

**INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA**

**EDNA MARIA PEREIRA GUEDES**

**ESTUDO DE TÉCNICA HÍBRIDA DE LOCALIZAÇÃO DE ESTAÇÕES  
MÓVEIS BASEADA EM TDoA E AoA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Mauro Soares de Assis – M. C.

Co- Orientador: Prof. Luiz A. R. da Silva Mello – D.C.

Rio de Janeiro  
2003

c2003

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha

Rio de Janeiro - RJ CEP: 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmear ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es) e do(s) orientador(es).

G924 Guedes, Edna Maria Pereira  
Estudo de Técnica Híbrida de Localização de Estações Móveis Baseada em TDoA e AoA / Edna Maria Pereira Guedes. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2003.

119 p. : il., graf., tab.

Dissertação (mestrado) - Instituto Militar de Engenharia – Rio de Janeiro, 2003.

1. Estudo de Técnica Híbrida. 2. Localização de Estações Móveis. 3. TDoA e AoA . I. Instituto Militar de Engenharia. II.

Título

CDD 621.38456

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

EDNA MARIA PEREIRA GUEDES

**ESTUDO DE TÉCNICA HÍBRIDA DE LOCALIZAÇÃO DE ESTAÇÕES  
MÓVEIS BASEADA EM TDoA E AoA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Mauro Soares de Assis – M.C.

Co-orientador: Prof. Luiz A. R. da Silva Mello – D.C.

Aprovada em 01 de outubro de 2003 pela seguinte Banca Examinadora:

---

Prof. Mauro Soares de Assis – M. C. do IME - Presidente

---

Prof. Luiz Alencar Reis da Silva Mello - D. C. da PUC

---

Prof. Maurício Henrique Costa Dias, - D. C do IME

Rio de Janeiro

2003

Ao meu amado marido e adoráveis filhas, Carlos Henrique,  
Maria Fernanda e Ana Carolina, maiores responsáveis por  
esta minha vitória.

## **AGRADECIMENTOS**

Meu primeiro agradecimento vai para meus pais, José Pereira e Dorcina, exemplos de luta, dignidade e companheirismo. A educação e os estudos por eles proporcionados são o alicerce de todas as minhas vitórias.

Ao meu orientador, Professor Mauro Soares Assis, pelas orientações, compreensão e parceria para a realização deste trabalho.

Ao meu co-orientador, Professor Luiz Alencar dos Reis Silva Mello, pelos conhecimentos transmitidos e pelo incansável apoio e atenção dispensada na elaboração deste trabalho.

Ao Instituto Militar de Engenharia, pela confiança na minha capacidade profissional e oportunidade na realização de um sonho.

A todos os meus familiares e amigos que de uma forma ou de outra me estimularam e me ajudaram a concretizar este trabalho.

Finalmente, um agradecimento muito especial a meu marido, Carlos Henrique e minhas filhas Maria Fernanda e Ana Carolina, pelo incentivo, apoio e compreensão. Eles são a força e o estímulo que tenho para vencer todos os obstáculos.

“A história moderna tem provado sem dúvida que um dos grandes fatores de evolução da civilização e do progresso do mundo é a facilidade com que as pessoas, vivendo distantes umas das outras, podem se comunicar entre si”.

GUGLIELMO MARCONI

## SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	10
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	12
LISTA DE SIGLAS.....	13
<b>1. SISTEMAS DE LOCALIZAÇÃO DE TERMINAIS MÓVEIS .....</b>	<b>16</b>
1.1. Introdução.....	16
1.2. Evolução das Comunicações Móveis .....	19
1.3. Recomendação da FCC para E-911 .....	23
1.4. Serviços Baseados em Localização .....	24
1.4.1. Serviços de Informação .....	25
1.4.2. Serviços de Tarifação Baseada na Localização – LBS .....	26
1.4.3. Serviços de Emergência .....	26
1.4.4. Serviços de Rastreamento de Veículos E Pessoas .....	27
1.4.5. Serviços Tipo M-Commerce .....	27
1.4.6. Serviços de Entretenimento e Aproximação de Pessoas .....	28
1.5. Critérios de Avaliação dos Métodos de Localização .....	28
1.5.1. Precisão .....	28
1.5.2. Cobertura de Posicionamento .....	29
1.5.3. Redução da Capacidade de Outros Serviços .....	29
1.5.4. Tempo de Resposta .....	29
1.5.5. Capacidade de Serviços de Localização .....	29
1.5.6. Custo .....	30
1.5.7. Consumo de Potência .....	30
1.5.8. Privacidade do Usuário .....	30
1.6. Fontes de Erros em Sistemas de Localização .....	31
1.6.1. Propagação por Multipercorso .....	31
1.6.2. Propagação Sem Linha de Visada Direta (NLOS) .....	31
1.6.3. Interferência Múltiplo Acesso (MAI) .....	32
1.7. Objetivo do Trabalho .....	32
1.8. Estrutura da Dissertação .....	33

<b>2.</b>	<b>TECNOLOGIAS DE LOCALIZAÇÃO .....</b>	<b>34</b>
2.1.	Introdução .....	34
2.2.	Soluções Baseadas em Terminais .....	34
2.2.1.	GPS .....	34
2.2.2.	A-GPS ( <i>Wireless Assisted GPS</i> ) .....	36
2.2.3.	E-OTD ( <i>Enhanced Observed Time Difference</i> ) .....	37
2.3.	Comparativo entre as Soluções Baseadas em Terminais .....	38
2.4.	Soluções Baseadas em Rede .....	39
2.4.1.	CELL-ID .....	39
2.4.2.	AoA .....	41
2.4.3.	ToA .....	42
2.4.4.	TDoA .....	44
2.4.5.	Análise de Multipercorso .....	45
2.4.6.	Sistema Híbrido TDoA/AoA .....	45
2.5.	Comparativo entre as Soluções Baseadas na Rede .....	46
2.6.	Conclusões do Capítulo .....	48
<b>3.</b>	<b>MÉTODOS BASEADOS EM TEMPO DE CHEGADA (TDoA) E ÂNGULO DE CHEGADA (AoA) .....</b>	<b>49</b>
3.1.	Introdução .....	49
3.2.	TDoA .....	50
3.2.1.	Modelo Matemático Geral para Solução das Equações Hiperbólicas .....	51
3.3.	Ângulo de Chegada (AoA) .....	55
3.3.1.	Formulação do Problema .....	56
3.3.2.	O Modelo Básico .....	57
3.4.	Sistema Híbrido TDoA/AoA .....	59
3.4.1.	Vantagens do Método Híbrido TDoA/AoA .....	59
3.4.2.	Detalhamento do Esquema Híbrido TDoA/AoA .....	60
3.4.3.	Modelamento de AoA para Macro célula .....	61
3.4.4.	Solução para as Equações de TDoA/AoA .....	62
3.4.5.	Configuração com 2 ERB'S .....	63
3.4.6.	Configuração com um Conjunto de ERB's .....	65
3.4.7.	Linearização das Equações .....	66



3.5.	Medidas de Precisão .....	68
3.5.1.	O Erro RMS .....	69
3.5.2.	Probabilidade de Erro Circular (CEP) .....	69
3.5.3.	Diluição de Precisão Geométrica (GDOP) .....	70
3.6.	Resumo do Capítulo .....	71
<b>4.</b>	<b>SIMULAÇÃO DOS MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO .....</b>	<b>73</b>
4.1.	Introdução.....	73
4.2.	Implementação dos Métodos TDoA e TDoA/AoA .....	73
4.3.	Adaptação do Método Híbrido TDoA/AoA .....	74
4.4.	Cenários Utilizados nas Simulações .....	74
4.5.	Simulação no Cenário Corredor .....	76
4.5.1.	Posicionamento da Fonte no Cenário Corredor .....	78
4.5.2.	Posicionamento do Móvel em Zig-Zag no Cenário Corredor .....	78
4.6.	Simulação no Cenário Cruzamento .....	79
4.6.1.	Posicionamento da MS no Cenário Cruzamento .....	80
4.7.	Desvio Padrão das Medidas ( $\sigma$ ) .....	80
4.8.	Resultados das Simulações .....	81
4.8.1.	Cenário Corredor .....	81
4.8.2.	Móvel em Zig-Zag .....	85
4.8.3.	Cenário Cruzamento .....	86
4.8.4.	Influência do Número de Sensores .....	91
4.8.5.	Influência do Desvio Padrão ( $\sigma$ ) .....	93
4.8.6.	Análise de Sensibilidade .....	94
4.9.	Resumo do Capítulo .....	95
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES.. .....</b>	<b>96</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>101</b>
<b>7</b>	<b>APÊNDICES.....</b>	<b>104</b>
7.1.	APÊNDICE 1: Método TDoA.....	105
7.2.	APÊNDICE 2: Método Híbrido TDoA/AoA.....	112

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIG. 2.1	Sistema GPS - Princípio da Triangulação .....	36
FIG. 2.2	Sistema A-GPS .....	36
FIG. 2.3	Sistema E-OTD.....	37
FIG. 2.4	Localização baseada em Cell-ID com Cell Sector e TA.....	40
FIG. 2.5	Localização baseada em AoA.....	41
FIG. 2.6	Localização baseada em ToA.....	43
FIG. 2.7	Localização baseada em TDoA.....	44
FIG. 2.8	Método Híbrido de Localização TDoA/AoA.....	46
FIG. 3.1	Plano de referência para solução das equações hiperbólicas.....	51
FIG. 3.2	Configuração bidimensional utilizada na determinação do AoA.....	56
FIG. 3.3	Modelo circular de espalhamento em macrocélula.....	62
FIG. 3.4	Configuração TDoA/AoA – 2D com 2ERB's.....	63
FIG. 3.5	Configuração TDoA/AoA – 2D com 2ERB's.....	64
FIG. 3.6	Configuração TDoA/AoA – Aproximação linear da equação do AoA para 2ERB's.....	66
FIG. 3.7	Geometria para medidas de precisão usando CEP .....	70
FIG. 4.1	Cenário corredor.....	75
FIG. 4.2	Cenário cruzamento.....	75
FIG. 4.3	Disposição das 3 ERB's no ambiente corredor.....	76
FIG. 4.4	Disposição das 4 ERB's no ambiente corredor.....	77
FIG. 4.5	Disposição das 6 ERB's no ambiente corredor.....	77
FIG. 4.6	Disposição do móvel em zig-zag no ambiente corredor.....	78
FIG. 4.7	Disposição das ERB's no cenário cruzamento.....	79
FIG. 4.8	Erro RMS em função da Distância (3 ERB's) – Método TDoA –LOS.....	81
FIG. 4.9	Erro RMS em função da Distância (3 ERB's) – Método TDoA/AoA – LOS.....	82
FIG. 4.10	Erro RMS em função da Distância (4 ERB's) – Método TDoA – LOS.....	82
FIG. 4.11	Erro RMS em função da Distância (4 ERB's) – Método TDoA/AoA – LOS.....	83
FIG. 4.12	Erro RMS em função da Distância (6 ERB's) – Método TDoA – LOS.....	83
FIG. 4.13	Erro RMS em função da Distância (6 ERB's) – Método TDoA/AoA – LOS.....	84
FIG. 4.14	Erro RMS em função da Distância (3 ERB's) – Comparação entre Métodos TDoA e TDoA/AoA – LOS.....	84

FIG. 4.15 Erro RMS em função da Distância (4 ERB's) – Comparação entre Métodos TDoA e TDoA/AoA – LOS.....	85
FIG. 4.16 Erro RMS em função da Distância (6 ERB's) – Comparação entre Métodos TDoA e TDoA/AoA – LOS.....	85
FIG. 4.17 Erro RMS em função da Distância (4 ERB's) –Móvel em Zig-Zag - Método TDoA/AoA – LOS.....	86
FIG. 4.18 Erro RMS em função da Distância (3 ERB's) – Método TDoA – LOS/NLOS.....	87
FIG. 4.19 Erro RMS em função da Distância (3 ERB's).– Método TDoA/AoA – LOS/NLOS.....	87
FIG. 4.20 Erro RMS em função da Distância (4 ERB's) – Método TDoA – LOS/NLOS.....	88
FIG. 4.21 Erro RMS em função da Distância (4 ERB's) – Método TDoA/AoA – LOS/NLOS.....	88
FIG. 4.22 Erro RMS em função da Distância (6 ERB's) – Método TDoA – LOS/NLOS.....	89
FIG. 4.23 Erro RMS em função da Distância (6 ERB's) – Método TDoA/AoA – LOS/NLOS.....	89
FIG. 4.24 Erro RMS em função da Distância (3 ERB's) –Situação LOS/NLOS.....	90
FIG. 4.25 Erro RMS em função da Distância (4 ERB's) –Situação LOS/NLOS.....	90
FIG. 4.26 Erro RMS em função da Distância (6 ERB's) –Situação LOS/NLOS.....	91
FIG. 4.27 Erro RMS em função da Distância –Variação do número de ERB's - Método TDoA – Situação LOS.....	91
FIG. 4.28 Erro RMS em função da Distância –Variação do número de ERB's - Método TDoA/AoA – Situação LOS.....	92
FIG. 4.29 Erro RMS em função da Distância–Situação LOS/NLOS.....	92
FIG. 4.30 Erro RMS em função da Distância–Situação LOS/NLOS.....	93
FIG. 4.31 Erro RMS em função do Desvio Padrão das Medidas ( $\sigma$ ) – Método TDoA – Situação LOS.....	93
FIG. 4.32 Erro RMS em função do Desvio Padrão das Medidas ( $\sigma$ ) – Método TDoA/AoA - Situação LOS.....	94
FIG. 4.33 Erro RMS em função do Número de interações - Método TDoA/AoA - Situação LOS.....	94

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

### ABREVIATURAS

- (x,y) - coordenadas da estação móvel  
 $\sigma_x^2$  - variância da coordenada x  
 $\sigma_y^2$  - variância da coordenada y  
c - velocidade da luz  
 $d_{i1}$  - conjunto de estimativas de TDoA's  
 $D_k$  - distância entre a MS e ERB\_k  
E - valor esperado  
M - Número de sensores ou ERB's  
 $n_\beta$  - erros das medidas de AoA  
 $n_k$  - erros das medidas de TDoA  
Q - matriz covariância das estimativas de TDoA's  
R - raio do anel de espalhamento

### SÍMBOLOS

- $\sigma$  - desvio padrão das medidas  
 $\beta$  - medida do ângulo de chegada (AoA)

## LISTA DE SIGLAS

3G	Terceira Geração
A-GPS	<i>Wireless Assisted GPS</i>
ALI	<i>Automatic Location Information</i>
ANI	<i>Automatic Number Information</i>
AoA	<i>(Angle of Arrival)</i> Angulo de Chegada
ARPU	<i>Average Revenue Per User</i>
BS	<i>(Base Station)</i> Estação Radio Base
CEP	Probabilidade de Erro Circular
CRLB	<i>(Crámer-Rao lower bound -)</i> limitante de Crámer-Rao
E-OTD	<i>Enhanced Observed Time difference</i>
FCC	<i>Federal Communications Commission</i>
GDOP	Degradação Geométrica da Precisão
GPS	<i>(Global Positioning System)</i> Sistema de Posicionamento Global
LBS	<i>(Location Based Services)</i> Serviços Baseados em Localização.
LOS	Linha de Visada Direta
MS	Estação Móvel
MSE	<i>(Mean Square Error)</i> Erro Médio Quadrático
NLOS	Linha sem Visada Direta
PPS	<i>(Precision Positioning Service)</i> Serviço de Posicionamento Preciso
PSAP	<i>(Public Safety Answering Points)</i> Centrais Públicas De Atendimento de Segurança
RMS	<i>Root Mean Square</i>
RTT	<i>Round Trip Time</i>
SMS	Serviço de mensagem curta
SPS	<i>Standard Positioning Service</i>
TA	<i>Timing Advance</i>
TDoA	<i>(Time Difference of Arrival)</i> Diferença de Tempo de Chegada
ToA	<i>(Time of Arrival)</i> Tempo de Chegada
TTF	<i>Time to First Fix</i>
WAP	<i>Wireless Application Protocol</i>

## RESUMO

Em 1996, a Federal Communications Commission (FCC), órgão do governo dos EUA responsável pela regulamentação das atividades das operadoras de telecomunicações, adotou uma série de regras determinando a todas as operadoras de telefonia móvel o fornecimento, às centrais públicas de atendimento de segurança - PSAP (Public Safety Answering Points), da localização geográfica de um assinante que realizasse uma chamada de emergência 911. Este fato impulsionou o desenvolvimento de várias técnicas de localização geográfica de estações móveis, bem como o surgimento de diversos serviços baseados em localização, também conhecidos por LBS (location based services).

Diversas tecnologias de localização geográfica de estações móveis tem sido propostas e testadas nos últimos anos. As principais tecnologias apresentadas podem ser categorizadas em: tecnologias baseadas em terminais (handset based) e tecnologias baseadas na rede (network based). As tecnologias baseadas nos terminais são geralmente mais precisas, entretanto mais caras, pois envolvem alterações nos terminais existentes e na rede. Já as tecnologias baseadas na rede requerem apenas alterações na rede, além de serem mais flexíveis, resultando assim em menores custos de implementação e implantação. Diversos fatores são analisados para avaliação das técnicas como: precisão, tempo de resposta, capacidade do sistema, custo e etc. Entretanto a precisão é mais observada e pode ser avaliada através de diferentes medidas como erro médio quadrático (RMS), probabilidade de erro circular (CEP), diluição da precisão geométrica (GDOP), dentre outras. Dentre as diversas técnicas baseadas na rede, duas se destacam: TDoA (Time Difference of Arrival) e AoA (Angle of Arrival). Como estas duas técnicas se complementam na maioria dos esquemas de estações rádio bases (ERB's), elas podem trabalhar em conjunto formando um esquema híbrido TDoA/AoA que combine suas medidas.

Este trabalho analisou um método híbrido de localização que combina as medidas de diferença do tempo de chegada (TDoA) do sinal às ERB's, com apenas uma medida de ângulo de chegada (AoA). Através de simulações em ambientes distintos usando situações com visibilidade (LOS) e sem visibilidade (NLOS), este método apresentou uma elevada precisão na localização de estações móveis, quando comparado ao método TDoA. Foi verificada, ainda, a influência do número de estações rádio base e do desvio padrão das medidas na precisão das estimativas de localização.

Além disso, foi elaborada uma adaptação da técnica híbrida com objetivo de um melhor aproveitamento das medidas de TDoA e AoA, onde são utilizadas apenas os melhores resultados da combinação TDoA/AoA ou simplesmente TDoA, obtendo assim um sistema mais eficiente e com menor custo de implantação.

## ABSTRACT

In nineteen ninety six, the Federal Communications Commission (FCC), institution of USA government which is responsible for regulating the telecommunication companies actions , issued a group of rules obligating to all mobile telecommunications companies to supply to Public Safety Answering Points (PSAP) the geographic position of a person who had done an emergency call to 911. Therefore the development of several techniques of geographic localization of mobile phones was increased as well as it started new services based on localization, also known as "location based services" (LBS).

Several technologies of geographic localization of mobile phones have been proposed and tested on last few years. This study has analyzed a hybrid localization method that combines measurements of time difference of arrival (TDoA) to ERB's, with only one measurement of angle of arrival (AoA). Through simulations in different environments using visible situations (LOS) and non visible situations (NLOS), this method resulted in a high accuracy on mobile stations localization if compared to TDoA method. In addition to this, the influence of number of radio station bases and average-deviation on measurements of localization estimated accuracy was realized.

This study also elaborated a modification of hybrid technique in order to improve the use of measurements of TDoA and AoA, getting an efficient system with a cheaper cost of implantation.

## 1. SISTEMAS DE LOCALIZAÇÃO DE TERMINAIS MÓVEIS

### 1.1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o cenário de alta competitividade no mercado de telefonia móvel tem despertado o interesse das empresas do setor em oferecer serviços diferenciados, sendo um deles os serviços baseados em localização. Estes serviços surgiram nos Estados Unidos, impulsionados pelas regras (FCC, 1996) adotadas pela *Federal Communications Commission* (FCC), órgão do governo americano responsável pela regulamentação das atividades das operadoras de telecomunicações. As regras publicadas em 1996, determinavam que toda operadora de telefonia móvel deveria ser capaz de fornecer às centrais públicas de atendimento de segurança - PSAP (*Public Safety Answering Points*), a localização geográfica de um assinante que realizasse uma chamada de emergência 911. Esta iniciativa foi adotada principalmente em decorrência do alto número de chamadas de emergência (código 911 ou apenas a tecla 9), originadas de telefones celulares, cerca de 30% dos casos.

A decisão de cunho social foi bem recebida pelos usuários. Por outro lado, ela requer tecnologias sofisticadas, com significativo impacto nos custos das operadoras e dos fabricantes de terminais, gerando substancial aumento nos custos finais dos serviços.

Para obter retorno sobre o dinheiro investido, as operadoras começaram a imaginar serviços que pudessem ser tarifados com base no fornecimento da localização de algum usuário ou lugar, por ventura a ser encontrado. Dessa forma, surgiu a concepção comercial dos serviços baseados em localização, conhecidos como LBS (*location based services*).

Os sistemas celulares de terceira geração (3G) que se encontram em desenvolvimento, oferecerão uma grande variedade de serviços de comunicação multimídia e de serviços de localização do usuário. Entretanto, a implementação dos serviços de localização em tais sistemas ainda não foi totalmente desenvolvida,



restando assim uma área aberta para pesquisa. Mesmo sem estatísticas da evolução desses serviços, as empresas não têm dúvida de que se trata de um mercado de altíssimo potencial e já estão buscando parcerias para desenvolvimento de soluções que envolvem os recursos destinados à pesquisa nesta área.

As empresas buscam mecanismos que lhes garantam aumentar a base de seus assinantes, fidelizar os atuais clientes, bem como deter a redução da ARPU (receita média por assinante). Dentre algumas opções, os LBS se destacam como uma das opções mais atrativas. Isso porque a informação da localização do usuário móvel pode ser usada para serviços de segurança, para o faturamento da localização sensível, para o sistema de transporte inteligente, para realçar a performance da rede celular e etc.

Um outro fator importante relativo às tecnologias de localização é que possibilitam a viabilização do *m-commerce* (*mobile commerce*) e de grande parte dos serviços oferecidos por ele. Estas tecnologias permitem a seletividade das informações relevantes a serem disponibilizadas aos clientes de acordo com sua localização e necessidade.

Na realidade já existem, há alguns anos, técnicas de localização bem rudimentares como por exemplo a *Cell-ID* e a *Cell-sector*. Com a técnica *Cell-ID* pode-se determinar a célula em que o usuário se encontra, porém não há nenhuma precisão do ponto aproximado, podendo variar de alguns metros a alguns quilômetros. No caso da *Cell-Sector*, possibilita a verificação do setor de uma determinada célula em que o usuário está localizado, diminuindo assim a imprecisão da cobertura. Entretanto, tal solução não é sólida e estável para os serviços baseados em localização.

Recentemente muitas técnicas têm surgido para satisfazer as necessidades dos LBS. Estas técnicas vêm sendo desenvolvidas e podem ser divididas em duas filosofias distintas: tecnologias baseadas em terminais e tecnologias baseadas na rede. A primeira categoria tem por base a estação móvel ou MS, e nela destacam-se os sistemas GPS, A-GPS, Triangulação Avançada pelo Enlace Direto e Observação de tempos de Chegada. Já as tecnologias baseadas na rede, utilizam informações coletadas nas estações rádio base. Nesta filosofia destacam-se os métodos baseados em medidas da intensidade de sinal, ângulos de chegada (AoA), tempo de chegada (ToA) e diferença de tempo de chegada (TDoA).

Existem diferentes aplicações para os serviços baseados em localização (WANG), (ALI, 1999) com distintas exigências em seus sistemas de posicionamento. Algumas aplicações requerem mais precisão, outras não. Algumas possíveis aplicações são descritas a seguir

*Aplicações governamentais:* vários países estão procurando a legislação de certos critérios para posicionamento de estações móveis. Esta idéia vem das normas estabelecidas pela FCC nos Estados Unidos da América, em que 67% das chamadas de emergência provenientes de MS's deverão ser localizadas com precisão de 125 metros. Todavia, os sistemas de localização não se limitam a chamadas de emergência, pois apresentam outras funções como rastreamento de carros roubados, monitoração de frotas de cargas, bem como localização de criminosos que utilizam sistemas móveis de comunicação.

*Aplicações para operadoras:* os sistemas de posicionamento podem ser usados pelas operadoras para promover novos serviços, como por exemplo executar o planejamento de suas redes, melhorando sua eficiência. As operadoras podem, ainda, oferecer serviços de chamadas com menor custo, dependendo da localização da MS, que possibilitará maior competição com operadoras fixas locais. Outra aplicação está na utilização dos dados de localização em algoritmos de *handover*

*Aplicações comerciais :* consistem puramente em serviços oferecidos pelas operadoras como: localização mais próxima de restaurantes, hotéis, hospitais e etc. Busca-se, com os serviços de localização, a viabilização do *m-commerce* e de grande parte dos serviços oferecidos por ele, pois os sistemas de localização permitem selecionar informações relevantes a serem disponibilizadas aos clientes de acordo com sua posição geográfica e necessidade.

## 1.2. EVOLUÇÃO DAS COMUNICAÇÕES MÓVEIS

A evolução das comunicações móveis passa por várias etapas. É interessante observar pontos marcantes dessa trajetória que começa com Hans Christian Oersted em 1820, quando descobre experimentalmente que a corrente elétrica produz um campo magnético. O primeiro sistema de comunicação foi o telégrafo que, já na metade do século XIX, permitia a transferência de palavras faladas a longa distância pelo código Morse. Esse sistema era baseado na comunicação com fio. As equações de Maxwell, descrevendo a propagação de ondas eletromagnéticas, e os experimentos de Heinrich Hertz, foram a base para a descoberta da radiotelegrafia por Marconi, no final do século XIX. Em 1901, o Oceano Atlântico foi pela primeira vez, atravessado por sinais de rádio. Este foi o início dos sistemas de comunicações sem fio. O telefone, inventado por Alexander Graham Bell, foi um segundo sistema de comunicação, o qual evoluiu rapidamente e tornou-se uma tecnologia complementar ao telégrafo durante muitos anos. O início do século XX é marcado pela conexão via fios de cobre dos setores comerciais dos EUA. Já em 1928, existia um telefone para cada cem habitantes nos EUA. A tecnologia digital veio acelerar ainda mais esse processo. Os computadores surgem como uma terceira geração dos sistemas de comunicação. Tornaram a comutação telefônica também digital e reduziram sensivelmente a participação de operadores no sistema. Entretanto, as características de comunicação com fio e o elevado custo de acesso remoto ainda predominam. Esses fatores tornaram os sistemas sem fio atraentes, porém ainda dependentes significativamente das redes fixas. Nesse sentido, enquanto a tecnologia sem fio se expande rapidamente para as redes de acesso, com baixo custo independente da distância à rede pública, as redes fixas, pelo uso da fibra ótica e satélites, se complementam nas comunicações de longa distância. A aceitação das novas tecnologias pelos usuários é um fator importante no surgimento e desenvolvimento de novos serviços sem fio.

O primeiro sistema de comunicação móvel foi um sistema de rádio utilizado pela polícia de Detroit em 1928. De uma forma um pouco mais detalhada a evolução tecnológica seguiu os seguintes passos:

- 1820 Hans Christian Oersted (1777-1851) descobre experimentalmente que a corrente elétrica produz um campo magnético. André Marie Ampère (1775-1836) quantifica essa observação na Lei de Ampère.
- 1830 Joseph Henry (1799-1878) descobre que a variação do campo magnético induz uma corrente elétrica, mas não publica o resultado. Em 1831, Michael Faraday (1791-1867) descobre independentemente esse efeito que passaria a ser conhecido como a Lei de Faraday e, mais tarde, a terceira equação de Maxwell.
- 1864 James Clark Maxwell (1831-1879) modifica a Lei de Ampère, amplia a Lei de Faraday e desenvolve as quatro famosas equações de Maxwell sobre campos magnéticos.
- 1876 Alexander Graham Bell (1847-1922) inventa o telefone.
- 1887 Heinrich Rudolph Hertz (1857-1894) detecta as ondas eletromagnéticas previstas pelas equações de Maxwell.
- 1896 Guglielmo Marconi (1874-1937) inventa o primeiro receptor sem fio prático: o telégrafo sem fio.
- 1907 Início do serviço de radiodifusão comercial transatlântico (estações terrestres imensas: antenas de 30 x 100 m).
- 1914 Início da Primeira Guerra Mundial. Rápido desenvolvimento das comunicações e sua interceptação.
- 1921 Radiodifusão comercial entra em operação nos Estados Unidos.
- 1928 A polícia de Detroit introduz um sistema de acionamento de carros baseado em radiodifusão (unidirecional) na faixa de 2 MHz.
- 1934 A FCC autoriza o uso de quatro canais na faixa de 30-40 MHz.
- 1935 Modulação em Frequência - FM (*Frequency Modulation*) surge como alternativa para a modulação em Amplitude - AM (*Amplitude Modulation*), reduzindo os problemas de ruídos na transmissão, e melhorando o desempenho com relação a desvanecimentos.

