

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA - UNIPAMPA

BRUNO DE SOUZA MUSWIECK

**SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO POR RF:
LOCALIZAÇÃO POR UM PONTO (LpUp)**

Alegrete
2014

BRUNO DE SOUZA MUSWIECK

**SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO POR RF:
LOCALIZAÇÃO POR UM PONTO (LpUp)**

Dissertação do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Eletrônica.

Orientador: Jumar Russi

Co-orientador: Marcos V. T. Heckler

Alegrete
2014

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço aos ensinamentos que aprendi em casa com meus pais, Mauro e Cleuza, de que nada se consegue na vida sem bastante esforço, persistência e trabalho, e também de que em tudo o que fazemos sempre aprendemos algo que será útil. Em seguida minha mulher, Carol, por sempre me motivar e me reerguer em momentos em que até eu tinha dúvida de mim mesmo, fazendo com que eu não desista de meus e nossos "sonhos". A minha tia, Ileon, que sempre comento meus "sonhos" e sempre me sinto reenergizado depois de nossas conversas e a toda a minha família. Ao meu eterno Mestre, Professor Júlio Cesar Lima, que me apresentou o "mundo da eletrônica" e me motivou na busca de mais desafios, juntamente com a época da faculdade que considero ter aprendido um dos maiores ensinamentos da minha vida, a persistência é um sinônimo da engenharia. Meus colegas de trabalho que me ajudaram tanto nos momentos em que eu não tinha tempo e "seguraram as pontas" no trabalho como nos testes em campo. Meus amigos onde aprendi que as vezes é necessário recalibrar a precisão dos objetivos que perseguimos nas nossas vidas. Por fim, agradeço a Deus de ter colocado todas estas e outras pessoas especiais em meu caminho que contribuíram para eu ser o que sou hoje e ter conseguido desenvolver o tema desta dissertação que pode ter um futuro de sucesso no mercado.

O mundo não é feito de flores e arco-íris. Ele é um local malvado e safado e não importa o quanto você é durão, ele vai bater em você, lhe deixar de joelhos e deixar você permanentemente desta maneira se você deixar. Você, eu ou qualquer outra pessoa não vai bater mais forte em você do que a vida. Para a vida não importa o quão forte você bate, e sim quantas porradas você suporta e continua andando. É isso que é preciso para vencer.

Rocky 5

RESUMO

Atualmente, as tecnologias para comunicações sem fio que utilizam a rádio-frequência estão em ascensão. Um dos motivos é o baixo custo que esta tecnologia atingiu e também a nova gama de aplicações possíveis com a sua utilização. Em particular, destacam-se os sistemas de localização em uma rede de sensores sem fio. Nestes sistemas de localização, métodos especiais são necessários para determinar distância ou ângulo e a localização do objeto de interesse, tendo cada método suas vantagens e desvantagens. Nesta dissertação é desenvolvido um novo sistema de localização em campo aberto de baixo custo utilizando a técnica conhecida como *received signal strength indication* (RSSI), juntamente com a técnica de medição de ângulo *angle of arrival* (AoA). Finalmente, um novo método de localização de baixo custo é sugerido: Localização por um Ponto (LpUp). Esta dissertação consta de uma revisão bibliográfica dos métodos de medição de distância, ângulo e localização existentes, simulação, testes em campo, determinação de variáveis de influência do RSSI, algoritmo e *firmware* do LpUp. Testes em campo indicaram que a acurácia do sistema pode chegar a 0,4 m, dependendo das condições do local e da configuração do LpUp. Devido à redução de custos do LpUp em comparação a outras técnicas de localização, será possível introduzir uma nova gama de aplicações no mercado.

Palavras-chave: rádio-localização, rede de sensores sem fio, medição de distância e ângulo, RSSI, AoA.

ABSTRACT

Nowadays, wireless technologies that use radio-frequency are growing, whereby the reason can be attributed to the low cost of this technology and to the possibility of developing several different applications. One of these applications is the localization system in a wireless sensor network. In this work, a low-cost localization method for open-field applications that uses the RSSI technique to estimate distance and angle is presented: Localization by one Point (LboP). This work includes: literature review of the distance, angle and localization methods, simulation, field tests, determination of the RSSI influences on the precision and accuracy of the positioning, algorithm and firmware of the LboP. This new localization system was realized and field tests show that the LboP accuracy can go down to 0,4 m. A limitation of the proposed method is its dependency on the terrain and on the LboP configurations. Due to the cost reduction of the LboP in comparison to other localization systems, new types of applications may be introduced in the market.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Radar.....	20
Figura 2 - Radar e transponder.	21
Figura 3 - Medição de tempo.....	23
Figura 4 - Diferença de fase.	24
Figura 5 - Geometria do TdoA, adaptado de (BENSKY, 2008).	27
Figura 6 - Diagrama de uma antena Yagi.....	28
Figura 7 - Diagrama de irradiação da antena dipolo de meia-onda (ORFANIDIS, 2008).....	29
Figura 8 - Ângulos de diretividade das antenas.....	30
Figura 9 - Equação de Friis em espaço livre x Reflexão do Chão (KVAKSRUD, 2007).....	33
Figura 10 - Ponto morto (KVAKSRUD, 2007).....	33
Figura 11 - Medição de distância - Potência.	35
Figura 12 - Dead Reckoning.....	38
Figura 13 - Lateração, Rho-Rho ou Lateração circular.	39
Figura 14 - Trilateração.	40
Figura 15 - Triangulação.	42
Figura 16 - Algoritmo de localização.	44
Figura 17 - a) Baseado em ponto; b) Baseado em área.	47
Figura 18 - Sistemas a) AoA b) RSSI.	52
Figura 19 - AoA com distância d	53
Figura 20 - Circuito de medição do RSSI do ADF7020.....	55
Figura 21 - Linearidade da leitura digital do RSSI.....	55
Figura 22 - Equação de Friis com diferentes potências.....	57
Figura 23 - Fluxograma principal.....	61
Figura 24 - Funções do LpUp.....	62
Figura 25 - Diagrama de Bloco dos Equipamentos.....	64
Figura 26 - Equipamentos em campo.....	65
Figura 27 - Placa Principal e mRadio.....	65
Figura 28 - Processo do Algoritmo do teste.	66

Figura 29 - Local dos testes.....	67
Figura 30 - Ângulos dos testes 7 e 8.....	67
Figura 31 - Espaço aberto com Pt de 23,97 dBm.....	68
Figura 32 - Espaço aberto com Pt de 8 dBm.....	69
Figura 33 - Diagrama da Antena Omnidirecional em a) 130 m e b) 20 m.....	70
Figura 34 - Diagrama da Antena Yagi em a) 130 m e b) 50 m.....	70
Figura 35 - Mudança do ângulo y.....	72
Figura 36 - Mudança do ângulo z.....	72
Figura 37 - Reflexão do Chão.....	73
Figura 38 - Método 2, equação do diagrama de irradiação da Yagi.....	77
Figura 39 - Simulação do Algoritmo LpUp.....	79
Figura 40 - Localidade 1 - Eletroeste.....	80
Figura 41 - Localidade 1 - Resposta do espaço aberto da Omni.....	81
Figura 42 - Localidade 1 - Resposta do espaço aberto da Yagi.....	81
Figura 43 - Diagrama de Irradiação da Yagi 8,4m.....	82
Figura 44 - Dependência do RSSI a temperatura.....	83
Figura 45 - LpUp resposta.....	85
Figura 46 - Distância x Potência erradas.....	86
Figura 47 - Modificação do Algoritmo do LpUp.....	87
Figura 48 - Fluxograma do LpUp.....	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre métodos de medição de distância.....	36
Tabela 2 - Comparação entre cálculos de localização.....	42
Tabela 3 - Variação de 1 dBm por metro em diferentes potências de transmissão.....	57
Tabela 4 - Variação 1 dBm e distâncias equivalentes	57
Tabela 5 - Média de 50 medições.....	71
Tabela 6 - Troca de antenas.....	71
Tabela 7 - Comparação de métodos para medir d	76
Tabela 8 - Irregularidade da Yagi.....	82
Tabela 9 - Medições do LpUp para distância de 10m.....	85

LISTA DE ACRÔNIMOS

AoA - *Angle of Arrival*
BSPK - *Binary phase shift keying*
CEP - Código de endereçamento postal
D - Maior dimensão da antena
d - Distância do EM em relação ao ERB
DF - *Direction Finding*
DR - *Dead Reckoning*
DS - *Direct Sequence*
EM - Estação móvel
ERB - Estação rádio base
FCC - Comissão Federal de Comunicações
FH - *Frequency Hopping*
GPS - *global system positioning*
h - Altura da antena em relação ao solo
L - Distância
MIT - *Massachusetts Institute of Technology*
RF - Rádio-frequência
RSSI - *Received signal strength indication*
SBL - Serviço baseados em Localização
SNR - *Signal noise ratio*
TdoA - *Time difference of Arrival*
TH - *Time Hopping*
ToA - *Time of Arrival*
ToF - *Time of Flight*
TT - Tempo de transferência
uC - Microcontrolador
x, y - Posições cartesianas
 x_0, y_0 - Posições cartesianas iniciais
 x_i, y_i - Posições cartesianas futuras

θ - Ângulo de chegada do sinal
 α - Direção de deslocamento da EM
 λ - Comprimento de onda

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	Objetivo	14
1.2	Motivação	15
1.3	Contribuições do trabalho.....	16
2	DISTÂNCIA E LOCALIZAÇÃO.....	17
2.1	Distância	17
2.2	Localização.....	17
3	MEDIÇÃO DE DISTÂNCIA.....	19
3.1	Tempo de chegada, ToA.....	19
3.1.1	Transmissão de pulsos	20
3.1.2	Transferência de tempo	22
3.1.3	Medição de múltiplo portador de fase	23
3.1.4	Espalhamento Espectral.....	24
3.2	Diferença de tempo de chegada, TDoA	26
3.3	Ângulo de chegada, AoA.....	27
3.4	Indicação de Intensidade de Sinal Recebido, RSSI.....	29
3.4.1	Modelos de perdas no caminho	31
3.4.2	Interferência no RSSI	32
3.4.3	Medição do RSSI.....	34
3.5	Potência	34
3.6	Comparações entre métodos de medição de distância.....	35
4	CÁLCULOS DE LOCALIZAÇÃO ATRAVÉS DE SISTEMAS DE ERBs.....	37
4.1	Sistemas unilateral e multilateral.....	37
4.2	Sensibilidade de proximidade.....	37
4.3	Ponto Morto.....	38
4.4	Lateração circular	39
4.5	Trilateração.....	40
4.6	Multilateração.....	40
4.7	Triangulação	41

4.8	Comparação entre cálculos de localização	42
5	ALGORITMOS DE LOCALIZAÇÃO	44
5.1	Livre de distância e baseado em distância.....	44
5.2	Proximidade e impressão digital.....	46
5.3	Baseado em ponto e baseado em área	46
5.4	Estatístico	47
6	MÉTODO HÍBRIDO	48
6.1	O Método de localização LpUp.....	51
6.2	Limite de resolução	54
6.2.1	Resolução do circuito de medição do RSSI.....	54
6.2.2	Ganho dos estágios de transmissão, recepção e antenas	56
6.2.3	Circuito de entrada de RF com ganho automático	56
6.2.4	Proximidade entre ERB e EM	56
6.3	Fontes de Erro.....	58
6.4	Algoritmo do Sistema.....	60
6.5	Hardware, configurações e planejamento.....	63
6.5.1	Hardware e Firmware	63
6.5.2	Algoritmo do teste	65
6.5.3	Planejamento	66
6.6	Resultados e Análise.....	68
6.7	Algoritmo do LpUp	74
6.7.1	Opções de Algoritmos para d e θ	74
6.7.2	Comparações dos métodos	75
6.7.3	Calibrações necessárias	78
6.7.4	Teste e análise do LpUp	78
6.7.4.1	Simulação do Algoritmo do LpUp	78
6.7.4.2	Teste em campo do Algoritmo do LpUp.....	79
6.7.5	Definição do Algoritmo do LpUp	87
6.7.6	Considerações sobre o método LpUp.....	89
7	CONCLUSÃO.....	91
8	PUBLICAÇÕES	Erro! Indicador não definido.
	REFERÊNCIAS	93

1 INTRODUÇÃO

A localização de objetos foi impulsionada por aplicações na área de radares durante a segunda guerra mundial, onde no pós-guerra o laboratório de radiação do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT) produziu um série de livros baseados no desenvolvimento realizado durante a guerra (POZAR, 2005). Já em 1996 a Comissão Federal de Comunicações (FCC) dos Estados Unidos exigiu que as empresas operadores de celulares fornecessem um serviço de localização de seus usuários para casos de emergência (KÜPPER, 2005), impulsionando serviços baseados em localização (SBL) (SCHILLER, 2004).

Atualmente com a diversidade de redes locais, rede de sensores e pontos de acessos, o estudo de localização de objetos está em ascensão, independente da técnica aplicada. Nesta área tem-se dois ramos de pesquisas existentes: localização em locais fechados e abertos. Independentemente do ramo, algumas aplicações para os sistemas de localização são:

- a) Trabalho: localização da seção onde se encontra o produto desejado, em um supermercado, loja de vestuário, etc;
- b) Informação: localização de um caixa automático, restaurante, local de informações, etc;
- c) Serviços sociais: usuários que tenham interesses em comum sejam informados quando se encontram próximos;
- d) Navegação: automobilística, marítima, aérea e mesmo navegação automatizada;
- e) Logística: localização de pacotes que estão sendo transportados, veículos de empresas;
- f) Segurança: monitoramento de pessoal, controle de acesso.

Estes são exemplos de algumas aplicações que poderão ser implementadas para a localização de objetos. No presente trabalho, algumas técnicas de localização existentes serão abordadas, assim como uma nova técnica, que foi desenvolvida no decorrer desta dissertação.

1.1 Objetivo

Depois da disseminação da eletrônica e da informática em equipamentos pessoais, comerciais, industriais e agrícolas, estes setores foram subdivididos, onde, cada equipamento tem sua característica própria de atuação, como por exemplo, controle, instrumentação, monitoramento, etc.

Com o passar do tempo estes equipamentos começaram a conectar-se, surgindo então as redes de comunicação. Para o setor de equipamentos pessoais, apareceram as redes sociais, criando diferentes tipos de negócios. Para outros segmentos, métodos de monitoramento e controle puderam alcançar um outro nível de aplicações. É nesse estágio onde nos encontramos, desejando ter acesso à informação necessária de maneira fácil, ágil e em tempo real. Informação essa que pode ser uma variável de um processo ou mais de uma variável de um sistema qualquer, ou ainda, uma posição no mundo ou dentro de um shopping, hospital, enfim, saber o local físico de determinado objeto do processo a ser monitorado ou controlado.

Uma ferramenta utilizada em todos os setores para localização é o sistema de localização global (do inglês, *global positioning system*, GPS). Porém, para aplicações onde os pontos a serem localizados não têm um alto valor agregado em comparação com o custo da tecnologia, esta tecnologia é inviável economicamente. Além disso, para aplicações dentro de prédios ou estacionamentos subterrâneos esta tecnologia não é viável tecnicamente. Devido a isto, outras opções devem ser utilizadas para localização.

O objetivo desta dissertação é desenvolver um sistema de localização por Rádio-Frequência (RF) através da utilização de rádios de troca de dados comerciais que tenha integrado a informação da intensidade do sinal recebido e através de pouca ou nenhuma modificação de *hardware* seja possível obter a localização de um rádio móvel. Além disto, este sistema deve ser mais vantajoso em determinadas aplicações em comparação ao GPS.

A metodologia utilizada é a de realizar uma pesquisa bibliográfica à respeito dos métodos de medição de distância e localização, e então analisá-los e compará-los. A partir disso, selecionar um dos métodos e verificar a viabilidade de melhorar sua precisão e acurácia, e desenvolver um algoritmo para o sistema. Após estabelecido o desenvolvimento da parte teórica, serão realizados testes do sistema em bancada e em campo aberto, e, por fim, será feita uma análise dos resultados para confrontar dados teóricos e experimentais.

1.2 Motivação

Atualmente tem-se um grande número de informações disponíveis que sequer se imaginava ser possível tê-las ao nosso alcance, e isso motiva engenheiros a desenvolver ferramentas para monitorar e controlar novas variáveis. Antigamente, isto não era possível ou pelo alto custo da tecnologia ou por inviabilidade técnica. Em todos os setores está surgindo um grande interesse na tecnologia de comunicação sem fio, especificamente em RF, abrindo

oportunidades de aparecimento de novos negócios em diferentes setores da indústria, comércio e agricultura em todo mundo.

Entre estes novos negócios, podem ser mencionados os sistemas de localização através de redes de comunicação sem fio, o que motiva a indústria a investir nesta tecnologia para poder monitorar e controlar novas variáveis. Hoje o serviço de localização é utilizado em todos os negócios e aplicações pessoais, como os mencionados anteriormente. A pirâmide de Maslow divide em camadas as necessidades pessoais e as aplicações do serviço de localização começou nas camadas mais baixas e hoje encontra-se na camada de relacionamentos pessoais e em um futuro breve estará no topo da pirâmide o que atingirá aplicações nas áreas da arte, jogos e entretenimento. A presente proposta visa atingir aplicações onde a tecnologia atual ainda encontra-se onerosa para implementar um sistema de localização e através desta proposta tornaria viável aplicações onde diversos pontos necessitam serem localizados.

1.3 Contribuições do trabalho

Sistemas de RF para medição de distância começaram a ser desenvolvidos alguns anos depois dos equipamentos de comunicação em RF aparecerem no mercado. Estes sistemas ganharam força em seu desenvolvimento em aplicações militares (POZAR, 2005). Atualmente, não apenas a área militar tem interesse nestas aplicações, mas também os setores industrial, comercial e agrícola, e em aplicações pessoais (BENSKY, 2008).

A contribuição desta dissertação é obter um sistema de localização para espaços abertos utilizando rádios comerciais sem a necessidade de *hardware* dedicado para esta finalidade. Além disso, foram estudadas as variáveis de influência da técnica de medição de distância através da indicação de intensidade do sinal recebido (do inglês, *received signal strength indication*, RSSI) e da técnica de ângulo de chegada (do inglês, *angle of arrival*, AoA) utilizando medições de RSSI. A aplicação destas técnicas incluiu as características de irradiação das antenas, *hardware* e infraestrutura necessários para o sistema. Por fim, um novo método híbrido de localização foi estabelecido, para o qual é necessária apenas uma estação base para a localização dos outros rádios.

Esta nova técnica apresenta algumas vantagens em relação às demais, devido a possibilidade da utilização de equipamentos existentes no mercado, com pouca adição de periféricos e a diminuição da quantidade de rádios na rede, o que possibilitará a redução dos custos com infraestrutura necessária para implementar o sistema de localização proposto.

2 DISTÂNCIA E LOCALIZAÇÃO

Distância e localização são termos próximos. A palavra distância refere-se a medida entre dois pontos, sendo esta expressa em uma unidade conhecida, como por exemplo, metros. Já a localização, refere-se a um ponto em um determinado local, de forma que pode-se saber o local exato deste ponto. Por exemplo, para localizar um endereço é necessário rua, número, Código de endereçamento postal (CEP), cidade, bairro e estado. Desta maneira é possível saber o local deste endereço. Outra maneira de determinar este endereço é através das coordenadas geográficas, que informam a posição de um ponto em qualquer local do globo terrestre.

Porém, para saber a localização é necessário ter-se o conhecimento da distância de um ponto de referência ao ponto de interesse, ou seja, a distância entre os mesmos. Então, quando se sabe o endereço de uma residência ou coordenada geográfica, ambas são referentes a um local específico, ou seja, não será possível ser determinada a localização sem que se tenha a distância entre dois ou mais pontos.

2.1 Distância

Considerando dois pontos em locais diferentes, o espaço entre eles é a distância. A mesma é determinada através de um número e de uma unidade conhecida. Um dos métodos mais antigos de mensurá-la é com a utilização de régua ou trena, sendo que, a unidade está escrita no equipamento. Assim é determinada a distância entre dois pontos.

Atualmente outros métodos são utilizados para obter a distância entre dois pontos, sendo eles o ótico, o sônico e RF. Em cada uma destas tecnologias existem diferentes maneiras para mensurar o quanto um ponto está distante do outro. O presente trabalho propõe utilizar a tecnologia de RF para determinar o afastamento entre dois objetos, uma vez que as distâncias envolvidas podem ser de centenas de metros ou quilômetros.

2.2 Localização

A localização e posição podem ser em relação a um bairro, cidade, região, estado, etc. Por outro lado, quando são fornecidas as coordenadas geográficas como latitude, longitude e altitude, tem-se a localização absoluta, uma vez que é um sistema utilizado em todo globo terrestre. Já o CEP de uma casa é a localização relativa, pois é relacionado com o

CEP utilizado pelos Correios do Brasil. Da mesma maneira afirmar que uma pessoa está no centro da cidade de Uruguaiana do estado do Rio Grande do Sul, também é considerada uma localização relativa.

Além dos conceitos citados, hoje em dia é possível dividir a localização em mais duas categorias: localização física, que se refere a um local no globo terrestre; localização virtual, que são as salas de conversa na internet, programas de comunicações, aparelhos de conferência via internet, etc. Atualmente a localização física é predominante, porém, a virtual avança dia a dia porque cada vez mais as pessoas interagem entre elas através da internet utilizando diversos *softwares* e topologias de rede. Dentro da localização física, existe a localização descritiva, relacionada à natureza geográfica do local; localização espacial; representada por um ponto no sistema euclidiano, expressada em coordenadas; localização de redes, onde, através do conhecimento da topologia da rede, é possível saber a posição do usuário de acordo com seu endereço (KÜPPER, 2005).

A posição dos objetos nesta dissertação será para localização física espacial, redes e relativa e através de equipamentos de RF. Mas uma vez localizados os objetos, seria possível processar a informação para obter-se a localização absoluta. Porém, este não é o foco desta dissertação.

3 MEDIÇÃO DE DISTÂNCIA

O físico alemão Heinrich Rudolf Hertz demonstrou que um fio circular (do inglês, *loop wire*) exibe diferentes excitações dependendo de sua orientação em relação à direção de recebimento das ondas eletromagnéticas (HAIGH, 1960). Isto demonstrou que efeitos direcionais relacionados entre transmissor e receptor existiam, dando início ao método de estimar distâncias, chamado direção de localização (do inglês, *Direction Finding – DF*) desenvolvido por John Stone Stone em 1902 (SCHANTZ, 2011). O princípio do DF é medir a potência do sinal recebido com sua antena apontando para diferentes posições. Suas primeiras aplicações surgiram na Primeira Guerra Mundial para localização de navios e aviões (SCHANTZ, 2011). Em 1904 Lee de Forest inventou o primeiro sistema de medição de distância, onde com a utilização de um resistor variável em um circuito de RF foi possível medir a intensidade do sinal. Nesta mesma época apareceu o Radar (SCHANTZ, 2011).

Atualmente, existem outras técnicas como tempo de diferença de chegada (do inglês, *Time Difference of Arrival, TDoA*), indicação de intensidade do sinal recebido, potenciômetro (TERWILLIGER, 2004), ângulo de chegada e tempo de chegada (do inglês, *time of arrival, ToA*). Então tem-se as cinco técnicas mais utilizadas atualmente e que serão descritas a seguir.

3.1 Tempo de chegada, ToA

O princípio do ToA é calcular o tempo de propagação (do inglês, *time of flight, ToF*) do sinal entre o transmissor e o receptor, sendo assim possível estimar a distância. Este tempo é o mesmo tempo de deslocamento do sinal entre estação rádio base (ERB) e a estação móvel (EM).

Devido às ondas eletromagnéticas moverem-se próximas da velocidade da luz ($3 \cdot 10^8$ m/s), para estimar distâncias com resoluções de, por exemplo, 0,1 m em um equipamento eletrônico, é necessário um oscilador de alta frequência, de, aproximadamente, 1,5 GHz, para calcular o ToF, de acordo com a equação abaixo:

$$T = \frac{\Delta d \times 2}{c} = \frac{0,1m \times 2}{3 \cdot 10^8 m/s} = 666,67 ps \quad (1)$$

Além disso, é necessário que o oscilador tenha pouco escorregamento (do inglês, *clock drift*) para obter uma medida confiável. Dependendo do tipo de ToF utilizado é necessário que as estações (ERBs e EMs) tenham os osciladores sincronizados (BENSKY, 2008).

Diferentes métodos são utilizados para estimar o ToA, entre eles: a transmissão de pulsos, transferência de tempo (do inglês, *time transferer*, TT), medição de múltiplo portador de fase (do inglês, *multi carrier phase measurement*) e espalhamento espectral (do inglês, *spread spectrum*). Estes métodos são descritos nas próximas seções.

3.1.1 Transmissão de pulsos

O radar, já mencionado anteriormente, utiliza a técnica de ToF por transmissão de pulsos, onde o transmissor emite um pulso, através de uma antena direcional, e ao chegar no objeto, este sinal é refletido e retorna para o radar. Este sinal é detectado pelo receptor e assim é calculado o tempo total de vôo do sinal. A distância é igual ao tempo dividido por dois e multiplicado pela velocidade do sinal, próximo da velocidade da luz. A Figura 1 demonstra este princípio, onde T é o tempo de ida e volta do sinal.

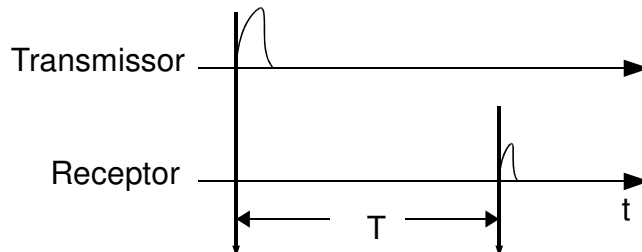


Figura 1 - Radar.

Diferente da técnica do radar, a técnica com *transponder* utiliza dois terminais ativos, em que, a EM emite um sinal para a ERB, utilizando um equipamento conhecido como *transponder*. Agora o ToF é determinado pela diferença entre sinal emitido e recebido, demonstrado na Figura 2. Sendo T_1 um período de tempo constante de resposta do EM, o ToF é obtido pelo ERB subtraindo T_1 de T_2 . A vantagem da utilização do *transponder*, é que o sinal recebido pela base é mais forte, aumentando o sinal em relação ao ruído (do inglês, *signal-to-noise ratio*, SNR) em relação a técnica sem *transponder*.

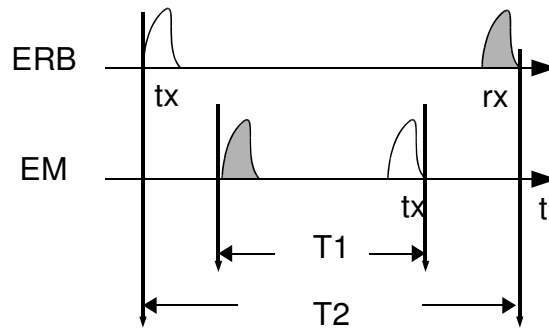


Figura 2 - Radar e transponder.

