

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

JULIETH KATHERIN ARIZA OLARTE

**PROPOSTA DE SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO EM REDES
DE SENSORES SEM FIO UTILIZANDO O TEOREMA DE
BAYES**

Porto Alegre

2014

JULIETH KATHERIN ARIZA OLARTE

**PROPOSTA DE SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO EM REDES
DE SENSORES SEM FIO UTILIZANDO O TEOREMA DE
BAYES**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Controle e Automação;
Subárea: Instrumentação.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Valner João Brusamarello

Porto Alegre

2014

JULIETH KATHERIN ARIZA OLARTE

**PROPOSTA DE SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO EM REDES
DE SENSORES SEM FIO UTILIZANDO O TEOREMA DE
BAYES**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Valner João Brusamarello, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis, Brasil.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Eduardo Pereira, UFRGS

Doutor pela Universität Stuttgart - Stuttgart, Alemanha

Prof. Dr. Ivan Müller, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil.

Prof. Dr. Álvaro Augusto Almeida de Salles, UFRGS

Doutor pela London University - Londres, Inglaterra.

Coordenador do PPGEE: _____

Prof. Dr. Alexandre Sanfelice Bazanella

Porto Alegre, Maio de 2014.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família em especial minha mãe, irmãos e meu namorado, pela dedicação e apoio em todos os momentos difíceis.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus todo poderoso por orientar-me e abençoar-me todos os dias de minha vida.

A minha família pelo constante e incondicional apoio para continuar minha formação profissional.

A meu namorado Sergio, por toda a dedicação, apoio, paciência e conselhos ao longo deste processo.

Ao professor Valner Brusamarello, por ser meu orientador no mestrado, sendo fundamental suas palavras e indicações no entorno acadêmico.

Aos colegas Sergio Severo, Ivan Müller e Jean Winter pelas contribuições e colaboração que foram essenciais para o desenvolvimento da pesquisa.

Aos colegas pelo seu auxílio nas tarefas desenvolvidas durante o curso.

Às funcionárias da secretaria do PPGEE, pela assistência durante o período de mestrado.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PPGEE, pela oportunidade de realização de trabalhos em minha área de pesquisa.

RESUMO

O crescimento na utilização de redes de sensores sem fio possibilitou desenvolver melhorias para atender as necessidades da indústria de comunicação de dispositivos em função de diversas vantagens relacionadas a baixo custo, baixo consumo de energia, mobilidade, instalação e configuração de novos dispositivos, além disso, criar funcionalidades adicionais, como por exemplo, localização de engenheiros de campo e ativos em ambientes industriais. O protocolo WirelessHART é um padrão aberto de comunicação sem fio que busca atender a estes requisitos. Neste trabalho é apresentado o estudo e desenvolvimento de uma aplicação de localização de um objeto alvo através da rede WirelessHART. São analisados diferentes métodos para estimar a distância entre o objeto alvo e os outros elementos fixos da rede de sensores sem fio, algoritmos para computar dados e determinar a localização em um plano de coordenadas. O funcionamento do sistema proposto e o método de localização utilizado foram avaliados por meio de simulações e de testes práticos. Para as condições utilizadas de instalação dos dispositivos, foi possível obter um alcance na comunicação via rádio de mais de 100 m, o que permitiu determinar uma área de monitoração do sistema de cerca de 100 m x 100 m. Os resultados obtidos do erro de localização atingiram entre um 72% e 80% de estimativas de localização menores que a 5 metros. O trabalho abordou a criação e avaliação de critérios de escolha para obter conjuntos de três transmissores com probabilidade de erros menores do que 5 metros. A avaliação dos critérios é feita através da construção de uma tabela de probabilidade conjunta obtida a partir da aplicação da regra de Bayes em dados experimentais com erro de posicionamento conhecido.

Palavras-chave: WirelessHART, Localização, Trilateração, Indicação de potência do sinal recebido.

ABSTRACT

The growth in the use of wireless sensor networks has made possible the development of improvements that meet the needs of the communication industry, including several devices with to low cost, low power consumption, mobility and ease of integration, installation and configuration advantages. Not only that but they also create additional functionalities, such as showing the location of field engineers who are assets in industrial environments. The WirelessHART protocol is an open standard for wireless communication that seeks to meet these qualities. This study presents a development of an application for the localization of a mobile device via the WirelessHART network. Different methods are analyzed to estimate the distance between the mobile node and the other fixed elements of the wireless sensor network, such as deployment topologies and algorithms, which are used to compute the data and determine the location in a coordinate plane. The operation of the proposed system and the location method were evaluated by means of simulations and practical tests. Due to the conditions used for the installation of the devices, it was possible to obtain a range of radio transmission over 100 m, which allowed to determine an area of monitoring system of about 100 m x 100 m. The results obtained from the error location reached between a 72% and 80% of the estimated localization that was less than 5 meters. The study addressed the establishment and evaluation of selection criteria for sets of three transmitters with probability of less than 5 meters errors. The evaluation criteria is done by constructing a joint probability table obtained from the application of Bayes rule in experimental data with known positioning error.