**Formatado:** Numerada + Nível: 1 +  
Estilo da numeração: 1, 2, 3, ... +  
Iniciar em: 1921 + Alinhamento:  
Esquerda + Alinhado em: 0,75 cm +  
Tabulação após: 3,77 cm + Recuar  
em: 3,77 cm

- 1939 Pesquisa e uso da comunicação via rádio se expande imensamente durante a Segunda Guerra Mundial.
- 1945 AT&T Bell Labs inicia experimentos no uso de frequências mais altas com o objetivo de melhorar os serviços móveis.
- 1947 AT&T lança o IMTS (*Improved Mobile Telephone Service*), um sistema de transmissão onde apenas uma torre de alta potência atendia uma grande área ou cidade. Em seguida, AT&T Bell Labs propõe o conceito celular.
- Anos 50 Os sistemas requeriam uma elevada banda para transmissão, uma faixa de 120 kHz para transmitir um circuito de voz de apenas 3 kHz. Esta faixa é reduzida pela metade. Com os transistores os equipamentos reduzem de tamanho e já são transportáveis.
- Anos 60 Um novo receptor de FM permite reduzir a banda para 30 kHz, abrindo espaço para um maior número de canais de comunicação com o mesmo espectro. Bell Labs já testa as técnicas de comunicação celular e surgem os primeiros aparelhos portáteis;
- Anos 70 A FCC aloca um espectro de frequências para os sistemas celulares. Nesse período AT&T lança o sistema celular conhecido por AMPS(*Advanced Mobile Phone System*). Inicialmente era um serviço de luxo, destinado para uso em automóveis e de aplicação limitada tendo em vista a baixa durabilidade das baterias. Oferecia uma capacidade limitada de tráfego e um número reduzido de usuários. A primeira rede celular no mundo foi lançada no Japão em 1979.
- 1983 O sistema AMPS evoluiu para os padrões atuais com a primeira rede celular americana lançada em 1983, em Chicago e Baltimore. Outros sistemas similares entram em operação no mundo: TACS (*TotalAccess Communications System*) no Reino Unido (1985), NMT(*Nordic Mobile Telephone Service*) na Escandinávia (1981), NAMTS(*Nippon Advanced Mobile Telephone System*) no Japão. O AMPS ainda está em uso nos

EUA, Brasil e grande parte do mundo, É considerado um sistema de primeira geração. A transmissão em FM, reduzida a 25 kHz nos anos 70, entra nos anos 90 na faixa de 10kHz. Também surgem os sistemas de transmissão digital. Pelas técnicas de processamento digital de sinais foi possível reduzir a banda necessária, viabilizando os sistemas móveis digitais.

1991 Validação inicial dos padrões TDMA e CDMA nos EUA. Introdução da tecnologia microcelular.

1992 Introdução do sistema celular Pan-Europeu GSM (*Groupe Spéciale Mobile*).

1994 Introdução do sistema CDPD (*Cellular Digital Packet Data*). Início dos serviços PCS (*Personal Communication Services*) CDMA e TDMA.

1995 Início dos projetos para cobertura terrestre de satélites de baixa Órbita, como o Projeto Iridium.

1996 A FCC, órgão do governo americano, adota uma série de regras relativas à disponibilidade de serviços de emergência denominados 911 services e à implementação de um serviço de localização para sistemas móveis denominado E911.

1998 Término de implementação da fase 1 relativa aos sistemas de localização, estabelecidos pela FCC nos EUA, onde a célula e o número do usuário ( ANI - *Automatic Number Information*) que origina a chamada são identificados.

2001 em diante Implementação da fase 2 dos sistemas de localização que prevê a identificação do número (ANI) , sua localização (ALI - *Automatic Location Information*) e informação automática ao PSAP da latitude e longitude aproximadas da estação móvel originadora da chamada 911.

**Formatado:** Numerada + Nível: 1 +  
Estilo da numeração: 1, 2, 3, ... +  
Iniciar em: 1994 + Alinhamento:  
Esquerda + Alinhado em: 0,75 cm +  
Tabulação após: 3,77 cm + Recuar  
em: 3,77 cm

**Formatado:** Numerada + Nível: 1 +  
Estilo da numeração: 1, 2, 3, ... +  
Iniciar em: 1998 + Alinhamento:  
Esquerda + Alinhado em: 0,75 cm +  
Tabulação após: 3,77 cm + Recuar  
em: 3,77 cm

### 1.3. RECOMENDAÇÃO DA FCC PARA E-911

A *Federal Communications Commission* (FCC) é uma agência do governo dos Estados Unidos da América, de responsabilidade direta do congresso, que tem atuado desde 1934 na regulamentação das atividades das operadoras de telecomunicações.

A partir de junho de 1996, e após o estabelecimento de um *Consensus Agreement* entre operadoras e agências de segurança pública, a FCC adotou uma série de regras (FCC, 1996) relativas à disponibilidade de serviços de emergência denominados *911 services* e à implementação de um serviço para sistemas móveis denominado E911 (*Enhanced 911 for wireless services*).

De acordo com estas regras todas as operadoras de telefonia celular deveriam fornecer condições para a localização de um usuário dentro de áreas com até 125 metros. As chamadas de emergência (chamadas 911) e informações sobre a localização do usuário que origina a chamada, devem ser fornecidas às centrais públicas de atendimento de segurança – PSAP (*Public Safety Answering Points*).

Duas fases foram determinadas para implementação destes sistemas de localização :

#### **Fase1:**

A fase 1 consiste em identificar a célula e o número do usuário ( ANI - *Automatic Number Information*) que origina a chamada. Esta informação é fornecida ao PSAP mais próximo da região. Como a célula pode cobrir uma área bem extensa, a identificação deixa muito a desejar.

#### **Fase2:**

Esta fase consiste em fornecer informações bem mais precisas. Ela prevê a identificação do número (ANI) , sua localização (ALI - *Automatic Location Information*) e informação automática ao PSAP da latitude e longitude aproximadas da estação móvel originadora da chamada 911, num raio de 125 metros em 67% das ligações. O prazo estipulado teve início em 2001 e a previsão para término será em 2005.

A regulamentação prevê a possibilidade de utilização de dois tipos de tecnologia, com diferentes cronogramas de implementação: as tecnologias baseadas na rede (*network-based*) e as tecnologias baseadas nos terminais (*handset-based*). Cabe às operadoras a decisão de qual tecnologia adotar, dependendo da área geográfica ou da base de clientes.

#### 1.4. SERVIÇOS BASEADOS EM LOCALIZAÇÃO

A crescente necessidade de oferecimento de serviços de valor agregado durante o deslocamento das pessoas, incentivou o desenvolvimento de uma série de tecnologias destinadas a capacitar o usuário em acessar dados via celular. Entretanto, mesmo com a evolução de serviços e terminais móveis celulares, ainda deverá passar algum tempo até que o celular atinja um grau mínimo de conforto na interface para acesso a sites de *e-commerce* (comércio eletrônico). A clara necessidade de tornar as informações veiculadas via celular mais objetivas e úteis, faz com o que a tecnologia de localização seja reconhecida como parte fundamental para o *m-commerce*, que vem sendo apontado como o mais promissor mercado da categoria.

A plataforma de Serviços Baseados em Localização – LBS's (*Location Based Services*), oferece às operadoras e seus clientes, provedores de serviços e portais, uma variedade de serviços que combinam o perfil pessoal e a localização de cada usuário. Fornecer serviços sem fio baseados em localização é um desafio complexo do ponto de vista da tecnologia e dos negócios. É necessário que haja a integração em tempo real de vários elementos. Esses elementos são: determinação da localização, dispositivo de mapeamento, conteúdo e informação, aplicações, personalização e uma interface otimizada com o dispositivo do usuário final. Além disso é preciso um modo simples e de baixo custo para integrar esses elementos e introduzir serviços de localização.

As operadoras estão procurando um conjunto inicial de aplicações atraentes (tanto para usuários consumidores como para clientes corporativos) com as quais possam entrar no mercado e expandir-se com facilidade no decorrer do tempo.



Sabendo a localização atual do usuário e cruzando com as informações do perfil cadastrado, operadoras e anunciantes poderão oferecer uma variedade de novos serviços que ganham relevância e utilidade para o usuário, passando a fazer parte de seu dia a dia, representando assim um consumo maior de *airtime* e consequentemente fidelização do assinante para com a operadora. Exemplificando: um apreciador de comida japonesa poderá receber, onde ele estiver, o endereço do restaurante mais próximo que oferece este tipo de comida, o trajeto para chegar ao local, promoções e até o preço dos pratos. Mas as aplicações dessa tecnologia são mais amplas. Ela poderá ser utilizada para a localização de frota de veículos para transportadoras e taxistas, serviço de assistência técnica com determinação do profissional mais próximo do local, informações sobre trânsito, além de serviços de utilidade pública. Os LBS's são os serviços, em tempo real, que utilizam as informações sobre a localização do aparelho, em conjunto com o perfil do assinante. A combinação desses dois itens vai filtrar a enorme quantidade de informações contida na Web e adequá-las a determinados interesses do usuário naquele momento e local. Um usuário que esteja no centro da cidade, por exemplo, e quiser saber informações sobre o trânsito na região não precisará receber dados sobre o mesmo assunto em todos os pontos da cidade. As empresas que disponibilizarão os serviços ressaltam apenas que as pessoas terão que concordar em receber as informações para que o serviço não se torne incomodativo. Obviamente tudo isso será pago, mas ninguém ousa ainda falar em cifras, dizendo apenas que o custo-benefício será compensatório. As tecnologias de localização abrem as portas para um mundo de interessantes e lucrativos "Serviços Baseados em Localização" que prometem dar um outro sentido aos terminais de telefonia móvel, agregando valores em facilidade, praticidade, entretenimento e segurança (CAFFERY, 1999), (WANG,).

Os LBS's podem ser classificados basicamente em seis categorias:

#### 1.4.1. SERVIÇOS DE INFORMAÇÃO

Transformam o aparelho celular em um tipo de páginas amarelas ou guia de viagens móveis. Entre muitos outros serviços, quando o usuário estiver em uma

cidade desconhecida, por exemplo, basta tocar uma tecla do seu telefone para saber onde fica o hotel ou caixa eletrônico mais próximo; localizar uma farmácia, que abre aos domingos, ou consultar o calendário de eventos local e reservar bilhetes para o teatro.

#### 1.4.2. SERVIÇOS DE TARIFAÇÃO BASEADA NA LOCALIZAÇÃO – LSB

Serviços do tipo *Location-Sensitive Billing* permitem que a operadora ofereça um desconto para os minutos de ligações efetuadas em determinadas regiões da cidade, como por exemplo, próximo do escritório ou da residência assinante, incentivando o aumento de tráfego e fidelizando o assinante. Uma operadora celular pode oferecer tarifas próximas à da telefonia fixa para um raio de 100m da residência, fazendo com que o assinante use seu celular como um "telefone com fio", gerando *airtime*, e sendo uma operadora com um diferencial no mercado.

#### 1.4.3. SERVIÇOS DE EMERGÊNCIA

Imagine que em caso de um mal estar, um acidente ou qualquer situação de emergência, pelo simples teclar de três dígitos, por exemplo: \*99, os parentes do usuário, bem como seu médico pessoal, receberiam um aviso via SMS (mensagens curta), WAP (*Wireless Application Protocol*) ou Voz, informando o local onde ocorre o problema. É fácil perceber a tranquilidade que tal serviço pode gerar para parentes de pessoas idosas, ou portadoras de deficiência, que necessitem se locomover sozinhas pelas ruas. Outros tipos de serviços de emergência tipo 190 e similares podem ser acionados em caso de assalto, e outras situações de emergência, possibilitando uma ação mais eficiente por parte das autoridades.

#### 1.4.4. SERVIÇOS DE RASTREAMENTO DE VEÍCULOS E PESSOAS

Ao contrário do que ocorre com os atuais sistemas baseados em GPS, o rastreamento de um veículo ou de uma pessoa via celular, funciona mesmo quando o rastreado encontra-se dentro de uma garagem, de um caminhão ou qualquer local coberto pelo sinal da operadora celular. Desta forma, os serviços de rastreamento de frotas/mercadorias, não falham quando o veículo sair da visada do satélite. As seguradoras de veículos poderão oferecer um generoso desconto no valor do seguro, caso seja possível, após um roubo ou furto saber exatamente em que rua e quadra o veículo roubado se encontra. Os pais poderão saber onde estão seus filhos, se no contrato do serviço o usuário forneça autorização para divulgar esta informação.

#### 1.4.5. SERVIÇOS TIPO *M-COMMERCE*

O *e-commerce*, e agora o *m-commerce*, estão cada vez mais na base das transações comerciais dentro das sociedades geradas pela nova economia. A redução de custos e o melhoramento dos processos eletrônicos inerentes à nova economia, geram novos serviços e aplicações móveis, que gradualmente ocupam um lugar preferencial dentro dos mercados virtuais, assim como nos canais de vendas dos mercados tradicionais. O comércio móvel vem permitir uma maior personalização dos serviços oferecidos pelos agentes econômicos aos consumidores finais, já que, através das tecnologias de localização podem ser fornecidos serviços cada vez mais personalizados aos clientes.

#### 1.4.6. SERVIÇOS DE ENTRETENIMENTO E APROXIMAÇÃO DE PESSOAS

Várias modalidades de jogos estão aguardando para divertir os assinantes adolescentes e engordar as faturas das operadoras. Por outro lado, seria interessante se as pessoas pudessem ser avisadas sempre que estivessem a menos de 100 metros de um velho amigo ou parente por exemplo. São inúmeras as possibilidades de aplicações baseadas em localização, as quais estão apenas aguardando a tecnologia estar implantada, para abrir as portas a uma verdadeira explosão do *airtime*. Definitivamente, os *Location-Based Services* irão alterar a forma como veremos nosso telefone celular, que passará a ser uma imprescindível interface pessoal para um mundo de serviços, relacionamentos e informações.

#### 1.5. CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO

A avaliação das técnicas de localização depende do tipo de aplicação. O critério mais observado é a precisão, embora não seja o único. Diferentes critérios são usados nas avaliações de sistemas de posicionamento com aplicações diversas e são descritos a seguir.

##### 1.5.1. PRECISÃO

A precisão depende do tipo de aplicação. Existem várias medidas estatísticas que são utilizadas para definir a precisão dos sistemas de posicionamento, como erro médio, erro quadrático, probabilidade de erro circular e etc. Entretanto sua determinação é bastante complexa, pois depende do meio e da geometria da rede celular

### 1.5.2. COBERTURA DE POSICIONAMENTO

A área de cobertura ideal, para localização da MS, é aquela similar à área de cobertura de outros serviços celulares. O efeito perto-distante limita a cobertura dos métodos de localização. Nas bordas da rede ou em redes rurais pode ser impossível usar um número suficiente de estações rádio bases.

### 1.5.3. REDUÇÃO DA CAPACIDADE DE OUTROS SERVIÇOS

Sistemas de posicionamento baseados em células reduzem a capacidade para outros serviços de telecomunicações. Isso porque a capacidade do sistema decresce com o aumento da utilização de canais específicos para posicionamento ou transmissão de potência.

### 1.5.4. TEMPO DE RESPOSTA

O tempo de resposta nos serviços de localização constitui um critério que depende do tipo de aplicação. Algumas aplicações, como por exemplo, os serviços de emergência necessitam de maior rapidez na localização do que outras aplicações.

### 1.5.5. CAPACIDADE DE SERVIÇOS DE LOCALIZAÇÃO

Este critério determina a capacidade de um sistema na localização de um determinado número de estações móveis (MS's), numa área específica e durante um intervalo de tempo.

#### 1.5.6. CUSTO

O custo de implantação dos sistemas de localização é um fator importante, pois envolve as operadoras, os fabricantes de terminais móveis e conseqüentemente os usuários.

#### 1.5.7. CONSUMO DE POTÊNCIA

Este critério mede o consumo extra de potência, requisitado pela MS, para fornecer o serviço de localização da mesma.

#### 1.5.8. PRIVACIDADE DO USUÁRIO

Consiste, sem dúvida, num dos pontos mais polêmicos dos sistemas de localização, pois envolve a privacidade dos usuários. Vários questionamentos são feitos como:

- O usuário deve ter a oportunidade de bloquear a localização de sua MS?
- As autoridades devem ter acesso a localização de uma MS mesmo sem autorização de seu usuário?

**Formatado:** Com marcadores + Nível: 1 + Alinhado em: 0,7 cm + Tabulação após: 1,34 cm + Recuar em: 1 cm

## 1.6. FONTES DE ERROS EM SISTEMAS DE LOCALIZAÇÃO

### 1.6.1. PROPAGAÇÃO POR MULTIPERCURSO

A propagação por multipercurso provoca a recepção de múltiplos sinais na MS ou na ERB. Os sinais possibilitam combinações construtivas ou destrutivas em função de pequenos deslocamentos do móvel, resultando no fenômeno conhecido como desvanecimento de pequena escala. Os múltiplos sinais recebidos reduzem a precisão na determinação da intensidade do sinal, ângulos de chegada, tempos de chegada e diferenças de tempos de chegada. É possível estimar os múltiplos ângulos de chegada do sinal sujeito à propagação por multipercurso utilizando um conjunto de antenas (*array*) e técnicas de processamento adequadas, que acarretariam no aumento da complexidade e custo do equipamento na estação rádio base.

### 1.6.2. PROPAGAÇÃO SEM LINHA DE VISADA DIRETA (NLOS)

Na propagação sem linha de visada direta (NLOS), o sinal que chega às ERB's sofre reflexões ou difrações, resultando num percurso de propagação mais longo e ângulo de chegada distorcido daquele que se obteria na condição de visada direta, gerando erros de localização.

Infelizmente, esta é a situação mais comum em regiões urbanas densas, onde a ausência de visibilidade se combina com o efeito de multipercurso, reduzindo sensivelmente a precisão das estimativas, ainda que nestas regiões as distâncias das MS's às ERB's sejam reduzidas e haja maior probabilidade do sinal de um móvel ser recebido em um número maior de ERB's devido à superposição de células.

### 1.6.3. INTERFERÊNCIA POR MÚLTIPLO ACESSO (MAI)

Todo sistema celular sofre de interferência co-canal, mas ela é particularmente acentuada nos sistemas CDMA, no qual os usuários dividem a mesma banda com códigos de espalhamento diferentes. No enlace reverso, para que o ganho de processamento seja efetivo, permitindo separar os sinais das diversas estações móveis, é necessário um rígido controle de potência para garantir que os sinais dos diversos usuários sejam recebidos com igual potência na ERB evitando o chamado efeito perto-distante.

### 1.7. OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo deste trabalho foi o estudo detalhado das técnicas de localização de terminais móveis baseados em diferença de tempo de chegada TDoA (*Time Difference of Arrival*), ângulo de chegada AoA (*Angle of Arrival*) e com maior relevância para a técnica híbrida TDoA/AoA. Estas técnicas foram escolhidas devido aos melhores resultados apresentados em outros estudos (MARQUES, 2001), (CONG, 2002).

Com este trabalho procurou-se identificar as situações em que cada técnica possui maior grau de precisão. Para isso foram desenvolvidos algoritmos utilizando software MATLAB. Foram criados ambientes imaginários onde ambas as técnicas foram simuladas trabalhando isoladamente e em conjunto. O desempenho destes algoritmos foi avaliado levando em consideração possíveis erros nas medidas de TDoA's e AoA's.

Para finalizar, foi desenvolvida uma adaptação da técnica híbrida TDoA/AoA, com melhor aproveitamento das estimativas de TDoA/AoA ou simplesmente TDoA, envolvidas no sistema.



## 1.8. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está estruturada em 5 capítulos.

Conforme apresentado nas páginas anteriores, o capítulo 1 descreve a evolução das comunicações móveis, o que são e como surgiram os serviços de localização com suas aplicações, critérios de avaliação e fontes de erro.

O capítulo 2 relata as principais técnicas de localização desenvolvidas ou que se encontram em desenvolvimento, onde são apresentados os problemas e vantagens inerentes a cada técnica. Ao final, é exposto um comparativo entre estas técnicas.

O capítulo 3 apresenta um estudo detalhado das técnicas TDoA, AoA e híbrida TDoA/AoA. São apresentados os principais parâmetros necessários ao desenvolvimento dos algoritmos que avaliam o desempenho de cada técnica.

O capítulo 4 relata a metodologia utilizada nas simulações, apresentando os ambientes imaginários utilizados, ferramentas computacionais e os resultados obtidos através das simulações. O objetivo destas simulações consiste na análise do desempenho de algoritmos desenvolvidos em função dos erros de medidas de TDoA's e AoA's em ambientes com LOS e NLOS.

Por último, o capítulo 5 apresenta as principais conclusões obtidas durante o desenvolvimento deste trabalho e algumas propostas para possíveis pesquisas relativas ao assunto abordado nesta dissertação.

## 2. TECNOLOGIAS DE LOCALIZAÇÃO

### 2.1. INTRODUÇÃO

A localização celular determina a posição de uma estação móvel (MS) vinculada a um sistema de comunicações celular, tendo como principais desafios a elevada exatidão e o baixo custo da execução, considerando o ambiente de propagação celular.

As tecnologias já desenvolvidas ou que se encontram em desenvolvimento são categorizadas de acordo com a obtenção das coordenadas das estações móveis (MS's). Se os equipamentos de medição de dados forem colocados nas ERB's e todo o processamento matemático para obtenção da localização de uma determinada fonte ou MS for nelas executado, a solução é baseada na rede (*network-based*). Se a estação móvel possui equipamentos capazes de detectar parâmetros necessários para obtenção de suas coordenadas, a solução é baseada em terminais (ou *handsets*). Caso a estação móvel seja localizada pela união de tecnologias distintas, é denominada de solução híbrida.

### 2.2. SOLUÇÕES BASEADAS EM TERMINAIS

#### 2.2.1. GPS

GPS é um sistema desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos, nos últimos 20 anos. Ele é composto por 24 satélites (21 + 03 de *backup*), posicionados em órbitas conhecidas, que giram em torno do planeta Terra (a aproximadamente 10.900 milhas de altitude). Estes satélites fornecem informações de velocidade, latitude, longitude e altura dos receptores e processadores GPS.

Cada satélite possui no seu interior relógios atômicos, que possuem uma precisão de 1 segundo em 30 anos (GORGULHO, 2001).

Como o GPS foi desenvolvido com fins militares, foram criados dois tipos de serviços de localização:

- *PPS (Precision Positioning Service)* – Utilizado por usuários autorizados com equipamentos de criptografia e *receivers* especialmente equipados para usar o modo PPS. É usado pelo Departamento de Defesa americano, pelas forças militares aliadas aos EUA, agências do governo americano e alguns usuários civis selecionados pelo governo americano (observatórios, laboratórios, etc.).

*SPS (Standard Positioning Service)* – Usuários civis do mundo inteiro usam o SPS sem cobrança ou restrições. É o uso padrão do GPS. O SPS possui uma precisão mais degradada propositalmente (*Selective Availability Rule*) pelo Departamento de Defesa americano, pela disponibilidade de uso seletivo.

Quando está totalmente em operação, o GPS fornece informação sobre posição geográfica, data e horário as 24 horas do dia. Até 2 de maio de 2000 a precisão do serviço SPS era de 100 metros, depois mudando para os atuais 10 metros. Na prática a precisão tem variado entre 1 e 10 metros (USP).

O sistema GPS funciona com base no princípio da triangulação, conforme ilustrado na FIG. 2.1. Conhecendo a distância em relação a 3 ou mais satélites o receptor pode calcular a sua posição com base numa série de equações. A distância é calculada multiplicando o tempo que o sinal demora a chegar pela velocidade com que ele viaja (velocidade da luz  $\approx 3 \times 10^8$  m/s). Para o cálculo da longitude e latitude são necessários pelo menos 03 satélites e para o cálculo da altitude é necessário o acréscimo de mais um satélite.

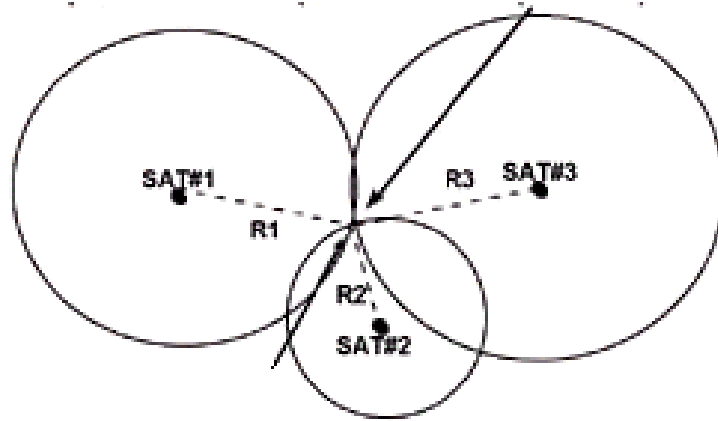


FIG. 2.1: Sistema GPS - Princípio da Triangulação

### 2.2.2. A-GPS (*WIRELESS ASSISTED GPS*)

Esta solução envolve a inclusão de receptores GPS nos terminais e a construção de uma rede de servidores GPS estacionários nas ERB's ou perto das células. Este esquema é ilustrado na FIG. 2.2.

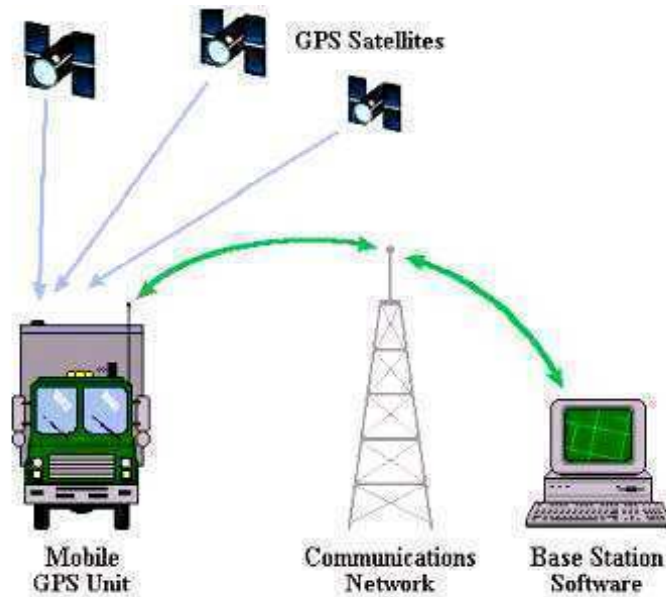


FIG. 2.2: Sistema A-GPS

O conceito consiste na distribuição das tarefas de posicionamento entre os terminais e os servidores GPS. Os servidores comunicam-se com os satélites e mapeam sua região de controle, passando os dados para os terminais. Dessa forma algumas funções que eram desempenhadas pelos terminais (no caso do sistema GPS tradicional) passam a ser de responsabilidade dos servidores, reduzindo assim o tempo de atualização das informações bem como, a aquisição de sinais mais fracos, além de uma significativa economia de energia do terminal (ZURSTRASSEN).

### 2.2.3. E-OTD (*ENHANCED OBSERVED TIME DIFFERENCE*)

Esta técnica usa a medida de tempos de chegada na estação móvel (MS) associada a recepção em estações de referência fixas na rede (ERB's), conforme mostra a FIG. 2.3. São necessárias alterações na estrutura da rede com a instalação de unidades de medição de localização a cada 4 células e algumas alterações no software dos terminais existentes para melhorar o processo de aquisição de medidas (ZURSTRASSEN).

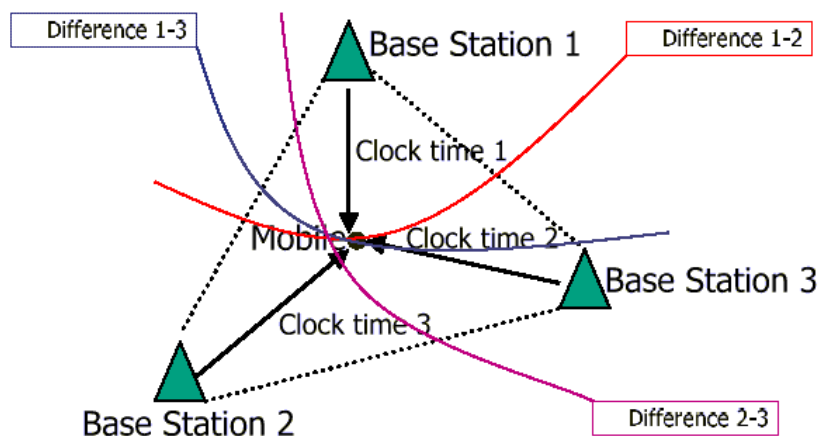


FIG. 2.3: Sistema E-OTD

Devido a esta tecnologia utilizar muitos recursos típicos de uma rede GSM, os custos de implementação para sistemas GSM são bem menores se comparados com outros padrões.

