para fins de cálculo de distância, angulação, etc. - do setor.

1.1.3 Setor Melhor Servidor

É o setor com o qual o MS está sincronizado e cujo canal de controle o MS decodifica. Em redes assíncronas, o MS mantém sincronismo apenas com o setor melhor servidor. Usualmente, o setor melhor servidor, também denominado simplesmente setor servidor, é o setor cujo sinal é recebido com maior intensidade pelo MS.

Neste trabalho, quando se fizer referência a setor melhor servidor ou setor servidor, assume-se que este é o setor cujo sinal é recebido com maior intensidade pelo MS. Contudo, em algumas circunstâncias específicas, associadas ao processo de *handover*, isto não ocorre. Por exemplo, em redes GSM, o MS, quando ligado (*power on*), varre os canais de controle da banda de operação (ou bandas, para MS multi-bandas), sincronizando-se com o canal de controle recebido com maior intensidade [24]. O procedimento de *handover* pode ser iniciado quando o nível do canal de controle desta célula cai abaixo de um limiar, sendo superado pela intensidade de sinal recebido de alguma célula vizinha [25]. Até que esta transição (*handover*) entre as células de origem e destino seja completada, o sinal do setor servidor não é o mais intenso. Esta condição também pode ocorrer quando o *handover* é disparado devido à qualidade do sinal recebido (expressa pela relação sinal-ruído e pela taxa de erro de quadros), carregamento da célula servidora ou distância entre o MS e a célula servidora [25]: o MS é forçado a realizar o *handover* para uma célula menos carregada, mesmo que a célula de destino - que se torna então o setor melhor servidor - seja recebida com uma intensidade de sinal inferior.

1.1.4 Setor Vizinho

É qualquer setor cujo sinal foi recebido acima do limiar de sensibilidade do MS e reportado no relatório de medidas (NMR - *Network Measurement Report*) que é perio-

dicamente enviado pelo MS para o setor servidor. Usualmente, se N setores podem ser inseridos no NMR, os $N-1$ setores com maior nível de sinal recebido ou melhor relação sinal-ruído, excetuando o setor servidor, são incluídos na lista de vizinhos.

1.1.5 Setor de Referência ou Setor Âncora

A localização de um MS é normalmente feita em duas etapas [22]. Na primeira etapa são coletadas medidas na interface rádio, como ângulo de chegada, nível de sinal recebido, tempo de chegada, etc. Na segunda etapa os parâmetros medidos são fornecidos a um método de cálculo de posição. Estas medidas podem ser feitas no enlace direto (sentido BTS para MS) pelo MS ou no enlace reverso (sentido MS para BTS) pela BTS. Os setores que participam da primeira etapa da localização do MS - medindo parâmetros relacionados à transmissão do MS ou tendo parâmetros referentes a sua própria transmissão medidos pelo MS a ser localizado - são denominados setores de referência ou setores âncora.

1.1.6 BTS Melhor Servidora

Também denominada simplesmente BTS servidora, é a BTS à qual pertence o setor melhor servidor.

1.1.7 BTS Vizinha

É uma BTS - diferente da BTS melhor servidora - e que teve qualquer dos seus setores inclusos na lista de setores vizinhos reportada no NMR.

1.1.8 BTS de Referência ou BTS Âncora

É uma BTS à qual pertence pelo menos um setor de referência.

1.1.9 Área Preditada de Melhor Servidor de um Setor

É a área geográfica calculada por meio de um modelo de rádio-propagação onde o nível de sinal recebido (RSS - *Received Signal Strength*) predito do setor em questão é maior que o de qualquer outro setor da rede. A Figura 1 ilustra as áreas preditas de

melhor servidor de três setores de uma mesma BTS, calculadas aplicando o modelo de predição empírico de Okumura-Hata [26]. O relevo e os prédios são representados na base topográfica digitalizada da região. As perdas adicionais por difração sobre estes obstáculos foram calculadas por meio do modelo de Epstein-Peterson [27].

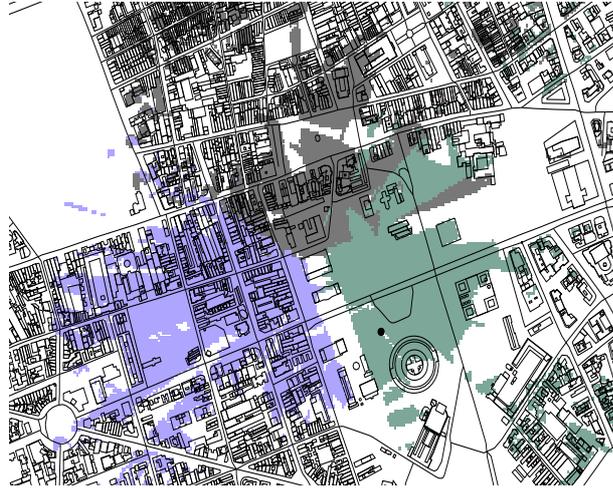


Figura 1 - Áreas Preditas de Melhor Servidor de Três Setores.

1.1.10 Tempo de Propagação Ida e Volta entre o MS e a BTS Servidora

O tempo de ida e volta do sinal (RTT - *Round Trip Time*) é geralmente medido pela BTS servidora em redes sem fio utilizando acesso múltiplo por divisão de código ou por divisão de tempo. Assumindo um tempo de processamento desprezível no MS, o valor de RTT pode ser diretamente relacionado à distância d percorrida pelo sinal entre a antena transmissora do setor servidor e o MS pela equação [28] [29]:

$$\text{RTT} = \left\lceil \frac{2d}{cT_s} \right\rceil \quad (1)$$

onde c é a velocidade da luz no espaço livre em metros por segundo e T_s é o período de símbolo em segundos.

1.2 Classificação segundo o Método de Cálculo

O primeiro critério de classificação é a maneira pela qual os métodos de localização calculam a estimativa de posição do MS no plano. Para utilizar a geometria euclidiana, é

necessário que as coordenadas geográficas dos setores de referência e do MS sejam representadas através uma projeção cartográfica retangular, ou seja, utilizando um sistema de coordenadas cartesianas. Os principais exemplos de sistemas de coordenadas retangulares utilizados em cartografia são o sistema UTM (*Universal Transverse Mercator*) [30], que utiliza a projeção cartográfica transversa de Mercator, e o sistema MGRS (*Military Grid Reference System*) [31].

1.2.1 Identidade da Célula

No método de localização da identidade da célula (CID - *Cell Identity*), a posição do MS é assumida como sendo igual à da antena transmissora do setor melhor servidor. O método CID, embora seja de baixa complexidade e elevada disponibilidade, apresenta uma precisão muito dependente da densidade de setores na área de interesse [32]. Assim, o erro de localização pode variar de algumas centenas de metros em áreas urbanas até vários quilômetros em áreas rurais.

1.2.2 Triangulação

As técnicas de triangulação utilizam medidas de distâncias (multi-lateração) ou ângulos (multi-angulação) entre o MS e os setores de referência para estimar a localização do MS [20].

Todos os métodos de triangulação presumem condições de propagação com linha de visada (LOS - *Line of Sight*) entre o MS e setores de referência. A propagação por múltiplos percursos e a presença de obstáculos entre o MS e os setores de referência podem corromper as medidas angulares, de tempo e de atenuação no percurso. Assim, a propagação sem linha de visada (NLOS - *Non Line of Sight*) é a principal fonte de erro para esses métodos. Como a propagação NLOS predomina em ambientes urbanos, a precisão dos métodos de triangulação pode ser seriamente comprometida nesses ambientes.

Além da propagação NLOS, outro fator que limita a precisão dos métodos de triangulação é a resolução finita das medidas realizadas na interface aérea e que são utilizadas no cálculo de posição: tempo, RSS e ângulo de chegada. A resolução da medida de tempo de propagação depende da largura de banda da portadora na interface rádio, sendo inversamente proporcional ao período de um símbolo, conforme a equação (1). A resolução da medida de RSS depende de especificações da interface rádio. Em redes GSM

e WCDMA, por exemplo, os valores de RSS são reportados pelo MS em passos de 1 dB [24] [33]. A resolução da medida angular depende da configuração dos conjuntos de antenas diretivas necessários para estimar o ângulo de chegada, bem como do diagrama de irradiação das antenas utilizadas no conjunto [34].

1.2.2.1 Multi-lateração Circular utilizando RTT

Um valor de RTT pode ser convertido em uma estimativa de distância, através da equação (2). O lugar geométrico dos pontos que distam \hat{d}_i da i -ésima célula de referência é um círculo de raio \hat{d}_i centrado na posição desta célula. Esse círculo define o conjunto dos pontos no plano que contém a possível localização do MS, sendo denominado linha de posição (LOP - *Line of Position*).

$$\hat{d}_i = \frac{c \cdot T_s \cdot \text{RTT}_i}{2} \quad (2)$$

A medida de RTT tem resolução igual ao período de um símbolo. Então, considerando uma medida de RTT, o conjunto de pontos no plano que contém a localização do MS não é um círculo, e sim um anel circular centrado na BTS servidora, conforme ilustrado na Figura 7. Porém, por razões de simplificação, utiliza-se a representação por meio de LOPs circulares, com raio igual ao raio interno no anel circular. Quanto menor o período de símbolo, menor é a largura do anel circular e mais este anel aproxima-se de um círculo. Assim, em sistemas banda larga, como o WCDMA, a utilização de LOPs circulares não introduz erro significativo [35].

Na multi-lateração circular utilizando RTT, também conhecida como método do tempo de chegada (TOA - *Time of Arrival*), a posição do MS é estimada a partir da interseção de pelo menos 3 LOPs circulares. Cada LOP é definida pelas coordenadas (centro do círculo) de uma célula e pela distância (raio do círculo) estimada entre essa célula e o MS. A distância entre o MS e a i -ésima célula é dada pela equação (2). A equação do círculo centrado na i -ésima célula e com raio \hat{d}_i é dada por $(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 = \hat{d}_i^2$. Para o caso genérico com N células, obtém-se o sistema de equações:

$$\begin{aligned} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 &= \hat{d}_1^2 \\ &\vdots \\ (x - x_N)^2 + (y - y_N)^2 &= \hat{d}_N^2 \end{aligned} \quad (3)$$

A linearização desse sistema de equações quadráticas pode ser feita através de séries de Taylor ou de LOPs lineares (LLOP - *Linear Line of Position*). A expansão em séries de Taylor é um método iterativo que exige uma estimativa inicial (x_0, y_0) da posição do MS. Cada equação quadrática é aproximada pela expansão da série de potências em torno do ponto de referência (x_0, y_0) . Cada equação do sistema é linearizada, após o truncamento da série de Taylor, com a eliminação dos termos não lineares [36]. Porém, a linearização por meio de LLOPs é um método mais simples e produz resultados mais acurados que a série de Taylor [37]. A linearização por meio de LLOPs baseia-se em uma observação geométrica simples. Duas LOPs circulares podem interceptar-se em dois pontos. Estes pontos definem uma reta, que é dita uma LLOP. Esta reta é secante a ambos os círculos, conforme ilustrado na Figura 2. No sistema da equação (3), a primeira LOP circular é selecionada como referência. A primeira equação é subtraída das demais, e, após alguma manipulação algébrica, obtém-se um sistema com $N - 1$ equações lineares, dado por:

$$\begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 \\ \dots & \dots \\ x_N - x_1 & y_N - y_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} x_2^2 - x_1^2 + y_2^2 - y_1^2 + \hat{d}_1^2 - \hat{d}_2^2 \\ \dots \\ x_N^2 - x_1^2 + y_N^2 - y_1^2 + \hat{d}_1^2 - \hat{d}_N^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

onde a j -ésima equação, $j = 1, 2, \dots, N-1$, é a equação da LLOP definida pela intersecção da primeira e $(j + 1)$ -ésima LOPs circulares. Embora estas retas secantes sejam referidas como linhas de posição [37], elas não o são. Linhas de posição, por definição, são o conjunto de pontos no plano onde o MS pode estar localizado. Um MS não pode estar localizado em qualquer ponto de uma reta secante, mas tão somente nos dois pontos de suporte, destacados na Figura 2, localizados na intersecção das LOPs circulares.

Em condições hipotéticas ideais - visada direta entre o MS e a BTS servidora, medida de RTT com resolução e acurácia infinitas - os círculos interceptar-se-iam em um único ponto, conforme ilustrado na Figura 3(a). Este ponto indicaria a localização do MS. Nestas condições, seriam necessárias precisamente três LOPs circulares para obter a localização exata do MS. Quaisquer LOPs adicionais seriam redundantes. Após a linearização, o sistema resultante seria determinado, com duas equações e duas variáveis (as coordenadas x e y do MS). Cada equação do sistema linearizado corresponde a uma LLOP.

Em condições reais, especialmente em área urbanas, raramente há visada direta

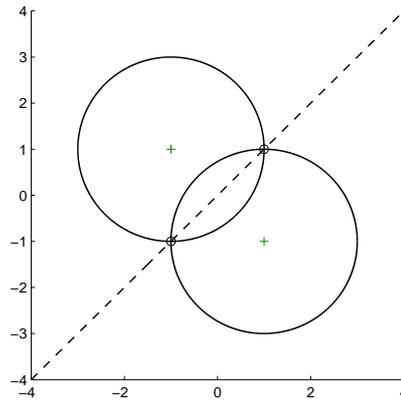


Figura 2 - Linhas de Posição Lineares.

entre o MS e a célula servidora. Além disso, a resolução da medida de RTT é igual ao período de símbolo, e a acurácia desta medida é igual a ± 0.5 período de símbolo [33]. Assim, os círculos não se interceptam em um único ponto, conforme ilustrado na Figura 3(b). Nessas condições, a utilização de mais de três LOPs circulares pode melhorar a estimativa final da posição do MS [14]. Para $N > 3$, após a linearização, o sistema resultante tem mais de duas equações linearmente independentes, porém apenas duas variáveis. Sistemas sobre-determinados com equações linearmente independentes não apresentam solução única. Neste caso, pode-se recorrer ao método dos mínimos quadrados para estimar a melhor solução, dada por [38]:

$$\begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} (\mathbf{U}^T \mathbf{U})^{-1} \mathbf{U}^T \mathbf{V} \quad (5)$$

onde

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 \\ \dots & \dots \\ x_N - x_1 & y_N - y_1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{V} = \begin{bmatrix} x_2^2 - x_1^2 + y_2^2 - y_1^2 + \hat{d}_1^2 - \hat{d}_2^2 \\ \dots \\ x_N^2 - x_1^2 + y_N^2 - y_1^2 + \hat{d}_1^2 - \hat{d}_N^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Em redes GSM, para obter mais de um valor de RTT, o MS deve realizar *hard handovers* forçados sequencialmente por várias BTS [16] [5]. Porém, durante o *hard handover*, a transmissão de voz ou dados é interrompida. Além disso, uma carga adicional de processamento e sinalização é imposta sobre a BSC. De qualquer modo, a baixa resolução

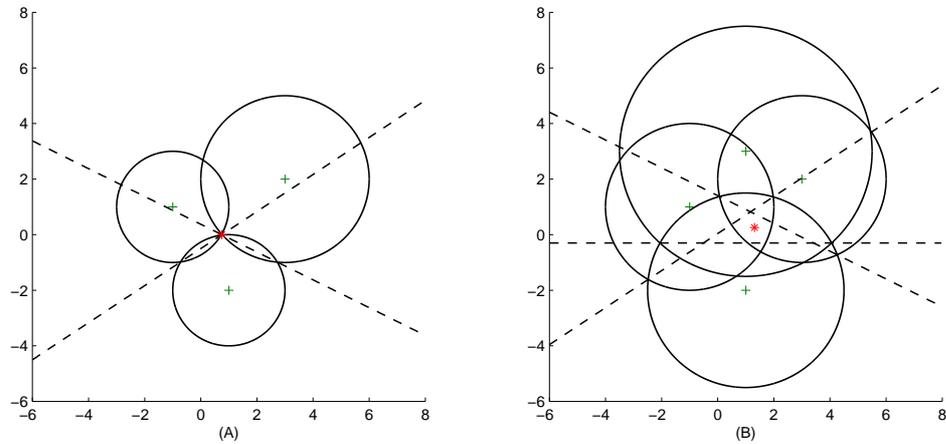


Figura 3 - Multi-lateração Circular.

temporal do RTT em redes GSM limita a acurácia deste método.

Em redes WCDMA a resolução temporal é muito maior que em redes GSM. Consequentemente, a resolução espacial também. Enquanto a onda eletromagnética percorre 78 metros durante o período de um símbolo em uma rede WCDMA, ela percorre 554 metros durante o período de um símbolo em uma rede GSM. A possibilidade de realizar amostragem [35] permite aumentar ainda mais a resolução espacial em redes WCDMA. Além disso, redes WCDMA suportam *soft handovers*, o que permite a obtenção de mais de um valor de RTT sem a necessidade de interromper a comunicação do usuário.

A precisão desse método será avaliada em uma rede WCDMA em um ambiente *outdoor* urbano no Capítulo 6, onde será apresentada uma técnica para a modelagem estatística do atraso adicional de propagação sem linha de visada.

1.2.2.2 Multi-lateração Circular utilizando Atenuação de Propagação

Este método é similar à multi-lateração circular utilizando RTT. A diferença reside na maneira como as distâncias - entre o MS e as células de referência - são calculadas. Na multi-lateração circular utilizando atenuação de propagação, ao invés do tempo de propagação, a perda média de propagação entre a antena transmissora da célula e o receptor do MS é utilizada para calcular a distância entre o MS e a célula. A perda média

de propagação, em decibéis, entre o MS e a i -ésima célula será dada por:

$$L_i = P_{t,i}(\theta, \phi) - P_{r,i} \quad (7)$$

onde $P_{r,i}$ é a potência da i -ésima célula recebida pelo MS e $P_{t,i}(\theta, \phi)$ é a potência isotrópica efetivamente irradiada (EIRP - *Effective Isotropic Radiated Power*) pela antena transmissora da i -ésima célula na direção de interesse, i.e., na direção do MS. A direção de interesse é definida pelos ângulos θ e ϕ nos planos horizontal e vertical, respectivamente.

Para que a perda de propagação possa ser usada para estimar a distância entre o MS e a célula, deve-se utilizar o RSS médio de um canal transmitido com potência constante no enlace direto. O valor médio de RSS deve ser calculado ao longo de um período de integração suficientemente longo para eliminar variações rápidas do sinal recebido (desvanecimento Rayleigh).

Modelos de propagação empíricos, como Okumura-Hata [26] e Egli [27], utilizam expressões analíticas para calcular a perda de propagação em função da distância entre o transmissor e o receptor. Utilizando sua forma inversa, pode-se obter essa distância em função da perda de propagação. Seja a expressão da perda de propagação média em dB dada pelo modelo de Okumura-Hata:

$$L_i = k_1 + k_2 \log(d_i) + k_3 \log(h_b) + k_4 L_f + k_5 \log(h_b) \log(d_i) \quad (8)$$

onde d_i é a distância entre o MS e a i -ésima célula em metros, h_b é a altura efetiva da antena transmissora da célula, L_f é a perda adicional por difração e os coeficientes k_1 a k_5 variam em função da morfologia (urbana, suburbana, rural) e da frequência de transmissão. Igualando as equações (7) e (8), e isolando o termo correspondente à distância, tem-se:

$$\hat{d}_i = 10^{(P_{t,i}(\theta, \phi) - P_{r,i} - k_1 - k_3 \log(h_b) - k_4 L_f) / (k_2 + k_5 \log(h_b))} \quad (9)$$

Para o caso geral com $i=1,2,\dots,N$ células, obtém-se um sistema como o da equação (3), com as distâncias calculadas pela equação (9). A estratégia de linearização por meio de LLOPs pode ser usada, resultando num sistema como o da equação (4).

Como a posição do MS não é conhecida *a priori*, os ângulos θ e ϕ entre o MS e a i -ésima célula não podem ser identificados. Assim, não é possível saber qual a EIRP

da célula na direção do MS, ou seja, o valor do parâmetro $P_{t,i}(\theta, \phi)$. Pode-se apenas assumir um valor, tipicamente a EIRP na direção de máxima irradiação. Quando as antenas utilizadas são diretivas, esta pressuposição insere significativo erro. O perfil dos obstáculos entre o MS e a i -ésima célula (prédios, montanhas, paredes, etc.) também não é conhecido. Logo, o valor da perda adicional por difração L_f não pode ser estimado acuradamente. O desconhecimento de $P_{t,i}(\theta, \phi)$ e L_f são limitações inerentes ao método de multi-lateração circular utilizando perda de propagação, e comprometem sua acurácia substancialmente, conforme será mostrado na Seção 4.6.4.

1.2.2.3 Multi-lateração Hiperbólica

Na multi-lateração hiperbólica, também conhecida como método da diferença dos tempos de chegada (TDOA - *Time Difference of Arrival*) [22], a posição do MS é estimada a partir da interseção de pelo menos duas LOPs hiperbólicas. Uma hipérbole é o lugar geométrico dos pontos sobre o plano para os quais a diferença Δ_{ij} entre as distâncias a dois pontos fixos i e j , denominados focos, é constante. Na localização utilizando multi-lateração hiperbólica, os focos estão situados nas coordenadas de duas células distintas. O parâmetro Δ_{ij} pode ser calculado a partir da diferença entre os tempos de propagação de sinais trafegando entre o MS e as células i e j .

Considere que o cálculo de Δ_{ij} é feito no enlace direto e que as rajadas transmitidas pelas células i e j são recebidas pelo MS nos instantes t_{i_1} e t_{j_1} , com $t_{j_1} > t_{i_1}$. A diferença de tempo observada (OTD - *Observed Time Difference*) entre os tempos de chegada é dada por:

$$\text{OTD}_{ij} = t_{j_1} - t_{i_1} \quad (10)$$

Porém, em redes assíncronas, células distintas não têm necessariamente alinhamento temporal de quadro. Assim, as células i e j podem ter iniciado a transmissão de suas rajadas em instantes distintos. Para o cálculo desta defasagem, é necessária uma referência de tempo comum, fornecida pelas unidades de gerenciamento de localização (LMUs - *Location Management Units*). As LMUs são compostas por terminais móveis celulares posicionados em coordenadas fixas e conhecidas, associados a receptores GPS [14]. A diferença entre as referências de tempo das células i e j é denominada

diferença real de tempo (RTD - *Real Time Difference*), sendo calculada por:

$$\text{RTD}_{ij} = t_{j_0} - t_{i_0} \quad (11)$$

onde t_{j_0} e t_{i_0} são as defasagens temporais das células i e j em relação à referência de tempo fornecida pelas LMUs.

Para obter-se a diferença corrigida entre os tempos de propagação, denominada diferença de tempo geométrica (GTD - *Geometric Time Difference*), aplica-se a equação:

$$\text{GTD}_{ij} = \text{OTD}_{ij} - \text{RTD}_{ij} = t_{j_1} - t_{i_1} - t_{j_0} + t_{i_0} \quad (12)$$

O parâmetro Δ_{ij} será dado por:

$$\Delta_{ij} = d_i - d_j = c \cdot \text{GTD}_{ij} \quad (13)$$

onde c é a velocidade da luz no vácuo e d_i e d_j são as distâncias euclidianas entre um ponto qualquer sobre a hipérbole e as células i e j .

Uma terceira célula é necessária para produzir uma segunda LOP hiperbólica. A diferença Δ_{ik} entre as distâncias do MS até a i -ésima e k -ésima células de referência é fornecida pela equação (13), substituindo GTD_{ij} por GTD_{ik} . O sistema de equações a seguir é obtido:

$$\begin{aligned} \Delta_{ij} &= \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2} = c \cdot \text{GTD}_{ij} \\ \Delta_{ik} &= \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \sqrt{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2} = c \cdot \text{GTD}_{ik} \end{aligned} \quad (14)$$

onde (x_i, y_i) , (x_j, y_j) e (x_k, y_k) são as coordenadas das células i , j e k .

Dois hipérbolos podem interceptar-se em mais de um ponto, conforme ilustrado na Figura 4, criando ambiguidades na localização do MS. Assim, pode ser necessária uma quarta célula para produzir uma terceira LOP hiperbólica. Uma alternativa para a linearização do sistema de equações associado à multi-lateração hiperbólica é apresentada em [39].

As diferenças entre os tempos de chegada podem ser medidas no enlace direto (sentido BTS para o MS) ou reverso (sentido MS para a BTS). No primeiro caso, o método é denominado OTD aprimorado (EOTD - *Enhanced OTD*). No segundo caso, o método é

denominado TDOA no enlace reverso (UTDOA - *Uplink TDOA*). Ambos os métodos são especificados em [14].

No método EOTD hiperbólico, a estimativa de posição pode ser calculada pelo MS ou pelo servidor de localização (SMLC - *Serving Mobile Location Center*). Na primeira alternativa, o MS calcula sua própria posição utilizando informações enviadas pela rede, como as coordenadas das células de referência e os valores de RTD medidos pelas LMUs. Na segunda alternativa, o SMLC calcula a posição do MS utilizando os valores de OTD medidos pelo MS.

No método UTDOA, o MS é instruído pela rede a realizar um *handover* assíncrono. Os tempos de chegada das rajadas de acesso geradas pelo MS são então medidos em diferentes LMUs. Estes valores são remetidos para o SMLC, onde as diferenças entre os tempos de chegada são calculadas par a par. Como no EOTD, no UTDOA pelo menos três medidas são requeridas para produzir uma estimativa de posição. Para eliminar ambiguidades, no caso das hipérbolas interceptarem-se em mais de um ponto, uma quarta LMU é necessária. É o SMLC que decide quantas e quais LMUs deverão monitorar os tempos de chegada das rajadas de acesso do MS. Tanto o EOTD quanto o UTDOA requerem a instalação de LMUs, porém apenas o EOTD requer modificações no MS.

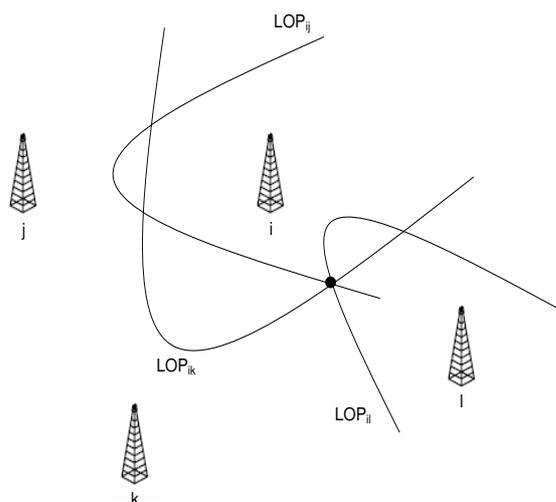


Figura 4 - Multi-lateração Hiperbólica.

1.2.2.4 Multi-angulação

Na multi-angulação, também conhecida como método do ângulo de chegada (AOA - *Angle of Arrival*), a posição do MS é estimada a partir da interseção de pelo menos duas LOPs lineares. Cada LOP é definida pelas coordenadas de uma célula e pelo ângulo horizontal de recepção do sinal do MS nesta célula. Se há N células de referência, tem-se um vetor de ângulos de chegada $[\theta_1 \theta_2 \theta_3 \dots \theta_N]^T$. Devido à presença de obstáculos entre o MS e as células de referência, os ângulos de chegada não correspondem aos ângulos de visada direta. Este erro, associado à própria resolução limitada da medida angular, faz com que as LOPs não se interceptem em um único ponto. A Figura 5 ilustra a situação para $N = 3$. Uma solução aproximada pode ser estimada pelo método dos mínimos quadrados, de modo análogo ao adotado para solucionar o sistema sobre-determinado associado à multi-lateração circular.

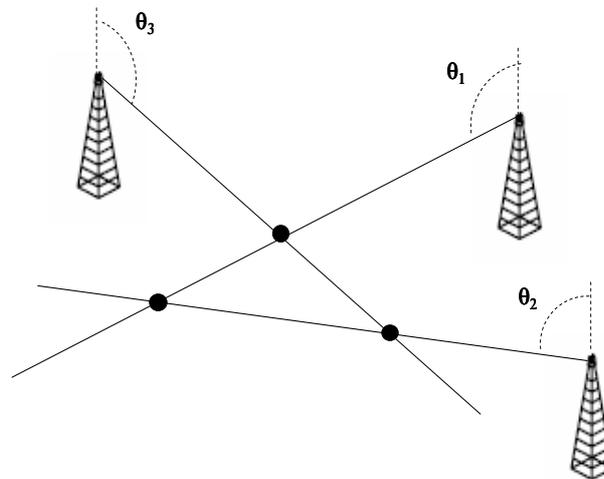


Figura 5 - Método do Ângulo de Chegada.

Apesar da vantagem de exigir apenas dois setores não-colineares para produzir uma estimativa de posição do MS, contra os três setores dos métodos de multi-lateração, o método AOA apresenta desvantagens sérias. A primeira é que para um mesmo erro na medida do ângulo de chegada, o erro de localização aumenta com a distância do MS em relação aos setores de referência [40]. A segunda desvantagem é que a acurácia de localização é seriamente degradada em condições de propagação NLOS. A terceira desvantagem é que o método AOA exige a implantação de conjuntos de antenas de alta diretividade nas BTS para a detecção do ângulo de chegada, o que implica em custos muito

elevados. Não foi encontrada na literatura pesquisada nenhuma aplicação do método AOA em redes de telefonia móvel celular em operação atualmente.

1.2.3 Centróides

Nesta classe de métodos, a posição estimada do MS é dada pelo cálculo do centróide de figuras geométricas planas. Quatro opções são apresentadas em ordem crescente de complexidade.

1.2.3.1 Centróide Simples

A posição do MS é dada pelo centróide do polígono cujos vértices estão situados nas coordenadas das antenas dos setores listados no NMR [41]. Seja \mathcal{S} o conjunto de setores reportado pelo MS no NMR. Sejam x_i e y_i as coordenadas do i -ésimo setor e $\#\mathcal{S}$ a cardinalidade de \mathcal{S} , onde $1 \leq \#\mathcal{S} \leq N$, sendo N o número máximo de setores que podem ser incluídos no NMR. A posição estimada (\hat{x}, \hat{y}) do MS é dada por:

$$\begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix} = \frac{1}{\#\mathcal{S}} \begin{bmatrix} \sum_{i \in \mathcal{S}} x_i \\ \sum_{i \in \mathcal{S}} y_i \end{bmatrix} \quad (15)$$

A Figura 6 mostra um conjunto de sete BTS omnidirecionais dispostas em um padrão hexagonal. O ponto M indica a posição real do MS, na qual ele recebe sinais das BTS 0, 1, 5 e 6. A posição estimada do MS é indicada pelo ponto M', que corresponde ao centróide do polígono cujos vértices são BTS₀, BTS₁, BTS₅ e BTS₆. O erro de localização é igual ao comprimento do segmento de reta MM'.

A representação hexagonal da área de cobertura de cada setor, ilustrada na Figura 6, é usualmente adotada para fins didáticos, não tendo qualquer correspondência com a cobertura eletromagnética em condições reais.

1.2.3.2 Centróide Ponderado

Geralmente, quanto maior o valor de RSS_i , mais próximo o MS está do i -ésimo setor. Assim, é possível aplicar um fator de ponderação em função do valor de RSS para reduzir o erro de localização em comparação ao método do centróide simples [41]. Desta

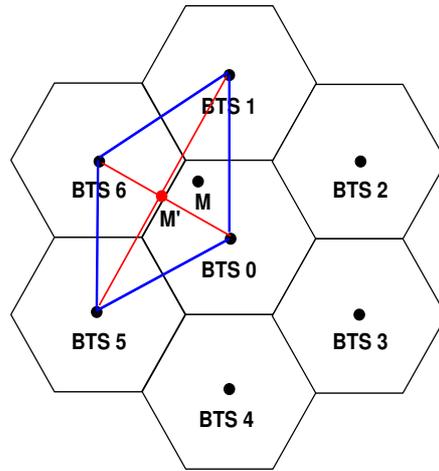


Figura 6 - Centróide Simples.

forma, as coordenadas dos vértices correspondentes a setores com RSS mais elevado têm maior peso no cálculo do centróide, conforme a equação (16). O peso W_i do i -ésimo setor é dado pela equação (17).

$$\begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sum_{i \in \mathcal{S}} W_i} \begin{bmatrix} \sum_{i \in \mathcal{S}} x_i W_i \\ \sum_{i \in \mathcal{S}} y_i W_i \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$W_i = \frac{RSS_i}{\sum_{k \in \mathcal{S}} RSS_k} \quad (17)$$

A premissa adotada para a utilização do método do centróide ponderado - a de que setores mais próximos do MS terão valores mais elevados de RSS - nem sempre é verdadeira, especialmente em condições de propagação NLOS. Nestes casos, o valor de RSS de um setor mais distante pode ser maior, devido à presença de obstáculos entre o MS e um setor próximo. Em tal situação, o ganho de acurácia decorrente do emprego do método do centróide ponderado, em relação ao método do centróide simples, é ligeiramente menor. Em [32], a utilização do método do centróide ponderado em áreas suburbanas resultou em uma redução de 14% na mediana do erro de localização em relação ao método do centróide simples. Em áreas urbanas, onde predominam condições de propagação NLOS, esta redução foi de apenas 11%.

1.2.3.3 Centróide da Seção de Anel Circular

Para uma BTS setorizada, a área de melhor servidor de um setor pode ser representada por uma seção angular centrada na antena transmissora. A direção, o raio e a abertura angular desta seção são determinados pelo azimute da antena, pela potência de transmissão e pelo diagrama de irradiação horizontal da antena. Se o valor de RTT for utilizado, esta seção angular pode ser reduzida a uma seção de anel circular [42]. Esta seção de anel circular define a área do plano onde a localização do MS é mais provável, e é ilustrada pela área hachurada na Figura 7. A posição estimada do MS é dada pelo centróide desta área. Quanto maior a resolução temporal do sistema, menor será o período de símbolo e conseqüentemente menor será a largura do anel circular, melhorando a acurácia da localização.

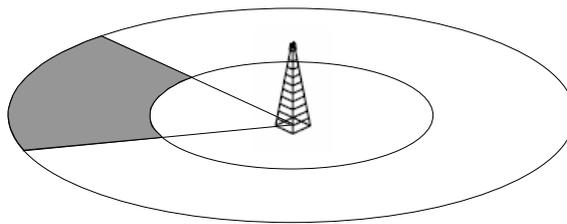


Figura 7 - Centróide da Seção de Anel Circular.

1.2.3.4 Centróide da Área Predita de Melhor Servidor utilizando RTT

A representação da área de melhor servidor como uma seção angular é uma simplificação extrema. Na prática, a área de melhor servidor de cada setor é irregular e depende do ambiente de propagação e das características dos sistemas irradiantes. Uma representação mais realista, como a ilustrada na Figura 1, pode ser obtida através de mapas de cobertura construídos com modelos de propagação e bases de dados topográficas digitalizadas. A posição do MS pode então ser dada pelo centróide da área predita de melhor servidor. Esse centróide é calculado pela média aritmética das coordenadas dos pontos contidos na área predita de melhor servidor.