Como mencionado anteriormente, para obter resoluções de 0,1m é necessário um oscilador de 1,5 GHz. Da mesma maneira outros parâmetros que devem ser levados em conta como escorregamento do oscilador, largura do pulso, largura de banda (do inglês, *bandwidth*) de transmissão, complexidade e custo. Menor escorregamento e precisão nos osciladores aumentam a complexidade do produto, uma vez que osciladores de qualidade e circuitos integrados (CI) adicionais devem ser utilizados.

A largura do pulso é determinada pela largura da banda e tempo de viagem (do inglês, *round-trip*) mínimo a ser calculado. Por outro lado, aumentando a largura do pulso aumenta-se a energia do sinal, melhorando a relação sinal/ruído. Essa solução é limitada pelo tempo de viagem. A largura da banda limita a largura do pulso e também a detecção da borda de subida no momento correto, tanto para o EM como para o ERB, ou seja, para a correta detecção, a largura de banda de RF deve ser de pelo menos duas vezes o tempo da largura de banda do sinal, segundo o teorema de Nyquist (BENSKY, 2008).

3.1.2 Transferência de tempo

Um dos métodos mais difíceis para medição de distâncias necessita osciladores sincronizados para ambos, ERB e EM. Porém, utilizando a técnica explicada nesta secção, é possível estimar a distância sem necessidade da sincronização dos ERBs e EMs.

Considerando dois transceptores, 1 e 2, a diferença de tempo pode ser obtida por:

$$\Delta t = T_1 - T_2 \quad (2)$$

O objetivo é determinar a diferença de tempo entre os dois osciladores, neste caso, o ToF. Nessa técnica um protocolo da rede pode ser utilizado. O primeiro passo é utilizar o preâmbulo da mensagem, que deve ser utilizado como parâmetro inicial de contagem do tempo (T_{2t}), nesse ponto é disparado um temporizador no transceptor 1. O transceptor 2 quando recebe a mensagem no final do preâmbulo (T_{2r}) dispara um temporizador, e no final do preâmbulo da sua resposta para o 1 (T_{2t}), para o seu temporizador e obtém T_2 . No momento em que o 1 recebe a resposta de 2, no final do preâmbulo (T_{2r}) o 1 para seu temporizador e obtém T_1 . Após obter estes tempos, o 2 deve enviar o T_2 para 1 e assim é possível calcular o tempo de viagem, que é expresso por:

$$tp = \frac{T_1 - T_2}{2} \quad (3)$$

O processo é demonstrado na Figura 3. Outra maneira de obter a diferença entre os dois osciladores, é utilizando o valor do oscilador nos momentos T_{1t} , T_{2r} , T_{2t} e T_{1r} (BENSKY, 2008).

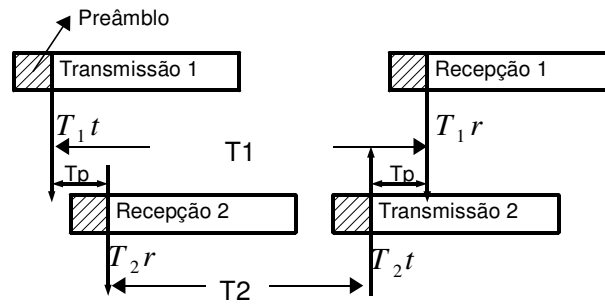


Figura 3 - Medição de tempo.

O preâmbulo é utilizado para que não ocorram falsas contagens de tempo, e apenas começar uma contagem quando o preâmbulo é reconhecido tanto pelo transceptor 1 quanto pelo 2. Da mesma maneira que a técnica de transmissão de pulsos, a largura da banda do sinal é determinante para a resolução. Para uma resolução de 1m é necessária uma taxa de transferência (do inglês, *data rate*) de 150 Mbps. Assim, as mesmas preocupações da técnica anterior são válidas.

3.1.3 Medição de múltiplo portador de fase

Para as técnicas de ToF relatadas até aqui a resolução é obtida com a utilização de osciladores de alta frequência através do sinal ou dados trocados entre as ERBs e EMs. Já nesta técnica a distância é obtida pela medição da diferença de fase do portador do sinal.

No receptor existe um oscilador para gerar um sinal de referência para, no momento em que o sinal do transmissor chegar, seja feita a comparação e obtida a diferença de fase entre o sinal recebido e o oscilador interno, como mostra a Figura 4. Porém, ocorre um problema nessa técnica chamada de ambiguidade inteira (do inglês, *integer ambiguity*), ou seja, não é possível medir uma distância entre os receptores ERB e EM maior do que o comprimento de onda (λ). Caso seja maior, o receptor não saberá quantos tamanhos de ondas se passaram (KÜPPER, 2005).

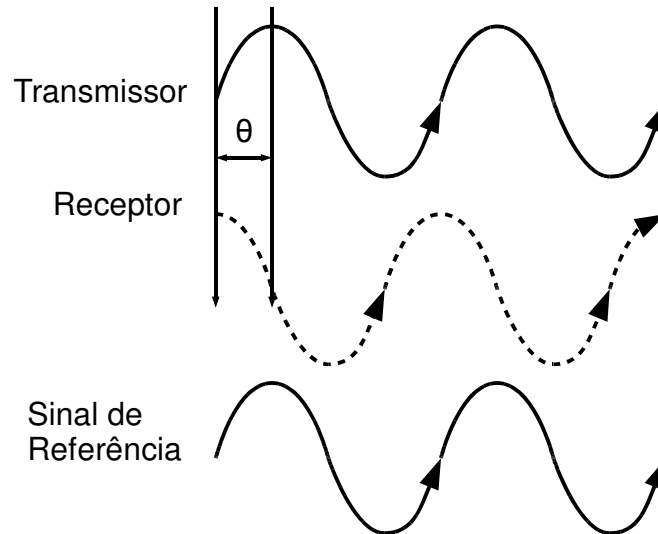


Figura 4 - Diferença de fase.

Para superar este problema, o receptor da EM recebe um sinal e através do sinal de referência mantém a mesma fase (do inglês, *phase lock*) e retransmite o sinal. O ERB calcula a diferença de fase da mesma maneira explicada anteriormente, porém, no primeiro momento em que o sinal foi transmitido, o ERB conta quantos ciclos (n) passaram-se até receber o sinal do EM. A distância poderá ser calculada através de (BENSKY, 2008):

$$d = \frac{\lambda}{2} \left(\frac{[\theta]}{2\pi} + n \right) \quad (4)$$

Para eliminar a contagem de ciclos, é possível enviar dois sinais em frequências diferentes e medir a diferença de fase de cada um em relação ao sinal de referência. Agora a limitação é em relação à distância de medição. Por exemplo, para o caso da diferença entre as duas frequências ser 1 MHz, o maior comprimento a ser medido é de 150 m. Para melhorar estas medições é necessário implementar em conjunto com esta técnica o método de espalhamento espectral (BENSKY, 2008).

3.1.4 Espalhamento Espectral

A técnica de espalhamento espectral difere das anteriores em relação à transmissão do sinal, uma vez que as técnicas anteriores necessitam de uma potência de sinal elevada para aumentar o SNR. No espalhamento espectral isto é obtido com o aumento do sinal em frequência, ou seja, pequenos sinais são gerados em diferentes frequências em torno de uma

frequência principal. Isto diferencia os transmissores de banda estreita (do inglês, *narrowband*) e de espalhamento espectral.

Seu princípio não apenas espalha a potência do sinal em diferentes frequências, mas, também, gera uma segurança para troca de dados, já que o transmissor e o receptor têm conhecimento de uma sequência pré-determinada de modulação e demodulação (código). Esse código ainda é modulado para, por exemplo, codificação de deslocamento de fase binária (do inglês, *binary phase shift keying*, BSPK) para ser transmitido.

Dentro dessa técnica, diferentes maneiras de espalhamento espectral são utilizadas: 1) pulso de frequência (do inglês, *frequency hopping*, FH), onde o código é gerado através da variação da frequência portadora; 2) sequência direta (do inglês, *direct sequence*, DS), onde o código é representado por uma sequência de bit e é modulado em BSPK, ou seja, o código utiliza uma frequência mais alta que o dado; 3) um pulso (do inglês, *chirp*), é modulado em frequência, onde o sinal diminui e aumenta linearmente; 4) pulso de tempo (do inglês, *time hopping*, TH), pulsos são gerados em tempos pré-determinados para formar o código. A norma IEEE 802.15.4a estabelece as regras das tecnologias de espalhamento espectral que focam em localização de objetos.

Essas técnicas de espalhamento espectral mencionadas têm as seguintes características (BENSKY, 2008):

- a) A largura da banda é significativamente maior do que a menor velocidade de dados;
- b) O espalhamento do sinal que causa o aumento da largura da banda é independente do dado;
- c) O inverso do espalhamento (do inglês, *despreading*) do sinal no receptor é feito através da sincronização e correlação de um sinal espalhado e replicado localmente;

Devido a largura da banda utilizada pela técnica do espalhamento espectral ser alta, as medições de distâncias têm a possibilidade de ter boa resolução, por exemplo, utilizando a técnica DS. Como nesta técnica o dado é enviado em uma codificação de bits, consequentemente os bits do código tem uma frequência mais alta em relação ao do dado, então é possível utilizar os bits do código como a resolução da distância. Além disso, da mesma maneira que a técnica de medição de múltiplo portador de fase, é possível fazer a contagem do número de ciclos. Por exemplo, no momento em que o sinal for recebido no receptor da EM, o código terá um atraso referente ao enviado, então o EM terá que

sincronizar o sinal para interpretar o código. Depois de feita a sincronização, é possível que o EM calcule em quantos bits de código o sinal referente ao código estava atrasado, desta maneira cada bit é a resolução de distância (KÜPPER, 2005).

O método transferência de tempo também é utilizado em espalhamento espectral, uma vez que é independente da técnica de comunicação. Este método apresentado anteriormente é para sistemas do tipo dois caminhos (do inglês, *two way*), porém, também pode ser utilizado em sistemas de tipo um caminho (do inglês, *one way*). Neste tipo, a desvantagem é que tanto o ERB e o EM devem ter seus clocks sincronizados, porque o ERB irá enviar a informação de tempo do seu clock no momento em que começou a transmissão. (BENSKY, 2008).

3.2 Diferença de tempo de chegada, TDoA

Ambos ToA e TDoA obtêm a distância por RF através do ToF, porém diferenciam-se pelo modo que o TDoA calcula a distância de um EM. Sua variável para cálculo é o tempo de diferença entre um par de sinais enviados por duas ERBs. Da mesma maneira do *ToA*, o TDoA necessita de pelo menos 3 ERBs para localização em duas dimensões (2D) e 4 ERBs para três dimensões (3D), isto é devido ao cálculo da distância que deverá ser determinada através de um par de ERBs, sendo que esta diferença deve-se ao fato do ToA necessitar de apenas 1 ERB para este cálculo.

Para exemplificar o TDoA, apresenta-se um sistema multilateral (e unilateral que serão explicados em breve com mais detalhes), como o da Figura 5. A EM transmite um dado que é recebido por ambas ERBs. O sinal é recebido pela ERB1 em t_1 e pela ERB2 em t_2 . Tendo os osciladores sincronizados entre as ERBs, o TDoA é obtido através $t_2 - t_1 = (t_2 - t_0) - (t_1 - t_0)$, onde t_0 é um tempo inicial, que não é conhecido e que também não é necessário para o cálculo, uma vez que seus osciladores são sincronizados. Através do TDoA obtêm-se as distâncias d_1 e d_2 , uma vez conhecidos t_1 e t_2 e a velocidade do sinal c (aproximadamente velocidade da luz). Agora, utilizando a equação da hipérbole, onde os ERBs 1 e 2 são os focos da mesma, consideram-se as diferenças das distâncias dos ERBs em relação ao EM ($d_1 - d_2$) igual a Δd . Desta maneira o EM encontra-se em uma das hipérbolas.

Sendo os ERBs de posição fixa, $D/2$ é o ponto de origem da hipérbole, então a equação 5 descreve a equação da hipérbole e a mesma em termo de Δd e D , sendo $a^2 = (\Delta d / 2)^2$, $b^2 = (D / 2)^2 - a^2$, e x e y a posição do EM.

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1 \rightarrow \frac{x^2}{\left(\frac{\Delta d}{2}\right)^2} - \frac{y^2}{\left(\left(\frac{D}{2}\right)^2 - a^2\right)} = 1 \quad (5)$$

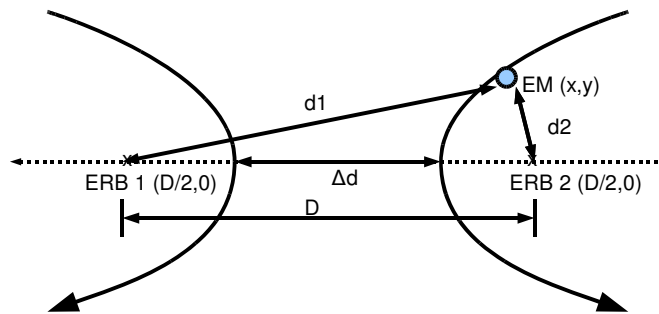


Figura 5 - Geometria do TdoA, adaptado de (BENSKY, 2008).

Através desta equação 5 confirma-se a necessidade de uma terceira ERB, pois não é possível obter x e y apenas com dois ERBs, devido a existência de duas variáveis desconhecidas na equação, x e y . Assim cria-se outra curva hiperbólica e no cruzamento de duas destas curvas encontra-se a posição do EM.

Da mesma maneira que o ToA, a resolução está ligada a largura da banda, ou seja, para se obter resoluções de alguns metros é necessária uma largura de banda alta e osciladores de alta frequência.

Um sistema antigo que utiliza o TdoA, é o Loran-C que começou a funcionar no final dos anos 50 no território americano e depois, com o aparecimento do GPS este sistema passou a funcionar apenas como segurança, caso o GPS falhasse (BENSKY, 2008). Em 2010 o Loran-C foi fechado pelo governo americano (NAVIGATION CENTER OF EXCELLENCE, 2012).

3.3 Ângulo de chegada, AoA

O método DF, já mencionado anteriormente, utiliza como princípio o AoA, o que coloca esta técnica como, provavelmente, a mais antiga metodologia de cálculo de distância e localização. O princípio desta técnica é calcular o ângulo do sinal recebido, porém não é necessária a troca de dados entre ERB e EM, nem há necessidade de sincronização entre estações, pois o ERB apenas deve identificar em qual direção o sinal foi recebido.

Este método exige ter conhecimento das propriedades da antena, sendo as principais: diretividade, ganho, ângulo de meia-potência (ou a largura de feixe) e polarização. Considerando-se essas características, uma antena com alta diretividade é a melhor escolha, porque aumenta a resolução para o cálculo do ângulo de recepção. Para o caso do SNR ser alto, é possível utilizar antenas com larguras de feixe de radiação maiores (BENSKY, 2008).

Para utilização de uma antena que gira em torno do próprio eixo, duas técnicas são utilizadas para o AoA. A primeira, através de uma antena do tipo direcional, com uma diretividade alta e pequena largura de feixe como mostra a Figura 6; no momento em que o RSSI está no ponto máximo, determina-se o AoA.

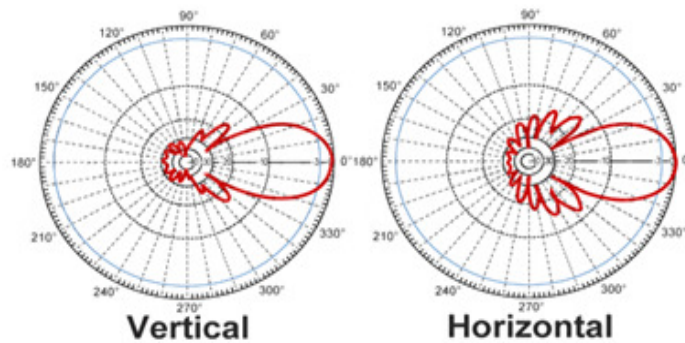


Figura 6 - Diagrama de uma antena Yagi.

Na segunda técnica, utiliza-se uma antena do tipo dipolo de meia-onda, conforme ilustrado na Figura 7, ou outra antena que apresente um nulo em seu diagrama de irradiação. Neste caso, determina-se o ponto em que o RSSI é nulo, uma vez que o nulo do diagrama é melhor definido em termos angulares que o máximo de irradiação considerado na técnica anterior. Devido ao diagrama do dipolo de meia-onda apresentar dois pontos onde o sinal é nulo, faz-se necessário saber em qual dos lados o EM se encontra para determinar sua posição.

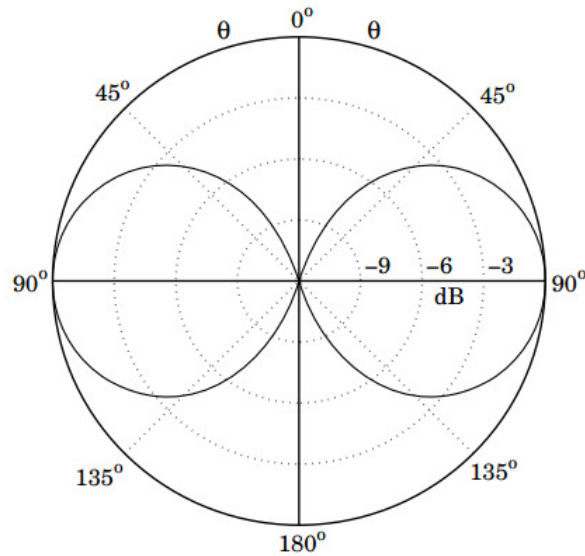


Figura 7 - Diagrama de irradiação da antena dipolo de meia-onda (ORFANIDIS, 2008).

Em muitas aplicações é um problema ter uma antena girando. Para evitar isso, utiliza-se uma rede de antenas (do inglês, *antennas array*). Neste caso, dois métodos são utilizados para determinar o AoA. O primeiro é a comparação de amplitude, que consiste em montar duas antenas com diagramas de irradiação de 180° em oposição e através de um circuito que amplifica o sinal e subtrai um sinal do outro, obtém-se o AoA. Porém este método apresenta o mesmo problema da técnica anterior, ou seja, é necessário saber qual o lado de localização do EM. O outro método é através de comparação de fases que utiliza um circuito detector para identificar a diferença de fase entre os sinais recebidos pelas antenas: o sinal chega antes na antena que estiver mais próxima do EM (BENSKY, 2008).

Antenas inteligentes (do inglês, *smart antennas*) ou antenas adaptativas, possibilitam a modificação da sua diretividade em tempo real de forma a obter uma melhor resolução para o cálculo do ângulo. Existem diferentes tipos de antenas inteligentes, sendo que uma delas é aquela em que as antenas são ligadas ou desligadas dependendo da necessidade. Neste caso, dois parâmetros podem servir de controle: o ponto máximo ou o ponto nulo do RSSI. Outro tipo é aquele em que a fase do sinal das antenas é modificada. Já em uma terceira topologia, varia-se a reatância do circuito das antenas (do inglês, *steerable parasitic array radiator*, ESPAR) (BENSKY, 2008).

3.4 Indicação de Intensidade de Sinal Recebido, RSSI

Quando um receptor recebe um dado, este sinal tem uma determinada potência, que é relacionada com a potência de transmissão, ganho das antenas e a distância entre o receptor e

o emissor, sendo esta quantificação conhecida como RSSI. Então, da mesma maneira do AoA, esta técnica não necessita de troca de dados ou sincronização entre ERM e EM para estimar a potência do sinal. Atualmente, o mesmo é utilizado por todos os usuários que utilizam conexões WiFi (marca registrada pela WiFi Alliance) para acesso a internet como indicador de qualidade do sinal. Isto demonstra uma grande vantagem desta técnica sobre as outras, ou seja, não há necessidade de modificação do hardware para implementar um sistema de localização, uma vez que atualmente o RSSI já vem integrado na maioria dos CIs de RF.

A relação entre potência recebida, transmitida e distância no espaço aberto foi estabelecida por Harald T. Friis (BALANIS, 2005) na equação abaixo:

$$\frac{P_r}{P_t} = e_{cdt} \cdot e_{cdr} \left(\frac{\lambda}{4\pi \cdot d} \right)^2 (1 - (\Gamma_t)^2)(1 - (\Gamma_r)^2) D_t(\theta, \phi) D_r(\theta, \phi) (\hat{\rho}_t - \hat{\rho}_r)^2 \quad (6)$$

Sendo t o transmissor, r receptor, ecd é a eficiência condutiva dielétrica, λ é o tamanho da onda eletromagnética, d é a distância entre transmissor e receptor, Γ é o coeficiente de reflexão, D (θ, Φ) é a diretividade e seus ângulos como mostra a Figura 8, e em (6) o $(|\hat{\rho}_t \cdot \hat{\rho}_r|)^2$ é o fator de perda por polarização (BALANIS, 2005).

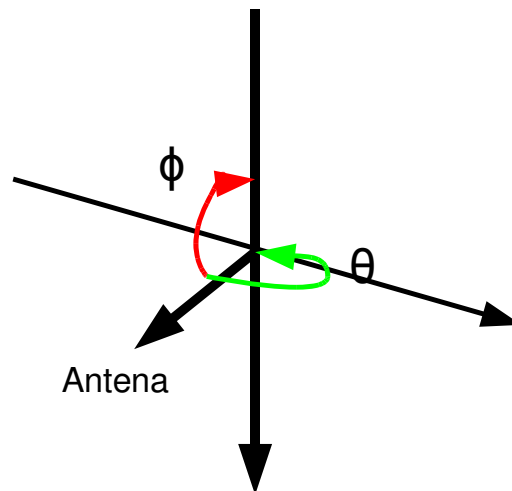


Figura 8 - Ângulos de diretividade das antenas.

Alguns autores como (BENSKY, 2008; JOHNSON, 1992, RAPPAPORT, 2002, APPLICATION NOTE ATMEL, 2010, KVAKSRUD, 2007) mencionam a equação de Friis em uma forma simplificada:

$$P_r = \frac{(P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2)}{(4 \cdot \pi)^2 \cdot d^2} \quad (7)$$

Onde G_t e G_r são os ganhos das antenas do transmissor e receptor respectivamente. Porém, às vezes, não é mencionada que esta é a equação 6 simplificada e menciona-se que é o modelo para o espaço livre, onde as antenas devem estar em uma situação ideal, e não ocorram perdas oriundas das outras variáveis, ou seja, antenas alinhadas, sem objetos para refletir, absorver ou obstruir, enfim, nada interfira nas ondas eletromagnéticas entre o transmissor e o receptor. No mundo real, como estas outras variáveis influenciam no valor da potência recebida no receptor, modelos são propostos para que a equação possa ficar mais próxima à equação 7. Esta mesma equação, se excluído o ganho do transmissor e das antenas, é conhecida como atenuação do espaço livre (do inglês, *path loss in free space*) que representa o quanto o sinal irá ter de atenuação entre o transmissor e receptor a uma determinada distância. Uma característica de influência que é possível identificar pela equação de Friis é a frequência de operação. Dessa forma quanto menor a frequência de operação menor será a atenuação do espaço livre para a mesma distância.

3.4.1 Modelos de perdas no caminho

A equação de Friis é válida quando d é maior que a distância do campo distante (do inglês, *far-field*) do receptor em relação ao transmissor (RAPPAPORT, 2002). Então, para modelos de propagação de grande escala utiliza-se uma distância de referência, d_0 , onde é conhecida a potência recebida pelo receptor, potência de referência, $P_r(d_0)$, sendo que este valor pode ser calculado ou medido em campo. Desta maneira, a equação para o modelo em espaço livre será:

$$P_r = P_r(d_0) \left(\frac{d_0}{d} \right)^2 \quad \text{onde } d \gg d_0 \gg d_f \quad (8)$$

Nesta equação d_0 é a distância de referência e d_f distância do campo distante, o expoente $2 = n$, é considerado o expoente de perdas no caminho. Existe tabelas na literatura que associam um valor do expoente para diferentes geografias do local da aplicação, tipo: campo fechado (do inglês, *indoor*) casa, prédio, etc; ou campo aberto (do inglês, *outdoor* ou

open field), urbano, floresta, descampado, etc; ou o expoente pode ser medido em campo. O n também é utilizado na equação 7, expoente do d , quando o cálculo não é feito referenciado.

Alguns modelos existentes para propagação em ambientes externos são Longley-Rice, para aplicações ponto a ponto nas frequências de 40 MHz a 100 GHz; Okumura, utilizado em áreas urbanas, em frequências de 150 a 1920 MHz (extrapolado a 3 GHz) a distâncias de 1 a 100 km; Hata, que é uma formulação empírica do Okumura; Walfisch and Bertoni que consideram o impacto de teto de casas e altura de prédios usando a difração para obter o RSSI no nível da rua. Sendo os mais populares o Longley-Rice e Okumura (RAPPAPORT, 2002).

Diversos estudos mostram variação de forma aleatória do RSSI em locais fechados (BENSKY, 2008). Assim é atribuída uma distribuição Gaussiana no modelo conhecido como normal-log sombreado (do inglês, *Log-normal Shadowing*) (RAPPAPORT, 2002). Como a proposta desta dissertação é para operação em campo aberto, o tópico em espaços fechados não será desenvolvido.

3.4.2 Interferência no RSSI

Apesar de grande parte dos equipamentos que utilizam RF ter o RSSI integrado, o mesmo é muito influenciável por diversas variáveis, como visto na equação de Friis. Quando considerada a reflexão do chão em relação às polarizações das antenas o RSSI sofre alterações (KVAKSUD, 2007), como mostra a Figura 9 com uma simulação feita em Matlab. Esta simulação mostra que quando a antena encontra-se em polarização horizontal ocorrem maiores variações nos níveis do RSSI.

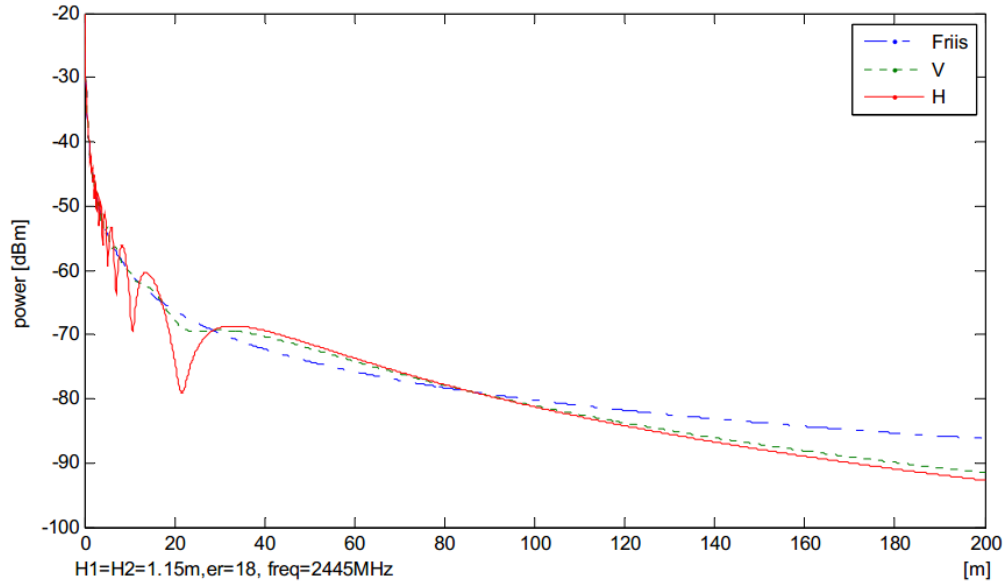


Figura 9 - Equação de Friis em espaço livre x Reflexão do Chão (KVAKSURUD, 2007).