A MS monitora rajadas de transmissão de várias ERB's vizinhas e mede os tempos de deslocamentos entre as chegadas dos quadros GSM das ERB's com que ele está comunicando. Estas diferenças de tempo observadas são as medidas subjacentes do método de localização de E-OTD, as quais são usadas para encontrar a localização do dispositivo móvel. A exatidão do método de E-OTD é função da definição das medidas de diferença do tempo, da geometria das ERB's vizinhas, e do ambiente do sinal. A MS deve medir diferenças de tempo de pelo menos três ERB's para suportar a determinação bidimensional de localização (nenhuma medida de altitude é fornecida).

### 2.3. COMPARATIVO ENTRE AS SOLUÇÕES BASEADAS EM TERMINAIS

A grande vantagem das soluções baseadas em GPS é o grau de precisão da informação. Um nível de precisão de 10 metros pode ser obtido. Uma outra vantagem é a área de cobertura do GPS, que é mundial. Além disso, a tecnologia requer um mínimo ou até nenhum investimento na rede. Por outro lado todas as estações móveis deverão ser trocadas para suportar o GPS. Isto tem um alto custo, tanto para operadoras como para usuários. Um outro problema é a necessidade de uma linha de visada direta entre a MS ( GPS *receiver* ) e satélites. O GPS *receiver* não funciona muito bem em ambientes *indoor*. Existe ainda a falta de uma interface aérea universal. Nos EUA, por exemplo, existem sistemas CDMA, TDMA, GSM. Então seria necessária a fabricação de dispositivos GPS para cada interface.

O custo de implantação da tecnologia E-OTD é pequeno. É necessário a instalação de unidades de medição de localização em uma rede de ERB's. Entretanto, estas unidades são de fácil manuseio e possuem flexibilidade de instalação, podendo ser colocadas em qualquer lugar, desde que se cumpram os requisitos de cobertura. O custo para os aparelhos também é pequeno. A grande vantagem dessa tecnologia é que ela usa muitos recursos de uma rede GSM, e

consequentemente o custo de implantação para redes GSM são bem menores do que para outras interfaces aéreas. É exatamente por isso que algumas das maiores operadoras de GSM estão fazendo grande pressão para que essa tecnologia seja o padrão para redes GSM. Além da estrutura da rede, são necessárias algumas modificações no software das unidades móveis (muito menos que um tradicional GPS, que requer mudança na estrutura da antena e no software de medida) para melhorar o processo de medição.

## 2.4. SOLUÇÕES BASEADAS EM REDE

### 2.4.1. CELL-ID

Cell-ID é a solução mais simples, mas de menor precisão, para determinar a localização de uma estação móvel (MS). Requer à rede identificar a ERB com a qual a estação móvel ou MS está se comunicando, bem como a localização dessa ERB. Se esta informação estiver disponível, o Cell ID identifica a localização da MS como a localização da estação rádio base e passa esta informação para a aplicação do serviço de localização. Uma vez que a MS pode estar em qualquer lugar na célula, a exatidão deste método depende do tamanho de célula e pode ser muito ruim em muitos casos, já que a célula pode ter entre 2 km a 20 km de diâmetro. Reduzir a área de localização especificando o setor da célula é uma estratégia muito usada para melhorar o desempenho (BARROS, 2002). Este esquema é mostrado na FIG. 2.4.

O posicionamento é geralmente mais preciso em áreas urbanas com uma rede densa de células menores do que nas áreas rurais onde há poucas estações rádio base. Se microcélulas forem utilizadas, a área de localização pode ser reduzida significativamente para uma escala de centenas de metros. Entretanto, estas melhorias podem não ser inteiramente realizadas caso o telefone estiver operando no modo *soft-handoff*, que introduz uma ambigüidade na célula.

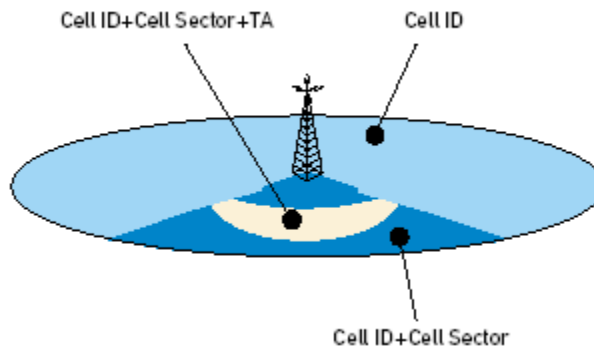


FIG. 2.4 – Localização baseada em Cell-ID com Cell Sector e TA

#### 2.4.1.1. CELL-ID COM TA (TIMING ADVANCE) OU RTT (*ROUND TRIP TIME*)

A exatidão do Cell ID pode ser mais eficaz incluindo uma medida de TA (*Timing Advance*) em redes GSM/GPRS ou RTT (*Round Trip Time*) em redes WCDMA. Medidas de TA e RTT usam a informação do tempo de *offset* emitida pela ERB para ajustar o tempo de transmissão relativa à MS para alinhar corretamente o tempo em que este sinal chega à ERB. Estas medidas podem ser usadas para determinar a distância da MS à ERB, reduzindo assim o erro da posição. Mesmo com estes incrementos esta tecnologia é uma das mais inconsistentes e de menor exatidão.

Geralmente, o rendimento e os TTF (Time to First Fix) são muito bons, mas a exatidão é fraca e a consistência da solução varia drasticamente, dependendo da densidade da célula. O problema se agrava nas áreas rurais onde as células têm uma distância maior umas das outras. Em termos de implementação, suporta *roaming* para redes de interface similar sem maiores modificações. É de fácil manutenção e não requer nenhum custo excepcional para expandir a rede. Apesar destas vantagens, a performance básica da exatidão suporta somente alguns dos possíveis serviços.



## 2.4.2. AoA

Uma das mais conhecidas abordagens do problema da localização é através da utilização do ângulo de chegada (AOA- *Angle Of Arrival*), ou seja, o cálculo do ângulo com que determinado sinal chega às antenas. Requer a instalação de receptores e antenas especiais nas ERB's. Esta tecnologia não requer modificações ou substituições dos aparelhos telefônicos existentes.

O AoA é determinado pela variação da fase dos sinais recebidos ao longo de um grupo de antenas. A diferença de fase do sinal entre antenas desse grupo resulta em ângulos recebidos, e isto pode ser referência da posição do móvel em relação a qualquer direção fixa.

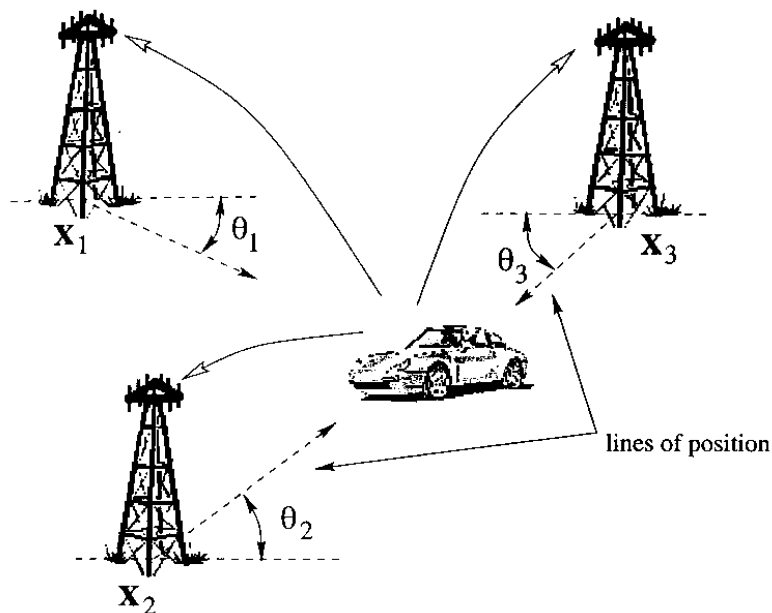


FIG. 2.5 - Localização baseada em AoA

O conhecimento do AoA de pelo menos dois receptores fornece a informação necessária para a localização da fonte do sinal. Pode-se aumentar a precisão com o acréscimo de bases receptoras. O desempenho dos métodos de localização baseados nos ângulos de chegada são limitados pela precisão das medidas, sendo esta uma característica do hardware e do algoritmo de estimação usado. Quando tal

sistema de localização é empregado, o desempenho torna-se dependente do meio de propagação, pois o espalhamento próximo e em torno da MS e da ERB afeta as medidas dos ângulos de chegada. O espalhamento causa o aparecimento de múltiplos sinais nas ERB's, o que introduz erros de estimação dos ângulos de chegada. Sem a presença de linha de visada direta (NLOS), o sinal captado pela antena pode não ser o da direção da MS. Mesmo que haja linha de visada direta (LOS), o multipercurso ainda afetará as medidas dos ângulos de chegada. A precisão do método diminui com o aumento da distância entre a MS e a ERB devido ao espalhamento e as limitações nos equipamentos usados para as medidas dos ângulos de chegada(CAFFERY, 1998).

#### 2.4.3. ToA

Esta técnica é baseada na estimação dos tempos de chegada do sinal transmitido pela MS e recebido em múltiplas ERB's. A distância entre a MS e a ERB é determinada achando o tempo de propagação do sinal entre eles. Geometricamente representa um círculo centrado na ERB. A interseção de 03 círculos determina a posição da MS e se resolve o problema de ambigüidade.

É necessária uma sincronização bastante precisa, entre as ERB's, para que os resultados possam localizar com exatidão o aparelho transmissor de sinais. Esta sincronização poderá ser obtida através de recursos dos sistemas ou com a utilização de equipamentos como o GPS. A maior parte do sinais utilizados são de forma conhecida e são codificados com largura de banda suficiente para que a recepção de 3 ou mais destes sinais possa determinar a localização do receptor.

Diferentemente do método AoA, os métodos baseados no tempo não se degradam com o aumento da distância entre a MS e a ERB. Não são necessários grandes conjuntos de antenas nas células. É mais fácil obter melhor precisão usando medidas de tempo ao invés de medidas de ângulo, porém é necessária uma linha de visada direta (LOS) entre a fonte e as ERB's para que isso seja possível.

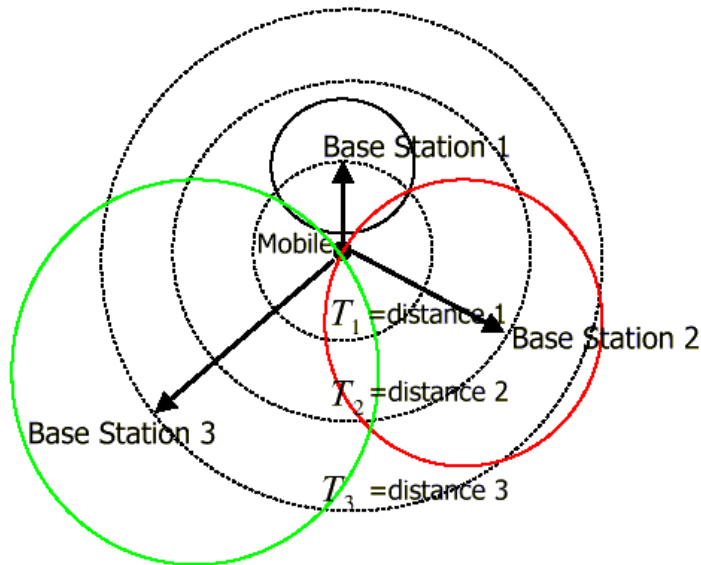


FIG. 2.6 - Localização baseada em ToA

Vários métodos têm sido propostos (CAFFERY, 1998) para estimar o tempo de chegada nos sistemas sem fio (*wireless*). Eles incluem técnicas de medidas de fase, transmissão de pulsos e espalhamento espectral.

- Medidas de Fase: em sistemas de alinhamento de fase, um tom de baixa frequência é transmitido e, uma vez recebido, é aplicado a um detector de fase do qual o tempo de chegada é obtido. Mais uma vez, três ERB's são necessárias para o posicionamento. Este sistema necessita que detectores de fase sejam sincronizados. Ambigüidades podem ser resolvidas usando diferentes frequências. Ocorrem erros significativos devido ao multipercurso. Assim o sinal resultante terá um erro de fase relativo ao sinal direto, o qual afetará a localização.
- Transmissão de Pulso: sistemas de alinhamento de pulso usam a transmissão de um único pulso, do qual o tempo de chegada é medido de vários receptores. Esta técnica pode ajudar a resolver o multipercurso desde que o primeiro pulso que chega possa ser considerado vindo do caminho direto. Infelizmente, pulsos estreitos que são necessários para se ter alta precisão, implicam numa grande largura de banda.
- Técnicas de Espalhamento Espectral (*Spread Spectrum*): com a sinalização *spread spectrum* os tempos de chegada podem ser determinados através do uso de técnicas de correlação. Devido a natureza dos sinais de espectro espalhado,

os efeitos do multipercurso podem ser reduzidos. Tal redução, é resultante da função autocorrelação de seqüências de espalhamentos periódicos o qual são tipicamente pequenas para retardos maiores que o período do chip.

#### 2.4.4. TDoA

A técnica TDoA requer receptores especiais nas ERB's e relógios precisos e sincronizados para a monitoração dos tempos de chegada.

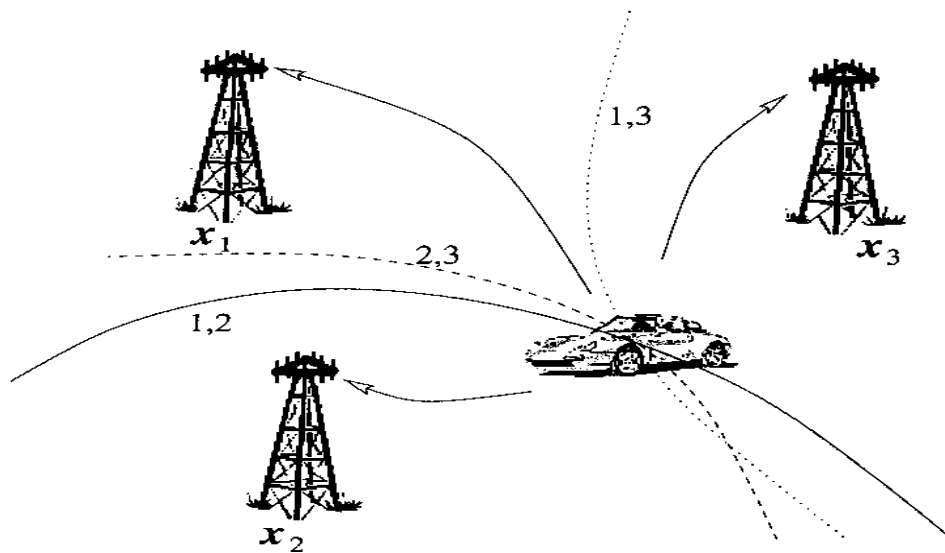


FIG. 2.7 - Localização baseada em TDoA

Os sistemas, que utilizam este método, usam tipicamente um transmissor de rádio freqüência na MS e receptores nas ERB's. Quando a MS emite o sinal para diferentes ERB's, os tempos de chegada são medidos em cada célula correspondente à ERB. Como o sinal trafega à velocidade da luz ( $\approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ), a diferença de tempo de chegada do sinal de um par de células pode ser usada para computar posições hiperbólicas em volta da MS. A interseção das hipérboles determina a posição do móvel (CAFFERY, 1998).

São necessárias pelo menos 03 células para determinar a posição do móvel.

#### 2.4.5. ANÁLISE DE MULTIPERCURSO

Quando um dispositivo móvel está localizado em uma área com muitos obstáculos, o sinal transmitido por ele sofre reflexões e difrações até chegar ao receptor. Com base nisto, esta técnica analisa os perfis de retardo observados na recepção dos sinais originados em diferentes pontos da área coberta. Nesta análise são feitas comparações dos perfis de retardo encontrados com uma grade de perfis previamente estabelecidos sobre a área coberta. A precisão depende essencialmente da resolução desta grade.

A linha direta de visada não é requerida pelas múltiplas células para localização da MS. Ela funciona efetivamente onde as reflexões em múltiplos caminhos são comuns. O problema é que estas reflexões não são tão constantes devido ao ambiente topográfico. Portanto, uma boa base de dados de padrões de frequência é fundamental para o bom funcionamento da tecnologia, o que requer sempre atualizações dos registros. Essa solução se adapta à infra-estrutura atual das operadoras. Somente uma ERB é requerida para receber o sinal e comparar com a base de dados. A grande dificuldade é manter sempre atualizados os registros da base de dados, pois caso contrário, pode-se obter uma imprecisão indesejável (COSTA, 2003).

#### 2.4.6. SISTEMA HÍBRIDO TDOA/AOA

Utilizando duas ou mais técnicas diferentes simultaneamente pode-se obter uma melhor precisão na estimação do posicionamento de uma fonte. Do ponto de vista geométrico, a solução é obtida a partir da interseção de curvas definidas pelos parâmetros de cada técnica, por exemplo uma reta definida pelo AoA interceptando hipérbolas definidas por TDoA's, conforme mostra a FIG. 2.8. Na prática, essa solução pode ser obtida através da combinação de estimativas de posição efetuadas independentes em cada sistema ou através da solução de equações formuladas a partir das medidas realizadas nos dois sistemas (MARQUES, 2001).

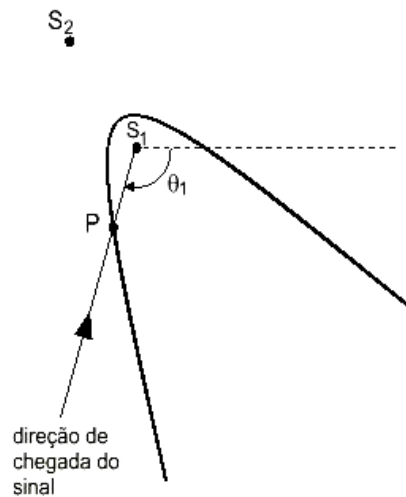


FIG. 2.8 – Método Híbrido de Localização TDoA/AoA

Os sistemas híbridos de localização mais comuns utilizados em redes celulares combinam AoA e ToA ou AoA e TDoA. A combinação de AoA com uma das outras técnicas permite a utilização de uma mesma estação rádio base para medir dois parâmetros diferentes associados ao mesmo sinal, tornando possível localizar um terminal mesmo que não exista um número suficiente de ERB's para captura do sinal e determinação da localização por apenas uma técnica. Um exemplo típico são as zonas rurais que não são propícias para ter três ou mais antenas recebendo o sinal devido à grande área de cobertura. Existem soluções (CONG, 2002) combinando AoA e TDoA para que se tenha um nível de precisão aceitável usando somente um par de ERB's.

## 2.5. COMPARATIVO ENTRE AS SOLUÇÕES BASEADAS NA REDE

A técnica baseada em Cell-ID, Cell-ID com TA e Cell-ID com RTT é a maneira mais simples de obter a localização de uma estação móvel. Entretanto, os esquemas que utilizam esta técnica não são uma solução atraente, pois a diversidade no tamanho da célula, a sua densidade e as características operacionais através de uma rede fazem a exatidão desta técnica inconsistente.

Os sistemas baseados em medidas de ângulo de chegada (AoA) necessitam, teoricamente, da recepção do sinal em apenas duas ERB's para localização da MS e não são necessárias alterações nos terminais dos usuários. Contudo, exigem a instalação de um conjunto de antenas em cada estação rádio base. Isso acarreta um alto investimento em infra-estrutura, embora exista hoje a expectativa de um aumento na demanda de instalações de antenas adaptativas. Entretanto isso deverá ser mais acentuado nas regiões de maior tráfego. Além disso os sistemas AoA's apresentam consideráveis sensibilidades às imperfeições do canal rádio, sendo necessário um ambiente LOS, isto é, uma linha de visada direta entre a fonte e os sensores instalados nas antenas, para obter uma melhor precisão nas medidas dos ângulos. Mesmo assim, as áreas suburbanas e rurais podem apresentar baixa precisão em situações nas quais os ângulos de chegada apresentam valores próximos, bastante comum no caso da cobertura ao longo de rodovias. Outro fator importante desta técnica é a calibração constante das antenas, pois pequenas distorções provocadas por ventos e tempestades podem resultar em erros significativos nas estimativas da posição da fonte. Apesar de não ser uma solução barata, é possível obter bons resultados utilizando as medidas de ângulo de chegada (AoA).

Os sistemas que utilizam a técnica baseada em tempo de chegada (ToA) não exigem grandes alterações na infra-estrutura da rede, porém necessitam do conhecimento do instante em que a fonte a ser localizada transmitiu o sinal. Isso implica em alterações nos equipamentos dos usuários. Além disso, esta técnica é bastante sensível a imperfeições no canal de rádio, principalmente em ambientes NLOS, isto é, quando não há linha de visada direta.

Já os sistemas baseados em diferença de tempo de chegada (TDoA), também conhecidos como sistemas hiperbólicos, não exigem alterações nos terminais dos usuários. Isto porque as estimativas de TDoA's dependem das diferenças dos tempos de chegada dos sinais e não dos instantes de transmissão, embora seja necessária a sincronização entre as ERB's para que a estimação seja efetuada. Esta sincronização poderá ser realizada através de equipamentos GPS instalados nas ERB's. Além disso estes sistemas são capazes de reduzir ou eliminar erros introduzidos pelo canal que sejam comuns aos dois receptores envolvidos nas medidas de um TDoA.

Uma solução com melhores resultados nos sistemas de posicionamento poderá ser encontrada utilizando uma combinação das técnicas AoA e TDoA. Cada técnica possui suas vantagens e limitações. Com o sistema híbrido uma técnica poderá suprir as limitações da outra. Por exemplo, a informação do AoA poderá resolver possíveis problemas de ambigüidade da aproximação de TDoA. O capítulo 3 aborda em detalhes esta solução híbrida.

## 2.6. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados os principais métodos existentes para determinação do posicionamento de estações móveis, tendo como base as próprias estações móveis ou a rede celular.

Dentre os métodos baseados em terminais, os que utilizam o GPS são bastante precisos, porém os custos de implantação são bem elevados, pois requerem grandes mudanças na estrutura da rede e no software de medição dos sinais. Já o E-OTD requer apenas algumas alterações na estrutura da rede e no software das unidades móveis para melhorar o processo de medição. Sua grande vantagem é a utilização de muitos recursos de uma rede GSM, reduzindo assim o custo de implantação para redes GSM.

O TDoA e o AoA se destacam como os principais métodos de posicionamento baseados na rede. Como estes dois métodos se complementam na maioria dos esquemas de ERB's, eles podem trabalhar em conjunto formando um esquema híbrido TDoA/AoA que combine suas medidas. Este esquema híbrido pode conseguir uma elevada precisão utilizando as principais características dos dois métodos, além de resolver possíveis problemas de ambigüidade e minimizar custos de implantação.

Foram apresentados também comparativos entre os métodos baseados em terminais e métodos baseados em rede, destacando assim suas vantagens e limitações.



### 3. MÉTODOS BASEADOS EM TEMPO DE CHEGADA (TDoA) E ÂNGULO DE CHEGADA (AoA)

#### 3.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo descreve detalhadamente métodos de localização celular baseados na rede que podem fornecer bons resultados quando utilizados isoladamente ou simultaneamente. O primeiro método de localização a ser introduzido é baseado no tempo, onde a diferença dos tempos da chegada (TDoA) do sinal à estação móvel (MS) é calculada. O segundo método é baseado no ângulo (AoA) com que determinado sinal chega à estação rádio base (ERB). Por último é exposto um método híbrido que combina as medidas de AoA e TDoA .

Nos sistemas baseados em TDoA, também conhecidos como sistemas hiperbólicos, o cálculo de estimativa da posição de determinada fonte é obtido primeiramente com a estimação das medidas de TDoA's para cada conjunto de sensores. Estas medidas são transformadas em diferenças de distância entre a fonte e os sensores multiplicando-as pela velocidade de propagação do sinal (no caso a velocidade da luz:  $\approx 3 \times 10^8$  m/s), resultando assim em um conjunto de equações hiperbólicas não lineares. A solução destas equações determina a posição da fonte.

A localização baseada em ângulo de chegada (AoA) é estimada tendo como base os ângulos dos sinais incidentes detectados pelas estações rádio bases (ERB's) fixas em pontos previamente determinados. A determinação da posição da fonte pode ser obtida utilizando apenas duas ERB's.

Ambos os métodos TDoA e AoA têm suas próprias vantagens e limitações. Por exemplo, um esquema que utiliza TDoA requer ao menos três estações rádio bases (ERB's), corretamente alocadas para determinação da localização bidimensional da estação móvel (MS), e tem geralmente uma melhor exatidão do que um esquema de AoA. Entretanto o esquema de AoA requer somente duas ERB's, no mínimo, para uma estimativa de localização. Porém, um pequeno erro na medida do ângulo

resultará em um grande erro na localização, quando a MS estiver bastante afastada de todas as ERB's envolvidas.

Como os métodos de localização baseados em TDoA e AoA se complementam eles podem trabalhar em conjunto, formando um esquema híbrido TDoA/AoA que combina suas medidas. Este esquema de localização possui as características desejadas nos sistemas celulares de terceira geração (3G) para baixos custos de sinalização e de implementação. Além disso, o esquema proporciona alta precisão em sistemas de localização.

Ao final deste capítulo são apresentadas ainda as principais medidas de precisão utilizadas para avaliar o desempenho dos algoritmos desenvolvidos a partir dos métodos de localização referenciados neste trabalho.

### 3.2. TDoA

Esta técnica utiliza um número de sensores ou estações rádio base (ERB's) especialmente separados que capturam o sinal emitido por uma estação móvel (MS) e as diferenças dos tempos de chegada (TDoA's) até os sensores são determinadas. Usando estes TDoA's a localização da MS pode ser definida.

A localização é simplificada quando os sensores são arranjados em uma configuração linear. A situação mais complexa ocorre quando os sensores são distribuídos arbitrariamente. Neste caso, são obtidas as estimativas de TDoA's através da correlação cruzada entre os sinais capturados por dois sensores. Para que isso seja possível é necessário que todos os sensores estejam sincronizados. Esta técnica de correlação cruzada envolve a captura dos sinais, a digitalização de um segmento de tamanho fixo destes sinais e o envio para uma central de processamento, onde o cálculo de correlação é efetuado.

A posição da fonte é determinada através da interseção de um conjunto de curvas hiperbólicas determinadas pelas estimativa de TDoA's . Estas estimativas são transformadas em diferenças de distâncias multiplicando-as pela velocidade de propagação do sinal (ou velocidade de propagação da luz,  $c \approx 3 \times 10^8$  m/s).

Estas medidas de diferença de distância resultam em um conjunto de equações hiperbólicas não lineares, cuja solução é bastante complexa. Esta solução é exata ou única quando o número de medidas de TDoA's é igual ao número de coordenadas da fonte. Caso contrário sua determinação torna-se mais difícil mas fornece maior precisão em presença de erros de medida resultantes de efeitos de multipercurso.

Várias técnicas de processamento têm sido propostas com diferentes complexidades e restrições (CHAN, 1994), (SCHMITH, 1987), (ABEL, 1990). Dentre elas encontra-se o método da série de Taylor (FOY, 1976) que proporciona níveis razoáveis de erros na estimativa da posição de uma MS. Consiste num método iterativo que inicia com uma suposição inicial da posição da MS e que a cada conjunto de medidas a estimativa apresenta um ganho de precisão para determinação da posição da MS. Porém, uma suposição inicial bem próxima da verdadeira é necessária para um bom desempenho desta técnica.

### 3.2.1. MODELO MATEMÁTICO GERAL PARA SOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES HIPERBÓLICAS

O desenvolvimento é feito em um plano bidimensional conforme a ilustração da FIG. 3.1.

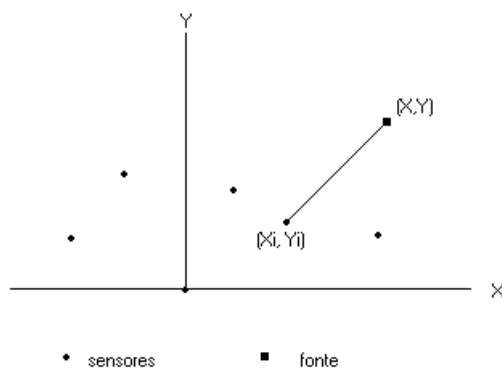


FIG. 3.1 – Plano de referência para solução das equações hiperbólicas

Assume-se que existem M sensores (ERB's) distribuídos arbitrariamente neste plano bidimensional com índice i. Chamando as coordenadas desconhecidas da MS de (x, y) e as coordenadas conhecidas da i-ésima ERB de (X<sub>i</sub>, Y<sub>i</sub>), pode-se dizer que a distância entre a MS e o i-ésimo sensor é dada por:

$$R_i = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2} \quad , \quad i=1,2,\dots,M \quad (3.2.1)$$

Escolhendo um sensor de referência com índice i=1 pode-se dizer que a distância entre a MS e este sensor é dada por:

$$R_1 = \sqrt{(X_1 - x)^2 + (Y_1 - y)^2} \quad (3.2.2)$$

Logo, a diferença de distância entre a i-ésima ERB (i = i) e à ERB de referência (i = 1) é dada por:

$$R_{i1} = cd_{i1} = R_i - R_1 = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2} - \sqrt{(X_1 - x)^2 + (Y_1 - y)^2} \quad (3.2.3)$$

onde c é a velocidade de propagação do sinal ( $c \approx 3 \times 10^8$  m/s) e  $d_{i,1}$  é o TDoA estimado entre o i-ésimo sensor (i= 2,...,M) e o sensor de referência (i=1).