Keywords: WirelessHART, Localization, Trilateration, Received signal strength indication.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	15
1.1	MOTIVAÇÃO	16
1.2	OBJETIVOS	17
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	18
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	REDES DE SENSORES SEM FIO	19
2.1.1	Características do Nó Sensor	20
2.2	O PADRÃO WIRELESSHART	22
2.2.1	Documentação da norma HART 7	22
2.2.2	Tipos de dispositivos	23
2.2.3	Camadas do protocolo WH	24
2.3	PROPAGAÇÃO DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS	26
2.3.1	Ambiente de Propagação	26
2.3.2	Mecanismos de Propagação	26
2.3.3	Causas da Atenuação do Sinal	27
2.4	MODELOS DE PROPAGAÇÃO	28
2.4.1	Modelo de Atenuação em Espaço Livre	29
2.4.2	Modelo de Atenuação Recomendado pela ITU-R P.1238-1	30
2.4.3	Modelo de Atenuação de um Degrau	31
2.5	MÉTODOS DE MEDIÇÃO DA DISTÂNCIA E LOCALIZAÇÃO	32
2.5.1	Direção de Chegada (DOA)	32
2.5.2	Tempo de Chegada (TOA)	32
2.5.3	Diferença de Tempo de Chegada (TDOA)	33
2.5.4	Indicador de Intensidade do Sinal Recebido (RSSI)	33
2.6	MODELOS DE LOCALIZAÇÃO	34
2.6.1	Trilateração	34
2.6.2	Método de Localização por Análise de Padrão de Sinal	36
2.6.3	Método de Localização por Proximidade	36
2.6.4	Método de Localização por Conectividade	37
2.7	PROBABILIDADES CONDICIONAIS DE BAYES	37
3.	REVISÃO DA LITERATURA	40
4.	ANÁLISE DE DESEMPENHO DO MODELO DE LOCALIZAÇÃO	42
4.1	MÉTRICAS DE DESEMPENHO DO MODELO DE LOCALIZAÇÃO	42
4.1.1	Raiz do Erro Quadrático Médio	42
4.1.2	Função de Distribuição Acumulada do Erro Quadrático Médio	43
4.2	ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA MODELAGEM DO CANAL DE PROPAGAÇÃO	43
4.2.1	Modelagem do canal de propagação sem ruído	43
4.2.2	Modelagem do canal de propagação com ruído	44
4.3	ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TOPOLOGIA	47
4.3.1	Variando o Número dos Nós de Referência	47
4.3.2	Variando a configuração dos Nós de Referência	49
5.	AValiação EXPERIMENTAL	51

5.1 O AMBIENTE DE TESTES	51
5.1.1 Planejamento do Levantamento.....	51
5.1.2 Medições de campo.....	52
5.1.3 Desenho croqui do terreno.....	52
5.2 APARATO EXPERIMENTAL	53
5.2.1 Gateway	53
5.2.2 Rádio protótipo	54
5.3 COLETA DE DADOS.....	55
5.4 CALIBRAÇÃO	57
5.5 CARACTERÍSTICAS DO ALGORITMO DE LOCALIZAÇÃO.....	58
5.6 RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS	60
5.6.1 Experimento 1.....	60
5.6.2 Experimento 2.....	62
6. PROPOSTA DA DISERTAÇÃO: DETERMINAÇÃO DE TRANSMISSORES PARA TRILATERAÇÃO COM BAIXO ERRO ATRAVÉS DA ESCOLHA DE CRITERIOS EMPÍRICOS.....	65
6.1 CRITÉRIOS EMPÍRICOS PARA ESCOLHA DE TRANSMISSORES.....	65
6.1.1 Critério empírico de geometria	65
6.1.2 Critério de iluminação	66
6.2 CRITÉRIOS EMPÍRICOS - CENÁRIOS POSSÍVEIS.....	67
6.3 AVALIAÇÃO PROBABILÍSTICA DOS CRITÉRIOS EMPÍRICOS.....	68
6.3.1 Avaliação da qualidade dos critérios.	68
6.3.2 Escolha dos nós de referência adequados.....	69
6.4 APLICAÇÃO DOS CRITÉRIOS EMPÍRICOS NO EXPERIMENTO	70
6.5 APLICAÇÃO DA TABELA DE PROBABILIDADE CONJUNTA NO EXPERIMENTO DE TESTE	83
7. CONCLUSÕES.....	93
7.1 CONCLUSÕES GERAIS.....	93
7.2 SUGESTÕES PARA FUTURO TRABALHOS E PESQUISAS	94