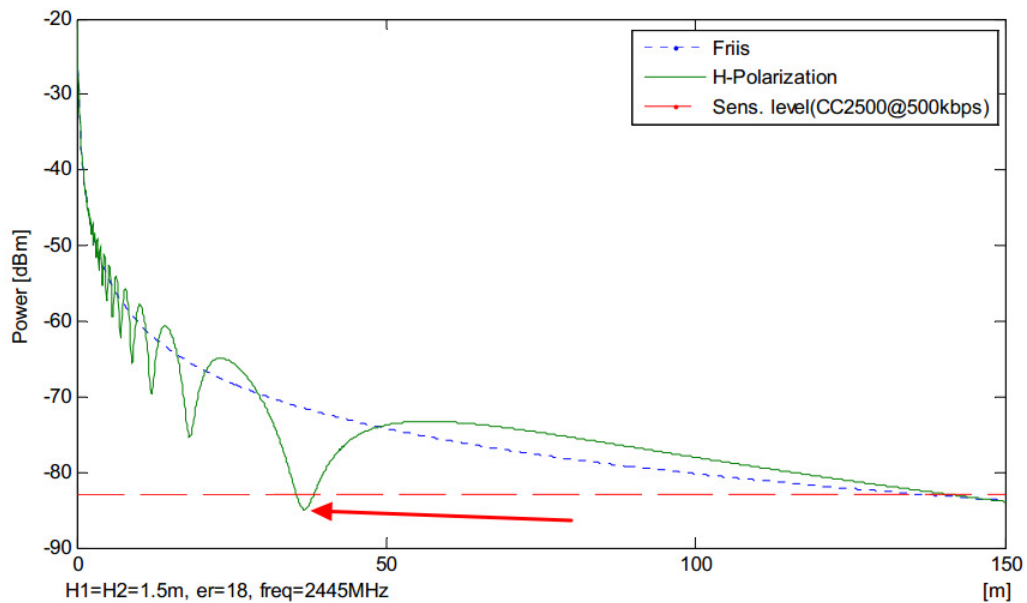


Figura 10 - Ponto morto (KVAKSURUD, 2007).

Da mesma maneira, as ondas eletromagnéticas podem percorrer caminhos diferentes (do inglês, *multipath fading*) e chegar ao receptor em diferentes tempos e intensidades, assim interferindo no RSSI. A Figura 10 demonstra as curvas da equação de Friis em campo aberto e polarização horizontal, e a linha horizontal demarcando o nível onde o receptor não consegue processar o sinal. É possível observar que em determinada distância ocorre uma perda de comunicação entre os rádios, conhecido como ponto morto. Isto ocorre devido ao sinal no receptor estar a um nível mais baixo ao nível mínimo que o receptor é capaz de

interpretar. Um dos motivos possíveis é um objeto entre transmissor e receptor provocando uma atenuação no sinal a ponto de eliminar a troca de dados entre eles.

Alguns autores desconsideram ou simplificam as variáveis da equação de Friis ou focam apenas em uma destas variáveis. Em (HUANG, 2009) são realizados testes de diferentes polarizações entre as antenas, transmissor e receptor, porém, para o cálculo de perda de desalinhamento de polarização é utilizado apenas um ângulo, diferente do real, onde existem dois ângulos como mostrado na Figura 8. Também é mencionado sobre a possível utilização do sensor micro elétrico-mecânico (do inglês, *micro electrical mechanical sensor*, MEMS) para verificar o ângulo de polarização e também para saber quando a EM movimentou-se ou parou. Da mesma maneira (APPLICATION NOTE ATMEL, 2010) considera apenas um ângulo e menciona a utilização do MEMS para cálculo do ângulo, mais velocidade e deslocamento. Já sobre sinais de RF, é mencionada a importância de desconsiderar leituras de RSSI de pacotes que chegaram com erro devido à interferência no RSSI que pode ser causada por outro rádio que está operando na mesma frequência.

3.4.3 Medição do RSSI

Como já mencionado, atualmente, o RSSI tornou-se comum nos CIs de RF, o mesmo é obtido de maneira diferente dependendo do circuito integrado. Por exemplo, o ADF7020 mede o RSSI após o filtro passa banda, já no CC2430 é medido diretamente pelo ADC que demodula o sinal. Normalmente o RSSI é medido através de um amplificador logarítmico.

3.5 Potência

Esta técnica comparada com as outras é a mais simples de ser implementada e pode ser facilmente utilizada em conjunto com outra. Para seu funcionamento o ERB necessita variar a sua potência de transmissão e utilizar uma antena com diagrama de irradiação de 360°, de maneira que cada variação de potência transmitida é referente a uma distância entre o ERB e EM. Seu princípio é o ERB enviar um sinal e caso o EM receber e responder significa que o EM está no círculo de alcance da ERB. Este círculo pode ser variável através da mudança do ganho do amplificador de potência do canal transmissor do ERB. Este método é melhor explicado na Figura 11.

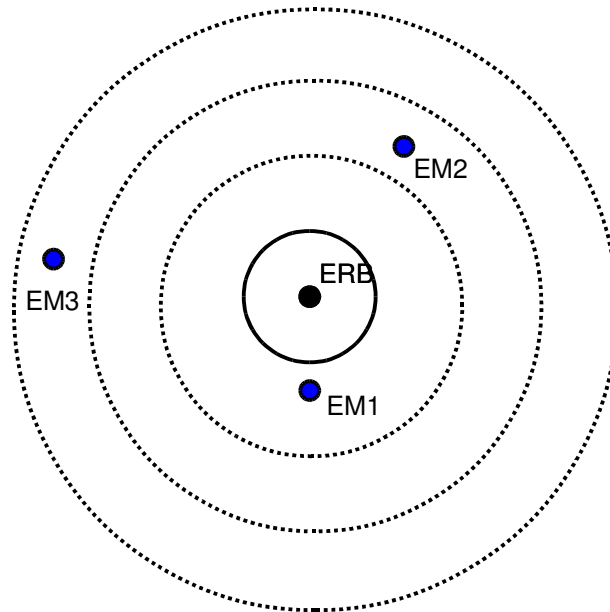


Figura 11 - Medição de distância - Potência.

Para o caso da potência do ERB estar configurada como a mais baixa e apenas EM1 estar no círculo desta potência, é possível estimar a distância, já para EM2 e EM3, o ERB terá que mudar a sua potência de sinal até conseguir estabelecer comunicação com os outros EMs. Esta técnica é aplicada em (TERWILLIGER, 2004), sendo que a resolução da distância depende de quanto o ERB consegue variar a sua potência de sinal.

Esta técnica pode ser considerada do mesmo grupo da célula de identificação (do inglês, *cell-ID*) utilizada na rede de celulares, porém, a distância não é medida, e sim, a posição do celular móvel é associada à estação base onde o mesmo encontra-se conectado (BENSKY, 2008). Uma técnica similar é apresentada por (Ji, 2009), limite de rádio comunicação (do inglês, *radio communication constraints*), porém, com mais ERBs e EMs do que da Figura 11, e também, uma vez conhecida a distância de um EM, o mesmo se utiliza desta técnica para cálculo de novas distâncias de outros EMs.

3.6 Comparações entre métodos de medição de distância

A tabela 1 apresenta um resumo dos métodos de medição de distância apresentados. Para sua elaboração foram considerados os seguintes critérios: complexidade técnica, o tempo e custo necessário para sua implementação; precisão e acurácia, informa nível possível a ser obtido utilizando a técnica de medição de distância sendo alto ≤ 1 m, médio ≤ 5 m e baixo > 5 m; calibração, informa se é necessário fazer calibração do sistema; interferência, informa o

quanto a técnica é suscetível à interferência de reflexões e de múltiplos caminhos; sincronização entre ERBs, informa se é necessário o ERBs ter seus osciladores sincronizados; hardware especial, informa os circuitos especiais necessários para implementação da técnica, por exemplo o RSSI, tem integrado em diversos transceptores de mercado.

Vale salientar que para a técnica ToA, a sincronização entre ERBs é dependente da técnica utilizada, pois algumas não apresentam a necessidade desta sincronização.

Tabela 1 - Comparação entre métodos de medição de distância.

Técnica	Princípio de Operação	Vantagem	Desvantagem
ToA	Calcular o tempo de propagação do sinal entre a ERB e EM.	- Precisão: alta. - Acurácia: alta. - Calibração: não. - Interferência: média.	- Complexidade técnica: alta. - Sincronização entre ERBs: sim. - Hardware especial: alto.
TdoA	Calcular a diferença do tempo de chegada do sinal recebido por um par de ERB.	- Precisão: alta. - Acurácia: alta. - Calibração: não. - Interferência: média.	- Complexidade técnica: alta. - Sincronização entre ERBs: depende da técnica utilizada. - Hardware especial: alto.
AoA	Calcular o ângulo do sinal recebido.	- Complexidade técnica: média. - Precisão: alta. - Acurácia: alta. - Sincronização entre ERBs: não.	- Calibração: sim. - Interferência: alta. - Hardware especial: alto.
RSSI	Medir intensidade do sinal recebido e de acordo com equação de Friis para determinar distância.	- Complexidade técnica: média. - Precisão: média. - Exatidão: média. - Sincronização entre ERBs: não. - Hardware especial: baixo.	- Calibração: sim. - Interferência: alta.
Potência	ERB transmite dados em diferentes níveis de potência, caso a ERB estiver com enlace com a EM e de acordo com a potência utilizada é determinada a distância.	- Complexidade técnica: baixa. - Precisão: média. - Interferência: baixa. - Sincronização entre ERBs: não. - Hardware especial: baixo.	- Acurácia: baixa. - Calibração: sim.

4 CÁLCULOS DE LOCALIZAÇÃO ATRAVÉS DE SISTEMAS DE ERBS

O processo de cálculo para obter a localização a ser seguido é: obtém-se a distância entre EM e ERB, transferem-se dados entre as ERBs e aplica-se o cálculo para obter a posição da EM. Este capítulo concentra-se nos tipos de sistemas de ERBs para cálculos de localização e os métodos de cálculos.

4.1 Sistemas unilateral e multilateral

O sistema unilateral ou multilateral é a maneira como a localização será obtida na rede. No momento em que a EM transmite dados para as ERBs, a distância do EM é estimada a partir de cada ERB, assim a informação é trocada entre as ERBs para que os cálculos de localização possam ser realizados. Este é um tipo de sistema multilateral, onde a informação da localização é obtida pelas ERBs, um exemplo destes sistemas é a rede de celulares. Já quando a EM recebe dados das ERBs e o mesmo faz os cálculos de localização a partir destes dados, é um sistema unilateral e para exemplificar pode-se citar o GPS (BENSKY, 2008).

O sistema a ser utilizado depende da aplicação e nada impede que a aplicação necessite que existam os dois, uni e multilateral.

Nas próximas seções serão apresentados os métodos para localização.

4.2 Sensibilidade de proximidade

Sensibilidade de proximidade (do inglês, *proximity sensing*) é um método que não exige a execução de nenhum cálculo. O seu princípio consiste em saber se a EM está entre os limites de alcance das ERBs, assim a sua posição é associada a determinada ERB. Quando as EMs estiverem fora do alcance dos ERBs nenhuma troca de dado poderá ser feita, indicando assim que a EM saiu do raio de alcance. Nas ERBs as antenas do tipo Omnidirecional podem ser utilizadas, ou para se obter melhores resoluções uma rede de antenas direcional poderá ser utilizada.

Para aplicações que necessitem de boa exatidão este método pode ser descartado, entretanto é um bom método para aplicações de baixo custo. Qualquer sistema de RF que possa estabelecer troca de dados entre ERB e EM pode utilizar este método.

4.3 Ponto Morto

O cálculo do ponto morto (do inglês, *Dead Reckoning*, DR) é um dos métodos mais antigos para determinar a posição de um EM. Sua origem vem do cultivo de peixes no mar, tendo sido também o método utilizado por Cristovão Colombo em suas viagens de descoberta do novo mundo (KÜPPER, 2005). Atualmente vem sendo utilizado na navegação de aviões, navios e automóveis.

Esta técnica é também conhecida como cálculo deduzido (do inglês, *deduced reckoning*) ou navegação inerte (do inglês, *inertial navigation*) devido ao seu princípio de estimar a posição futura com base na posição atual, direção e distância percorrida. O DR é demonstrado na Figura 12:

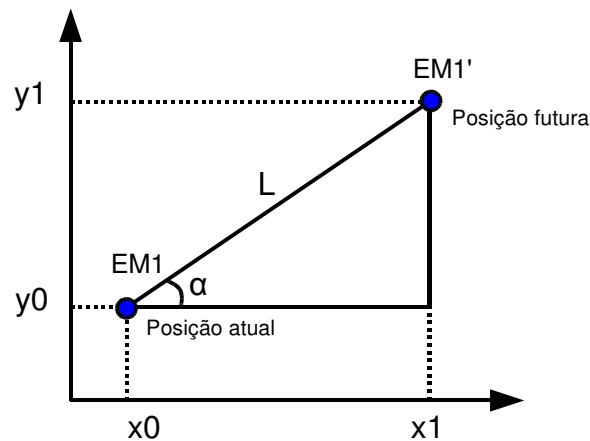


Figura 12 - Dead Reckoning.

A posição futura é obtida uma vez que L (distância) e α (direção) são conhecidas através de:

$$x_1 = x_0 + L \cdot \cos \alpha, y_1 = y_0 + L \cdot \sin \alpha \quad (9)$$

Supondo L e posição não sejam conhecidos, mas a posição inicial x_0, y_0 , velocidade, ângulo e tempo de deslocamento sejam conhecidos, então L é obtido multiplicando-se a velocidade pelo tempo de deslocamento. A velocidade e ângulo (α) podem ser obtidas através da utilização de acelerômetros, que obtêm a aceleração e integrando a mesma obtém-se a velocidade. Para determinar o ângulo α também é possível a utilização de giroscópios.

A posição atualizada da EM contém erros, onde, estes irão se propagar pelas novas estimativas de posição. Outros erros seriam do algoritmo utilizado para cálculo das posições futuras utilizando os sensores mencionados anteriormente.

Um exemplo de aplicação do DR é o projeto WearIt da empresa Xsens, tendo como objetivo de localização de pessoas.

4.4 Lateração circular

Na lateração (do inglês, *lateration*) são necessários mais de uma ERB para obter a localização de uma EM. Para o caso da lateração circular (do inglês, *circular lateration*) (AHSON, 2010) ou apenas lateração ou Rho-Rho (BENSKY, 2008), é possível obter a localização da EM a partir de duas ERBs. Cada ERB tem sua posição e um raio de alcance, conhecidos. A intersecção entre os dois círculos formados pelas ERBs é o local onde está a EM. Este princípio é melhor explicado de acordo com a Figura 13:

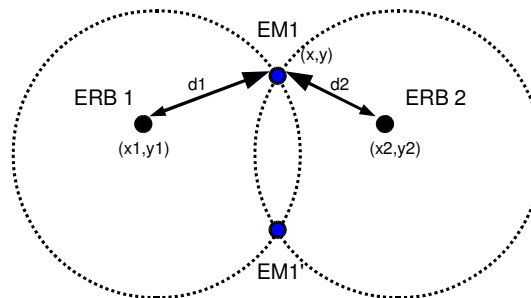


Figura 13 - Lateração, Rho-Rho ou Lateração circular.

De acordo com o teorema de Pitágoras, se x_i e y_i são posições conhecidas das ERB em respeito à coordenada cartesiana e as distâncias d_i são conhecidas, assim a posição da EM1 pode ser calculada de acordo com a equação:

$$d_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} \quad (10)$$

Para obter a coordenada da EM, é necessário resolver a matriz com as duas coordenadas das ERBs 1 e 2. Outro detalhe já mencionado anteriormente, a lateração utiliza duas ERBs, então não é possível diferenciar a localização entre as posições EM1 e EM1', porque existem dois pontos de intersecção dos círculos.

Este método pode ser utilizado com as técnicas de medição de distância como ToA, RSSI e potência. Nas ERBs não é necessário um grande poder de processamento, uma vez que a matemática a ser aplicada não é pesada.

4.5 Trilateração

Trilateração (do inglês, *Trilateration*) é uma técnica derivada da lateração, que por sua vez determina a localização através da interseção de dois círculos. Já a trilateração é quando a localização é determinada a partir dos três lados de um triângulo, ou seja, três ERBs. Da mesma maneira que o método anterior, através da equação de Pitágoras, é possível obter as coordenadas do EM. Na Figura 14 é mostrado o princípio deste método.

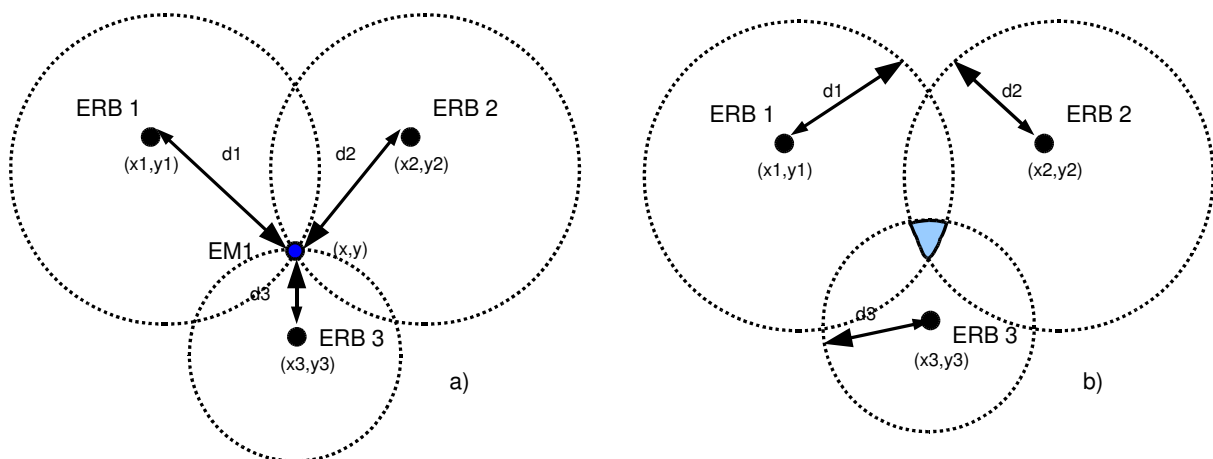


Figura 14 - Trilateração.

Na prática, ocorre algo parecido com a Figura 14b, isto é devido às distâncias medidas conterem erros, assim a EM está no local azul e não em um ponto exato. Dois métodos matemáticos podem ser utilizados, a técnica de estimativa de máxima probabilidade (do inglês, *maximum likelihood estimation*, MLE) ou menor raiz (do inglês, *least square*, LS). Estes métodos matemáticos também podem ser utilizados no método anterior, pois também ocorrem erros, uma vez que são provenientes das técnicas de medição de distâncias.

Da mesma maneira que para o método anterior, as técnicas de ToA, RSSI e potência podem ser utilizadas, porém, o emprego de métodos matemáticos para amenizar os erros é necessário um certo poder de processamento para o ERB.

4.6 Multilateração

Esta técnica também é conhecida como posição hiperbólica, mesmo princípio do cálculo de distância da técnica TdoA. Assim não serão revistos os cálculos das equações hiperbólicas. A seção da técnica TdoA contém as informações necessárias para o entendimento da multilateração e das equações hiperbólicas.

4.7 Triangulação

Por fim, tem-se a triangulação (do inglês, *triangulation*), que não é uma derivada da lateração, uma vez que seu princípio de cálculo envolve os ângulos entre ERBs e EM. Devido à necessidade da obtenção dos ângulos, a técnica de AoA é utilizada em conjunto.

O princípio da técnica reside nas leis da trigonometria plana, que afirmam que se um lado e dois ângulos de um triângulo são conhecidos, os outros dois lados e o ângulo remanescente podem ser calculados (AHSON, 2010) ou se dois ângulos e as posições das ERBs 1 e 2 são conhecidas é possível determinar a posição da EM (BENSKY, 2008). Através da Figura 15 pode-se calcular de duas maneiras a posição da EM1. Uma delas é quando são conhecidos θ_1 , θ_2 e B, então aplicam-se as equações dos senos e cossenos, equação 11 e 12 (AHSON, 2010) e obtém-se o θ_{EM1} e as distâncias B e C. A outra maneira é conhecendo-se as posições das ERBs 1 (0,0) e 2 (x_2, y_2) e os ângulos θ_1 e θ_2 , aplicam-se as equações 13 e 14, também originadas na trigonometria (BENSKY, 2008).

$$\frac{A}{\text{seno } a} = \frac{B}{\text{seno } b} = \frac{C}{\text{seno } c} \quad (11)$$

$$C^2 = A^2 + B^2 + 2A.B.\cos(c); B^2 = A^2 + C^2 + 2C.A.\cos(b); A^2 = B^2 + C^2 + 2B.C.\cos(a) \quad (12)$$

$$y_{EM1} = \frac{(y_2.\tan(\theta_2) - x_2)}{(\tan(\theta_2) - \tan(\theta_1))} \quad (13)$$

$$x_{EM1} = y \cdot \tan(\theta_1) \quad (14)$$

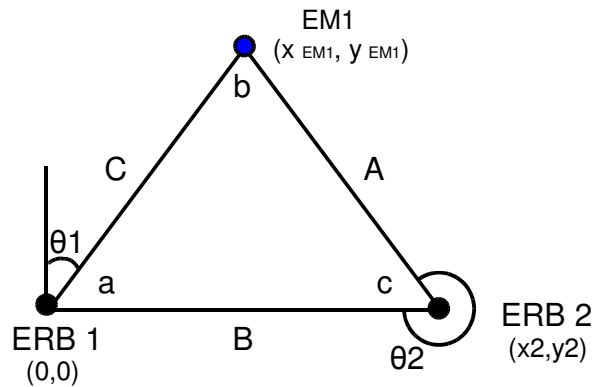


Figura 15 - Triangulação.

Na prática a triangulação pode ser aplicada com a utilização de antenas direcionais instaladas nas ERBs possibilitando obter os ângulos das EMs. Sendo assim, é possível verificar que a exatidão do cálculo está diretamente relacionada com a diretividade da antena, neste caso.

É importante mencionar que às vezes a triangulação é mal interpretada na literatura e aparece sendo utilizada para localização junto ao método RSSI, sendo que o método correto utilizado nestes casos é a trilateração. Por exemplo em (TEKDAS, 2010), onde é calculada a localização através de câmeras, seus ângulos são obtidos e a triangulação é mencionada corretamente.

4.8 Comparação entre cálculos de localização

A tabela 2 apresenta um resumo dos cálculos de localização entre as ERBs, discutidos. Para sua elaboração foram levados em conta os seguintes critérios: cálculo, se exige cálculo ou não e nível de complexidade dos cálculos a serem realizados; necessidade de método de medição de distância, informa se é necessário que tenha um método de medição de distância e com quais métodos podem ser utilizados; erro, informa o nível de erro; hardware especial, informa se é necessário algum hardware especial a ser utilizado na técnica.

Tabela 2 - Comparação entre cálculos de localização.

Técnica	Princípio de Operação	Vantagem	Desvantagem
---------	-----------------------	----------	-------------

Sensibilidade de proximidade	Saber se EM está entre limites de alcance da ERB.	- Cálculo: não. - Necessidade de método de medição de distância: não. - Hardware especial: não.	- Erro: alto.
Ponto morto	Estimar posição futura com base na inicial.	- Cálculo: médio.	- Erro: alto (acumulativo). - Necessidade de método de medição de distância: sim. - Hardware especial: sim, como sensores para deslocamento e ângulo.
Lateralização circular	Duas ERBs e a posição é determinada através do teorema de Pitágoras.	- Cálculo: médio.	- Erro: média (ambiguidade). - Necessidade de método de medição de distância: sim. ToA, RSSI ou Potência. - Hardware especial: não.
Trilateração	Três ERBs e a posição é determinada através do teorema de Pitágoras.	- Hardware especial: não. - Erro: baixo.	- Cálculo: alto. - Necessidade de método de medição de distância: sim. ToA, RSSI ou Potência.
Multilateração	Através do teorema da hipérbole é determinada a posição.	- Hardware especial: não. - Erro: baixo.	- Cálculo: alto. - Necessidade de método de medição de distância: sim. TdoA.
Triangulação	Através dos ângulos entre ERB e EM e a utilização das leis da trigonometria plana é determinada a posição.	- Hardware especial: não. - Erro: baixo.	- Cálculo: alto. - Necessidade de método de medição de distância: sim. AoA.

5 ALGORITMOS DE LOCALIZAÇÃO

Até esta seção da dissertação foram apresentados métodos de medição de distâncias e localização, mas para obter a posição das EMs é necessária a execução de algum tipo de algoritmo na rede sem fio. Estes algoritmos são divididos em categorias: livre de distância (do inglês, *range free*), baseado em distância (do inglês, *range based*), os tipos proximidade (do inglês, *proximity*), impressão digital (do inglês, *fingerprinting*), baseado em ponto (do inglês, *point based*), em área (do inglês, *area based*) e estatístico. A Figura a seguir mostra a subdivisão dos algoritmos, sendo que o estatístico está destacado porque o mesmo pode ser adicionado a qualquer outro baseado em ponto ou área.

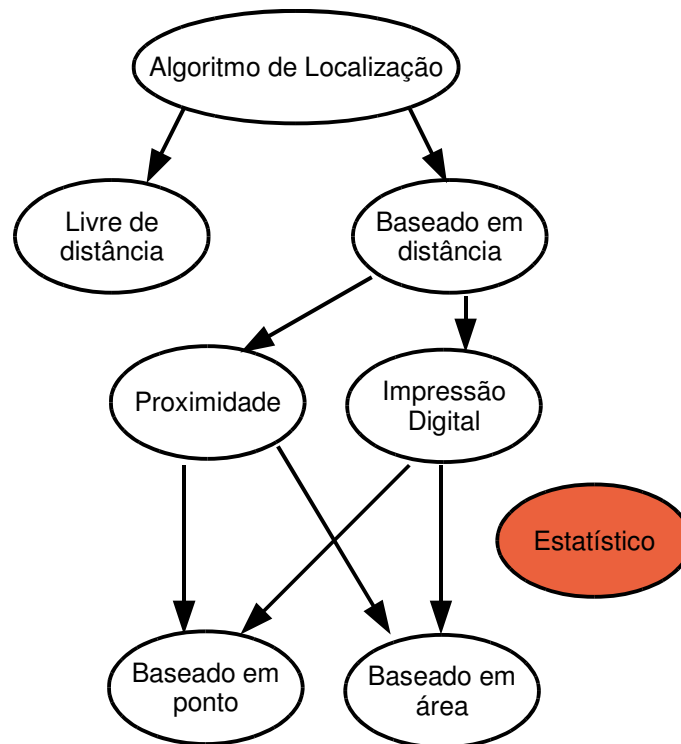


Figura 16 - Algoritmo de localização.