O parâmetro RTT pode ser utilizado para melhorar a estimativa de localização. Para tal, as áreas preditas de melhor servidor de cada setor - obtidas a partir do mapa de predição de cobertura - são subdivididas conforme valores de RTT preditos. O valor de

RTT em cada ponto do mapa de cobertura é dado pela equação (1), inserindo na variável d a distância de visada direta entre o ponto e a antena do setor servidor. Para cada dupla (CI_i, RTT_j) há um par de coordenadas $(x_{i,j}, y_{i,j})$, correspondente ao centróide da j -ésima subárea de RTT predito pertencente à área de melhor servidor do i -ésimo setor. O parâmetro CI_i é o identificador da i -ésima célula (*CI - Cell Identifier*). O par ordenado $(x_{i,j}, y_{i,j})$ é a estimativa de posição produzida para uma dupla (CI, RTT) medida pelo MS, onde $(CI, RTT) = (CI_i, RTT_j)$. Esse método foi originalmente proposto pelo autor em [32].

1.2.4 Correlação de Assinaturas de Rádio-Frequência

Os métodos de correlação de assinaturas de rádio-frequência produzem estimativas de posição comparando assinaturas de rádio-frequência (RF - *Radio Frequency*) medidas com assinaturas de RF armazenadas em um banco de dados [41] [23]. As assinaturas de RF contém parâmetros medidos pela BTS servidora e/ou pelo MS. Os parâmetros medidos pelo MS são reportados para a rede através dos NMRs que são periodicamente enviados pelo MS para a BTS servidora. Os métodos de correlação de assinaturas de RF são apresentados no Capítulo 2.

1.2.5 Híbridos

É possível combinar dois ou mais dos métodos de cálculo de posição apresentados para produzir um método de localização híbrido. Um método híbrido é mais complexo que os métodos simples, e sua utilização justifica-se apenas se for verificada pelo menos uma das seguintes condições: **i)** redução da quantidade mínima de setores requerida para estimar a posição do MS; **ii)** redução do erro de posicionamento.

O principal exemplo de método híbrido na literatura é o AOA+RTT [43] [22]. Uma versão análoga é o método AOA+RSS [44]. Ambos são capazes de calcular a posição do MS com apenas um setor de referência, e ambos obtêm a posição estimada do MS pela intersecção de uma LOP circular e uma LOP linear. O raio r da LOP circular é calculado pela equação (2), se o parâmetro utilizado for o RTT, ou pela equação (9), se o parâmetro utilizado for a atenuação de propagação (obtida pela diferença entre a EIRP e o RSS). A LOP linear será definida pelo ângulo de chegada θ e pelas coordenadas (x_0, y_0) da BTS. A posição estimada do MS será dada pela equação (18). Esta solução, referente à configuração geométrica representada pela Figura 8, só é válida em condições de

propagação LOS entre o MS e a BTS. Em condições NLOS, o método AOA+RTT - assim como sua versão análoga, o AOA+RSS - sofrerá grande degradação de precisão [43]. Assim como no caso do método AOA, não foi encontrada na literatura pesquisada nenhuma aplicação dos métodos híbridos AOA+RTT e AOA+RSS em redes de telefonia móvel celular em operação atualmente.

$$\begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 + r \cdot \sin \theta \\ y_0 + r \cdot \cos \theta \end{bmatrix} \quad (18)$$

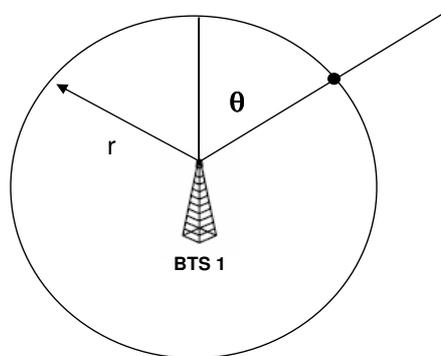


Figura 8 - Método de Localização Híbrido AOA+RTT.

Outro exemplo de método híbrido encontrado na literatura é o AOA+TDOA, que combina a multi-lateração hiperbólica com o método do ângulo de chegada. Embora em [40] resultados numéricos de simulações computacionais indiquem que esse método obtém uma acurácia superior àquela obtida pelos métodos AOA ou TDOA isoladamente, o método AOA+TDOA combina as desvantagens de ambos: **i)** requer a implantação de LMUs para a medida de diferença de tempo de chegada; **ii)** requer a implantação de conjuntos de antenas diretivas nas BTS para a medida de ângulo de chegada; **iii)** só tem desempenho aceitável em condições LOS, raramente observadas em áreas urbanas. Por essas razões, o método híbrido AOA+TDOA não é uma opção viável em cenários reais atualmente.

1.3 Classificação segundo a Participação do MS

O segundo critério de classificação dos métodos de localização é o grau de participação do MS no cálculo de posição. Há três categorias: baseado na rede, assistido pelo MS e baseado no MS. Essas categorias podem ser agrupadas em dois conjuntos: métodos que permitem a localização de terminais legados (baseados na rede) e métodos que dependem de terminais modificados (assistidos pelo MS ou baseados no MS).

1.3.1 Baseado na Rede

Os métodos baseados na rede calculam a posição do MS utilizando medidas realizadas pela BTS servidora, como o ângulo de chegada do sinal de um MS, ou informações enviadas pelo MS e não especificamente associadas a posicionamento, como medidas de nível de sinal recebido e tempo de propagação do sinal entre o MS e a BTS servidora.

Neste trabalho, assume-se que o emprego de informações ordinariamente utilizadas para gerência de recursos na interface rádio, como medidas de RSS e RTT, não caracteriza que o processo de localização é assistido pelo terminal [42] [23] [2]. Porém, algumas fontes divergem desta definição, assumindo que, se qualquer medida realizada pelo MS é utilizada no cálculo de posição, o método de localização em questão é assistido pelo terminal [45].

Os métodos baseados na rede não exigem quaisquer modificações nos terminais, logo podem atender a toda a base de assinantes. Por outro lado, como utilizam mensagens enviadas pelo MS enquanto em modo ativo, a localização em modo *idle* não é possível.

1.3.2 Assistido pelo MS

Neste trabalho, define-se que um método é assistido pelo terminal somente se informações específicas para o cálculo de posição são fornecidas pelo terminal à rede. Isto exige funcionalidades adicionais, o que requer terminais com modificações de *hardware* e/ou *software* [2].

O exemplo mais conhecido de método de localização assistido pelo MS é o AGPS. As informações auxiliares enviadas pelo MS incluem a lista de satélites GPS visíveis. Esta informação permite reduzir para apenas alguns segundos o tempo para produzir a primeira estimativa de posição, que pode chegar a dez minutos em receptores GPS [14] [21]. Outro exemplo de método de localização assistido pelo MS é o EOTD hiperbólico, onde o MS

envia à rede os valores das diferenças observadas (OTD) entre os tempos de chegada de sinais de BTS distintas [14].

1.3.3 Baseado no MS

Um método de localização é baseado no MS se o cálculo da posição é feito pelo MS, com ou sem o uso de informações auxiliares enviadas pela rede. Essa solução exige terminais com modificações de *hardware* e/ou *software*, além de uma maior capacidade de processamento no MS. O GPS e o EOTD baseado no terminal são exemplos de métodos baseados no MS.

1.4 **Classificação segundo a Quantidade Mínima de Setores Necessária para a Localização**

A quantidade mínima de setores necessária para o cálculo da posição do MS está diretamente relacionada com a disponibilidade de um método de localização. Via de regra, quanto maior essa quantidade, menor a disponibilidade do método.

A quantidade mínima de setores limita a capacidade de um método produzir uma estimativa de posição. Se o número N de setores cujos sinais são recebidos pelo MS com nível acima do limiar de recepção for inferior à essa quantidade mínima, a localização do MS não pode ser fornecida pelo método em questão. Porém, mesmo que N seja igual ou superior à quantidade mínima de setores, a acurácia da estimativa final de posição depende, dentre outros fatores, das posições relativas do MS e dos setores de referência. Por exemplo, no caso do método AOA, os dois setores necessários para estimar a posição e o MS não podem ser colineares. No método de multi-lateração hiperbólica, dependendo da disposição geométrica das células, das LMUs e do MS, uma quarta célula ou LMU de referência pode ser necessária para eliminar a ambiguidade na estimativa de posição do MS, conforme ilustrado na Figura 4. O efeito do arranjo geométrico dos setores e do MS pode ser quantificado através do parâmetro diluição geométrica de precisão (GDOP - *Geometric Dilution of Precision*). Uma avaliação teórica do parâmetro GDOP, em diferentes configurações geométricas associadas à localização por multi-lateração circular e hiperbólica, é apresentada em [46].

1.4.1 1 Setor

Os métodos de correlação de assinaturas de rádio-frequência, de identidade da célula, do centróide da área predita de melhor servidor com RTT, do centróide da seção circular e os métodos híbridos AOA+RTT e AOA+RSS são exemplos de métodos que necessitam de apenas um setor de referência para estimar a posição do MS.

1.4.2 2 Setores

O método de localização por multi-lateração angular, ou método do ângulo de chegada, é um exemplo de método que requer no mínimo dois setores de referência para estimar a posição do MS.

1.4.3 3 Setores

Necessitam de no mínimo três setores de referência, todos os métodos de multi-lateração, além dos métodos do centróide simples e do centróide ponderado.

1.5 **Quadro Sinótico**

A Tabela 1 resume as principais características dos métodos de localização apresentados neste capítulo: o método de cálculo, a participação do MS no cálculo da posição, a quantidade mínima de setores requerida para calcular a posição do MS e os elementos adicionais necessários na rede de acesso rádio (RAN - *Radio Access Network*). A última coluna informa se o método depende de condições de propagação LOS entre o MS e as células de referência - ou os satélites, no caso do método AGPS - para não sofrer degradação da acurácia de localização.

Como a precisão de um método de localização é fortemente dependente das características específicas da rede onde o mesmo será utilizado - largura de banda, resolução temporal, densidade superficial de setores, ambiente de propagação, etc. - optou-se por não inserir na Tabela 1 valores genéricos de precisão, como os fornecidos em [21]. A avaliação experimental da precisão de todos os métodos listados na Tabela 1 que não necessitam de elementos adicionais na RAN - excetuando o AGPS e o *Csecao* - será feita nos Capítulos 4, 5 e 6.

Tabela 1 - Quadro Sinótico dos Métodos de Localização.

Sigla	Método de Cálculo	Participação do MS	Quant. Mín. de Setores	Elem. adicionais na RAN	Requer LOS ?
AOA	Triang. por multi-angulação	Baseado na Rede	2	Conj. de antenas diretivas	Sim
CID	Identidade da célula	Baseado na Rede	1	-	Não
<i>Cpred</i>	Centróide da Área de Melhor Servidor Predita com RTT	Baseado na Rede	1	-	Não
<i>Csimp</i>	Centróide Simples	Baseado na Rede	3	-	Não
<i>Cpond</i>	Centróide Ponderado	Baseado na Rede	3	-	Não
<i>Csecao</i>	Centróide de Seção de Anel Circular	Baseado na Rede	1	-	Não
DCM	Correlação de Assinaturas de RF	Baseado na Rede	1	-	Não
UTDOA	Triang. por multi-lateração hiperbólica	Baseado na Rede	3	LMUs	Sim
EOTD	Triang. por multi-lateração hiperbólica	Assistido ou Baseado no MS	3	LMUs	Sim
AGPS	Triang. por multi-lateração circular	Assistido pelo MS	3	-	Sim
CID+RTT	Triang. por multi-lateração circular com RTT	Baseado na Rede	3	-	Sim
CID+RSS	Triang. por multi-lateração circular com perda de propagação	Baseado na Rede	3	-	Sim
AOA+RTT	Híbrido	Baseado na Rede	1	Conj. de antenas diretivas	Sim
AOA+RSS	Híbrido	Baseado na Rede	1	Conj. de antenas diretivas	Sim
AOA+TDOA	Híbrido	Assistido pelo MS	2	Conj. de antenas diretivas	Sim

2 MÉTODOS DE CORRELAÇÃO DE ASSINATURAS DE RF

Os métodos de correlação de assinaturas de RF, também conhecidos como DCM (*Database Correlation Methods*) ou *fingerprinting*, são métodos de localização de terminais móveis aplicáveis em qualquer rede sem fio [23]. Embora haja uma grande variedade de tais métodos, todos compartilham os mesmos elementos básicos:

- *Assinatura de RF*: É um conjunto de parâmetros disponíveis na RAN e dependentes da posição do MS, razão pela qual cada assinatura de RF é associada a uma posição específica. Se apenas parâmetros inerentes à RAN são incluídos na assinatura de RF - i.e., se nenhum parâmetro especificamente relacionado à localização precisa ser acrescentado na RAN - então o método DCM é inteiramente baseado na rede, não sendo necessária nenhuma modificação nos MS legados [47]. A estrutura da assinatura de RF é definida na Seção 2.1;
- *Banco de Dados de Correlação*: Assinaturas de RF são coletadas em testes de campo ou geradas com a utilização de modelos matemáticos de simulação de rádio-propagação, sendo então armazenadas em um banco de dados de correlação (CDB - *Correlation Database*). O CDB é diretamente acessado pelo servidor de localização. Cada assinatura de RF armazenada no CDB está associada a uma posição específica. A estrutura do CDB e as técnicas para construí-lo são apresentadas na Seção 2.2;
- *Servidor de Localização*: O SMLC (*Serving Mobile Location Center*) é o elemento de rede responsável por receber requisições de localização, consultar o CDB e estimar a posição do MS através da correlação da assinatura de RF medida pelo MS com as assinaturas de RF armazenadas no CDB;
- *Técnicas para Redução do Espaço de Busca no CDB*: O CDB pode ser muito grande e analisar todas as assinaturas de RF nele armazenadas pode ser uma tarefa muito demorada. Portanto, é necessário definir técnicas para reduzir o espaço de busca dentro do CDB, resultando em uma diminuição do tempo requerido para produzir uma estimativa de posição. Duas técnicas para redução do espaço de busca no CDB são apresentadas na Seção 2.3;
- *Correlação de Assinaturas de RF*: Para estimar a posição do MS, o SMLC compara a assinatura de RF medida pelo MS com um subconjunto das assinaturas de RF

armazenadas no CDB. Esta comparação ou correlação pode ser feita através de diferentes técnicas, como descrito na Seção 2.4.

Qualquer método DCM tem duas fases. A primeira é a fase de treinamento, durante a qual o CDB é construído. A segunda é a fase operacional ou de teste, durante a qual estimativas de posição do MS são produzidas [41]. Diferentemente dos métodos de triangulação, os métodos DCM não se baseiam na pressuposição de condições LOS [23] e não requerem uma quantidade mínima de três células de referência para estimar a posição do MS. Portanto, serviços de localização baseados em DCM normalmente têm uma disponibilidade maior do que aqueles baseados em triangulação.

Um fluxograma simplificado de uma requisição de localização originada pelo MS [14] e utilizando um sistema baseado em DCM é mostrado na Figura 9. No primeiro passo, o MS envia uma requisição de localização para o SMLC, através da RAN. No segundo passo, a RAN comunica-se com o SMLC, usualmente através de um *gateway*. O SMLC recebe a requisição, contendo a assinatura de RF medida pelo MS. No terceiro passo, o SMLC consulta o CDB, obtendo no quarto passo as assinaturas de RF que serão comparadas com a assinatura de RF medida pelo MS. O SMLC então aplica uma função de correlação para obter a estimativa de posição do MS, que é enviada para o MS através da RAN no quinto e sexto passos.

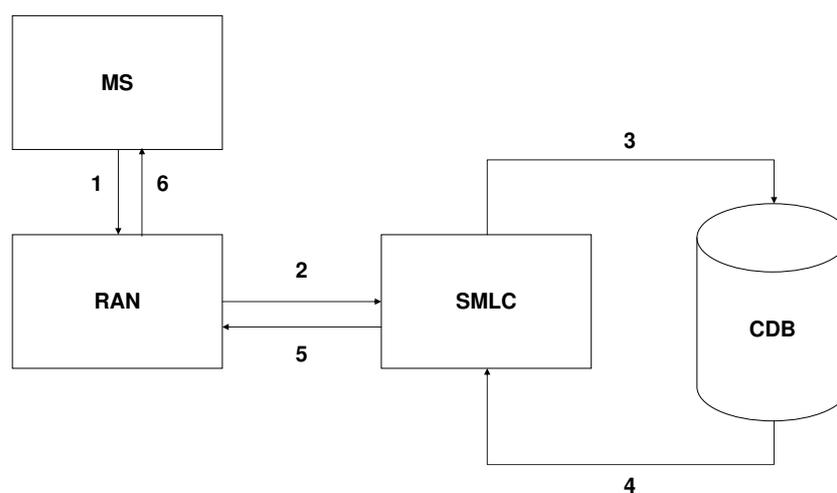


Figura 9 - Fluxograma de Requisição de Localização Originada pelo MS.

2.1 Assinaturas de Rádio-Frequência

Uma assinatura de RF é um conjunto de parâmetros de sinal dependente da posição do MS, medidos pelo MS ou pelos setores de referência [23]. Tal qual uma impressão digital humana, que traz a identificação única de uma pessoa, espera-se que uma assinatura de RF identifique unicamente uma posição geográfica. Para tal, o número de parâmetros de sinal na assinatura de RF deve ser grande o suficiente para permitir uma correspondência única com uma dada posição. Os parâmetros de sinal selecionados - ou pelo menos suas médias temporais - devem ter baixa variabilidade no tempo em uma dada posição. Porém, estabilidade completa ao longo do tempo não é possível. Embora o uso das médias temporais reduza variações de pequena escala, modificações na RAN - como a ativação de novos setores, substituição de modelos de antenas de transmissão ou recepção, alteração nas potências de transmissão, etc. - podem invalidar o mapeamento prévio entre uma dada assinatura de RF e uma certa posição. Em tais casos, é necessário atualizar o CDB, obtendo novas assinaturas de RF através dos métodos descritos na Seção 2.2.2.

Uma grande variedade de parâmetros de sinal pode ser selecionada para compor uma assinatura de RF: RSS [32], RTT [48], perfil de retardo de potência calculado por meio da resposta impulsiva do canal [49], ângulo de chegada [43], etc. Idealmente, os parâmetros selecionados devem estar previamente disponíveis na RAN. O uso de parâmetros ordinariamente envolvidos com o gerenciamento de chamadas ou sessões evita a carga adicional na RAN que surge se mensagens e parâmetros específicos para localização são inseridos. Outro benefício dessa abordagem é que nenhuma modificação de *hardware* ou *software* é necessária no MS, tornando possível localizar qualquer MS legado dentro da área de cobertura da rede. Por essas razões, os parâmetros mais frequentemente utilizados são o RSS e o RTT, que são os parâmetros selecionados para compor as assinaturas de RF alvo e de referência neste trabalho. O MS periodicamente monitora o RSS do canal de controle do setor servidor e das células vizinhas para auxiliar a seleção de células e *handover*. Estes valores de RSS são reportados para a BSC através de NMRs. Apenas o RSS de canais transmitidos com potência constante pode ser inserido em uma assinatura de RF [32], então o canal de controle, que é transmitido por todas as células com potência constante, é a escolha mais óbvia. O valor de RTT é periodicamente medido pelo MS ou pelos setores âncora.

Uma assinatura de RF pode ser classificada como *assinatura alvo* ou como *assina-*

tura de referência. Uma assinatura de RF alvo é a assinatura de RF associada ao MS que se deseja localizar, i.e., ela contém parâmetros de sinal medidos pelo MS ou pelos setores de referência. As assinaturas de RF de referência são coletadas ou geradas durante a fase de treinamento e armazenadas no CDB. Cada assinatura de RF de referência está associada a um único par de coordenadas geográficas. Ambos os tipos de assinaturas de RF têm a mesma estrutura: todos os parâmetros usados na assinatura alvo também devem estar presentes nas assinaturas de referência. A estrutura das assinaturas de RF alvo utilizada neste trabalho é definida pela matriz $N_a \times 3$:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \text{CI}_1 & \text{RSS}_1 & \text{RTT}_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \text{CI}_{N_a} & \text{RSS}_{N_a} & \text{RTT}_{N_a} \end{bmatrix} \quad (19)$$

onde N_a é o número de setores âncora, CI_i e RSS_i são o CI e RSS medido do i -ésimo setor âncora. RTT_i é o tempo de propagação de ida e volta entre o MS e o i -ésimo setor âncora. As linhas são classificadas em ordem decrescente de RSS, então $\text{RSS}_i \geq \text{RSS}_j$, se $i \leq j$. Os passos de quantização e as faixas dinâmicas de RSS e RTT, o número máximo de setores âncora e o número de valores de RTT disponíveis são específicos de cada tipo de rede sem fio. Em redes GSM, por exemplo, o valor de RTT está disponível apenas para o setor melhor servidor [24], que usualmente é o setor âncora com o maior valor de RSS. Em redes WiFi 802.11b/g, por exemplo, não há qualquer valor de RTT [50].

2.2 Banco de Dados de Correlação

O CDB é essencialmente um conjunto de assinaturas de RF de referência. Cada assinatura de RF de referência está associada a um único par de coordenadas geográficas. O CDB é construído durante a fase de treinamento do método DCM [22], utilizando modelagem de rádio-propagação, medidas de campo ou uma combinação de ambos.

2.2.1 Estrutura do CDB

Cada elemento do CDB contém uma assinatura de RF de referência e um par único de coordenadas geográficas. A distribuição planar - ou espacial, no caso de localização tridimensional - dessas coordenadas de referência dentro da área de serviço define a estru-

tura do CDB. A *área de serviço* é a região onde o serviço de localização é oferecido. No restante deste trabalho, apenas localização bidimensional é considerada, mas a extensão para o caso tridimensional é direta.

2.2.1.1 Grade Uniforme

Se o CDB é organizado como uma grade uniforme, todas as coordenadas de referência são uniformemente espaçadas no plano. A distância entre coordenadas de referência adjacentes define a resolução planar do CDB. A resolução planar deve ser comparável à acurácia média esperada do método de localização [23]. Não é razoável utilizar uma resolução planar muito pequena, se o erro de localização médio é muito alto. Por outro lado, utilizar uma resolução planar muito grande pode provocar degradação da precisão do método. O efeito de diferentes valores de resolução planar na precisão de localização de métodos DCM é verificado na Seção 4.5. A grade uniforme é a estrutura mais adequada para CDBs construídos a partir de modelagem de rádio-propagação.

2.2.1.2 Lista Indexada

Se o CDB é estruturado como uma lista indexada, a distribuição planar das coordenadas de referência não segue nenhum padrão regular. Esta estrutura é usualmente adotada em CDBs construídos a partir de medidas de campo [41]. Por exemplo, se o CDB é construído a partir de rotas veiculares de coleta de medidas, o padrão irregular das ruas pode impedir a obtenção de assinaturas de RF uniformemente espaçadas.

Cada elemento na lista contém uma assinatura de RF de referência e um par de coordenadas geográficas, obtidas através de um receptor GPS ou diretamente de um mapa - este é normalmente o caso para CDBs construídos a partir de medidas em ambientes *indoor*. O índice da lista é composto por dois campos: o par de coordenadas geográficas.

2.2.2 Construção do CDB

O CDB armazena as assinaturas de RF de referência coletadas durante testes de campo ou geradas por modelos de propagação. O CDB é construído durante a fase de treinamento do método DCM. Esta seção apresenta as principais alternativas para a construção do CDB.

2.2.2.1 Medidas de Campo

O CDB pode ser inteiramente construído a partir de medidas de campo. A coleta de medidas requer um MS, um *software* de coleta e processamento de medidas feitas pelo MS e um receptor GPS, no caso de medidas *outdoor*. O *software* pode ser executado em um *laptop* ou *palmtop* conectado ao MS, ou no próprio MS. Periodicamente, parâmetros relacionados à localização, como aqueles listados na equação (19), são coletados pelo *software* e armazenados para posterior processamento. Esses parâmetros são medidos pelo MS ou definidos pela rede e enviados ao MS. Para cada conjunto de parâmetros coletado, a posição do MS é registrada pelo receptor GPS. No caso de medidas *indoor*, pode ser necessário utilizar um mapa com a planta do prédio e registrar as posições de referência do MS manualmente. As coordenadas de referência do MS e os parâmetros medidos compõem uma entrada no CDB estruturado como uma lista indexada, como descrito na Seção 2.2.1.

O CDB empírico obtido a partir de medidas de campo usualmente permite que os métodos DCM que dele fazem uso atinjam maior precisão. Porém, esta alternativa apresenta uma séria desvantagem, especialmente quando utilizada em redes de área metropolitana. Nessas redes, para manter o CDB atualizado, testes de campo devem ser realizados após qualquer alteração em elementos da RAN. Estas alterações - ativação de novas células, substituição de modelos de antenas, mudança de azimute ou inclinação, alteração da potência de transmissão, etc. - ocorrem frequentemente, especialmente em redes de telefonia móvel celular, tornando a utilização deste tipo de CDB praticamente inviável nessas redes. A degradação da precisão de localização de métodos DCM utilizando CDBs com parâmetros desatualizados em redes celulares foi avaliada em [41] e [51]. Porém, no caso de métodos DCM para localização *indoor*, a utilização de CDBs construídos a partir de medidas pode ser uma opção viável, considerando-se a maior complexidade do ambiente de propagação *indoor* - o que torna mais difícil a modelagem acurada da rádio-propagação - e a menor área a ser coberta pela campanha de coleta de medidas.

2.2.2.2 Modelagem de Rádio-Propagação

A principal vantagem de utilizar um CDB construído a partir de modelagem de propagação é a possibilidade de atualizar o CDB de forma fácil, rápida e barata. Toda vez

que ocorrem alterações nos elementos da RAN, a atualização do CDB requer apenas que as modelagens de propagação sejam realizadas com os parâmetros atualizados da RAN. Porém, a precisão de localização pode ser pior que aquela obtida com a utilização de CDBs construídos a partir de medidas de campo. Essa degradação da precisão pode ser reduzida através da calibração ou ajuste fino dos modelos de propagação empregados [52].

Há uma grande variedade de modelos matemáticos para a predição de rádio-propagação, mas eles podem ser agrupados em duas classes principais: modelos determinísticos e modelos empíricos. Modelos determinísticos são baseados em técnicas de traçado de trajetória de raios. Eles descrevem a propagação da onda eletromagnética por meio de raios lançados da antena transmissora. Esses raios são refletidos e difratados em elevações do terreno, edificações, paredes e outros obstáculos. A principal desvantagem desses métodos reside na elevada carga de processamento requerida e conseqüentemente no tempo mais longo para execução das predições de cobertura [53]. Modelos empíricos são baseados em extensas campanhas de coleta de medidas de campo que, após análise estatística, fornecem equações parametrizadas de perda de propagação no percurso. Os parâmetros ou coeficientes dessas equações podem ser ajustados, dentro de limites pré-determinados, para melhor representar um ambiente de propagação particular [27]. Modelos empíricos apresentam uma menor carga de processamento e, embora usualmente sejam menos acurados que os modelos determinísticos, provêm uma acurácia compatível com a acurácia média da maioria dos métodos DCM para localização *outdoor* [48] [47].

O modelo de Okumura-Hata [26] provê uma fórmula empírica para a perda de propagação, obtida a partir de extensas medidas em áreas urbanas. Esse modelo é aplicável ao projeto de sistemas operando nas faixas de UHF (*Ultra High Frequency*) e VHF (*Very High Frequency*), sob as seguintes condições: faixa de frequências entre 100 e 1500 MHz, distâncias entre 1 e 20 km, altura da antena da BTS entre 30 e 200 metros, e altura da antena do MS entre 1 e 10 metros. O modelo de Okumura-Hata é largamente utilizado no planejamento de RF de redes celulares.

O modelo de Okumura-Hata não leva em consideração explicitamente a difração sobre o terreno e edificações. Para tal, é necessário representar matricialmente a topografia da área de serviço e aplicar modelos específicos de perda por difração.

A topografia da área de serviço é representada por uma matriz \mathbf{H} denominada modelo de elevação digital (DEM - *Digital Elevation Model*) ou base topográfica digita-

lizada [54]. Cada elemento $h_{i,j}$ da matriz armazena a altura média do terreno em uma superfície de $r_H \times r_H$ m², denominada *pixel*. O parâmetro r_H é a resolução planar da matriz \mathbf{H} . A matriz \mathbf{H} também pode conter, adicionada à altura do terreno, a altura de edificações. Se a área de serviço cobre uma superfície total de $l \times w$ m², então \mathbf{H} tem $\left\lceil \frac{l}{r_H} \right\rceil \times \left\lceil \frac{w}{r_H} \right\rceil$ elementos.

Para representar a superfície da área de serviço como um plano, dividido em *pixels* uniformemente espaçados, é necessário aplicar um sistema de coordenadas geográficas que use uma projeção cartográfica retangular, como o sistema UTM. Assume-se que o sistema UTM é utilizado e que $h_{1,1}$, o primeiro elemento de \mathbf{H} , está situado no extremo noroeste da área de serviço, conforme ilustrado pela Figura 10. Se as coordenadas UTM $[x_1 \ y_1]^T$ de $h_{1,1}$ são conhecidas, então as coordenadas de $h_{i,j}$ são dadas por:

$$\begin{bmatrix} x_j \\ y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 + r_H (j - 1) \\ y_1 - r_H (i - 1) \end{bmatrix} \quad (20)$$

onde $i = 1, 2, \dots, \left\lceil \frac{w}{r_H} \right\rceil$ e $j = 1, 2, \dots, \left\lceil \frac{l}{r_H} \right\rceil$.

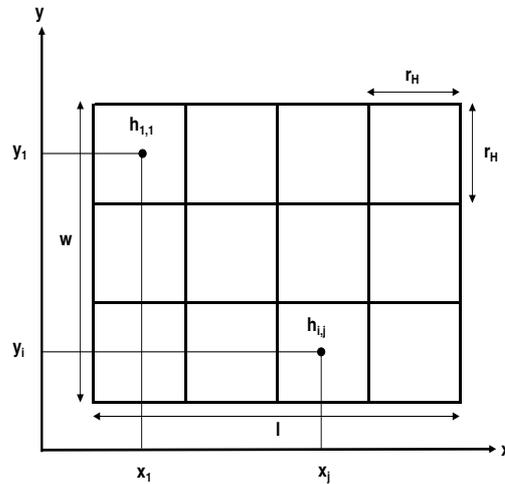


Figura 10 - Superfície da Área de Serviço representada como uma Matriz.

O perfil do relevo - incluindo a altura dos prédios, se disponível - entre a k -ésima célula e o *pixel* (i, j) é obtido a partir do DEM. A Figura 11 mostra o perfil do relevo e a fronteira da primeira Zona de Fresnel [27] em um rádio-enlace.

Após a obtenção perfil do relevo entre o transmissor e o receptor, as perdas por difração em obstáculos devem ser calculadas por um modelo específico, como Epstein-

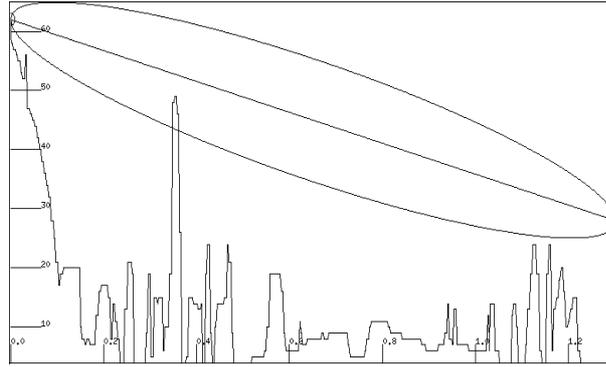


Figura 11 - Perfil do Relevo com Altura de Prédios.

Peterson, Bullington ou Deygout [27]. A perda de propagação média em dB, calculada pelo modelo de Okumura-Hata, entre a k -ésima célula na área de serviço e o *pixel* (i, j) , acrescida da perda por difração $u_{i,j,k}$, é dada por:

$$L_{i,j,k} = c_1 + c_2 \log_{10}(d_{i,j,k}) + c_3 \log_{10}(z_k) + c_4 u_{i,j,k} + c_5 \log_{10}(z_k) \log_{10}(d_{i,j,k}) \quad (21)$$

onde $d_{i,j,k}$ é a distância em metros entre a antena da k -ésima célula e o *pixel* (i, j) . Os coeficientes do modelo dependem da morfologia da região e da frequência de operação do rádio-enlace. Para RANs utilizando a banda de 869-881 MHz, como as utilizadas nos testes no Capítulo 4, o modelo de Okumura-Hata é aplicado na frequência central de 875 MHz. Os valores dos coeficientes são listados na Tabela 2. Estes são os valores padrão para áreas urbanas e suburbanas, exceto os valores de c_4 , que foram empiricamente definidos pelo autor em [55].

Tabela 2 - Coeficientes do Modelo de Okumura-Hata.

Coefficiente	Urbana	Suburbana
c_1	-12,1	-2,2
c_2	-44,9	-44,9
c_3	-5,83	-5,83
c_4	0,5	0,4
c_5	6,55	6,55

O parâmetro z_k na equação (21) é a altura efetiva em metros da antena da k -ésima célula. Sejam B_1 a altura da antena do setor em relação ao nível do solo, B_0 a altura do solo em relação ao nível do mar no local onde está instalada a antena do setor, M_1 a altura da antena do MS em relação ao nível do solo e M_0 a altura do solo em relação ao nível do mar no local onde está situado o MS. Os parâmetros B_0 , B_1 , M_0 e M_1 são

indicados na Figura 12. A altura efetiva da k -ésima célula é dada por [56]:

$$\begin{aligned} z_k &= B_1 + B_0 - (M_1 + M_0), \text{ se } B_0 > M_0 \\ z_k &= B_1, \text{ se } B_0 < M_0 \end{aligned} \quad (22)$$

onde assume-se que $M_1 = 1.5$ metros [26].

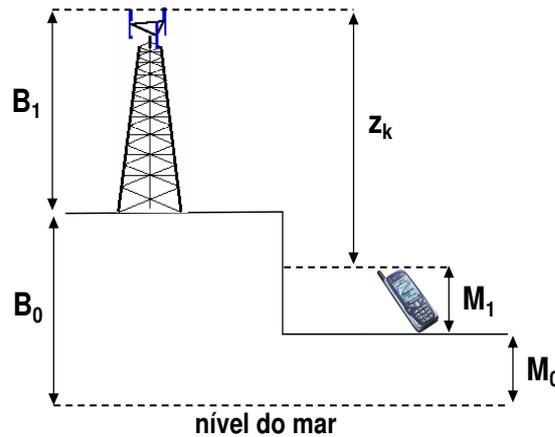


Figura 12 - Cálculo da Altura Efetiva da Antena da BTS.