A equação 3.2.3 define um conjunto de equações não lineares cuja solução corresponde às coordenadas da MS (x,y). Esta solução é bastante complexa.

As estimativas de TDoA's possuem um grau de incerteza, associado aos erros das medidas, devido aos efeitos de reflexão, difração e multipercursos no canal móvel celular. Estas incertezas podem ser modeladas assumindo-se que o vetor  $\underline{d}$  é composto pela soma do vetor  $\underline{d}^0$ , que contém os valores de TDoA's que seriam obtidos em um ambiente ideal, com o vetor  $\underline{n} = [n_{21}, n_{31}, \dots, n_{M1}]^T$  que representa os erros nas medidas provocados pelo ambiente real, ou seja,

$$\underline{d} = \underline{d}^0 + \underline{n} \quad (3.2.4)$$

$$\text{onde } \underline{d}^0 = [d_{21}^0, d_{31}^0, \dots, d_{M1}^0]^T. \quad (3.2.5)$$

Segundo estudo (MARQUES, 2001) já realizado, este vetor  $\underline{n}$  pode ser considerado Gaussiano de matriz covariância Q e valor esperado  $E[\underline{n}] = \underline{0}$  sendo  $\underline{0}$  um vetor onde todas as componentes são nulas. Quanto à matriz covariância Q, supõe-se que os erros em cada tempo de chegada medido possam ser modelados por variáveis aleatórias Gaussianas ( $n_i, i = 1, \dots, M$ ) identicamente distribuídas de média nula e variância  $\sigma_n^2$ . Assim,  $E[n_{i1}] = E[n_i] - E[n_1] = 0$ ,  $var(n_{i1}) = var(n_i) + var(n_1) = 2\sigma_n^2$  e  $cov(n_{i1}, n_{j1}) = var(n_i) = \sigma_n^2$  com  $i, j = 2, \dots, M, i \neq j$ . A partir destas suposições a matriz covariância Q das estimativas de TDoA's será dada por

$$Q = 0.5 \sigma_d^2 [I + \underline{1}\underline{1}^T] \quad (3.2.6)$$

onde,  $\sigma_d^2 = 2\sigma_n^2$ , I é a matriz identidade de ordem M-1 e  $\underline{1} = [1, \dots, 1]^T$ .

A linearização pela expansão em série de Taylor é um método bastante utilizado para simplificar a solução das equações geradas pelas estimativas de TDoA's (MARQUES, 2001), (COSTA, 2003). Com um conjunto de estimativas de TDoA's ( $d_{i,1}$ ), o método começa com uma suposição inicial  $(x_0, y_0)$  e em seguida calcula os desvios da estimativa da posição da MS.

$$\begin{bmatrix} \Delta_x \\ \Delta_y \end{bmatrix} = (G_t^T Q^{-1} G_t)^{-1} G_t^T Q^{-1} \underline{h}_t \quad (3.2.7)$$

onde,

$$\underline{h}_t = \begin{bmatrix} R_{21} - (\tilde{R}_2 - \tilde{R}_1) \\ R_{31} - (\tilde{R}_3 - \tilde{R}_1) \\ \vdots \\ R_{M1} - (\tilde{R}_M - \tilde{R}_1) \end{bmatrix} \quad (3.2.8)$$

e

$$G_T = \begin{bmatrix} (X_1 - x)/\tilde{R}_1 - (X_2 - x)/\tilde{R}_2 & (Y_1 - y)/\tilde{R}_1 - (Y_2 - y)/\tilde{R}_2 \\ (X_1 - x)/\tilde{R}_1 - (X_3 - x)/\tilde{R}_3 & (Y_1 - y)/\tilde{R}_1 - (Y_3 - y)/\tilde{R}_3 \\ \vdots & \vdots \\ (X_1 - x)/\tilde{R}_1 - (X_M - x)/\tilde{R}_M & (Y_1 - y)/\tilde{R}_1 - (Y_M - y)/\tilde{R}_M \end{bmatrix} \quad (3.2.9)$$

Os valores de  $\tilde{R}_i$ ,  $i = 1, \dots, M$  são computados através da equação abaixo:

$$\tilde{R}_i = \sqrt{(X_i - x_o)^2 + (Y_i - y_o)^2} \quad (3.2.10)$$

onde  $(x_o, y_o)$  corresponde, na primeira iteração, à estimativa inicial de posição do móvel. Nas próximas iterações, os valores de  $x_o$  e  $y_o$  são então atualizados para  $x_o + \Delta_x$  e  $y_o + \Delta_y$ . O processo se repete até que  $\Delta_x$  e  $\Delta_y$  atinjam valores toleráveis, previamente estabelecidos.

O método de linearização por série de Taylor tem a desvantagem de necessitar um grande esforço computacional e uma escolha de  $(x_o, y_o)$ , à priori, bem próxima da posição real da MS, senão a convergência não é garantida.

No capítulo 4 são feitas simulações para avaliação da precisão do método TDoA utilizando cenários variados com várias combinações de ERB's situadas em pontos diversos.

### 3.3. ÂNGULO DE CHEGADA (AoA)

A medida do ângulo de chegada (AoA) é uma técnica usada em sistemas de localização de estações móveis (MS), dentre diversas outras (KRIZMAN, BIEDKA AND RAPPAPORT, 1997). A localização é estimada tendo como base os ângulos dos sinais incidentes, detectados pelas estações rádio base (ERB's) fixas em pontos previamente determinados. Pelo menos duas ERB's são requeridas para a determinação da longitude e latitude de uma MS. Uma grande vantagem da escolha de um sistema de localização baseado em AoA é que esta tecnologia não requer modificações ou substituições dos aparelhos telefônicos existentes. Além disto o sistema pode monitorar continuamente o canal de tráfego reverso.

Dentre as diversas fontes de erro na estimação do AoA podem ser citadas como principais a polarização durante a colocação das antenas nas ERB's, o ruído inserido na medida angular devido aos sinais de multipercurso e as medidas sem linha de visada direta (NLOS).

O primeiro problema que refere-se à polarização na colocação das antenas pode ser minimizado com a calibração e a manutenção periódica dos sistemas de antenas. Já o aparecimento de ruídos nas medidas angulares devido, principalmente, aos fatores de multipercurso, requer algoritmos especiais. Este problema foi estudado com grande esforço no passado e alguns algoritmos de alta resolução foram desenvolvidos e encontram-se disponíveis na literatura técnica (SCHIMIDT, 1986). A terceira fonte de erros, mencionada acima, refere-se a ausência de um trajeto direto, ou uma linha de visada direta, entre a fonte e a estação base, sendo o ponto crítico na localização da fonte (SILVENTOINEN and RANTALAINEN, 1995), (WYLIE and HOLZMAN, 1996). A linha de visada direta entre fonte e receptor na maioria das vezes não ocorre, principalmente em regiões urbanas densas, onde a ausência de visibilidade se combina com o efeito de multipercurso reduzindo sensivelmente a precisão das estimativas

Esta seção analisa a performance da técnica AoA na estimação da localização do móvel e mostra a dependência da precisão da localização com o desvio padrão das medidas angulares realizadas nas ERB's.

### 3.3.1. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

A formulação do problema (XIONG, 1998) será feita considerando que existem  $M$  estações radio-base (ERB's) fixadas em posições conhecidas  $(x_i, y_i)$  (com  $i=1, \dots, M$ ). A  $i$ -ésima estação base pode detectar a direção do  $\theta_i$  no azimute do ângulo dos sinais transmitidos pelo móvel. Em condições perfeitas, isto é, condição de linha de visada direta (LOS) entre transmissor e receptor, todos os feixes medidos pelas ERB's devem-se interceptar na posição verdadeira do móvel cujas coordenadas são chamadas por  $(x, y)$ . Entretanto, devido aos erros das medidas, é provável que estes feixes desviem do AoA verdadeiro por  $\psi_i$ , conforme representado na FIG. 3.2.

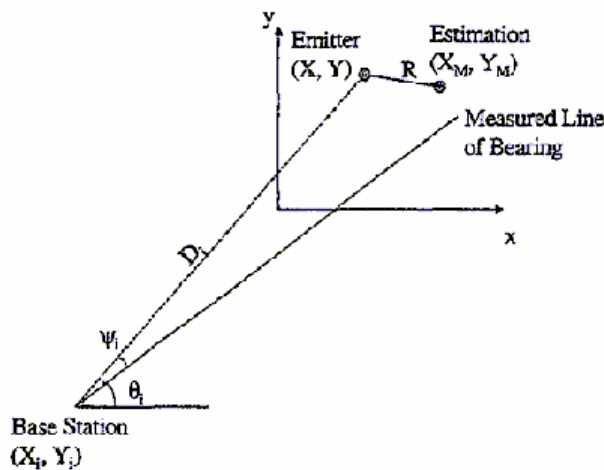


FIG. 3.2 – Configuração bidimensional utilizada na determinação do AoA

Segundo XIONG, o problema é encontrar a probabilidade máxima da posição do transmissor com um conjunto de dados em  $\theta_i$ .



### 3.3.2. O MODELO BÁSICO

Supondo que (XIONG, 1998) a polarização da medida angular seja insignificante e seu erro seja descrito adequadamente por uma distribuição gaussiana, pode-se escrever a probabilidade de encontrar a linha verdadeira na direção de  $\theta_i + \psi_i + d\psi$  como sendo:

$$P(\psi_1 \dots \psi_N) d\psi_1 \dots d\psi_N = \frac{1}{(2\pi)^{N/2} \sigma_1 \dots \sigma_N} \exp\left[-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \frac{\psi_i^2}{\sigma_i^2}\right] d\psi_1 \dots d\psi_N \quad (3.3.1)$$

onde:  $\sigma_i$  na equação acima é o desvio padrão do erro angular.

Caso este desvio seja bastante pequeno a região incerta da posição do móvel torna-se também pequena, comparada à escala de distância entre o móvel e a estação base. O erro angular pode ser desprezado e  $\psi_i$  pode ser expresso como sendo:

$$\psi_i = \frac{|(x - x_i) \sin \theta_i - (y - y_i) \cos \theta_i|}{D_i} \quad (3.3.2)$$

onde  $D_i$  é a distância da  $i$ -ésima estação base à fonte.

A posição do móvel com máxima verossimilhança é uma com coordenadas  $(X_M, Y_M)$  que maximizem a distribuição acima, ou minimizem a soma dos quadrados dos expoentes, desde que o limite do menor ângulo  $\psi_i$  seja linear com  $(X < Y)$ , como mostrado na equação acima, onde existe uma solução analítica deste problema. As coordenadas da probabilidade máxima da posição do móvel são:

$$X_M = \left\{ \sum_{i=1}^N \frac{\cos^2 \theta_i}{D_i^2 \sigma_i^2} \left[ \sum_{i=1}^N \frac{\sin^2 \theta_i X_i}{D_i^2 \sigma_i^2} - \sum_{i=1}^N \frac{\sin \theta_i \cos \theta_i Y_i}{D_i^2 \sigma_i^2} \right] + \sum_{i=1}^N \frac{\sin \theta_i \cos \theta_i}{D_i^2 \sigma_i^2} \left[ \sum_{i=1}^N \frac{\cos^2 \theta_i Y_i}{D_i^2 \sigma_i^2} - \sum_{i=1}^N \frac{\sin \theta_i \cos \theta_i X_i}{D_i^2 \sigma_i^2} \right] \right\} /$$

$$\left[ \sum_{i=1}^N \frac{\sin^2 \theta_i}{D_i^2 \sigma_i^2} \sum_{i=1}^N \frac{\cos^2 \theta_i}{D_i^2 \sigma_i^2} - \left( \sum_{i=1}^N \frac{\sin \theta_i \cos \theta_i}{D_i^2 \sigma_i^2} \right)^2 \right]$$

(3.3.3)

$$Y_M = \left\{ \sum_{i=1}^N \frac{\sin^2 \theta_i}{D_i^2 \sigma_i^2} \left[ \sum_{i=1}^N \frac{\cos^2 \theta_i Y_i}{D_i^2 \sigma_i^2} - \sum_{i=1}^N \frac{\sin \theta_i \cos \theta_i X_i}{D_i^2 \sigma_i^2} \right] + \sum_{i=1}^N \frac{\sin \theta_i \cos \theta_i}{D_i^2 \sigma_i^2} \left[ \sum_{i=1}^N \frac{\sin^2 \theta_i X_i}{D_i^2 \sigma_i^2} - \sum_{i=1}^N \frac{\sin \theta_i \cos \theta_i Y_i}{D_i^2 \sigma_i^2} \right] \right\} /$$

$$\left[ \sum_{i=1}^N \frac{\sin^2 \theta_i}{D_i^2 \sigma_i^2} \sum_{i=1}^N \frac{\cos^2 \theta_i}{D_i^2 \sigma_i^2} - \left( \sum_{i=1}^N \frac{\sin \theta_i \cos \theta_i}{D_i^2 \sigma_i^2} \right)^2 \right]$$

(3.3.4)

O desvio padrão do ângulo medido  $\sigma_i$  é o parâmetro crítico no modelo. Ele caracteriza realmente a inclusão de todas as incertezas no ambiente e no sistema. Vale a pena observar que quando todos  $\sigma_i$  são iguais, eles poderão ser desprezados das equações acima automaticamente. O mesmo pode ser adotado para os  $D_i$ 's, quando são iguais.

Devido a complexidade deste modelo e a necessidade de um alto investimento para sua implantação, este método de localização não fará parte do escopo de simulação deste trabalho. Entretanto, simulações já realizadas em outros estudos (XIONG,1998) mostram uma dependência quase linear entre medidas de precisão, como de RMS (raiz quadrada do erro médio quadrático) com o desvio padrão das medidas angulares realizadas nas estações bases.

### 3.4. SISTEMA HÍBRIDO TDoA/AoA

Esta seção descreve um esquema de localização híbrido TDoA/AoA diferenciado (CONG, 2002). Para conseguir uma elevada exatidão da localização e um baixo custo de implementação, o esquema de localização combina as medidas de diferença do tempo de chegada (TDoA) do sinal, no enlace direto, com a medida do ângulo de chegada (AoA) do sinal, no enlace reverso. Este esquema difere dos demais porque requer a medida do ângulo de chegada dos sinal, emitido pela fonte, detectada apenas pela ERB de referência, além de utilizar as principais características das técnicas TDoA e AoA.

Conforme exposto no item 3.2, as equações do estimador de localização baseadas nas medidas de diferença de tempo de chegada (TDoA) são geralmente não lineares e suas soluções não são triviais, principalmente quando estas medidas são ruidosas. Em FOY e TORRIERI, a solução para as equações dos TDoA's é obtida pela linearização das equações através da expansão da série de Taylor. A aproximação da série de Taylor pode conseguir alta exatidão, mas requer uma suposição inicial (*a priori*) da localização e pode sofrer pelo problema da convergência se a suposição inicial não for bastante exata.

#### 3.4.1. VANTAGENS DO MÉTODO HÍBRIDO TDoA/AoA

Este método híbrido de localização TDoA/AoA explora os recursos de sinalização e de sistema, como nas propostas dos sistemas 3G, para elevada exatidão da localização com um baixo custo de implementação.

O método híbrido possui várias vantagens em relação a outros como:

- A incorporação dos méritos de TDoA e do AoA. Com a informação de AoA, o esquema de localização requer somente duas ERB's para uma estimativa de localização. Mas, quando há mais de duas ERB's disponíveis, o método conseguirá uma elevada precisão na aproximação de TDoA.

**Formatado:** Com marcadores + Nível: 1 + Alinhado em: 0,75 cm + Tabulação após: 1,38 cm + Recuar em: 1,38 cm

- A informação do AoA poderá resolver problemas de ambigüidade que a aproximação de TDoA poderá gerar. Esta ambigüidade ocorre quando as hipérbolas definidas pelas medidas de TDoA, numa configuração 1D (*one-dimensional*), se interceptam em dois pontos distintos. Tornando-se necessária a informação, adicional, de outra hipérbole ou de outro método como o AoA, quanto a localização da MS (MARQUES, 2001).
- Evitar alguns inconvenientes do método de localização de AoA como: a instalação de um complexo conjunto de antenas nas ERB's que requer alto custo de implantação e baixa precisão nas medidas de AoA devido ao efeito perto-distante ou a interferência co-canal (comum em sistemas CDMA).
- No esquema de localização híbrido TDoA/AoA, o AoA é medido somente na ERB servidora. Além disso, como a MS está relativamente perto de sua ERB servidora, geralmente existe a situação de visibilidade (LOS) entre elas, ocorrendo assim pequenos erros na medida de AoA.
- Com a aproximação TDoA, a MS não precisa estar sincronizada com todas as ERB's, tendo por resultado um receptor (instalado na MS) mais simples em comparação àquele que usa uma aproximação ToA.

**Formatado:** Com marcadores + Nível: 1 + Alinhado em: 0,75 cm + Tabulação após: 1,38 cm + Recuar em: 1,38 cm

**Formatado:** Com marcadores + Nível: 1 + Alinhado em: 0,75 cm + Tabulação após: 1,38 cm + Recuar em: 1,38 cm

**Formatado:** Com marcadores + Nível: 1 + Alinhado em: 0,75 cm + Tabulação após: 1,38 cm + Recuar em: 1,38 cm

A performance do esquema de localização híbrido TDoA/AoA pode ser avaliada usando os métodos Raiz Quadrada do Erro Médio Quadrático (RMS) e o Limitante de Crámer Rao (CRLB).

### 3.4.2. DETALHAMENTO DO ESQUEMA HÍBRIDO TDoA/AoA

Considerando uma localização bidimensional e supondo que, as ERB's estejam sincronizadas no tempo, através de recursos do próprio sistema ou de equipamentos como o GPS, em algum momento, a MS a ser encontrada poderá receber os sinais pilotos (ou sinais de *paging*) do enlace direto de sua ERB servidora e de pelo menos uma ERB vizinha. Duas medidas podem ser realizadas após recebimento do pedido de localização:

**-1)** Medidas de TDoA no receptor da MS – Como todas as ERB's estão sincronizadas no tempo, o receptor da MS pode medir a diferença do tempo

**Formatado:** Recuo: À esquerda: 0 cm, Primeira linha: 2 cm, Vários níveis + Nível: 1 + Estilo da numeração: 1, 2, 3, ... + Iniciar em: 1 + Alinhamento: Esquerda + Alinhado em: 0,63 cm + Tabulação após: 1,27 cm + Recuar em: 1,27 cm

de chegada entre os sinais da ERB servidora e os sinais de outra ERB, através de um código PN que segue o traçado do cruzamento dos sinais. O sinal de cada uma das ERB's pode ser usado na localização da MS, desde que a relação sinal ruído (SNR) deste sinal, proveniente da ERB e recebido na MS, esteja acima de um determinado ponto inicial. O efeito da interferência de ruídos na precisão da medida de TDoA pode ser reduzido aumentando o tempo de integração do traçado.

2) Medidas do AoA na ERB servidora - com um conjunto de antenas adaptativas, a ERB servidora direciona seu feixe de antenas para seguir o sinal do enlace reverso da MS para uma melhor recepção. Isto fornece um ângulo chegando do azimute do sinal da MS. No enlace direto as medidas de TDoA serão enviadas a ERB servidora através do canal celular, onde ambas as medidas de TDoA e de AoA são combinados para dar uma localização estimada da MS, conforme descrito na seção 3.4.4.

### 3.4.3. MODELAMENTO DE AoA PARA MACROCÉLULA

A exatidão da medida do AoA é crítica para o esquema de localização híbrido e depende do ambiente de propagação. Um canal celular contém objetos que espalham aleatoriamente a energia do sinal transmitido. Os sinais espalhados chegam até o receptor por várias direções (GANS, 1972). Em um ambiente de macrocélula os espalhadores que cercam a MS são, aproximadamente, da mesma altura que ele ou mais elevados. Isto resulta em uma recepção de sinal chegando de todas as direções, após o efeito dos espalhadores circunvizinhos. O AoA na antena da MS pode ser modelado como uma variável aleatória distribuída uniformemente sobre  $[0, 2\pi]$  (GANS, 1972).

As antenas das ERB's são montadas geralmente em um nível mais elevado do que os espalhadores circunvizinhos. O sinal recebido na ERB servidora resulta principalmente de processos de espalhamentos nas vizinhanças do móvel. As ondas entrantes do móvel, vistas na antena da ERB, são restritas a uma pequena região angular (ADACHI, 1990), e o AoA não é mais distribuído uniformemente ao longo de

$[0, 2\pi]$ . Para ambientes de macrocélula com alturas das antenas de ERB's relativamente grandes, um modelo eficaz para o AoA na ERB servidora é aquele em que os espalhamentos são espaçados uniformemente em um anel circular sobre o móvel (JAKES,1994)(LEE,1997), como mostrado na FIG. 3.3, onde  $\theta_{BW}$  denota o ângulo de propagação,  $R$  é o raio do anel de espalhamento,  $D$  é a distância entre a MS e a ERB servidora e  $\beta$  é o AoA do sinal. Em geral,  $\theta_{BW}$  decresce com o aumento das alturas das antenas das ERB's. O modelo circular prediz uma probabilidade relativamente elevada de componentes de multipercurso dentro de uma pequena escala dos ângulos. Vários estudos sugerem que o AoA tem distribuição Gaussiana (ASZETLY, 1996) .

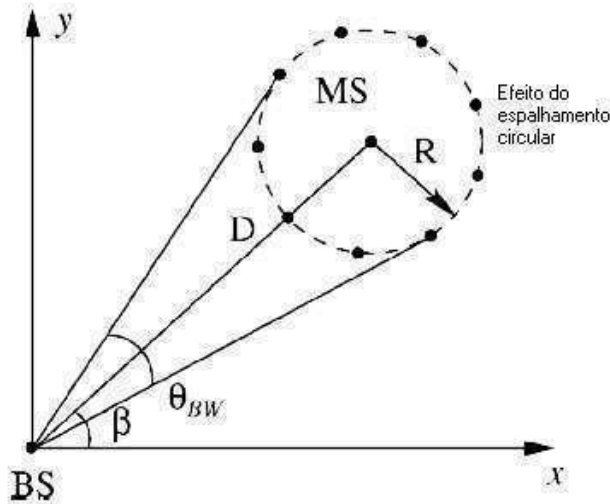


FIG. 3.3 – Modelo circular de espalhamento em macrocélula

Como a distribuição angular não está sendo considerada, este modelamento poderá ser generalizado para ambientes de microcélulas e macrocélulas.

#### 3.4.4. SOLUÇÃO PARA AS EQUAÇÕES DE TDoA/AoA

Conforme mencionado no capítulo anterior, as estimativas de TDoA's são transformadas em diferenças de distâncias multiplicando-as pela velocidade de

propagação do sinal (ou velocidade de propagação da luz,  $c \approx 3 \times 10^8 \text{m/s}$ ). Estas medidas de diferença de distância resultam em um conjunto de equações hiperbólicas não lineares, cuja solução é bastante complexa.

Para resolver as equações não lineares o método híbrido TDoA/AoA (CONG, 2002) supõe que os erros das medidas de TDoA e AoA são variáveis aleatórias gaussianas independentes com média e variância conhecida. Considera-se também que existem clusters com linha de visada direta (LOS) entre a ERB servidora e a MS para efetuar as medidas do AoA.

### 3.4.5. CONFIGURAÇÃO COM 2 ERB'S

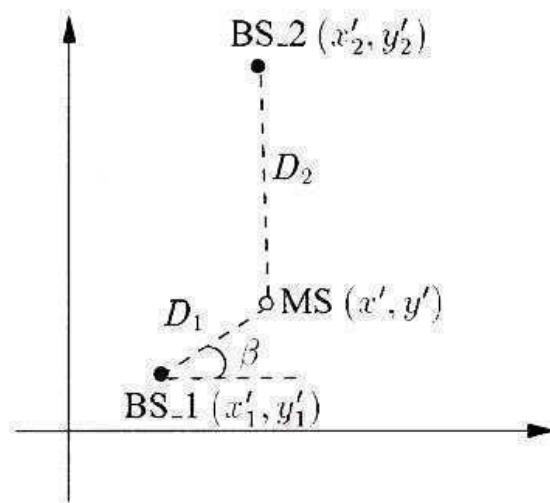


FIG. 3.4 – Configuração TDoA/AoA – 2D com 2 ERB's

Segundo CONG, considerando medidas exatas de TDoA e AoA, são necessárias apenas duas ERB's para efetuar a localização de uma MS. Esta situação é mostrada na FIG. 3.4, em que a ERB\_1 é a ERB servidora e a ERB\_2 é a segunda ERB utilizada;  $\beta$  é a medida de AoA efetuada na ERB\_1, respeitando um sentido da referência (representado pela linha central horizontal). Conhecendo as medidas de AoA, de TDoA e considerando as coordenadas de ERB\_1 e ERB\_2 como sendo  $(x'_1, y'_1)$  e  $(x'_2, y'_2)$ , respectivamente, a localização da MS pode ser

obtida encontrando as coordenadas  $(x', y')$ , através da resolução das seguintes equações:

$$t_2 = \frac{1}{c}(D_k - D_1) \quad (3.4.1)$$

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{y' - y'_1}{x' - x'_1}\right) \quad (3.4.2)$$

$$D_k = \sqrt{(y'_k - y')^2 + (x'_k - x')^2} \quad (k = 1, 2) \quad (3.4.3)$$

onde  $t_2$  é o TDoA entre os sinais de ERB\_2 e ERB\_1,  $D_k$  é a distância entre a MS e ERB\_k e  $c$  é a velocidade de luz.

A solução das equações acima é bastante complexa. Para simplificar a análise, será utilizado um novo sistema de coordenadas (CONG, 2002), conforme ilustrado na FIG. 3.5, obtido pela rotação do ângulo  $\beta$ , pertencente ao antigo sistema de coordenadas, no sentido horário e pela definição das coordenadas de ERB\_1 como sendo a origem. No novo sistema as coordenadas de localização da MS são  $(x, y)$  e as coordenadas da ERB\_2  $(x_2, y_2)$ .

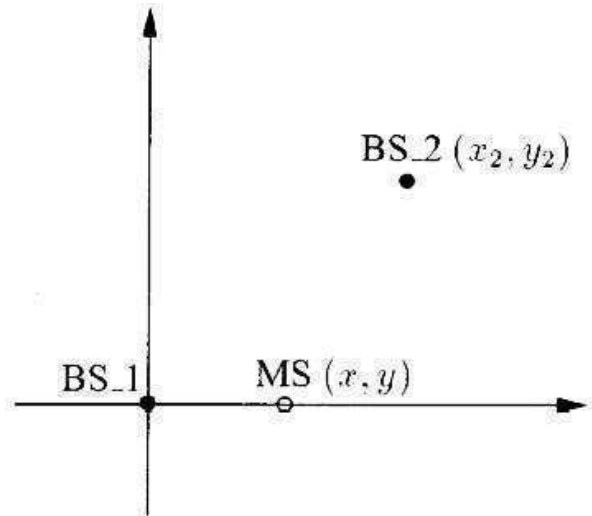


FIG. 3.5 – Configuração TDoA/AoA – 2D com 2ERB's



A equação correspondente para este sistema de coordenadas, segundo CONG, é:

$$ct_2 = \sqrt{(y - y_2)^2 + (x - x_2)^2} - \sqrt{x^2 + y^2}, y = 0 \quad (3.4.4)$$

e a solução é dada por:

$$x = \frac{x_2^2 + y_2^2 - c^2 t_2^2}{2(x_2 + ct_2)}, y = 0 \quad (3.4.5)$$

As coordenadas  $(x_2, y_2)$  são encontradas em função do AoA medido ( $\beta$ ):

$$x_2 = \sqrt{(x_2' - x_1')^2 + (y_2' - y_1')^2} \cos\left(\arctan \frac{y_2' - y_1'}{x_2' - x_1'} - \beta\right) \quad (3.4.6)$$

$$y_2 = \sqrt{(x_2' - x_1')^2 + (y_2' - y_1')^2} \sin\left(\arctan \frac{y_2' - y_1'}{x_2' - x_1'} - \beta\right) \quad (3.4.7)$$

Na realidade, devido aos efeitos do canal de propagação, as medidas de TDoA e AoA contêm erros. Em consequência disso, pode não existir uma solução para as equações acima, isto é, as medidas que envolvem somente duas ERB's podem não conduzir à estimativa de uma localização da MS. Mais de duas ERB's são geralmente requeridas para uma estimativa de localização com razoável precisão.