No decorrer deste capítulo serão apresentados os algoritmos da Figura 16.

5.1 Livre de distância e baseado em distância

Os algoritmos livres de distância são aqueles onde nenhum método de medição de distância existe. Neste segmento enquadram-se os algoritmos que fazem o uso do número de vezes que o dado é repetido, saltos (do inglês, *hops*), entre ERBs ou até mesmo através das EMs, como exemplo do algoritmo de localização *Amorphous* (Ji, 2009) onde o importante é

que as EMs, estejam dispostos de maneira que as distâncias entre eles sejam sempre as mesmas. Outro algoritmo utilizado é o DV-hop, onde a distância é calculada a partir de saltos entre as EMs iniciais e finais (Niculescu, 2001).

Já os métodos baseados em distância necessitam de um hardware para medir distância, independentemente do tipo de método utilizado. Alguns algoritmos existentes são:

- a) Estimativa convexa (do inglês, *convex estimation*), através de uma rede do tipo ponto a ponto onde nenhum rádio é uma ERB ou EM. A comunicação entre os rádios é definida por figuras geométricas, círculos e ângulos, que são utilizados para estimar a posição de um rádio. (Ji, 2009) e (Doherty, 2001).
- b) Método Mínimo e Máximo, define uma área em que a EM possivelmente se encontra. As maneiras de processamento da localização são duas. Na primeira são medidas as distâncias entre as EMs e ERBs e a localização é obtida. O segundo é baseado no método de trilateração (Ji, 2009).
- c) Lateração, uma vez que uma EM encontra-se no alcance de mais de uma ERB, equações podem ser montadas e através dos mínimos quadrados é estimada a posição das EMs (Ji, 2009).
- d) Estatístico, através de uma tabela de histórico de posição é possível estipular pesos para determinadas posições onde uma EM pode-se encontrar (Ji, 2009).
- e) Multidimensional Escalar (do inglês, *multidimensional scalling*, MDS), esta técnica é utilizada para analisar a proximidade dos dados a um estímulo para revelar uma estrutura escondida nestes dados (Steyvers, 2001). Para esclarecer o que o MDS pode obter, imagine que um copo quebre em vários pedaços no chão, consequentemente existe um arranjo nestes pedaços. Agora conhecendo a distância entre os pares de pedaços espalhados, o MDS pode refazer este arranjo. O algoritmo utilizando o MDS faz a medição da distância entre pares de EMs e as posições das EMs podem ser determinadas (Shang, 2003).
- f) MDS-MAP introduzido por (Shang, 2003), utiliza o MDS como base. Seu princípio é dividido em três passos. Primeiro é necessário computar o menor caminho entre todos os pares de EMs da região de interesse; segundo, aplicar o método MDS clássico e terceiro é necessário transformar o mapa relativo para mapa absoluto baseado nos ERBs.
- g) DV-distance, similar com os algoritmos livres de distância, a diferença é que a distância não é mais calculada em saltos e sim utilizando algum método de medição de distância (Niculescu, 2001).

- h) Euclidean, através de cálculos de linhas entre ERB e EM, utiliza-se o teorema de Pitágoras para colocar “peso” na localização da EM desejada (Niculescu, 2001).

5.2 Proximidade e impressão digital

Na área dos algoritmos baseados em distância, ainda ocorre uma subdivisão entre proximidade e impressão digital.

Algoritmos de proximidade é qualquer algoritmo que utiliza um tipo de método de medição de distância e em conjunto com os métodos de localização pode estabelecer a posição de uma EM (BENSKY, 2008).

Já nos algoritmos de impressão digital, as características dos sinais recebidos pelas ERBs das EMs são comparadas com uma base de dados armazenados nas ERBs para estabelecer a posição. Essa base de dados é levantada em campo, manualmente ou por um sistema automático para coletar e salvar os dados referentes à característica do sinal em determinada posição (área ou volume), assim possibilitando a associação. A vantagem deste método ao de proximidade é obter uma maior precisão para uma geografia já conhecida, uma vez que ao fazer a base de dados, problemas como múltiplos caminhos e sombra são eliminados (BENSKY, 2008).

5.3 Baseado em ponto e baseado em área

Este tipo de algoritmo é dividido em dois, baseado por ponto ou por área. É considerado baseado por ponto quando o mesmo tenta localizar o objeto em sua posição real, já o baseado em área é quando a localização é dada em uma área, ou seja, o objeto deve estar dentro da área previamente estabelecida. A Figura 17 exemplifica a diferença:

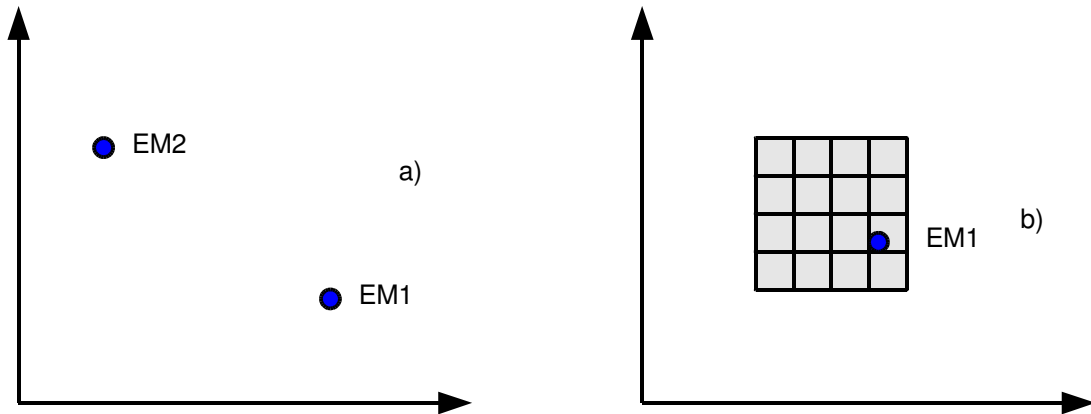


Figura 17 - a) Baseado em ponto; b) Baseado em área.

Na Figura 17a, temos a posição de dois EMs e suas posições estão bem determinadas, sem considerar erros, já na Figura 17b, a posição do EM1 para o algoritmo utilizado está na segunda área de cima para baixo à direita, não importando exatamente sua posição dentro desta área (MAO, 2009).

5.4 Estatístico

O método estatístico pode ser utilizado em qualquer algoritmo baseado em distância. O objetivo deste é utilizar uma análise dos locais mais prováveis de uma EM estar, porém, levando em consideração alguma técnica de medição de distância ou ângulo.

6 MÉTODO HÍBRIDO

Após a análise dos métodos de medição de distância, localização e algoritmos, foi verificado qual método de medição de distância seria possível aplicar com hardware de baixo custo e já difundido no mercado, enquadrando-se a técnica de RSSI. Os motivos para selecionar esta técnica são:

- Grande parte dos CIs transceptores de RF possuem medição do RSSI integrada, ou caso contrário, é possível adicionar um circuito de medição de RSSI com a utilização de 1 ou 2 CIs adicionais. Diferentemente de outras técnicas de medição de distância, assim a utilização do RSSI diminui o tempo de desenvolvimento e custo do projeto;

- Outros trabalhos já feitos utilizam a técnica do RSSI para determinar a localização e afirmam ser possível utilizar esta técnica para este fim (ZHU, 2006, MASIERO, 2007, KVAKSRUD, 2007, VIG, 2004, TERWILLIGER, 2004, LEE, 2010, HARNEY, 2009, ALMAULA, 2010, BANDARA, 2005, LAU, 2008, SAXENA, 2008, ZÀRUBA, 2006, LEE, 2010, BAHL, 2000, HELÉN, 2005, HARNEY, 2009);

- Devido à existência de variáveis de influência que alteram os valores do RSSI. Como exemplo, pode-se mencionar a inclusão das características das antenas utilizadas não serem levadas em conta por outros autores, o que diminui a acurácia e precisão do sistema de localização ou até mesmo o deixa inviável tecnicamente. Estas variáveis de influência abrem precedentes de uma verificação: é possível aumentar a acurácia e a precisão de um sistema de localização levando-se em consideração estas variáveis de influência? No decorrer dos testes desta dissertação esta pergunta é respondida.

Como mencionando anteriormente, esta técnica vem sendo bastante empregada em localização por RF, por diversos autores (ZHU, 2006, MASIERO, 2007, KVAKSRUD, 2007, VIG, 2004, TERWILLIGER, 2004, LEE, 2010, HARNEY, 2009, ALMAULA, 2010, BANDARA, 2005, LAU, 2008, SAXENA, 2008, ZÀRUBA, 2006, LEE, 2010, BAHL, 2000, HELÉN, 2005, HARNEY, 2009). O RSSI foi bastante difundido após a publicação de (BAHL, 2000) que focou em implementar a localização de computadores instalados no prédio da Microsoft através da rede WiFi. Porém algumas vezes o RSSI ainda é visto como um método de baixa precisão ou inviável para este tipo de aplicação (PARAMSWARAN, 2009), e é sugerido outro método, por exemplo, ToA onde é possível conseguir melhor precisão. Porém esta visão distorcida do RSSI pode ser atribuída à falta de atenção dada para as antenas

utilizadas, polarização das antenas e características físicas do ambiente (principalmente em ambientes fechados).

Prova destas variáveis de distorção é demonstrada em (HUANG, 2009) onde três tipos de polarizações são empregadas, demonstrando que o desalinhamento de polarização das antenas introduz um erro no RSSI e que, considerando essa variável, é possível aumentar a acurácia do RSSI. Por outro lado, ainda em muitos trabalhos, o diagrama de irradiação nem é conhecido e é considerado como sendo isotrópico e sem perdas, o que na realidade não ocorre, como mostrado nos testes de (ZHOU, 2004) e (PUCINELLI, 2006). Os trabalhos (BAHL, 2000, HELÉN, 2005) mencionam o fato do corpo humano ser um obstáculo que interfere no sinal, exigindo a necessidade de identificar se há ou não uma pessoa entre os rádios, além de mencionarem que a frequência de operação de 2,4 GHz é bem sensível a obstáculos tipo paredes, devido ao comprimento de onda. Um dos trabalhos que mais discute sobre os impactos no RSSI é (LIN, 2008), que testa a orientação das antenas com obstáculos atrás, ao lado, abaixo e na frente da linha de visão dos rádios, bem como rádios posicionados em locais de intensa circulação de pessoas. O autor conclui ser possível verificar que no horário onde não há circulação de pessoas, os valores do RSSI ficam estáveis. Também em (KVAKSrud, 2007) fala-se sobre a distância necessária para instalação da antena em relação ao solo, para minimizar os efeitos da reflexão da onda eletromagnética.

A frequência de operação apresenta influência direta na atenuação e reflexões do sinal causadas por um objeto na linha de visão entre dois rádios. Uma alternativa para a realização de medições mais confiáveis do RSSI é através da técnica de diversidade de antenas (LACOSTE, 2011), a qual tem como principal objetivo diminuir os efeitos de múltiplos caminhos no receptor. O sistema de recepção opera com duas antenas separadas por uma distância de um quarto de onda. Este mesmo princípio é utilizado com a técnica de salto em frequência em que o sinal é medido em diferentes frequências. Também menciona sobre a diversidade de polarização ajudar na leitura do RSSI, porém a melhora ocorre se a polarização das outras EMs não for fixa, caso contrário irá piorar a medição. O artigo (KVAKSrud, 2007) alerta que a utilização de outros rádios com a mesma frequência irá modificar as medições, devido a interferência gerada.

Em relação ao *hardware*, (MO, 2010) e (FRENZEL, 2006) mencionam sobre a mudança de temperatura alterar os valores lidos pelos detectores de RF, responsáveis pela medição do RSSI. Em (ZHOU, 2004) e (LYMBERPOULOS, 2006), é mencionada a existência de variação na potência transmitida de um transmissor para o outro, devido à

variação do processo de fabricação e em (ZHOU, 2004) também é mencionada a variação da potência transmitida devido à variação da tensão de alimentação, mesmo que o CI que compõem o rádio esteja operando na faixa de alimentação especificada pelo fabricante.

Além destas variáveis que modificam o RSSI, algoritmos podem ser empregados para reduzir os erros de medição, porém (PUCINELLI, 2006) menciona da dificuldade de simular todas as reflexões que a onda eletromagnética pode sofrer, e, por isso, é aconselhável fazer um modelo estatístico. Vale salientar que grande parte dos trabalhos simulam redes sem fios com seus algoritmos, assim, estas simulações não levam em conta todas as variáveis de influência. O autor de (LU, 2010) apresenta o modelo log-normal de sombra com variância dinâmica (do inglês, *log-normal shadowing model with dynamic variance*, LNSM-DV), determinado com base em grande número de amostras de RSSI. Já (SAVARESE, 2001) apresenta o algoritmo Hop-TERRAIN, que pode ser utilizado em redes onde existem rádio repetidores e é contado o número de repetições realizadas nos pacotes da rede (do inglês, *hops*) e assim é determinada a localização. Já outros como (BAHL, 2000) e (JI, 2009) utilizam a técnica de impressão digital, mencionada anteriormente, com algoritmos adicionais para localização.

Após esta verificação, confirmam-se algumas afirmações: alguns trabalhos não levam em consideração as características reais das antenas; não levam em conta variáveis de influência; atribuem ao RSSI variação aleatória; etc. Esta dissertação irá levar em consideração as variáveis de influência do RSSI para determinar a medição de distância e localização.

O método AoA, explicado anteriormente, também pode ser implementado utilizando medições de RSSI. Isto fez com que surgisse interesse nesse tópico e a verificação de trabalhos existentes para uma possível implementação do AoA nas ERBs.

Em (HAIGH, 1960) fala-se em intensidade do sinal recebido pela antena quando varia-se a mesma em relação ao ângulo de recepção e também sobre rede de antenas, mencionando o sistema H-Adcok. Em (RAPPAPORT, 1998) é feito um resumo de duas décadas de AoA e separa o AoA em duas técnicas, baseada em espectro, onde o valor recebido que contenha a maior intensidade de sinal é relacionado ao AoA e a paramétrica, que exige uma análise estatística dos sinais recebidos para determinar o AoA. Como já mencionado, um dos focos do trabalho será a importância das antenas, assim a técnica de AoA de interesse é baseada em espectro.

Em (NAVAL AIR SYSTEM COMMAN, 1999) são apresentadas 3 técnicas aplicadas: varredura de feixe (do inglês, *beam scanning*), onde uma antena direcional está sobre um suporte giratório; comparação por amplitude, através de uma rede de antenas é feita a divisão de potência do sinal recebido em duas das antenas; interferômetro de fase (do inglês, *Phased Interferometer*), que utiliza uma rede de antenas e mede a diferença de fase entre as antenas da rede, sendo proporcional ao AoA. Em (BENSKY, 2008) é mencionado que torres de celulares normalmente utilizam 3 painéis setoriais onde cada uma abrange 120° e, através da potência do sinal recebido, é determina a localização das EMs. Em (JI, 2009) utiliza-se um refletor parabólico para intensificar o sinal recebido em uma antena omnidirecional localizada sobre um suporte giratório, envolvendo um procedimento mecânico para obter o AoA. Similar a (PARK, 2000), onde utiliza-se uma direcional na ERB com motor de passo e nas EMs uma antena omnidirecional, e para determinar sua localização, as EMs necessitam ao menos da medição dos ângulos de duas ERBs (triangulação). Já (KOTWAL, 2009) utiliza a medição do RSSI para medir distância, AoA para determinar o ângulo e também saltos na rede sem fio e propõe um algoritmo de localização, porém todo o sistema apenas é simulado. Em (WINFREE, 2007) utiliza-se uma rede de 6 antenas dipolo onde é feito o chaveamento das antenas necessárias para formar o diagrama de irradiação desejado para poder transformar o RSSI medido em AoA, similar a (ASH, 2004), onde a rede de antenas é direcional. Já o (TAILLEFER, 2005) utiliza a rotação mecânica da antena. Em (BRÁS, 2011) é proposta uma antena, Hive5, para combinar o RSSI com AoA, onde esta antena é do tipo setorizada, sendo possível determinar 6 zonas distintas, através do diagrama de irradiação da antena. Após este estudo foi verificado ser possível determinar o AoA utilizando medições do RSSI.

Então, verifica-se a possibilidade de implementar um sistema híbrido onde o AoA e RSSI possam ser utilizados em conjunto. A vantagem com esse tipo de sistema será explicada nas próximas seções onde um novo método e algoritmo de localização é proposto.

6.1 O Método de localização LpUp

Os métodos descritos para executar a localização das EMs em um espaço físico de coordenadas cartesianas, (x,y), necessitam de pelo menos de 3 ERBs para poderem executar os cálculos de triangulação, trilateração ou multilateração. Isto demanda investimento em uma infraestrutura adequada (estrutura para antenas, rádios, ERBs, energia elétrica no local, etc) para fazer um sistema de localização, e dependendo do relevo e obstáculos do local somente 3

ERBs não serão suficientes. Tendo como uma das motivações a redução dos custos, verificou-se a possibilidade de desenvolver um novo sistema onde através de apenas um ponto ou ERB é possível fazer a localização em um espaço físico (x,y) das EMs, sistema esse chamado de localização por um ponto (LpUp).

LpUp é um sistema híbrido que utiliza as técnicas de RSSI e AoA. Considerando a Figura 18, o ERB fica no centro dos diagramas de irradiação das antenas. Na Figura 18(a), é um sistema do tipo AoA que irá fornecer o ângulo θ referente a EM utilizando antenas direcionais, já na Figura 18(b) é um sistema do tipo RSSI que irá fornecer a distância d referente ao receptor da EM utilizando uma antena omnidirecional. Através de d , θ e usando trigonometria é possível estabelecer x e y :

$$\begin{aligned} x &= \cos \theta \cdot d \\ y &= \text{sen} \theta \cdot d \end{aligned} \quad (15)$$

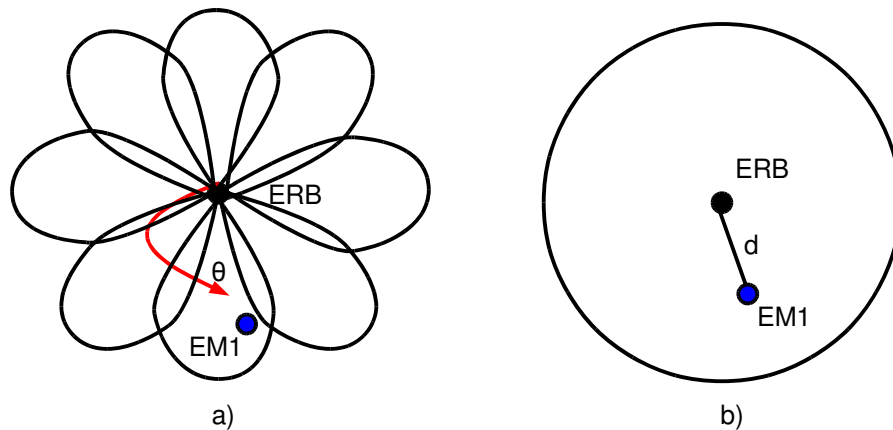


Figura 18 - Sistemas a) AoA b) RSSI.

No sistema de localização relativo, utilizado nesta dissertação, a localização das EMs será relativa a ERB (x_{ERB}, y_{ERB}) , assim os EMs terão as coordenadas de acordo com a equação:

$$\begin{aligned} x &= \cos \theta \cdot d + x_{ERB} \\ y &= \text{sen} \theta \cdot d + y_{ERB} \end{aligned} \quad (16)$$

O método LpUp primeiramente determina a distância, Figura 18(b), a ERB utiliza uma antena omnidirecional para este fim e mantém as outras antenas direcionais inoperantes. O nível de potência do sinal recebido pela EM₁ indica a distância d .

O passo seguinte do LpUp é determinar o ângulo θ e para isso é necessário determinar em qual antena direcional o EM₁ encontra-se. A Figura 18(a) demonstra este passo da seguinte forma: a ERB conecta a saída de seu rádio na antena 1 e tenta estabelecer comunicação com o EM₁, depois na antena 2 e sucessivamente até passar por todas as antenas. O maior valor de RSSI é relacionado à antena em operação e indica que a EM₁ encontra-se dentro do diagrama de irradiação desta antena.

Utilizando a informação da distância d em conjunto com o RSSI da antena direcional em operação é possível determinar o AoA. O método proposto pelo LpUp para AoA considera a posição da EM no diagrama de irradiação da antena Yagi. Considera-se a Figura 19, o diagrama de irradiação de uma antena direcional no plano horizontal e os pontos A_i, B_i e C_i como possíveis posições da EM. Estas posições apresentam diferentes valores de RSSI, e também são dependentes das posições i_1 , i_2 e i_3 , ou seja, esta variação é dependente de d , mas como d é conhecido, então é necessário ajustar o valor de RSSI para d nos pontos A_i, B_i e C_i e assim é possível determinar o AoA, ou seja, o ângulo da EM.

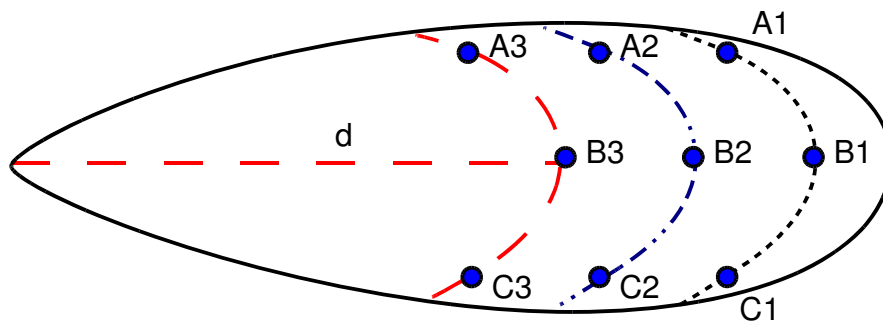


Figura 19 - AoA com distância d

Porém esta técnica apresenta o problema de ambiguidade na posição da EM, ou seja, não é possível diferenciar os pontos A_i e C_i apenas com a leitura desta antena. Para resolver este problema é necessária a utilização da informação das antenas vizinhas. Considerando a Figura 18 a) e a EM posicionado no diagrama de irradiação da antena direcional mais à direita e que a posição do EM seja A₃, Figura 19 - AoA com distância d , então a antena vizinha à esquerda terá um valor de RSSI lido maior em relação à antena da direita, indicando o ponto A₃ como o local da EM.

Nas próximas seções serão descritas as etapas que foram realizadas para desenvolver o algoritmo do LpUp bem como os testes realizados em campo que influenciaram na tomada de decisão para estabelecer o melhor algoritmo e métodos para implementação do LpUp.

6.2 Limite de resolução

Como qualquer outro método de localização, o LpUp tem seu limite de resolução, sendo dependendo dos seguintes fatores:

- Resolução do circuito de medição do RSSI;
- Ganho dos estágios de transmissão, antenas e recepção;
- Circuito de entrada (do inglês, *front-end*) de RF com ganho automático;
- Proximidade entre ERB e EM;

Nas seguintes seções estes fatores são descritos.

6.2.1 Resolução do circuito de medição do RSSI

A resolução do RSSI depende do receptor ou transceptor utilizado no rádio. Como já mencionado, atualmente os transceptores tem este circuito de medição junto ao CI. Nesta dissertação é utilizado o mRadio da Eletroeste que é baseado no transceptor ADF7020 da Analog Devices.

Existem diferentes circuitos para medir o RSSI. No CI utilizado nesta dissertação o RSSI é obtido através do amplificador logarítmico de compressão sucessiva seguido de um filtro passa-banda,

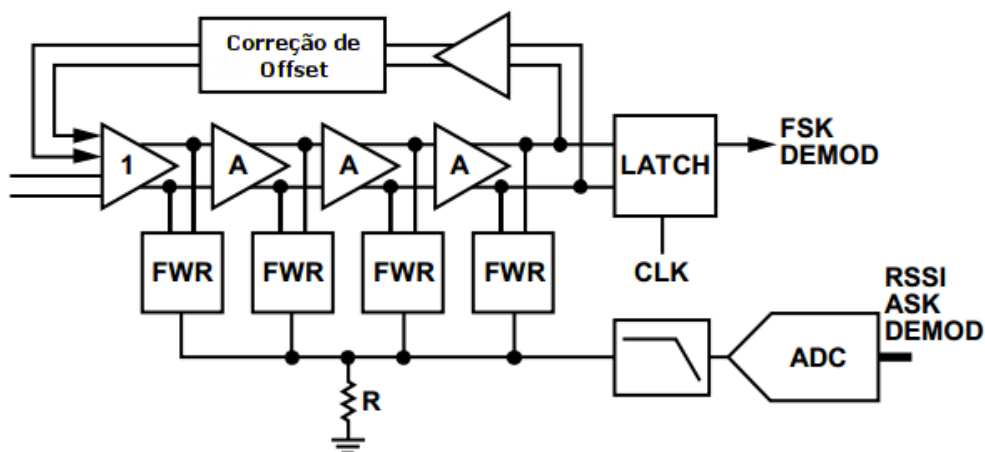


Figura 20, onde este valor é disponibilizado em um registrador. Este valor é utilizado para o ajuste automático do ganho do CI. Para este valor ser utilizado como RSSI é necessário convertê-lo para dBm como informa o manual do CI. No caso do mRadio, o valor do RSSI já é em dBm, assim nenhum cálculo é necessário. As especificações do circuito são:

- ADC de 7 bits;

- Linearidade ± 2 dB;
- Exatidão absoluta ± 3 dB;
- Escala de medição: -110 a -24 dBm;

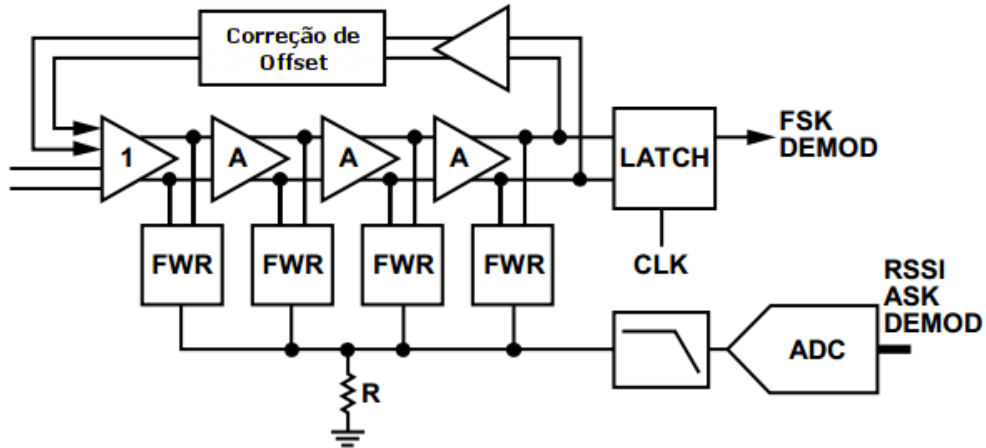


Figura 20 - Circuito de medição do RSSI do ADF7020.