Os ângulos ϕ (plano vertical) e θ (plano horizontal) entre a antena da k -ésima célula e o *pixel* (i, j) podem ser calculados utilizando trigonometria, uma vez que as coordenadas geográficas espaciais - x , y e z - da antena e do *pixel* são conhecidas. A potência de transmissão do canal de controle da k -ésima célula é conhecida, assim como as perdas em conectores e cabos entre o transmissor e a antena transmissora. Portanto, de posse dos diagramas de radiação vertical e horizontal da antena, é possível estimar a EIRP do canal de controle da k -ésima célula na direção do *pixel* (i, j) . Essa direção é definida pelos ângulos ϕ e θ . O RSS em dBm no *pixel* (i, j) do canal de controle da k -ésima célula é dado por:

$$\text{RSS}_{i,j,k} = \text{EIRP}_{i,j,k} - L_{i,j,k} \quad (23)$$

onde $\text{EIRP}_{i,j,k}$ é a EIRP do canal de controle da k -ésima célula na direção do *pixel* (i, j) e $L_{i,j,k}$ é a perda de propagação entre a antena da k -ésima célula e o *pixel* (i, j) , dada pela equação (21). Um mapa com os valores preditos de RSS para uma célula é mostrado na Figura 13. Esse mapa foi gerado utilizando o modelo de Okumura-Hata sobre uma base topográfica digitalizada com resolução planar $r_H = 5$ metros, com altura de prédios

sobreposta ao relevo. As perdas adicionais por difração sobre estes obstáculos foram calculadas por meio do modelo de Epstein-Peterson [27].

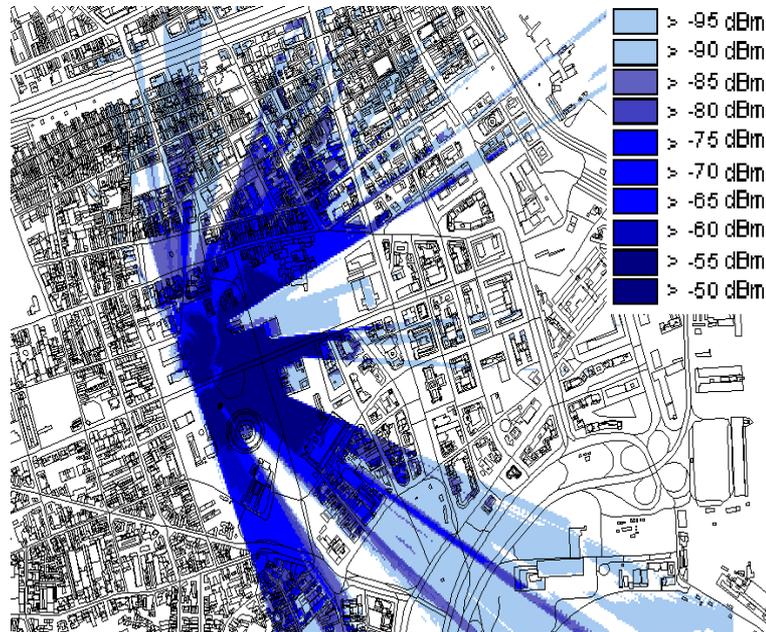


Figura 13 - Mapa de RSS para uma Célula.

Conforme definido na Seção 2.1, as assinaturas de RF alvo e de referência têm a mesma estrutura. Assim, considerando a assinatura de RF definida na equação (19), não apenas os valores de RSS, mas também os valores de RTT devem ser estimados. O valor de referência de RTT - i.e., contido na assinatura de RF de referência - entre a k -ésima célula e o *pixel* (i, j) é dado por:

$$\text{RTT}_{i,j,k} = \left\lfloor \frac{2d_{i,j,k}}{cT_s} \right\rfloor \quad (24)$$

onde c é a velocidade da luz no espaço livre em metros por segundo, T_s é o período de símbolo em segundos e $d_{i,j,k}$ é a distância em metros entre a antena da k -ésima célula e o *pixel* (i, j) . A equação (24) assume condições LOS entre a antena e o *pixel*, mas isso raramente se verifica em condições reais, especialmente em áreas urbanas densas. Para melhorar a acurácia do valor estimado do RTT de referência, o atraso adicional de propagação devido à propagação em condições NLOS pode ser modelado como uma variável aleatória. Uma alternativa para essa modelagem é apresentada no Capítulo 6 [48].

A assinatura de RF de referência no *pixel* (i, j) está completa após $\text{RSS}_{i,j,k}$ e $\text{RTT}_{i,j,k}$ terem sido calculados para $k = 1, 2, \dots, N_{i,j}$, onde $N_{i,j}$ é o número de células

cujos valores preditos de RSS estão acima de um limiar na posição do *pixel* (i, j) . Note que $1 \leq N_{i,j} \leq N_c$, onde N_c é o número total de células na área de serviço. A assinatura de RF de referência no *pixel* (i, j) é definida por:

$$\mathbf{S}_{i,j} = \begin{bmatrix} \text{CI}_{i,j,1} & \text{RSS}_{i,j,1} & \text{RTT}_{i,j,1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \text{CI}_{i,j,N_{i,j}} & \text{RSS}_{i,j,N_{i,j}} & \text{RTT}_{i,j,N_{i,j}} \end{bmatrix} \quad (25)$$

onde $\text{CI}_{i,j,k}$ é o CI da k -ésima célula cujo sinal é detectado, segundo a predição de cobertura, no *pixel* (i, j) . As linhas são classificadas em ordem decendente de RSS, i.e., $\text{RSS}_{i,j,k'} \geq \text{RSS}_{i,j,k''}$, se $k' \leq k''$.

O CDB está completo após $\mathbf{S}_{i,j}$ ter sido calculado para todos os *pixels* na área de serviço - i.e., para $i = 1, 2, \dots, \lceil \frac{w}{r_H} \rceil$ e $j = 1, 2, \dots, \lceil \frac{l}{r_H} \rceil$. A estrutura do CDB assim obtido é uma grade uniforme, conforme definido na Seção 2.2.1.

A resolução planar do CDB deve ser comparável à acurácia média esperada do método de localização [23]. Então, se r_H é muito pequeno, a grade do CDB pode ser sub-amostrada [48]. A matriz resultante terá $\lceil \frac{l}{r_S} \rceil \times \lceil \frac{w}{r_S} \rceil$ elementos, onde r_S é a nova resolução planar do CDB. A Figura 14 mostra um exemplo onde $r_S = 2r_H$. A nova assinatura de RF de referência $\mathbf{S}'_{1,1}$ do primeiro elemento da matriz é obtida pela média dos valores contidos nas assinaturas de RF de referência originais $\mathbf{S}_{1,1}$, $\mathbf{S}_{1,2}$, $\mathbf{S}_{2,1}$ e $\mathbf{S}_{2,2}$. O processo é repetido para todos os *pixels*. Se as coordenadas UTM de $[x_1 \ y_1]^T$ de $\mathbf{S}'_{1,1}$ são conhecidas, então as coordenadas de $\mathbf{S}'_{i,j}$ são dadas por:

$$\begin{bmatrix} x_j \\ y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 + r_S (j - 1) \\ y_1 - r_S (i - 1) \end{bmatrix} \quad (26)$$

onde $i = 1, 2, \dots, \lceil \frac{w}{r_S} \rceil$ e $j = 1, 2, \dots, \lceil \frac{l}{r_S} \rceil$.

2.2.2.3 Calibração do CDB obtido por Modelagem utilizando Medidas de Campo

Se o CDB é construído a partir de modelagem de propagação, medidas de campo podem ser utilizadas para um ajuste fino dos modelos de propagação empíricos utilizados. Espera-se que este procedimento melhore a precisão de localização de um método DCM utilizando tal CDB.

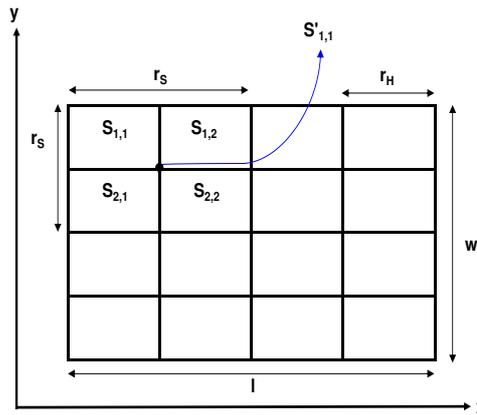


Figura 14 - Sub-amostragem de um CDB estruturado como uma Grade Uniforme.

Considere que uma rota de calibração - como a rota 3 descrita na Seção 4.1 - é realizada através da área de serviço. Em cada ponto de medição, o RSS de cada célula detectada é coletado. As coordenadas dos pontos de medição, obtidas com o GPS, também são coletadas, permitindo identificar sobre quais *pixels* do CDB os pontos de medição da rota de calibração estão situados, conforme exemplificado pela Figura 15(a). Para pontos de medição situados sobre um mesmo pixel, um valor médio de RSS por célula é calculado, restando apenas um ponto de medição equivalente por *pixel*. Após esse procedimento, cada ponto de medição é identificado pela 3-upla (i_n, j_n, \mathbf{M}_n) , conforme exemplificado pela Figura 15(b). O par (i_n, j_n) identifica o *pixel* sobre o qual o n -ésimo ponto de medição está situado. Note que $1 \leq n \leq N_m$, onde N_m é o número de pontos de medição da rota de calibração. A matriz \mathbf{M}_n é o conjunto de valores de RSS médios coletados no n -ésimo ponto de medição, e é definida por:

$$\mathbf{M}_n = \begin{bmatrix} CI_{n,1} & RSS_{n,1} \\ \vdots & \vdots \\ CI_{n,N_n} & RSS_{n,N_n} \end{bmatrix} \quad (27)$$

onde $CI_{n,k}$ e $RSS_{n,k}$ são o CI e RSS da k -ésima célula no n -ésimo ponto de medição. Note que $1 \leq k \leq N_n$, onde N_n é o número de células detectadas no n -ésimo ponto de medição e $1 \leq N_n \leq N_c$. As linhas na matriz \mathbf{M} são classificadas em ordem decrescente de RSS, então $RSS_{n,k'} \geq RSS_{n,k''}$, se $k' \leq k''$.

No n -ésimo ponto da rota de calibração, a diferença entre os valores medido e

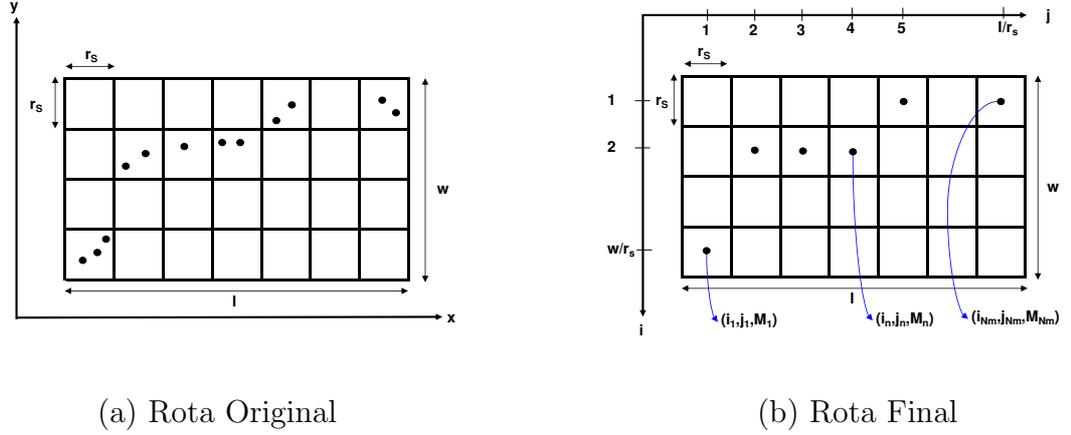


Figura 15 - Rota de Calibração.

predito de RSS da k -ésima célula é dada por:

$$b_{n,k} = \mathbf{M}_n(k', 2) - \mathbf{S}'_{i,j}(k'', 2) \quad (28)$$

para

$$\mathbf{M}_n(k', 1) = \mathbf{S}'_{i,j}(k'', 1) = \text{CI}_k \quad (29)$$

e

$$(i_n, j_n) = (i, j) \quad (30)$$

Note que $1 \leq k' \leq N_n$, $1 \leq k'' \leq N_{i,j}$, $1 \leq k \leq N_c$ e $1 \leq n \leq N_m$.

Calculando $b_{n,k}$ para todos os pontos da rota de calibração onde a k -ésima célula foi detectada, obtém-se uma matriz coluna \mathbf{B}_k com $N_{m,k}$ linhas. O parâmetro $N_{m,k}$ indica o número de pontos da rota de calibração onde a k -ésima célula foi detectada. Note que $1 \leq N_{m,k} \leq N_m$.

A calibração ou ajuste fino do modelo de propagação é feito célula a célula, através da definição de um fator de calibração C_k que é adicionado à perda de propagação - dada pela equação (21) - entre a antena da k -ésima célula e qualquer *pixel* (i, j) na área de serviço. O fator C_k minimiza a soma das diferenças absolutas entre os valores de RSS medidos e preditos da k -ésima célula nos pontos da rota de calibração onde a k -ésima célula foi detectada. O fator C_k em dB pode ser estimado pelo método dos mínimos quadrados, conforme:

$$C_k = \left(\mathbf{V}^T \mathbf{V} \right)^{-1} \mathbf{V}^T \mathbf{B}_k \quad (31)$$

onde \mathbf{V} é uma matriz coluna com $N_{m,k}$ linhas e cujos elementos são todos iguais a um [57].

2.2.2.4 Interpolando Valores Preditos e Medidos

É possível utilizar simultaneamente no CDB assinaturas de referência medidas e preditas. Neste caso, o CDB é dito misto. Primeiro, um CDB estruturado como uma grade uniforme é construído utilizando modelagem de rádio-propagação. Em seguida, medidas de campo são realizadas para coletar assinaturas de RF de referência. Estes pontos de medição podem ser isolados ou localizados ao longo de rotas. Nos *pixels* do CDB onde houver pontos de medição, as assinaturas de referência medidas substituem as assinaturas de referência preditas. Para suavizar discontinuidades entre valores preditos e medidos de RSS, alguma forma de interpolação entre os valores medidos e preditos precisa ser realizada nos *pixels* em torno dos pontos de medição [57].

Espera-se que a inserção de assinaturas de referência medidas no CDB melhore a precisão de localização do MS, especialmente nos *pixels* próximos aos pontos de medição. Porém, as mesmas dificuldades de atualização que atingem os CDBs construídos inteiramente a partir de medidas de campo também afetam os CDBs mistos. Após qualquer alteração na RAN, medidas atualizadas precisam ser obtidas para prevenir degradação da precisão de localização [41]. Se os pontos de medição são obtidos a partir de rotas veiculares, isso significa que novas rotas precisam ser realizadas para a atualização do CDB. Esse procedimento, dependendo das dimensões da área de serviço afetada pelas alterações na RAN, pode ser demorado e caro.

Uma solução alternativa para a atualização dos CDBs mistos é a utilização de receptores de referência denominados *passive listeners* [51]. Estas unidades são MS posicionados em locais com coordenadas conhecidas. Estes MS realizam medidas que são enviadas à rede através de NMRs, possibilitando uma atualização automática do CDB misto. É possível aumentar a precisão de localização em uma dada zona por meio da instalação de um número suficientemente alto de receptores de referência nessa zona. Um algoritmo para indicar a distribuição ótima de receptores de referência em uma dada área é proposto em [51].

2.3 Técnicas para Reduzir o Espaço de Correlação

Cada elemento do CDB contém uma assinatura de RF de referência e um par de coordenadas geográficas. O espaço de correlação é um sub-conjunto de elementos do CDB cujas assinaturas de referência são comparadas com a assinatura alvo. As coordenadas geográficas dos elementos do espaço de correlação são posições candidatas para a solução do problema de localização do MS.

Inicialmente, o espaço de correlação contém todos os elementos do CDB. Porém, não é praticável comparar a assinatura alvo com todas as assinaturas de referência armazenadas no CDB, uma vez que isso resultaria em uma elevada carga de processamento e em um longo tempo para produzir uma estimativa de posição. Portanto, alguma técnica deve ser aplicada para reduzir o espaço de correlação sem prejudicar de modo perceptível a precisão de localização.

Duas técnicas de redução do espaço de correlação são apresentadas nessa seção: filtragem determinística do CDB, originalmente proposta pelo autor em [48], e busca otimizada com algoritmos genéticos (GA - *Genetic Algorithms*), originalmente proposta em [58] e modificada pelo autor em [59]. As técnicas de redução do espaço de correlação são apresentadas assumindo que o CDB é estruturado como uma grade uniforme, porém a extensão para o caso de um CDB estruturado como uma lista indexada é direta.

O espaço de correlação original é representado pelo conjunto \mathcal{A} e contém todos os elementos do CDB. Se o CDB é estruturado como uma grade uniforme e a área de serviço cobre uma superfície total de $l \times w$ m², então $\#\mathcal{A} = \left\lceil \frac{l}{r_S} \right\rceil \times \left\lceil \frac{w}{r_S} \right\rceil$, onde r_S é a resolução planar do CDB. O conjunto \mathcal{A} é definido por:

$$\mathcal{A} = \left\{ \left(x_j, y_i, \mathbf{S}'_{i,j} \right) \mid i = 1, 2, \dots, \left\lceil \frac{w}{r_S} \right\rceil \text{ e } j = 1, 2, \dots, \left\lceil \frac{l}{r_S} \right\rceil \right\} \quad (32)$$

onde $\mathbf{S}'_{i,j}$ é a assinatura de RF de referência no *pixel* (i, j) . As coordenadas geográficas (x_j, y_i) do *pixel* (i, j) são dadas pela equação (26).

O espaço de correlação reduzido \mathcal{D} é um subconjunto de \mathcal{A} . O fator de redução do espaço de correlação pode ser definido por:

$$\gamma = 1 - \frac{\#\mathcal{D}}{\#\mathcal{A}} \quad (33)$$

onde $\#\mathcal{A}$ e $\#\mathcal{D}$ são o número de elementos no espaço de correlação original (\mathcal{A}) e reduzido (\mathcal{D}), respectivamente. Note que $\mathcal{D} \subset \mathcal{A}$.

2.3.1 Filtragem Determinística

Essa técnica reduz progressivamente o espaço de correlação, aplicando três passos sucessivos de filtragem sobre os elementos do CDB [48]. A área de serviço é representada na Figura 16(a), onde a área de melhor servidor de cada célula é mostrada, bem como os vetores representando o arruamento. O mapa da área de serviço inclui todos os elementos do CDB e corresponde ao espaço de correlação original \mathcal{A} .

2.3.1.1 Primeiro Passo de Filtragem

No primeiro passo de filtragem, o espaço de correlação é restrito aos elementos do CDB dentro da área de melhor servidor da célula com o maior valor de RSS na assinatura de RF alvo, obtendo-se:

$$\mathcal{B} = \left\{ (x_j, y_i, \mathbf{S}'_{i,j}) \mid \mathbf{S}'_{i,j} \in \mathcal{A} \text{ e } \mathbf{S}'_{i,j}(1, 1) = \mathbf{F}(1, 1) \right\} \quad (34)$$

onde $\mathbf{S}'_{i,j}(1, 1)$ e $\mathbf{F}(1, 1)$ são o CI do melhor servidor na assinatura de referência e na assinatura alvo, respectivamente. A assinatura de referência é definida pela equação (25). A assinatura alvo é definida pela equação (19).

A área de melhor servidor de uma célula qualquer, cujo CI é indicado por $\mathbf{F}(1, 1)$, é mostrada na Figura 16(b). Essa área contém os elementos de \mathcal{B} .

2.3.1.2 Segundo Passo de Filtragem

No segundo passo de filtragem, o espaço de correlação é restrito aos elementos cujo valor de RTT do melhor servidor é igual ao valor de RTT do melhor servidor na assinatura de RF alvo. O conjunto resultante é definido por:

$$\mathcal{C} = \left\{ (x_j, y_i, \mathbf{S}'_{i,j}) \mid \mathbf{S}'_{i,j} \in \mathcal{B} \text{ e } \mathbf{S}'_{i,j}(1, 3) = \mathbf{F}(1, 3) \right\} \quad (35)$$

onde $\mathbf{S}'_{i,j}(1, 3)$ e $\mathbf{F}(1, 3)$ são os valores de referência e alvo de RTT, respectivamente. A Figura 16(c) mostra os *pixels* pertencentes a \mathcal{C} .

O segundo passo de filtragem é omitido em RANs onde valores de RTT não estão disponíveis, como no caso de redes WiFi.

2.3.1.3 Terceiro Passo de Filtragem

No terceiro passo de filtragem, o espaço de correlação é restrito ao elementos cujas assinaturas de referência contém as primeiras N células listadas na assinatura alvo \mathbf{F} . Como as linhas de \mathbf{F} são classificadas em ordem decrescente de RSS, essas células têm os N maiores valores de RSS em \mathbf{F} . O conjunto dos CIs das N células com os maiores valores de RSS na assinatura alvo é definido por:

$$\mathcal{I}_{T_N} = \{\mathbf{F}(1 : N, 1) \mid N \in [1, N_a]\} \quad (36)$$

onde N_a é o número de células âncora em \mathbf{F} .

O conjunto de CIs na assinatura de referência no pixel (i, j) é definido por:

$$\mathcal{I}_{R,i,j} = \{\mathbf{S}'_{i,j}(1 : N_{i,j}, 1) \mid \mathbf{S}'_{i,j} \in \mathcal{C}\} \quad (37)$$

onde $N_{i,j}$ é o número de células em $\mathbf{S}'_{i,j}$.

A cardinalidade do conjunto $(\mathcal{I}_{R,i,j} \cap \mathcal{I}_{T_N})$ informa quantas das células na assinatura de referência do *pixel* (i, j) estão entre as N células com os maiores valores de RSS na assinatura alvo. Se $\#(\mathcal{I}_{R,i,j} \cap \mathcal{I}_{T_N}) = 0$, o valor de N é reduzido até que $\#(\mathcal{I}_{R,i,j} \cap \mathcal{I}_{T_N}) > 0$.

No terceiro passo de filtragem, o espaço de correlação é restrito aos *pixels* onde $\#(\mathcal{I}_{R,i,j} \cap \mathcal{I}_{T_N}) = N$. O espaço de correlação reduzido assim obtido é definido por:

$$\mathcal{D} = \{(x_j, y_i, \mathbf{S}'_{i,j}) \mid \mathbf{S}'_{i,j} \in \mathcal{C} \text{ e } \#(\mathcal{I}_{R,i,j} \cap \mathcal{I}_{T_N}) = N \text{ e } N \in [1, N_a]\} \quad (38)$$

A Figura 16(d) mostra os *pixels* pertencentes a \mathcal{D} . Note que $\mathcal{D} \subset \mathcal{C} \subset \mathcal{B} \subset \mathcal{A}$ e que, nesse caso, $\#\mathcal{D} \ll \#\mathcal{A}$, o que significa que a técnica de filtragem determinística do CDB atinge um elevado fator de redução do espaço de correlação [48].

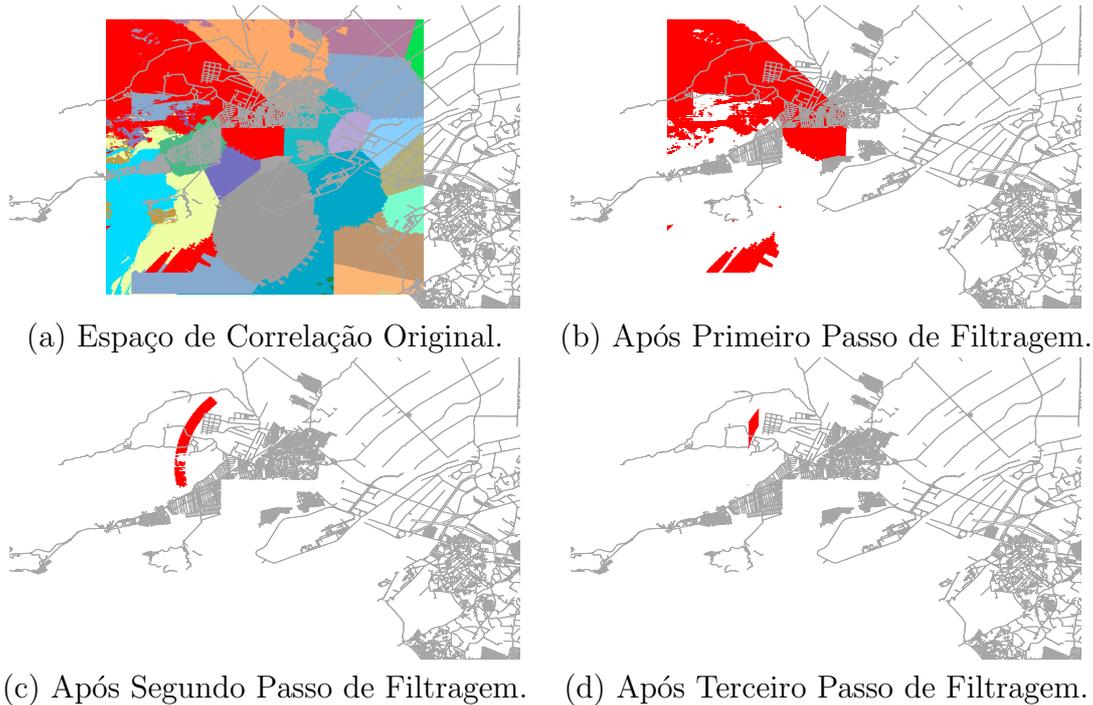


Figura 16 - Redução do Espaço de Correlação com Filtragem Determinística

2.3.2 Busca Otimizada utilizando Algoritmos Genéticos

GA é uma técnica de busca adaptativa baseada no princípio da seleção natural e reprodução genética [60]. Cada solução candidata é um indivíduo representado por uma sequência numérica denominada cromossomo. Quando o cromossomo é representando em forma binária, cada bit é denominado gene. O conjunto de indivíduos em cada ciclo ou geração é denominado população. Os indivíduos em uma população são modificados e combinados por meio de operadores genéticos - *crossover*, mutação e elitismo - produzindo uma nova população para a geração seguinte. O *crossover* combina segmentos de cromossomos de dois indivíduos, produzindo dois novos indivíduos para a geração seguinte. A mutação é uma alteração aleatória de um ou mais genes de um cromossomo. O elitismo é a clonagem do melhor indivíduo de uma geração no ciclo subsequente [61]. A aptidão de um indivíduo é verificada através de uma função de avaliação. Indivíduos mais aptos têm maior probabilidade de serem selecionados para reprodução (*crossover*). O melhor indivíduo em uma população é aquele que atinge o maior valor na função de avaliação. Este ciclo continua até que um critério de parada - o número máximo de gerações, aptidão do melhor indivíduo, tempo de processamento, etc. - seja atingido. O melhor indivíduo da última geração fornece a solução sub-ótima do problema [60].

Na aplicação proposta de GA para localização, cada indivíduo é um pixel. Cada

pixel tem uma assinatura de RF de referência, que é usada para avaliar a aptidão do indivíduo. Os passos do algoritmo são:

1. Inicializar a população da primeira geração, selecionando aleatoriamente indivíduos pertencentes ao conjunto \mathcal{B} , definido na equação (34);
2. Avaliar a aptidão de cada indivíduo da população atual, utilizando uma função de correlação;
3. Criar os cromossomos, convertendo as coordenadas dos indivíduos para o formato binário;
4. Aplicar operadores genéticos - *crossover*, mutação e elitismo - para criar a nova geração;
5. Converter os cromossomos para o formato inteiro;
6. Se o critério de parada foi atingido, a localização do MS é dada pelas coordenadas do indivíduo mais apto; caso contrário, retorna ao passo 2.

O primeiro passo é um aprimoramento da formulação proposta em [58], onde a população inicial é aleatoriamente selecionada dentre os *pixels* pertencentes ao conjunto \mathcal{A} . O aprimoramento, proposto originalmente pelo autor em [59], baseia-se na suposição de que a probabilidade do MS estar localizado dentro da área de melhor servidor predita do seu setor servidor é maior do que em quaisquer outros *pixels* na área de serviço. Portanto, durante a inicialização da população da primeira geração, ao invés de selecionar aleatoriamente indivíduos por toda a área de serviço, os indivíduos são selecionados aleatoriamente dentre os *pixels* pertencentes ao conjunto \mathcal{B} . Como consequência, a aptidão média da população da primeira geração é maior - i.e., na média, os indivíduos da primeira geração estão mais próximos da localização real do MS - o que significa que, em comparação com o algoritmo proposto em [58], menos gerações são necessárias para atingir a solução sub-ótima. Este efeito será verificado na Seção 4.3.1.

Se o CDB é estruturado como uma grade uniforme, o comprimento de cada cromossomo é dado pelo número de bits necessário para identificar a posição de um *pixel* - i.e., sua linha e sua coluna no CDB - e é dado por $\left\lceil \left(\log_2 \left\lceil \frac{l}{r_S} \right\rceil + \log_2 \left\lceil \frac{w}{r_S} \right\rceil \right) \right\rceil$, onde $l \times w$ m² é a superfície da área de serviço e r_S é a resolução planar do CDB.

Cada indivíduo tem uma assinatura de RF de referência. Quanto maior a correlação entre a assinatura de referência de um indivíduo e a assinatura alvo, maior a aptidão desse indivíduo. O indivíduo mais apto de uma geração é aquele que atinge a maior correlação. A correlação é calculada utilizando uma das técnicas apresentadas na Seção 2.4.

O ciclo do GA termina quando pelo menos uma das seguintes duas condições ocorrer: **i)** um número máximo de gerações g_{max} for atingido; **ii)** a aptidão do melhor indivíduo não aumentar mais do que ϵ durante α gerações consecutivas. A segunda condição otimiza o critério de parada comum baseado apenas no número máximo de gerações: se a aptidão do melhor indivíduo atinge um estado estacionário, isto pode significar que o algoritmo atingiu um máximo local e que portanto não há necessidade de avaliar novas gerações [62]. A ocorrência prematura do máximo local pode ser evitada elevando-se a taxa de mutação.

O espaço de correlação reduzido \mathcal{D} contém as coordenadas e as assinaturas de referência de todos os indivíduos de todas as gerações. A cardinalidade do conjunto \mathcal{D} é $\#\mathcal{D} = g \times \tau$, onde g é o número de gerações e τ é o número de indivíduos por geração. Note que $g \leq g_{max}$ e que $\mathcal{D} \subset \mathcal{B} \subset \mathcal{A}$.

2.4 Correlação de Assinaturas de Rádio-Frequência

Após definir a estrutura da assinatura de RF e do CDB, o espaço de correlação e as técnicas para reduzi-lo, faz-se necessário especificar como as assinaturas de referência contidas no espaço de correlação reduzido são comparadas à assinatura alvo. O objetivo é encontrar a assinatura de referência no espaço de correlação reduzido que tem a maior similaridade ou correlação com a assinatura alvo. A correlação pode ser avaliada através dos valores absolutos ou relativos de RSS. Os valores de RTT não são diretamente utilizados na comparação das assinaturas de referência e alvo, mas são aplicados na otimização da busca da posição estimada do MS através da redução do espaço de correlação, conforme descrito na Seção 2.3.1.

Neste trabalho, a correlação entre as assinatura de referência e alvo é avaliada através dos valores absolutos e relativos de RSS. No primeiro caso, esta avaliação é feita de duas maneiras: **i)** calculando a distância no espaço N -dimensional de RSS entre as assinaturas de referência e alvo [48] e **ii)** utilizando redes neurais artificiais [63]. No

segundo caso, esta avaliação é feita utilizando o coeficiente de correlação de ordem de Spearman [64].

Assume-se que o MS está localizado no *pixel* cuja assinatura de referência tenha a maior correlação com a assinatura alvo. Alternativamente, ao invés de utilizar apenas o *pixel* com a maior correlação, é possível selecionar os K *pixels* com os maiores valores de correlação com a assinatura alvo. Neste caso a localização estimada do MS é dada pela média aritmética das coordenadas desses K *pixels*. Este método é denominado K vizinhos mais próximos (KNN - *K Nearest Neighbors*) [65].

2.4.1 Distância no Espaço N -Dimensional de RSS

A similaridade entre as assinaturas de referência e alvo pode ser definida em função da distância entre essas assinaturas de RF em um espaço N -dimensional de RSS [66]. Cada dimensão corresponde a uma célula. A distância na k -ésima dimensão é a diferença entre os valores de RSS de referência e alvo da k -ésima célula. A Figura 17 mostra um exemplo para $N = 3$. A distância euclidiana entre a assinatura alvo (ponto negro) e cada assinatura de referência (pontos brancos) no espaço tridimensional de RSS é indicada pelos comprimentos dos segmentos de reta.

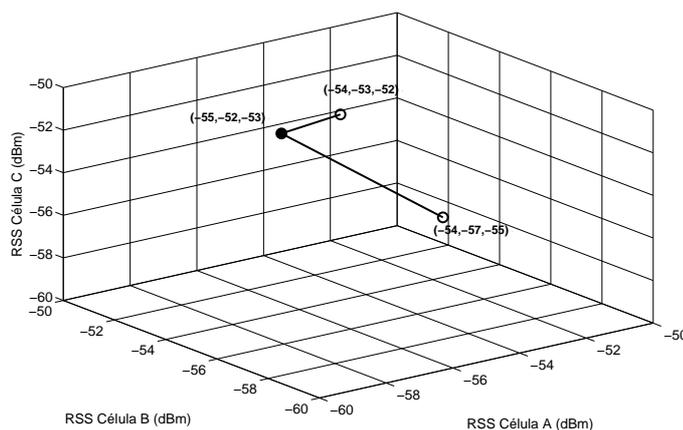


Figura 17 - Distância Euclidiana entre Assinaturas de RF no Espaço de RSS.

A similaridade ou correlação entre as assinaturas de referência e alvo é inversamente proporcional à distância no espaço N -dimensional de RSS entre essas assinaturas. Esta distância pode ser calculada através de diferentes métricas: distância euclidiana, soma de diferenças absolutas (SAD - *Sum of Absolute Differences*), etc. O uso de diferen-

tes métricas pode produzir estimativas de posição distintas. Este efeito é analisado nos Capítulos 4 e 5.

Duas situações são consideradas quando a distância no espaço N -dimensional de RSS é calculada: um caso particular, aplicado especificamente quando a filtragem determinística é utilizada [48], e um caso geral, onde um termo de penalidade é introduzido [23].

2.4.1.1 Caso Particular

O caso particular é aplicável quando o espaço de correlação reduzido \mathcal{D} é obtido utilizando filtragem determinística do CDB. O caso particular também é aplicável quando apenas o terceiro passo de filtragem é utilizado, isto é, quando as assinaturas de referência que contém as primeiras N células listadas na assinatura alvo \mathbf{F} são selecionadas diretamente do conjunto \mathcal{A} , e não do conjunto \mathcal{C} . Essa situação é testada no Capítulo 5.