### 3.4.6. CONFIGURAÇÃO COM UM CONJUNTO DE ERB'S

Quando existem  $K (\geq 3)$  ERB's disponíveis para a estimativa de localização da MS, são geradas estimativas de TDoA's e AoA's que definem um conjunto de equações não lineares referentes à localização da MS. Neste caso as equações incorporam os erros das medidas (CONG, 2002) e são dadas por :

$$t_k = \frac{1}{c}(D_k - D_1) + n_k \quad k = 2, \dots, k \quad (3.4.8)$$

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{y - y_1}{x - x_1}\right) + n_\beta \quad (3.4.9)$$

onde:  $n_k$  são os erros das medidas de TDoA associados com as ERB's servidoras e  $n_\beta$  são os erros das medidas do AoA. Este conjunto de equações pode ser solucionado através da linearização pela série de Taylor (CHAN,1994), descrita a seguir.

### 3.4.7. LINEARIZAÇÃO DAS EQUAÇÕES

Considerando a equação 3.5.9 e usando a ERB servidora com coordenadas na origem (0,0), a seguinte relação geométrica é encontrada e comprovada através da FIG. 3.6:

$$D_1 \sin n_\beta = x \sin \beta - y \cos \beta \quad (3.4.10)$$

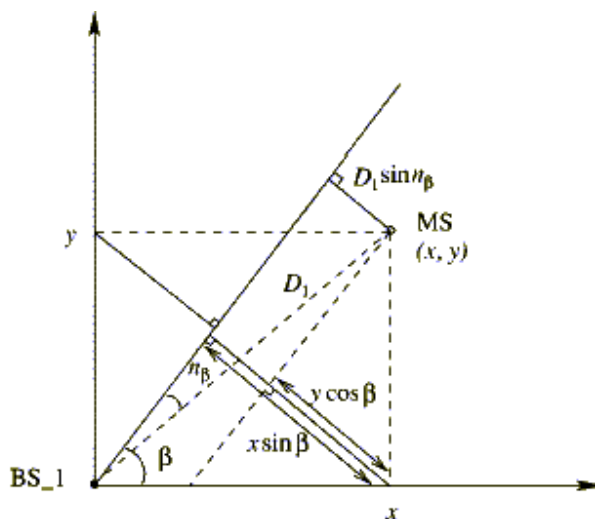


FIG. 3.6 – Configuração TDoA/AoA – Aproximação linear da equação do AoA p/ 2 ERB's

Usando o fato de que  $\text{sen } n_\beta \approx n_\beta$ , onde  $|n_\beta| \ll 1$ , a aproximação linear da equação de AoA pode ser escrita na forma:

$$0 \approx -x \text{sen } \beta + y \cos \beta + D_1 n_\beta \quad (3.4.11)$$

Como resultado, a equação das estimativas de TDoA e AoA pode ser rescrita em uma forma de matriz:

$$m = f(\theta) + n \quad (3.4.12)$$

Onde:

$$\theta = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}, \quad (3.4.13)$$

$$m = \begin{bmatrix} t_{2,1} \\ t_{3,1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ t_{K,1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.4.14)$$

$$f(\theta) = \begin{bmatrix} (D_2 - D_1)/c \\ (D_3 - D_1)/c \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ (D_K - D_1)/c \\ -x \text{sen } \beta / D_1 + y \cos \beta / D_1 \end{bmatrix} \quad (3.4.15)$$

e

$$n = \begin{bmatrix} n_{2,1} \\ n_{3,1} \\ \cdot \\ \cdot \\ n_{K,1} \\ n_{\beta} \end{bmatrix} \quad (3.4.16)$$

Supõe-se ainda que as medidas dos erros, representadas pelo vetor  $n$ , são definidas por variáveis aleatórias Gaussianas com média zero e uma matriz covariância positiva ( $K \times K$ ) dada por

$$Q = \begin{bmatrix} Q_t & 0 \\ 0 & \sigma_{\beta}^2 \end{bmatrix} \quad (3.4.17)$$

onde  $Q_t$  é a matriz covariância para os erros das medidas de TDoA's, e  $\sigma_{\beta}^2$  é a variância dos erros das medidas do AoA. A equação acima pode ser resolvida através do método de expansão da série de Taylor (CHAN, 1994), descrito na seção 3.2.

A simulação deste método será apresentada no próximo capítulo, considerando ambientes diversos e várias configurações de ERB's.

### 3.5. MEDIDAS DE PRECISÃO

Medidas de precisão muito utilizadas para avaliar a precisão de algoritmos de locação são o erro RMS e a probabilidade de erro circular (CEP-Circular Error Probability). Já o efeito da configuração geométrica das ERB's para a estimativa de posicionamento do móvel é medido pela degradação geométrica de precisão.

Normalmente, faz-se a comparação do erro médio quadrático (MSE) ou a raiz quadrada deste erro (RMSE) de localização estimado com o limitante de Crámer-Rao - CRLB (MARQUES, 2001).

### 3.5.1. O ERRO RMS

Para a localização na dimensão D (D = 2 ou 3), o erro médio quadrado (MSE) da posição estimada é dado por:

$$MSE = E[(x - \hat{x})^2 + (y - \hat{y})^2] \quad (3.5.1)$$

onde E[\*] denota o valor esperado. Para uma dada posição da fonte, o MSE é igual à variância do erro somada com o quadrado da média do erro, também chamada polarização.

O erro RMS (*Root Mean Square Error* – RMSE) é a raiz quadrada do MSE e tem a dimensão de distância, sendo a medida de erro mais apropriada para avaliação de sistemas de localização nos quais uma distância mínima à fonte a ser localizada é imposta como requisito de desempenho.

$$RMSE = \sqrt{E[(x - \hat{x})^2 + (y - \hat{y})^2]} \quad (3.5.2)$$

### 3.5.2. PROBABILIDADE DE ERRO CIRCULAR (CEP)

A probabilidade de erro circular (CEP) é uma medida de incerteza da posição  $\hat{x}$  com relação a sua média  $E[\hat{x}]$ . Para um sistema de duas coordenadas a CEP é definida como o raio do círculo cujo centro é a média da estimativa e que contém metade das realizações do vetor aleatório  $\hat{x}$ . Se o estimador de localização é imparcial (estimador despolarizado), a CEP é a medida de incerteza do estimador relativa a uma posição correta da fonte. Se o estimador é polarizado e a magnitude da polarização é limitada por  $\beta$ , então a probabilidade de uma estimativa estar dentro de uma distância  $\beta + CEP$  da posição correta é igual a 1/2. Este conceito é ilustrado na FIG. 3.7.

O cálculo exato da CEP é complexo e detalhes podem ser encontrados em FOY e TORRIERI. Para um estimador hiperbólico de localização, a CEP é aproximada com uma precisão dentro de 10% pela seguinte expressão

$$CEP \approx 0,75\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (3.5.3)$$

Onde  $\sigma_x^2$  e  $\sigma_y^2$  são as variâncias das coordenadas  $\hat{x}$  e  $\hat{y}$  da estimativa de posição da fonte.

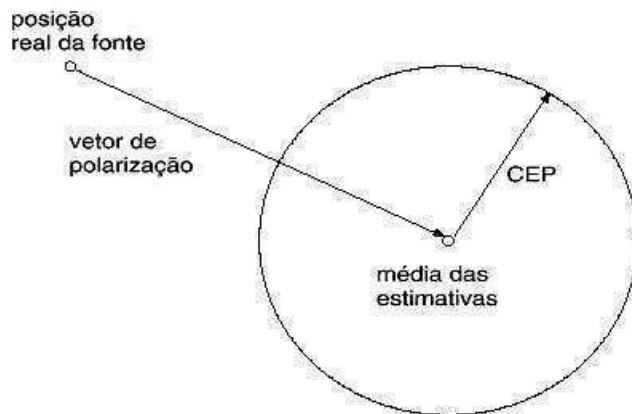


FIG. 3.7 - Geometria para medidas de precisão usando CEP

### 3.5.3. DEGRADAÇÃO GEOMÉTRICA DA PRECISÃO (GDOP)

A diluição de precisão geométrica (GDOP) é uma medida que quantifica a precisão de localização baseada na configuração geométrica (FOY, 1976), (TORRIERI, 1984). Já que a relação geométrica entre a posição da fonte e as posições das ERBs exerce uma grande influência na precisão dos algoritmos de localização. Isso ocorre porque os erros nas medidas de TDoA's são transformados em erros de diferenças de distância que, por sua vez, dependendo da geometria afetariam de forma diferente a solução das equações hiperbólicas. A GDOP é

definida como a razão entre o erro RMS na posição e o erro RMS nas diferenças de distância e, para um sistema hiperbólico bi-dimensional, é dada por

$$GDOP = \frac{\sqrt{E[(x - \hat{x})^2 + (y - \hat{y})^2]}}{\sigma_s} \quad (3.5.4)$$

onde  $\sigma_s$  é o erro RMS das medidas de diferença de distância,  $x$  e  $y$  são as coordenadas reais da fonte e  $\hat{x}$  e  $\hat{y}$  são as coordenadas estimadas. Para um estimador despolarizado a equação acima se transforma em

$$GDOP = \frac{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}}{\sigma_s} \quad (3.6.5)$$

onde  $\sigma_x^2$  e  $\sigma_y^2$  são as variâncias das coordenadas  $\hat{x}$  e  $\hat{y}$  da estimativa de posição da fonte. Para estimadores despolarizados a relação entre GDOP e CEP é dada por

$$CEP \approx (0,75\sigma_s)GDOP \quad (3.5.6)$$

O GDOP é um critério utilizado para selecionar o conjunto de ERB's que minimiza o erro de localização a partir de um grande conjunto estimativas.

### 3.6. RESUMO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados os métodos de localização baseados em medidas de diferença de tempo de chegada (TDoA) e ângulo de chegada (AoA) dos sinais às estações rádio-base.

O primeiro método analisado, TDoA, utiliza a linearização por serie de Taylor para a solução dos sistemas de equações hiperbólicas desencadeado pelas medidas de TDoA's.

Em seguida, o método baseado nas medidas dos ângulos de chegada dos sinais às ERB's foi exposto. Entretanto, ele apresenta um nível de complexidade bastante elevado e requer grandes investimentos em infra-estrutura para sua implantação.

A seguir, foi analisado um método de localização híbrido que combina medidas de diferença de tempo de chegada e ângulo de chegada dos sinais. Ele apresenta melhores resultados quanto à precisão, confiabilidade e custos de implantação.

Por último, foram apresentadas algumas medidas de precisão normalmente utilizadas para avaliação das diversas técnicas de localização existentes. Dentre elas estão o erro médio quadrático (MSE) ou RMS que é a raiz quadrada do MSE, a probabilidade de erro circular (CEP-*Circular Error Probability*) e a degradação geométrica de precisão (GDOP).



## 4. SIMULAÇÃO DOS MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO

### 4.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os ambientes imaginários para desenvolvimento de um programa de simulações, utilizando software MATLAB, visando estimação da posição do móvel. Dois programas foram desenvolvidos: um utilizando medidas de diferença de tempo de chegada dos sinais (TDoA) e outro utilizando medidas de diferença de tempo e ângulo de chegada dos sinais (TDoA/AoA). Ambos os programas tiveram como base os métodos de linearização por série de Taylor para solução das equações não lineares.

São apresentados dois cenários escolhidos para estimação das medidas de TDoA e AoA. Nestes cenários são alocadas diferentes configurações de ERB's e MS's utilizadas nas simulações.

Os métodos são avaliados através da medida de desempenho RMS, descrita no item 3.5.1, para cada um dos cenários, considerando o número de ERB's, o desvio padrão escolhido e a posição da MS.

As estimativas de TDoA e TDoA/AoA são geradas por software desenvolvido através da formulação matemática descrita no capítulo 3.

### 4.2. IMPLEMENTAÇÃO DOS MÉTODOS TDoA E TDoA/AoA

Primeiramente, foram desenvolvidos programas de computador utilizando o software MATLAB para estimação da posição do móvel, tendo como base as equações descritas no capítulo 3.

Foram desenvolvidos dois programas, um para medidas de diferença de tempo de chegada (TDoA) e outro para medidas de diferença de tempo e ângulo de chegada (TDoA/AoA), uma vez que os métodos apresentam formulações distintas.

Os programas têm como dados de entrada, a serem inseridos, o número de ERB's selecionadas, os valores de desvios padrões das medidas de TDoA e AoA, a estimativa *a priori* da posição da MS e o número de interações para cada posição da MS. A partir destes dados de entrada, os programas calculam as distâncias entre as *i*-ésimas ERB's e a ERB de referência e um conjunto de equações não lineares são geradas e solucionadas por série de Taylor. A solução destas equações tem como saída a posição estimada do móvel em coordenadas cartesianas  $(x,y)$ .

Os programas ainda avaliam o desempenho dos métodos a partir das posições estimadas e posições reais dos móveis. São geradas, como saídas do programa, as coordenadas da MS  $(x,y)$  e o erro médio quadrático (RMS).

#### 4.3. ADAPTAÇÃO DO MÉTODO HÍBRIDO TDoA/AoA

O método híbrido TDoA/AoA não apresenta bons resultados na localização, quando a MS está localizada em ambientes no qual o ângulo  $\beta$ , entre a MS e a ERB de referência, possui valor igual ou muito próximo de zero. Por isso o programa desenvolvido, para este método, foi adaptado com objetivo de minimizar esta situação. Na ocorrência de uma situação em que  $\beta$  possui um valor igual ou muito próximo de zero, o algoritmo desconsidera a medida do ângulo e utiliza apenas as medidas de TDoA para cálculo da localização.

#### 4.4. CENÁRIOS UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES

Foram utilizados dois cenários distintos para simulação dos métodos de localização TDoA e híbrido TDoA/AoA. O primeiro cenário utilizado foi um corredor com ERB's espalhadas ao longo dele. A FIG. 4.1 ilustra o cenário do corredor:

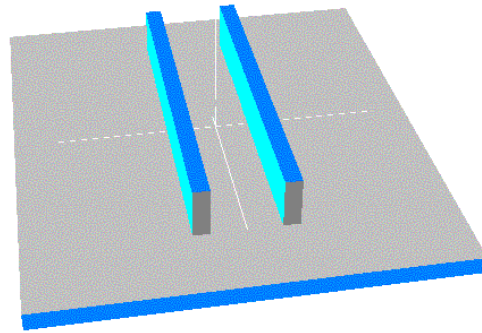


FIG. 4.1 – Cenário corredor

O segundo cenário utilizado foi um cruzamento com ERB's localizadas em posições previamente escolhidas. A FIG. 4.2 ilustra o cenário de cruzamento:

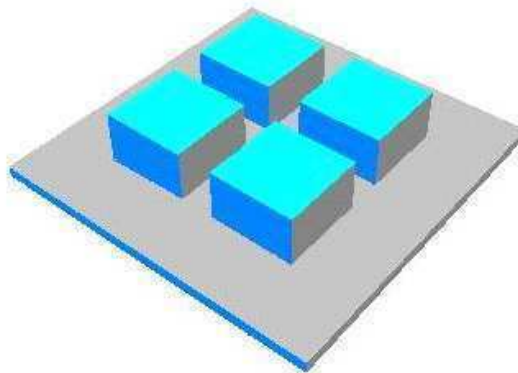


FIG. 4.2 – Cenário cruzamento

O objetivo de terem sido utilizados estes cenários é a simulação dos métodos de localização em ambientes bem próximos de cenários exteriores como uma rua linear, um cenário interior no qual os tetos sejam elevados ou pouco refletivos (centros de convenções ou *shopping centers*) ou então, um cenário de um quarteirão regular.

Estes cenários ilustram condições microcelulares. Apesar do item 3.4.3 referir-se a condições macrocelulares, eles foram utilizados por apresentarem situações de visibilidade (LOS), mais propícias ao modelamento.

#### 4.5. SIMULAÇÃO NO CENÁRIO CORREDOR

As simulações foram feitas utilizando, primeiramente, 3 ERB's, depois 4 ERB's e por último 6 ERB's e a MS que representa as posições do terminal do usuário deslocando-se em intervalos regulares ao longo do corredor para ambos os métodos de localização TDoA e TDoA/AoA. Para cada conjunto de ERB's, a ERB1 foi posicionada nas coordenadas (0,0) e tomada como referência para cálculo das distâncias entre ERB's.

O primeiro cenário utilizado para a simulação foi o corredor com 3 ERB's. As 3 ERB's foram posicionadas inicialmente conforme mostra a FIG. 4.3:

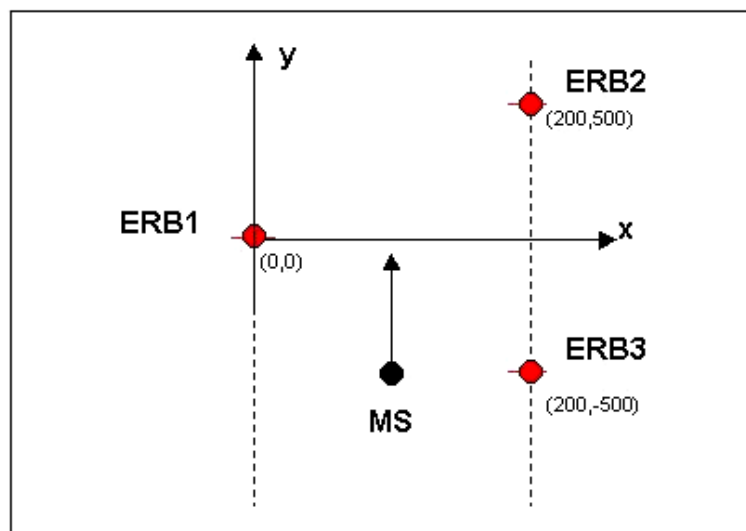


FIG. 4.3 - Disposição das 3 ERB's no ambiente corredor

Neste caso, as coordenadas utilizadas em metros são ERB1 = (0,0) , ERB2 = (200,500), ERB3 = (200,-500).

O segundo cenário utilizado para a simulação foi o corredor com 4 ERB's. As 4 ERB's foram posicionadas nas coordenadas ERB1 = (0,0) , ERB2 = (0,500), ERB3 = (200,0) e ERB4 = (200,-500), conforme mostra a FIG. 4.4:

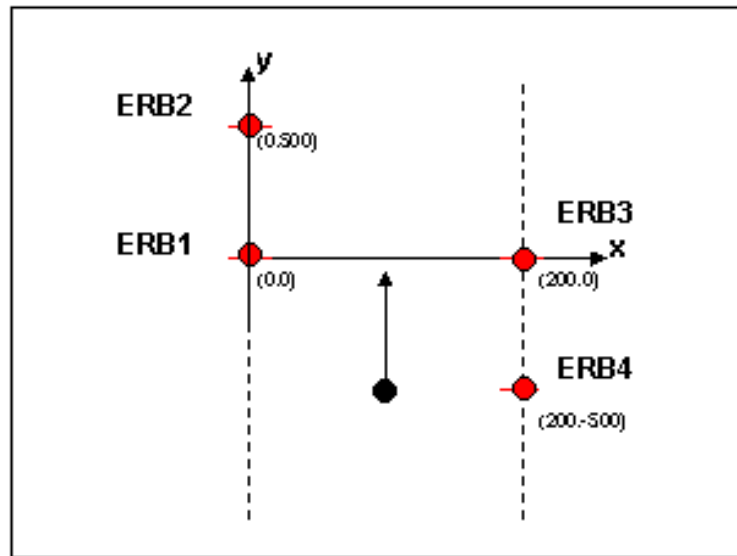


FIG. 4.4 – Disposição das 4 ERB's no ambiente corredor

No cenário com 6 ERB's posicionadas ao longo do corredor foram utilizadas as seguintes coordenadas: ERB1 = (0,0) , ERB2 = (200,0), ERB3 = (0,500), e ERB4 = (200,500), ERB5 = (0,-500), ERB6 = (200,-500), conforme mostra a FIG. 4.5:

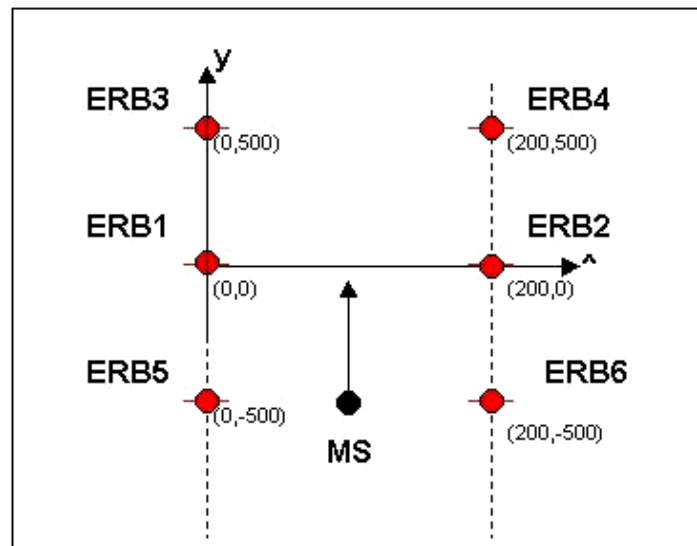


FIG. 4.5 - Disposição das 6 ERB's no ambiente corredor

#### 4.5.1. POSICIONAMENTO DA MS NO CENÁRIO CORREDOR

Foram colocadas várias MS's situadas em  $x = 100$  metros e  $y$ , variando em intervalos de 100 metros, percorrendo um total de 1000 metros.

Os gráficos das medidas de desempenho foram traçados com base nas MS's posicionadas nestes intervalos em pontos determinados: ponto1:(100,-500) , ponto2: (100,-400), ponto3:(100,-300), ponto4:(100,-200), ponto5: (100,-100), ponto6: (100,0), ponto7: (100,100), ponto8: (100,200) e ponto9: (100,300), ponto10: (100,400), ponto11: (100,500) .

#### 4.5.2. POSICIONAMENTO DO MÓVEL EM ZIG-ZAG NO CENÁRIO CORREDOR

Em todas os ambientes apresentados, acima, o móvel encontra-se em movimentos verticais ao longo do corredor. Entretanto, uma situação mais realística seria uma movimentação horizontal e vertical. Esta é a situação mostrada na FIG. 4.6. O móvel está movendo-se em zig-zag, nas posições P1 a P9, ao longo do corredor. O objetivo desta simulação é avaliar o erro RMS quando a MS encontra-se situada em posições descentralizadas em relação as ERB's.

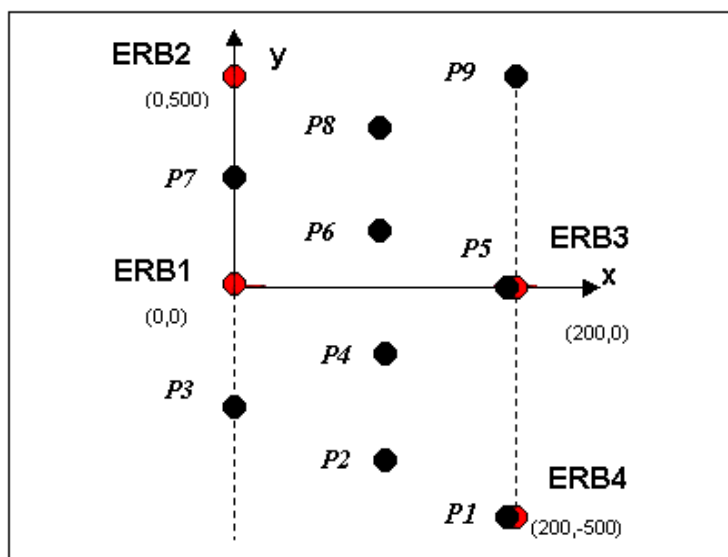


FIG. 4.6 – Disposição do móvel em zig-zag no ambiente corredor

#### 4.6. SIMULAÇÃO NO CENÁRIO CRUZAMENTO

Similarmente ao corredor, as simulações foram feitas utilizando, primeiramente, 3 ERB's, depois 4 ERB's e por último 6 ERB's e a MS deslocando-se em intervalos regulares ao longo do corredor do cruzamento para ambos os métodos de localização TDoA e TDoA/AoA. Para cada conjunto de ERB's: a ERB1 foi posicionada nas coordenadas (0,0) e tomada como referência para cálculo das distâncias entre ERB's. A FIG. 4.7 mostra a disposição das ERB's no cenário cruzamento.

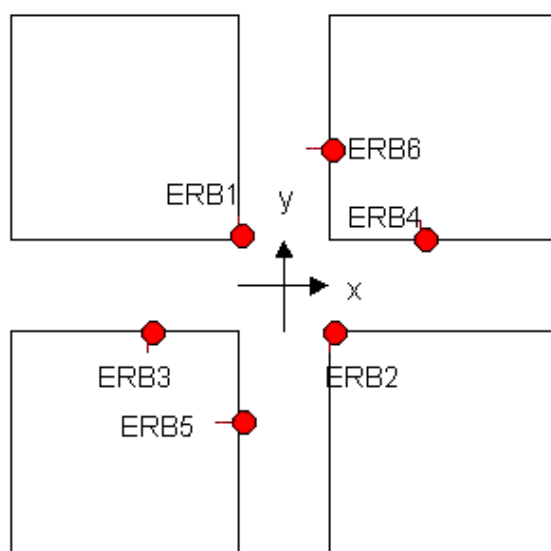


FIG. 4.7 - Disposição das ERB's no cenário cruzamento

Na primeira disposição, utilizada para a simulação do cenário cruzamento, foram posicionadas 3 ERB's nas seguintes coordenadas  $ERB1 = (0,0)$ ,  $ERB2 = (200,-200)$  e  $ERB3 = (-200,-200)$ .

O segundo cenário utilizou 4 ERB's, posicionados nas coordenadas  $ERB1 = (0,0)$ ,  $ERB2 = (200,-200)$ ,  $ERB3 = (-200,-200)$  e  $ERB4 = (400,0)$ .

Por último, foi utilizado o cenário com 6 ERB's posicionadas ao longo do corredor do cruzamento, com as seguintes coordenadas  $ERB1 = (0,0)$ ,  $ERB2 = (200,-200)$ ,  $ERB3 = (-200,-200)$ ,  $ERB4 = (400,0)$ ,  $ERB5 = (0,-400)$  e  $ERB6 = (200,400)$ .

#### 4.6.1. POSICIONAMENTO DA MS NO CENÁRIO CRUZAMENTO

No cruzamento, várias MS's foram situadas em  $x = 100$  e  $y$  variando de -400 metros a +200 metros. Para traçar os gráficos das medidas de desempenho, o eixo  $x$  foi dividido em intervalos de 100 metros onde foram posicionadas as MS's na seguinte ordem: ponto1: (100;-400) , ponto2: (100,-300), ponto3:(100, -200), ponto4: (100,-100), ponto5: (100,0), ponto6: (100,100) e ponto7: (100,200).

#### 4.7. DESVIO PADRÃO DAS MEDIDAS ( $\sigma$ )

Para avaliar influência do desvio padrão nas medidas de precisão dos métodos de localização, foram feitas várias simulações com diferentes valores de  $\sigma$ , em cada posicionamento das MS's. Os valores utilizados dos desvios das medidas de TDoA foram:  $\sigma_k = [0,1], [1], [5], [10], [15], [20]$  e da medida do AoA foi:  $\sigma_\beta = [1]$ .

Outros valores de  $\sigma$  poderão ser utilizados, de acordo com as necessidades do sistema. Entretanto, um grande incremento do desvio da medida do AoA acarretará num aumento do erro RMS. Em general, se a medida do AoA tiver um grande erro e as medidas de TDoA forem exatas, o método híbrido TDoA/AoA proporcionará um pior desempenho do que o método TDoA.

Foram plotados gráficos de medidas de precisão RMS em relação aos valores dos desvios padrões.



## 4.8. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

### 4.8.1. CENÁRIO CORREDOR

Esta seção apresenta as simulações realizadas no ambiente corredor, onde é analisado o desempenho dos métodos de localização através do erro RMS. Este erro é obtido através da raiz quadrada do erro médio quadrático ou MSE, dado pela equação (3.5.2).

O erro RMS foi escolhido por ser uma medida de precisão comum a ambos métodos analisados e ter dimensão de distância. Ele é o mais apropriado para avaliação de sistemas para os quais uma distância mínima à MS a ser localizada é imposta como requisito de desempenho, como é o caso de sistemas de localização utilizados para E-911 (CONG, 2002), (MARQUES, 2001).

As FIG.s 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12 e 4.13 apresentam os valores do erro RMS em função da distância, percorrida pelo móvel ao longo do corredor, obtidos por vários sigmas utilizando 3, 4 e 6 ERB's respectivamente.