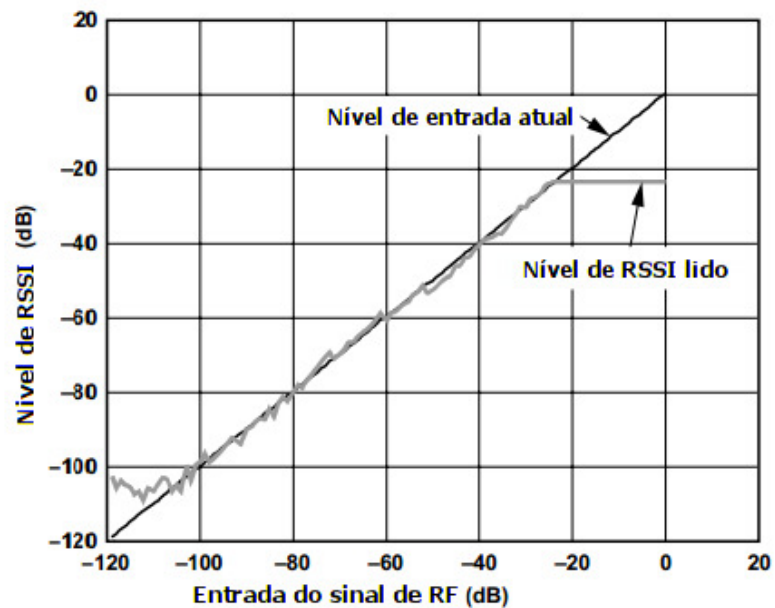


Figura 21 - Linearidade da leitura digital do RSSI.

A resolução do circuito é de 86 níveis de -24 a -110 dBm, indicando uma resolução limitada à variação de 1 dBm. Os valores de linearidade e exatidão irão interferir na acurácia e precisão da medição do RSSI. Tanto linearidade e exatidão das medições alcançam maiores desvios do valor real quando o SNR estiver alto, ou seja, quando o RSSI estiver em seu nível máximo ou mínimo.

6.2.2 Ganho dos estágios de transmissão, recepção e antenas

Os estágios de transmissão e recepção e das antenas influenciam diretamente na resolução do sistema de localização. Supondo o limite de leitura do RSSI seja de 1 dBm e caso seja possível aumentar o ganho dos amplificadores do canal de recepção e transmissão, possibilitando estabelecer comunicação entre dois pontos mais distantes (d maiores). Neste exemplo, quando os ganhos aumentam, a leitura do RSSI de 1 dBm representa uma distância maior em comparação quando os ganhos eram menores. Estes ganhos aparecem na fórmula de Friis e este caso é descrito em maiores detalhes nas próximas seções.

6.2.3 Circuito de entrada de RF com ganho automático

Alguns transceptores em seu circuito de entrada contêm um circuito que ajusta automaticamente o ganho do amplificador de baixo ruído (do inglês, *low noise amplifier*, LNA) do canal de recepção. A medição do RSSI é realizada depois deste circuito, ou seja, uma vez que o LNA é ajustado automaticamente o valor medido pelo RSSI tem, ou não, introdução do ganho, onde dependendo o transceptor, este valor do ganho não é acessível pelo usuário. Então o ganho do LNA deve ser fixo porque ao utilizar a equação de Friis é necessário informar o valor do LNA ou se utilizado o método de impressão digital, uma vez feita as medições dos valores de RSSI no local, o ganho do LNA também deve-se manter fixo.

6.2.4 Proximidade entre ERB e EM

A Figura 22 apresenta as 4 diferentes potências de transmissão do mRadio, 23,97, 18, 13 e 8 dBm, na equação 7. Pelo gráfico é possível verificar que quanto menor o sinal recebido no receptor, P_r , maior é a variação de distância em relação à mudança de 1 dBm do sinal recebido, ou seja, menor será a resolução. Assim, a maior resolução será obtida quando o sinal recebido estiver tendendo ao mesmo sinal transmitido, ou seja, lado esquerdo da Figura 22. Outra consideração é em relação a um ganho adicionado ao sistema, na transmissão ou recepção, uma vez que este ganho irá modificar a resposta do sinal recebido em relação a distância. A Tabela 3 foi obtida calculando valores em diferentes níveis de recepção da Figura 22 e mostra o quanto a variação de 1 dBm o quanto representa em metros para diferentes

níveis de sinal recebido e potências transmitidas, confirmando que para o mesmo nível de sinal recebido, quanto maior o sinal e menor a potência transmitida é possível obter a maior resolução com a variação de 1 dBm. Na Tabela 4 foi calculada a variação de 1 dBm, mostrando claramente a relação de ganhos e resolução.

Outra questão é quando o sistema estiver operando com valores de RSSI baixos, significa que o transceptor aumenta o erro em relação ao valor real, como já mencionado na seção 6.2.1.

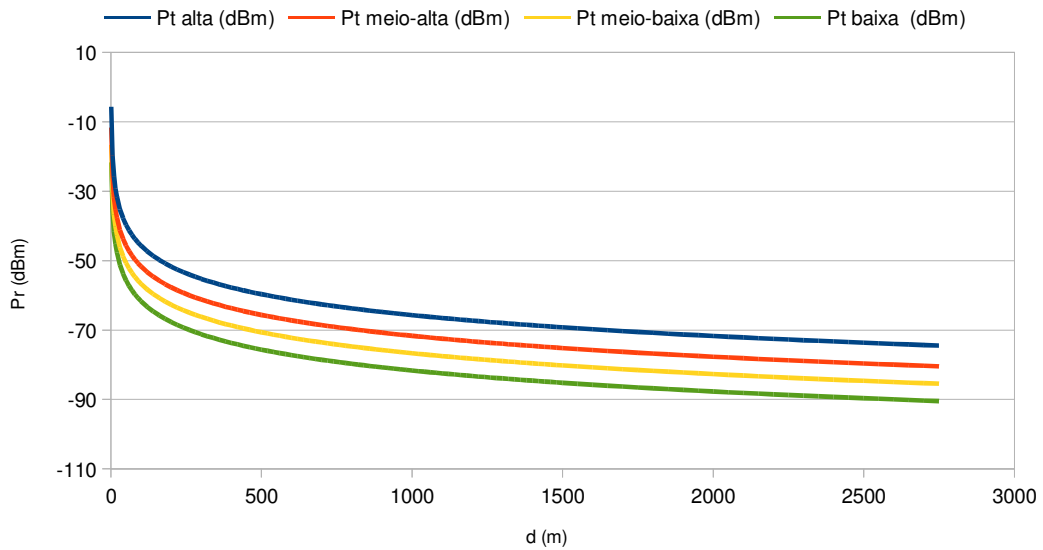


Figura 22 - Equação de Friis com diferentes potências.

Tabela 3 - Variação de 1 dBm por metro em diferentes potências de transmissão.

Potência de transmissão (dBm)	23,97	18	13	8
Pr (dBm)	1 dBm/m	1 dBm/m	1 dBm/m	1 dBm/m
40 a 50	12	6	3,5	2
50 a 60	36	19	11	6
60 a 70	116	56	32	19
70 a 80	360	182	98	56

Tabela 4 - Variação 1 dBm e distâncias equivalentes.

RSSI level (dBm)	Pt high (m)	Diferença de 1 dBm (m)	Pt mid-high (m)	Diferença de 1 dBm (m)	Pt mid-low (m)	Diferença de 1 dBm (m)	Pt low dBm (m)	Diferença de 1 dBm (m)
-30	16,7	2,0	8,4	1,0	4,7	0,6	2,7	0,3

-31	18,7		9,4		5,3		3,0	
-40	52,8	6,4	26,5	3,2	14,9	1,8	8,4	1,0
-41	59,2		29,8		16,7		9,4	
-50	166,9	20,4	83,9	10,2	47,2	5,8	26,5	3,2
-51	187,2		94,2		53,0		29,8	
-60	527,7	64,4	265,4	32,4	149,2	18,2	83,9	10,2
-61	592,1		297,8		167,5		94,2	
-70	1668,7	203,6	839,2	102,4	471,9	57,6	265,4	32,4
-71	1872,4		941,6		529,5		297,8	
-80	5277,0	643,9	2653,9	323,8	1492,4	182,1	839,2	102,4
-81	5920,9		2977,8		1674,5		941,6	
-90	16687,4	2036,2	8392,5	1024,0	4719,4	575,9	2653,9	323,8
-91	18723,6		9416,5		5295,3		2977,8	

Assim, para o limite de resolução, os itens da seção 6.2 Limite de resolução influenciam diretamente nos valores lidos no RSSI. Através deste estudo percebeu-se a possibilidade de um algoritmo para melhorar a resolução do LpUp na etapa de medição de distância. Esta melhora pode ser obtida variando a potência de transmissão da ERB, da seguinte maneira: supondo que a ERB esteja funcionando em uma potência de transmissão de 23,97 dB, e a EM esteja uma distância onde a ERB com uma potência de 15 dBm consiga estabelecer troca de dados e o RSSI não esteja no limite inferior, então a potência é reduzida e a distância d é estimada, fazendo com que a resolução possa ser reduzida em até 3 vezes. Desta maneira o algoritmo começa a transmitir na potência mais alta e tenta encontrar a menor potência em que ainda assim tenha comunicação e o RSSI não esteja no limite de recepção, assim o sistema tenta trabalhar na menor resolução possível.

6.3 Fontes de Erro

Em um sistema de localização deseja-se que o erro seja mínimo, porém cada sistema tem suas limitações e vantagens que o deixam mais ou menos atrativo para uma aplicação específica. Nesta seção os possíveis erros do sistema são descritos.

Na equação de Friis, equação 6, se comparada com a equação de Friis no espaço aberto, aparecem variáveis que introduzem variações no RSSI, sendo estas: eficiência de irradiação, fator de perda por polarização, diretividade e coeficiente de reflexão. A eficiência de irradiação é causada por perdas nos materiais que compõem a antena. A perda por polarização ocorre caso as antenas de polarização linear utilizadas no transmissor e receptor,

não estejam corretamente alinhadas no sentido da polarização da onda irradiada. Perda por diretividade ocorre quando as antenas não estão alinhadas corretamente, ou seja, as direções de máxima irradiação de ambas as antenas não estão alinhadas com a direção de visada direta. O coeficiente de reflexão está relacionado ao casamento de impedância entre a antena transmissora e o transmissor, e entre a antena receptora e o receptor (BALANIS, 2005).

Outras variações comuns em RF são a reflexão, espalhamento (do inglês, *scattering*) e difração, sendo características introdutórias de erros no sistema. A reflexão ocorre quando uma onda eletromagnética incide em um meio de diferentes propriedades elétricas e parte da potência é refletida. Reflexão ocorre na superfície da terra, prédios e paredes. Um tipo de reflexão que normalmente acontece é no chão. Este tipo de reflexão é utilizado para determinar a potência do sinal recebido no receptor dependendo da altura do chão onde estão localizados o transmissor e receptor. Na literatura o modelo de reflexão do chão chamado Two-Ray é utilizado para este propósito (RAPPAPORT, 2002). Neste modelo a equação simplificada para determinar a potência do sinal recebido é:

$$P_r = P_t G_t G_r \frac{H_t^2 H_r^2}{d^4} \quad (17)$$

A difração ocorre quando o caminho entre dois rádios é obstruído por um objeto, gerando ondas secundárias, sendo estas ondas contribuintes para o fenômeno de múltiplas reflexões. A perda introduzida no sinal por difração é explicada pelas zonas de Fresnel. Estas zonas são regiões onde as ondas eletromagnéticas secundárias ocorrem derivadas da onda principal. Em geral se um objeto não obstruir a 1ª zona de Fresnel então a perda por difração será mínima, dessa maneira como esta dissertação não envolve objetos entre ERB e EM, a difração não irá interferir na determinação da distância entre o ERB e EM.

De maneira similar à difração, o espalhamento não irá interferir no método proposto, porque isto ocorre quando no caminho da onda eletromagnética existem vários objetos cujas dimensões são menores do que o comprimento de onda.

Outras variáveis que introduzem erro são a temperatura de operação do *hardware* (MO, 2010), que também é mencionado por (FRENZE, Ed Online 17106) onde é demonstrado um erro de $\pm 0,5$ dB; diferença na potência de transmissão devido ao processo de fabricação como mencionado por (ZHOU, 2004) e (LYMBEROPOULOS, 2006). Em (ZHOU, 2004) é mencionado que a variação da tensão de alimentação dos transceptores altera

a potência de transmissão, porém pode ser desconsiderado neste trabalho, uma vez que a tensão de alimentação do transceptor é constante.

Na seção de resolução, o circuito de medição do RSSI já foi discutido sobre os valores possíveis de introdução de erro ao sistema, linearidade de ± 2 dB e exatidão absoluta de ± 3 dB. Consequentemente, dependendo da distância e da potência, o erro será maior ou menor.

6.4 Algoritmo do Sistema

Primeiramente, um fluxograma do algoritmo do LpUp foi elaborado com base no método descrito na seção 6.1 sem levar em consideração os testes a serem realizados em campo para verificar o tipo de resposta do RSSI com as antenas Omni e Yagi. Na Figura 23 é apresentado o fluxograma principal do LpUp, o algoritmo do ERB e do EM. É possível verificar que o processamento do LpUp é realizado todo na ERB e na EM apenas é respondido seu RSSI ao ERB, o que apresenta uma vantagem ao sistema, pois o EM deve ser de baixo custo e consumir pouca energia. Na Figura 24 são apresentadas as funções da Figura 23 que são implementadas no ERB, detalhando o algoritmo do LpUp.

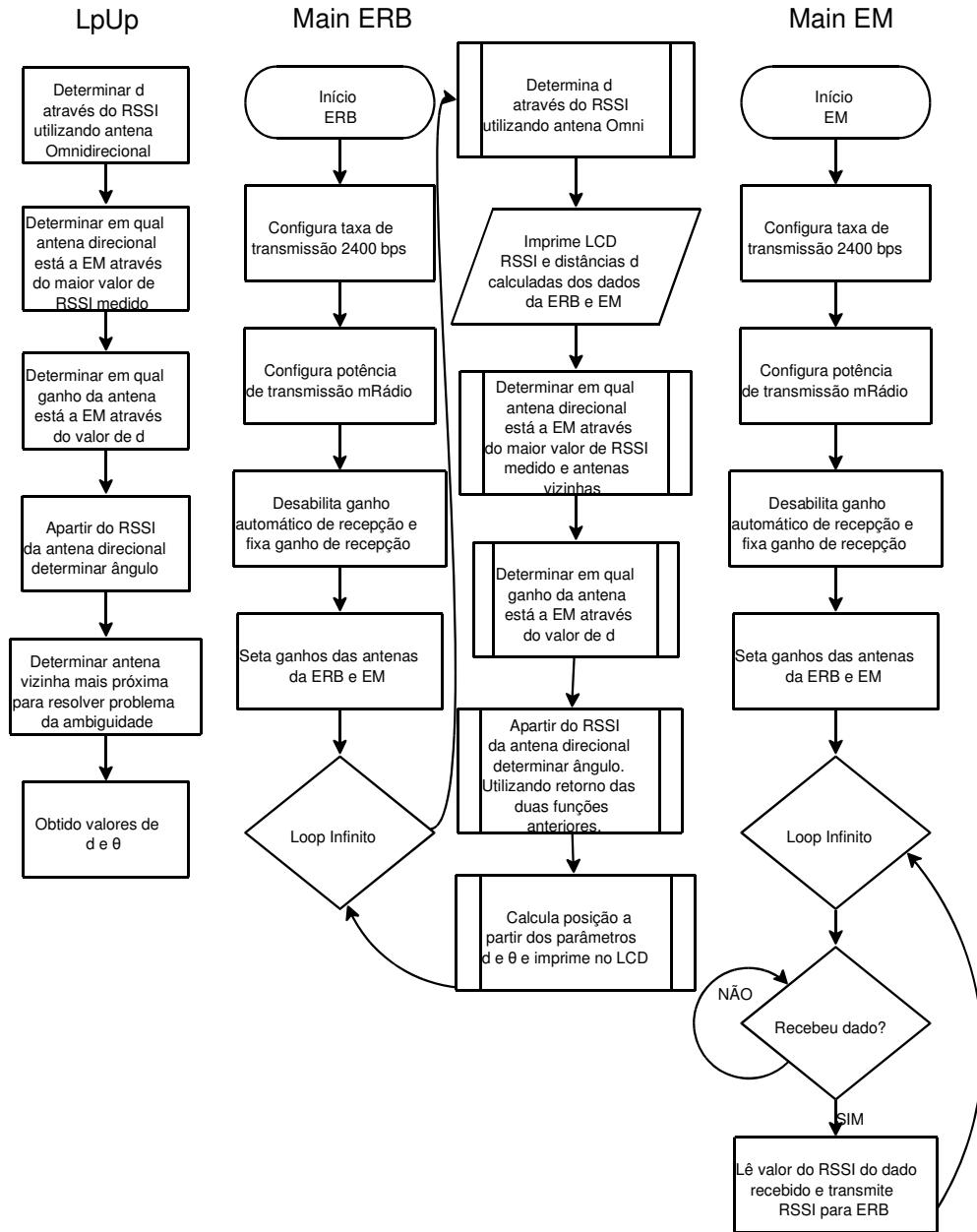


Figura 23 - Fluxograma principal.

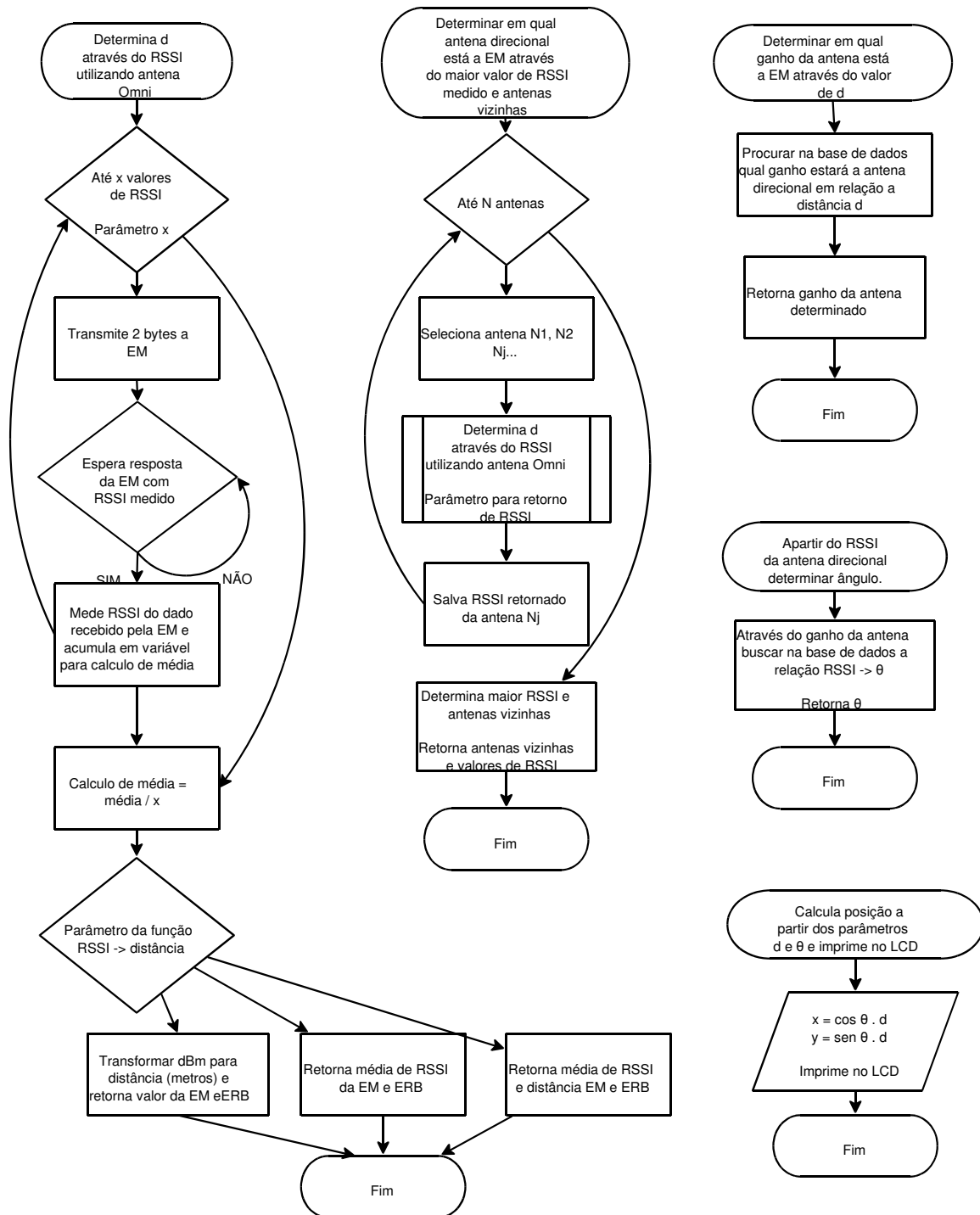


Figura 24 - Funções do LpUp.

Nos sistemas de localização, diversas EMs devem ter suas posições determinadas. Para o caso do LpUp o algoritmo deve ser expandido e alguns métodos podem ser considerados:

- ERB envia um dado onde todas as EMs recebem o dado, obtêm o seu RSSI e retornam o dado à ERB. Este envio dos dados pelas EMs é realizado em um intervalo de tempo determinado, na ordem numérica crescente de seus endereços da rede;
- ERB envia um dado para a EM que se deseja saber a localização.

Em ambos os casos, os conflitos de dados são evitados, ou pelo intervalo entre envios ou pela prioridade da ERB de requisição do dado. Como o foco desta dissertação é a validação do método de localização, o assunto do LpUp para diversas EMs não será aprofundado.

6.5 Hardware, configurações e planejamento

Nesta seção é descrito o planejamento necessário para realização dos primeiros testes para obter o RSSI para implementação do LpUp.

Primeiramente, um levantamento dos testes necessários foi feito, baseado-se nas seções anteriores, determinando as seguintes necessidades:

- Além do mRadio, as estações, ERB e EM devem ter equipamentos capazes de executar troca de dados entre si, ler e executar funções com o valor de RSSI;
- Ganhos do mRadio e antenas, o diagrama de irradiação das antenas e temperatura ambiente devem ser conhecidos;
- Com o objetivo de eliminar as interferências é necessário que as antenas estejam a determinada altura do chão, o local de teste seja em campo aberto sem obstruções entre ERB e EM e nenhuma ou pouca interferência de outros equipamentos de RF;
- Devido a necessidade de deslocamento para execução dos testes, é necessário que os equipamentos sejam de fácil transporte;

6.5.1 Hardware e Firmware

O mRádio, Figura 27, possui uma conexão serial, RS-232, onde é possível estabelecer facilmente a troca de dados entre dois equipamentos. Através do acesso a seus registradores é feita a leitura do RSSI do último pacote válido recebido, sendo a partir deste registrador os valores utilizados nos testes. Devido a necessidade de fácil deslocamento dos equipamentos, a utilização de computadores foi eliminada e escolhida a utilização de uma

placa eletrônica que contém um microcontrolador (uC) de 8 bits onde é possível executar um programa em linguagem C. Esta placa é chamada de Placa Principal, Figura 27, utilizada em outro equipamento, e foi facilmente adaptada para os testes. A energia é fornecida por uma bateria de 12V, facilmente encontrada no mercado. O diagrama de blocos da Figura 25 mostra o hardware das estações ERB e EM utilizadas e na Figura 26 os equipamentos em campo.

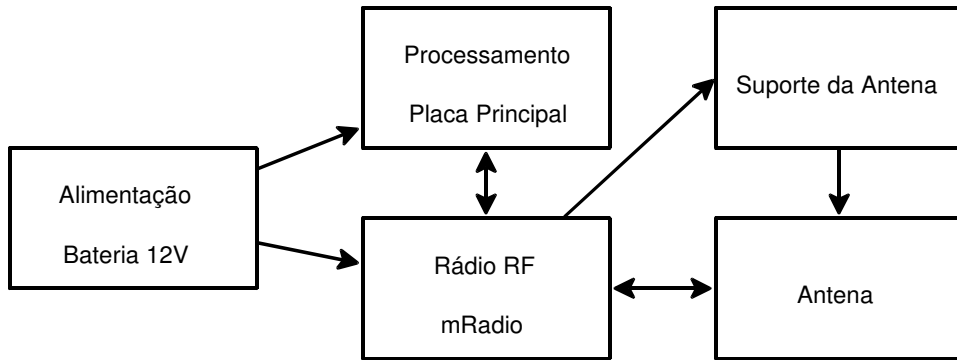


Figura 25 - Diagrama de Bloco dos Equipamentos.

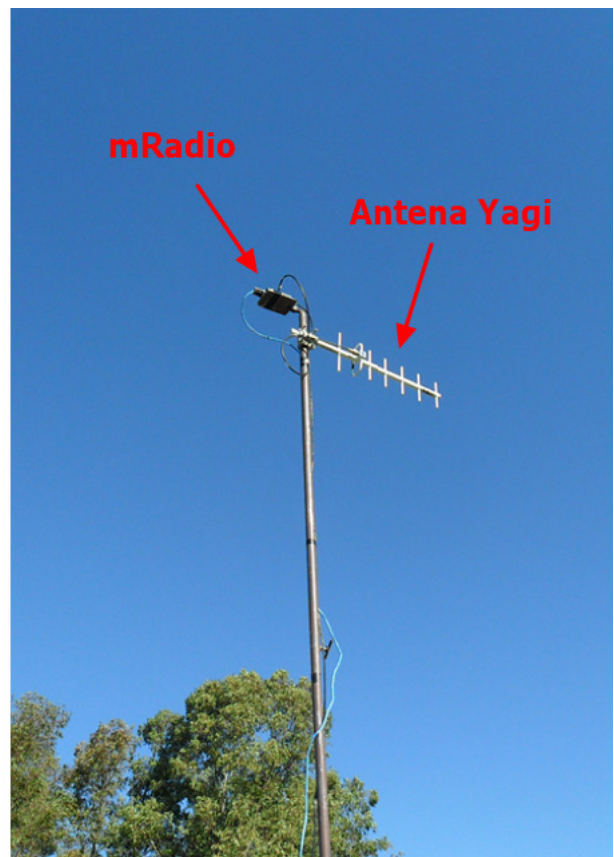


Figura 26 - Equipamentos em campo.