Considerando que o CDB é organizado como uma grade uniforme e que $(i, j, \mathbf{S}'_{i,j}) \in \mathcal{D}$, a distância euclidiana entre a assinatura alvo \mathbf{F} e a assinatura de referência $\mathbf{S}'_{i,j}$ no espaço N -dimensional de RSS, no caso particular, é dada por:

$$d_{i,j} = \sqrt{\sum_{k=1}^N \left(\left\lfloor \frac{\mathbf{S}'_{i,j}(n_k, 2) - \mathbf{F}(k, 2)}{\delta} \right\rfloor \right)^2} \quad (39)$$

onde $\mathbf{S}'_{i,j}(n_k, 1) = \mathbf{F}(k, 1)$ e $n_k \in [1, N_{i,j}]$. O parâmetro $N_{i,j}$ informa o número de linhas em $\mathbf{S}'_{i,j}$. O parâmetro δ representa a inacurácia em dB na medida de RSS, inerente ao MS. A utilização do parâmetro δ na correlação de assinaturas de RF foi originalmente proposta pelo autor em [32]. Note que, na equação (39), qualquer diferença entre valores alvo e de referência de RSS menor que δ é considerada nula. Se o parâmetro δ não for utilizado, a equação (39) torna-se:

$$d_{i,j} = \sqrt{\sum_{k=1}^N \left(\mathbf{S}'_{i,j}(n_k, 2) - \mathbf{F}(k, 2) \right)^2} \quad (40)$$

2.4.1.2 Caso Geral com Termo de Penalidade

Assume-se que o CDB é estruturado como uma grade uniforme e que $(i, j, \mathbf{S}'_{i,j}) \in \mathcal{D}$. No caso geral, a correlação entre as assinaturas de referência e alvo é feita levando em consideração todas as células contidas nas assinaturas, e não apenas as N células com

maiores valores de RSS na assinatura alvo, como é feito no caso particular. Um termo de penalidade é inserido para cada célula presente na assinatura alvo e ausente na assinatura de referência. No caso geral com termo de penalidade, a distância euclidiana entre a assinatura alvo \mathbf{F} e a assinatura de referência $\mathbf{S}'_{i,j}$ no espaço N -dimensional de RSS é dada por:

$$d_{i,j} = \sqrt{\sum_{k=1}^N \left(\left| \frac{\mathbf{S}'_{i,j}(n_k, 2) - \mathbf{F}(m_k, 2)}{\delta} \right| \right)^2} + 2\beta(N_a - N) \quad (41)$$

onde $\mathbf{S}'_{i,j}(n_k, 1) = \mathbf{F}(m_k, 1)$, $n_k \in [1, N_{i,j}]$ e $m_k \in [1, N_a]$. O parâmetro N_a é o número de células âncora em \mathbf{F} . O parâmetro β é o valor em dB da faixa dinâmica de RSS. Em redes GSM, por exemplo, $\beta = 63$ dB [24]. A equação (41) difere da formulação apresentada em [23] pela inserção do parâmetro δ .

Na equação (41), o parâmetro N informa quantas células listadas em \mathbf{F} também o são em $\mathbf{S}'_{i,j}$. Ao contrário do que ocorre na equação (39), essas células não têm necessariamente os N maiores valores de RSS em \mathbf{F} . Para cada célula listada em \mathbf{F} e ausente de $\mathbf{S}'_{i,j}$, um termo de penalidade 2β é adicionado. Esse valor é igual ao dobro da máxima diferença possível entre valores de RSS, garantindo que, dadas duas assinaturas de referência, aquela com o maior valor de N estará mais próxima da assinatura alvo, independentemente do valor do primeiro termo na equação (41). Note que, para qualquer assinatura de referência, se $N = N_a$, as equações (39) e (41) fornecem o mesmo resultado. Ou seja, a equação (39) é um caso particular da equação (41).

O cálculo da SAD apresenta menor complexidade computacional, se comparado com o cálculo da distância euclidiana. Se, ao invés da distância euclidiana, a SAD for utilizada, a equação (41) torna-se:

$$d_{i,j} = \sum_{k=1}^N \left[\left| \frac{\mathbf{S}'_{i,j}(n_k, 2) - \mathbf{F}(m_k, 2)}{\delta} \right| \right] + 2\beta(N_a - N) \quad (42)$$

Se o parâmetro δ não for utilizado, a equação (42) torna-se:

$$d_{i,j} = \sum_{k=1}^N \left| \mathbf{S}'_{i,j}(n_k, 2) - \mathbf{F}(m_k, 2) \right| + 2\beta(N_a - N) \quad (43)$$

Exemplo 1 Considere dois pixels, (10, 20) e (10, 25), contidos em um CDB estruturado como uma grade uniforme. A assinatura alvo \mathbf{F} e as assinaturas de referência $\mathbf{S}'_{10,20}$ e

$\mathbf{S}'_{10,25}$ são dadas por:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 100 & 62 & 0 \\ 110 & 60 & -1 \\ 005 & 54 & -1 \\ 002 & 43 & -1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{S}'_{10,20} = \begin{bmatrix} 100 & 55 & 0 \\ 005 & 50 & -1 \\ 110 & 49 & -1 \\ 111 & 45 & -1 \\ 010 & 34 & -1 \\ 200 & 30 & -1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{S}'_{10,25} = \begin{bmatrix} 100 & 60 & 0 \\ 110 & 50 & -1 \\ 002 & 45 & -1 \\ 005 & 40 & -1 \\ 010 & 35 & -1 \end{bmatrix} \quad (44)$$

Neste exemplo assume-se que apenas o valor de *RTT* do melhor servidor é conhecido, assim todos os demais valores de *RTT* recebem um valor negativo para indicar que não estão disponíveis. Assume-se também que o parâmetro *RSS* é quantizado utilizando 64 valores possíveis, com passos de 1 dB, entre 0 (−110 dBm ou abaixo) e 63 (−48 dBm ou acima). Estas características baseiam-se nas especificações da interface rádio GSM [24].

Se o espaço de correlação reduzido \mathcal{D} é obtido através de filtragem determinística do CDB, os conjuntos \mathcal{I}_{T_N} e $\mathcal{I}_{R,i,j}$ são identificados. Eles são definidos pelas equações (36) e (37), respectivamente. A partir das assinaturas de RF listadas na equação (44) e assumindo $N = 3$, obtém-se:

$$\begin{aligned} \mathcal{I}_{R,10,20} &= \{005, 010, 100, 110, 111, 200\} \\ \mathcal{I}_{R,10,25} &= \{002, 005, 010, 100, 110\} \\ \mathcal{I}_{T_N} &= \{005, 100, 110\} \\ (\mathcal{I}_{R,10,20} \cap \mathcal{I}_{T_N}) &= (\mathcal{I}_{R,10,25} \cap \mathcal{I}_{T_N}) = \{005, 100, 110\} \end{aligned} \quad (45)$$

Portanto, $(x_{20}, y_{10}, \mathbf{S}'_{10,20}) \in \mathcal{D}$ e $(x_{25}, y_{10}, \mathbf{S}'_{10,25}) \in \mathcal{D}$, pois:

$$\begin{aligned} \mathbf{S}'_{10,20}(1, 1) &= \mathbf{F}(1, 1), \quad \mathbf{S}'_{10,20}(1, 3) = \mathbf{F}(1, 3), \quad \#(\mathcal{I}_{R,10,20} \cap \mathcal{I}_{T_N}) = 3 \\ \mathbf{S}'_{10,25}(1, 1) &= \mathbf{F}(1, 1), \quad \mathbf{S}'_{10,25}(1, 3) = \mathbf{F}(1, 3), \quad \#(\mathcal{I}_{R,10,25} \cap \mathcal{I}_{T_N}) = 3 \end{aligned} \quad (46)$$

Utilizando a equação (39) para calcular a distância no espaço N -dimensional de *RSS* entre cada assinatura de referência e a assinatura alvo, obtém-se:

$$d_{10,20} = \sqrt{\left(\left\lfloor \frac{S'_{10,20}(1,2) - F(1,2)}{\delta} \right\rfloor\right)^2 + \left(\left\lfloor \frac{S'_{10,20}(3,2) - F(2,2)}{\delta} \right\rfloor\right)^2 + \left(\left\lfloor \frac{S'_{10,20}(2,2) - F(3,2)}{\delta} \right\rfloor\right)^2} \quad (47)$$

$$d_{10,25} = \sqrt{\left(\left\lfloor \frac{S'_{10,25}(1,2) - F(1,2)}{\delta} \right\rfloor\right)^2 + \left(\left\lfloor \frac{S'_{10,25}(2,2) - F(2,2)}{\delta} \right\rfloor\right)^2 + \left(\left\lfloor \frac{S'_{10,25}(4,2) - F(3,2)}{\delta} \right\rfloor\right)^2}$$

Assumindo $\delta = 6$ dB [24]:

$$d_{10,20} = \sqrt{\left(\left\lfloor \frac{55-62}{6} \right\rfloor\right)^2 + \left(\left\lfloor \frac{49-60}{6} \right\rfloor\right)^2 + \left(\left\lfloor \frac{50-54}{6} \right\rfloor\right)^2} = 1,41 \quad (48)$$

$$d_{10,25} = \sqrt{\left(\left\lfloor \frac{60-62}{6} \right\rfloor\right)^2 + \left(\left\lfloor \frac{50-60}{6} \right\rfloor\right)^2 + \left(\left\lfloor \frac{40-54}{6} \right\rfloor\right)^2} = 2,23$$

Se não houver outras posições candidatas, então a localização estimada do MS é dada por $\hat{\mathbf{x}} = (x_{20}, y_{10})$, uma vez que $d_{10,20} < d_{10,25}$.

Utilizando a equação (42) para calcular a distância no espaço N -dimensional de RSS entre cada assinatura de referência e a assinatura alvo, obtém-se:

$$\begin{aligned} d_{10,20} &= \left\lfloor \frac{S'_{10,20}(1,2) - F(1,2)}{\delta} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{S'_{10,20}(3,2) - F(2,2)}{\delta} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{S'_{10,20}(2,2) - F(3,2)}{\delta} \right\rfloor + 2\beta(4-3) \\ d_{10,25} &= \left\lfloor \frac{S'_{10,25}(1,2) - F(1,2)}{\delta} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{S'_{10,25}(2,2) - F(2,2)}{\delta} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{S'_{10,25}(3,2) - F(4,2)}{\delta} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{S'_{10,25}(5,2) - F(3,2)}{\delta} \right\rfloor + 2\beta(4-4) \end{aligned} \quad (49)$$

Assumindo $\delta = 6$ dB e $\beta = 63$ dB [24]:

$$\begin{aligned} d_{10,20} &= \left\lfloor \frac{55-62}{6} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{49-60}{6} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{50-54}{6} \right\rfloor + 126 = 128 \\ d_{10,25} &= \left\lfloor \frac{60-62}{6} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{50-60}{6} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{40-54}{6} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{45-43}{6} \right\rfloor = 3 \end{aligned} \quad (50)$$

Se não houver outras posições candidatas, então a localização estimada do MS é dada por $\hat{\mathbf{x}} = (x_{25}, y_{10})$, uma vez que $d_{10,25} < d_{10,20}$. Note que, ao trocar a função de avaliação da equação (39) pela da equação (42), a posição estimada do MS também mudou.

2.4.2 Redes Neurais Artificiais

Redes neurais artificiais (ANN - *Artificial Neural Networks*) são sistemas paralelos distribuídos compostos por unidades de processamento denominadas neurônios, que executam funções matemáticas [67]. ANNs são usualmente utilizadas para aproximar funções não lineares e para classificação de padrões [68].

Uma ANN pode ser utilizada para aproximar uma função que representa o mapeamento entre uma assinatura de RF e um par de coordenadas geográficas (x, y) , minimizando o erro quadrático médio (MSE - *Mean Squared Error*). Em [63], foi proposta e testada em redes WiFi uma topologia para uma ANN com tal aplicação, com dois valores de entrada por célula detectada: o primeiro é uma variável booleana indicando se a célula está presente ou não na assinatura de RF; o segundo é o valor de RSS normalizado referente a esta célula. Uma topologia mais geral pode ser utilizada, considerando também os valores de RTT, não disponíveis em redes WiFi [50]. Assim, haverá uma terceira entrada por célula: o valor de RTT normalizado, como mostra a Figura 18. Os valores de RSS e RTT são normalizados dentro de uma faixa que depende da função de transferência utilizada nos neurônios.

Apenas uma camada escondida com M neurônios é utilizada. Isto está de acordo com o *teorema da aproximação universal*, que afirma que uma única camada escondida, se corretamente dimensionada, é suficiente para aproximar a maioria das função não-lineares [69].

Há dois neurônios na camada de saída, já que apenas a localização no plano está sendo considerada. As coordenadas estimadas do MS, fornecidas pela ANN, são normalizadas dentro de uma faixa que depende da função utilizada nos neurônios das camadas escondida e de saída.

Uma topologia alternativa, mais adequada para situações onde apenas um valor de RTT está disponível por assinatura de RF, como em redes GSM, é mostrada na Figura 19. Há duas entradas por célula, como na topologia proposta em [63], e uma entrada adicional para o valor de RTT normalizado. Esta ANN tem $2N_c + 1$ entradas, onde N_c é o número de células na área de serviço.

As conexões entre os neurônios são chamadas de sinapses e cada uma delas tem um peso numérico. Cada neurônio tem uma entrada adicional denominada *bias* ou po-

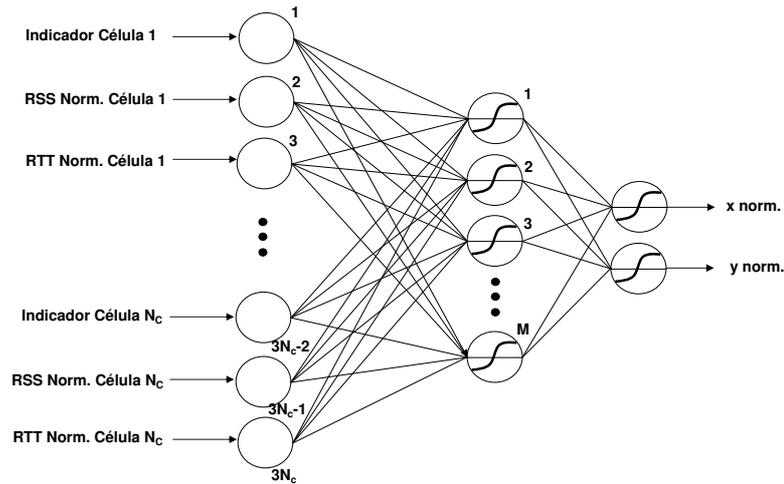


Figura 18 - Representação da Topologia da ANN com Três Entradas por Célula.

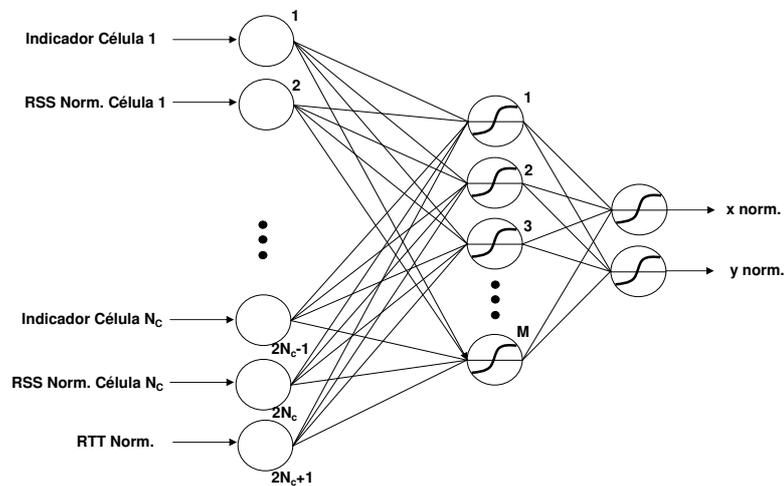


Figura 19 - Representação da Topologia da ANN com Duas Entradas por Célula.

larização, que é um valor numérico que modifica a saída da função de transferência. Os pesos e *biases* são ajustados durante a fase de treinamento. Usualmente, os pesos e *biases* iniciais são aleatoriamente selecionados.

Durante o treinamento supervisionado [67], todas as assinaturas de referência armazenadas no CDB são fornecidas à ANN. Para cada entrada $\mathbf{S}'_{i,j}$, a ANN fornece uma saída (\hat{x}_j, \hat{y}_i) , que é comparada à saída alvo (x_j, y_i) . Os pesos e *biases* da rede são iterativamente ajustados de forma a minimizar o MSE entre as saídas fornecidas pela ANN e as saídas alvo. O treinamento termina quando um número máximo de ciclos ou épocas é atingido, ou quando um valor alvo de MSE é alcançado. Após o treinamento supervisionado, a ANN está pronta para receber assinaturas de RF alvo como entradas, fornecendo na saída a localização estimada do MS. A avaliação experimental de métodos DCM uti-

lizando ANN será feita na Seção 4.6.3, em redes GSM, e nas Seções 5.3 e 5.4, em redes WiFi.

2.4.3 Coeficiente de Correlação de Spearman

Diferenças nos processos de fabricação de terminais móveis podem afetar a maneira como eles medem valores de RSS. Em consequência disso, em uma mesma posição e no mesmo instante, diferentes MS podem informar valores de RSS distintos referentes ao sinal recebido de uma mesma célula. Se o CDB é construído a partir de medidas de campo com um certo MS, e outro MS deve ser localizado, tem-se uma condição de operação *cross-device* [41]. A acurácia da localização de um método DCM utilizando esse CDB irá piorar nessa condição. Isso é ainda mais perceptível quando os MS são de diferentes modelos ou fornecidos por diferentes fabricantes.

Para minimizar a degradação da acurácia de localização em condições *cross-device*, pode-se utilizar os valores relativos de RSS, i.e., sua ordenação, ao invés do valores absolutos. A ordenação dos valores de RSS de diferentes células é mais robusta às condições *cross-device*, o que significa que, enquanto os valores absolutos de RSS de um conjunto de células podem ser bastante diferentes quando medidos por MS distintos, a sua ordenação tem maior probabilidade de permanecer a mesma, ou pelo menos, bastante semelhante. Essa observação baseia-se na suposição de que, para uma dada célula, a relação entre a intensidade do seu sinal na entrada do MS e o valor de RSS informado pelo MS é uma função monotonicamente crescente [70].

Exemplo 2 *Considere dois MS, MS_1 e MS_2 , ambos na mesma posição, e duas BTS, BTS_A e BTS_B . Os sinais dessas BTS chegam a ambos os MS com intensidades s_A e s_B . Os valores de RSS informados pelo MS_1 são RSS_{1A} e RSS_{1B} . Os valores de RSS informados pelo MS_2 são RSS_{2A} e RSS_{2B} . Se a relação entre a intensidade do sinal de entrada e o valor informado de RSS é uma função monotonicamente crescente, então, se $s_A > s_B$, $RSS_{1A} > RSS_{1B}$ e $RSS_{2A} > RSS_{2B}$. Note que, embora os pares de valores (RSS_{1A}, RSS_{1B}) e (RSS_{2A}, RSS_{2B}) possam ser diferentes, se as células detectadas pelos dois MS forem listadas em ordem decrescente de RSS, obtém-se a mesma sequência: (BTS_A, BTS_B) .*

A similaridade entre diferentes sequências ou permutações de um mesmo conjunto de células, ordenadas em função de seus respectivos valores de RSS, pode ser numerica-

mente avaliada através do coeficiente de correlação de Spearman [64]. Esse coeficiente pode ser utilizado para calcular a correlação entre a assinatura de RF alvo \mathbf{F} e uma assinatura de RF de referência $\mathbf{S}'_{i,j}$. Porém, essas assinaturas não têm necessariamente as mesmas células ou a mesma quantidade de células. Portanto, antes de aplicar o coeficiente de correlação de Spearman, alguma manipulação é requerida. Por isso, duas matrizes $N_c \times 2$ - \mathbf{V}_F e \mathbf{V}_S - são utilizadas, com valores iniciais definidos por:

$$\mathbf{V}_F(n, 1 : 2) = \mathbf{V}_S(n, 1 : 2) = [\text{CI}_n \ N_c] \quad (51)$$

onde $n = 1, 2, \dots, N_c$. O parâmetro N_c é a quantidade de células na área de serviço e CI_n é o CI da n -ésima célula na área de serviço.

Como as linhas de \mathbf{F} são classificadas em ordem decrescente de RSS, a posição de cada célula na sequência ordenada pelos valores de RSS é o próprio índice da linha correspondente em \mathbf{F} . Esse índice deve ser inserido na segunda coluna da linha correspondente em \mathbf{V}_F , conforme definido por:

$$\mathbf{V}_F(n_k, 2) = k, \text{ onde } \mathbf{V}_F(n_k, 1) = \mathbf{F}(k, 1), \ n_k \in [1, N_c] \text{ e } k = 1, 2, \dots, N_a \quad (52)$$

O mesmo procedimento deve ser seguido para $\mathbf{S}'_{i,j}$ e \mathbf{V}_S , conforme definido por:

$$\mathbf{V}_S(n_k, 2) = k, \text{ onde } \mathbf{V}_S(n_k, 1) = \mathbf{S}'_{i,j}(k, 1), \ n_k \in [1, N_c] \text{ e } k = 1, 2, \dots, N_{i,j} \quad (53)$$

O coeficiente de correlação de Spearman, calculado entre a assinatura alvo e a assinatura de referência no *pixel* (i, j) , é dado por:

$$\rho_{i,j} = \frac{\sum_{n=1}^{N_c} \left\{ \left[\left(\mathbf{V}_F(n, 2) - \bar{R}_F \right) \left(\mathbf{V}_S(n, 2) - \bar{R}_S \right) \right] \right\}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{N_c} \left\{ \left(\mathbf{V}_F(n, 2) - \bar{R}_F \right)^2 \right\} \sum_{n=1}^{N_c} \left\{ \left(\mathbf{V}_S(n, 2) - \bar{R}_S \right)^2 \right\}}} \quad (54)$$

onde $\bar{R}_F = \frac{1}{N_c} \sum_{n=1}^{N_c} \{ \mathbf{V}_F(n, 2) \}$ e $\bar{R}_S = \frac{1}{N_c} \sum_{n=1}^{N_c} \{ \mathbf{V}_S(n, 2) \}$.

A distância de Spearman pode ser definida como [64]:

$$d_{i,j} = 1 - \rho_{i,j} \quad (55)$$

3 CRITÉRIOS PARA AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO

Neste capítulo são apresentadas métricas para avaliação de métodos de localização que serão utilizadas nos Capítulos 4, 5 e 6. Estas métricas - baseadas na distribuição do erro de localização, no tempo requerido para produzir uma estimativa de posição e na disponibilidade - permitem uma comparação objetiva entre métodos de localização distintos.

3.1 Acurácia

A acurácia de uma estimativa de posição pode ser definida como a distância euclidiana entre a posição de referência do MS e a posição calculada pelo método de localização. Então, numericamente, a acurácia é igual ao erro da estimativa de posição:

$$e = \sqrt{(x_0 - \hat{x})^2 + (y_0 - \hat{y})^2} \quad (56)$$

onde (\hat{x}, \hat{y}) e (x_0, y_0) são as coordenadas da posição estimada e da posição “real” do MS, respectivamente. A posição “real” é fornecida por métodos de localização de alta acurácia, como o GPS ou o GPS diferencial, ou através de cartas topográficas. Assim, as coordenadas (x_0, y_0) correspondem na verdade à posição de referência do MS. Conforme descrito na Seção 1.2, para calcular a distância euclidiana é necessário que as coordenadas geográficas sejam representadas através de uma projeção cartográfica retangular, i.e., que utilize um sistema de coordenadas cartesianas, como o UTM.

A definição de acurácia expressa pela equação (56) refere-se a estimativas de posição individuais. Nesse contexto, pode-se fazer referência à acurácia de uma estimativa, e não à acurácia de um método. Na tentativa de definir a acurácia de um método de localização, pode-se recorrer a um estimador estatístico. Algumas fontes utilizam a acurácia média de um conjunto com M estimativas de posição [20]:

$$\bar{e} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M e_i \quad (57)$$

onde e_i é a i -ésima estimativa de posição, calculada pela equação (56).

3.2 Precisão

A precisão de um método de localização pode ser definida como a distribuição probabilística da acurácia de um conjunto de estimativas de posição.

Se todas as estimativas são obtidas enquanto o MS está estacionário em um ponto de referência fixo, então a precisão pode ser caracterizada por meio da probabilidade de erro circular (CEP - *Circular Error Probability*) [71]. Seja o par ordenado (\bar{x}, \bar{y}) dado pela média aritmética das coordenadas (\hat{x}_i, \hat{y}_i) , $i = 1, 2, \dots, M$, das estimativas de posição fornecidas por um método de localização enquanto o MS está estacionário na posição de referência (x_0, y_0) . A CEP é numericamente igual ao raio do círculo centrado em (\bar{x}, \bar{y}) e no interior do qual estão situadas 50% das M estimativas de posição. Quanto maior for o valor de CEP, menor será a precisão do método, pois a dispersão das estimativas em torno da média será maior. Note que um método pode ser preciso - i.e, ter um valor reduzido de CEP - e ao mesmo tempo ter uma baixa acurácia - i.e, a distância euclidiana entre a posição de referência (x_0, y_0) e (\bar{x}, \bar{y}) ser elevada. Essa situação é ilustrada na Figura Figura 20(b), onde P_0 corresponde à posição de referência e P está situado em (\bar{x}, \bar{y}) .

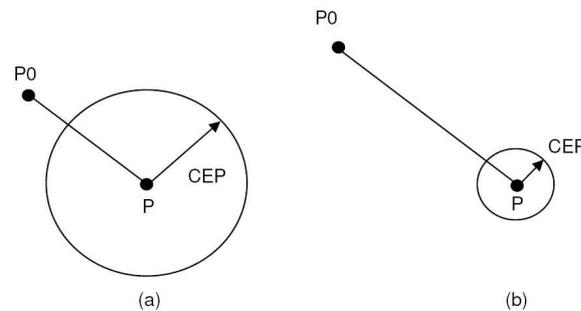


Figura 20 - Probabilidade de Erro Circular.

Porém, a maneira mais comum de caracterizar a precisão é através da *função distribuição de acumulada* (CDF - *Cumulative Distribution Function*) [72], sendo o critério normalmente utilizado para comparar diferentes métodos de localização [20] ou para especificar requisitos mínimos de desempenho [2]. Considere que a identificação do erro de localização em metros (desprezando os valores fracionários em centímetros) de cada estimativa de posição é um experimento aleatório. Seja a variável aleatória discreta E , que mapeia os resultados deste experimento aleatório em valores numéricos inteiros não

negativos. Seja e um valor específico de E para uma realização do experimento aleatório. A CDF da variável aleatória E , que representa o erro de localização, é a função definida por:

$$F(e) = P\{E \leq e\} = \sum_{i=0}^e P\{E = i\} \quad (58)$$

onde $P\{E = i\}$ é a probabilidade do erro de localização ser igual a i metros e $P\{E \leq e\}$ é a probabilidade do erro de localização ser menor ou igual a e . O valor de $P\{E = i\}$ é definido experimentalmente por:

$$P\{E = i\} = \frac{m}{M} \quad (59)$$

onde M é o número de realizações do experimento aleatório, ou seja, a quantidade de estimativas de posição, e m é a quantidade de realizações em que o erro de localização obtido é igual a i metros.

3.3 Erro de Localização Ponderado

A caracterização da distribuição do erro de localização de um método através de um único número pode facilitar a comparação com outros métodos. Para dispor de um estimador que traga mais informação que a média ou a mediana, por exemplo, propõe-se neste trabalho a utilização de um erro de localização ponderado, definido por:

$$e_w = \frac{e_{50\%}w_{50\%} + e_{67\%}w_{67\%} + e_{95\%}w_{95\%}}{w_{50\%} + w_{67\%} + w_{95\%}} \quad (60)$$

onde $e_{50\%}$, $e_{67\%}$ e $e_{95\%}$ são os erros de localização dos percentis 50%, 67% e 95%, respectivamente. Os parâmetros $w_{50\%}$, $w_{67\%}$ e $w_{95\%}$ são os pesos desses percentis no cálculo da média ponderada, com $w_{50\%} = 1$ e $w_{67\%} = w_{95\%} = 3$. Os percentis 67% e 95% têm pesos maiores pois a especificação E911 utiliza-os na definição dos requisitos de acurácia para métodos de localização baseados na rede [2].

3.4 Complexidade

A complexidade de um método de localização pode ser definida levando em consideração, conjunta ou isoladamente, diversos parâmetros, tais como [20]:

- Complexidade computacional: número de instruções a serem executadas por um processador para permitir a obtenção de uma estimativa de posição;
- Necessidade de atualizações de *software* e/ou *hardware* em terminais móveis para suportar o método de localização;
- Complexidade ou custo de implantação: necessidade de instalação de elementos adicionais na RAN, como LMUs e conjuntos de antenas diretivas;
- Necessidade de tráfego de mensagens específicas na interface rádio, aumentando o tráfego de controle na RAN;
- Tempo para obter uma estimativa de posição;

A maioria destes parâmetros dificilmente pode ser quantificada de modo acurado. Por esta razão, neste trabalho optou-se por definir a complexidade de um método de localização por meio do tempo médio de cálculo de posição, dado por:

$$\bar{t} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L t_i \quad (61)$$

onde t_i é o tempo de cálculo da posição para a i -ésima requisição, e L é o total de requisições.

Assim, quanto maior o tempo médio \bar{t} , maior a complexidade do método. A utilização de \bar{t} permite quantificar de modo simples a complexidade, possibilitando a análise comparativa deste parâmetro entre diversos métodos de localização. Para tal, o valor de \bar{t} para os diferentes métodos sendo avaliados deve ser calculado sob as mesmas condições: mesmo computador (o que assegura condições idênticas em relação à capacidade de processamento e quantidade de memória volátil), mesmo sistema operacional e sem nenhum outro aplicativo ou processo de usuário sendo executado em segundo plano.

3.5 Disponibilidade

A disponibilidade de um método de localização define sua capacidade de produzir uma estimativa de posição para MS localizados em uma determinada área. Por exemplo, a disponibilidade do GPS em ambientes *indoor* é praticamente nula. Logo, o GPS é um método indisponível nesses locais.

Se uma estimativa de posição (\hat{x}_p, \hat{y}_p) de um MS localizado no ponto (x_p, y_p) pode ser produzida por um método de localização, diz-se que esse método está disponível em (x_p, y_p) . O conjunto de pontos onde um método está disponível define a *região de disponibilidade* do método. O *percentual de disponibilidade* é definido pela razão $\frac{a}{A}$, onde a é a área da região de disponibilidade do método de localização em uma região de interesse com área total A .

Os métodos de localização baseados no MS ou assistidos pelo MS podem ter diferentes graus de disponibilidade em função do tipo de MS sendo considerado. A disponibilidade desses métodos para terminais legados é nula. Diz-se, então, que os métodos que requerem terminais modificados apresentam uma *disponibilidade seletiva*. Essa característica é uma séria desvantagem, quando se considera aplicações críticas como a localização de chamadas para números de emergência [5].

A disponibilidade de um método de localização pode ser quantificada de duas formas: pela quantidade mínima de setores necessária para calcular a posição do MS ou pelo percentual de disponibilidade.

A disponibilidade de um método de localização é inversamente proporcional ao número mínimo de setores requerido para produzir uma estimativa de posição. Assim, um método que necessita de apenas um setor para o cálculo de posição, como o DCM, tem uma disponibilidade maior que um método que necessita de três setores para estimar a posição do MS, como o CID+RTT. Essa distinção contudo só será percebida em regiões com baixa densidade de setores, como em áreas suburbanas, onde muitas vezes o MS não detecta quantidade suficiente de setores. Em regiões com elevada densidade de setores, como em áreas urbanas, na maioria dos pontos o MS detectará sinais utilizáveis de três ou mais setores.

4 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE MÉTODOS DCM EM REDES GSM

Neste capítulo, os métodos DCM apresentados no Capítulo 2 são testados em redes GSM 850 MHz. As assinaturas de RF obtidas durante a campanha de coleta descrita na Seção 4.1 são utilizadas para a avaliação experimental. Os critérios de avaliação descritos no Capítulo 3 são aplicados para comparar o desempenho dos métodos DCM com o de outros métodos baseados na rede, descritos no Capítulo 1.

4.1 Campanha de Coleta de Assinaturas de RF

A coleta de assinaturas de RF em redes GSM na banda de 850 MHz foi realizada nos bairros Centro (Região 1) e Santa Cruz (Região 2) do município do Rio de Janeiro. A Região 1 tem morfologia urbana densa, com elevada densidade de setores e predominância de condições de propagação NLOS. A Região 2 tem morfologia suburbana, com baixa densidade de setores e predominância de condições de propagação LOS.

O conjunto de teste foi constituído de um telefone GSM legado modelo SAGEM OT298 e um receptor GPS modelo GARMIN, ambos conectados a um *laptop* no interior de um veículo, em cujo topo foi instalada a antena receptora GPS. Em cada região de teste, foi originada uma chamada e o MS foi mantido em modo dedicado durante a coleta. Todas as mensagens trocadas entre o MS e a BTS servidora foram capturadas pelo *software* TEMS *Investigation* da *Ericsson* e armazenadas para posterior processamento. As características das rotas de coleta nas Regiões 1 e 2 são resumidas na Tabela 3 [32].

Tabela 3 - Rotas de Coleta em Redes GSM.

Rota	1	2	3
Região	1	2	1
Quantidade de NMRs	4501	7864	1929
Área (km²)	4,84	100	-
Qtde de Setores Detectados	114	23	60
Densidade de Setores (set./km²)	23,5	0,23	-

A densidade de setores na Tabela 3 é calculada assumindo uma distribuição uniforme das células na região de teste, sendo dada pela razão entre o número de setores e a área da superfície coberta pela rota de teste. A área em quilômetros quadrados desta superfície é dada por $10^{-6} (x_{max} - x_{min}) (y_{max} - y_{min})$, onde (x_{min}, y_{max}) e (x_{max}, y_{min}) são as coordenadas UTM em metros dos pontos de medida nos extremos noroeste e sudeste da

rota de coleta, respectivamente. Como a precisão dos métodos de localização estudados depende fortemente da densidade de setores, este parâmetro poderá ser utilizado como fator de normalização do erro de localização, permitindo uma comparação da precisão dos métodos quando aplicados em regiões distintas [32].



Figura 21 - Rotas de Coleta GSM.