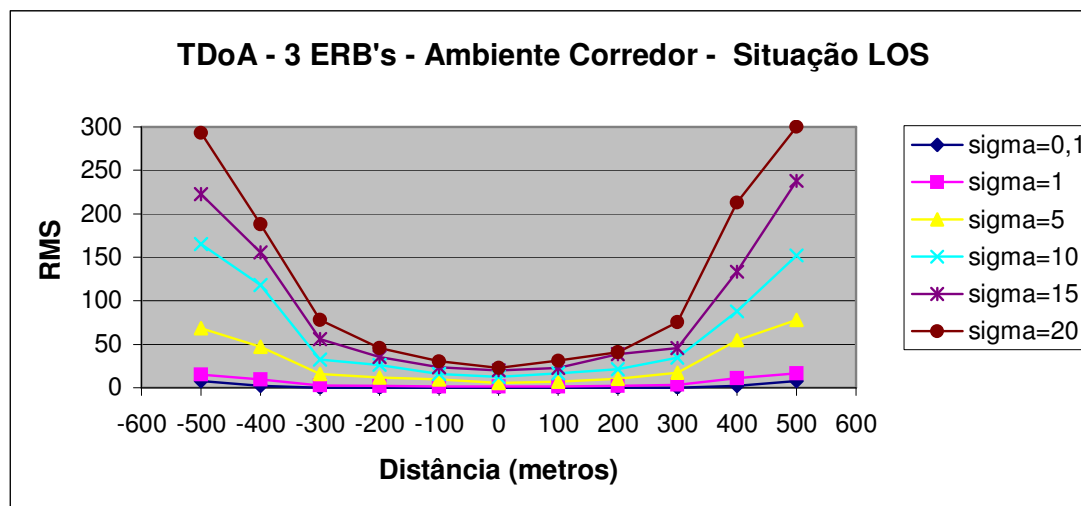


FIG. 4.8 – Erro RMS em função da Distância (3 ERB's) – Método TDoA – Situação LOS

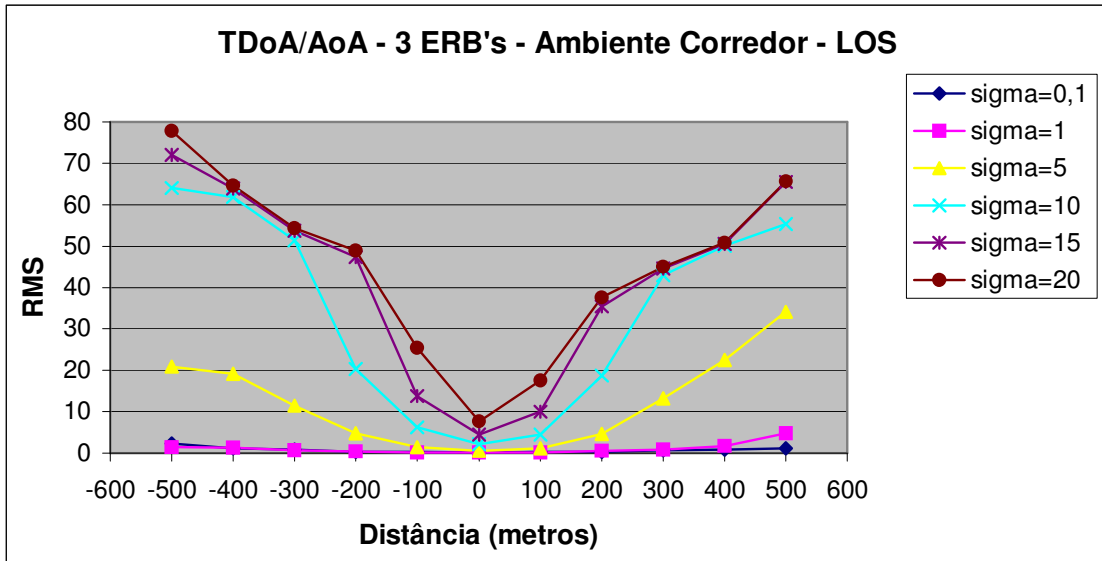


FIG. 4.9 – Erro RMS em função da Distância (3 ERB's) – Método TDoA/AoA – Situação LOS

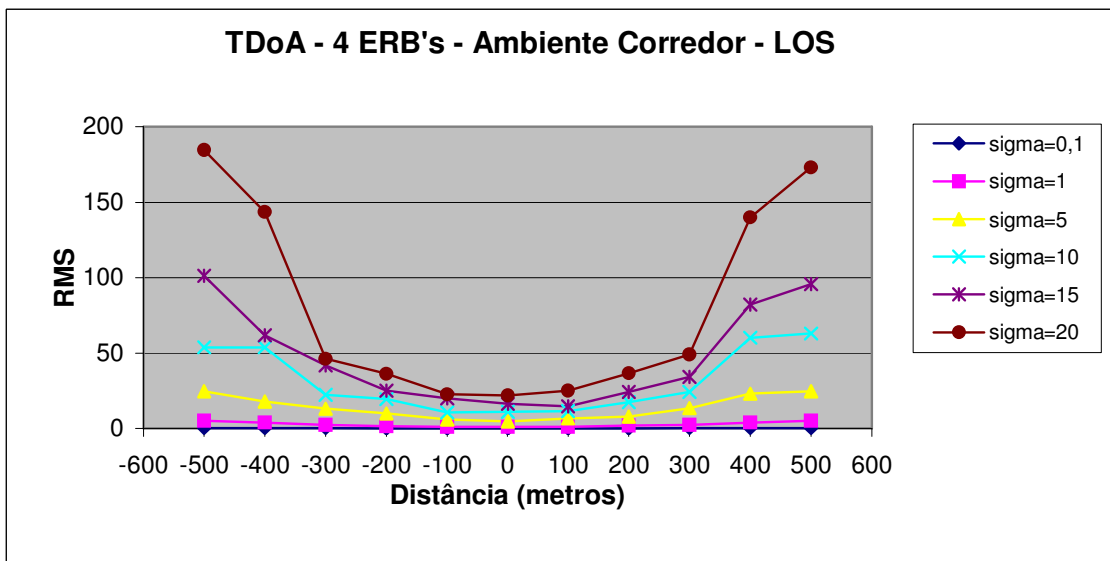


FIG. 4.10 – Erro RMS em função da Distância (4 ERB's) – Método TDoA – Situação LOS

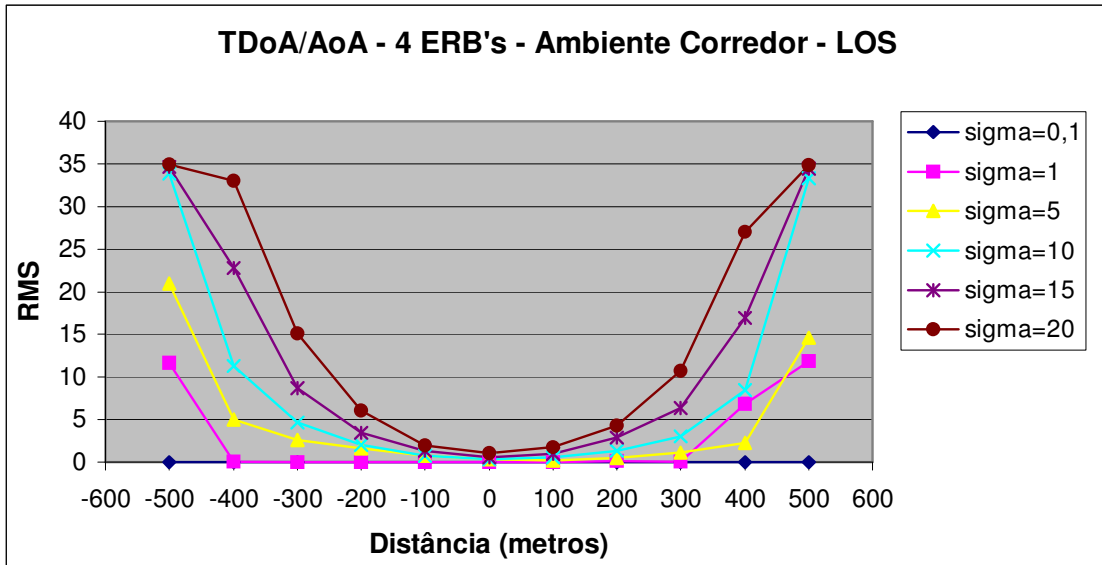


FIG. 4.11 – Erro RMS em função da Distância (4 ERB's) – Método TDoA/AoA – Situação LOS

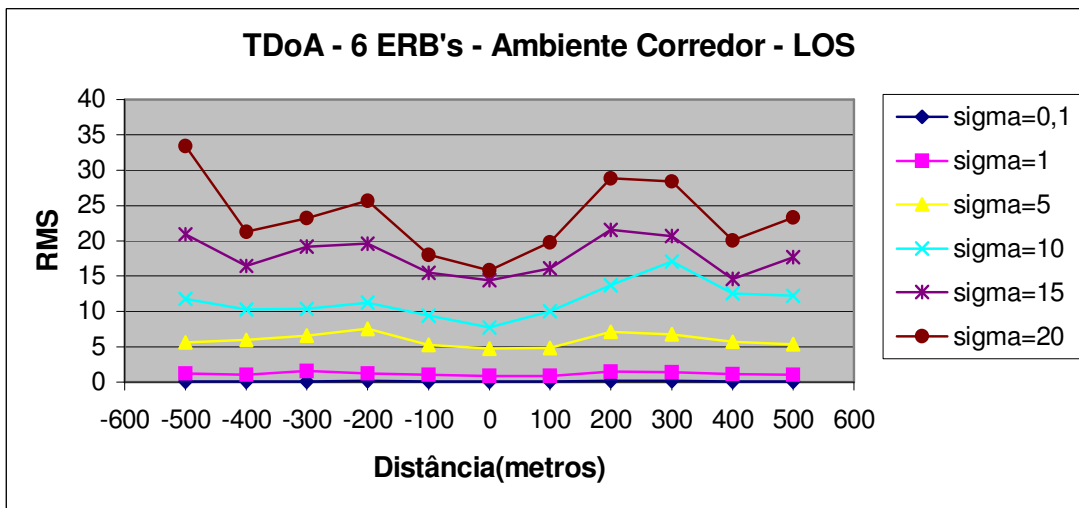


FIG. 4.12 – Erro RMS em função da Distância (6 ERB's) – Método TDoA – Situação LOS

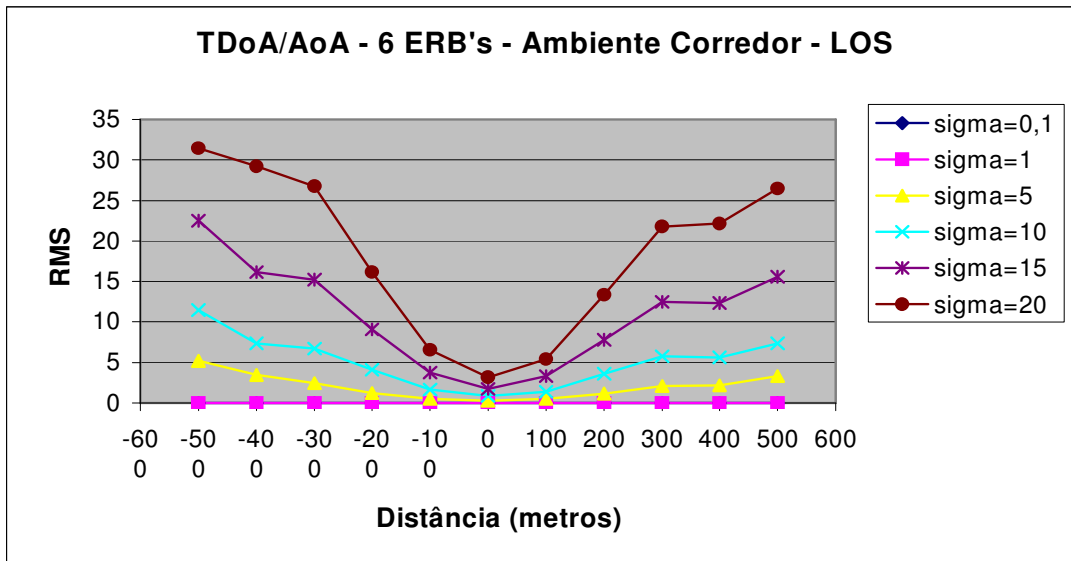


FIG. 4.13 – Erro RMS em função da Distância (6 ERB's) – Método TDoA/AoA – Situação LOS

As FIG.s 4.14, 4.15 e 4.16 apresentam gráficos de comparações entre os métodos TDoA e TDoA/AoA, utilizando o cenário corredor, em situações LOS e sigma=10.

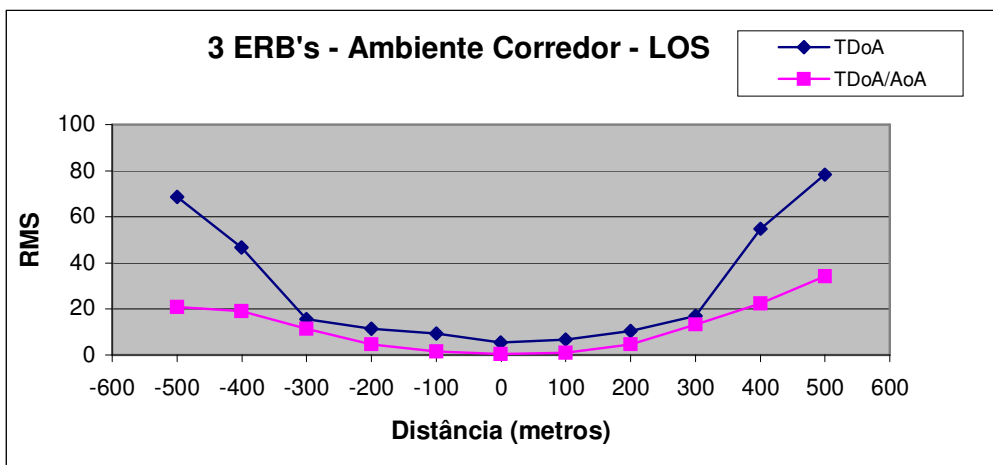


FIG. 4.14 – Erro RMS em função da Distância (3 ERB's) – Comparação entre Métodos TDoA e TDoA/AoA – Situação LOS

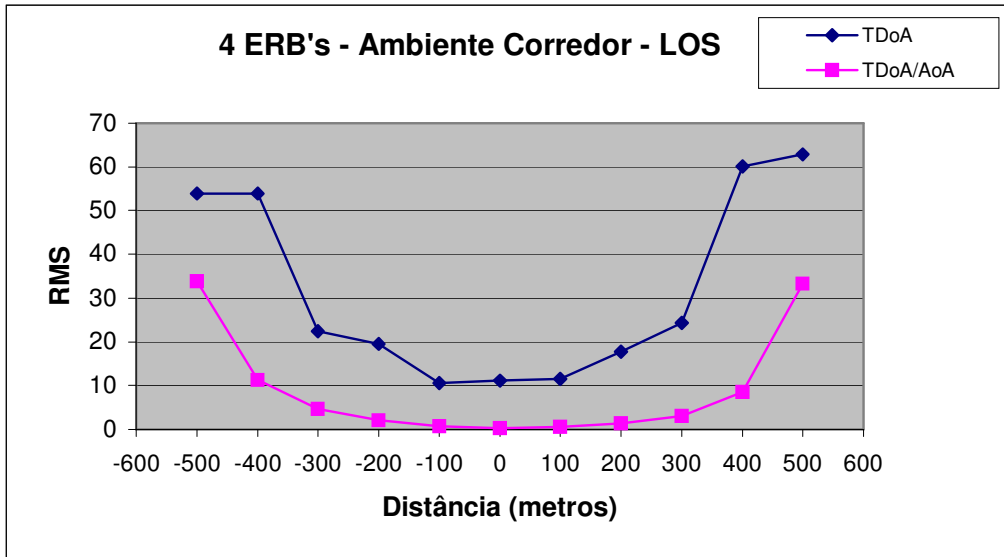


FIG. 4.15 – Erro RMS em função da Distância (4 ERB's) – Comparação entre Métodos TDoA e TDoA/AoA – Situação LOS

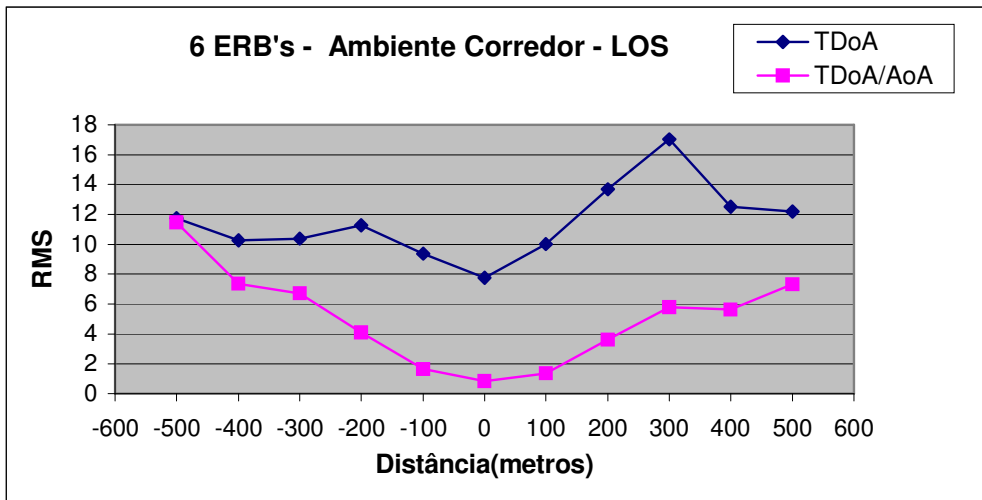


FIG. 4.16 – Erro RMS em função da Distância (6 ERB's) – Comparação entre Métodos TDoA e TDoA/AoA – Situação LOS

#### 4.8.2. MÓVEL EM ZIG-ZAG

Todas as simulações, apresentadas no item anterior, foram realizadas com o móvel movendo-se ao longo do corredor em linha reta. Entretanto, a situação mais realística com o móvel em movimentos horizontais e verticais é mostrada na FIG. 2.6

e o resultado da simulação, utilizando o método híbrido com 4 ERB's num ambiente LOS é apresentado na FIG. 4.17.

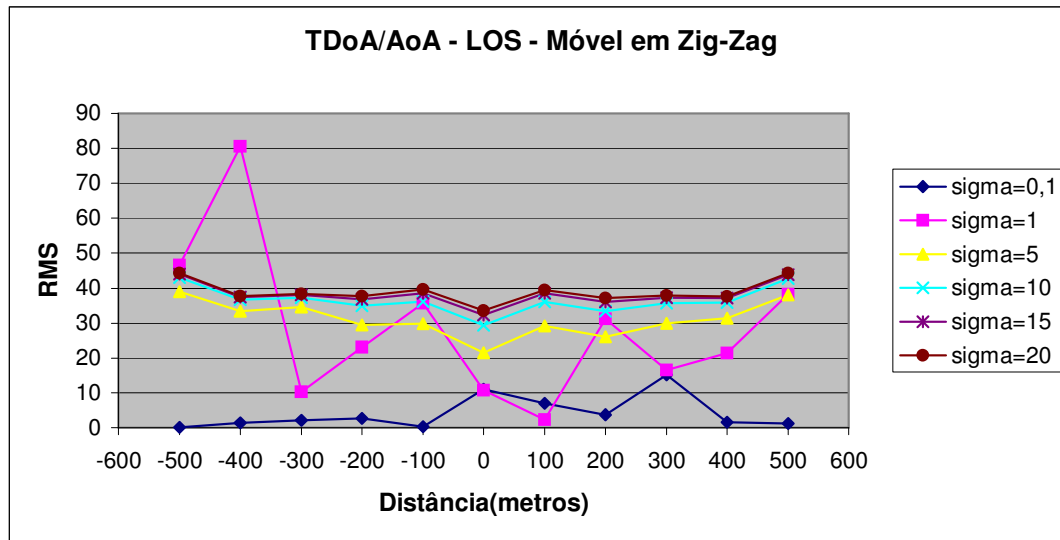


FIG. 4.17 – Erro RMS em função da Distância (4 ERB's) –Móvel em Zig-Zag - Método TDoA/AoA – Situação LOS

#### 4.8.3. CENÁRIO CRUZAMENTO

Nesta seção é exposto o desempenho dos métodos de localização, em um cenário de cruzamento, através do erro RMS. Assim como no cenário corredor, o erro RMS é obtido através da raiz quadrada do erro médio quadrático ou MSE, dado pela equação (3.5.2).

Neste cenário têm-se duas situações distintas da MS: em visibilidade (LOS) e sem visibilidade (NLOS) em relação às ERB's. Nas situações NLOS, foram consideradas apenas os efeitos de reflexões no trajeto do sinal, entre a MS e as ERB's. As medidas de distâncias foram retiradas da planta do cenário cruzamento, devidamente plotada, conforme mostra a figura 4.7.

As FIG.s 4.18 a 4.23 apresentam os valores do erro RMS em função da distância, percorrida pelo móvel ao longo do cruzamento, utilizando 3,4 e 6 ERB's respectivamente.

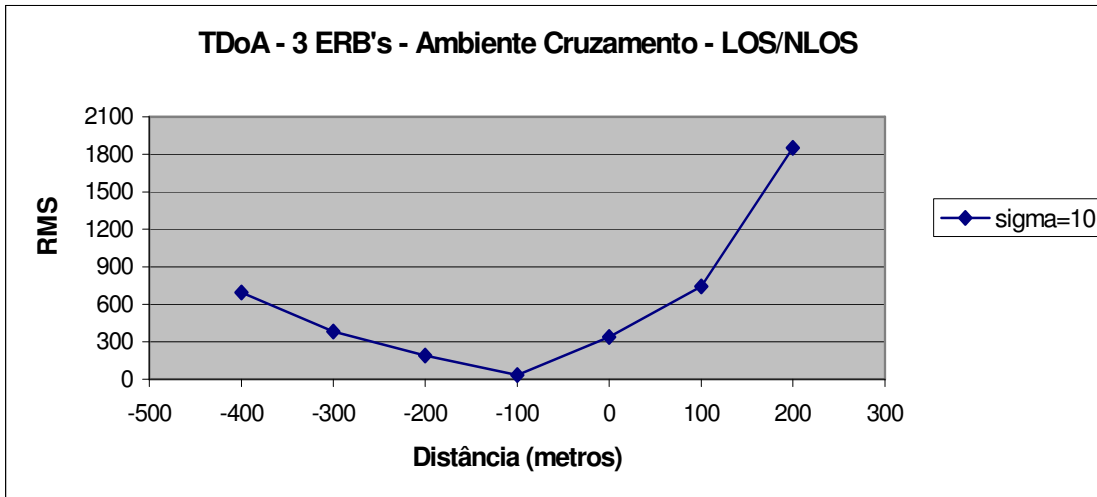


FIG. 4.18 – Erro RMS em função da Distância (3 ERB's) – Método TDoA – Situação LOS/NLOS

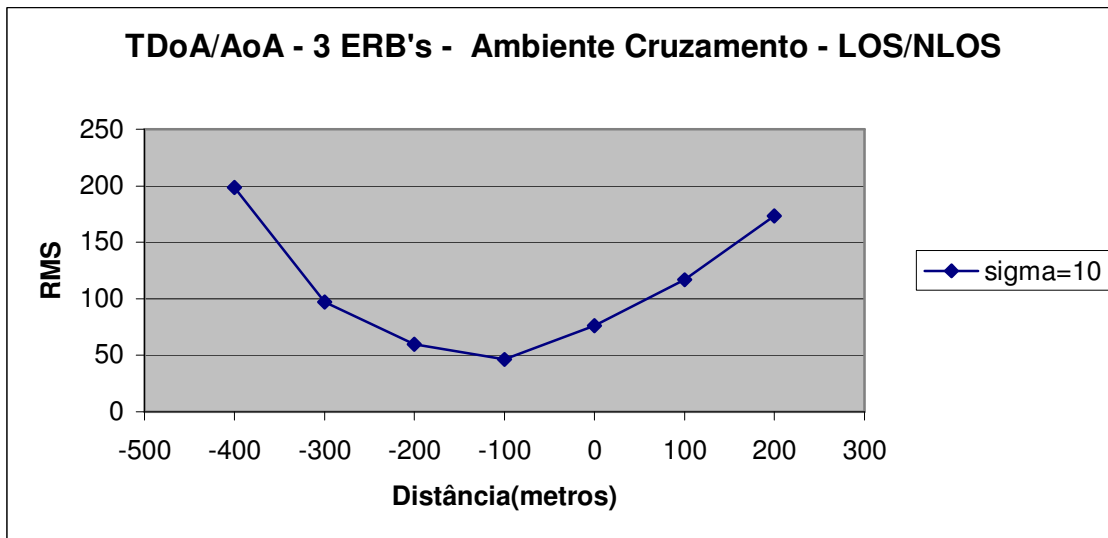


FIG. 4.19 – Erro RMS em função da Distância (3 ERB's) – Método TDoA/AoA – Situação LOS/NLOS

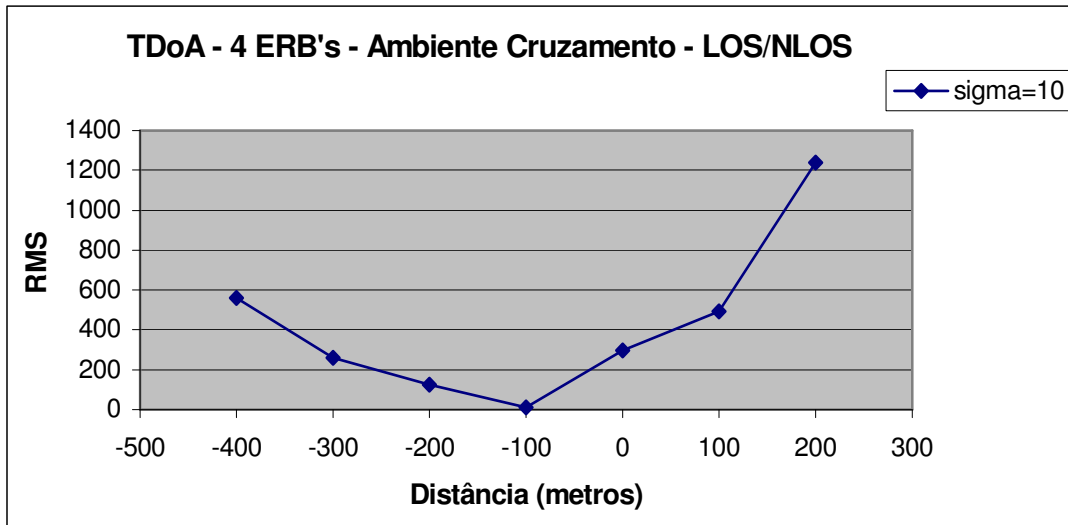


FIG. 4.20 – Erro RMS em função da Distância (4 ERB's) – Método TDoA – Situação LOS/NLOS

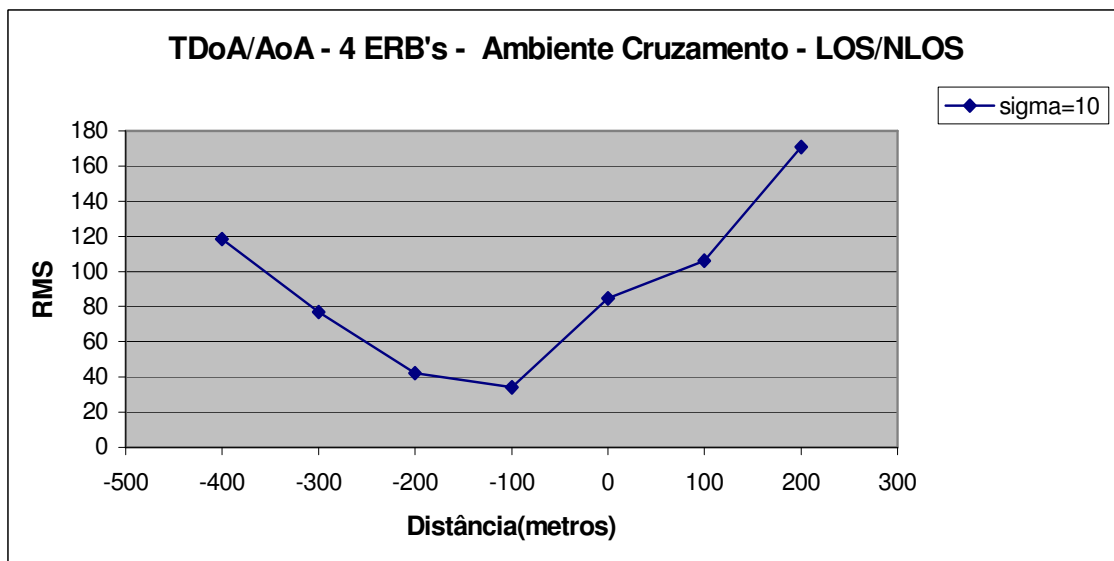


FIG. 4.21 – Erro RMS em função da Distância (4 ERB's) – Método TDoA/AoA – Situação LOS/NLOS



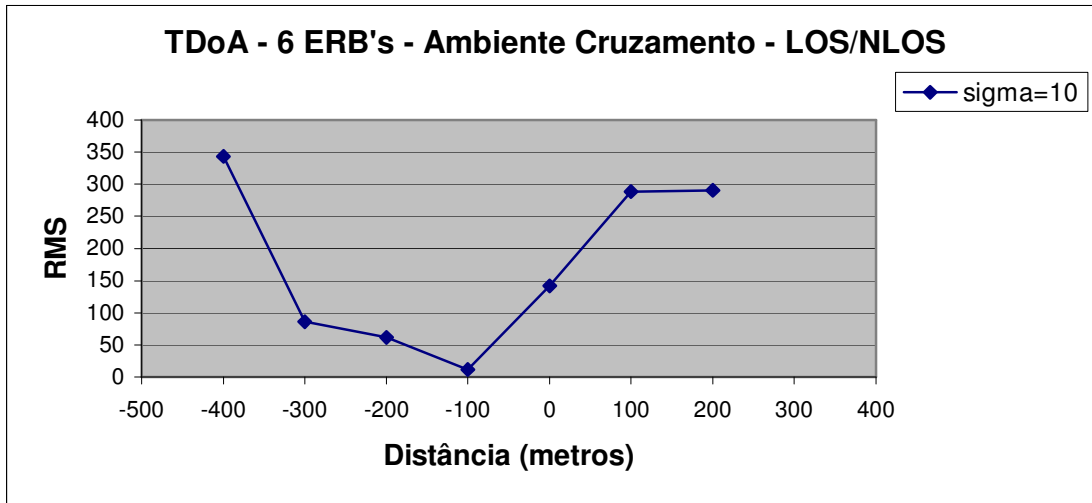


FIG. 4.22 – Erro RMS em função da Distância (6 ERB's) – Método TDoA – Situação LOS/NLOS

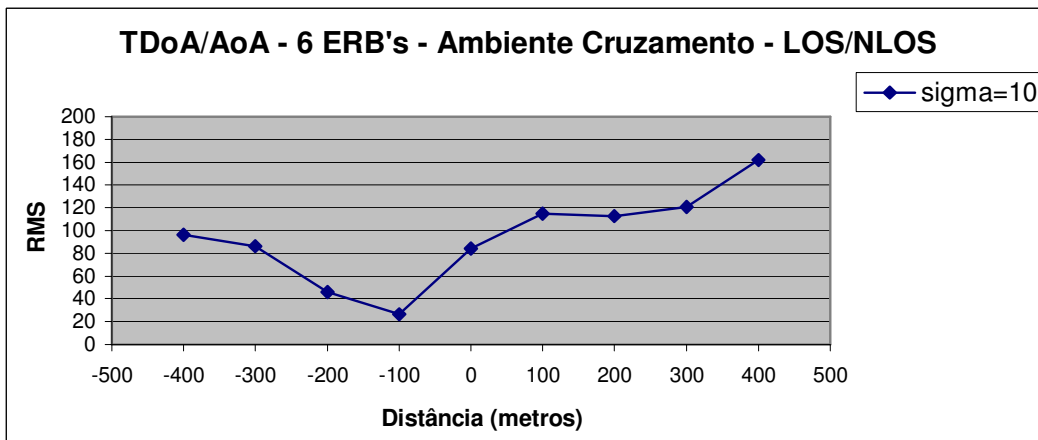


FIG. 4.23 – Erro RMS em função da Distância (6 ERB's) – Método TDoA/AoA – Situação LOS/NLOS

As FIG.s 4.24, 4.25 e 4.26 apresentam gráficos de comparações entre os métodos TDoA e TDoA/AoA, utilizando o cenário cruzamento, em situações LOS/NLOS e  $\sigma=10$ .