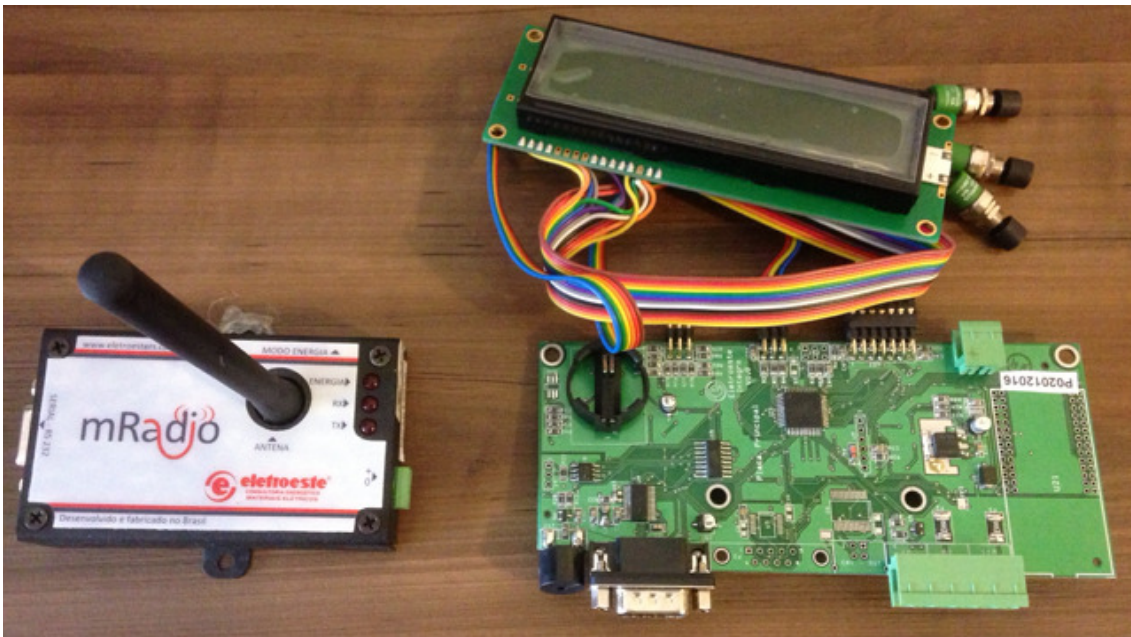


Figura 27 - Placa Principal e mRadio.

A finalidade do suporte das antenas é para evitar reflexões do chão, possibilitar alguns testes e fixação das antenas. A altura mínima é determinada através da equação 19, onde D é dimensão da maior antena. Para cálculo da altura mínima, h , foi considerando um ângulo do diagrama de irradiação no plano vertical da antena em relação ao chão de $26,5^\circ$, a distância mínima entre o transmissor e receptor, d , deve ser maior ou igual a 6,1 m. Assim partindo-se da trigonometria, determina-se $h \geq 3,0$ m. Para se ter opções para os testes, o suporte da antena foi dividido em 5 seções de 1 m cada, totalizando $h = 5$ m. Com a utilização destas seções é possível girar a antena em seu próprio eixo, x , e no suporte superior existe outro suporte que possibilita o giro no eixo y , como mostra a Figura 30.

$$d = \frac{2 \cdot D^2}{\lambda} \quad (18)$$

6.5.2 Algoritmo do teste

O algoritmo para a execução dos testes necessários para obter os valores de RSSI da ERB e EM é simples, funciona basicamente da seguinte maneira: ao energizar-se a ERB, esta

executa as configurações do mRadio e envia 2 bytes ao EM, a EM lê o RSSI destes bytes recebidos e envia o seu RSSI à ERB e o mesmo também lê o RSSI deste dado recebido, como mostra Figura 28. A ERB por sua vez executa este ciclo x vezes, onde x determina o tamanho da amostragem para o cálculo da média do RSSI, e mostra o valor no visor da Placa Principal. A EM ao energizar também executa os primeiros passos do fluxograma da Figura 23 e depois fica esperando os dados da ERB chegarem e responde seu RSSI, Figura 28 do processo descrito.

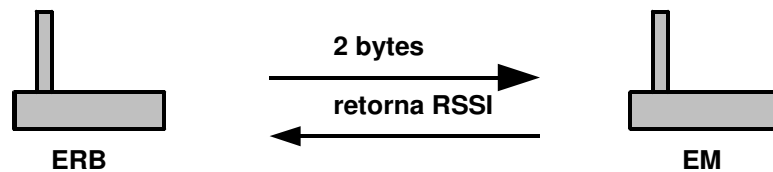


Figura 28 - Processo do Algoritmo do teste.

6.5.3 Planejamento

No início da seção 6.5 foram mencionadas as necessidades do local para os testes, assim um local com as seguintes características foi escolhido: longe de interferências eletromagnéticas; sem obstáculos entre as estações ERB e EM; com distância visada de 3 km; e geografia plana. Os testes foram realizados na área rural de Uruguiana na Cabanha Ribelles, como pode ser visto na Figura 29. A ERB foi fixada em uma camionete para quando necessário ocorrer deslocamento, já a EM ficou em um local fixo. De acordo com as preocupações mencionadas a seguinte lista de teste foi gerada:

1. Gráfico do espaço aberto para potências de transmissão de 23,97 e 8 dBm.
 2. Determinar diagrama de irradiação da Omni. Executar duas rodadas de testes em distâncias diferentes.
 3. Determinar o diagrama de irradiação da antena Yagi. Executar duas rodadas em diferentes distâncias.
 4. Medições com média de 50 valores de RSSI.
 5. Determinar se a diferença de RSSI entre mRadios está relacionada às antenas.
- Assim foram conduzidos testes com as antenas invertidas.
6. Modificar ângulo y de uma das antenas.
 7. Modificar ângulo z de uma das antenas.
 8. Diminuir a altura dos rádios para verificar a reflexão do chão.



Figura 29 - Local dos testes

Nos testes de deslocamento foi utilizado um GPS ou régua (menores distâncias) para determinar as posições. Todos estes testes foram feitos com média de RSSI igual a 10 amostras e no teste 4 a média é modificada para 50 amostras, afim de verificar se uma média maior produz valores mais estáveis. As modificações no ângulo da antena, testes 6 e 7, tem o objetivo de verificar perdas de polarização e diretividade. Na Figura 30 é possível observar estes ângulos.

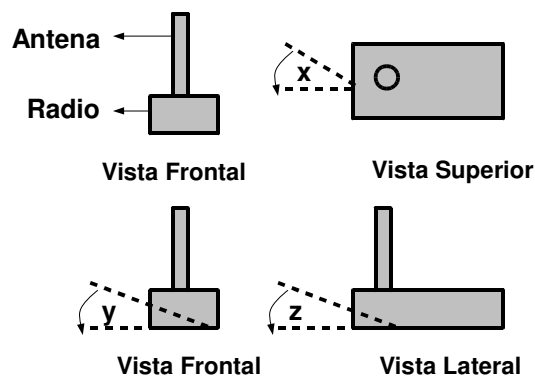


Figura 30 - Ângulos dos testes 7 e 8

O processo do teste é: para cada nova posição ou modificação da antena anotar os novos valores de RSSI das estações ERB e EM em uma tabela para posterior análise.

6.6 Resultados e Análise

Os resultados e análise são apresentados de acordo como foram enumerados na seção anterior.

Teste número 1: gráfico do espaço aberto para potências de transmissão de 23,97 e 8 dBm. Os resultados obtidos são mostrados na Figura 31 e na Figura 32. Para execução deste teste a ERB foi deslocada em diferentes distâncias. As curvas 23,97 e 8 dBm apresentadas na Figura 31 e na Figura 32 são curvas da equação 7 e é possível verificar que as curvas reais das estações ERB e EM seguem a mesma tendência desta curva, apesar de apresentarem maiores perdas do sinal em determinados níveis. Na Figura 31 próximo ao valor de -65 dBm ocorre a saturação dos valores de RSSI, ou seja, não é possível mais associar valores de RSSI à distância. Também é possível verificar na Figura 32 uma diferença entre os níveis medidos das estações ERB e EM, que serão discutidos no teste 6.

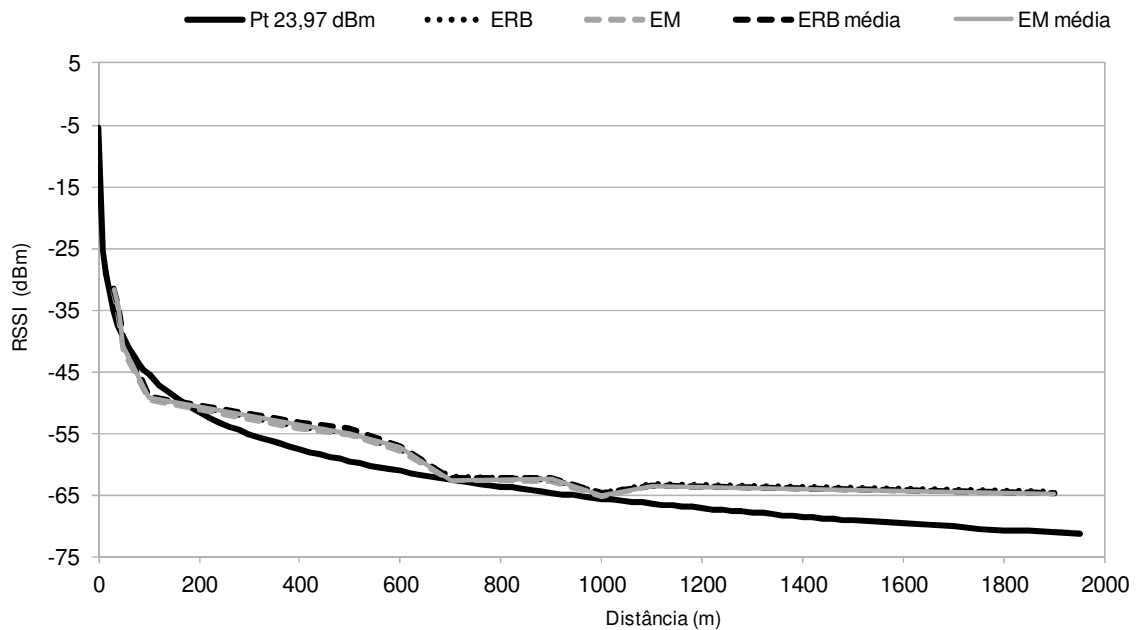


Figura 31 - Espaço aberto com Pt de 23,97 dBm.

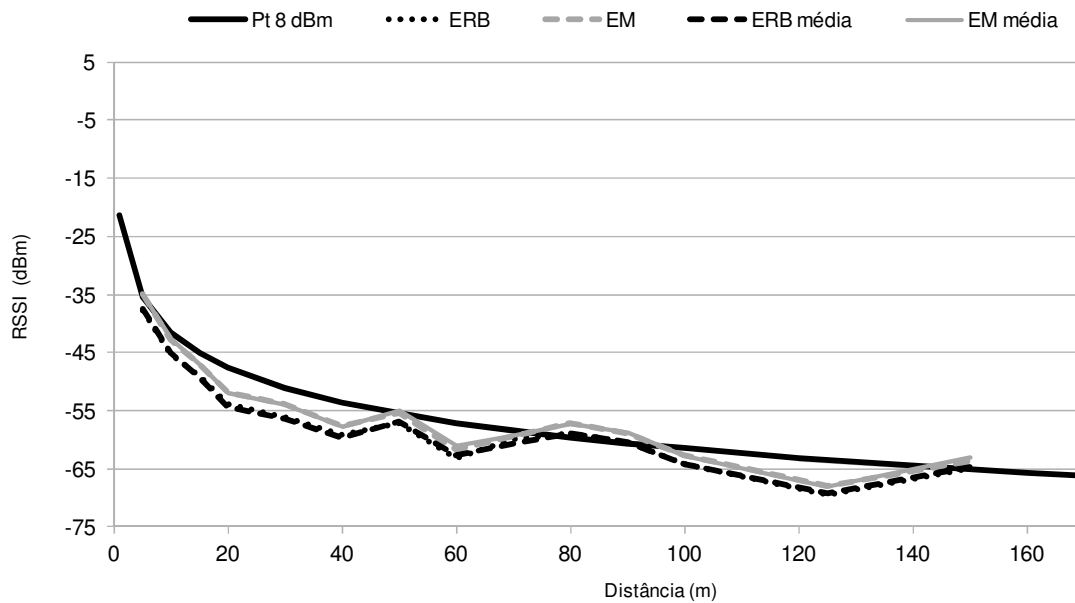


Figura 32 - Espaço aberto com Pt de 8 dBm.

Teste número 2: determinar diagrama de irradiação da antena Omnidirecional e executar duas rodadas de testes em diferentes distâncias. Para a execução deste teste as potências dos rádios foram configuradas em 8 dBm e o suporte da ERB foi girado no eixo x, Figura 30, com um incremento de 30° até completar os 360°. É possível verificar,

Figura 33, que o diagrama de irradiação real é diferente do teórico que apresenta mesmo ganho em todos os ângulos. Na

Figura 33 a) em 270° e em distâncias maiores existe maior irregularidade no diagrama, uma possível causa é devido as medições estarem muito próximas de -65 dBm. Da mesma maneira que o teste 1, valores das ERB e EM apresentam diferenças.

Teste número 3: determinar o diagrama de irradiação da Yagi e executar duas rodadas em diferentes distâncias. Para a execução deste teste as potências dos rádios foram configuradas em 8 dBm e o suporte da ERB foi girado no eixo x, Figura 30, com um incremento de 10°, assim a abertura do diagrama de irradiação foi estabelecida. O diagrama de irradiação e os valores obtidos nos testes mostram que é possível determinar o AoA com o incremento de 10°. A abertura do diagrama também pode ser determinada, 80°. Similarmente ao teste 2, quando as distâncias são maiores, as variações dos valores do RSSI são maiores. Da mesma maneira que o teste 1, valores das ERB e EM apresentam diferenças.

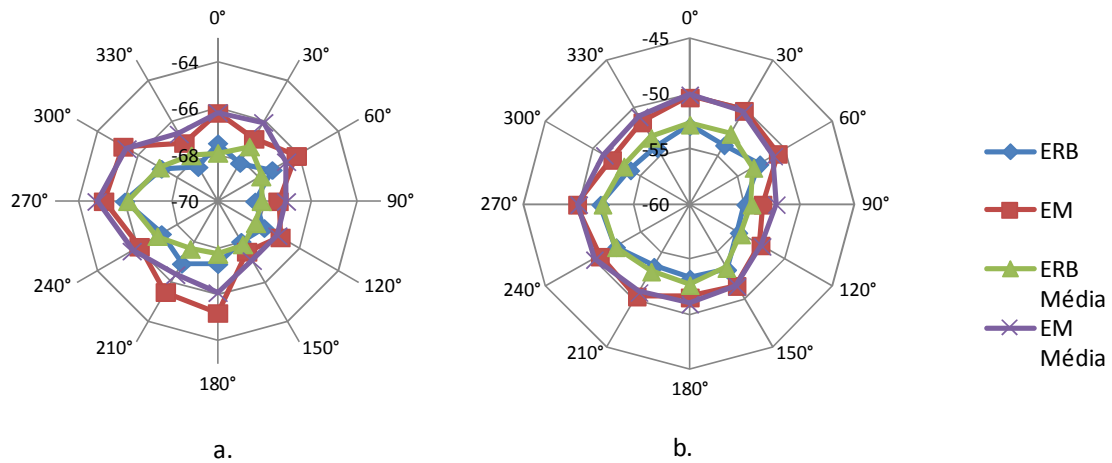


Figura 33 - Diagrama da Antena Omnidirecional em a) 130 m e b) 20 m.

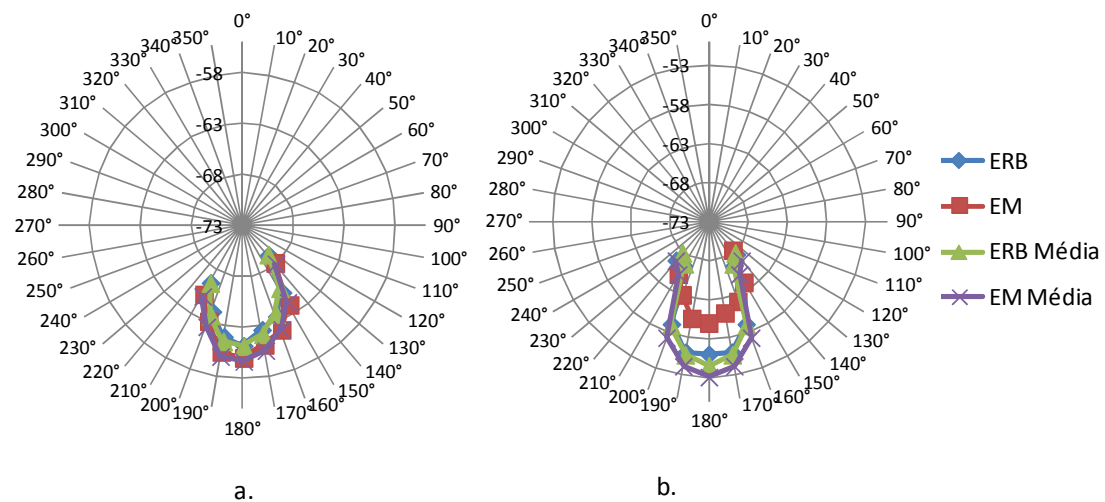


Figura 34 - Diagrama da Antena Yagi em a) 130 m e b) 50 m.

Teste número 4: medições com média de 50 valores. Para a execução deste teste as potências dos rádios foram configuradas em 8 dBm e os valores de RSSI foram obtidos em 3 distâncias diferentes. Este teste mostra que quanto maior o número de amostras do RSSI na média, a média tende ao valor real. Na Tabela 5 demonstra-se a maior variação dos valores da EM na distância de 20 m sendo de 0,48 dBm, diferente das medições de 10 amostras onde a variação chegou a ser de 1,4 dBm.

Tabela 5 - Média de 50 medições.

Distância (m)		RSSI medido (dBm)	RSSI medido (dBm)	RSSI medido (dBm)	Maior diferença (dBm)
ERB	20	-55,20	-55,00	-54,84	-0,36
EM		-53,10	-52,96	-52,62	-0,48
ERB	50	-64,54	-64,74	-64,70	-0,20
EM		-62,88	-63,02	-62,96	-0,14
ERB	130	-67,96	-68,16	-68,30	-0,34
EM		-66,72	-66,74	-66,96	-0,24

Teste número 5: determinar se a diferença de RSSI entre mRadios está relacionado as antenas; para este teste as antenas foram invertidas. Para a execução deste teste as potências dos rádios foram configuradas em 8 dBm, com uma distância entre ERB e EM de 20 m, utilizado antena omnidirecional em ambos rádios e obtendo uma medição e depois repetindo a medição com as antenas trocadas entre ERB e EM. De acordo com a Tabela 6 é possível verificar as diferenças entre ERB e EM sendo ± 2 dBm, seguindo o mesmo após a troca das antenas. Então esta diferença não é devido às antenas e sim devido a uma diferença de hardware em ambos os rádios, podendo ser casamento de impedância ou diferença dos CIs durante o processo de fabricação.

Tabela 6 - Troca de antenas.

Distância (m)		RSSI medido (dBm)	RSSI medido (dBm)	RSSI medido (dBm)	RSSI medido (dBm)	Maior diferença entre ERB e EM (dBm)
ERB	Normal	-52,90	-53,20	-52,00	-52,50	2,70
EM		-50,30	-50,80	-49,30	-49,90	
ERB	Invertido	-53,00	-53,80	-51,80	-53,10	2,50
EM		-53,10	-52,70	-49,40	-50,60	

Teste número 6: modificar ângulo y de uma antena, Figura 30. Para a execução deste teste as potências dos rádios foram configuradas em 8 dBm e os valores de RSSI foram obtidos em 2 ângulos em y , 30° e 60° e em 3 distâncias, 20, 50 e 130m. É possível verificar na Figura 35 que o desalinhamento das antenas introduz uma perda no sinal; neste caso o sinal recebido em 60° é 3,7 dBm menor em comparação a 30° .

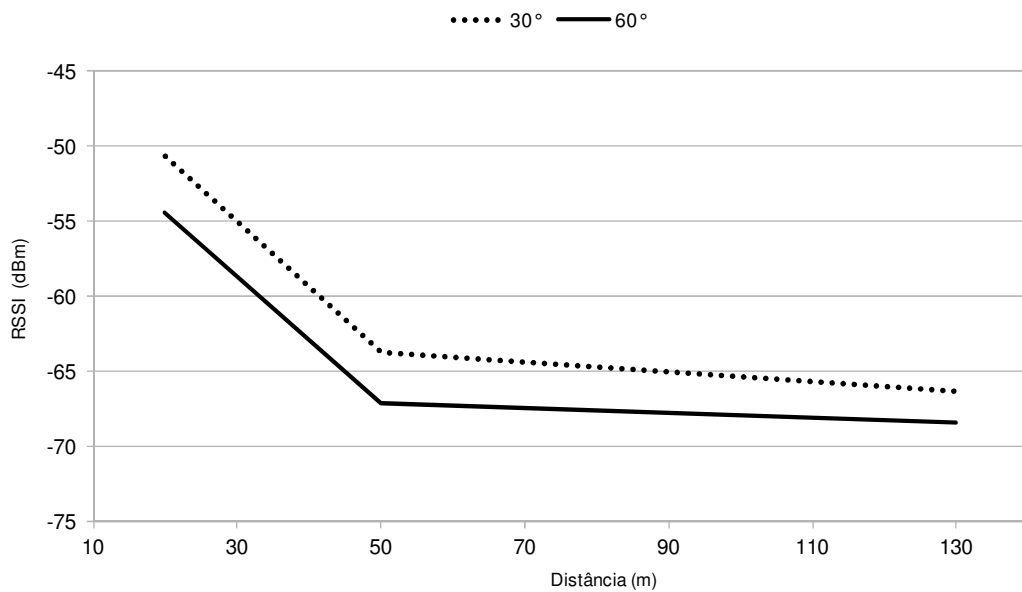


Figura 35 - Mudança do ângulo y.

Teste número 7: modificar o ângulo z de uma antena, Figura 30. Para a execução deste teste as potências dos rádios foram configuradas em 8 dBm e os valores de RSSI foram obtidos para 2 ângulos em z, 15° e 30° e em 3 distâncias, iguais ao teste 6. A partir da

Figura 36 é possível verificar que o aumento do ângulo, e conseqüentemente, o aumento do desalinhamento das antenas, introduz perda ao sinal recebido. Também foi verificado que quanto menor a distância entre ERB e EM maior é a perda do sinal.

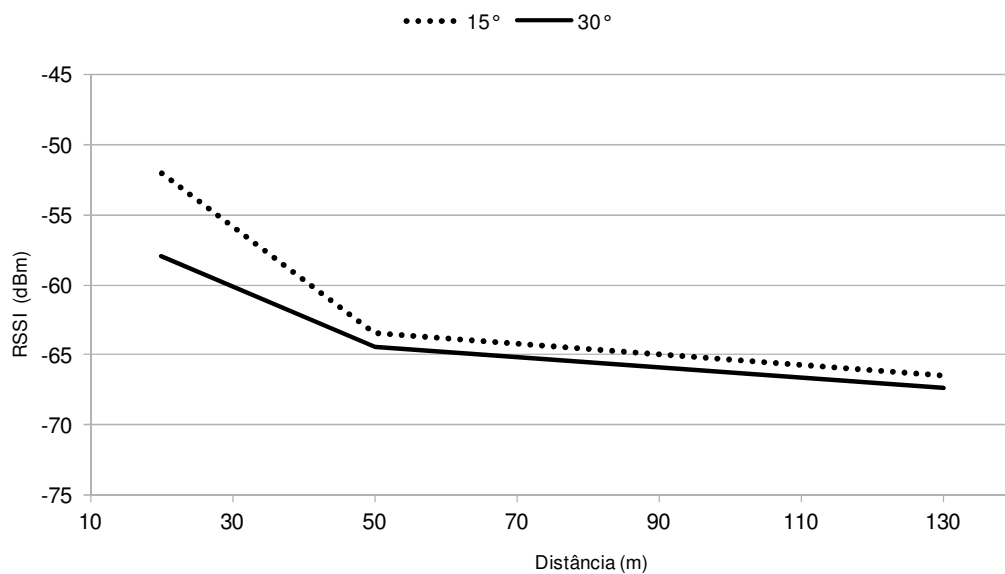


Figura 36 - Mudança do ângulo z.

Teste número 8: diminuir altura dos rádios para verificar a reflexão do chão. Para a execução deste teste as potências dos rádios foram configuradas em 8 dBm e os valores de RSSI foram obtidos em 3 distâncias, iguais do teste 6, e as antenas configuradas em duas alturas, normal do suporte (5m) e menor (ERB = 2,8m e EM = 1,3m), sendo a ERB deslocada. Na Figura 37 é possível verificar que a interferência de reflexão do chão introduz um ganho no sinal de recepção.

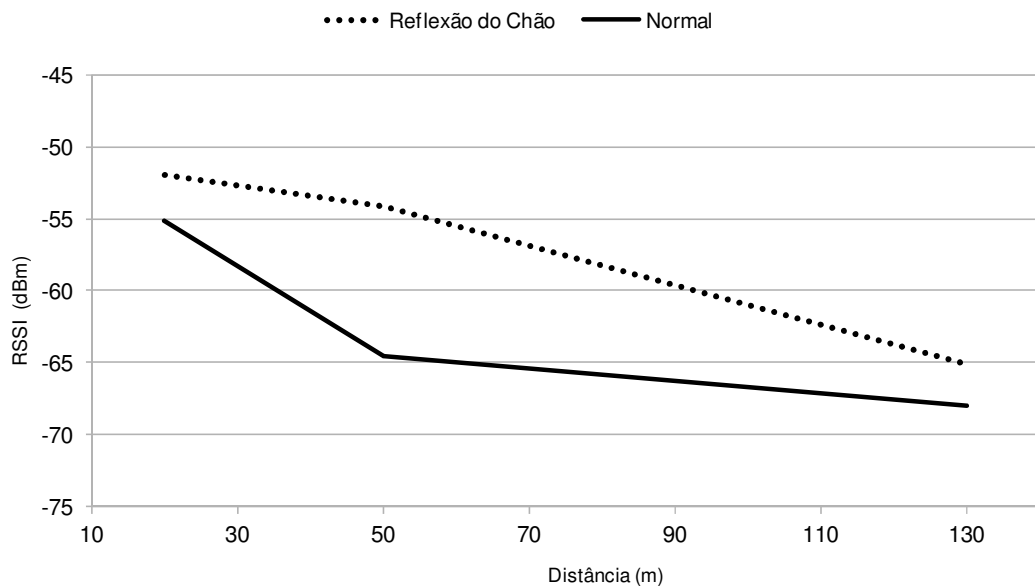


Figura 37 - Reflexão do Chão.

Após a realização destes testes, o algoritmo do LpUp foi revisto e novas características passaram a ser consideradas. Previamente já foram mencionadas na equação 6 as variáveis de introdução de perda no sinal recebido. Através dos testes foi comprovado que se estas variáveis não forem consideradas, as mesmas irão introduzir erro ao sistema de localização. Ou seja, caso sejam levadas em conta essas variáveis é possível aumentar a acurácia e precisão do sistema de localização se comparado com sistemas em que as mesmas são desprezadas. O teste 4 demonstra que com o aumento da quantidade de amostras de RSSI ocorre um aumento na precisão do algoritmo. Já pelo teste 5, o mesmo demonstra a necessidade de uma calibração para cada rádio e/ou antena a ser utilizada pelo sistema devido a cada equipamento mostrar respostas diferentes, o que melhorará a acurácia. Por fim, o algoritmo do LpUp foi revisto e foram estabelecidos quais são os melhores métodos a serem

implementados para chegar a uma precisão e acurácia melhor do sistema de localização, LpUp.