Conforme indicado pela Tabela 3, foram coletadas 4501, 7864 e 1929 assinaturas de RF nas Rotas 1, 2 e 3, respectivamente. A Rota 3 é parte do trajeto da Rota 1 e é utilizada apenas para calibração de modelos de propagação empíricos, conforme descrito na Seção 2.2.2. As posições de referência - fornecidas pelo GPS - em que as assinaturas foram coletadas nas Rotas 1 e 2 são ilustradas na Figura 21(a) e Figura 21(b). Cada assinatura de RF medida é composta pelo código da área de localização (LAC - *Location Area Code*), pelo valor de alinhamento temporal (TA - *Timing Advance*) e pelos valores de RSS das células listadas no NMR.

TA é a denominação do RTT em redes GSM. Cada BTS monitora continuamente o atraso na comunicação com cada MS por ela servido. Se este atraso para um dado MS variar mais de um período de símbolo, o valor de TA para aquele MS será aumentado ou reduzido de uma unidade e o novo valor de TA será informado ao MS através do canal SACCH (*Slow Associated Control Channel*) no enlace direto [28].

O MS em modo ativo envia um NMR para o setor servidor a cada 480 ms através do canal SACCH no enlace reverso. O NMR contém a identidade do setor servidor, indicada diretamente através do CI, e a identidade de até 6 setores vizinhos, expressa através do número do canal de controle de difusão (BCCH - *Broadcast Control Channel*) e do código de identificação da estação rádio-base (BSIC - *Base Station Identity Code*). O NMR contém também os valores de RXLEV (*Received Signal Level*) do setor servidor e

de até 6 setores vizinhos. O RXLEV é o valor médio de nível de sinal recebido do BCCH, que é transmitido por cada setor com potência constante. O RXLEV é quantizado com passo de 1 dB, variando de -110 dBm (RXLEV=0) a -48 dBm (RXLEV=63). O RXLEV do setor servidor e dos setores na lista de vizinhos são medidos pelo MS ao longo de um período de multi-quadro SACCH. Além do setor servidor, os 6 setores vizinhos com maior RXLEV são selecionados e incluídos no NMR [24].

O LAC identifica a área de localização (LA - *Location Area*), que por sua vez define uma zona de *paging*. Uma LA é o equivalente em redes celulares ao domínio de difusão (*broadcast*) em redes locais *Ethernet* [73]. Quando a rede precisa enviar uma mensagem para um MS em modo *idle*, essa mensagem ou *paging* é enviada para todas as BTS na LA onde o MS registrou-se pela última vez. Idealmente, dentro de uma mesma LA, um valor de BCCH+BSIC não se repete. Assim, em uma dada rede, os setores vizinhos reportados no NMR podem ser identificados - i.e., seus CIs podem ser obtidos - a partir dos pares BCCH+BSIC contidos no NMR, acrescidos do LAC.

4.2 Configuração dos Métodos Avaliados

4.2.1 Métodos DCM

A configuração geral dos métodos DCM avaliados é apresentada na Tabela 4. A configuração específica dos métodos utilizando GA é apresentada na Tabela 5. O parâmetro δ informa a inacurácia máxima admissível na medida de RSS feita por um MS em redes GSM [24].

Os métodos DCM avaliados utilizam CDBs construídos a partir de predição de propagação, empregando o modelo de Okumura-Hata sobre DEMs com resolução planar $r_H = 5$ metros na Região 1 e $r_H = 25$ metros na Região 2. O DEM utilizado na Região 1, que é uma zona urbana densa, contém a altura dos prédios sobreposta ao relevo. As características dos CDBs utilizados são listadas na Tabela 6.

4.2.2 Valores Ótimos de K nos Métodos $DcmFull$, $DcmSad$ e $DcmSpear$

No processo de correlação de assinaturas, múltiplos *pixels* candidatos podem estar a aproximadamente a mesma distância, no espaço de RSS, em relação à assinatura alvo medida. Esses *pixels* são ditos vizinhos no espaço de correlação. Devido à imprecisão

Tabela 4 - Métodos DCM Avaliados no Teste GSM *Outdoor*.

Método DCM	Técnica de Redução do Espaço de Correlação	Técnica de Correlação de Assinaturas de RF	δ (dB)
<i>DcmFull</i>	Filtragem Determinística	Distância Euclidiana no Espaço N-Dimensional de RSS	6
<i>DcmSad</i>	Filtragem Determinística (Passos 1 e 2)	SAD com Termo de Penalidade	6
<i>DcmSpear</i>	Filtragem Determinística (Passos 1 e 2)	Distância de Spearman	-
<i>DcmAnn</i>	-	ANN	-
<i>DcmGaOld</i>	GA (População Inicial em \mathcal{A})	SAD com Termo de Penalidade	6
<i>DcmGaNew</i>	GA (População Inicial em \mathcal{B})	SAD com Termo de Penalidade	6

Tabela 5 - Configuração GA

Parâmetro	Valor
Taxa de Crossover	60%
Tipo de Seleção	Roleta
Taxa de Mutação	1%
Elitismo?	Sim
Comprimento do Cromossomo	16 genes (Região 1) 14 genes (Região 2)
g_{max}	50 gerações
ϵ	0,00001
α	5 gerações
γ	97%

intrínseca à modelagem de propagação e à inacurácia inerente às medidas do MS, não há razão para selecionar apenas o *pixel* mais próximo e descartar os vizinhos. Além disso, o vetor de erro no espaço de RSS tem uma orientação diferente para cada vizinho. Assim, a média das coordenadas dos K vizinhos pode fornecer uma estimativa final que está mais próxima da posição real do MS, do que a posição de qualquer vizinho individualmente [66]. Essas são as razões pelas quais os métodos *DcmFull*, *DcmSad* e *DcmSpear* estimam a posição final do MS empregando KNN. A utilização desta técnica não é possível no método *DcmAnn*, uma vez que a ANN aproxima uma função, e não compara valores de correlação de diferentes *pixels* candidatos. O KNN poderia ser empregado nos métodos utilizando GA, mas exigiria modificações no algoritmo.

Para a definição do valor de K ótimo, foi utilizado o erro de localização ponderado e_w , definido pela equação (60). O valor de K ótimo é aquele que minimiza o valor de e_w .

O valor de K ótimo reduz-se à medida que as assinaturas de referência armazenadas

Tabela 6 - Características dos CDBs

Parâmetro	Região 1	Região 2
Tipo	Predito	Predito
Estrutura	Grade Uniforme	Grade Uniforme
r_H (metros)	5	25
r_S (metros)	10 e 25	100 e 200
Quantidade de Elementos	48400 ($r_S = 10$ metros) 7569 ($r_S = 25$ metros)	30625 ($r_S = 100$ metros) 7569 ($r_S = 200$ metros)

no CDB apresentam maior similaridade, em média, com as assinaturas alvo coletadas na rota de teste [55]. De modo geral, espera-se que esta similaridade seja menor em CDBs baseados em modelagem de propagação, um pouco maior em CDBs com modelos calibrados e maior ainda em CDBs baseados em medidas. De fato, no primeiro caso, o K ótimo é igual a 5, reduzindo-se para 2 no segundo caso e 1 no terceiro caso, confirmando a tendência prevista.

4.2.3 Valor Ótimo de N no Método *DcmFull*

O parâmetro N é utilizado no terceiro passo da filtragem determinística, conforme descrito na Seção 2.3.1. No método *DcmFull*, o valor de N ótimo é aquele que, fixado o valor de K , minimiza o valor de e_w .

Em um cenário hipotético, onde fosse possível modelar com exatidão o ambiente de rádio-propagação e onde o RSS médio em uma dada posição fosse invariante no tempo, a dupla (N, K) que maximizaria a precisão do método *DcmFull* seria $(7, 1)$. Ou seja, haveria equivalência entre todos os CIs medidos e preditos e seria selecionado apenas o *pixel* com a menor diferença quadrática. Porém, em um cenário real, a confiabilidade da predição de RSS é maior para os sinais mais fortes, conforme sugerem os resultados apresentados em [74]. Por isso, no método *DcmFull*, adota-se um valor de $N < 7$ quando um CDB baseado em modelagem de propagação é utilizado. Sete é o número máximo de setores que pode ser reportado em um NMR em uma rede GSM: o melhor servidor e os seis vizinhos mais fortes.

Os valores experimentais ótimos de N nas Regiões 1 e 2 são iguais a 5 e 6, respectivamente. O maior valor de N ótimo na Região 2 reflete a melhor modelagem da propagação na área suburbana, onde há maior ocorrência de condições LOS em comparação ao ambiente urbano denso da Região 1.

A Tabela 7 lista os valores de N e K ótimos, experimentalmente definidos utilizando o erro ponderado e_w , nas Regiões 1 e 2, para três tipos de CDB. Estes valores são empregados para os métodos *DcmFull*, *DcmSad* e *DcmSpear* nas seções subsequentes.

Tabela 7 - Valores Ótimos de N e K .

Método	N		K		
	Região 1	Região 2	CDB Predito	CDB Calibrado	CDB Medido
<i>DcmFull</i>	5	6	5	2	1
<i>DcmSad</i>	–	–	5	2	1
<i>DcmSpear</i>	–	–	5	2	1

4.2.4 Topologia e Treinamento das ANNs

A topologia das ANNs utilizadas nos testes é mostrada na Figura 19. Há duas entradas por setor: o indicador booleano da presença do setor no NMR e o valor de RSS medido. Além disso, há uma única entrada adicional referente ao valor de TA. Assim, há 229 (2×114 setores +1 TA) e 47 (2×23 setores +1 TA) entradas nas ANNs utilizadas nas Regiões 1 e 2, respectivamente. As ANNs têm uma camada escondida com quinze neurônios. Este valor foi definido experimentalmente, e coincide com aquele utilizado em [63]. A camada de saída tem dois neurônios, um para fornecer a coordenada UTM X e outro para fornecer a coordenada UTM Y. A função de transferência de todos os neurônios é a tangente hiperbólica sigmóide [75], cuja imagem é dada pelo intervalo $(-1, 1)$. Em razão disso, os valores de entrada e saída da rede estão normalizados neste intervalo.

Em cada região de teste, as assinaturas de referência armazenadas no CDB são aleatoriamente divididas em dois grupos: 95% são selecionadas para o conjunto de treinamento e 5% para o conjunto de validação. O conjunto de validação é utilizado para monitorar o aprendizado da ANN e prevenir o *overtraining* [67]. Em cada ciclo ou época do treinamento, as assinaturas no conjunto de treinamento são apresentadas três vezes à rede para reforçar seu aprendizado, feito através do algoritmo de *Levenberg-Marquardt* [76]. Durante o treinamento, os pesos sinápticos e os *biases* das funções de ativação dos neurônios são ajustados de modo a minimizar o MSE entre as saídas alvo - i.e., as coordenadas UTM das assinaturas de referência no conjunto de treinamento - e as saídas fornecidas pela ANN. Trata-se, portanto, de um treinamento supervisionado.

A Figura 22 mostra o desempenho do treinamento das ANNs nas Regiões 1 e 2. Na

Região 1, o valor de MSE mais baixo no conjunto de validação foi de 0,0025, tendo sido atingido na época 22. Na Região 2, o valor de MSE mais baixo no conjunto de validação foi de 0,0012, tendo sido atingido na época 37. Os pesos sinápticos e *biases* finais são aqueles obtidos na época em que o conjunto de validação teve o menor MSE.

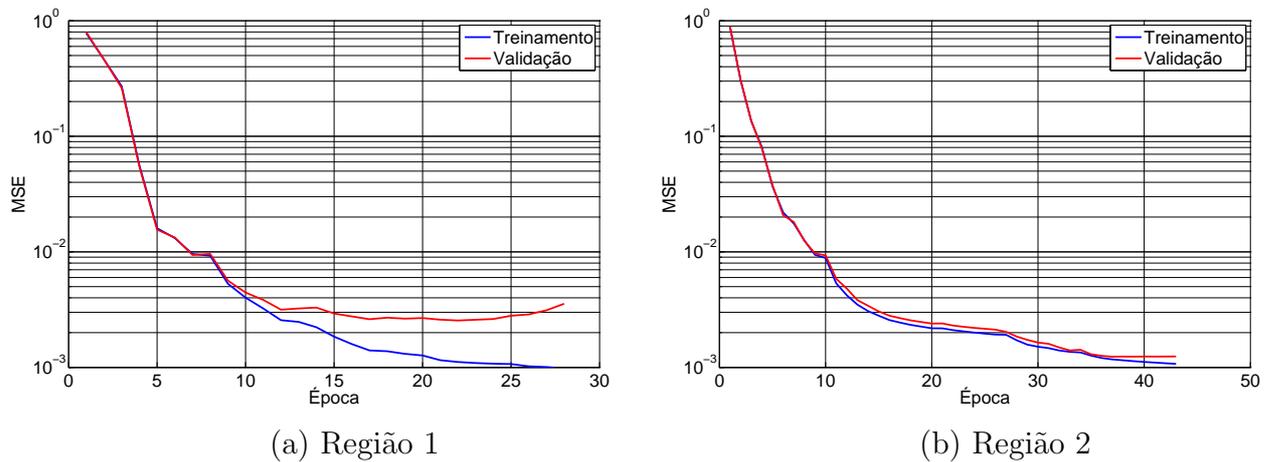


Figura 22 - Treinamento das ANNs para Localização GSM *Outdoor*.

4.2.5 Outros Métodos

A precisão de localização dos métodos DCM listados na Tabela 4 é comparada com a de outros métodos de localização baseados na rede: os métodos utilizando centróides (*Csimp*, *Cpond* e *Cpred*), descritos na Seção 1.2.3; o método de identidade da célula (CID), descrito na Seção 1.2.1; e o método de triangulação por multi-lateração circular utilizando perda de propagação (CID+RSS), descrito na Seção 1.2.2. Para o cálculo da perda de propagação no método CID+RSS, os coeficientes do modelo de Okumura-Hata recebem os valores descritos na Seção 2.2.2.

4.3 Comparação das Técnicas de Redução do Espaço de Correlação

Duas técnicas de redução do espaço de correlação foram apresentadas no Capítulo 2: filtragem determinística e GA. Há duas variantes da técnica utilizando GA. Na primeira técnica, aplicada no método *DcmGaOld* e originalmente proposta em [58], os indivíduos da população inicial são espalhados por toda a área de serviço, ou seja, dentre os elementos do conjunto \mathcal{A} , definido pela equação (32). Na segunda técnica, aplicada no método

DcmGaNew e originalmente proposta pelo autor em [59], os indivíduos são aleatoriamente selecionados dentro da área de melhor servidor predita da célula servidora, ou seja, dentre os elementos do conjunto \mathcal{B} , definido pela equação (34). A filtragem determinística completa é empregada no método *DcmFull*. Para a comparação dos tempos de processamento, os métodos foram executados sobre as Rotas 1 (4501 NMRs) e 2 (7864 NMRs) no mesmo computador, conforme especificações definidas na Seção 3.4. Na Região 1, utilizou-se um CDB com resolução planar $r_S = 10$ metros, e na Região 2, um CDB com resolução planar $r_S = 200$ metros.

4.3.1 Métodos *DcmGaOld* e *DcmGaNew*

O método *DcmGaOld* utiliza GA segundo a formulação originalmente proposta em [58], onde os indivíduos da primeira geração são aleatoriamente selecionados por toda a área de serviço, ou seja, dentre os elementos do conjunto \mathcal{A} . O método *DcmGaNew* utiliza uma versão modificada, originalmente proposta pelo autor em [59], onde os indivíduos da primeira geração são randomicamente selecionados na área de melhor servidor predita do setor servidor indicado na assinatura alvo, ou seja, dentre os *pixels* do conjunto \mathcal{B} . A técnica de redução do espaço de correlação adotada no método *DcmGaNew* é, portanto, uma composição da técnica utilizando GA, proposta em [58], com o primeiro passo da filtragem determinística, descrito na Seção 2.3.1.

Para comparar o tempo para produzir uma estimativa de posição nos métodos *DcmGaOld* e *DcmGaNew*, o mesmo fator γ de redução do espaço de correlação será aplicado em ambos. O fator γ pode ser expresso por:

$$\gamma = 1 - \frac{n}{m} \quad (62)$$

onde n e m são as cardinalidades dos espaços de correlação reduzido e inicial, respectivamente. Para os métodos *DcmGaOld* e *DcmGaNew*, assumindo que o critério de parada é o número máximo de gerações g_{max} , tem-se:

$$\gamma = 1 - \frac{(\mathcal{T}g_{max})}{m} \quad (63)$$

onde τ é o número de indivíduos por geração. Isolando τ na equação (63), obtém-se:

$$\tau = \frac{(1 - \gamma) m}{g_{max}} \quad (64)$$

Na equação (64), verifica-se que τ é diretamente proporcional à cardinalidade m do espaço de correlação inicial. O espaço de correlação inicial no método *DcmGaOld* é o conjunto \mathcal{A} . O espaço de correlação inicial no método *DcmGaNew* é o conjunto \mathcal{B} , onde $\#\mathcal{B} \ll \#\mathcal{A}$. Assim, fixados g_{max} e γ , o método *DcmGaOld* terá um número muito mais elevado de indivíduos por geração do que o método *DcmGaNew*.

No método *DcmGaNew*, os indivíduos da primeira geração apresentam maior aptidão média, uma vez que, sendo selecionados dentre os *pixels* da área de melhor servidor predita do setor servidor, estão mais próximos, em média, da posição real do MS. A Figura 23(a) mostra a aptidão média da população inicial por localização, para os métodos *DcmGaOld* e *DcmGaNew*. Observa-se que, em média, a população inicial no método *DcmGaNew* tem uma aptidão média 75% superior a do método *DcmGaOld*. Com uma maior aptidão média inicial, o estado estacionário, definido como um dos critérios de parada na Seção 2.3.2, é atingido após um menor número de gerações.

O menor número de indivíduos por geração e a maior aptidão média da população inicial no método *DcmGaNew* explicam por que seu tempo de processamento é cerca de 10 vezes menor que o do método *DcmGaOld*, conforme mostra a Figura 23(b).

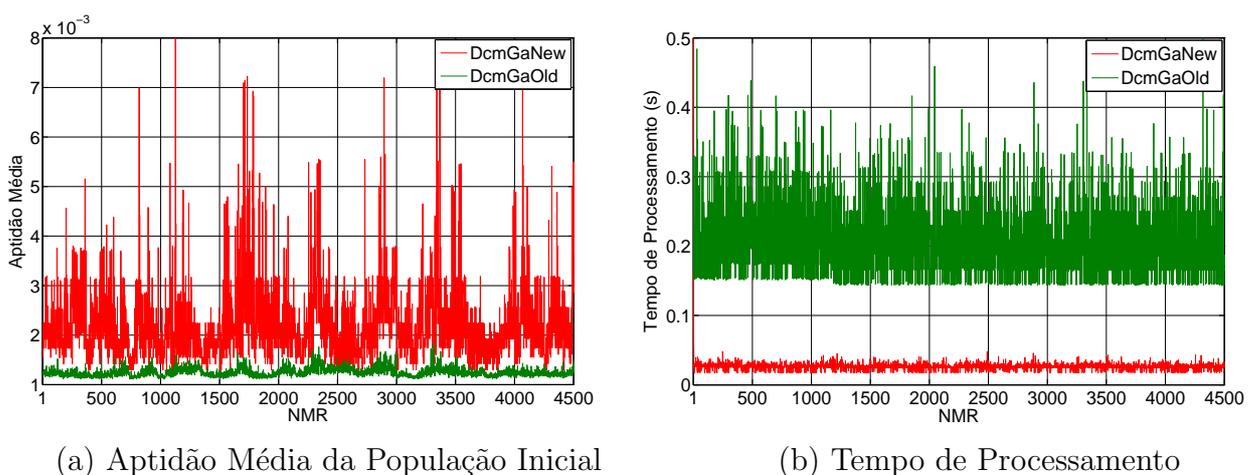


Figura 23 - Comparação dos Métodos de Localização Utilizando GA na Região 1.

4.3.2 Métodos *DcmFull* e *DcmGaNew*

A Figura 24(a) mostra que, na Região 1, o método *DcmGaNew* tem um tempo médio de processamento por localização 31% inferior ao do método *DcmFull*. Na Região 2, contudo, essa condição se inverte, e o método *DcmFull* apresenta um tempo médio de processamento por localização 91% inferior ao do método *DcmGaNew*, conforme ilustra a Figura 24(b). Observa-se também que o tempo médio de processamento do método *DcmGaNew*, em torno de 25 ms, é aproximadamente o mesmo nas duas regiões.

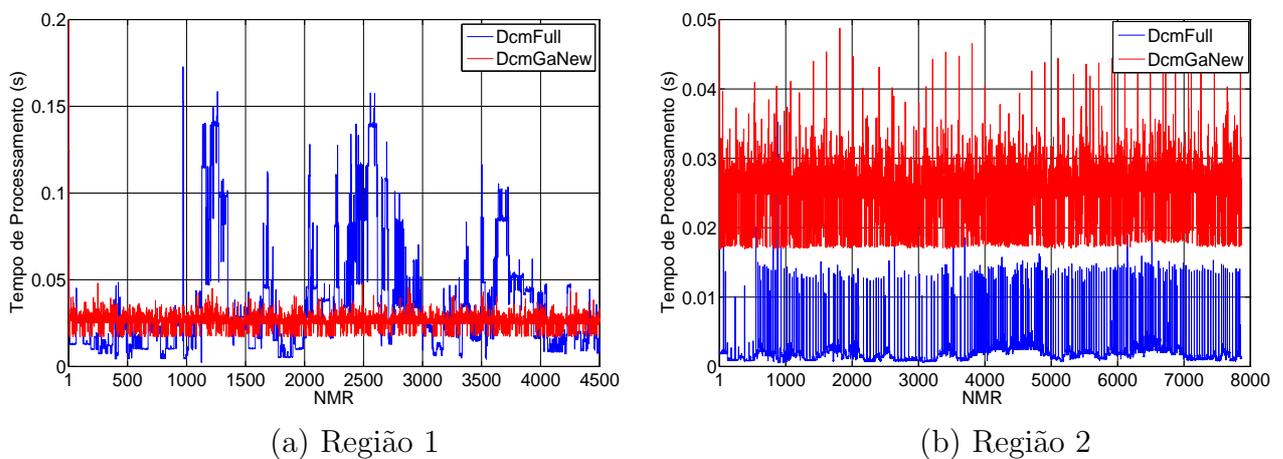


Figura 24 - Comparação do Tempo para Produzir uma Estimativa de Posição.

A explicação para essa inversão na relação entre os tempos de processamento por localização dos métodos *DcmFull* e *DcmGaNew* na Regiões 1 e 2 é fornecida pelas seguintes observações:

1. A Figura 25(a) mostra que, na Região 1, $\#\mathcal{B} \approx \#\mathcal{D}$ para qualquer NMR. Isto ocorre porque, como mostra a Figura 26, mais de 70% dos NMRs coletados na Rota 1 têm o mesmo valor de TA. Neste caso, o segundo passo de filtragem elimina poucos *pixels*;
2. A Figura 25(b) mostra que, na Região 2, $\#\mathcal{B} \gg \#\mathcal{D}$. Isto ocorre porque, como mostra a Figura 26, os NMRs coletados na Rota 2 têm valores de TA distribuídos entre 0 e 8. Neste caso, o segundo passo de filtragem reduz bastante o número de *pixels*;
3. Na Tabela 3 observa-se que: **i)** a superfície da Região 2 é muito maior que a da Região 1; **ii)** a densidade de setores na Região 2 é muito menor que na Região 1.

Em razão destas duas características, a área média coberta por setor na Região 2 é maior que na Região 1. Porém, como a resolução planar do CDB na Região 2 ($r_S = 200$ metros) é menor que na Região 1 ($r_S = 10$ metros) - o que tende a reduzir o número de *pixels* na Região 2 - a quantidade média de *pixels* por área de melhor servidor predita em ambas as regiões é aproximadamente igual. Isso pode ser observado comparando o gráfico de $\#\mathcal{B}$ na Figura 25(a) e Figura 25(b);

4. O método *DcmFull*, que usa filtragem determinística, opera com um espaço de correlação reduzido \mathcal{D} em média menor na Região 2 do que na Região 1, em função do exposto nos itens 1 e 2;
5. Pelo exposto no item 3, o método *DcmGaNew*, que utiliza GA e apenas o primeiro passo da filtragem determinística, opera com espaços de correlação iniciais \mathcal{B} com aproximadamente a mesma cardinalidade média nas Regiões 1 e 2. Em função disso, fixados os valores de g_{max} e γ , o número médio de usuários por geração é aproximadamente igual nas duas regiões, conforme a equação (64).

O item 4 explica por que o método *DcmFull* é mais rápido na Região 2 do que na Região 1, e o item 5 explica por que o método *DcmGaNew* tem aproximadamente a mesma velocidade em ambas as regiões. Esses resultados poderiam suscitar a idéia de aplicar o GA não sobre o primeiro, mas sobre o segundo passo da filtragem determinística. Neste caso, os indivíduos da população inicial seriam aleatoriamente distribuídos dentre os elementos do conjunto \mathcal{C} , definido pela equação (35). Isso, contudo, não seria praticável, pois, ao aplicar a equação (64) com $\gamma = 97\%$, o número de indivíduos por geração seria sempre igual à unidade (uma vez que valores fracionários são arredondados para a unidade), o que impossibilitaria a aplicação do operador genético *crossover*. Para que o número de indivíduos por geração fosse maior que a unidade, o valor de γ deveria ser muito reduzido. Isso, contudo, faria com que o método *DcmGaNew* convergisse para o método *DcmSad*, pois praticamente todos os *pixels* no conjunto \mathcal{C} seriam incluídos no espaço de correlação reduzido.

4.4 Filtragem de Média Móvel

Para um dado MS, há uma forte correlação entre suas localizações nos instantes t_k e $t_k + \Delta t$, desde que o produto da velocidade v do MS e do intervalo de tempo Δt seja

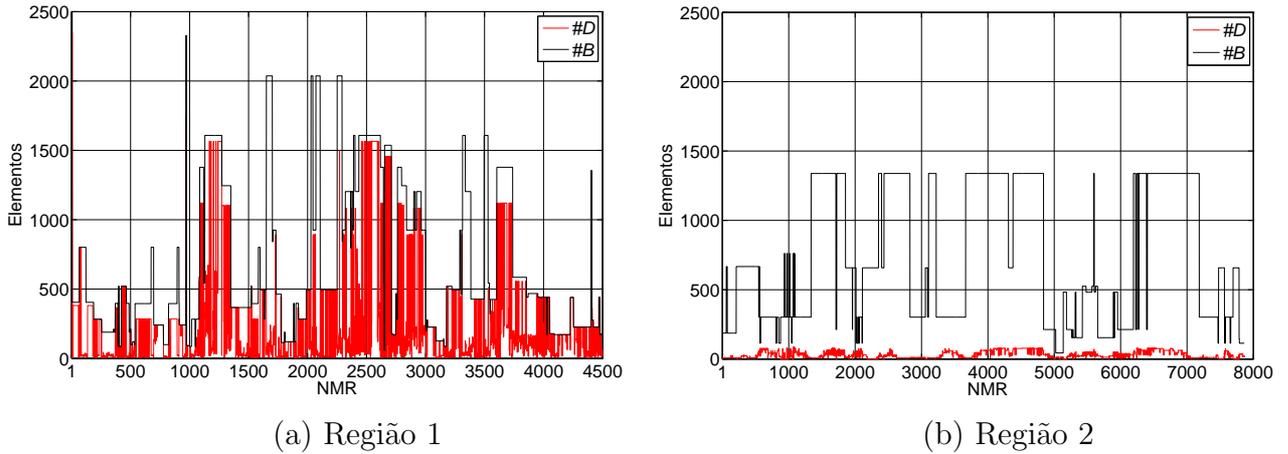


Figura 25 - Cardinalidade dos Conjuntos \mathcal{B} e \mathcal{D} no Método *DcmFull*.

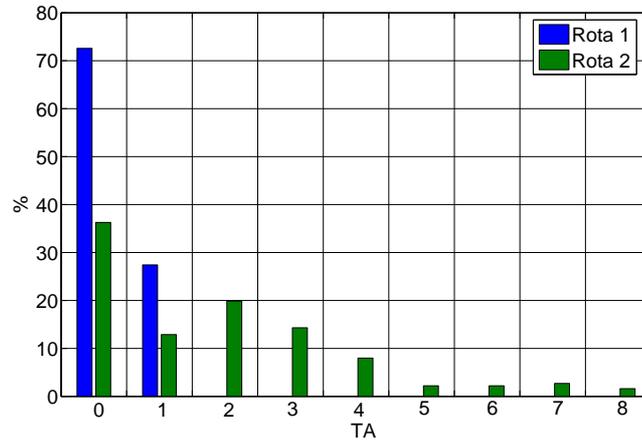


Figura 26 - Distribuição dos Valores Medidos de TA.

pequeno [77]. O filtro de média móvel atua como um filtro passa-baixa, suavizando desvios entre estimativas de localização adjacentes ao longo de uma rota de teste. Utilizando um filtro de comprimento L , as coordenadas estimadas $[\hat{x}_k \hat{y}_k]^T$ do MS no instante t_k são dadas pela média aritmética das coordenadas da estimativa atual e das $L - 1$ anteriores, ou seja:

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_k \\ \hat{y}_k \end{bmatrix} = \frac{1}{L} \sum_{u=0}^{L-1} \begin{bmatrix} \hat{x}_{k-u} \\ \hat{y}_{k-u} \end{bmatrix} \quad (65)$$

O valor ótimo de L depende do produto $v \cdot \Delta t$ e das variações de direção e velocidade do MS [77]. Verificou-se experimentalmente que o valor ótimo para a Rota 1 é $L = 20$.

Para a Rota 2, onde a velocidade média do MS era ligeiramente maior que na Rota 1, o valor ótimo é $L = 15$. O valor ótimo de L é aquele para o qual o erro ponderado e_w é minimizado.

O efeito da filtragem de média móvel na precisão do método *DcmFull* é mostrado na Tabela 8, onde são informados os erros de localização com e sem filtragem para os percentis 50%, 67% e 95% nas Regiões 1 e 2.

A Figura 27(a) e Figura 27(b) mostram as estimativas de posição do método *DcmFull* na Região 1 (pontos vermelhos), com e sem filtragem, respectivamente. As coordenadas de referência dos pontos de medida ao longo da rota de teste, fornecidas pelo GPS, são mostradas em ambas as figuras (pontos azuis). A Figura 27(b) mostra que, com a filtragem de média móvel, as estimativas de posição ficam mais próximas da rota de teste. Em alguns trechos, as estimativas seguem aproximadamente o traçado da rota.

Tabela 8 - Efeito da Filtragem de Média Móvel na Precisão do Método *DcmFull*.

Percentil	Região 1			Região 2		
	Sem Filtro	Filtro($L = 20$)	Redução	Sem Filtro	Filtro($L = 20$)	Redução
50%	115 m	100 m	13%	724 m	672 m	7%
67%	161 m	134 m	17%	1030 m	915 m	11%
95%	310 m	261 m	16%	2352 m	1687 m	28%

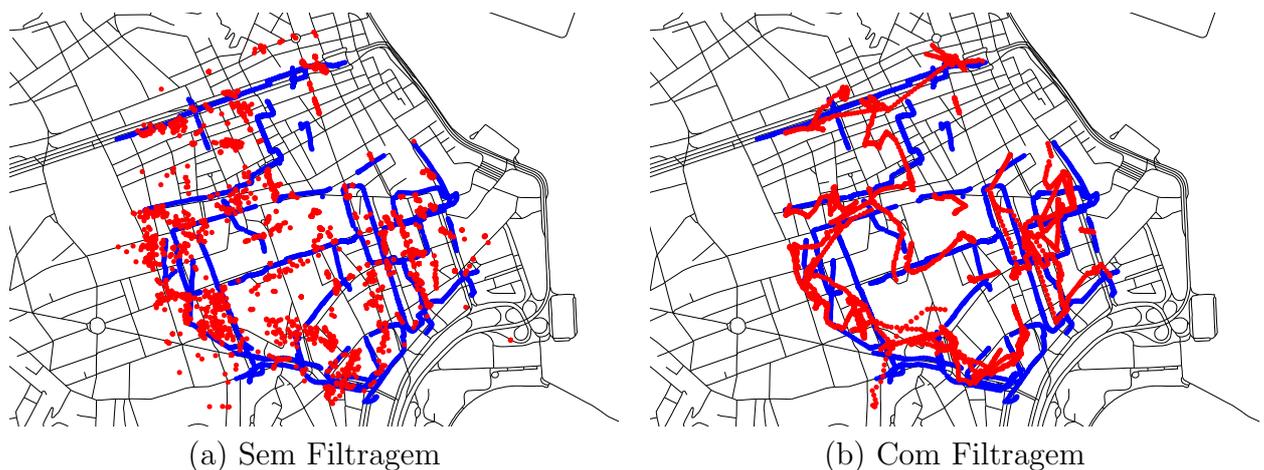


Figura 27 - Rota de Coleta e Posições Estimadas pelo Método *DcmFull* na Região 1.

Os resultados apresentados nas seções subsequentes foram obtidos com a utilização de filtros de média móvel, exceto quando explicitamente informado o contrário. O comprimento dos filtros foi $L = 20$ e $L = 15$, nas Regiões 1 e 2, respectivamente.

4.5 Resolução Planar do CDB

Os CDBs utilizados estão disponíveis em duas resoluções planares por região: 10 e 25 metros, na Região 1, e 100 e 200 metros, na Região 2.

Os métodos DCM listados na Tabela 4 fornecem, cada um, aproximadamente a mesma precisão quando utilizando CDBs com $r_S = 100$ metros e $r_S = 200$ metros na Região 2. Para uma mesma região, quanto menor o valor de r_S , maior a quantidade de *pixels*, ou seja, de elementos no CDB. Quanto maior o número de elementos no CDB, maior o tempo médio requerido por um método DCM para produzir uma estimativa de posição. Assim, se dois valores diferentes de r_S resultam em precisões de localização muito semelhantes, deve-se optar pelo maior valor, neste caso, $r_S = 200$ metros.

O mesmo ocorre na Região 1, onde os métodos da Tabela 4 utilizam CDBs com $r_S = 10$ metros e $r_S = 25$ metros. A exceção é o método *DcmFull*, onde a utilização de $r_S = 10$ metros fornece uma precisão ligeiramente superior, conforme indica a Figura 28(a). Por questões de uniformidade, o valor de $r_S = 10$ metros foi selecionado também para os demais métodos DCM, sem prejuízo da precisão de localização.