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Arquitetura de um nó sensor sem fio.	21
Figura 2 Exemplo de rede WH.	24
Figura 3 Camadas do protocolo WH.	24
Figura 4 Reflexão de sinal.	26
Figura 5 Difração de sinal.	27
Figura 6 Dispersão de sinal.	27
Figura 7 Trilateração com três nós de referência.	34
Figura 8 Diferença entre as distâncias reais e os raios das circunferências.	35
Figura 9 Simulação da trajetória zigzag do objeto alvo sem ruído.	44
Figura 10 Medição do ruído presente no canal de propagação.	45
Figura 11 Simulação da trajetória circular do objeto alvo sem ruído.	46
Figura 12 Erro na posição devido ao ruído branco, com três nós de referência.	46
Figura 13 Resultado da localização associado ao número de nós de referência utilizados: (a) utilizando 4 nós de referência, (b) utilizando 3 nós de referência.	47
Figura 14 Erro da localização do objeto alvo em 18 posições diferentes associado ao número de nós de referência utilizados.	48
Figura 15 Resultado da localização utilizando diferentes topologias para os nós de referência. Esta figura mostra como a topologia tem grande influência na qualidade da localização: (a) nós de referência distribuídos nos cantos do cenário, (b) nós de referência posicionados na parte superior esquerda do cenário, (c) nós de referência posicionados na parte inferior direita do cenário, (d) nós de referência posicionados aleatoriamente.	49
Figura 16 Erro da localização do objeto alvo em 18 posições diferentes associado à configuração geométrica dos nós de referência.	50
Figura 17 Área do local onde foram distribuídos os nós de referência para realizar os experimentos.	53
Figura 18 Smart Wireless Gateway 1420A - Emerson.	54
Figura 19 Protótipos compatíveis com o protocolo.	55
Figura 20 RSSI do objeto alvo a 1 metro de distância dos nós de referência.	57
Figura 21 Área com distribuição dos nós de referência e caminho percorrido pelo objeto alvo para o experimento 1.	60
Figura 22 Erro na posição, conjunto de três nós de referência e média da trilateração para experimento 1.	61
Figura 23 Erro de distância utilizando CDF para experimento 1.	62
Figura 24 Área com distribuição dos nós de referência e caminho percorrido pelo objeto alvo para o experimento 2.	63
Figura 25 Erro na posição, conjunto de três nós de referência e média da trilateração para experimento 2.	63
Figura 26 Erro de distância utilizando CDF para experimento 2.	64
Figura 27 Topologia de uma rede representada por triângulos pela combinação 3 a 3 dos nós referência.	66
Figura 28 Possíveis Cenários para avaliar a qualidade dos critérios de geometria e iluminação.	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Detalhes dos comandos relacionados à RSL dos vizinhos.	25
Tabela 2. Parâmetros N e L_f , Recomendação ITU-R P1238-1 para a frequência de 2,4 GHz.	31
Tabela 3. Valores do índice de decaimento de potência para diversos ambientes.	31
Tabela 4. Erros do algoritmo de localização variando a quantidade de nós de referência.	47
Tabela 5. Erros do algoritmo de localização adicionando mais de 4 nós de referência.	48
Tabela 6. Erros do algoritmo de localização variando a configuração dos nós de referência.	50
Tabela 7. Coordenadas dos nós de referência utilizados nos experimentos.	52
Tabela 8. Leitura RSSI pelo objeto alvo para o experimento 1.	56
Tabela 9. Leitura RSSI pelo objeto alvo para o experimento 2.	56
Tabela 10. Dados de entrada para o algoritmo de trilateração.	58
Tabela 11. Erros do algoritmo de localização para o experimento 1.	61
Tabela 12. Erros do algoritmo de localização para o experimento 2.	62
Tabela 13 Erro de localização da trilateração do experimento de treinamento.	71
Tabela 14 Valores dos critérios de geometria e iluminação.	72
Tabela 15 Probabilidade incondicional via contagem dos critérios e erro de localização obtidos para a primeira posição do nó alvo.	73
Tabela 16 Probabilidade incondicional dos critérios e erro de localização de serem aceitáveis ou inaceitáveis para a primeira posição do nó alvo.	74
Tabela 17 Probabilidade incondicional via contagem relacionando o erro de localização com o critério de geometria para a primeira posição do nó alvo.	74
Tabela 18 Probabilidade condicional relacionando o erro de localização com o critério de geometria para a primeira posição do nó alvo.	75
Tabela 19 Probabilidade incondicional via contagem relacionando o erro de localização com o critério de iluminação para a primeira posição do nó alvo.	76
Tabela 20 Probabilidade condicional relacionando o erro de localização com o critério de iluminação para a primeira posição do nó alvo.	77
Tabela 21 Regra de Bayes critério de geometria para a primeira posição do nó alvo.	78
Tabela 22 Regra de Bayes critério de iluminação para a primeira posição do nó alvo.	78
Tabela 23 Probabilidade incondicional via contagem da conjunção dos critérios com o erro de localização para a primeira posição do nó alvo.	79
Tabela 24 Probabilidade incondicional da conjunção dos critérios para a primeira posição do nó alvo.	80
Tabela 25 Probabilidade condicional da conjunção dos critérios com o erro de localização para a primeira posição do nó alvo.	81
Tabela 26 Probabilidade conjunta.	82
Tabela 27 Erro de localização da trilateração do experimento de teste.	83
Tabela 28 Valores dos critérios de geometria e iluminação.	84
Tabela 29 Valores do critério de iluminação das combinatórias prévias.	85
Tabela 30 Valores do critério de iluminação das combinatórias na posição desconhecida do nó alvo.	86
Tabela 31 Validação dos Resultados para a primeira posição do nó alvo do experimento de teste.	87

Tabela 32 Validação dos Resultados para a segunda posição do nó alvo do experimento de teste.....	88
Tabela 33 Validação dos Resultados para a terceira posição do nó alvo do experimento de teste.....	89
Tabela 34 Validação dos Resultados para a quarta posição do nó alvo do experimento de teste.....	90
Tabela 35 Validação dos Resultados para a quinta posição do nó alvo do experimento de teste.....	91
Tabela 36 Validação dos Resultados para a sexta posição do nó alvo do experimento de teste.....	92

LISTA DE SÍMBOLOS

A_0	Atenuação de uma onda eletromagnética em espaço livre
λ	Comprimento de onda (m)
c	Velocidade de onda no vácuo (m/s)
d	Distância entre emissor e receptor
e_i	Erro de localização
G_R	Ganho no receptor
G_T	Ganho no transmissor
L_f	Fator de perdas de penetração dos pisos
N	Coefficiente de perdas de potência com a distância
P_L	Path Loss (perdas no canal)
P_T	Potência no transmissor
T_P	Tempo de propagação
σ^2	Variância
σ_e	Raiz quadrática média
X_σ	Variável aleatória gaussiana

LISTA DE ABREVIATURAS

BW	<i>Band Width</i>
CDF	<i>Cumulative Distribution Function</i>
DOA	<i>Direction of Arrival</i>
DSSS	<i>Direct-Sequence Spread Spectrum</i>
EIRP	<i>Equivalent Isotropically Radiated Power</i>
ECDF	<i>Empirical Cumulative Distribution Function</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i>
ITU	União Internacional das Telecomunicações
LQI	Indicador de Qualidade do Enlace
NF	Nó Fixo
NM	<i>Network Manager</i>
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i>
PPGEE	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
RF	Radiofrequência
RSL	<i>Received Signal Level</i>
RSSF	Redes de Sensores Sem Fio
RSSI	<i>Received signal strength indication</i>
TDOA	<i>Time Difference of Arrival</i>
TOA	<i>Time of Arrival</i>
WH	<i>WirelessHART</i>
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>