6.7 Algoritmo do LpUp

Com os dados obtidos na seção 6.6 é possível determinar o melhor algoritmo de acordo com o método LpUp. Como mencionado anteriormente o LpUp é dividido em duas variáveis a serem obtidas, distância, d , e ângulo, θ . Nesta seção é feita uma análise dos possíveis métodos a serem utilizados e também são realizadas comparações dos métodos e das calibrações necessárias do sistema. Por fim o algoritmo definitivo do LpUp é apresentado.

6.7.1 Opções de Algoritmos para d e θ

Nesta seção são apresentados os possíveis métodos para determinar d e θ .

Para determinar d , 6 métodos são apresentados.

1. Diretamente da equação 6 (completa);
2. Utilizando equação 7 e utilizando valor de ajuste;
3. Utilizando equação 8;
4. Devido a irregularidade da antena Omni, seria possível utilizar a informação do AoA para compensar esta irregularidade;
5. Devido à variação de 1 dBm para 1 m ser menor quando a intensidade do sinal recebido é alta, então dependendo a distância entre ERB e EM existe uma determinada potência de transmissão onde é possível obter uma melhor resolução.
6. De acordo com a Figura 31 e Figura 32 existem determinados locais onde a curva real distancia-se da curva teórica. Esta distância entre as curvas poderia ser eliminada através de um ajuste entre a curva real e teórica, onde após determinado esse ajuste, a acurácia melhora consideravelmente. Para este método ser viável, o mesmo teria que ser implementado de maneira automática, da seguinte maneira: primeiro obtém-se a curva real no campo; um algoritmo de ajuste acharia os pontos onde ambas as curvas cruzassem e determinaria os ajustes da curva real.

Já para θ são apresentados 4 métodos, considerando que a EM já esteja dentro do diagrama de irradiação da antena Yagi:

1. Através de d sabe-se qual é o valor de RSSI esperado em 0° da Yagi (valor máximo) e assim determinar θ através do valor de referência previamente medido pela Yagi.
2. Através da equação do espaço aberto e após obter o diagrama de irradiação real da Yagi em campo, determina-se uma equação para o diagrama de irradiação. Um valor de ajuste é necessário para ser possível estimar os novos valores para o diagrama de irradiação referente à distância, d , e assim relacionar os valores de RSSI da Yagi com ângulo. Este valor de ajuste é determinado com a utilização da equação do espaço aberto para a Yagi.
3. Semelhante ao 2, porém ao invés de utilizar a equação para o diagrama de irradiação, utiliza uma tabela feita a partir dos dados medidos em campo e aplica-se o método matemático de interpolação. Devido à resolução das medições do AoA com a Yagi serem com um incremento de 10° a utilização do método de interpolação aumentará a resolução do AoA.
4. Semelhante ao 3, porém utiliza tanto para o diagrama de irradiação como o espaço aberto o procedimento de procura nas tabelas com utilização do método matemático de interpolação.

6.7.2 Comparações dos métodos

Nesta seção são realizadas as comparações entre os métodos da seção anterior. Estas comparações são feitas baseadas nas equações de cada método e valores reais medidos em campo.

Para os métodos de determinar d , os métodos 1, 2 e 3, tanto os valores que inserem perda no sinal do 1 como o valor de ajuste do 2 ou como o do 3, aparece uma diferença no valor estimado em comparação ao sinal real. Para qualquer um destes métodos não ocorrem melhorias, uma vez que o sinal real medido apresenta irregularidades não lineares em diferentes distâncias, ou seja, estes métodos apenas irão deslocar a curva para cima ou para baixo, como exemplo, na Figura 22 dependendo do ganho ou atenuação introduzido. No caso de valores reais a diferença máxima entre as duas curvas, real e equação, na Figura 31 -

Espaço aberto com Pt de 23,97 dBm ocorre em torno de 500 m com uma diferença de 5 dBm. Já na Figura 32 ocorre na distância de 20 a 40 m e apresenta uma diferença de 6,8 dBm para a ERB e 4,4 dBm para a EM.

O método 4 mesmo compensando a irregularidade da antena Omni não teria tanto ganho caso utilize a distância d através dos métodos 1, 2 ou 3, pois os erros destes métodos seriam adicionados ao método 4. Porém, considerando apenas o método 4, a diferença entre os valores máximo e mínimo do diagrama de irradiação para 20 m é de 2,2 dBm e para 130 m é de 2,4 dBm, o que poderia melhorar a acurácia do LpUp.

O método 5 tem como princípio a utilização de diferentes potências de transmissão dependendo da distância entre ERB e EM, questão já mencionada na seção 6.2.4. Este método tenta aumentar a resolução do sistema, onde utilizando uma resolução menor, menor serão os erros na medição da distância. Esta resolução seria atingida utilizando os níveis máximos e mínimos do sinal recebido, caso se ultrapasse estes níveis, o sinal estará saturado, como na Figura 32, quando o sinal estava abaixo de -65 dBm, onde a relação RSSI e distância não é mais verdadeira. Através deste método estabelecem-se valores máximos e mínimos de RSSI e utilizam-se as 4 potências de transmissão sendo que a de menor potência tem prioridade para estabelecer a comunicação, assim a menor potência que estabelecer a troca de dados com a EM é utilizada.

O método 6 consiste em fazer um ajuste para a resposta do RSSI a ser relacionada diretamente com a medição feita em campo. Neste caso o próprio método faz o ajuste automático da curva real com a curva teórica e, ainda, possibilita executar periodicamente uma nova rodada de ajustes. Desta maneira o erro existente é causado pelo hardware ou pela mudança dos valores de uma rodada de ajuste para o outro, onde os erros dos outros métodos não acontecerão.

Tabela 7 - Comparação de métodos para medir d .

	Método 1	Método 2	Método 3	Método 4	Método 5	Método 6
Erro em relação a curva real	X	X	X	X	X	
Erro de irregularidade da Antena	X	X	X		X	X
Erro de mudanças climáticas	X	X	X	X	X	
Melhor resolução					X	

Entre os métodos de medição de θ , o método 1 foi descartado quando começou a ser implementado o algoritmo porque os valores de RSSI em relação ao θ são dependentes da distância d e neste método isto não foi levado em consideração. Já o método 2, é idêntico ao 1, porém levando em conta a dependência de θ à distância d .

No método 2 duas questões são relevantes, primeiro é a equação do espaço aberto e segundo, considerar uma equação polinomial para o diagrama de irradiação. Porém esta apresenta uma questão a ser levada em conta: quanto maior o grau da equação polinomial, mais processamento é necessário para determinar θ . Na Figura 38 é mostrada a equação de 2º grau de aproximação do diagrama de irradiação a 50 m e é possível verificar que em alguns pontos a curva da equação distancia-se da curva real, ou seja, apresentará um erro na determinação do θ . Não é possível reduzir este erro, mesmo aumentando o grau da equação, neste caso o erro apenas desloca-se para outros pontos. Já para o método 3 e 4 este erro é pequeno, uma vez que a interpolação é baseada nos valores previamente medidos em campo e o erro existente é o erro matemático da interpolação. A interpolação linear é utilizada nos método 3 e 4 de acordo com a equação 19.

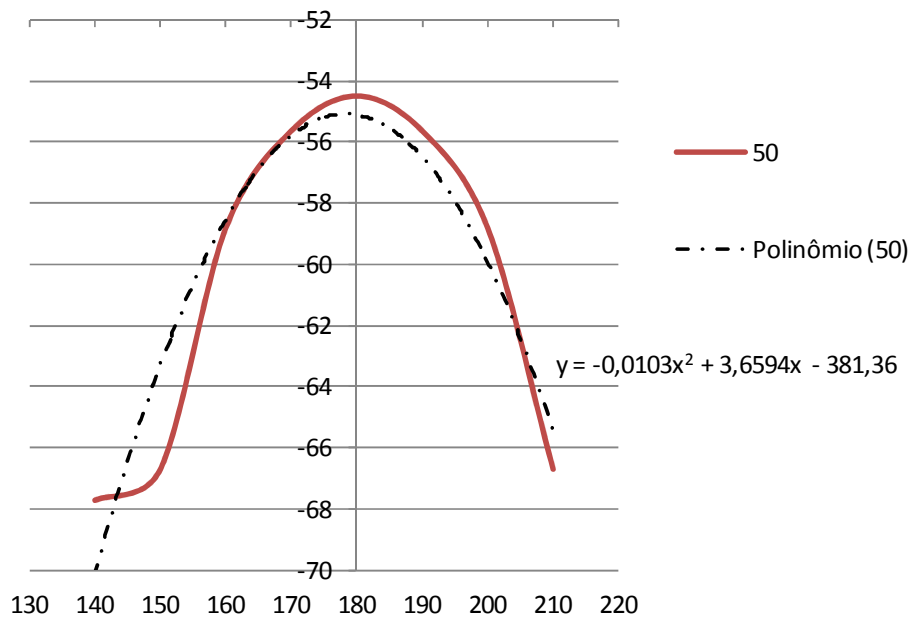


Figura 38 - Método 2, equação do diagrama de irradiação da Yagi.

$$f(RSS) = \theta_{i-1} + (RSS_i + RSS_{i-1}) \cdot \frac{(\theta_{i+1} - \theta_{i-1})}{(RSS_{i+1} - RSS_{i-1})} \quad (19)$$

Nos métodos de determinação do θ apresentados, todos necessitam da informação da distância d , ou seja, o erro do método para determinar d , é somado ao erro do método para determinar θ . Por fim, o método selecionado para determinar d é o 2 e para determinar θ é o método 3. Mesmo que outros métodos para determinar d apresentassem melhores resultados, o método 2 foi utilizado para validação mais rápida do LpUp, uma vez que o mais relevante para esta dissertação é determinar θ .

6.7.3 Calibrações necessárias

As calibrações necessárias para rodar o LpUp com métodos 2 e 3 em campo são as respostas das antenas Omni e Yagi no espaço aberto e diagrama de irradiação da Yagi. Estes valores devem ser introduzidos no algoritmo do LpUp.

6.7.4 Teste e análise do LpUp

Nesta seção são apresentados os testes do algoritmo LpUp dividido em duas partes, simulação e teste em campo. A simulação para o LpUp é necessária para garantir a correta execução de todos os passos e cálculos necessários, tanto para o algoritmo como o *firmware* que rodará no uC, o que garantirá a resposta correta do programa para os testes do LpUp em campo.

6.7.4.1 Simulação do Algoritmo do LpUp

Esta etapa de simulação contribuiu para reduzir o tempo de desenvolvimento para a implementação do algoritmo do LpUp, porque a simulação no uC verificou se os cálculos e passos do LpUp estava corretos. Nesta simulação valores reais, obtidos nos testes da seção 6.5.3 Planejamento, foram utilizados. A Figura 39 mostra os procedimentos utilizados para a situação real da obtenção do valor de RSSI e para o método utilizado em simulação.

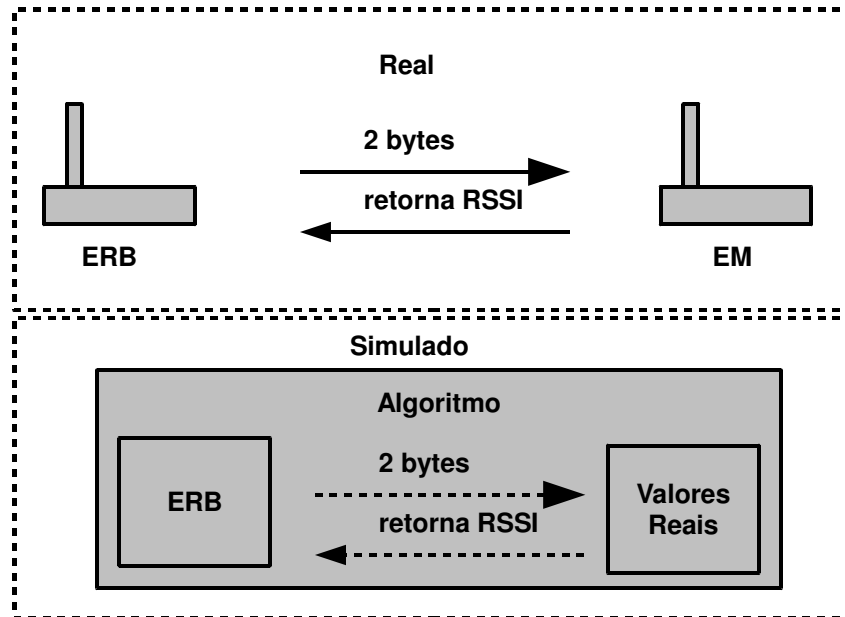


Figura 39 - Simulação do Algoritmo LpUp.

Para determinar distância d , alguns dos valores testados como medição da omnidirecional foram -60 e -62 dBm retornando corretamente as distâncias de 519,05 e 655,4 m, respectivamente. Os cálculos utilizaram a equação 7, com potência de transmissão em 23,97 dBm, ganhos das antenas de 1 dBi e frequência de 915 MHz. É importante mencionar que ao invés de executar todo o cálculo, foram geradas variáveis do tipo constantes para diminuir o processamento do uC.

De maneira semelhante, para determinar θ alguns dos valores testados como medição da Yagi foram -66 dBm retornando corretamente o valor de ajuste de -7,48 dBm e $-21,82^\circ$. Neste caso, os valores de ganhos e frequência de operação são os mesmos daqueles mencionados para determinar d .

6.7.4.2 Teste em campo do Algoritmo do LpUp

Nesta seção dois testes em campo foram executados em duas localidades diferentes, sendo uma delas no estacionamento da Eletroeste, 1, e na Cabanha Ribelles, 2, mesmo local do teste anterior. A localidade 1 (na cidade) onde os testes foram executados em um meio com interferência eletromagnética, possibilitou que outra questão fosse respondida: da ocorrência ou não desta interferência. Não menos importante, devido à área da localidade 1

ser menor, isto fez com que as distâncias dos testes fossem reduzidas, conseqüentemente, a potência do Rádio configurada foi a mais baixa, 8 dBm.

Para rodar o LpUp é necessária uma calibração local, e para isso as respostas das antenas devem ser conhecidas, independente da localidade. Primeiramente, os testes foram executados na localidade 1, Figura 40, e a resposta do espaço aberto foi obtida para as antenas Omni e Yagi. Porém após este teste, surgiu a necessidade de outros testes, então os testes executados na localidade 1 foram:

1. Resposta do espaço aberto para as antenas Omni e Yagi.
2. Determinação do padrão de irradiação da Yagi.
3. Irregularidade da Yagi.
4. Determinação dos valores de pico.
5. Dependência do RSSI em função da temperatura.
6. Movimento do suporte da antena e interferência eletromagnética.
7. LpUp

Vale lembrar que a localidade 1, os rádios foram configurados para 8 dBm de potência de transmissão e o canal de recepção foi configurado para linearidade alta.



Figura 40 - Localidade 1 - Eletroeste.

Os resultados do teste número 1, resposta do espaço aberto da Omni e Yagi, foram obtidos da mesma maneira que para o teste da seção 6.5.3. Na Figura 41 e Figura 42 são apresentadas as curvas Pt 8 dBm, curva teórica do espaço aberto com valores configurados de ganhos, valores medidos na ERB e Pt 8dBm + perda, onde se apresenta a curva teórica com adição de uma perda para ajustar-se a curva medida na ERB, e assim obter o ajuste necessário

para adicionar no algoritmo do LpUp. Esta perda ou ajuste é a calibração mencionada anteriormente, necessária devido às variáveis que adicionam perdas ao sistema. É possível verificar que o resultado medido, na ERB, segue a mesma tendência da teórica, Pt 8 dBm, e com menos irregularidades em comparação ao teste anterior, Figura 32.

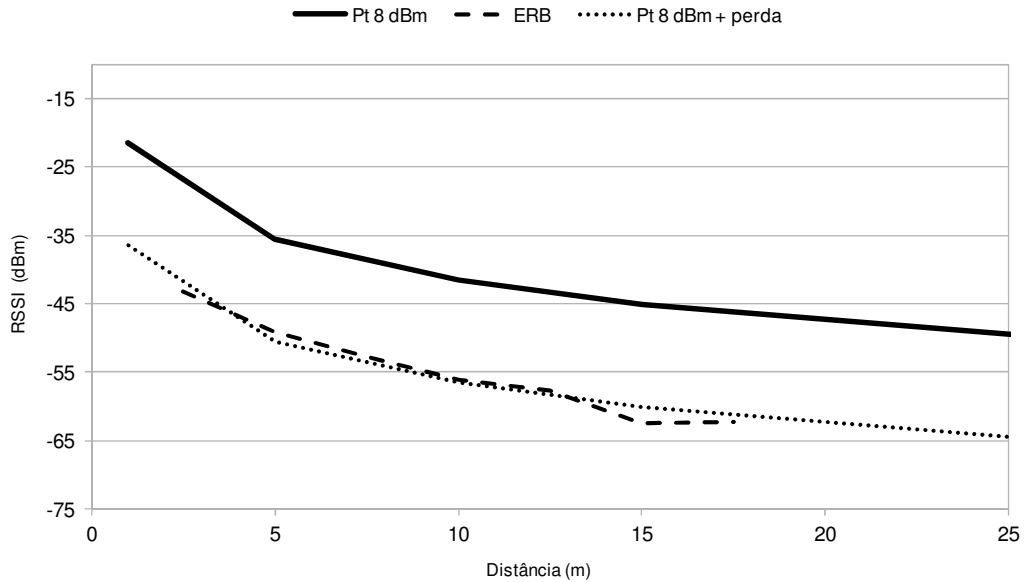


Figura 41 - Localidade 1 - Resposta do espaço aberto da Omni.

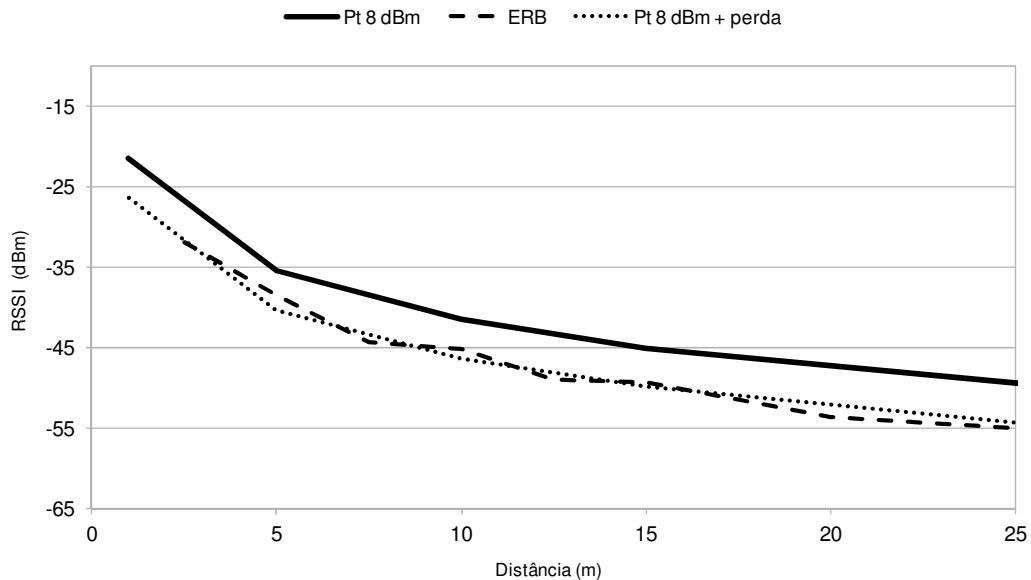


Figura 42 - Localidade 1 - Resposta do espaço aberto da Yagi.

Teste número 2: determinar padrão de irradiação da Yagi, obtido da mesma maneira do teste da seção 6.5.3. Esse teste foi executado para adicionar os valores à tabela da Yagi no

LpUp, ou seja, outra etapa de calibração. Na Figura 43 é possível verificar uma irregularidade nos ângulos de 160° e 200°, uma vez que ambos os ângulos deveriam apresentar valores de RSSI iguais devido a simetria da Yagi. Essa questão exigiu a necessidade da verificação da simetria da Yagi, teste 3.

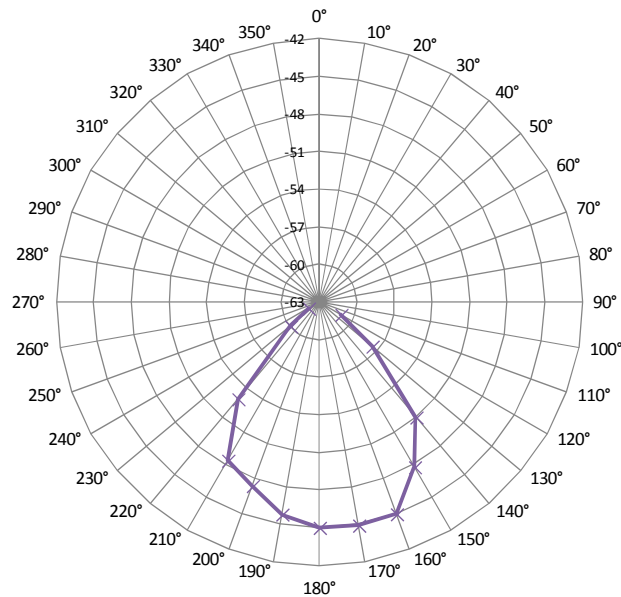


Figura 43 - Diagrama de Irradiação da Yagi 8,4m.

Teste número 3: verificar irregularidade da Yagi. Este teste foi executado da mesma maneira que o teste 2. A Tabela 8 mostra (na coluna normal) que o ângulo de 200° apresenta uma perda de sinal comparada ao ângulo de 160°. No momento em que a antena foi rotacionada no seu próprio eixo em 180°, os valores seguiram os mesmos porém com os ângulos invertidos, como era de se esperar. Este teste confirmou que a Yagi utilizada não é perfeitamente simétrica, ou seja, não apresenta o mesmo diagrama de irradiação em suas laterais.

Tabela 8 - Irregularidade da Yagi.

	Normal	Rotacionado 180°
160°	-45	-47
0°	-45	
200°	-47,4	-45,4

Teste número 4: determinar valores de pico. Durante a execução deste teste foram observados alguns valores extremos apresentando variações de ± 3 dBm, o que leva a um erro considerável para o LpUp. Isto poderia ser devido ao hardware do equipamento. Então medições de uma amostra (sem média) foram realizadas. Os valores obtidos no teste não tiveram variações de ± 3 dBm. O que, provavelmente, atribui estes valores extremos à um erro de firmware. Conseqüentemente, a implementação de um filtro, eliminaria estes valores extremos.

Teste número 5: dependência de temperatura. Durante a execução dos testes foram observadas variações dos valores do RSSI para uma mesma distância, porém não no mesmo instante e sim em períodos diferentes do dia, que poderiam ser em função da variação da temperatura ambiente, uma vez que durante os teste ocorreu uma amplitude térmica de 20°C . Durante os testes, foi possível obter a resposta do espaço aberto em 3 temperaturas diferentes, Figura 44, indicando que uma elevação de temperatura, ocorre uma maior perda no sistema. Esta associação de temperatura e perda do sinal, primeiramente foi relacionada aos cabos de RF, porém nos testes as antenas estava conectadas diretamente ao rádio o que excluiu esta possibilidade e conseqüentemente admitindo a provável causa ao hardware do rádio e antenas.

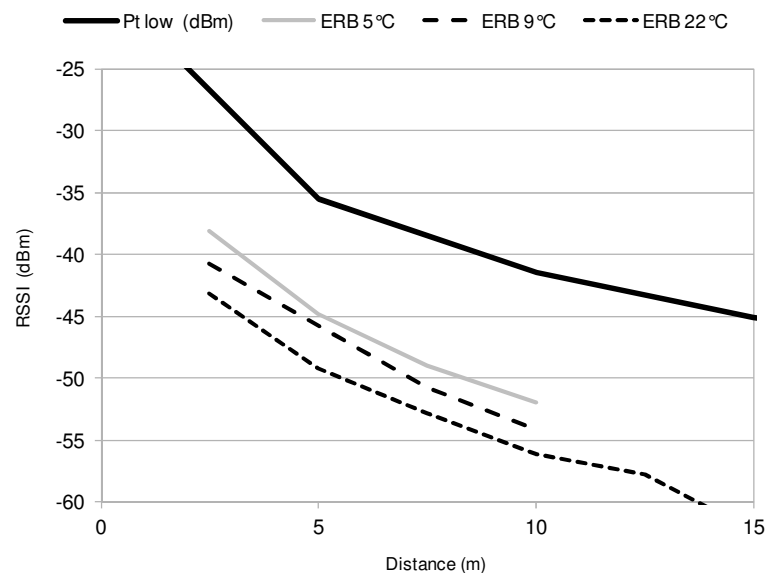


Figura 44 - Dependência do RSSI a temperatura.

Teste número 6: possíveis variáveis de erro (movimento do suporte da antena e interferência eletromagnética). O movimento do suporte da antena devido ao vento era outra possível causa de variações nas medições e se iria ou não influenciar nos valores, e nesta

rodada de teste foi verificado que este movimento não altera os valores de maneira significativa. Esta conclusão foi obtida através da análise de um vídeo que foi gerado para este teste. Da mesma maneira a primeira rodada de testes foi feita na localidade 2, onde diminui-se a possibilidade de interferência eletromagnética, uma vez que a resposta do sistema não era conhecida e assim esta questão foi eliminada. Porém, nestes testes os valores medidos não tiveram alterações que poderiam ser consideradas devido à existência de outros meios de transmissão, desconsiderando essa questão como uma variável de influência.

Teste número 7: LpUp. Na Figura 45 é mostrada a resposta do LpUp em duas distâncias, 5 e 10 m respectivamente para duas temperaturas ambientes diferentes. Em ambos os testes não ocorreu deslocamento lateral, ou seja, $\theta = 0^\circ$. Na distância de 5 m a calibração estava errada, já a 10 m a calibração estava correta, possibilitando verificar o erro introduzido. Em relação à precisão do sistema, nas duas distâncias a precisão é consideravelmente boa. Para 5 m igual a 2 m e para 10 m igual a 3 m, considerando que os valores extremos sejam eliminados. No caso da acurácia, a distância de 10 m apresenta melhor acurácia em comparação à distância de 5 m, devido a calibração errada da distância de 5 m. A Tabela 9 mostra uma média de 11 valores (cada valor é a média de 10 amostras), o erro e desvio padrão na distância de 10 m. A coluna das amostras é referente as 11 amostras, já a coluna sem picos é referente a valores desconsiderando valores extremos. Quando se desconsideram os valores extremos, o erro cai pela metade, -0,40 m, neste caso o erro representa a acurácia do LpUp. Já o desvio padrão de 3,14 m cai para 0,86 m quando são desconsiderados os valores extremos, e neste caso é a precisão do LpUp.