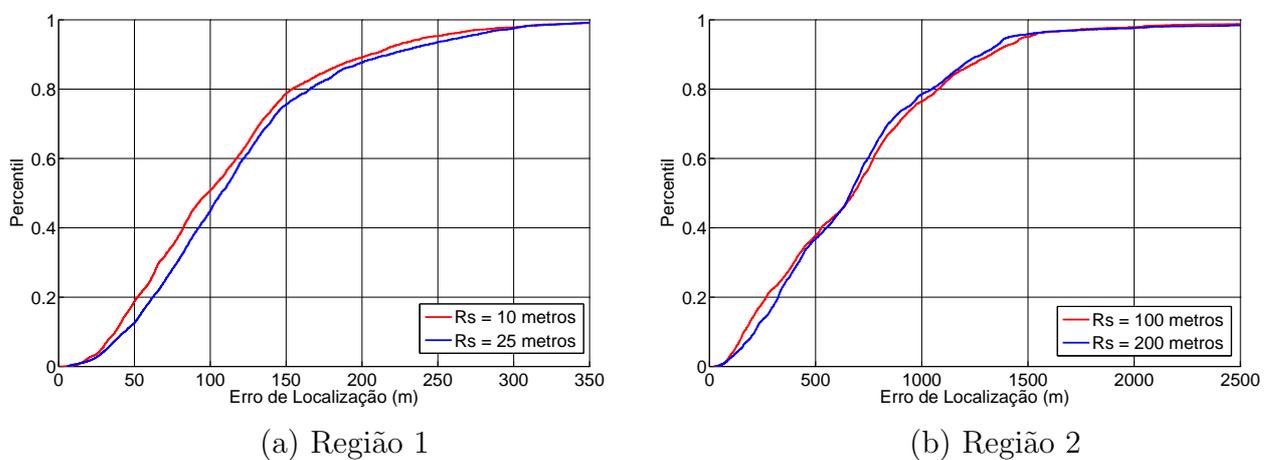


Figura 28 - Precisão do Método *DcmFull* em Função de r_S .

Os resultados mostrados nas seções subsequentes foram obtidos considerando a utilização de CDBs com $r_S = 10$ metros e $r_S = 200$ metros nas Regiões 1 e 2, respectivamente.

4.6 Precisão Experimental

4.6.1 Centróides

A Tabela 9 resume o desempenho dos métodos baseados em centróides nas Regiões 1 e 2. Estes métodos foram apresentados na Seção 1.2.3: o método do centróide simples (C_{simp}), o método do centróide ponderado (C_{pond}) e o método do centróide da área predita de melhor servidor utilizando RTT (C_{pred}) [32]. Aplicou-se filtragem de média móvel nos métodos C_{simp} e C_{pond} , com $L = 20$ e $L = 15$ nas Regiões 1 e 2, respectivamente.

Na Região 1, o método C_{pond} tem uma acurácia superior para os três percentis informados na Tabela 9. Na Região 2, onde a densidade de setores é cerca de 10 vezes menor que na Região 1, o método C_{pred} destaca-se dos demais, com um erro ponderado inferior à metade do erro ponderado do método C_{simp} .

O método C_{pred} utilizou os mesmos CDBs empregados pelos métodos DCM, com $r_S = 10$ metros e $r_S = 200$ metros nas Regiões 1 e 2, respectivamente. Após a apresentação do processo de filtragem determinística na Seção 2.3.1, o método C_{pred} pode ser re-definido de forma mais simples: *o método C_{pred} fornece como estimativa de posição do MS a média aritmética das coordenadas dos elementos do conjunto \mathcal{C} , ou seja, o centróide da superfície ocupada pelos elementos restantes após o segundo passo da filtragem determinística.* O conjunto \mathcal{C} é definido pela equação (35).

Os métodos C_{simp} e C_{pond} são bastante simples, não utilizando modelagem de propagação. Porém, sua precisão em áreas com baixa densidade de setores é muito ruim, com valores de e_w superiores a 2 km. Além disso, apresentam menor disponibilidade que o método C_{pred} , uma vez que necessitam de pelo menos três células âncora para produzir uma estimativa de posição, enquanto o método C_{pred} necessita de apenas uma.

Tabela 9 - Erro de Localização dos Métodos Baseados em Centróides.

Percentil	Região 1			Região 2		
	C_{simp}	C_{pond}	C_{pred}	C_{simp}	C_{pond}	C_{pred}
50%	124 m	119 m	130 m	1743 m	1491 m	780 m
67%	153 m	148 m	168 m	2253 m	2020 m	994 m
95%	267 m	257 m	336 m	4245 m	3970 m	2138 m
e_w	198 m	191 m	235 m	3034 m	2780 m	1454 m

4.6.2 Métodos *DcmFull*, *DcmSad* e *DcmSpear*

A Tabela 10 resume o desempenho dos métodos *DcmFull*, *DcmSad* e *DcmSpear* nas Regiões 1 e 2. Os três métodos têm uma precisão muito semelhante, porém, na Região 1, o método *DcmFull* tem um desempenho ligeiramente superior, considerando o erro ponderado e os percentis mais elevados. Este melhor desempenho do método *DcmFull* fica ainda mais evidente na Região 2.

Tabela 10 - Erro de Localização dos Métodos *DcmFull*, *DcmSad* e *DcmSpear*.

Percentil	Região 1			Região 2		
	<i>DcmFull</i>	<i>DcmSad</i>	<i>DcmSpear</i>	<i>DcmFull</i>	<i>DcmSad</i>	<i>DcmSpear</i>
50%	98 m	100 m	96 m	665 m	661 m	688 m
67%	128 m	134 m	133 m	813 m	895 m	911 m
95%	244 m	261 m	267 m	1411 m	1632 m	1767 m
e_w	173 m	184 m	185 m	1048 m	1209 m	1246 m

4.6.3 Métodos *DcmFull*, *DcmAnn* e *DcmGaNew*

A Figura 29 mostra as CDFs dos erros de localização dos métodos *DcmFull*, *DcmAnn* e *DcmGaNew*, nas Regiões 1 e 2. O método *DcmFull* obteve o melhor desempenho em ambas as regiões, sobretudo na Região 2, onde seu erro mediano foi inferior a 50% do erro mediano do segundo melhor método. O método *DcmAnn* apresentou um desempenho muito ruim, com $e_w = 404$ metros na Região 1 e $e_w = 2767$ metros na Região 2.

O método *DcmGaNew* atingiu uma precisão próxima ao do método *DcmFull* na Região 1, mas teve o pior desempenho na Região 2. Para melhorar a precisão do método *DcmGaNew* na Região 2 seria necessário aumentar o número máximo de gerações ou aumentar o fator γ , o que resultaria em maior número de indivíduos por geração. Ambas as alternativas resultariam em elevação do tempo médio para produzir uma estimativa de posição. Porém, na Região 2, o método *DcmGaNew* já é mais lento que o *DcmFull*, conforme mostra a Figura 24(b). Assim, na Região 2, a técnica de redução do espaço de correlação utilizando GA parece não poder competir com a filtragem determinística.

4.6.4 Diversos Métodos

Na Figura 30 a precisão do método *DcmFull* - que obteve o melhor desempenho dentre os métodos DCM em ambas as regiões de teste - é comparada com a precisão do

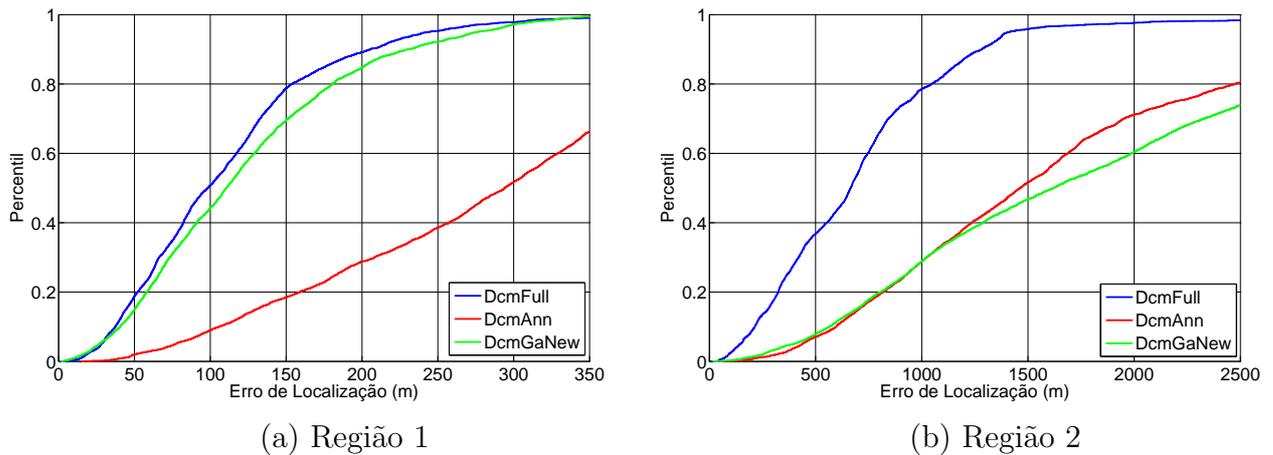


Figura 29 - Precisão Experimental dos Métodos *DcmFull*, *DcmAnn* e *DcmGaNew*.

método CID+RSS e dos métodos *Cpond* e *Cpred*, que obtiveram os melhores desempenhos dentre os métodos baseados em centróides nas Regiões 1 e 2, respectivamente. O método CID é incluído para fornecer uma base de comparação: nenhum método utilizável em uma dada região pode ter um desempenho igual ou pior que o CID.

Foi utilizada filtragem de média móvel, conforme descrito na Seção 4.4, exceto para os métodos CID e *Cpred*. Não foi utilizada filtragem de média móvel nestes métodos devido à característica de granularidade das estimativas de posição por eles produzidas. No método CID, independentemente da posição real do MS dentro da área de melhor servidor de um setor, a posição estimada será a mesma e coincidirá com as coordenadas do setor em questão. Algo semelhante ocorre com o método *Cpred*: a estimativa de posição por ele retornada será o centróide da sub-área com RTT constante dentro da área de melhor servidor predita da célula servidora, independentemente da posição real do MS dentro desta sub-área. A aplicação da filtragem de média móvel nestas condições resulta em elevação do erro de localização, razão pela qual esta técnica não é aplicada nos métodos *Cpred* e CID.

O método *DcmFull* obteve o melhor desempenho em ambas as regiões. Os métodos utilizando centróides - *Cpond* na Região 1 e *Cpred* na Região 2 - vêm em seguida, com erros ponderados cerca de 10% maiores.

O método CID+RSS tem um desempenho muito ruim em ambas as regiões. Na Região 1, sua precisão é pior que a do método CID. Este desempenho, contudo, era previsível, conforme as limitações destacadas na Seção 1.2.2. Métodos de multi-lateração

circular utilizando RSS parecem apresentar desempenho aceitável apenas em ambientes simulados com condições bastante favoráveis [78].

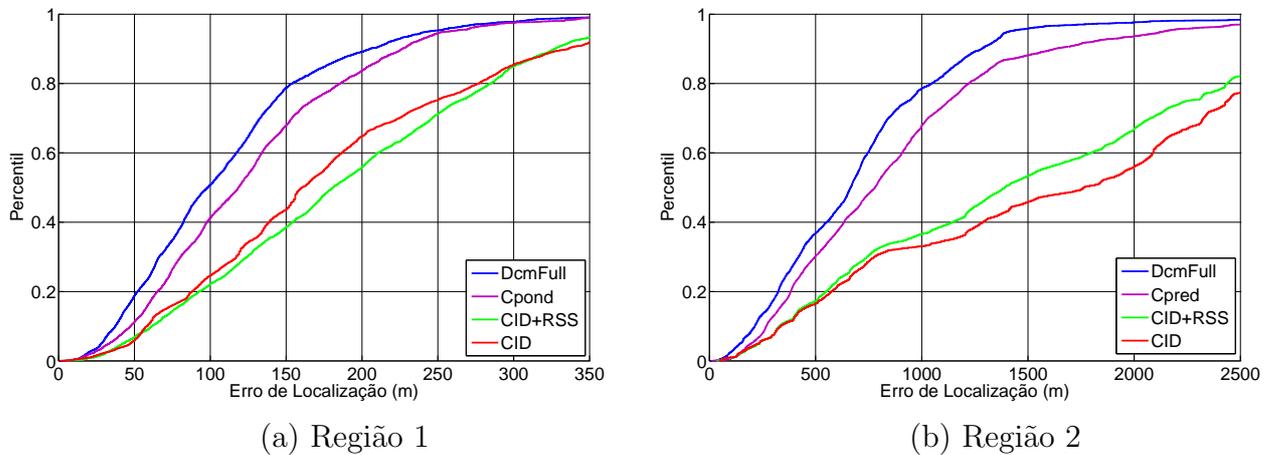


Figura 30 - Precisão de Diversos Métodos de Localização.

4.7 Efeito do Primeiro Passo da Filtragem Determinística na Precisão do Método *DcmFull*

Se o MS está localizado em um *pixel* onde o melhor servidor predito difere do melhor servidor real - i.e., medido pelo MS - a posição real do MS é excluída do espaço de correlação já no primeiro passo da filtragem determinística. Esta diferença ocorre devido à inacurácia intrínseca à modelagem de propagação e, normalmente, não surge de forma pontual. Ou seja, quando esta diferença é observada no *pixel* onde o MS está situado, provavelmente acontece também em diversos *pixels* vizinhos (particularmente no caso de valores pequenos de r_S), que por esta razão também são excluídos do espaço de correlação, conforme mostram a Figura 34(a) e Figura 35(a).

A exclusão do *pixel* onde o MS está localizado e de *pixels* vizinhos resulta em degradação da precisão de métodos DCM utilizado filtragem determinística. Para avaliar este efeito, os NMRs coletados foram divididos em dois conjuntos por rota:

1. Conjunto Equivalente: composto pelos NMRs situados em *pixels* onde o melhor servidor predito é igual ao melhor servidor reportado no NMR;
2. Conjunto Não-Equivalente: é o complemento do conjunto anterior.

Como os NMRs em cada conjunto de cada rota não são necessariamente sequenciais - os conjuntos intercalam-se ao longo de uma mesma rota - a filtragem de média móvel não é utilizada nesta análise. Os resultados obtidos pelo método *DcmFull* são mostrados na Figura 31. A precisão de localização para o Conjunto Equivalente é notoriamente melhor em ambas as regiões, com uma acurácia superior para todos os percentis. O melhor desempenho para o Conjunto Equivalente também é evidenciado através do erro ponderado: na Região 1, tem-se $e_w = 167$ metros e $e_w = 241$ metros para os Conjuntos Equivalente e Não-Equivalente, respectivamente; na Região 2, tem-se $e_w = 1095$ metros e $e_w = 2196$ metros para os conjuntos Equivalente e Não-Equivalente, respectivamente. O desempenho global - o Conjunto Geral na Figura 31 - é uma média ponderada do desempenho dos conjuntos Equivalente e Não-Equivalente.

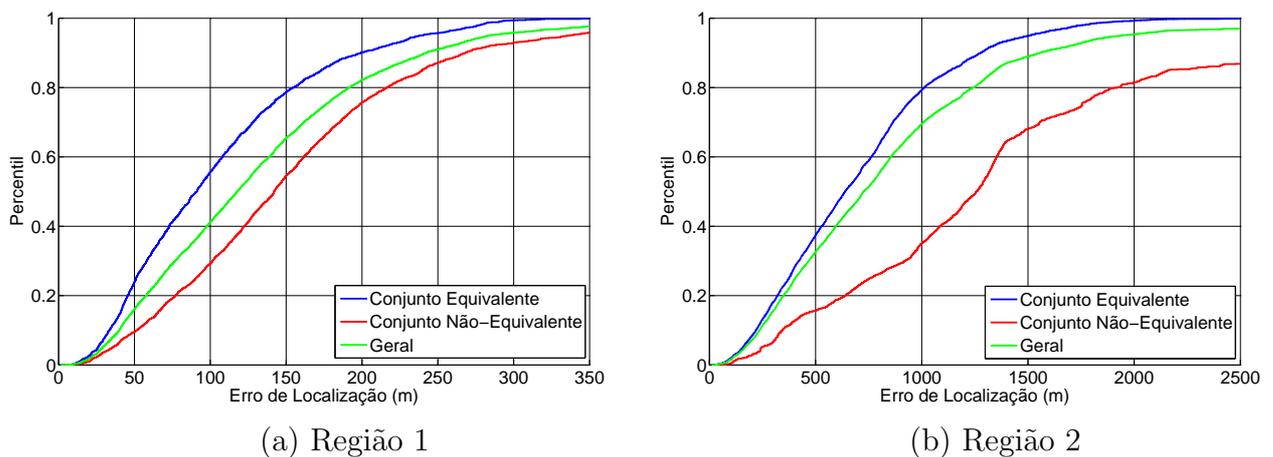


Figura 31 - Efeito do Primeiro Passo da Filtragem Determinística na Precisão.

Na Região 2, devido à baixa densidade de setores, valores de TA acima de 1 são observados, conforme mostra o histograma da Figura 26. Assim, é possível verificar nesta região como o erro médio de localização do método *DcmFull* varia em função do valor de TA. Os resultados obtidos são mostrados na Figura 32. Observa-se que o erro médio do Conjunto Não-Equivalente cresce linearmente para valores de TA entre 0 e 3, caindo em seguida, até se estabilizar em torno de 1600 metros. O erro médio do Conjunto Equivalente fica abaixo de 1000 metros para todos os valores de TA.

Se os modelos de propagação utilizados para a construção do CDB são calibrados, a identificação das áreas de melhor servidor de cada célula é feita de modo mais preciso. Com isso, a quantidade de *pixels* no Conjunto Equivalente aumenta, resultando em

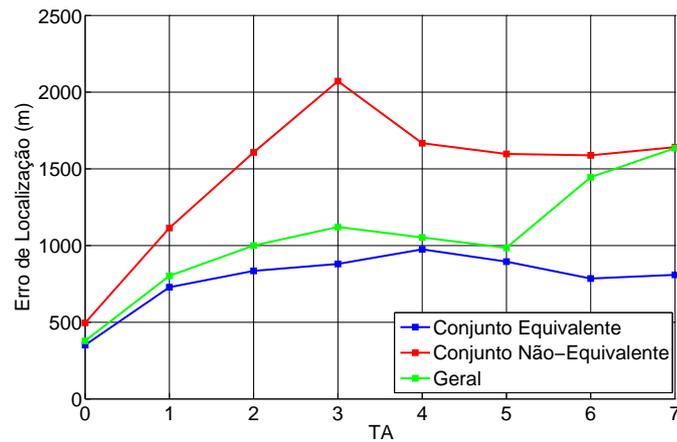


Figura 32 - Erro Médio do Método *DcmFull* versus Valor de TA na Região 2.

uma melhoria de precisão do método *DcmFull*. O efeito da calibração dos modelos de propagação na precisão do método *DcmFull* é avaliado na Seção 4.8. Contudo, deve-se ressaltar que outro fator, além da imprecisão da modelagem de propagação, pode afetar o primeiro passo da filtragem determinística e a precisão de localização do método *DcmFull*: conforme a definição de setor melhor servidor, fornecida na Seção 1.1, em algumas situações associadas ao *handover*, o setor melhor servidor pode não ser aquele com o maior valor de RSS. Nestas condições, mesmo com um hipotético modelo de propagação perfeito, ocorreria discrepância entre o setor melhor servidor predito e o setor melhor servidor efetivo.

4.8 Efeito da Calibração dos Modelos de Propagação na Precisão do Método *DcmFull*

A calibração do modelo de propagação empírico de Okumura-Hata foi realizada na Região 1, setor a setor, segundo o procedimento descrito na Seção 2.2.2 e utilizando a Rota 3, especificada na Tabela 3.

O resultado esperado com a calibração dos modelos de propagação utilizados para construir o CDB é a melhoria da precisão do método *DcmFull*. Esta expectativa é confirmada pela comparação das CDFs dos erros de localização do método *DcmFull*, antes e após a calibração, mostradas na Figura 33. Com a calibração, o erro mediano reduz-se de 98 metros para 78 metros - uma diminuição de 21% - e o erro ponderado reduz-se de 173 metros para 156 metros - uma diminuição de 10%.

Os pontos da Rota 3 não estão distribuídos uniformemente pela área de teste. Assim, dos 114 setores existentes na Região 1, apenas 60 foram detectados na rota de calibração. Deste subconjunto, 27 setores têm menos de 50 pontos de calibração válidos. O baixo número de pontos de calibração por setor impede que a calibração resulte em uma melhoria mais pronunciada da precisão de localização.

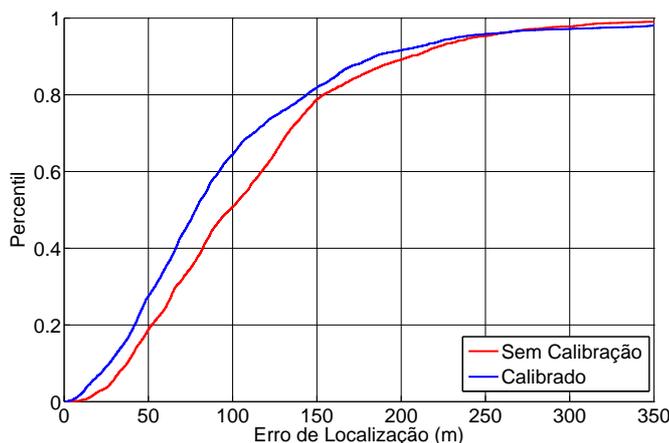


Figura 33 - Efeito da Calibração na Precisão do Método *DcmFull* na Região 1.

Para melhor avaliar o efeito da calibração na precisão de localização, as duas células na Região 1 com o maior número de pontos de calibração em suas respectivas áreas de melhor servidor foram selecionadas: o setor 9, com 249 pontos de calibração, e o setor 53, com 241 pontos de calibração.

A Figura 34 mostra a área de melhor servidor predita do setor 9, antes e após a calibração. A Figura 34 mostra também os pontos da rota de teste - a Rota 1, especificada na Tabela 3 - onde o melhor servidor medido foi o setor 9. Os pontos vermelhos fora da região azul são aqueles onde o melhor servidor real e o melhor servidor predito são diferentes. Conforme mostrado na Seção 4.7, essa discrepância provoca aumento do erro de localização. Comparando a Figura 34(a) e Figura 34(b), observa-se que, após a calibração, diminui o número de pontos onde essa diferença ocorre. O resultado é a melhoria da precisão, evidenciada pela comparação das CDFs dos erros de localização antes e após a calibração, mostradas na Figura 36(a), onde verifica-se que o erro mediano sofre uma redução de 42%. Não foi utilizado filtro de média móvel.

A Figura 35 mostra a área de melhor servidor predita do setor 53, antes e após a calibração do modelo de propagação. A Figura 35 mostra também os pontos da rota

de teste onde o melhor servidor medido foi o setor 53. A comparação da Figura 35(a) e Figura 35(b) leva às mesmas conclusões feitas em relação ao setor 9. A Figura 36(b) mostra as CDFs dos erros de localização antes e após a calibração: o erro mediano e o erro ponderado sofrem reduções de 42% e 27%, respectivamente. Não foi utilizado filtro de média móvel.

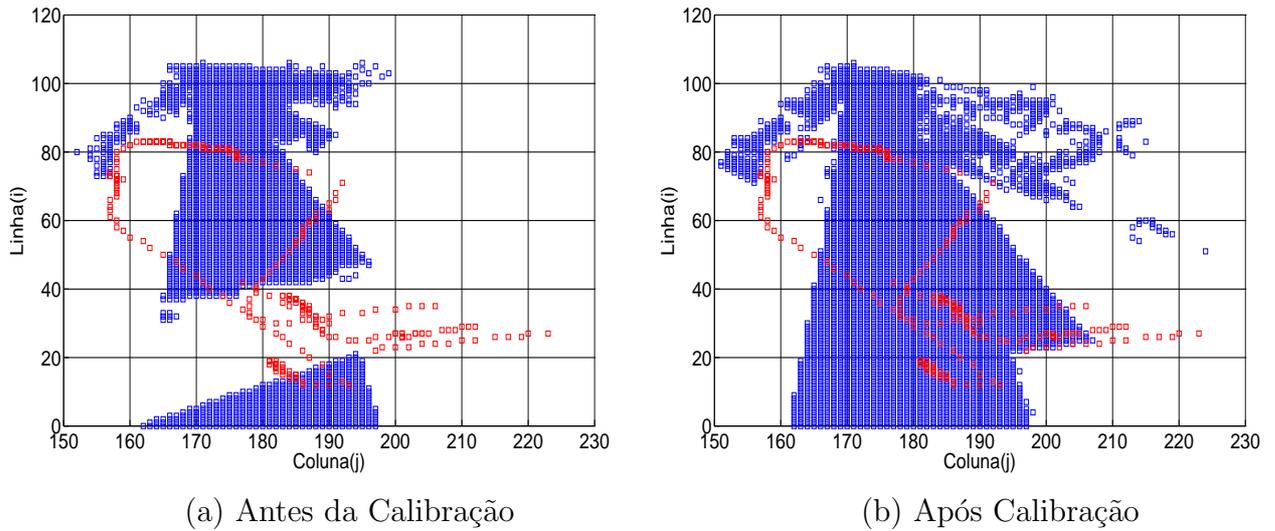


Figura 34 - Área de Melhor Servidor Predita do Setor 9 na Região 1.

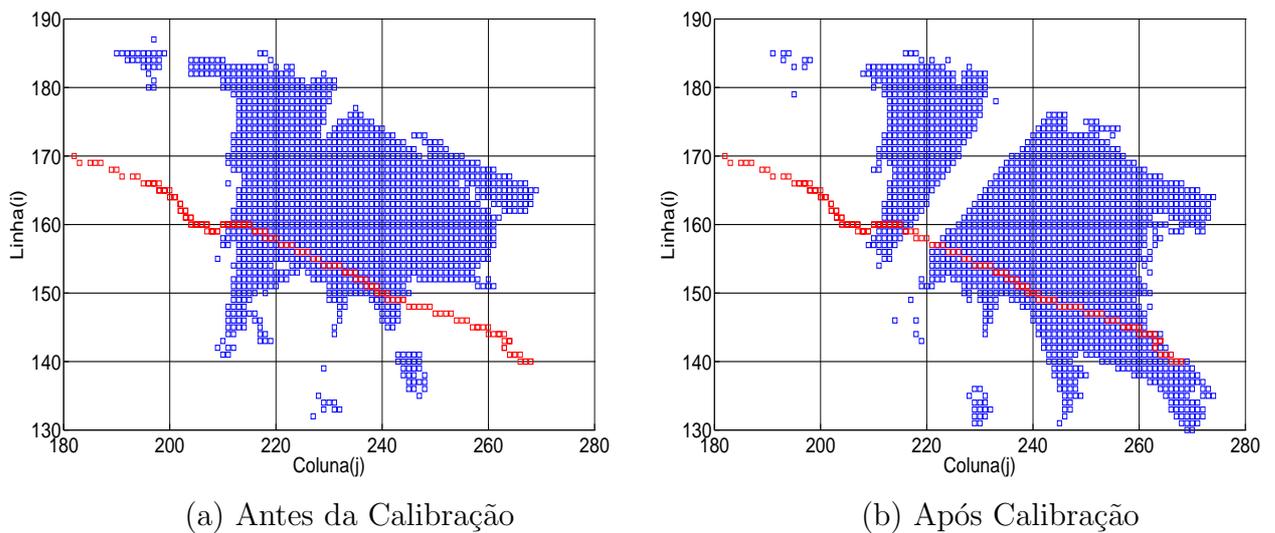


Figura 35 - Área de Melhor Servidor Predita do Setor 53 na Região 1.

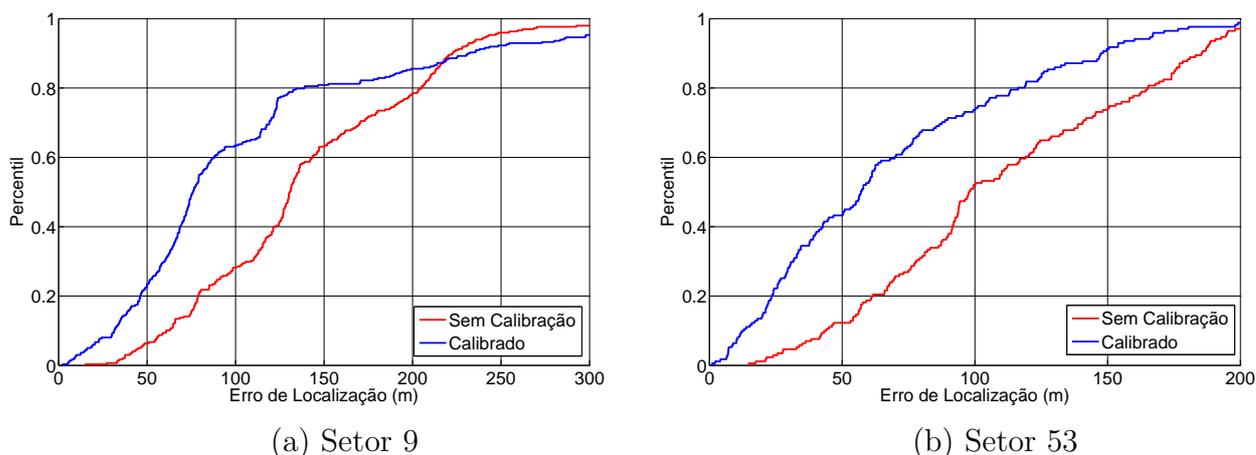


Figura 36 - Precisão do Método *DcmFull* em Dois Setores da Região 1.

4.9 Comparação com Resultados Publicados na Literatura

A comparação direta de métodos aplicados em redes distintas é difícil, pois o desempenho dos métodos de localização analisados depende, dentre outros fatores, da disposição das células na região de teste. Normalmente, quanto maior a densidade superficial de setores, maior a precisão de qualquer método. Esta característica deve ser levada em consideração quando os resultados obtidos neste trabalho forem comparados com outros publicados na literatura especializada. Uma tentativa de normalização do erro de localização em função da densidade superficial de setores foi feita pelo autor em [32]. Neste trabalho, contudo, é usada, quando possível, uma abordagem mais simples: a normalização é feita em relação à precisão do método CID, o mais básico de todos os métodos, e cuja precisão de localização, mais do que a de qualquer outro método, está diretamente relacionada à densidade superficial de setores na área de teste. A utilização desta abordagem, contudo, depende da disponibilidade de dados referentes à precisão do método CID nas publicações consultadas.

4.9.1 Métodos de Multi-Lateração

Em [79], um método de multi-lateração circular utilizando perda de propagação obteve erro médio de 399 metros em uma rede GSM em área urbana na cidade de Istambul, na Turquia. O desempenho do método CID nessa mesma área não é informado, tampouco a densidade de setores, logo não é possível normalizar o erro para melhor comparação.

Mesmo sem a possibilidade de normalização, o resultado obtido é claramente insatisfatório, já que em [80], foi obtido um erro mediano de 400 metros com o método CID, também em uma rede GSM em área urbana. Na Região 1, o erro mediano do CID foi de 160 metros, enquanto o do CID+RSS foi de 182 metros. A utilização de um método de localização com desempenho igual ou inferior ao CID não se justifica. Os resultados do método CID+RSS, resumidos na Figura 30, e aqueles obtidos em [79], parecem confirmar que os métodos de multi-lateração circular utilizando perda de propagação não têm desempenho aceitável em cenários reais.

Em [16], um método de multi-lateração circular utilizando RTT obteve erros médios de propagação de 723 metros em área urbana e 1428 metros em área suburbana. O método *DcmFull* obteve em redes GSM, com CDBs não calibrados, erros médios de 111 metros em área urbana e 718 metros em área suburbana. Os testes em [16] também foram conduzidos em redes GSM, logo o parâmetro utilizado para a multi-lateração foi o TA. A baixa resolução temporal do TA é a principal responsável pelo pobre desempenho alcançado, inferior até ao desempenho do método de multi-lateração circular utilizando perda de propagação reportado em [79]. Além da baixa precisão, o método proposto em [16] tem uma desvantagem adicional: o MS em modo ativo em uma rede GSM tem apenas um valor de TA, por isso o MS deve realizar um *handover* forçado entre as células, de modo a dispor de pelo menos três valores de TA. Isto provoca uma breve interrupção da comunicação do usuário, além de aumentar o tráfego de informações de controle na interface aérea e a carga de processamento na BSC.

Em [80] são reportados os resultados obtidos pelo método EOTD em uma rede GSM em uma área urbana densa. O método EOTD é um método de multi-lateração baseado no MS ou assistido pelo MS e que exige a instalação de LMUs na RAN, conforme descrito na Seção 1.2.2. Em condições LOS, espera-se que ele tenha uma precisão maior que a de métodos baseados na rede, como o método *DcmFull*. Porém, na área de teste em [80], devido à predominância de condições de propagação NLOS, o desempenho do EOTD é degradado, atingindo uma acurácia mediana de 87 metros. Esse valor é um pouco maior que a acurácia mediana do método *DcmFull* na Região 1, após a calibração do CDB e utilizando o filtro de média móvel, que é de 78 metros.

4.9.2 Métodos utilizando ANNs

Em [68], um método DCM utilizando ANN foi testado em uma rede GSM em uma região urbana densa com $3 \times 3 \text{ km}^2$, obtendo um erro mediano de 115 metros. Nesta mesma região, um método DCM convencional, como o proposto em [23], foi testado, utilizando um CDB construído a partir de modelos determinísticos baseados em traçado de trajetória de raios. A resolução planar do CDB era de 5 metros. O erro mediano obtido por esse método DCM convencional foi de 160 metros, ou seja, 40% superior ao erro mediano atingido pela ANN. A relação entre estes resultados é inversa à verificada na Seção 4.6.3, onde a ANN teve um desempenho muito pior que os demais métodos DCM.

A diferença entre estes resultados relativos pode ser explicada através da investigação do processo de treinamento da ANN nos dois casos. Na Seção 4.2.4, a ANN é treinada com as assinaturas de referência armazenadas no CDB. Estas assinaturas, além de não estarem restritas aos pontos da rota de teste, apresentam desvios em relação aos valores reais de RSS devido às imperfeições intrínsecas à modelagem empírica de propagação. Em [68], uma parte das assinaturas de RF medidas na rota de teste é selecionada para o treinamento da ANN. A utilização de **i)** padrões de treinamento e teste obtidos ao longo da mesma trajetória, e **ii)** padrões de treinamento medidos, explica o melhor desempenho relativo da ANN em [68].

O mesmo processo polarizado de treinamento utilizado em [68] foi adotado em [63], onde um método DCM utilizando ANN em redes WiFi *outdoor* obteve um erro RMS (*Root Mean Squared*) de apenas 7 metros. Este resultado, contudo, só foi possível devido ao processo polarizado de treinamento, e não se sustentaria no caso geral, condição na qual foi testado o método *DcmAnn* na Seção 4.6.3.