1. INTRODUÇÃO

Recentemente, devido aos avanços na eletrônica e nas tecnologias de comunicação sem fio tem surgido uma crescente necessidade no desenvolvimento de dispositivos de baixo custo, baixo consumo de energia e com capacidade de comunicação sem fio para processos industriais. Atualmente as Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) compostas por diversos dispositivos espalhados em uma determinada área, podem possuir características como organização, configuração, recuperação e diagnósticos automáticos as quais permitem grande flexibilidade de instalação e utilização em diversas aplicações (WHANG; ZHANG; WHANG, 2006). As redes de sensores sem fio são utilizadas para monitoração ambiental, medicina, agricultura, indústria, entre outras aplicações. Dessa forma, é fácil imaginar que esse tipo de serviço tende a se tornar um componente funcional em dispositivos presentes em ambientes industriais (AKYILDIZ et al., 2002; WANG; ZHANG; WHANG, 2006).

Os sistemas de localização estão disponíveis no mercado em diferentes tecnologias já existentes. O sistema de localização mais conhecido de todos é o *Global Positioning System* (GPS). Entretanto, o sistema GPS apresenta várias desvantagens (NICULESCU, 2001): falta linha de visada entre os satélites e o receptor, consumo de energia elevado o que reduz a vida útil, tamanho muito grande para serem instalados e utilizados em grande volume entre outros. O modo mais comum de realizar localização baseada em sinal de rádio frequência (RF) é utilizar a potência do sinal recebido *Received Signal Strength Indication* (RSSI) dos transmissores presentes no ambiente. A ideia é utilizar a relação entre o RSSI e a distância entre transmissor e receptor. Sistemas de localização que utilizam o sinal sem fio de RF foram propostos como uma possível solução para o problema de localização em ambientes internos (BAHL & PADMANABHAN, 2000; CHINTALAPUDI et al., 2010). Porém sabe-se que sistemas de localização baseados em RF tem desempenho bem mais limitado que o GPS.

Alguns métodos de localização de alta precisão foram desenvolvidos. Dentre estes, pode-se citar sistemas que utilizam sinais de ultrassom (HAZAS, 2002) e infravermelho (KRUMM; PLATT, 2003), os quais apresentam estimativas de erros em centímetros, mas que possuem um custo alto de implementação, já que o ambiente teria que conter um grande número de sensores para uma ótima monitoração.

Como já citado anteriormente, as redes de sensores sem fio têm características muito particulares, o que tem incentivado o desenvolvimento de vários protocolos mais adaptados às

suas limitações. A HART Communication em 2007 lançou a norma HART 7, que inclui o novo padrão WirelessHART, WH, sendo este o primeiro padrão aberto de comunicação sem fio para automação de processos industriais (CHEN; NIXON; MOK, 2010). O protocolo WH busca atender as necessidades para aplicações que envolvem monitoração e utiliza diferentes métodos que buscam aumentar a confiabilidade e segurança das comunicações sem fio (MULLER et al., 2011).

1.1 MOTIVAÇÃO

O crescimento na utilização de redes de sensores sem fio possibilitou desenvolver melhorias para atender as necessidades da indústria de comunicação de dispositivos e criar funcionalidades adicionais, como por exemplo, localização de engenheiros de campo e ativos em ambientes industriais. A capacidade de localizar pessoal é uma questão crítica de segurança em instalações de controle de processo por causa de altos riscos provocados por produtos químicos tóxicos e outros perigos (ZHU et al., 2009).

Boa parte dos trabalhos encontrados na literatura sobre localização em redes de sensores emprega o sinal de rádio frequência no processo de localização (ZHU et al., 2009; BAHL; PADMANABHAN, 2000; PENG; SICHITIU, 2007; CASTRO et al., 2001). Considerando o sinal transmitido por um nó sensor de posição conhecida e recebido pelo nó móvel cuja posição deseja-se estimar, o valor da potência recebida pode ser usado para estimar a distância entre os dois terminais. No entanto, a observação de potência recebida é ruidosa devido à distorção causada pelo canal de propagação no sinal, levando a erros na estimativa da posição. O tratamento destas distorções, de forma a minimizá-las, e a avaliação dos seus impactos no desempenho das técnicas de localização são os principais motivadores das pesquisas nesta área. Quando mais do que três dispositivos estão disponíveis, a escolha do melhor conjunto pode servir para minimizar o erro de localização.

A proposta da presente dissertação é desenvolver e avaliar critérios de escolha para obter conjuntos de três transmissores com probabilidade de erro baixo. Faz-se a avaliação através da construção de uma tabela de probabilidade conjunta obtida a partir da aplicação da regra de Bayes em dados experimentais com erro de posicionamento conhecido.

1.2 OBJETIVOS

Os seguintes itens constituem os objetivos desse trabalho:

- a) Estabelecer a localização objeto alvo utilizando unicamente a comunicação de rádio entre os dispositivos da rede WH. O critério importante a ser considerado nesse contexto é a possibilidade de localização de um objeto alvo dentro da rede com estimativa satisfatória das coordenadas resultantes.
- b) Criar um conjunto de critérios empíricos, relacionados de forma independente, capazes de fornecer informações que qualifiquem de forma diferenciada cada grupo de três transmissores fixos.
- c) Utilizar uma técnica probabilística (Teorema de Bayes) capaz de avaliar adequadamente um conjunto de critérios que permitam obter erros menores do que 5 metros em 100% dos casos através da escolha adequada dos transmissores.

A localização da posição do nó móvel é estimada através da medição da intensidade do sinal recebido pelos nós de referência, sendo necessária uma comunicação direta desse nó móvel com nós fixos de posição conhecida. Dentre as principais características de localização do nó móvel surge a necessidade de avaliar os principais fatores que influenciam a qualidade da localização obtida utilizando esse método tanto em ambientes externos sem obstáculos.