Os testes executados na localidade 2 seriam os mesmos executados na localidade 1, porém em distâncias maiores e potência de 23,97 dBm para verificar a resposta do LpUp. Porém ao obter a resposta do sistema no espaço aberto, Figura 46, a mesma teve grandes variações de maneira que impossibilitam a implementação do LpUp. Comparando a testes anteriores realizados na localidade 2, Figura 31, é possível verificar que as distâncias do teste eram de 50 a 1000 m, sendo este fator a grande diferença entre os dois testes. Outros testes realizados, como o do espaço aberto da Yagi, mostraram respostas semelhantes ao da Figura 46. Consequentemente, não foi possível a utilização destes testes para análise. Porém, a diferença entre este teste e o anterior indica a necessidade de ser utilizada uma potência diferente dependendo da distância a ser estimada, ou seja, neste teste a potência de 23,97 dBm seria muito alta para as distâncias de até 80 m e provavelmente estava saturando o canal de recepção dos rádios.

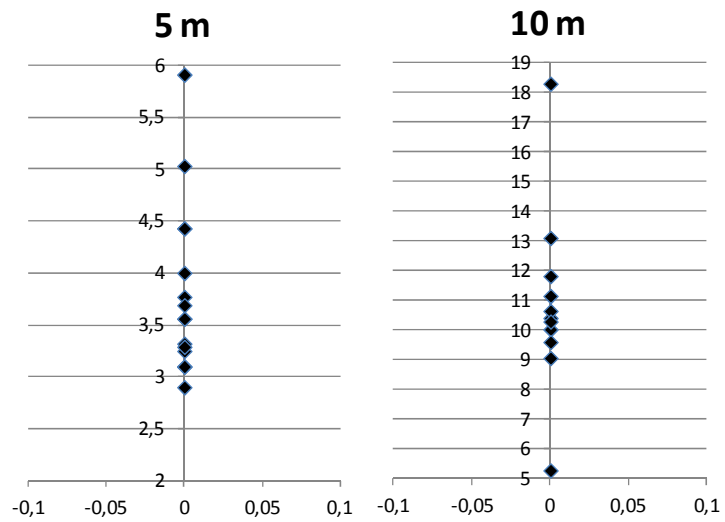


Figura 45 - LpUp resposta

Tabela 9 - Medições do LpUp para distância de 10m.

	Amostras	Sem picos
Valor real (m)	10,00	10,00
Média (m)	10,90	10,40
Erro (m)	-0,90	-0,40
Desvio Padrão (m)	3,14	0,86

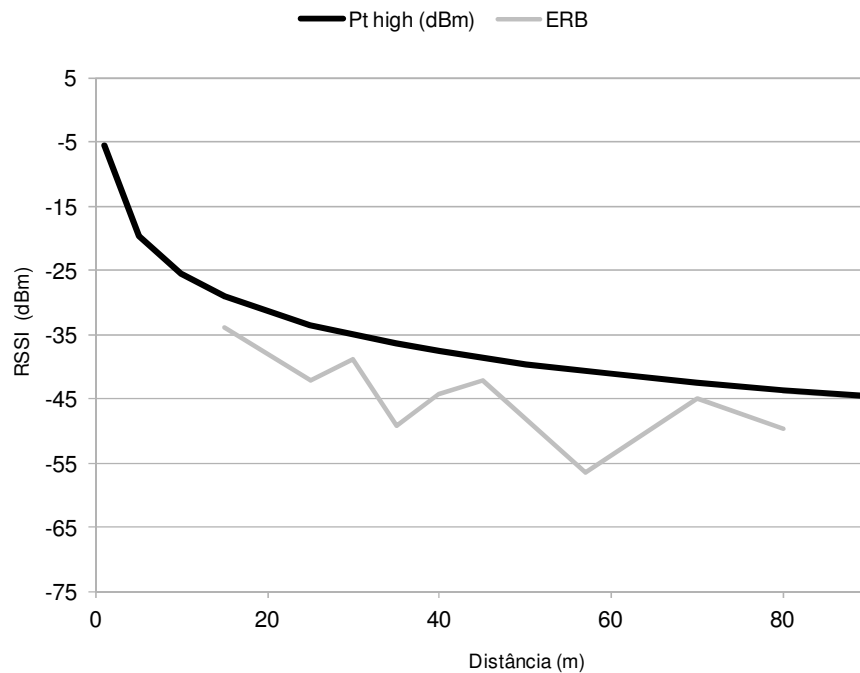


Figura 46 - Distância x Potência erradas.

Novamente, depois dos testes outras conclusões importantes foram estabelecidas, principalmente em relação à resposta do algoritmo e método LpUp. Os valores obtidos na Tabela 9 foram obtidas através de 110 amostras (11 valores onde cada valor é uma média de 10 amostras), confirmando a conclusão do teste 4 da seção 6.6, que indica que quanto maior o número de amostras maior a tendência do valor estimado se aproximar do real. Também, observa-se a importância da implementação de um filtro para eliminar valores extremos, o que adicionaria uma melhoria considerável ao LpUp. Uma questão do algoritmo que foi verificada com estes testes é a necessidade de se conhecer o local onde será implementado o LpUp, porque dependendo da resposta do espaço livre do sistema, é melhor utilizar o estimador com interpolação ao invés do estimador com a equação 7. Também o teste na localidade 2 indicou a necessidade de cuidar a relação distância x potência, caso contrário deixa o sistema impraticável. Não menos importante é a questão da temperatura e das condições climáticas, sendo que dependendo do clima, métodos que utilizam GPS aumentam o erro ou até mesmo tornam-se inoperáveis, ao contrário do LpUp, o que apresenta outra vantagem do método proposto, LpUp.

6.7.5 Definição do Algoritmo do LpUp

Após os testes realizados em campo e análise dos possíveis algoritmos, o LpUp foi definido. A modificação do algoritmo em relação aos fluxogramas apresentados na seção 6.4 foi no método de estabelecer o θ , nas funções "Determinar em qual ganho da antena está a EM através do valor de d e A partir do RSSI da antena direcional determinar o ângulo θ ". Na primeira função, o objetivo é estabelecer o valor de ajuste baseado em d e na segunda função, a partir da tabela ajustada determinar θ , assim estas funções ficaram de acordo a Figura 47.

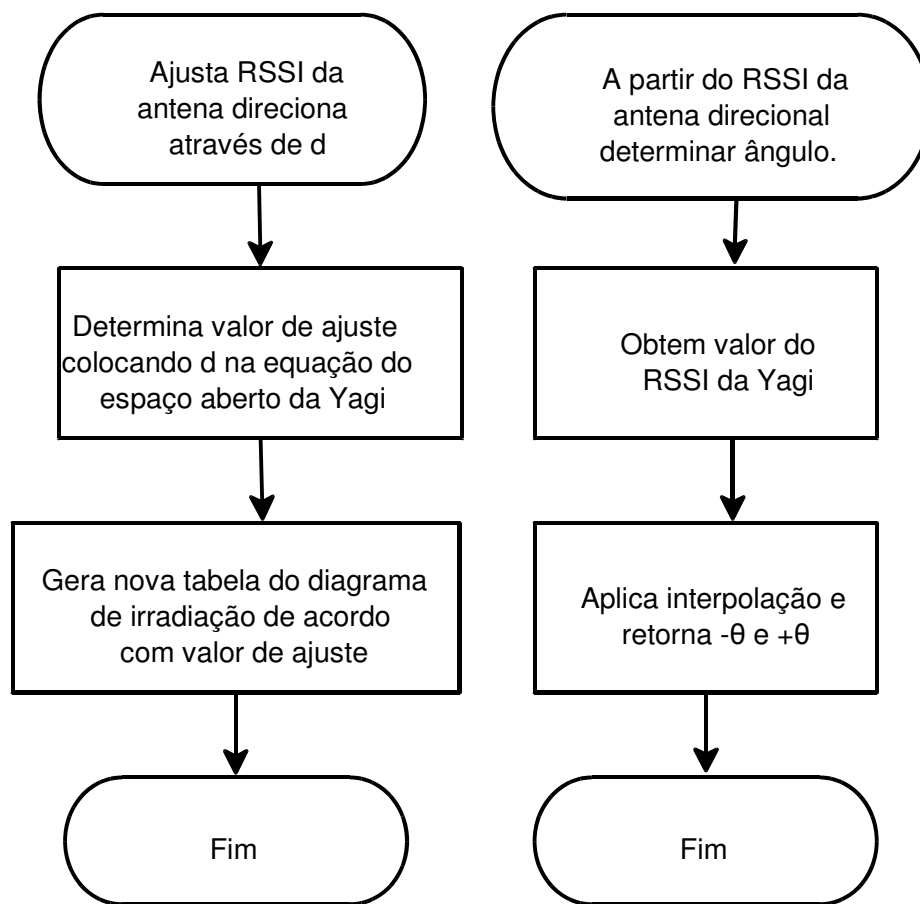


Figura 47 - Modificação do Algoritmo do LpUp

De acordo com os testes em campo a implementação da média (filtro) das medições do RSSI é importante porque quanto maior o número de amostras, mais estáveis ficam os valores, que tendem ao valor real. Este filtro é implementado de acordo a equação 21.

$$RSS_{m\u00e9dia} = \frac{(RSS_1 + RSS_2 + \dots + RSS_n)}{n} \quad (20)$$

O valores de calibra\u00e7\u00e3o modificam muito pouco os c\u00e1lculos do LpUp, bem como o processamento para execu\u00e7\u00e3o do algoritmo porque \u00e9 poss\u00edvel utilizar apenas uma vari\u00e1vel de calibra\u00e7\u00e3o a ser utilizada ap\u00f3s todos os c\u00e1lculos da equa\u00e7\u00e3o 7. Assim a equa\u00e7\u00e3o com calibra\u00e7\u00e3o fica:

$$LpUp - P_r = \frac{\left(P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2 \right)}{\left((4 \cdot \pi)^2 \cdot d^2 \right)} + Calibra\u00e7\u00e3o \quad (21)$$

O algoritmo foi implementado em linguagem C em um uC de 8 bits operando em 8 MHz. Devido ao uC ser de 8 bits, alguns cuidados especiais na implementa\u00e7\u00e3o do algoritmo s\u00e3o necess\u00e1rios. Para a implementa\u00e7\u00e3o da equa\u00e7\u00e3o 7 \u00e9 necess\u00e1rio utilizar constantes nos lugares de vari\u00e1veis que n\u00e3o t\u00eam seus valores alterados durante a execu\u00e7\u00e3o do c\u00f3digo para diminuir o processamento. J\u00e1 para aloca\u00e7\u00e3o de vari\u00e1veis \u00e9 necess\u00e1rio ter cuidado com as casas decimais a serem utilizadas, porque a utiliza\u00e7\u00e3o de vari\u00e1veis de ponto flutuantes sobrecarrega o uC. A utiliza\u00e7\u00e3o deste uC, apesar de apresentar alguns problemas para implementa\u00e7\u00e3o do algoritmo, ap\u00f3s o LpUp ter sido implementado, comprova que o algoritmo n\u00e3o exige muito processamento e pode rodar em uC de baixo custo.

Por fim o algoritmo final do LpUp segue o fluxograma da Figura 48 - Fluxograma do LpUp. O mesmo foi implementado na Placa Principal e simulado com valores reais obtidos nos testes em campo.

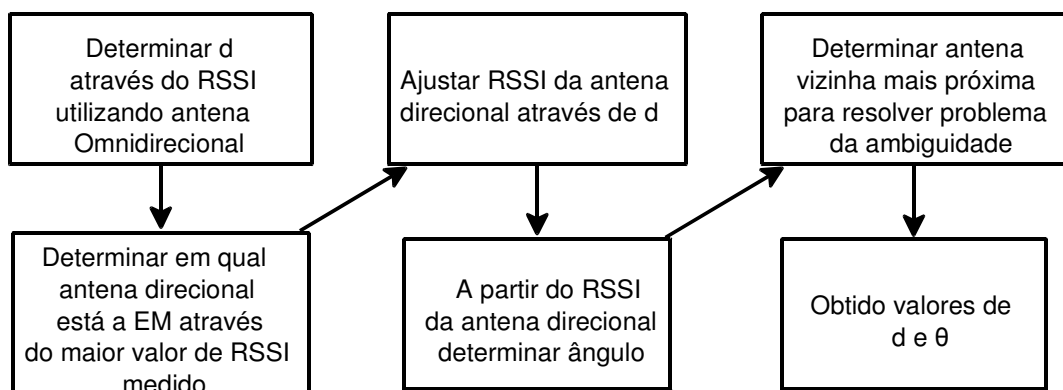


Figura 48 - Fluxograma do LpUp.

6.7.6 Considerações sobre o método LpUp

Os trabalhos futuros podem ser separados em três partes: questões a verificar, melhorias com métodos já mencionados e novos métodos.

Questões ainda pertinentes para o LpUp são: mais testes no AoA para verificação de acurácia e precisão, e também para ser possível fazer uma comparação com o erro do GPS, erro circular. Outra questão a verificar é, ao invés de utilizar a interpolação linear para determinar o AoA, verificar a possibilidade de estimar uma equação. Testes para verificar como são os resultados do LpUp para distâncias maiores e em locais onde o relevo não é plano. A questão dos valores extremos obtidos nos testes deve ser verificada, tanto no programa como na implementação de um filtro. Na questão do filtro, um filtro possível é a utilização do desvio padrão como verificador para validar ou não as amostras. Por fim, determinar as potências corretas de acordo com a distância em que está o EM.

Dos métodos já mencionados para diminuir os erros da medição da distância d é necessário a utilização de um método que integre os métodos 4, 5 e 6, sendo que o método 4 compensaria a irregularidade da antena Omni, o 5 melhoraria a resolução e repetibilidade do RSSI e o 6 compensaria a diferença da medição em campo com valores teóricos e também rodaria um autoajuste diariamente para compensar variações climáticas e de temperatura. Já os métodos para determinar θ , com a implementação do método 4 diminuiria os erros porque utiliza valores medidos em campo para determinar valor de ajuste e o θ .

Como novos métodos possíveis, pode-se citar a utilização de um acelerômetro onde seria possível verificar deslocamentos realizados pelas EMs e assim confrontar com valores calculados pelo LpUp, ou até mesmo, o acelerômetro manter o cálculo válido para locais onde o enlace entre ERB e EM não é possível. Com a utilização de um magnetômetro, CI que fornece a direção em relação ao norte do planeta terra, seria possível saber a direção para a qual a EM está direcionada sendo possível compensar o erro da Omni. Também um teste a ser executado, seria determinar se a irregularidade da Omni é devido ao formato do mRadio, onde seria necessário a construção de uma Omni com plano de terra eletrônico circular e verificar se isso eliminaria a irregularidade.

Já para implementação real do LpUp é necessário ter a possibilidade de informar a existência de obstáculos ou variações no terreno que influenciem nos valores de RSSI entre as estações ERB e EM. Bem como, a possibilidade de utilizar antenas direcionais que não cubram os 360°, uma vez que, dependendo dos obstáculos encontrados ou a situação em

campo, a área de cobertura das antenas serão por exemplo, 180°. Outro ponto é como o LpUp fornece a informação da posição da EM, no caso desta dissertação as coordenadas são cartesianas, mas para o usuário, o interessante é saber a localização da EM em um determinado mapa. Para isso, é necessário conectar o sistema LpUp a um computador com um *software* para fazer o processamento da informação fornecida pelo LpUp, para que o mesmo determine a posição da EM neste mapa. Para isso é necessário um *hardware* para transferir os dados para o computador, e também o desenvolvimento do *software*. Com estes dados no *software* também seria possível criar um banco de dados das EMs afim de poder traçar os trajetos realizados e também cruzar as informações de horários, datas e posições, onde que, dependendo da aplicação isto seria essencial.

7 CONCLUSÃO

Um novo método de localização foi apresentado, onde o seu diferencial é: através de um ponto possibilitar que uma ERB estabeleça a posição de outras EMs. Esta vantagem reduz o custo em infraestrutura para implementar um sistema de localização, uma vez, que outros métodos necessitam de 3 ou mais ERB. Caso existam 5 ERBs para abranger todos os locais possíveis da EM, também é necessário executar os cálculos de localização com 3 ERBs diferentes que estejam no enlace da EM. Para determinar quais das 3 ERBs serão utilizadas para executar os cálculos, é necessário um algoritmo de controle na rede sem fio para execução da troca de dados entre todas as ERBs para o sistema determinar quais serão as 3 ERBs utilizados para obter os dados da EM para posterior determinação de sua posição. Já para o LpUp, além da diminuição do custo devido à utilização de apenas uma ERB, também não existe a necessidade de um algoritmo complexo para rede sem fio, uma vez que a comunicação é feita apenas entre ERB e as EMs. Em comparação ao método mais utilizado de localização no mundo, o GPS, o LpUp apresenta a vantagem de funcionar da mesma maneira em dias nublados, ao contrário do GPS.

Em relação a custo do sistema entre o LpUp e GPS é possível fazer um levantamento prévio do valor do equipamento a ser colocado nas EMs, considerado método de transmissão de dados sem fio e de localização. Com o método do LpUp o valor do equipamento nas EMs pode reduzir em até 350 % o valor se comparado o método do GPS.

Também foi verificado que o método de “impressão digital” compensa erros em relação à utilização de fórmulas, porém o método de impressão digital exige uma calibração em campo, também necessária para o LpUp. Já na questão de custo do sistema, a utilização de uC de 8 bits mostrou que o LpUp não exige grande capacidade de processamento de *hardware* possibilitando a utilização de um uC de baixo custo. Nesta mesma linha, o LpUp pode ser ajustado para operar com baixo consumo de energia, uma vez que as EMs deverão ser alimentadas por meio de baterias.

Pelo lado prático, também foi verificado através dos testes que é necessário criar equipamentos e procedimentos para a calibração em campo ser rápida e confiável, caso contrário a implementação do LpUp em situações reais fica difícil ou até mesmo inviável. Também é necessário um método onde seja possível informar para o LpUp a existência de obstáculos no terreno para o LpUp poder compensar as interferências criadas por estes

obstáculos, caso contrário, isto também pode inviabilizar o sistema. Além destes obstáculos técnicos, também é necessário o desenvolvimento do *hardware* de RF para a ERB ter controle em qual antena que a mesma está medindo o sinal de RSSI.

Por fim, como maior contribuição desta dissertação um novo método, LpUp, foi apresentado, desenvolvido, testado e validado, sendo que o mesmo apresenta vantagens em comparação com métodos atuais. Testes em campo mostraram que a sua acurácia pode chegar até 40 cm e precisão de 86 cm, dependendo das condições e relevo do local e das configurações do LpUp. Também outra contribuição importante é confirmação de que o RSSI e a Equação de Friis podem serem utilizadas como um método para medir distâncias no caso das variáveis de influência serem levadas em conta. Como contribuição final, a possibilidade de utilizar o RSSI e antenas direcionais, método utilizado no LpUp, para determinar o AoA. Assim o objetivo da dissertação foi atingido, implementar um sistema de localização em espaço aberto por RF de baixo custo com vistas a aplicação na prática, e foi possível ir além do objetivo, porque um novo método de localização foi desenvolvido e validado.

REFERÊNCIAS

- AHSON, Syed A.; IYAS, Mohammad. **Location-Based Services Handbook: Applications, Technologies, and Security**. CRC Press, 2010.
- APPLICATION NOTE ATMEL, **Range Calculations**. www.atmel.com, 2010.
- ASH, Joshu; POTTER, Lee. **Sensor Network Localization via Received Signal Strength Measurements with Directional Antennas**. Proc. 42nd Annual Allerton Conference on Communication, Control and Computing, 2004.
- BAHL, P; PADMANABHAN, V.N. **RADAR: an in-building RF-based user location and tracking system**. INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE, V 2, 2000.
- BALANIS, Constantine A. **Antenna Theory - Analysis and Design**. Wiley-Interscience, 2005.
- BANDARA, Udana. et al. **Design and Implementation of a Bluetooth Signal Strength Based Location Sensing System**. Radio and Wireless Conference, IEEE 2004.
- BENSKY, Alan. **Wireless Positioning Technologies and Applications (GNSS Technology and Applications)**. Artech House Publishers, 2008.
- BRAS, L. et al. **Localization system improvement using a special designed sectorised antenna**. Antennas and Propagation (APSURSI), IEEE International Symposium on, 2011.
- FRENZEL, Louis E. **RF Detectors For Wireless Devices**. Design Faqs. Sponsored by Analog Devices. Ed Online 17106.
- HAIGH, J. H. **The Services Textbook of Radio, Volume 7: Radiolocation Techniques**. Her Majesty's Stationery Office, 1960.
- HELÉN, Marko; LATVALA, Juha; IKONEN, Hannu; NIITTYLAHTI, Jarkko. **Using Calibration in RSSI-Based Location Tracking System**. Tampere University of Technology, 18 March 2005.
- HILL, McGraw. **Antenna Engineering Handbook**. 3.ed. Johnson, 1992.
- HUANG, Xu; BARRALET, Mark; SHARMA, Dharmendra. **Accuracy of Location Identification with Antenna Polarization on RSSI**. Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists, Vol I, Hong Kong, 18-20 Mar. 2009.
- HUANG, Xu; BARRALET, M.; SHARMA, D. **Behaviors of Antenna Polarization for RSSI Location Identification**. Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing. International Conference on, NSWCTC 09, Wuhan, 2009.
- JI, Yiming. **Location Determination within Wireless Networks: Dynamic indoor/outdoor Localization Systems: Algorithm Design, Performance Analysis and Comparison Study**. VDM Verlag, 2009.

JI, Yiming; YU, Changbin; ANDERSON, B.D.O. **Bias-Correction In Localization Algorithms**. Global Telecommunications Conference, 2009. GLOBECOM 2009. IEEE. Australia, 30 Nov- 4 Dec. 2009.

KOTWAL, S.B. et al. **MAIL: Multi-Hop Adaptive Iterative Localization for Wireless Sensor Networks**. Computational Intelligence, Communication Systems and Networks, First International Conference on. CICSYN '09, 2009.

KÜPPER, Axel. **Location-Based Services: Fundamentals and Operation**. Wiley, 2005.

KVAKSRUD, Tor-Inge. **RANGE Measurements in an Open Field Environment**. Design Note DN018, Texas Instruments. www.ti.com, 2007.

LAU, Erin-Ee-Lin. et al. **Enhanced RSSI-based high accuracy real-time user location tracking system for indoor and outdoor environments**. International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems, v. 1, n. 2, jun. 2008.

LEE, Kung-Chung. **Localization systems using signal strength fingerprinting**. Electrical and Computer Engineering, 2010.

LIN, Tsung-Han. et al. **A Microscopic Examination of an RSSI-Signature-Based Indoor Localization System**. HotEmNets'08, June 2–3, 2008, Charlottesville, Virginia, USA

LYMBEROPOULOS, Dimitrios; LINDSEY, Quentin; SAVVIDES, Andreas. **An Empirical Characterization of Radio Signal Strength Variability in 3-D IEEE 802.15.4 Networks Using Monopole Antennas**. Embedded Networks and Applications Lab, ENALAB. Yale University, New Haven, CT 06520, USA.

MAO, Guoqiang; FIDAN, Baris. **Localization Algorithms and Strategies for Wireless Sensor Networks (Premier Reference Source)**. Information Science Reference, 2009.

MO, Andy. **Improving the Output Accuracy Over Temperature for RMS Power Detector**. Linear Technology, set 2010.

Naval Air Systems Command, **Navy Warfare and Radar Systems Handbook**. Washington, 1999.

NAVIGATION CENTER OF EXCELLENCE, U.S. Department of Homeland Security, United States Coast Guard, 2012.

ORFANIDIS, Sophocles J.; **Electromagnetic Waves and Antennas**. ECE Department Rutgers University, Piscataway, NJ, 2008.

PARAMESWARAN, Ambili Thottam; HUSAIN, Mohammad Iftekhar; UPADHYAYA, Shambhu. **Is RSSI a Reliable Parameter in Sensor Localization Algorithms – An Experimental Study**. Department of Computer Science and Engineering State University of New York at Buffalo NY, 14620, USA.

PARK, ChulYoung. et al. **Localization Algorithm Design and Implementation to Utilization RSSI and AOA of Zigbee**. Future Information Technology (FutureTech), 2010, 5th International Conference on. 21-23 May, 2010.

PUCCINELLI, Daniele; HAENGGI, Martin. **Multipath Fading in Wireless Sensor Networks: Measurements and Interpretation**. 3rd IEEE International Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks (SECON'06), Reston, VA, USA, September 2006.

POZAR, David M. **Microwave Engineering**. 3. ed. Estados Unidos da América: John Wiley & Sons, Inc, 2005.

RAPPAPORT, Theodore, S. **Smart Antennas: Adaptive Arrays, Algorithms, & Wireless Position Location**. IEEE, 1998.

RAPPAPORT, Theodore, S. **Wireless Communications: Principles and Practice**. 2.ed. Prentice Hall, 2002.

SAVARESE, Chris. **Robust Positioning Algorithms for Distributed Ad-Hoc Wireless Sensor Networks**. Department of Electrical Engineering and Computer Sciences, University of California at Berkeley, in partial satisfaction of the requirements for the degree of Master of Science, Plan II.

SAXENA, Mohit; GUPTA, Puneet; JAIN, Bijendra Nath. **Experimental Analysis of RSSI-based Location Estimation in Wireless Sensor Networks**. Communication Systems Software and Middleware and Workshops, 2008. COMSWARE 2008. 3rd International Conference on, 6-10 Jan. 2008.

SCHANTZ, Hans Gregory. **On the Origins of RF-Based Location**. Submitted to 2011 IEEE Radio & Wireless Symposium, Phoenix, Jan. 2011.

SCHILLER, Jochen; VOISARD, Agnès. **Location-Based Services (The Morgan Kaufmann Series in Data Management Systems)**. Morgan Kaufmann, 2004.

TAILLEFER, E. et al. **Direction-of-arrival estimation using radiation power pattern with an ESPAR antenna**. Antennas and Propagation, IEEE Transactions on. Feb, 2005.

TERWILLIGER, Mark; et al. **A Localization System using Wireless Network Sensors: A Comparison of Two Techniques**. Western Michigan University, Kalamazoo, MI 49008, USA.

WINFREE, Sean. **Angle of Arrival Estimation using Received Signal Strength with Directional Antennas**. An Honor Thesis Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Bachelor of Science with Distinction in Electrical and Computer Engineering of The Ohio State University, The Ohio State University, 2007.

ZARUBA, G. V. et al. **Indoor location tracking using RSSI readings from a single Wi-Fi access point**. Wireless Networks. Published online: 8 Jun. 2006.

ZHOU, Gang. et al. **Impact of Radio Irregularity on Wireless Sensor Networks**. MobiSYS'04: Proceedings of the 2nd international conference on Mobile systems, applications, and services, Boston, 2004.

ZHU, Jian. **Indoor/Outdoor Location of Cellular Handsets Based on Received Signal Strength.** School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology, aug. 2006.