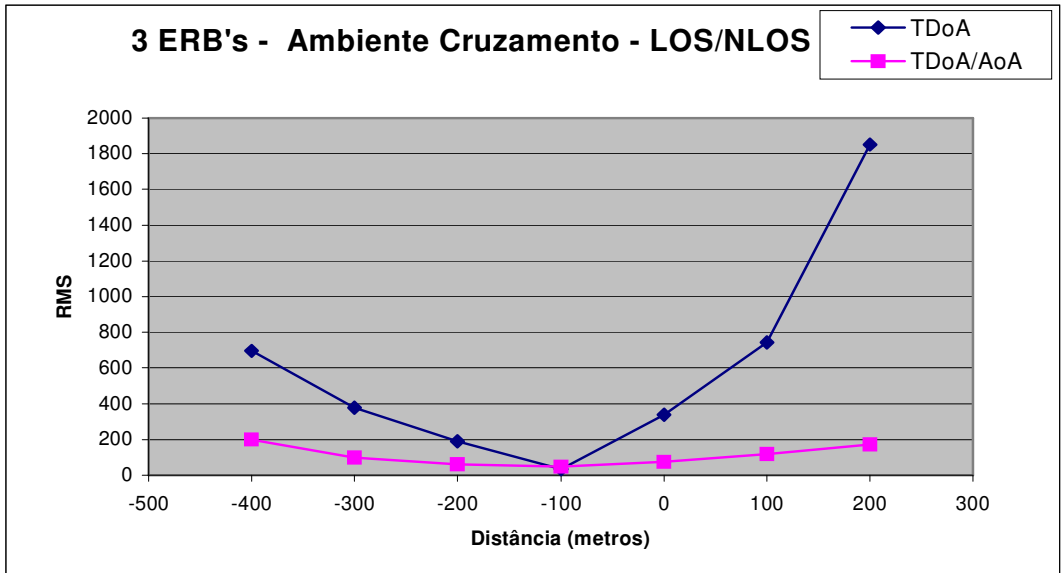


FIG. 4.24 – Erro RMS em função da Distância (3 ERB's) –Situação LOS/NLOS

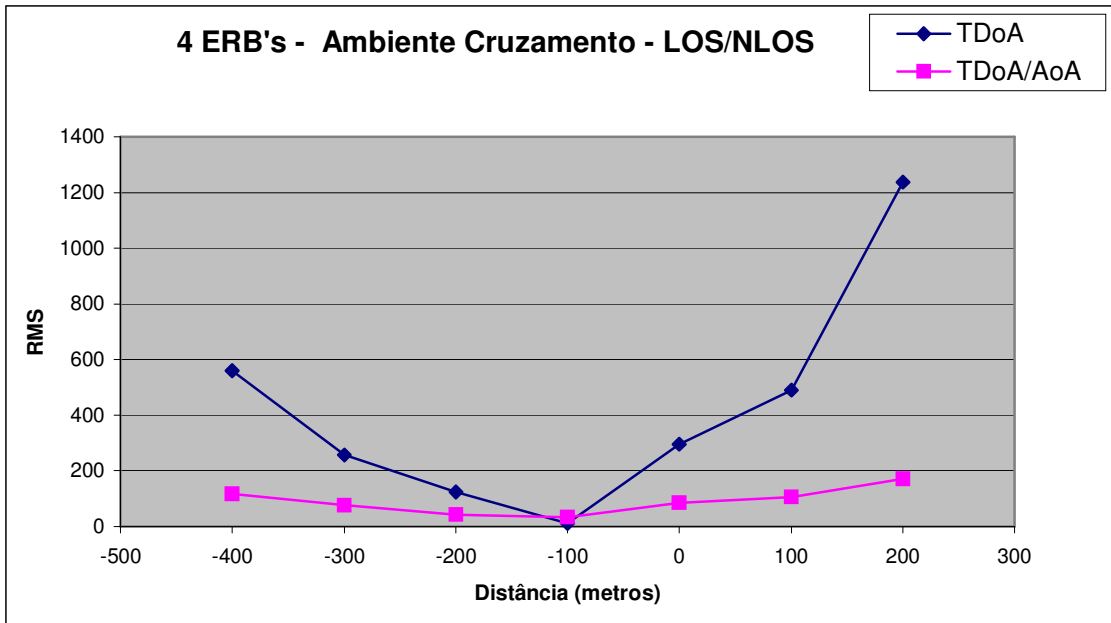


FIG. 4.25 – Erro RMS em função da Distância (4 ERB's) –Situação LOS/NLOS

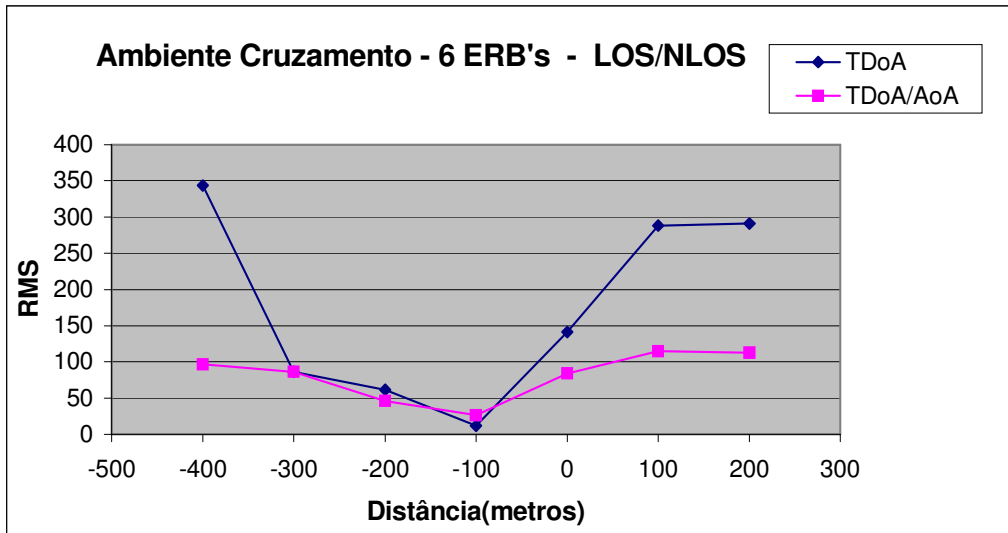


FIG. 4.26 – Erro RMS em função da Distância (6 ERB's) –Situação LOS/NLOS

#### 4.8.4. INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE SENSORES

O desempenho dos métodos de localização depende, também, do número de sensores ou ERB's envolvidos no sistema. Um aumento no número das medidas de TDoA's e AoA's contribui com uma melhoria para o desempenho. As simulações foram feitas com  $M=3, 4$  e  $6$  ERB's e o desempenho dos métodos para cada conjunto de ERB's é exposto nas FIG.s 4.27, 4.28, 4.29 e 4.30 .

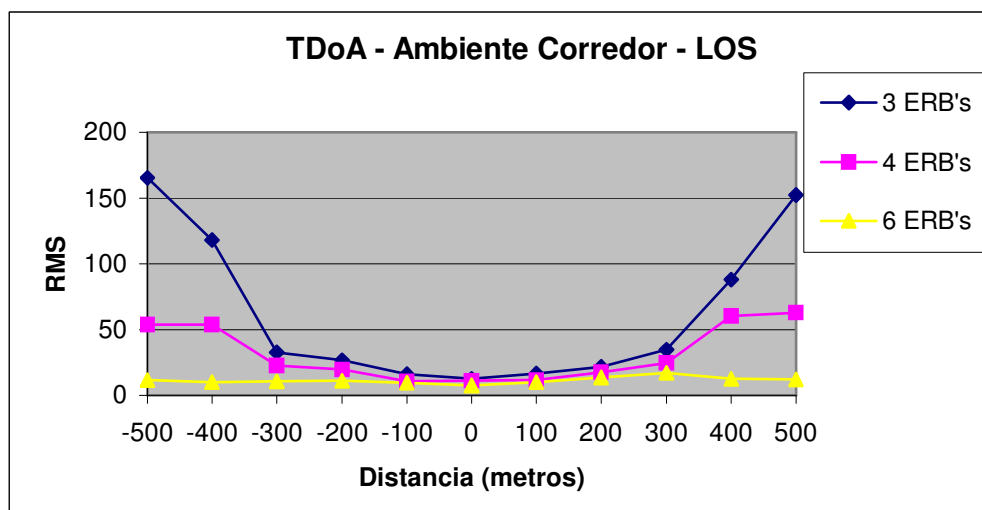


FIG. 4.27 – Erro RMS em função da Distância –Variação do número de ERB's – Método TDoA – Situação LOS -  $\sigma=10$

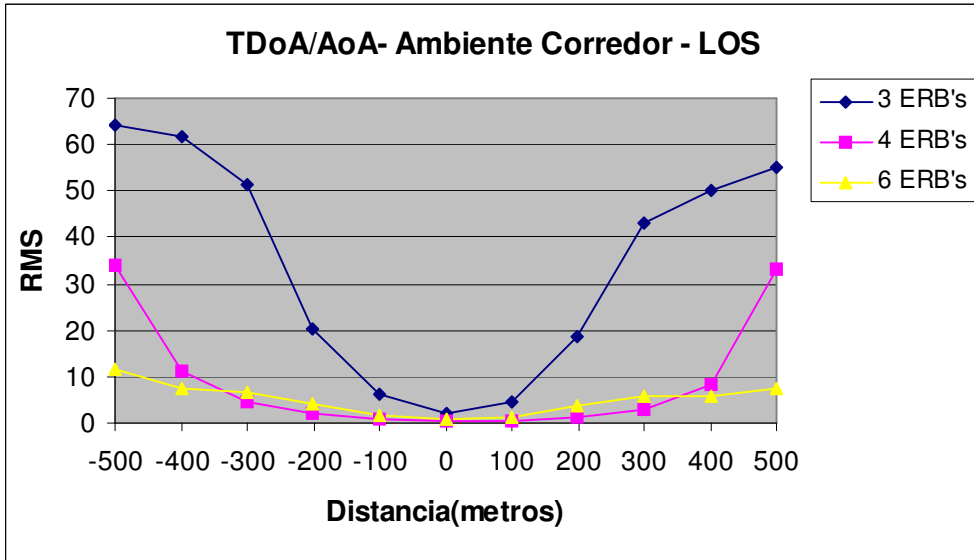


FIG. 4.28 – Erro RMS em função da Distância –Variação do número de ERB's - Método TDoA/AoA – Situação LOS - sigma=10

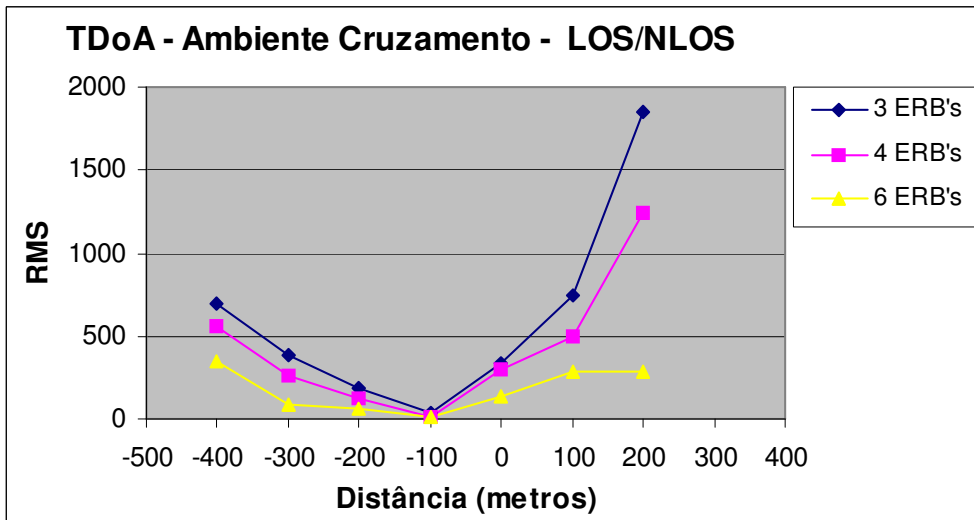


FIG. 4.29 – Erro RMS em função da Distância – Situação LOS/NLOS – sigma=10

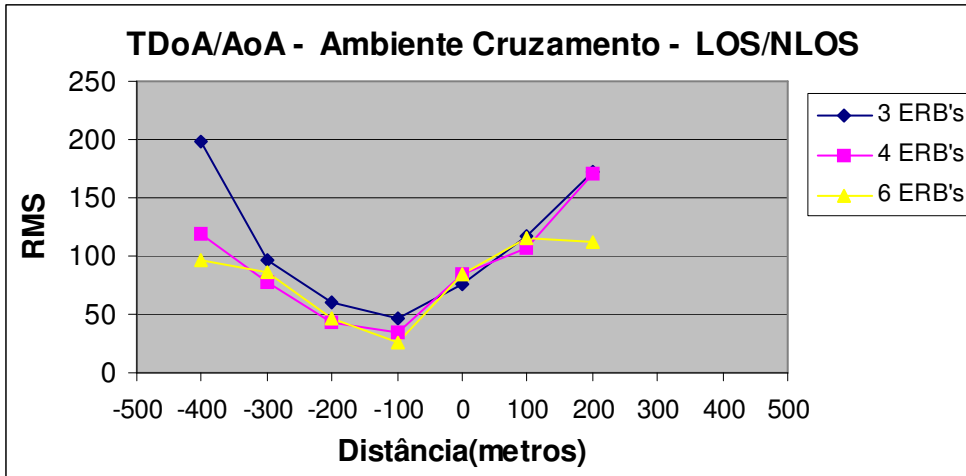


FIG. 4.30 – Erro RMS em função da Distância – Situação LOS/NLOS - sigma=10

#### 4.8.5. INFLUÊNCIA DO DESVIO PADRÃO ( $\sigma$ )

Um outro fator importante na avaliação dos métodos de localização, é a influência do desvio padrão das medidas para cálculo do erro RMS. As simulações apresentadas foram realizadas para diversos valores de sigma conforme mencionado no item 4.6 . As FIG.s 4.31 e 4.32 mostram uma dependência quase linear entre o erro RMS e o valor do sigma ( $\sigma$ ), principalmente no método TDoA.

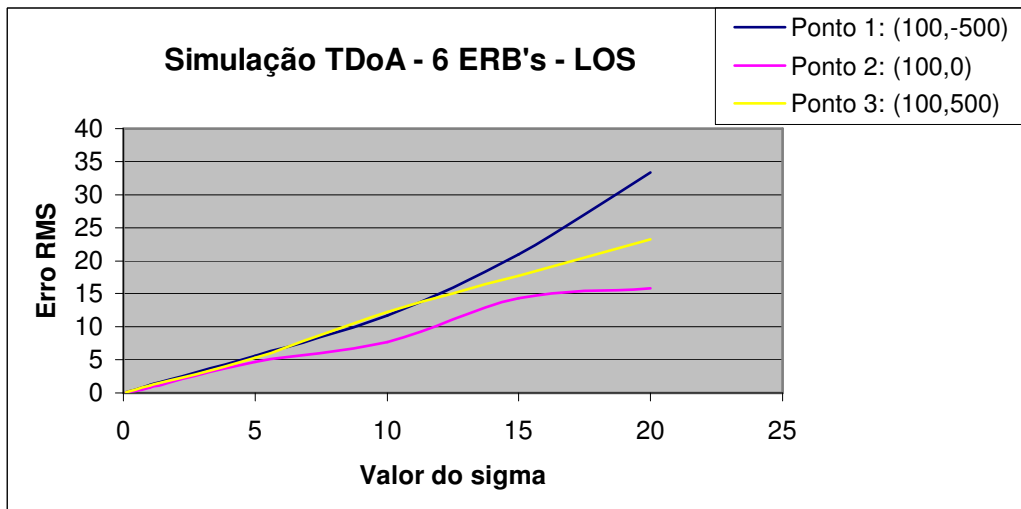


FIG. 4.31 – Erro RMS em função do Desvio Padrão das Medidas ( $\sigma$ ) – Método TDoA - Situação LOS

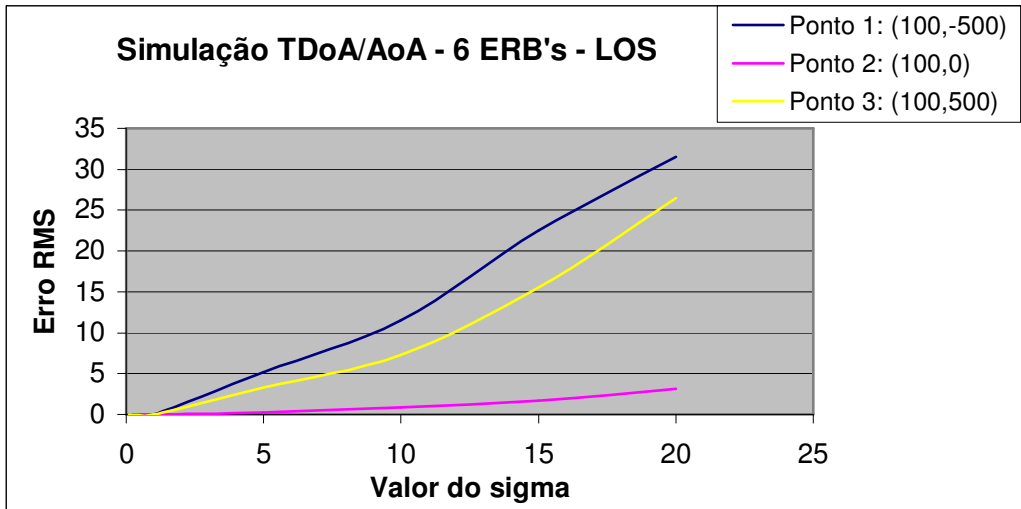


FIG. 4.32 – Erro RMS em função do Desvio Padrão das Medidas ( $\sigma$ ) – Método TDoA/AoA - Situação LOS

#### 4.8.6. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Com o objetivo de obter uma melhor precisão nos resultados, foi feita uma análise de sensibilidade do número de interações necessário para se realizar as simulações. Foi constatado que utilizando um número igual ou superior a 50 obteve-se o objetivo em questão. A FIG. 4.33 mostra esta análise utilizando o método híbrido TDoA/AoA, numa situação LOS.

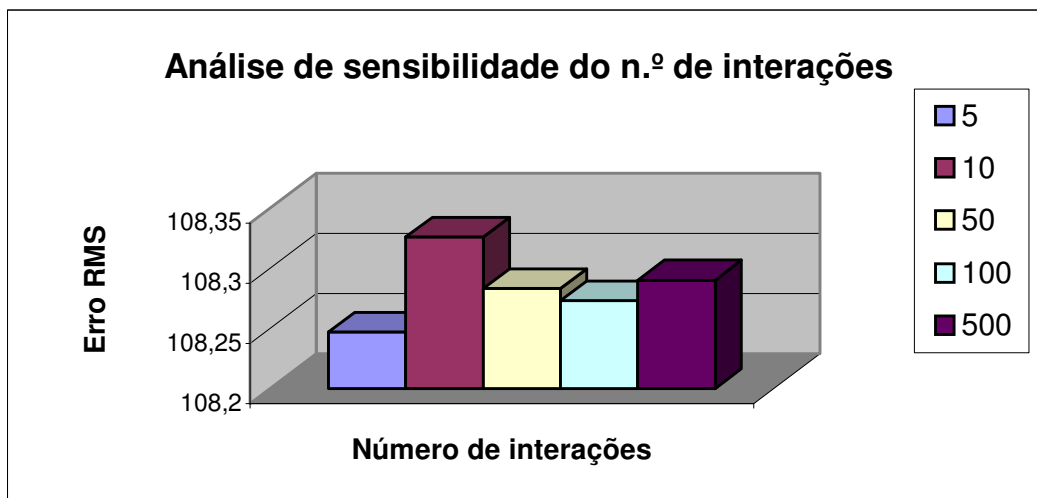


FIG. 4.33 – Erro RMS em função do Número de interações - Método TDoA/AoA - Situação LOS

#### 4.9. RESUMO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados os resultados obtidos através de simulações dos métodos TDoA e híbrido TDoA/AoA. O objetivo foi verificar o desempenho desses métodos utilizando diferentes ambientes que propiciam situações em LOS e NLOS.

Foram utilizados ambientes que simulam um corredor e um cruzamento, onde várias ERB's com sensores de medição foram alocadas. Foram utilizadas configurações com 3,4 e 6 ERB's respectivamente.

Verificou-se que o aumento do número de ERB's e conseqüentemente, o aumento das medidas redundantes de TDoA e AoA, contribui significativamente no desempenho dos métodos.

Foram utilizados, também diferentes desvios ( $\sigma$ ), com o intuito de verificar sua influência em medidas de precisão, como erro RMS. Existe uma dependência quase linear entre o erro RMS e o valor do sigma ( $\sigma$ ), principalmente no método TDoA.

No ambiente corredor foram consideradas apenas as situações em visibilidade (LOS). Entretanto no cruzamento a situação de não visibilidade (NLOS) também foi utilizada trabalhando em conjunto com a situação de visibilidade. A situação NLOS teve impacto negativo bastante significativo sobre os resultados.

As simulações com o método híbrido TDoA/AoA apresentaram resultados bem melhores do que o método TDoA. Isto foi válido para todas as configurações de ERB's e para ambos os ambientes, corredor e cruzamento.

## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

As expectativas de utilização dos serviços baseados em localização (LBS) estão aumentando a cada dia que passa, tanto por questões de regulamentação de normas em alguns países, como nos EUA, como pelo grande potencial de aplicações em novos serviços. As operadoras estão buscando parcerias para desenvolvimento de soluções que envolvem os recursos destinados à pesquisa nesta área, abrindo assim novas perspectivas de trabalho para o mercado de telefonia móvel.

Uma dimensão inteiramente nova de possibilidades será criada pela introdução destas tecnologias de localização de terminais móveis. Serviços relacionados ao lazer, conveniência, segurança e até saúde irão dar asas à imaginação e à criatividade de portais, agências de propaganda e empresas direcionadas ao desenvolvimento de aplicações.

Além disso, a combinação da Internet móvel com a tecnologia de localização cria uma infinidade de oportunidades para o fornecimento de serviços de informações personalizadas e comércio móvel (*m-commerce*). Os LBS's tornarão o *m-commerce* uma realidade.

As aplicações baseadas em localização móvel apresentarão um crescimento exponencial simétrico à flexibilidade e mobilidade proposta a seus usuários, que possuirão, nas suas unidades móveis, informações mais objetivas e úteis. Os assinantes dos LBS's utilizarão estes serviços como parte do seu dia-a-dia, assim como ocorre com o e-mail e a Internet.

Atualmente, alguns serviços de localização já são oferecidos por algumas operadoras a seus usuários, como serviços de páginas amarelas, utilizando técnicas simples como CELL-ID ou CELL-Sector. Entretanto, não são serviços precisos, nem confiáveis.

A curto e médio prazo, os custos de desenvolvimento e implantação dos LBS's não são muito atrativos. Mas analistas deste setor não têm dúvida de que este é um mercado promissor. Principalmente após a implantação destas tecnologias e serviços nos EUA.



As técnicas de localização já desenvolvidas ou que se encontram em desenvolvimento estão divididas em duas categorias distintas: técnicas baseadas nos terminais e técnicas baseadas em rede.

Geralmente os custos de implementação e implantação das técnicas baseadas em terminais são mais altos por envolverem alterações dos terminais móveis existentes. Entretanto possuem uma precisão mais expressiva.

Já as técnicas baseadas em rede não requerem alterações muito significativas nos sistemas existentes. Além disso, possuem maior flexibilidade em seu desenvolvimento, podendo-se utilizar duas técnicas diferentes simultaneamente. Com isso, uma melhor precisão na estimação do posicionamento de uma MS poderá ser obtida.

As principais técnicas baseadas em rede, que se encontram em desenvolvimento, utilizam medidas de sinais recebidos nas ERB's ou nos terminais, onde se destacam medidas de tempos de chegada ou ângulo de chegada dos sinais transmitidos pelo móvel. A estimação da posição do móvel com base nas diferenças de tempo de chegada envolve a solução de sistemas de equações hiperbólicas bastante complexas. Vários estudos comprovaram que dentre os diversos métodos existentes na literatura, a linearização por série de Taylor encontra-se como uma das melhores opções na solução destas equações, além de apresentar melhores resultados para distribuições genéricas de ERB's.

Com a utilização de duas ou mais técnicas diferentes, simultaneamente, pode-se obter uma melhor precisão na estimação do posicionamento de uma fonte. Do ponto de vista geométrico, a solução é obtida a partir da interseção de curvas definidas pelos parâmetros de cada técnica, por exemplo uma reta definida pelo AoA interceptando hipérbolas definidas por TDoA's. Na prática, essa solução pode ser obtida através da combinação de estimativas de posição efetuadas independentemente em cada sistema ou através da solução de equações formuladas a partir das medidas realizadas nos dois sistemas.

Este trabalho analisa um esquema envolvendo as principais características das técnicas TDoA e AoA. Ele requer a medida do ângulo de chegada do sinal, emitido pela fonte, detectada por apenas uma ERB de referência. Assim é possível obter uma implementação mais simples com menor custo.