Em [81], um procedimento não-polarizado de treinamento foi adotado em uma rede GSM. Um total de 14625 assinaturas de RF foi coletado em posições aleatórias em uma área urbana densa com $2 \times 1,4 \text{ km}^2$ em Auckland, na Nova Zelândia. As assinaturas coletadas foram randomicamente divididas em três grupos: treinamento, validação e teste. Um erro de localização médio igual a 150 metros foi obtido no conjunto de teste. O método *DcmFull* obteve em uma rede GSM em área urbana um erro médio de 111 metros. Com a utilização de um CDB calibrado, o erro médio cai para 97 metros.

A comparação dos resultados obtidos com treinamento polarizado, como em [68] e [63], com os resultados alcançados com treinamento não-polarizado, como em [81] e na

Seção 4.6.3, sugerem que métodos DCM utilizando ANNs para aproximar a função que mapeia as assinaturas alvo em coordenadas geográficas, são capazes de produzir bons resultados apenas quando os padrões de treinamento e teste são muito semelhantes.

4.9.3 Métodos DCM utilizando CDBs baseados em Medidas

Em [41], foi utilizado um método DCM com KNN para localização em redes GSM em uma área urbana densa na cidade de Seattle, nos EUA, com $2,7 \times 2,3 \text{ km}^2$ e uma densidade superficial de setores igual a 66 células/ km^2 . As assinaturas de RF continham a identidade e RSS medido de até 7 setores. Dois conjuntos de rotas de coleta foram realizados: o primeiro para construção do CDB, e o segundo para testar o algoritmo. Havia redes GSM de diversas operadoras na área de teste. Em uma das redes testadas, o método utilizado atingiu erros de 94 metros e 291 metros para os percentis 50% e 90%, respectivamente. O método *DcmFull*, utilizando um CDB construído a partir de modelagem de propagação, obteve em uma rede GSM em área urbana densa com 23.5 células/ km^2 , erros de 78 metros e 184 metros para esses mesmos percentis, após a calibração do CDB.

Em [41], ao serem utilizadas medidas de múltiplas redes simultaneamente para a localização, o desempenho foi seriamente comprometido, com elevação do erro mediano de 94 metros para 153 metros. Isso ocorreu porque uma das operadoras ativou novas células em sua rede durante o intervalo entre a realização das rotas de treinamento - utilizadas para a construção do CDB - e a realização das rotas de teste. Ou seja, em relação aos parâmetros da RAN dessa operadora, o CDB estava desatualizado, resultando em séria degradação da precisão de localização.

Em [51], foi utilizado um método DCM em uma rede GSM em área urbana densa na cidade de Damasco, na Síria. O CDB foi construído a partir de medidas. Para melhorar a precisão, foi empregada a técnica denominada *map matching* [72]: utilizaram-se os vetores representando o arruamento para corrigir as estimativas de posição, que, como o teste foi veicular, deveriam estar sobre a malha viária. A acurácia mediana obtida foi de 150 metros. Assim como em [41], a ocorrência de modificações na RAN no período entre a realização das rotas de treinamento e teste resultou em degradação da precisão, com elevação do erro mediano para 250 metros.

Em [72], a localização pelo método DCM foi feita utilizando simultaneamente assinaturas de RF coletadas em uma rede GSM e em uma rede WCDMA na área de teste.

O CDB foi construído com medidas de campo. Para melhorar a precisão, foi utilizada, assim como em [51], a técnica de *map-matching*, além de um filtro de Kalman [82]. Na fase de teste, foi obtida uma acurácia mediana de 40 metros e erro ponderado $e_w = 59$ metros. Embora tenha sido atingida uma elevada precisão, deve-se ressaltar que, ao contrário de [41], onde as rotas de treinamento cobriam uma área muito mais extensa que as rotas de teste, em [72] as rotas de treinamento e teste seguem exatamente o mesmo traçado. Isso pode configurar uma condição de treinamento polarizado, como aquelas observadas em [68] e [63].

4.9.4 Métodos DCM utilizando CDBs baseados em Modelagem de Propagação

Em [53], foi utilizado um método DCM para localização em redes GSM em uma área urbana densa com 2×3 km² em Stuttgart, na Alemanha. Dois CDBs foram utilizados: o primeiro, construído utilizando o modelo empírico COST 231 Walfisch-Ikegami [83], e o segundo, utilizando um modelo determinístico de traçado tridimensional de trajetória de raios. No primeiro CDB, as perdas adicionais por difração em múltiplos obstáculos foram calculadas utilizando o modelo de Epstein-Perterson [27]. A resolução planar de ambos os CDBs era de 5 metros. O DEM utilizado na construção dos CDBs continha, além da altura do relevo, as alturas das edificações na área de teste. Com o primeiro CDB (COST 231), foram obtidos erros de 65 metros e 150 metros, para os percentis 67% e 95%, respectivamente. Com o segundo CDB (modelo 3D), foram obtidos erros de 65 metros e 250 metros para esses mesmos percentis. O teste foi realizado a pé, logo é esperado que a precisão obtida seja melhor que no caso de testes veiculares. Em condições veiculares em uma rede GSM em área urbana (Região 1), o método *DcmFull* obteve erros de 104 metros e 233 metros para esses mesmos percentis.

Em [47], foi utilizado um método DCM para localização em redes GSM em uma área urbana densa com 10 km² em Stuttgart, na Alemanha. O CDB foi construído utilizando o modelo COST 231 Walfisch-Ikegami. A resolução planar do CDB era de 10 metros, e foi utilizado um DEM que representava as alturas dos prédios, além do relevo na área de teste. A rota de teste foi realizada a pé, e foram coletadas 365 assinaturas de RF. O erro médio obtido foi de 75 metros, e o erro para o percentil 67% foi igual a 83 metros.

Os resultados obtidos em [47], [53], [32] e [48] sugerem que métodos DCM utili-

zando CDBs construídos a partir de modelagem de propagação podem atingir, tanto em condições veiculares ou pedestres, uma precisão comparável a dos métodos DCM utilizando CDBs construídos a partir de medidas de campo. A utilização de modelagem de propagação, contudo, apresenta uma importante vantagem, que é a de possibilitar uma atualização rápida e automática do CDB, prevenindo degradação da precisão, como as reportadas em [41] e [51].

5 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE MÉTODOS DCM EM REDES WIFI

Neste capítulo os métodos DCM apresentados no Capítulo 2 são avaliados em redes WiFi 802.11b/g. Para tal, são utilizadas as assinaturas de RF obtidas durante a campanha de coleta descrita na Seção 5.1.

5.1 Campanha de Coleta de Assinaturas de RF

A campanha de coleta de assinaturas de RF em redes WiFi foi realizada no quarto andar do Pavilhão Reitor João Lyra Filho no *campus* da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) [84].

O *software* utilizado para coletar as assinaturas foi o *NetStumbler* versão 0.4. O *NetStumbler* foi executado em um *laptop* Toshiba A75-S211 com adaptador WiFi 802.11b/g interno modelo AR5005GS da *Atheros*, e em um *laptop* Sony PGC-Z505R com adaptador externo WiFi 802.11b/g da TP-Link, com interface PCMCIA.

O *NetStumbler* instrui a placa WiFi a buscar redes 802.11 de forma passiva, ou seja, sem o envio de *probe requests*. Para tal, o adaptador WiFi permanece durante um período em cada canal, aguardando o recebimento do *beacon*. O *beacon*, enviado por cada ponto de acesso (AP - *Access Point*), contém o identificador da rede (SSID - *Service Set ID*) e o endereço físico (MAC - *Medium Access Control*) do AP [50]. Para cada AP detectado, o *NetStumbler* registra o MAC, o SSID, a portadora, o RSS, o nível de ruído do canal e a relação sinal-ruído, conforme ilustrado pela Figura 37. Cada assinatura de RF medida é composta pelo MAC e RSS de até 20 APs.

Os *laptops* foram colocados sobre uma mesa móvel, e em cada um dos 275 pontos de medição cada adaptador WiFi coletou 240 assinaturas de RF, a uma taxa de 2 assinaturas por segundo. Cada ponto de medição é identificado por uma única assinatura de RF por adaptador WiFi, calculada da seguinte forma: **i)** os APs que aparecem em menos da metade das assinaturas de RF coletadas no ponto são excluídas; **ii)** para os APs restantes, calcula-se o RSS médio por AP.

Os pontos de medição foram distribuídos no andar com espaçamento uniforme de três metros, com a disposição mostrada na Figura 41. Devido à indisponibilidade do GPS em ambiente *indoor*, as coordenadas dos pontos foram registradas manualmente,

utilizando como referência as marcações existentes no piso, conforme ilustrado na Figura 38 [84].

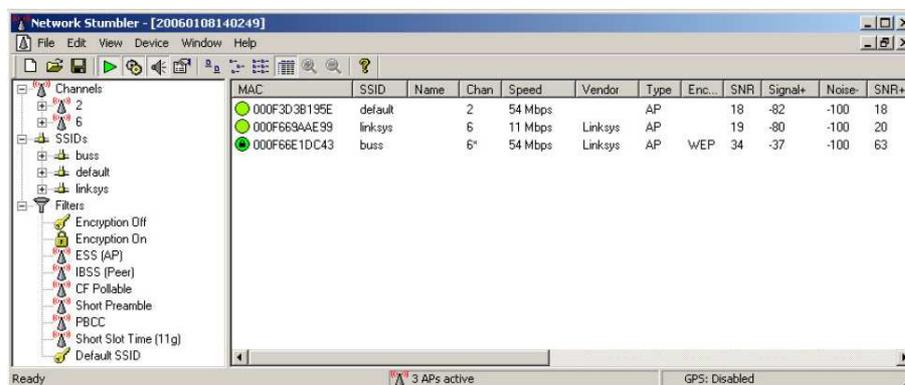


Figura 37 - Tela do *NetStumbler*.

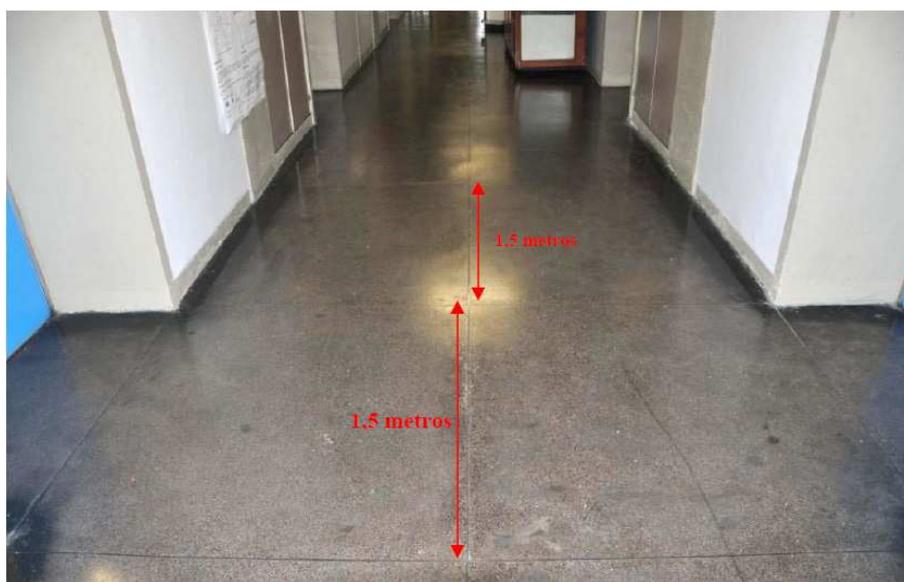


Figura 38 - Espaçamento entre os Pontos de Coleta WiFi.

5.2 Configuração dos Métodos Avaliados

5.2.1 Métodos DCM

A configuração geral dos métodos DCM avaliados é apresentada na Tabela 11. Devido ao reduzido tamanho do CDB - apenas 275 elementos - não foi utilizada nenhuma técnica de redução do espaço de correlação, salvo no método *DcmSub*, onde o terceiro

passo da filtragem determinística foi utilizado para avaliar seu impacto na precisão de localização.

O CDB é construído a partir de medidas, conforme descrito na Seção 5.1. O conjunto de teste foi obtido a partir de registros feitos pelo *NetStumbler* ao longo sequências de 10 segundos, aleatoriamente selecionadas em cada ponto de medição. A média por AP, ao longo deste intervalo, é inserida na assinatura de RF alvo. Haverá então 275 assinaturas alvo, uma por ponto de medição. O intervalo de apenas 10 segundos por ponto foi escolhido para que o teste simulasse a condição de um usuário andando pelo andar.

Como o CDB é construído a partir de medidas, o valor de N ótimo para o método *DcmSub* é igual a 7, conforme descrito na Seção 4.2.3. Pela mesma razão, o valor de K ótimo é igual a 1 para os métodos *DcmSub*, *DcmSad* e *DcmSpear*, conforme descrito na Seção 4.2.2.

A inacurácia máxima da medida de RSS feita pelos MS em redes WiFi é de ± 5 dB [50]. Assumindo o caso mais geral, em que o CDB é construído a partir de medidas coletadas com uma placa WiFi de um determinado modelo, e o método de localização é testado com uma placa de outro modelo, a seguinte condição pode ser observada: em um dado ponto, onde o RSS de um AP₀ é igual a RSS₀ dBm, a primeira placa pode informar um valor de RSS igual a (RSS₀ - 5) dBm, enquanto a segunda placa pode informar um valor de RSS igual a (RSS₀ + 5) dBm. A diferença entre os valores de RSS informados pelas duas placas é igual a 10 dB, embora ambas tenham recebido a mesma potência do AP₀. Na correlação entre a assinatura alvo e as assinaturas de referência armazenadas no CDB, diferenças de RSS (para um mesmo AP) inferiores a este valor devem ser tratadas como nulas. Para isso, o parâmetro δ deve ser igual a 10 dB .

Tabela 11 - Métodos DCM Avaliados no Teste WiFi *Indoor*.

Método DCM	Técnica de Redução do Espaço de Correlação	Técnica de Correlação de Assinaturas de RF	Parâmetro δ (dB)
<i>DcmSub</i>	Terceiro Passo da Filtragem Determinística	Distância Euclidiana no Espaço N-Dimensional de RSS	10
<i>DcmSad</i>	-	SAD com Termo de Penalidade	10
<i>DcmSpear</i>	-	Distância de Spearman	-
<i>DcmAnn</i>	-	ANN	-

5.2.2 Topologia e Treinamento da ANN

A topologia utilizada pela ANN é idêntica à utilizada em [63]. A ANN tem duas entradas por AP: o indicador booleano da presença do AP e o valor de RSS medido. Como foram detectados 62 APs durante a campanha de coleta de assinaturas de RF, a ANN tem 124 entradas. A ANN tem quinze neurônios na camada escondida e dois neurônios na camada de saída, um para fornecer a coordenada x e outro para fornecer a coordenada y na planta do andar. A função de transferência dos neurônios da camada de saída é linear, enquanto a função de transferência dos neurônios da camada escondida é a tangente hiperbólica sigmóide, cuja imagem é dada pelo intervalo $(-1, 1)$. Em razão disso, os valores de entrada e saída da rede estão normalizados neste intervalo.

As assinaturas de referência armazenadas no CDB são aleatoriamente divididas em dois grupos: 95% são selecionadas para o conjunto de treinamento e 5% para o conjunto de validação. Em cada ciclo ou época do treinamento, as assinaturas no conjunto de treinamento são apresentadas duas vezes à rede para reforçar seu aprendizado, feito através do algoritmo de *Levenberg-Marquardt*. Durante o treinamento, os pesos sinápticos e os *biases* das funções de ativação dos neurônios são ajustados de modo a minimizar o MSE entre as saídas alvo - i.e., as coordenadas (x, y) das assinaturas de referência no conjunto de treinamento - e as saídas fornecidas pela ANN. Trata-se, portanto, de um treinamento supervisionado.

A Figura 39 mostra o desempenho do treinamento da ANN, onde o valor de MSE mais baixo no conjunto de validação foi de 0.0005, atingido na época 23. Os pesos sinápticos e *biases* finais são aqueles obtidos na época em que o conjunto de validação obteve o menor MSE.

5.3 Avaliação do Erro de Localização em Condições *Single-Device*

A condição *single-device* é aquela na qual a mesma placa WiFi é utilizada nas fases de treinamento - i.e., na construção do CDB - e de teste. A precisão experimental dos métodos DCM listados na Tabela 11 é mostrada na Figura 40. O treinamento e o teste foram feitos utilizando o adaptador WiFi da *Atheros*, conforme descrito na Seção 5.1.

O método *DcmSpear* obteve a melhor precisão, atingindo erros de 3 e 5 metros para os percentis 50% e 80%, respectivamente. O erro mediano é aproximadamente igual

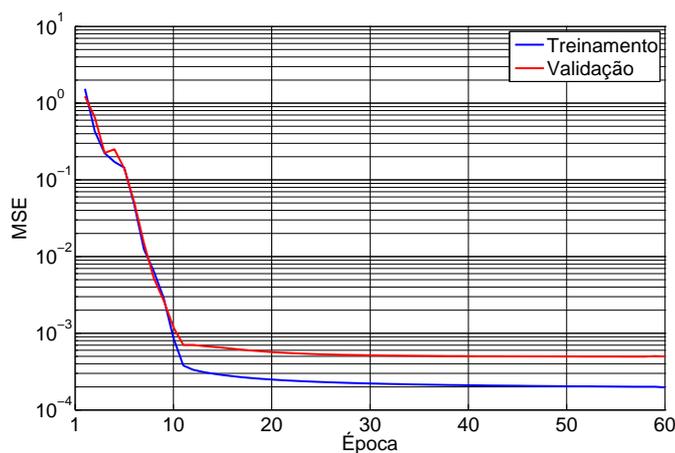


Figura 39 - Treinamento da ANN para Localização WiFi *Indoor*.

ao espaçamento entre os pontos de medição.

O método *DcmSub* apresentou precisão semelhante ao do método *DcmSad* para percentis inferiores a 67%. Para percentis acima deste valor, o método *DcmSad* teve uma precisão superior: para o percentil 80%, por exemplo, a acurácia do método *DcmSad* foi de 13 metros, enquanto a do método *DcmSub* foi de 17 metros.

O método *DcmSpear* atingiu uma precisão bastante superior aos demais métodos DCM. Contudo, nos testes em redes GSM, não ocorre o mesmo comportamento: observando a Tabela 10, verifica-se que o método *DcmSpear* tem uma CDF bastante próxima dos demais métodos DCM na Região 1 (área urbana) e uma precisão pior que os demais na Região 2 (área suburbana). O melhor desempenho relativo do método utilizando distância de Spearman em redes WiFi deve-se, provavelmente, à maior dimensão (quantidade de células âncora) das assinaturas de RF em tais redes: as assinaturas de RF coletadas pelo *NetStumbler* podem conter até 20 APs, enquanto em redes GSM uma assinatura de RF pode conter no máximo os valores de RSS de 7 células. A maior dimensão das assinaturas de RF em redes WiFi permite atingir maior precisão quando um coeficiente de correlação de ordem é empregado, pois uma posição tem maior probabilidade de ser unicamente identificada por uma sequência de identidades de células - ordenadas pelo valor de RSS - mais longa. Sequências mais curtas - como nas assinaturas de RF GSM - têm maior probabilidade de repetirem-se em várias posições ou *pixels* (caso utilize-se um CDB com estrutura de grade uniforme). Esta hipótese é reforçada pelos resultados obtidos nos testes em redes GSM: o método utilizando distância de Spearman obteve o melhor desempenho

na área urbana, onde, devido a maior densidade superficial de setores, o número médio de células por assinatura de RF é maior que na área suburbana.

O método utilizando ANN obteve a pior precisão, assim como nos testes em redes GSM. Embora no teste WiFi tenha sido utilizado um CDB construído a partir de medidas, a técnica utilizada para criar o conjunto de teste a partir do CDB, descrita na Seção 5.2.2, tornou os conjuntos de treinamento e teste bastante diferentes. Isto impediu que a ANN aproximasse satisfatoriamente a função que mapeia as assinaturas de RF alvo em posições no andar onde foi realizado o teste.

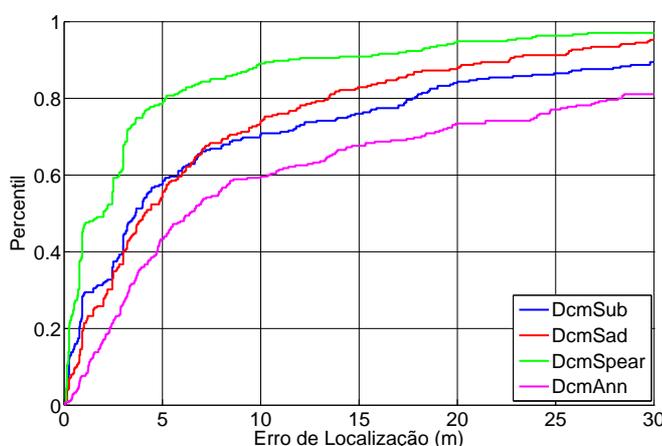


Figura 40 - Precisão de Localização *Indoor* de Diversos Métodos.

A Figura 41 mostra os pontos de medição e as estimativas de posição fornecidas pelos métodos *DcmSpear* e *DcmAnn*. Como $K = 1$, as estimativas produzidas pelo método *DcmSpear* sempre irão coincidir com algum ponto de medição.

5.4 Avaliação do Erro de Localização em Condições *Cross-Device*

A condição de operação *cross-device* é aquela na qual o CDB é construído com um adaptador WiFi e o método DCM é testado com outro adaptador [41]. Para verificar a precisão dos métodos listados na Tabela 11 nesta condição, foi utilizado o CDB construído a partir das medidas feitas com o adaptador WiFi *Atheros* e o conjunto de teste construído a partir das medidas realizadas pela placa da TP-Link. Conforme descrito na Seção 5.1, o adaptador *Atheros* é interno ao *laptop*, enquanto a placa da TP-Link é externa, com interface PCMCIA. A precisão experimental obtida é mostrada na Figura 42.

A precisão de localização é bastante degradada em relação à condição *single-device*.

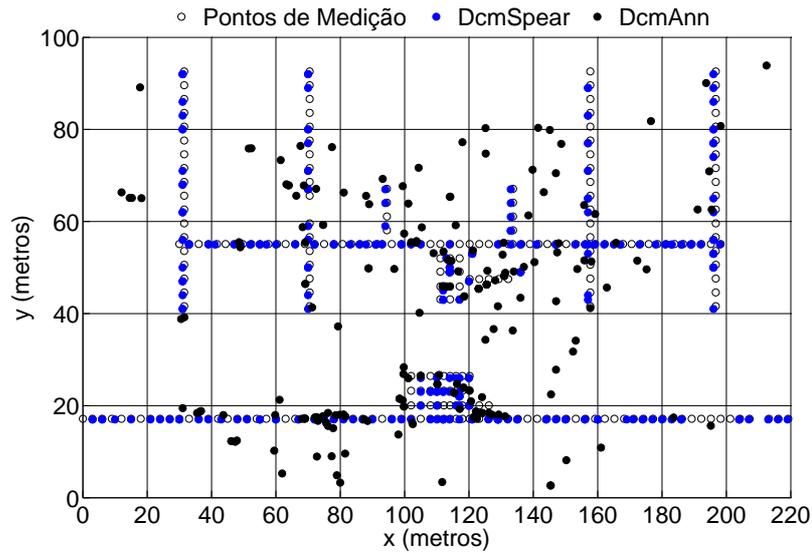


Figura 41 - Estimativas de Posição no Teste *Indoor*

Os métodos *DcmSad* e *DcmSpear* têm desempenhos semelhantes, com erro mediano igual a 17 metros. O método *DcmSub*, que utiliza o terceiro passo da filtragem determinística tem o melhor desempenho, com uma acurácia mediana igual a 11 metros.

O método utilizando a distância de Spearman já é intrinsecamente preparado para lidar com condições *cross-device*, conforme mostra o Exemplo 2 na Seção 2.4.3. Para os métodos *DcmSub* e *DcmSad*, a utilização do parâmetro δ melhora o desempenho em condições *cross-device*, conforme mostra a Figura 43. No método *DcmSub*, a utilização do parâmetro δ reduz o erro mediano de 18 para 11 metros. No método *DcmSad*, a utilização do parâmetro δ reduz o erro mediano de 22 para 16 metros.

O método *DcmAnn* destaca-se dos demais como o pior método, com uma acurácia mediana de 35 metros em condições *cross-device*, onde a ANN é treinada com o CDB construído por uma placa e testada com outra.

5.5 Comparação com Resultados Publicados na Literatura

Em [66], foi utilizado um método DCM para estimar a localização *indoor* em redes WiFi, em um andar com $22 \times 43 \text{ m}^2$. O CDB foi construído a partir de medidas realizadas em 70 pontos. Em cada ponto de medição, foram coletadas pelo menos 20 assinaturas de RF. A assinatura de referência de cada ponto de medição foi obtida pelo média dos valores de RSS por AP. A correlação entre as assinaturas alvo e de referência foi calculada através

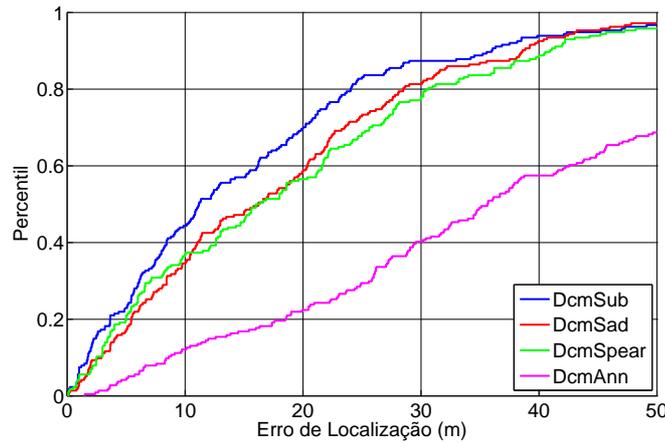


Figura 42 - Precisão de Localização *Indoor* em Condições *Cross-Device*.

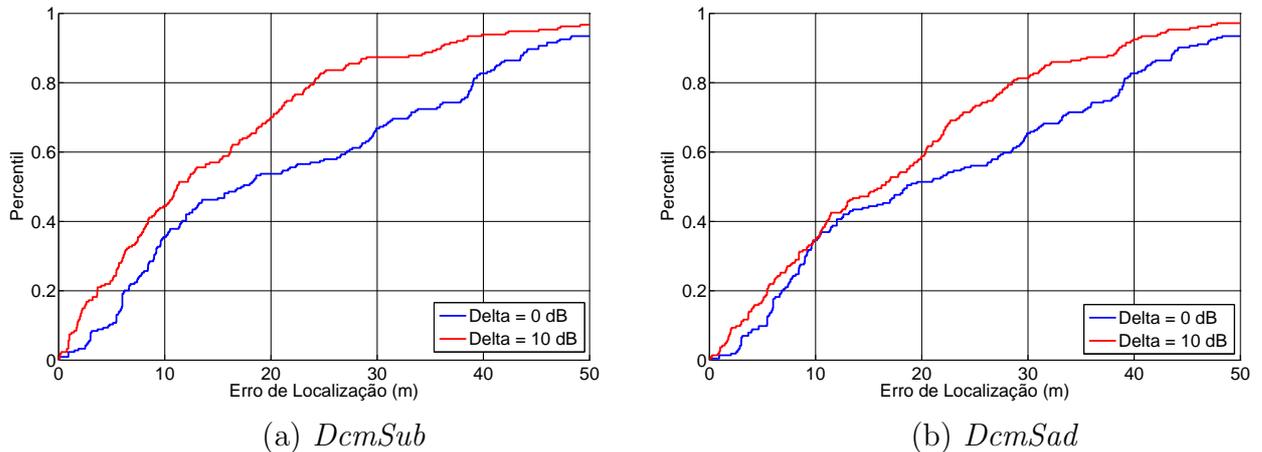


Figura 43 - Efeito do Parâmetro δ na Precisão em Condições *Cross-Device*.

da distância euclidiana no espaço tridimensional de RSS, uma vez que foram utilizados apenas três APs durante o teste. O método foi então empregado para localizar cada um dos pontos de medição, da seguinte maneira: para a localização do i -ésimo ponto, a i -ésima assinatura de referência é excluída do CDB e então o método DCM é aplicado. O processo é repetido para $i = 1, 2, 3, \dots, 70$. Uma acurácia mediana de 2,94 metros foi reportada, ou seja, um resultado próximo ao obtido pelo método *DcmSpear* na Seção 5.3.

Em [85], foi feita uma análise para quantificar o efeito de mudanças dinâmicas no ambiente de propagação *indoor* - presença de pessoas, portas abertas ou fechadas, umidade relativa do ar - sobre a acurácia de sistemas de localização em redes WiFi. Foi proposto um método assistido por sensores para a adaptação do sistema de localização às condições do ambiente *indoor*, selecionando o CDB mais adequado à situação corrente.

Uma acurácia mediana de 2,6 metros foi reportada.

Em [86], foi utilizado um método DCM para estimar a localização *indoor* em redes WiFi. A correlação foi feita utilizando a distância euclidiana no espaço de RSS. O CDB foi construído a partir de medidas em 31 pontos no Centro de Comunicações sem Fio da Universidade de Oulu, na Finlândia. Os pontos de medição estavam dispostos ao longo do corredor principal, com uma separação de 2 metros entre pontos adjacentes. Os valores de RSS de quatro APs foram utilizados para compor as assinaturas de RF. O erro foi inferior a 3 metros para cerca de 80% das estimativas de posição. O método *DcmSpear*, com uma separação de 3 metros entre os pontos de medida na campanha de coleta descrita na Seção 5.1, obteve um erro de 5 metros para esse mesmo percentil.

6 ANÁLISE COMPARATIVA DOS MÉTODOS DCMFULL E CID+ RTT

Métodos de multi-lateração circular utilizando RTT são largamente estudados na literatura [16] [37] [35] [87]. Tais métodos, também conhecidos como CID+RTT ou TOA, produzem a estimativa de posição do MS a partir da intersecção de LOPs circulares centradas nas células âncora, conforme descrito na Seção 1.2.2. Os raios das LOPs circulares são calculados a partir dos valores medidos de RTT, de acordo com a equação (2).

O método CID+RTT presume condições de propagação LOS entre o MS e os setores âncora. Assim, a propagação em condições NLOS, predominante em ambientes urbanos, é o principal fator de degradação da sua precisão [36]. Em condições LOS, exatamente três LOPs circulares - e portanto três setores âncora - são suficientes para estimar a posição do MS. Em condições NLOS, essas LOPs não interceptam-se em um único ponto, e mais de três setores âncora podem ser necessários para melhorar a estimativa de posição do MS [37].

Neste capítulo a precisão do método CID+RTT é avaliada em uma análise semi-empírica em uma rede WCDMA 850 MHz FDD (*Frequency Division Duplex*) na Região 1. O método CID+RTT é testado em condições simuladas LOS e NLOS. Para tal, é utilizada uma modelagem estatística para o atraso adicional de propagação em condições NLOS [48]. A precisão obtida é então comparada com aquela fornecida pelo método *DcmFull*, definido na Seção 4.2.

Esta avaliação semi-empírica foi realizada em uma rede WCDMA pois a baixa resolução temporal do TA em redes GSM limita a precisão do método CID+RTT. Além disso, o MS em modo ativo em uma rede GSM tem apenas um valor de TA, por isso o MS deve realizar um *handover* forçado entre as células, de modo a dispor de pelo menos três valores de TA. Isto provoca uma breve interrupção da comunicação do usuário, já que o *soft-handover* não é suportado em redes GSM.

Outra razão para a escolha de uma rede WCDMA para o teste do método CID+RTT é que em tais redes, a alta resolução temporal traduz-se em elevada resolução espacial: durante o período de um símbolo WCDMA, um sinal eletromagnético percorre 78 metros, enquanto durante o período de um símbolo GSM a distância percorrida seria de 554 metros. Isto permite alcançar maior precisão do que em redes GSM. Além disso, devido ao suporte a *soft-handover*, há múltiplos valores de RTT disponíveis para um MS em modo

ativo: um valor para cada célula na lista de células ativas (*active set*).

6.1 Avaliação Semi-Empírica em Rede WCDMA 850 MHz

Para avaliar a precisão dos métodos *DcmFull* e CID+RTT em um sistema celular de terceira geração, uma simulação foi realizada em uma rede WCDMA 850 MHz na Região 1. Assume-se que a rede WCDMA utiliza as mesmas antenas da rede GSM 850 MHz, na qual foi realizada a Rota 1, descrita na Seção 4.1. Assim, as assinaturas alvo coletadas na Rota 1 e as assinaturas de referência armazenadas no CDB utilizado nos testes do Capítulo 4 na Região 1 podem ser usadas na análise WCDMA, após a substituição dos valores de RTT medidos na rede GSM por valores de RTT simulados para a rede WCDMA. Para tal, os valores da terceira coluna da assinatura de referência $\mathbf{S}'_{i,j}$ do *pixel* (i, j) , definida pela equação (25), devem ser substituídos por valores de RTT calculados pela equação:

$$\text{RTT}_{i,j,k} = \left\lceil \frac{2d_{i,j,k}}{cT_s/\rho} \right\rceil \quad (66)$$

para $1 \leq k \leq N_{i,j}$, onde $N_{i,j}$ é o número de células cujos valores preditos de RSS estão acima de um limiar na posição do *pixel* (i, j) ; c é a velocidade da luz no espaço livre em metros por segundo; T_s é o período de símbolo na rede WCDMA em segundos e $d_{i,j,k}$ é a distância em metros entre a antena da k -ésima célula e o *pixel* (i, j) . O parâmetro ρ é o fator de *oversampling*. Fatores de *oversampling* até 16 são suportados [35], permitindo uma resolução temporal igual a 1/16 do período de símbolo. Porém, fatores de *oversampling* superiores a quatro são atípicos em cenários reais [88]. A equação (66), que deve ser aplicada a todos os *pixels* do CDB utilizado na Região 1, assume condições LOS entre a antena do k -ésimo setor e o *pixel* (i, j) .

Seja a assinatura alvo \mathbf{F}_n do n -ésimo ponto da Rota 1, definida pela equação (19). Os valores da terceira coluna de todas as assinaturas alvo coletadas na Rota 1 devem ser substituídos por valores de RTT calculados pela equação:

$$\text{RTT}_{n,k} = \left\lceil \frac{2\tau_{0,n,k} + \tau_{md_{n,k}} + \tau_{mu_{n,k}}}{T_s/\rho} \right\rceil \quad (67)$$

para $1 \leq k \leq N_a$, onde N_a é o número de setores âncora medidos no n -ésimo ponto da rota; $\tau_{0,n,k}$ é o atraso de propagação entre o k -ésimo setor de referência e o n -ésimo ponto da rota em condições LOS; $\tau_{md_{n,k}}$ e $\tau_{mu_{n,k}}$ são os atrasos adicionais médios devido

à propagação NLOS nos enlaces direto e reverso, respectivamente.