Este trabalho aplica uma metodologia teórico-experimental para atingir os objetivos propostos. De forma geral, as seguintes etapas foram realizadas:

- 1) Pré-processamento referente à coleta de dados dos transmissores;
- 2) Processamento com a trilateração de todos os sensores e avaliação do erro de localização;
- 3) Definir e avaliar as probabilidades de acerto dos critérios (treinamento);
- 4) Aplicação das probabilidades para, com o uso do teorema de Bayes, determinar o conjunto de transmissores que proporcionariam a menor probabilidade de erro.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta dissertação é dividida da seguinte forma:

- O capítulo 2 apresenta os principais conceitos teóricos utilizados no desenvolvimento deste trabalho. Entre os assuntos abordados, encontram-se aspectos gerais de RSSF, WirelessHART (WH), modelos de propagação de sinais eletromagnéticas, métodos de medição de distância e de localização, técnicas probabilísticas aplicadas, as diferentes normas que especificam as características do padrão WH e os dispositivos presentes em uma rede WH.
- O capítulo 3 apresenta uma análise do estado da arte sobre sistemas de localização em RSSF baseados na informação da RSSI.
- O capítulo 4 apresenta a proposta do ambiente desenvolvido, as simulações realizadas com o objetivo de comprovar o desempenho dos algoritmos de localização desenvolvidos, os experimentos realizados e a avaliação das probabilidades de acerto dos critérios propostos. Também é analisada e avaliada a influência da topologia na eficácia do algoritmo de localização.
- O capítulo 5 apresenta os resultados dos experimentos, descrevendo os fatores que podem influenciar o desempenho do sistema. Também é descrito o ambiente de testes, o aparato experimental utilizado e sua calibração.
- O capítulo 6 apresenta a criação, descrição e implementação dos critérios empíricos para escolher o melhor conjunto de três transmissores que levem a um erro de localização baixo.
- O capítulo 7 apresenta as conclusões do trabalho e propostas de trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção são apresentados os principais conceitos teóricos utilizados no desenvolvimento deste trabalho. Entre os assuntos abordados, encontram-se aspectos gerais de RSSF, WH, modelos de propagação de sinais eletromagnéticas, métodos de medição de distância e de localização e técnicas probabilísticas aplicadas.

2.1 REDES DE SENSORES SEM FIO

O crescimento na utilização do uso de arquiteturas computacionais distribuídas na área de automação industrial possibilitou desenvolver melhorias para atender as necessidades de comunicação com diversos dispositivos e inclusive diferentes fabricantes (protocolo aberto). Conforme (WINTER; PEREIRA, 2010) a utilização de redes que permitam a comunicação rápida e confiável entre equipamentos e o uso de mecanismos padronizados são, na atualidade fatores relevantes no conceito de produtividade industrial.

As redes de comunicação industrial sem fio diferem das redes de computadores normais em diversos aspectos. Normalmente são formadas por vários elementos distribuídos em uma área e operam sem a ação humana direta. É importante que os dispositivos integrantes da rede tenham um baixo consumo de energia, pois muitas vezes eles estão distribuídos em regiões de difícil acesso e sem fonte de energia não é possível a substituição de baterias. Cada sensor é autônomo e coleta diversas informações do ambiente e as envia para os nós vizinhos, permitindo que sejam utilizados em várias aplicações (TRENTIN, 2011). Conforme (LOUREIRO, 2003) as RSSF só tornaram-se possíveis devido ao grande avanço da tecnologia em termos de circuitos digitais e sistemas mecânicos microeletrônicos, que permitiram a miniaturização dos componentes, juntamente com o aumento na capacidade de processamento de dados e a diminuição do consumo de energia. Segundo (MOTTER, 2011) os requisitos básicos para o funcionamento de uma RSSF são:

- **Autonomia:** é essencial que cada dispositivo apresente um baixo consumo de energia, pois muitas vezes são espalhados em locais remotos, de difícil acesso e precisam funcionar por meses ou até mesmo anos sem necessidade de manutenção ou recarga de baterias.
- **Cooperação:** através da cooperação, cada elemento da rede pode tomar uma ação baseado nas informações recebidas dos nós vizinhos da rede. Também podem agrupar dados de diferentes fontes para o envio posterior a um elemento supervisor de rede.

- Tolerância a falhas: visto que cada dispositivo deve ter uma autonomia suficiente para funcionar durante muito tempo sem intervenção externa, é importante que tenha tolerância a falhas e de auto ajuste caso algum dispositivo apresente problemas. Para isso se desenvolvem algoritmos que realizam a correção dos erros, redundância no envio de dados e roteamento de pacotes.
- Custo: é um critério que usualmente conflita diretamente com todos os outros. A autonomia e as dimensões do nó sensor também geram custos e todos esses requisitos devem ser estudados. O baixo custo é importante, pois em diversas aplicações é necessário um grande número de sensores espalhados e um custo mais alto pode inviabilizar o projeto.

2.1.1 Características do Nó Sensor

As redes de sensores são, por natureza, centradas em dados, diferentes das redes tradicionais que são centradas em endereços. De acordo com esta característica, um nó sensor difunde informações baseadas em atributos, tais como, faixas de temperatura, níveis de vibrações, localização espacial, limite de velocidade entre outros. Outra característica peculiar é que se espera que os nós sensores atendam os requisitos específicos da aplicação, sendo comum o atendimento de um só atributo ou, no máximo, alguns outros atributos combinados.

Os principais requisitos deste tipo de redes são baixa latência, limitações rígidas de energia, baixo custo e possibilidade de implementação de redes com um elevado número de dispositivos e baixa complexidade dos nós da rede.