Utilizando as técnicas TDoA e híbrida TDoA/AoA foram implementados programas de simulação de ambas as técnicas. Um programa foi elaborado com a utilização das melhores medidas de TDoA e AoA, dependendo do posicionamento do móvel. Quando o sistema híbrido não atribui bons resultados para a localização, apenas as medidas de TDoA são utilizadas. Como resultado temos um sistema mais preciso e eficiente.

As simulações foram realizadas em dois cenários distintos: um corredor e um cruzamento. Em ambos os cenários foram alocados conjuntos de 3, 4 e 6 ERB's, respectivamente. Os gráficos mostraram um melhor desempenho das técnicas com o aumento do número de ERB's. Isto já era esperado, porque um acréscimo de ERB's representa um maior número de medidas envolvidas na solução do sistema.

O desempenho dos métodos envolvidos neste trabalho, foi avaliado através do erro RMS descrito no item 3.5.1. Foi constatada, através de uma análise de sensibilidade, que a partir de 50 interações, o erro RMS se estabiliza. Por isso todas as simulações foram realizadas com este número, para cálculo e avaliação do erro RMS.

O método híbrido TDoA/AoA diferenciado apresentou melhores resultados em ambos os cenários, corredor e cruzamento, utilizando conjuntos de 3, 4 e 6 ERB's .

As simulações comprovaram também o bom desempenho da linearização da Série de Taylor na resolução das equações hiperbólicas não lineares, conforme mencionado em outros estudos (MARQUES, 2001).

As simulações realizadas no cenário corredor, condição de visibilidade entre o móvel e as ERB's, mostraram uma melhora significativa de precisão na localização quando foram utilizadas 4 ERB's em lugar de 3 ERB's. Este efeito não foi tão expressivo com a utilização de 6ERB's.

As simulações efetuadas no cenário cruzamento, representaram as situações de LOS e NLOS entre o móvel e as ERB's. O impacto negativo da situação sem visibilidade foi bastante significativo sobre os resultados obtidos. Os melhores resultados foram obtidos em certas posições do móvel, em que a visibilidade de alguma ERB era possível.

Um fator importante na avaliação do desempenho dos métodos é o posicionamento das ERB's. A simulação com a MS posicionada em zig-zag mostrou

que uma distribuição uniformemente em relação ao móvel proporciona, sem dúvida, melhores resultados na localização.

Dentre algumas contribuições deste trabalho podemos citar:

- Abordagem do problema da localização de terminais móveis, analisando questões de geometria, desempenho, complexidade, captação de dados, existência e unicidade de soluções, bem como o impacto do custo de implantação dos equipamentos necessários aos sistemas;
- Estudo detalhado de um método híbrido que envolve medidas de TDoA, referentes a várias ERB's e de AoA detectada por apenas uma ERB;
- Adaptação do método híbrido TDoA/AoA, com aproveitamento apenas dos melhores resultados oferecidos pelas medidas de TDoA/AoA ou simplesmente TDoA, envolvidas no sistema;
- Realização de simulações em cenários distintos, bem próximos de uma situação real, que propiciaram comparações do desempenho dos métodos em situações LOS e NLOS. Foram obtidos resultados bastante consistentes;
- Simulações com vários conjuntos de ERB's distribuídas ao longo dos cenários, permitindo assim melhor análise da influência do número de medidas no desempenho dos métodos estudados;
- Análise de sensibilidade do número de interações necessárias para simulação das medidas de desempenho dos métodos TDoA e híbrido TDOA/AoA .

A continuidade de estudos nesta área poderá ainda abrir espaço para pesquisas envolvendo os tópicos relacionados abaixo:

- Utilização de cenários mais complexos nas simulações, incluindo edificações descontínuas, propiciando efeitos de reflexões, refrações, desvanecimentos comuns em ambiente reais. Isso permitiria uma melhor caracterização da situação sem visibilidade (NLOS) entre móvel e ERB's.

- Análise do impacto da altura das antenas no desempenho dos sistemas de localização, abrangendo ainda a implantação de antenas diretivas para medição dos ângulos de chegada dos sinais às ERB's.
- Estudo detalhado do efeito do desvio padrão ( $\sigma$ ) nas medidas de desempenho, permitindo assim melhor escolha dos valores a serem utilizados.
- Estudo de outros métodos de localização mistos, utilizando recursos já disponíveis pelas operadoras, como a combinação da identificação das células (*Cell ID*) ou setor (*Cell-Sector*) com TDoA. Pode-se utilizar ainda o avanço de tempo (*Timing Advance*).
- Viabilização de outros métodos híbridos, combinando tecnologias baseadas em rede e terminais, buscando melhor desempenho dos sistemas de localização.

Finalmente, um tópico bastante interessante seria uma pesquisa sobre a possibilidade, existência e unicidade de soluções para os padrões de interface de rádio existentes no Brasil, tendo em vista sua maior representatividade em mercado potencial da América Latina para LBS.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABEL, J. S. *A divide and conquer approach to least-squares estimation*. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems 26, 423{427}, 1990.
- ADACHI, F. *Cross correlation between the envelopes of 900 MHz signals received at a mobile radio base station site*. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 26, pp. 423–427, Mar. 1990.
- ALI, M.. *The system applications of novel methods of location and tracking of cellular mobiles*. Novel Methods of Location and Tracking of cellular Mobiles and Their System Applications ( Ref. N° 1999/046). IEEE Colloquium on, 1999 Page(s): 6/1-6/4.
- ASZETLY, D. *On Antenna Arrays in Mobile Communication Systems: Fast Fading and GSM Base Station Receiver Algorithms*. Dissertation Ph.D., Royal Institute Technology, Sweden, Mar. 1996.
- BARROS, Romualdo H. Monteiro de. *A Nova Era da Telefonia Móvel*. Revista INFO GEO Ano 4 - nº 23 - Mar/Abr – 2002. Disponível: <http://inteli redes.com.br> [capturado em maio 2003].
- CAFFERY, J. Jr. *Wireless Location in CDMA Cellular Radio Systems*. Kluwer international Series in Engineering and computer science, 1999.
- CAFFERY, J. Jr., STÜBER, G. L. *Subscriber location in CDMA cellular networks*. IEEE Transactions Vehicular Technology, vol. 47, pp. 406–416, Maio, 1998.
- CHAN, Y. T.. *A Simple and Efficient Estimator for Hyperbolic Location*. IEEE Transactions on signal Processing, vol. 42, Nr 8, Agosto 1994.
- CONG, Li, ZHUANG, Weihua. *Non-Line\_of-Error Mitigation in TDoA Mobile Location*. IEEE,0-7803-7206-9/01, 2001.
- CONG, Li. *Hybrid TDOA/AOA Mobile User Location for Wideband CDMA Cellular Systems*. IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 1, No. 3, Julho 2002.
- COSTA, Renata Braz Falcão da. *Estudo e Simulação de Técnicas de Localização de Terminais em Ambientes Microcelulares*. CETUC-PUC/Rio, Dissertação de Mestrado, abril de 2003.
- FCC Docket N o 94-102. *Revision of the Commissions Rules to Ensure Compatibility with Enhanced 911 Emergency Calling Systems*. RM-8143, 26 de Julho de 1996.

- FOY, W. H. *Position-location solutions by Taylor-series estimation*. Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. AES-12, pp. 187–194, Mar.1976.
- GANS, M. J. *A power-spectral theory of propagation in the mobile-radio environment*. IEEE Transactions Vehicular Technology, vol. VT-21, pp. 27–38, Feb. 1972.
- GORGULHO, Miguel. *GPS - O Sistema de Posicionamento Global*. 2001. Disponível: <http://www.gpsglobal.com.br/Artigos/Apostila.html> [capturado em maio 2003]
- JAKES, W. C. *Microwave Mobile Communications*. New York: IEEE Press, 1994.
- KLUKAS, R. and FATTOUCHE, M. *Line-of-sight angle of arrival estimation in the outdoor multipath environment*. IEEE Transactions Vehicular Technology, vol.47, pp. 342–351, Feb. 1998.
- KRIZMAN, Kevin J.; BIEDKA, Thomas E. and RAPPAPORT, Theodore S. *Wireless Position Location: Fundamentals, implementation strategies, and sources of error*. IEEE 47<sup>th</sup> Vehicular Technology Conference, pp. 919-923, 1997.
- LEE, W. C. Y. *Mobile Communications Engineering Theory and Applications*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1997.
- MARQUES, André. R. *Localização Geográfica de Estações Móveis em Sistemas Celulares*. CETUC-PUC/Rio, Dissertação de Mestrado, setembro de 2001.
- SCHIMIDT, R. O. *Multiple emitter location and signal parameter estimation*. IEEE Trans. Antennas Propagate, vol. AP-34, pp.276-280, March 1986.
- SCHMITH, J. O. and ABEL, J. S. *Closed-form least-squares source location estimation from range-difference measurements*. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing ASSP-35, Nr. 12, 1661{1669), 1987.
- SILVENTOINEN, M. and RANTALAINEN, T. *Mobile station locating in GSM*. IEEE Wireless Communication System Symposium, pp53-59, Nov. 1995.
- TORRIERI, D. J. *Statistical theory of passive location systems*. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems., vol. AES-20, pp. 183–198, Mar. 1984.
- USP – Universidade de São Paulo. *Manual de usuário para levantamentos com correção diferencial com pós-processamento*. CIAGRI - Centro de Informática. Disponível: <http://gps.ciagri.usp.br/> [capturado em agosto 2003].
- WANG, S.S.(Peter); GRENN, Marilyn and MALKAWI, Magedd. *E-911 Location Standards and Location Commercial Services*. Nokia Research Center.
- WYLIE, M. P. and HOLTZMAN, J. *The non-line of sight problem in mobile location estimation*. IEEE 5<sup>th</sup> International Conference on Universal Personal Communication, pp. 827-831, 1996.

XIONG, Li. *A Selective model to suppress NLOS signals in angle-of-arrival (AoA) Location Estimation*. IEEE 0-7803-4872-9/98, 1998.

ZURSTRASSEN, Leonardo. *LBS (Location Based Service)*. Disponível: [http://lbs\\_zurstrassen.htm](http://lbs_zurstrassen.htm) [capturado em maio 2003].

## 7. APÊNDICES



## 7.1. APÊNDICE 1: MÉTODO TDoA

```
%Método TDoA

clear;
clc;

M=[];
M=input('Digite o número de sensores: ');
disp([' ']);

if M==3
    BS=[0+0i;0+500i;0-500i];
elseif M==4
    BS=[0+0i;0+500i;200+0i;200-500i];
else M==6
    BS=[0+0i;200+0i;0+500i;200+500i;0-500i;200-500i];
end

% Coordenadas dos M sensores
BS = BS([1:M]); % Pega as M primeiras coordenadas
da matriz BS

disp(['Coordenadas dos sensores escolhidos:']);
disp([BS]);

xErb = real(BS(:)); % Vetor com as abcissas dos sensores
yErb = imag(BS(:)); % Vetor com as ordenadas dos sensores

xo=[];
yo=[];
P=[];
P=input('Digite a posição do móvel: ');
disp([P]);

if P==1
    xmovel = [100];
    ymovel = [-500];
elseif P==2
    xmovel = [100];
    ymovel = [-400];
elseif P==3
    xmovel = [100];
    ymovel = [-300];
```

```

elseif P==4
    xmovel = [100];
    ymovel = [-200];
elseif P==5
    xmovel = [100];
    ymovel = [-100];
elseif P==6
    xmovel = [100];
    ymovel = [0];
elseif P==7
    xmovel = [100];
    ymovel = [100];
elseif P==8
    xmovel = [100];
    ymovel = [200];
elseif P==9
    xmovel = [100];
    ymovel = [300];
elseif P==10
    xmovel = [100];
    ymovel = [400];
else M==11
    xmovel = [100];
    ymovel = [500];
end

Pos_real = [xmovel ymovel];
disp([Pos_real]);
Pos_est = [xo yo];
disp([Pos_est]);

mu = 0;    % Valor da média considerado na distribuição normal

sigma=[];
disp(['Digite o vetor de desvios padrões ']);
sigma= input('exemplo: [0.001 0.01 0.1] ou [0.01]: ');
disp([sigma]);

N = length(sigma);    % N é a quantidade de sigmas existentes

Ndim = M-1;
delt = eye(Ndim)+ones(Ndim);

%-----
% DoA é o vetor com a distância entre todos os sensores e a
fonte.

```

```

        DoA    = sqrt((xErb(:)-xmovel).^2 + (yErb(:)-ymovel).^2);
%-----

xo=[];
yo=[];
xestim=[];
yestim=[];

disp([' Posição inicial do móvel:']);
xo= input('digite a abcissa inicial x do móvel: ');
yo= input('digite a ordenada inicial y do móvel: ');
disp(['  ']);
%-----
iteracoes = input(' Informe o número de cálculos para cada sigma:
');
disp(['  ']);
%-----
c = 3*10^8;          % velocidade da luz em m/s

% Tolerância: quando a diferença entre as posições calculadas em
2 iterações seguidas for menor que a tolerância, chega-se ao
resultado
tol = c*10^-5;
distancia=[];
precisao =[];
xTaylor = [];
yTaylor = [];
num_ite = [];
erros = [];
RMS  = [];
n_linha = 1;
xTaylorAtual = [];
yTaylorAtual = [];
linha_inicio = [];

k=0;          %-----repete os cálculos para cada sigma-----
for k=1:N

Q      = (sigma(k)^2)*delt;
Qinv   = inv(Q);

s=0;        %-----repete os cálculos para um mesmo sigma-----
for s=1:(iteracoes)

```

```

%-----
% Os erros são calculados através do comando "normrnd", que
% produz uma matriz M x 1 de valores aleatórios com distribuição
% normal, média MU e desvio padrão SIGMA.

noise = normrnd(mu,sigma(k),M,1);
erros = [erros noise];          % armazena erros
%-----

%-----
% DoAN soma os valores reais de DoA com os erros noise.

    DoAN = DoA(:) + noise(:);

%-----
% comb_R_R é uma matriz com 2 colunas, sendo que cada linha é uma
% combinação dois a dois dos elementos de DoAN.
% exemplo:          | R1 R2 |
%                  | R1 R3 |
%                  | R2 R3 |          para 3 sensores.

    comb_R_R = zeros(Ndim,2);
    comb_R_R(:,1) = DoAN(1);          % Primeira coluna com o R1 de
referência
    comb_R_R(:,2) = DoAN([2:M]);     % Segunda coluno com os demais Rs

%-----
% DDoAN é um vetor com a diferença de distância entre o sensor de
% referência e os outros sensores. É calculado subtraindo os
valores
% da primeira coluna de comb_R_R dos valores da segunda coluna.

    DDoAN = comb_R_R(:,2) - comb_R_R(:,1);

%-----
x = xo;
y = yo;

xi = x;
yi = y;

%-----

intTaylor = 1; % calcula o número de iterações realizadas

```

```

    aux = 0;    % "aux" só serve para construir o while, que será
quebrado por "break"
    while aux == 0;

        f = (sqrt((xErb(:)-x).^2+(yErb(:)-y).^2));

        R_aux = [];
        R = [];    % só estamos interessados nas (M-1) primeiras
linhas da matriz DDoAN, que são as diferenças em relação ao
sensor de referência

        for i=1:(Ndim)
            R_aux = DDoAN(i);
            R = [R; R_aux];
        end
        h = zeros((Ndim),1);
        G = zeros((Ndim),2);
        for w = 1:(Ndim)
            h(w,1) = R(w) - (f(w+1) - f(1));
            G(w,1) = ((xErb(1)-x)/f(1)) - ((xErb(w+1)-x)/f(w+1));
% coluna 1 de G
            G(w,2) = ((yErb(1)-y)/f(1)) - ((yErb(w+1)-y)/f(w+1));
% coluna 2 de G
        end
        delta = zeros(2,1);
        delta = inv(G'*Qinv*G)*G'*Qinv*h;    % desvio da posição
do móvel.

        x = x + delta(1);
        y = y + delta(2);

        erro = ((x-xi)^2+(y-yi)^2)/(x^2+y^2);
        if erro < tol
            break;    % se o erro é menor que tolerância, concluir iterações
        end
        xi=x;
        yi=y;
        intTaylor = intTaylor + 1;

        if intTaylor > 100
            disp([' '])
            disp(['Não convergiu após 100 iterações. Escolha nova
posição inicial.']);
            break;
        end
    end
end

```

```

xTaylor = [xTaylor;x];% armazena posição encontrada p/ cada sigma
yTaylor = [yTaylor;y];
num_ite = [num_ite;intTaylor];% armazena o número de iterações p/
cada sigma

% armazena distância entre sensor ref. e o móvel para cada sigma:
distancia = [distancia;(sqrt((xErb(1)-x).^2+(yErb(1)-y).^2))];

end %-----end do for(s) -----

if k == 1 % pegar os (x,y) somente do sigma atual
    n_linha = 1;
    linha_inicio = [linha_inicio; n_linha];
else
    n_linha = n_linha + iteracoes;
    linha_inicio = [linha_inicio; n_linha];
end

disp(['-----']);
disp(['Coordenadas encontradas para o sigma igual a:']);
disp([sigma(k)]);

xTaylorAtual = xTaylor([n_linha:(n_linha+iteracoes-1)])
yTaylorAtual = yTaylor([n_linha:(n_linha+iteracoes-1)])

EMQ = mse(xmovel-xTaylorAtual)+mse(ymovel-yTaylorAtual); % Erro
médio quadrático

RMS = [RMS;sqrt(EMQ)]; % armazena root mean square

fi = c^2*inv(G'*Qinv*G); % matriz 2.4.3
Diago = fi.*eye(2); % zerar elementos q não são da diagonal
CRLB = sum(sum(Diago,1),2); % soma dos elementos da matriz

if EMQ < CRLB % armazena o resultado da precisão p/ cada sigma
    precisao=[precisao;[0]]; % MSE < Limite inferior - RUIM
else
    precisao=[precisao;[1]]; % MSE > Limite inferior - OK
end

end %-----end do for(k) (cálculos p/ cada sigma)

mostra = [];

```

```

mostra = sigma';
mostra = [mostra xTaylor(linha_inicio(:))];
mostra = [mostra yTaylor(linha_inicio(:))];
mostra = [mostra distancia(linha_inicio(:))];
mostra = [mostra precisao];

disp([' ']);
disp(['----- Resultado final-----']);
disp(['Método TDoA'])
disp(['Número de ERBs '])
disp([M])
disp(['Posição real: '])
disp([' Xmovel Ymovel'])
disp([Pos_real]);
disp(['Posição estimada: '])
disp([' Xest Yest'])
disp([ xo yo ])
disp(['sigma RMS'])
disp([sigma' RMS]);
disp(['-----']);
disp([' ']);

```

## 7.2. APÊNDICE 2: MÉTODO HÍBRIDO TDoA/AoA

```
%Método híbrido TDoA/AoA
clear;
clc;

M=[];
M=input('Digite o número de sensores: ');
disp([M]);

if M==3
    BS=[0+0i;0+500i;0-500i];
elseif M==4
    BS=[0+0i;0+500i;200+0i;200-500i];
else M==6
    BS=[0+0i;200+0i;0+500i;200+500i;0-500i;200-500i];
end

% Coordenadas dos M sensores
BS = BS([1:M]); % Pega as M primeiras coordenadas
da matriz BS
disp(['Coordenadas dos sensores escolhidos:']);
disp([BS]);

xErb = real(BS(:)); % Vetor com as abcissas dos sensores
yErb = imag(BS(:)); % Vetor com as ordenadas dos sensores

xo=[];
yo=[];
P=[];
P=input('Digite a posição do móvel: ');
disp([P]);

if P==1
    xmovel = [100];
    ymovel = [-500];
elseif P==2
    xmovel = [100];
    ymovel = [-400];
elseif P==3
    xmovel = [100];
    ymovel = [-300];
elseif P==4
    xmovel = [100];
```



```

        ymovel = [-200];
    elseif P==5
        xmovel = [100];
        ymovel = [-100];
    elseif P==6
        xmovel = [100];
        ymovel = [0];
    elseif P==7
        xmovel = [100];
        ymovel = [100];
    elseif P==8
        xmovel = [100];
        ymovel = [200];
    elseif P==9
        xmovel = [100];
        ymovel = [300];
    elseif P==10
        xmovel = [100];
        ymovel = [400];
    else M==11
        xmovel = [100];
        ymovel = [500];
    end

```

```

Pos_real = [xmovel ymovel];
disp([Pos_real]);
Pos_est = [xo yo];
disp([Pos_est]);

```

```

mu = 0;      % Valor da média considerado na distribuição normal

```

```

sigma=[];
disp(['Digite o vetor de desvios padrões das medidas de TDoA']);
sigma= input('exemplo: [0.001 0.01 0.1] ou [0.01]: ');
disp([sigma]);

```

```

sigma2=[];
disp(['Digite o desvio padrão de AoA']);
sigma2= input('exemplo: [0.1] ou [1]: ');
disp(['  ']);

```

```

N = length(sigma);      % N é a quantidade de sigmas existentes

```

```

Ndim = M-1;
delt = eye(Ndim)+ones(Ndim);

```

```

%-----
% DoA é o vetor com a distância entre todos os sensores e a
fonte.

    DoA = sqrt((xErb(:)-xmovel).^2 + (yErb(:)-ymovel).^2);
%-----
% comb_R_R é uma matriz com 2 colunas, sendo que cada linha é uma
% combinação dois a dois dos elementos de DoA.
% exemplo:          | R1 R2 |
%                  | R1 R3 |
%                  | R2 R3 |          para 3 sensores.

comb_R_R = zeros(Ndim,2);
comb_R_R(:,1) = DoA(1);          % Primeira coluna com o R1 de
referência
comb_R_R(:,2) = DoA([2:M]);     % Segunda coluno com os demais Rs

%-----
% DDoA é um vetor com a diferença de distância entre o sensor de
% referência e os outros sensores. É calculado subtraindo os
valores
% da primeira coluna de comb_R_R dos valores da segunda coluna.

    DDoA = comb_R_R(:,2) - comb_R_R(:,1);
%-----
xo=[];
yo=[];
xestim=[];
yestim=[];

disp([' Posição inicial do móvel:']);
xo= input('digite a abcissa inicial x do móvel: ');
yo= input('digite a ordenada inicial y do móvel: ');
disp(['  ']);

iteracoes = input(' Informe o número de cálculos para cada sigma:
');
disp(['  ']);

%-----
% velocidade da luz em km/s
c = 3*10^8;
%-----
% Tolerância: quando a diferença entre as posições calculadas em
2 iterações seguidas for menor que a tolerância, chega-se ao
resultado

```

```

tol = c*10^-5;
%-----
distancia=[];
precisao =[];
xTaylor = [];
yTaylor = [];
num_ite = [];
erros = [];
erros2 = [];
RMS = [];
n_linha = 1;
xTaylorAtual = [];
yTaylorAtual = [];
linha_inicio = [];

f = zeros(M,1);
for w = 1:(M-1)
    f(w,1) = DDoA(w);
end

%-----repete os cálculos para cada sigma-----
k=0;
for k=1:N

    Q = sigma2*((sigma(k)^2)*delt);           % considerando-se mesmo
sigma para ângulo e distâncias
    Qinvs = inv(Q);

%-----repete os cálculos para um mesmo sigma-----
s=0;
for s=1:(iteracoes)

%-----
% Os erros são calculados através do comando "normrnd", que
produz uma matriz M x 1 de valores aleatórios com distribuição
normal, média MU e desvio padrão SIGMA.

        noise = normrnd(mu, sigma(k), M, 1);
        erros = [erros noise];                % armazena erros
        noise2 = normrnd(mu, sigma2, M, 1);

%-----
% Cálculo do ângulo Beta.

beta = atan((ymovel-yErb(1))/(xmovel-xErb(1)))+noise2(M);
if abs(beta)==0
    combeta = 0

```

```

elseif abs(beta)<=5
    combeta = 0
else
    combeta = 1
end
%-----
% Última linha do "f" que muda com o sigma:
if combeta == 1
    f(M,1) =(xmovel*sin(beta))/DoA(1)+(ymovel*cos(beta))/DoA(1);
end

m = f(:) + noise(:);

if combeta == 1
    QQ = [Q;ones(1,Ndim)];           % adiciona linha de 1s
    QQ = [QQ ones(M,1)];           % adiciona coluna de 1s
    QQinv = inv(QQ);
end

x = xo;
y = yo;

xi = x;
yi = y;

%-----
intTaylor = 1; % calcula o número de iterações realizadas

aux = 0; % "aux" só serve para construir o while, que será
quebrado por "break"

while aux == 0;
D = sqrt((xErb(:)-x).^2+(yErb(:)-y).^2); % --> constrói o vetor
de distância entre a fonte e cada um dos sensores
    R_aux = [];
    R = [];
    if combeta == 1
        for i=1:(M) % Se considerar beta, acrescenta última
linha
            R_aux = f(i);
            R = [R; R_aux];
        end
        h = zeros((M),1);
        h(M,1) = R(M);
    else
        for i=1:(Ndim)

```

```

R_aux = m(i);          % Se sem beta, com noise (m em vez de f)
                    R = [R; R_aux];
end
h = zeros((Ndim),1);
end
G = zeros((Ndim),2);
for w = 1:(Ndim)
    h(w,1) = R(w) - (D(w+1) - D(1));
    G(w,1) = ((xErb(1)-x)/D(1)) - ((xErb(w+1)-x)/D(w+1)); %
coluna 1 de G
    G(w,2) = ((yErb(1)-y)/D(1)) - ((yErb(w+1)-y)/D(w+1)); %
coluna 2 de G
end

if combeta == 1
    G = [G;ones(1,2)];          % Se considerar beta, acrescenta
última linha
end
delta = zeros(2,1);
if combeta == 1                % desvio da posição do móvel
    delta = inv(G'*QQinv*G)*G'*QQinv*h;
else
    delta = inv(G'*Qinv*G)*G'*Qinv*h;
end

x = x + delta(1);
y = y + delta(2);

erro = ((x-xi)^2+(y-yi)^2)/(x^2+y^2);
if erro < tol
    break;                    % concluir iterações
end
xi=x;
yi=y;
intTaylor = intTaylor + 1;

if intTaylor > 100
    disp([' '])
    disp(['Não convergiu após 100 iterações. Escolha nova
posição inicial.']);
    break;
end
end
end
xTaylor = [xTaylor;x];          % armazena posição
encontrada p/ cada sigma
yTaylor = [yTaylor;y];

```

```

    num_ite = [num_ite;intTaylor];      % armazena o número de
iterações p/ cada sigma

    if s == iteracoes
        if combeta == 1
            G = G([1:Ndim],[1 2]);      % eliminando linha de 1s
        end
    end

% armazena distância entre sensor ref. e o móvel para cada sigma:
distancia = [distancia;(sqrt((xErb(1)-x).^2+(yErb(1)-y).^2))];

    end %-----end do for(s) -----

    if k == 1          % pegar os (x,y) somente do sigma atual
        n_linha = 1;
        linha_inicio = [linha_inicio; n_linha];
    else
        n_linha = n_linha + iteracoes;
        linha_inicio = [linha_inicio; n_linha];
    end

    disp(['-----']);
    disp(['Coordenadas encontradas para o sigma igual a:']);
    disp([sigma(k)]);

    xTaylorAtual = xTaylor([n_linha:(n_linha+iteracoes-1)])
    yTaylorAtual = yTaylor([n_linha:(n_linha+iteracoes-1)])

    EMQ=mse(xmovel-xTaylorAtual)+mse(ymovel-yTaylorAtual); % Erro
médio quadrático
    RMS = [RMS;sqrt(EMQ)];          % armazena root mean square

    fi = c^2*inv(G'*Qinv*G);      % matriz 2.4.3
    Diago = fi.*eye(2); % zerar elementos que não são da diagonal
    CRLB = sum(sum(Diago,1),2); % soma dos elementos da matriz

    if EMQ < CRLB % armazena o resultado da precisão p/ cada sigma
        precisao=[precisao;[0]]; % MSE < Limite inferior - RUIM
    else
        precisao=[precisao;[1]]; % MSE > Limite inferior - OK
    end

end %-----end do for(k) (cálculos p/ cada sigma
mostra = [];
```

```

mostra = sigma';
mostra = [mostra xTaylor(linha_inicio(:))];
mostra = [mostra yTaylor(linha_inicio(:))];
mostra = [mostra distancia(linha_inicio(:))];
mostra = [mostra precisao];

disp([' ']);
disp(['----- Resultado final -----'])
disp(['Método híbrido TDoA/AoA'])
disp(['Número de ERBs '])
disp([M])
disp(['Posição real: '])
disp([' Xmovel Ymovel'])
disp([Pos_real]);
disp(['Posição estimada: '])
disp([' Xest Yest'])
disp([ xo yo ])
disp(['sigma RMS'])
disp([sigma' RMS]);
disp(['-----'])
disp([' ']);

```