Devido à separação de 45 MHz entre as frequências do enlace direto e reverso em redes WCDMA FDD [89], pode-se assumir que os percursos no enlace direto e no enlace reverso são independentes. Assim, os atrasos adicionais médios $\tau_{md_{n,k}}$ e $\tau_{mu_{n,k}}$ devem ser tratados como variáveis aleatórias independentes [48]. Os parâmetros $\tau_{md_{n,k}}$ e $\tau_{mu_{n,k}}$ são sempre não negativos, uma vez que a propagação NLOS introduz uma polarização positiva na estimativa de RTT. Tanto no enlace direto quanto no reverso, o atraso adicional médio tem uma distribuição lognormal para uma determinada distância entre o MS e o setor âncora, dada por [90]:

$$\tau_{m_{n,k}} = \alpha T_0 D^\epsilon X \quad (68)$$

onde α é a constante de proporcionalidade entre os valores médio ($\tau_{m_{n,k}}$) e RMS ($\tau_{rms_{n,k}}$) do atraso adicional, ϵ é uma constante que depende do ambiente de propagação, T_0 é o valor mediano de $\tau_{rms_{n,k}}$ para $D = 1$ km e D é a distância em quilômetros entre o k -ésimo setor âncora e o n -ésimo ponto da rota. A variável aleatória X tem distribuição lognormal na distância D , tal que $\ln(X)$ tem distribuição normal com média nula e desvio padrão σ . Os parâmetros T_0 , α , ϵ e σ variam em função do ambiente de propagação. Valores típicos para estes parâmetros em ambientes macro-celulares urbanos [91] [90] são mostrados na Tabela 12, assim como os valores utilizados na simulação na Região 1.

Tabela 12 - Valores Empíricos de Parâmetros NLOS

Parâmetro	Típico Urbano	Região 1
T_0 (μs)	[0.41,0.94]	0.77
α	[0.66,1]	0.66
ϵ	0.5	0.5
σ (dB)	[1.9,3.6]	2.6

Substituindo os valores de $\tau_{md_{n,k}}$ e $\tau_{mu_{n,k}}$ por aqueles dados pela equação (68), a equação (67) pode ser reescrita como:

$$\text{RTT}_{n,k} = \left\lceil \frac{2\tau_{0_{n,k}} + \alpha T_0 D^\epsilon (X_d + X_u)}{T_s / \rho} \right\rceil \quad (69)$$

onde X_d e X_u são variáveis aleatórias com distribuição lognormal na distância D .

Para obter resultados mais confiáveis na análise em condições NLOS, uma simulação Monte Carlo [92] foi executada. A cada ciclo da simulação, valores de uma distribuição lognormal foram aleatoriamente selecionados para X_d e X_u , e o valor de

$\text{RTT}_{n,k}$ foi calculado pela equação (69). Assume-se um *active set* com no máximo 6 células, logo cada assinatura alvo terá no máximo 6 valores de RTT. O erro de localização final do método CID+RTT para a n -ésima assinatura alvo é dado pela média aritmética dos erros de localização obtidos para esta assinatura ao longo de todos os ciclos da simulação Monte Carlo. Este processo é repetido para todas as assinaturas alvo coletadas na rota de teste. Para cada assinatura alvo, foram utilizados 50 ciclos na simulação Monte Carlo. Este valor provou ser suficiente para prover convergência do algoritmo, uma vez que dois conjuntos independentes de 50 ciclos fornecem aproximadamente o mesmo erro de localização médio para qualquer assinatura alvo [48].

6.2 Resultados da Simulação

A precisão obtida com o método CID+RTT em condições LOS - ou seja, assumindo $\tau_{md_{n,k}} = \tau_{mu_{n,k}} = 0$ na equação (67) - é mostrada na Figura 44 para três valores do fator de *oversampling*. Para $\rho = 16$, a acurácia mediana é aproximadamente igual a 5 metros, que é igual à distância percorrida pela onda eletromagnética em 1/16 do período de símbolo. Porém, em redes WCDMA reais, tipicamente $\rho = 1$. Nestas condições, o erro mediano é de 20 metros. Este resultado está de acordo com a acurácia mediana reportada em [87] e [35]. Não foi utilizada filtragem de média móvel.

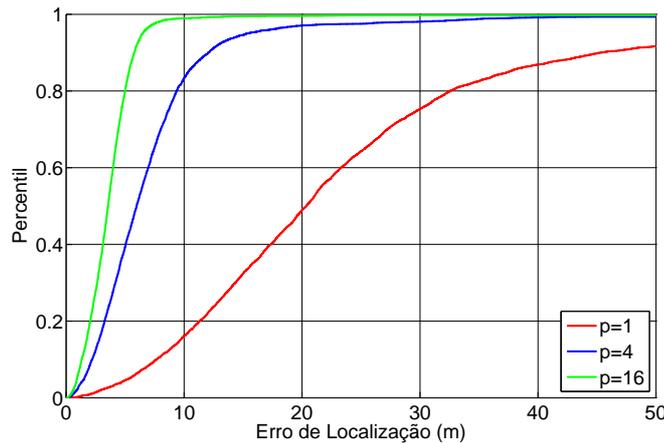


Figura 44 - Precisão do Método CID+RTT em Condições LOS.

A precisão mostrada na Figura 44 só é alcançável em cenários simulados ideais, como os utilizados em [87] e [35], onde assume-se condições de propagação LOS. Os resultados obtidos em um cenário onde o atraso adicional de propagação é modelado

segundo o método descrito na Seção 6.1, são mostrados na Figura 45. Em ambos os métodos de localização foi utilizado um filtro de média móvel com $L = 20$.

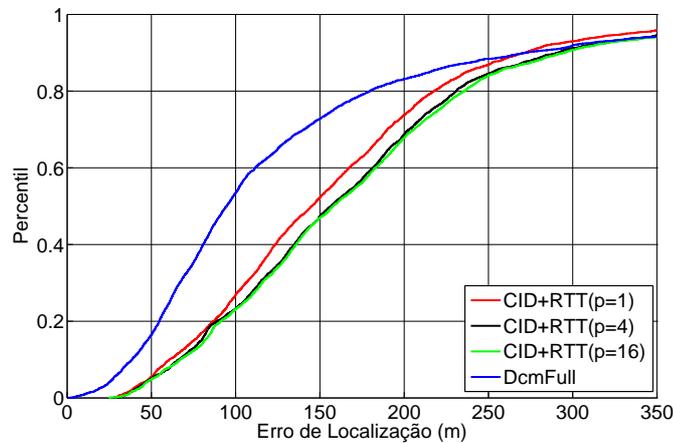


Figura 45 - Precisão dos Métodos *DcmFull* e CID+RTT em Condições NLOS.

Em condições NLOS, a utilização de valores mais elevados de ρ não melhora a precisão de localização, produzindo, ao contrário, uma ligeira piora em relação a $\rho = 1$. Observa-se severa degradação da precisão em relação à situação LOS. Para $\rho = 1$, o método CID+RTT atinge uma acurácia mediana de 150 metros. O método *DcmFull*, utilizando um CDB calibrado, obtém uma acurácia mediana de 78 metros. A precisão do método CID+RTT pode ser melhorada neste cenário com a utilização de técnicas para mitigação do erro NLOS, como as propostas em [93] e [94].

Em áreas suburbanas e rurais, onde as condições NLOS são menos severas que em áreas urbanas densas, espera-se que o método CID+RTT, quando utilizado em redes banda larga, como a WCDMA, obtenha uma precisão satisfatória, compatível com ou até mesmo superior àquela atingida pelo método *DcmFull*. O problema é que, em áreas suburbanas e, sobretudo em áreas rurais, a baixa densidade de setores aumenta a probabilidade do MS não detectar pelo menos três setores de referência, que é o mínimo necessário para que o método CID+RTT possa produzir uma estimativa de posição. Ou seja, exatamente nas áreas onde o método CID+RTT tem potencial para atingir uma precisão mais elevada, ele tem menor disponibilidade.

CONCLUSÃO

Nesta dissertação tratou-se de aspectos relativos a métodos de localização baseados na rede. Tais métodos são capazes de estimar a posição de terminais móveis legados, isto é, sem qualquer *software* ou *hardware* específico para posicionamento. Especial atenção foi dada para a formulação teórica e a avaliação experimental de métodos de correlação de assinaturas de RF, que são uma classe de métodos baseados na rede. Recapitulando:

- No Capítulo 1, apresentou-se uma classificação dos métodos de localização existentes, com foco particular, porém não exclusivo, em métodos aplicados em redes de telefonia móvel celular;
- No Capítulo 2, a teoria dos métodos DCM foi apresentada em detalhe. Foram propostas duas alternativas para a aceleração do processo de estimação da posição do MS, através da utilização de GA e do método de filtragem determinística. Para a avaliação da similaridade entre as assinaturas de referência e alvo, foi proposta uma modificação das funções de correlação tipicamente utilizadas em métodos DCM. Essa modificação consistiu na inserção de um fator correspondente à inacurácia da medição de RSS feita pelo MS. Foi sugerida também a utilização da distância de Spearman, que é uma métrica obtida a partir de um coeficiente de correlação de ordem;
- No Capítulo 3 foram apresentados critérios de avaliação de desempenho de métodos de localização, com destaque para uma métrica, denominada simplesmente de erro ponderado, que é definida considerando os requisitos de precisão exigidos pelo FCC para o serviço E911, destinado à localização de chamadas para números de emergência originadas de telefones móveis celulares;
- No Capítulo 4, as propostas apresentadas no Capítulo 2 foram avaliadas experimentalmente em redes GSM 850 MHz em áreas urbanas e suburbanas. Diferentes configurações de métodos DCM foram testadas e comparadas com outros métodos propostos na literatura. Foi verificado também o efeito da calibração de CDBs construídos a partir de modelagem de propagação sobre a precisão de métodos DCM;
- No Capítulo 5, as propostas apresentadas no Capítulo 2 foram avaliadas experimentalmente em redes WiFi 802.11b/g em ambiente *indoor*. Os testes foram realizados

em condições *single-device* e *cross-device*. Os resultados obtidos foram comparados com outros métodos propostos na literatura;

- No Capítulo 6, o método *DcmFull* foi testado em uma rede WCDMA 850 MHz, através de uma simulação semi-empírica. Seu desempenho foi então comparado com o método de multi-lateração circular utilizando RTT em condições LOS e NLOS. O atraso médio de propagação em condições NLOS foi modelado estatisticamente e simulações de Monte Carlo foram utilizadas para aumentar a confiabilidade dos resultados obtidos.

Ao longo do desenvolvimento desta dissertação, seis trabalhos foram publicados pelo autor:

- Em [32], a utilização do parâmetro δ , descrito na Seção 2.4.1, foi proposta e o método *Cpred*, descrito na Seção 1.2.3, foi formulado. A primeira versão da filtragem determinística foi apresentada;
- Em [55], foi feito um estudo sobre os valores ótimos de N e K nas Regiões 1 e 2. Os parâmetros N e K são descritos na Seção 4.2;
- Em [48], a filtragem determinística, com a configuração descrita na Seção 2.3.1, foi formulada;
- Em [74], foram feitas modificações na função de avaliação definida pela equação (39), inserindo um fator de ponderação em função do valor de RSS e um fator de ordenação, que se assemelha a um coeficiente de correlação de ordem. Os resultados obtidos permitiram avaliar melhor o impacto do terceiro passo da filtragem determinística na precisão do método *DcmFull*;
- Em [95], foi proposto um sistema de inferência *fuzzy* para localização de terminais móveis em redes GSM;
- Em [59], o método *DcmGaNew*, com a configuração descrita na Seção 4.2, foi formulado.

O método *DcmFull*, cuja configuração é mostrada na Tabela Tabela 4, foi avaliado em redes celulares GSM e WCDMA, ambas na banda de 850 MHz, obtendo o melhor desempenho dentre os métodos testados nas Regiões 1 e 2. O bom desempenho do método

DcmFull foi confirmado através de uma ampla e detalhada comparação com outros resultados publicados na literatura. As principais razões para seu bom desempenho são a utilização do parâmetro δ , que corresponde à inacurácia intrínseca à medida de RSS feita pelo MS, e o terceiro passo do processo de filtragem determinística, ambos descritos no Capítulo 2. O parâmetro δ mostrou-se capaz também de reduzir a degradação da precisão de localização em condições de operação *cross-device* nos testes em redes WiFi, superando o método utilizando o coeficiente de correlação de Spearman. Além disso, o método *DcmFull*, por não assumir condições de propagação LOS, tem precisão superior à de métodos que partem deste pressuposto - como os métodos de multi-lateração utilizando tempo de propagação - quando testados em condições de propagação NLOS.

Quanto ao método *DcmFull*, deve-se ressaltar que, por ser um método baseado na rede, não requer modificações nos MS existentes. Esta característica, associada a sua alta disponibilidade e boa precisão, tornam-no um candidato viável para diversas aplicações baseadas em posição, em particular a localização de chamadas de emergência originadas em telefones móveis celulares. Após a calibração do CDB, o método *DcmFull* obteve, na rede GSM em área urbana, erros de 104 metros e 233 metros para os percentis 67% e 95%, respectivamente. A especificação do FCC para o serviço E911 define para métodos baseados na rede, erros máximos de 100 metros e 300 metros para esses mesmos percentis.

O método *DcmFull* atingiu esses resultados utilizando um CDB construído a partir de modelagem de propagação, e posteriormente calibrado, seguindo processo descrito no Capítulo 2. A comparação da precisão obtida com resultados reportados na literatura mostrou que a utilização de CDBs construídos a partir de modelagem de propagação é uma opção viável para métodos DCM. A utilização de CDBs construídos a partir de modelagem de propagação, contudo, traz uma vantagem não disponível para os CDBs construídos a partir de medidas de campo: eles podem ser atualizados de forma rápida e automática. Após alterações na RAN, basta atualizar os parâmetros modificados - azimute de antenas, potência de transmissão, acréscimo de setores, etc. - no *software* de planejamento de RF e executar as previsões de propagação novamente. A manutenção do CDB atualizado traz um outro benefício, além de impedir a degradação da precisão de localização, que é facilitar o processo de planejamento e otimização da RAN.

Como desenvolvimentos futuros, as técnicas de redução do espaço de correlação podem ser aprimoradas, com impactos tanto na complexidade quanto na precisão dos

métodos DCM. A técnica proposta de redução do espaço de correlação utilizando GA reduziu o tempo médio de processamento por estimativa de posição em relação à filtragem determinística em área urbana, porém ao custo de perceptível redução da precisão de localização. Estudos mais profundos são necessários para tornar essa técnica utilizável. Outras alternativas envolvem a utilização de ANNs ou sistemas de inferência *fuzzy* para reduzir o espaço de busca. Além disso, um aprimoramento útil seria a possibilidade de definir de forma automática o valor de N ótimo no terceiro passo da filtragem determinística, assim como o valor de K ótimo nos métodos DCM que fazem uso de KNN.

Na Seção 4.7, verificou-se o efeito nocivo que o erro de modelagem de propagação e o *handover* têm sobre a precisão de métodos DCM utilizando a filtragem determinística. Além da solução óbvia para mitigar este efeito, que é a calibração dos modelos de propagação e cujo impacto foi avaliado na Seção 4.8, uma alternativa complementar, proposta como desenvolvimento futuro, envolve uma modificação no primeiro passo da filtragem determinística: ao invés de selecionar apenas os *pixels* cujo melhor servidor predito corresponde ao melhor servidor reportado pelo MS, poderiam ser incluídos também os *pixels* em uma região de *handover*. Esta região predita de *handover* seria formada por pixels onde a diferença entre os valores de RSS preditos de uma célula qualquer e da célula servidora (reportada pelo MS) fosse positivo e menor que um valor limite, relacionado à histerese no *handover*.

REFERÊNCIAS

- [1] 3GPP. *TS 22071, v9.0.0 (2009-12) - 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Location Services (LCS); Service Description; Stage 1 (Release 5)*. 2009.
- [2] FCC. Guidelines for Testing and Verifying the Accuracy of Wireless E911 Location Systems. *OET BULLETIN No.71*, 2000.
- [3] European Commission. Commission Recommendation 2003/558/EC. *Official Journal of the European Union*, 2003.
- [4] ZAGAMI, J. M. et al. Providing Universal Location Services Using a Wireless E911 Location Network. *IEEE Communications Magazine*, v. 36, n. 4, p. 66–71, April 1998.
- [5] SILVENTOINEN, M. I.; RANTALAINEN, T. Mobile Station Emergency Locating in GSM. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Personal Wireless Communications*. New Delhi, India: [s.n.], 1996. p. 232–238.
- [6] TIM. *TIM Casa*. Disponível em: <http://guiadeviagem.locaweb.com.br/tim_casa>. Acesso em: 20 de Março de 2010.
- [7] AT&T. *TeleNav Track*. Disponível em: <<http://www.wireless.att.com/businesscenter/solutions/industry-solutions/vertical-industry/telenav-track.jsp>>. Acesso em: 20 de Março de 2010.
- [8] Northstream. *People Tracking - A potential breakthrough LBS application*. [S.l.], 2005.
- [9] Child Locate. *Child Locate*. Disponível em: <<http://www.childlocate.co.uk/>>. Acesso em: 20 de Março 2010.
- [10] NTT DoComo. *Imadoco Search*. Disponível em: <<http://www.nttdocomo.co.jp/english/service/safety/imadoco/index.html>>. Acesso em: 20 de Março de 2010.
- [11] TomTom. *TomTom Points of Interest*. Disponível em: <<http://www.tomtom.com/services>>. Acesso em: 20 de Março de 2010.

- [12] NTT DoComo. *Imadoco Kantan Search*. Disponível em: <http://www.nttdocomo.co.jp/english/service/information/imadoco_kantan/index.html>. Acesso em: 20 de Março de 2010.
- [13] FOURNOGERAKIS, P.; KYRIAZAKOS, S.; KARETSOS, G. Enhanced Handover Performance in Cellular Systems based on Position Location of Mobile Terminals. In: *Proceedings of IST Mobile Summit*. Barcelona, Spain: [s.n.], 2001.
- [14] ETSI. *TS 101724 v8.9.0 (2004-06) - Digital telecommunications system (Phase 2+); Location Services (LCS); Functional description; Stage 2 (3GPP TS 03.71 version 8.9.0 Release 1999)*. 2004.
- [15] 3GPP. *TR 25847, v4.0.0 (2001-03) - 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; UE positioning enhancements (Release 4)*. 2001.
- [16] SPIRITO, M. A.; MATTIOLI, A. G. Preliminary Experimental Results of a GSM Mobile Phones Positioning System based on Timing Advance. In: *Proceedings of IEEE 50th Vehicular Technology Conference*. Amsterdam, The Netherlands: [s.n.], 1999. p. 2072–2076.
- [17] INFO Online. *Celulares chegam a 4 bilhões no mundo*. Disponível em: <<http://info.abril.com.br/aberto/infonews/012009/06012009-23.shl>>. Acesso em: 20 de Janeiro de 2009.
- [18] TI Inside Online. *Nokia dá passo para popularizar GPS no celular*. Disponível em: <<http://www.tiinside.com.br/21/01/2010/nokia-da-passo-para-popularizar-gps-no-celular/ti/163446/news.aspx>>. Acesso em: 20 de Janeiro de 2010.
- [19] ANATEL. *Estatísticas de Celulares no Brasil*. Disponível em: <<http://www.teleco.com.br/ncel.aps>>. Acesso em: 20 de Dezembro de 2009.
- [20] LIU, H. et al. Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics - Part C: Applications and Reviews*, v. 37, n. 6, p. 1067–1080, November 2007.

- [21] BILL, R. et al. Indoor and Outdoor Positioning in Mobile Environments - a Review and some Investigations on WLAN-Positioning. *Geographic Information Sciences*, v. 10, n. 2, p. 91–98, December 2004.
- [22] GEZICI, S. A Survey on Wireless Position Estimation. *Wireless Personal Communications: An International Journal*, v. 44, n. 3, p. 263–282, February 2008.
- [23] LAITINEN, H.; LAHTEENMAKI, J.; NORDSTROM, T. Database Correlation Method for GSM Location. In: *Proceedings of IEEE 53rd Vehicular Technology Conference*. Rhodes, Greece: [s.n.], 2001. p. 2504–2508.
- [24] ETSI. *TS 100911 v6.2.0 (1998-07) - Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Radio subsystem link control (GSM 05.08 version 6.2.0 Release 1997)*. 1998.
- [25] ETSI. *European digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Handover Procedures (GSM 03.09 version 4.5.1)*. 1995.
- [26] HATA, M. Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 29, n. 3, p. 317–325, August 1980.
- [27] YACOUB, M. D. *Foundations of Mobile Radio Engineering*. [S.l.]: CRC Press, 1993.
- [28] ETSI. *TS 100912 v8.12.0 (2003-08) - Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Radio subsystem synchronization (3GPP TS 05.10 version 8.12.0 Release 1999)*. 2003.
- [29] 3GPP. *TS 25214, v5.0.0 (2002-03) - 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Physical Layer Procedures (FDD) (Release 5)*. 2002.
- [30] LIBAULT, A. *Geocartografia*. [S.l.]: Editora da Universidade de São Paulo, 1975.
- [31] NGIA. *DMA Technical Manual 8358.1 - Datums, Ellipsoids, Grids, and Grid Reference Systems*. Disponível em: <<http://earth-info.nga.mil/GandG/publications/tm8358.1/tr83581b.html>>. Acesso em: 20 de Junho de 2010.

- [32] CAMPOS, R. S.; LOVISOLO, L. Location Methods for Legacy GSM Handsets using Coverage Prediction. In: *Proceedings of IEEE 9th Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications*. Recife, Brazil: [s.n.], 2008. p. 21–25.
- [33] 3GPP. *TS 25133, v9.1.0 (2009-09) - 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Requirements for support of radio resource management (FDD) (Release 9)*. 2009.
- [34] KRIZMAN, K. J.; BIEDKA, T. E.; RAPPAPORT, T. S. Wireless Position Location: Fundamentals, Implementation Strategies and Sources of Error. In: *Proceedings of IEEE 47th Vehicular Technology Conference*. Phoenix, USA: [s.n.], 1997. p. 919–923.
- [35] BORKOWSKI, J.; NIEMELA, J.; LEMPIAINEN, J. Enhanced Performance of Cell ID+RTT by Implementing Forced Soft Handover Algorithm. In: *Proceedings of IEEE 60th Vehicular Technology Conference*. Los Angeles, USA: [s.n.], 2004. p. 3545–3549.
- [36] CAFFERY, J. J.; STÜBER, G. L. Overview of Radio Location in CDMA Cellular Systems. *IEEE Communications Magazine*, v. 36, n. 4, p. 38–45, April 1998.
- [37] CAFFERY, J. J. A New Approach to the Geometry of TOA Location. In: *Proceedings of IEEE 52nd Vehicular Technology Conference*. Boston, USA: [s.n.], 2000. p. 1943–1949.
- [38] LAWSON, C. L.; HANSON, R. J. *Solving Least Squares Problems*. [S.l.]: Prentice Hall, 1974.
- [39] CHAN, Y. T.; HO, K. C. A Simple and Efficient Estimator for Hiperbolic Location. *IEEE Transactions on Signal Processing*, v. 42, n. 8, p. 1905–1915, August 1994.
- [40] CONG, L.; ZHUANG, W. Hybrid TDOA/AOA Mobile User Location for Wideband CDMA Cellular Systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 1, n. 3, p. 274–278, March 2002.
- [41] CHEN, M. et al. Practical Metropolitan-Scale Positioning for GSM Phones. In: *Proceedings of 8th International Conference on Ubiquitous Computing*. Newport Beach, USA: [s.n.], 2006. p. 225–242.

- [42] SPIRITO, M. A.; PÖYKKÖ, S.; KNUUTTILA, O. Experimental Performance of Methods to Estimate the Location of Legacy Handsets in GSM. In: *Proceedings of IEEE 54th Vehicular Technology Conference*. Atlantic City, USA: [s.n.], 2001. p. 2716–2720.
- [43] PORRETA, G. M. M.; NEPA, P.; GIANNETTI, F. Location, Location, Location - Use of Deterministic Propagation Models for Testing Wireless Networks Location Techniques. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, v. 3, n. 2, p. 20–29, June 2008.
- [44] RUSSEL, S. *Detecting and Locating Rogue Access Points*. [S.l.], 2003.
- [45] LAITINEN, H. et al. *Cellular Location Technology*. [S.l.], 2001.
- [46] SPIRITO, M. A. On The Accuracy of Cellular Mobile Station Location Estimation. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 50, n. 3, p. 674–685, May 2001.
- [47] ZIMMERMANN, D. et al. Database Correlation for Positioning of Mobile Terminals in Cellular Networks using Wave Propagation Models. In: *Proceedings of IEEE 60th Vehicular Technology Conference*. Los Angeles, USA: [s.n.], 2004. p. 4682–4686.
- [48] CAMPOS, R. S.; LOVISOLO, L. A Fast Database Correlation Algorithm for Localization of Wireless Network Mobile Nodes using Coverage Prediction and Round Trip Delay. In: *Proceedings of IEEE 69th Vehicular Technology Conference*. Barcelona, Spain: [s.n.], 2009.
- [49] AHONEN, S.; LAITINEN, H. Database correlation method for UMTS location. In: *Proceedings of IEEE 57th Vehicular Technology Conference*. Jeju, Korea: [s.n.], 2003. p. 2696–2700.
- [50] IEEE Computer Society. *IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements; Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*. 2007.
- [51] HALLAK, M. A.; SAFADI, M.; KOUATLY, R. Mobile Positioning Technique using Signal Strength Measurement method with the aid of Passive Mobile Listener Grid. In: *Proceedings of 2nd International Conference on Information and Communication Technologies: from Theory to Applications*. Damascus, Syria: [s.n.], 2006. p. 105–110.

- [52] AARNÆS, E.; HOLM, S. Tuning of Empirical Radio Propagation Models Effect of Location Accuracy. *Wireless Personal Communications*, v. 4, n. 2–4, p. 267–281, December 2004.
- [53] WÖLFLE, G. et al. Enhanced Localization Technique within Urban and Indoor Environments based on Accurate and Fast Propagation Models. In: *European Wireless*. Firenze, Italy: [s.n.], 2002.
- [54] ITU. Digital Topographical Database for Propagation Studies. *Recommendation ITU-R P.1058-1*, 1997.
- [55] CAMPOS, R. S.; LOVISOLO, L. Análise Empírica de Métodos de Localização de Terminais GSM Legados utilizando Predição de Cobertura e Alinhamento Temporal. In: *Anais do XXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*. Rio de Janeiro, Brasil: [s.n.], 2008.
- [56] MSI. *PLANET Technical Reference Guide Version DMS 2.0*. [S.l.], 1999.
- [57] ZHU, J.; DURGIN, G. D. Indoor/Outdoor Location of Cellular Handsets Based on Received Signal Strength. *Electronic Letters*, v. 41, n. 1, p. 24–26, January 2005.
- [58] MAGRO, M. J.; DEBONO, C. J. A Genetic Algorithm Approach to User Location Estimation in UMTS Networks. In: *EUROCON - The International Conference on Computer as a Tool*. Warsaw, Poland: [s.n.], 2007. p. 1136–1139.
- [59] CAMPOS, R. S.; LOVISOLO, L. Mobile Station Location using Genetic Algorithm Optimized Radio Frequency Fingerprinting. In: *Proceedings of IEEE 2010 International Telecommunications Symposium*. Manaus, Brazil: [s.n.], 2010.
- [60] PARDALOS, P. M. et al. Parallel Search for Combinatorial Optimization: Genetic Algorithms, Simulated Annealing, Tabu Search and GRASP. In: *Proceedings of the 2nd International Workshop on Parallel Algorithms for Irregularly Structured Problems*. Lyon, France: [s.n.], 1995. p. 317–332.
- [61] GOLDBERG, D. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. [S.l.]: Addison-Wesley, 1989.

- [62] HOUCK, C.; JOINES, J.; KAY, M. A Genetic Algorithm for Function Optimization: A Matlab Implementation. *NCSU-IE TR 95-09*, 1995.
- [63] SPIRITO, M. A.; CACERES, M.; SOTTILE, F. WLAN-Based Real Time Vehicle Locating System. In: *Proceedings of IEEE 69th Vehicular Technology Conference*. Barcelona, Spain: [s.n.], 2009.
- [64] The MathWorks, Inc. *Pairwise distance between pairs of objects*. Disponível em: <<http://www.mathworks.de/access/helpdesk/help/toolbox/stats/pdist.html>>. Acesso em: 20 de Maio de 2010.
- [65] SEIDL, T.; KRIEGEL, H.-P. Optimal Multi-Step K-Nearest Neighbor Search. In: *Proceedings of the 1998 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*. Seattle, USA: [s.n.], 1998. p. 154–165.
- [66] BAHL, P.; PADMANABHAN, V. N. RADAR: An In-Building RF-based User Location and Tracking System. In: *Proceedings of 19th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*. Tel Aviv, Israel: [s.n.], 2000. p. 775–784.
- [67] HAYKIN, S. *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. [S.l.]: Prentice Hall PTR, 1994.
- [68] TAKENGA, C.; XI, C.; KYAMAKYA, K. A Hybrid Neural Network-Data Base Correlation Positioning in GSM Network. In: *Proceedings of IEEE 10th International Conference on Communication Systems*. Singapore: [s.n.], 2006. p. 1–5.
- [69] HORNIK, K. Approximation Capabilities of Multilayer Feedforward Networks. *Neural Networks Archive*, v. 4, n. 2, p. 251–257, 1991.
- [70] KRUMM, J.; CERMAK, G.; HORVITZ, E. RightSPOT: A Novel Sense of Location for a Smart Personal Object. In: *Proceedings of Ubicomp 2003*. Seattle, USA: [s.n.], 2003. p. 36–43.
- [71] TORRIERI, D. J. Statistical Theory of Passive Location Systems. *IEEE Transactions on Aerosp. Electron. Syst*, n. 2, p. 183–197, March 1984.
- [72] KEMPPI, P. *Database Correlation Method for Multi-System Location*. Dissertação (Mestrado) — Helsinki University of Technology, 2005.

- [73] COMER, D. E. *Internetworking with TCP/IP - Volume I: Principles, Protocols and Architecture*. 3. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 1995.
- [74] CAMPOS, R. S.; LOVISOLO, L. Aprimoramento da Localização de Terminais Móveis utilizando Correlação de Assinaturas de Rádio-Frequência. In: *Anais do XXVII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*. Blumenau, Brasil: [s.n.], 2009.
- [75] VOGL, T. P. et al. Accelerating the Convergence of the Backpropagation Method. *Biological Cybernetics*, v. 59, p. 257–263, 1988.
- [76] BATES, D. M.; WATTS, D. G. *Nonlinear Regression and Its Applications*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1988.
- [77] SHEN, X.; MARK, J. W.; J.YE. Mobile Location Estimation in CDMA Cellular Networks by Using Fuzzy Logic. In: *Proceedings of IEEE 52nd Vehicular Technology Conference*. Boston, USA: [s.n.], 2000. p. 2108–2114.
- [78] LAARAIEDH, M.; AVRILLON, S.; UGUEN, B. Enhancing Positioning Accuracy through Direct Position Estimators based on Hybrid RSS Data Fusion. In: *Proceedings of IEEE 69th Vehicular Technology Conference*. Barcelona, Spain: [s.n.], 2009.
- [79] TURKYILMAZ, O. et al. Environment Aware Location Estimation in Cellular Networks. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2008.
- [80] WECKSTRÖM, M.; SPIRITO, M.; RUUTU, V. Mobile Station Location. In: Timo Halonen and Javier Romero and Juan Melero (Ed.). *GSM, GPRS and EDGE Performance - Evolution towards UMTS*. 2. ed. [S.l.]: John Wiley and Sons, 2003. cap. 4, p. 119–139.
- [81] SALCIC, Z. GSM Mobile Station Location Using Reference Stations and Artificial Neural Networks. *Wireless Personal Communications*, v. 19, p. 205–226, 2001.
- [82] BROWN, R.; HWANG, P. *Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering*. 3. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1997.
- [83] COST Action 231. *COST 231 Final Report: Digital Mobile Radio Towards Future Generation Systems*. Disponível em: <<http://www.lx.it.pt/cost231>>. Acesso em: 20 de Janeiro de 2010.

- [84] GONZAGA, A. S.; MARÇAL, A. V.; FERREIRA, I. K. *Levantamento de Redes Wi-Fi 802.11 no Campus da UERJ*. 2008. Monografia (Graduação) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro.
- [85] CHEN, Y.-C. et al. Sensor Assisted Wi-Fi Indoor Location System for Adapting to Environmental Dynamics. In: *Proceedings of 8th ACM International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*. Montreal, Canada: [s.n.], 2005. p. 118–125.
- [86] PAHLAVAN, K.; LI, X.; MÄKELÄ, J.-P. Indoor Geolocation Science and Technology. *IEEE Communications Magazine*, v. 40, n. 2, p. 112–118, February 2002.
- [87] BORKOWSKI, J.; NIEMELÄ, J.; LEMPIÄINEN, J. Location Techniques for UMTS Radio Networks. In: *Proceedings of Mobile Venue Conference*. Athens, Greece: [s.n.], 2004.
- [88] BORKOWSKI, J. *On Applicable Cellular Positioning for UMTS*. Tese (Doutorado) — Tampere University of Technology, Finland, April 2008.
- [89] 3GPP. *TS 25215, v3.0.0 (1999-10) - 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Physical Layer Measurements (FDD)*. 1999.
- [90] GREENSTAIN, L. J. et al. A New Path-Gain/Delay-Spread Propagation Model for Digital Cellular Channels. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 46, n. 2, p. 477–485, May 1997.
- [91] YANGSEOK, J.; HEUNGRYEOL, Y.; CHUNGYONG, L. Calibration of NLOS Error for Positioning Systems. In: *Proceedings of IEEE 53rd Vehicular Technology Conference*. Rhodes, Greece: [s.n.], 2001. p. 2605–2608.
- [92] MENDO, L.; HERNANDO, J. M. Unbiased Monte Carlo Estimator with Guaranteed Confidence. In: *Proceedings of IEEE 9th Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications*. Recife, Brazil: [s.n.], 2008. p. 625–628.
- [93] VENKATRAMAN, S.; CAFFERY, J. J.; YOU, H.-R. Location using LOS Range Estimation in NLOS Environments. In: *Proceedings of IEEE 55th Vehicular Technology Conference*. Birmingham, USA: [s.n.], 2002.

- [94] VENKATRAMAN, S.; CAFFERY, J. J. A Statistical Approach to Non-Line-of-Sight BS Identification. In: *Proceedings of IEEE 5th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications*. Honolulu, USA: [s.n.], 2002.
- [95] CAMPOS, R. S.; LOVISOLO, L. Localização de Terminais GSM com Sistemas de Inferência Fuzzy. In: *Anais do IX Congresso Brasileiro de Redes Neurais*. Ouro Preto, Brasil: [s.n.], 2009.