Outra característica, também decorrente do baixo custo por sensor e, conseqüentemente, sua alta disponibilidade, é a possibilidade de formação de redes densas e altamente escaláveis, com poucos cuidados em relação à instalação. Conforme (MOTTER, 2011) pode-se pensar numa distribuição saturada de nós sensores em certo ambiente que se deseje monitorar/analisar, aproveitando-se de alto grau de redundância e disponibilidade. As características de alta disponibilidade e de orientação de dados combinados remetem à agregação de dados nos nós sensores, determinada por interações localizadas entre nós que compartilham a mesma vizinhança para reduzir tráfego e economizar energia, coordenar sensoriamento e direcionar interesses.

Um nó participante de uma RSSF possui quatro blocos principais: sensoriamento, computação, comunicação e energia como é apresentado na Figura 1.

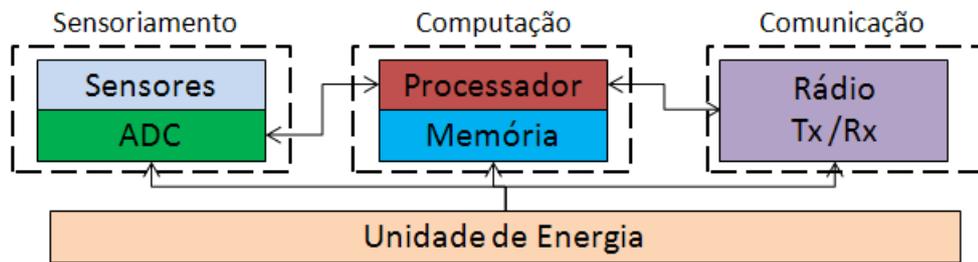


Figura 1 Arquitetura de um nó sensor sem fio.

O bloco de sensoriamento é o responsável pela medição de grandezas físicas e aquisição de dados do ambiente. O sinal que é enviado pelo sensor passa por um conversor analógico-digital, de forma que o bloco de computação possa processar as informações. Existem muitos sensores que podem ser anexados a um nó e ser utilizados em uma RSSF. Por exemplo, podem ser atribuídos sensores de temperatura, umidade, pressão, aceleração, entre outros.

O bloco de computação é o responsável por realizar o processamento das informações adquiridas pelo sensor e enviá-las ao bloco de comunicação. Este é composto por um microcontrolador e algum recurso de memória para armazenar os dados e enviar posteriormente.

O bloco de comunicação é composto por um transceptor, normalmente rádio, e a comunicação é feita através de protocolos padronizados com o envio e recebimento de mensagens com outros nós sensores participantes da rede.

O bloco de energia é o responsável por fornecer energia para todo o sensor. A fonte de energia normalmente é uma bateria e deve ter autonomia suficiente para que o nó sensor funcione por um período longo de tempo sem necessitar manutenção. Podem ser adicionados ao nó sensor recursos de gerenciamento de energia para o processador e o rádio, quando os mesmos não estiverem sendo utilizados.

2.2 O PADRÃO WIRELESSHART

O protocolo WH foi desenvolvido com o objetivo de estabelecer um padrão de comunicação sem fio para uso de aplicações industriais (CHEN; NIXON; MOK, 2010). A coordenação de uma rede WH é feita pelo estabelecimento dos *slots* de tempo e da frequência na qual ocorrerá comunicação. As ligações entre os nós da rede são feitas através de *superframes* que são repetidos periodicamente para gerar tráfego de comunicações rápidas (desde 250 ms), lentas (na faixa de minutos), além de tráfego acíclico. No protocolo WH, as mensagens são priorizadas de acordo com quatro níveis distintos: comando, dados de processo, normais e alarme. A priorização é feita para que o gerenciamento de latência e do fluxo dos dados na rede possa ser realizado. As mensagens tipo comando têm a mais alta prioridade e são encontradas em qualquer pacote que contenha dados provenientes do gerenciador de rede. As mensagens de dados de processo são utilizadas normalmente durante o controle e monitoramento de um processo automático. As mensagens tipo alarme contém informações acíclicas, tais como, falha de caminho, falha de hardware e outras. As mensagens normais são as que não se enquadram em nenhuma das mensagens descritas anteriormente.

Com relação ao roteamento de mensagens, em uma rede WH qualquer dispositivo ou nó deve fornecer ou repassar pacotes a fim de realizar roteamento das mensagens dentro da rede. A rede é formada por múltiplos e redundantes caminhos de comunicações, e devem suportar roteamento para todos os nós vizinhos. O gerenciador da rede adapta e conhece o estado da rede.

2.2.1 Documentação da norma HART 7

Em 2007 a HCF adicionou a funcionalidade de comunicação sem fio através da introdução do padrão WH. A seguir são apresentados os documentos que especificam a comunicação sem fio do protocolo:

- a) HCF_SPEC-65 – 2.4 GHZ DSSS O-QPSK *Physical Layer Specification*: Especifica as características da camada física (HART COMMUNICATION FOUNDATION, 2007);
- b) HCF_SPEC-75 – TDMA *Data- Link Layer Specification*: Especifica as características da camada de enlace (HART COMMUNICATION FOUNDATION, 2007a);

- c) HCF_SPEC-85 – *Network Management Specification*: Especifica as características da camada de rede, de transporte e de aplicação (HART COMMUNICATION FOUNDATION, 2009);
- d) HCF_SPEC-155 – *Wireless Command Specification*: Define os comandos da camada de aplicação relacionados às comunicações sem fio (HART COMMUNICATION FOUNDATION, 2008b);
- e) HCF_SPEC-290 – *WirelessHART Device Specification*: Define as características de funcionamento dos diferentes tipos de dispositivos, em relação aos comandos que devem ser suportados e das funcionalidades (HART COMMUNICATION FOUNDATION, 2008c).

2.2.2 Tipos de dispositivos

Esta seção apresenta uma breve descrição dos dispositivos presentes em uma rede WH. Usando uma rede sem fio tipo malha entre os dispositivos de campo, o protocolo é empregado em sensores e atuadores. Na Figura 2 é apresentada uma rede WH ligada à rede de uma planta automatizada. A rede WH suporta uma variedade de equipamentos, incluindo:

- Dispositivos de campo como dispositivos básicos realizando funções de sensoriamento ou atuação;
- Dispositivos roteadores de campo;
- Adaptador de dispositivos de campo, que permite a conexão de dispositivos HART convencional (com fio) à rede;
- Pontos de acesso que ligam os dispositivos de campo com um gateway;
- Gerente de rede WH, que pode estar integrado no gateway ou aplicado em um host. O gerenciamento é realizado através de diversos comandos enviados e recebidos dos dispositivos que estão presentes na rede.

Fonte: KUNZEL, 2012.

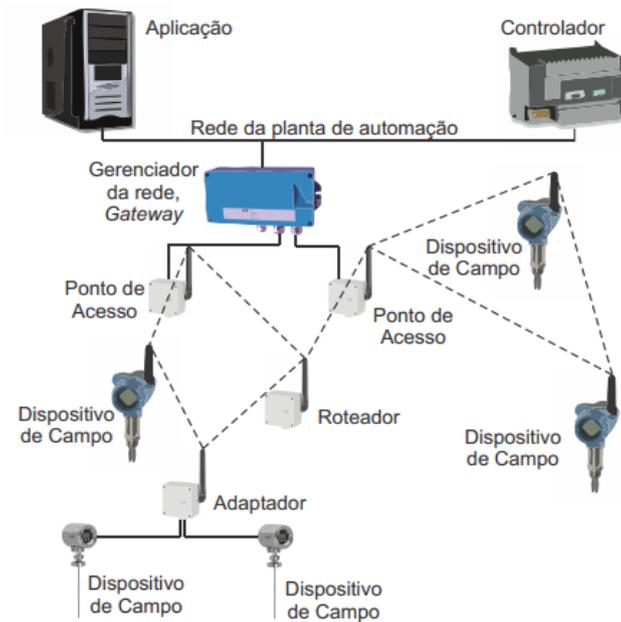


Figura 2 Exemplo de rede WH.

2.2.3 Camadas do protocolo WH

O protocolo WH inclui cinco camadas do modelo OSI como é apresentado na Figura 3: a camada física, camada de enlace, camada de rede, camada de transporte e camada de aplicação (HART COMMUNICATION FOUNDATION, 2007).

Fonte: KUNZEL, 2012.

Camada OSI	Função	WirelessHART
Aplicação	Provê ao usuário aplicações que utilizam a rede	Orientado a comandos. Tipos de dados pré-definidos e procedimentos de aplicação
Apresentação	Converte dados de aplicação entre formatos locais e de rede	
Sessão	Gerenciamento de serviços de conexão para aplicações	
Transporte	Provê transferência transparente de mensagens	Auto-segmentação de dados, transporte confiável, tamanho de segmentos negociável
Rede	Roteamento fim a fim de pacotes. Resolução de endereços de rede	Otimização de energia, rotas redundantes, rede <i>mesh</i> com recuperação automática
Enlace	Estabele estrutura dos pacotes, detecção de erros, arbitração de barramento	Segurança e confiabilidade, TDMA/CSMA sincronizado, <i>channel hopping</i> , confirmação de recebimento
Física	Conexões mecânicas e elétricas Transmissão de bits	2,4 Ghz <i>wireless</i> , rádios baseados na 802.15.4, potência transmissão 10 dBm

Figura 3 Camadas do protocolo WH.

A tecnologia WH (CHEN; NIXON; MOK, 2010) apresenta uma rede segura e opera na banda de rádio de 2,4 GHz ISM (*Industrial Scientific and Medical*). O padrão utiliza a

norma IEEE 802.15.4 (camada física) com sequência direta de espalhamento do espectro, *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS). A camada física do protocolo WH define as características de rádio, como o método de sinalização, potência do sinal, e a sensibilidade do dispositivo. O protocolo WH opera na faixa ISM 2400-2483.5MHz livre de licença, com uma taxa de dados de até 250 kbit/s. A malha de rede WH abrange uma área relativamente grande. Todos os dispositivos devem fornecer uma *Equivalent Isotropically Radiated Power* (EIRP) nominal de até 10dBm (10mW) \pm 3dB. A potência de transmissão é programável de -10 dBm a +10dBm. A linha máxima de alcance para transmissão deve ser de 100 metros.

Para a localização de dispositivos alvo não existe um comando definido que cumpra esta funcionalidade utilizando o protocolo WH, mas existem outros comandos específicos (comandos 780 e 787) que podem ser utilizados para fornecer dados que permitam realizar a localização do objeto alvo. A camada de aplicação do protocolo WH é responsável por gerar, interpretar e responder a comandos trocados entre os dispositivos, bem como reportar o estado de funcionamento do dispositivo. Diversos comandos definidos no protocolo são relevantes para a obtenção de dados utilizados no sistema de localização. A Tabela 1 (HART COMMUNICATION FOUNDATION, 2008b) apresenta os principais comandos relacionados à RSSI dos vizinhos, como uma das informações relevantes contidas no comando. Os comandos podem ser classificados de duas maneiras: dinâmicos, quando são enviados ao gerenciador de rede e mudam com o tempo, ou estáticos, quando não se alteram.

Tabela 1 Detalhes dos comandos relacionados à RSL dos vizinhos.

Número-Nome	Característica	Descrição	Informações contidas
<i>780-Report Neighbor Health List</i>	Dinâmico	Estados dos vizinhos que têm <i>link</i> com o dispositivo	RSSI do vizinho, número de pacotes transmitidos e recebidos com sucesso e com falhas
<i>787-Report Neighbor Signal Levels</i>	Dinâmico	Intensidade de sinal de todos os vizinhos não linkados descobertos	RSSI dos vizinhos

Fonte: HART COMMUNICATION FOUNDATION, 2008b.

2.3 PROPAGAÇÃO DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

2.3.1 Ambiente de Propagação

O meio de propagação de uma rede sem fios é o ar. Este meio não tem características lineares, sofrendo interferência de padrões específicos de cada cenário. É uma tarefa árdua definir modelos matemáticos que permitam descrever o comportamento de qualquer sistema, chamados modelos de propagação em redes sem fios. É importante destacar que o padrão de cada local é singular. Cada localização tem um comportamento específico, seja um espaço *indoor* (dentro de um prédio) ou *outdoor* (fora do prédio), se existe presença de obstáculos, se existe vegetação, entre outros. Todos estes fatores contribuem para uma dependência direta da potência recebida e das características do meio.

A potência no receptor não é apenas função da distância do emissor. (KOTZ; NEWPORT; ELLIOT, 2003) apresenta algumas características inerentes à propagação de sinais não consideradas no desenvolvimento de simuladores de redes sem fios: altura da antena, não-isotropia da área de transmissão, as características do *hardware*, a assimetria nas ligações entre nós e a atenuação do sinal devido à presença de obstáculos.

2.3.2 Mecanismos de Propagação

A presença de obstáculos, a mobilidade dos dispositivos e as condições atmosféricas são fatores que influenciam a propagação de sinais, devendo ser contemplados nos desenvolvimentos de modelos que estimem a potência do sinal transmitido e também do sinal recebido. Conforme (RAPPAPORT, 2002) podem-se definir três mecanismos básicos que provocam atenuação:

- a) Reflexão: A Figura 4 ilustra este fenômeno, que ocorre na presença de obstáculos que podem refletir as ondas emitidas. Depende da dimensão do obstáculo e do comprimento de onda. A reflexão das ondas pode interferir construtivamente ou destrutivamente na onda transmitida.

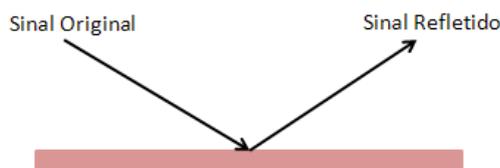


Figura 4 Reflexão de sinal.

- b) Difração: ocorre quando existe a presença de obstáculos impenetráveis, e as ondas contornam o obstáculo como é ilustrado na Figura 5. Este mecanismo permite enviar sinais entre dispositivos sem linha de vista. Este fenômeno é também conhecido de *shadowing* devido ao fato de um sinal transmitido poder atingir um receptor mesmo que esteja na sombra do obstáculo.

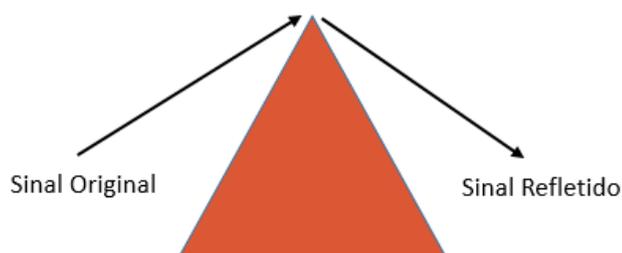


Figura 5 Difração de sinal.

- c) Dispersão: Uma superfície rugosa pode originar a dispersão do sinal, ou seja, será irradiado em várias direções como é ilustrado na Figura 6. A dispersão ocorre na presença de objetos no caminho de transmissão com uma dimensão na ordem ou menor que o comprimento de onda do sinal. Em (ANDERSEN; RAPPAPORT; YOSHIDA, 1995) o estudo revela que, postes de iluminação e sinais de trânsito dispersam energia em várias direções, o que permite a recepção de sinais aonde este não chegaria através de mecanismos de reflexão ou difração.

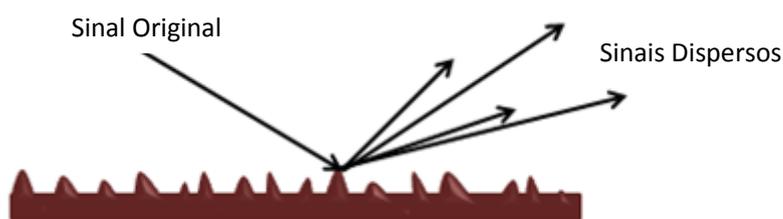


Figura 6 Dispersão de sinal.

2.3.3 Causas da Atenuação do Sinal

Um sinal eletromagnético propaga-se entre o transmissor e o receptor através de um ambiente real, composto por uma ampla variedade de obstáculos e características que tem influência na potência recebida. Existem diversos fatores que atenuam ou alteram o sinal transmitido quando este atinge o receptor:

- a) Distância: a característica mais relevante que modela o sinal recebido é a distância. Em um cenário ideal, a potência recebida seria apenas função da distância, o que permitiria determinar com valores exatos a potência recebida a certa distância.
- b) Propagação multi-caminho: o sinal refletido chega ao destino por diferentes direções, podendo causar efeito construtivo ou destrutivo levando atenuações e atraso do sinal. Este fator pode provocar variações abruptas na potência do sinal recebido.
- c) Obstrução do caminho: a presença de obstáculos no caminho entre o transmissor e o receptor.
- d) Tipo de ambiente: existem diversos tipos de ambientes, que podem ser caracterizados como interiores (*indoor*) ou exteriores (*outdoor*). Em ambientes *indoor*, a presença de obstáculos é maior, causando múltiplas reflexões ao longo do caminho entre o transmissor e o receptor.
- e) Tipo de materiais: a reflexão e transmissão de ondas eletromagnéticas é diferente entre os diversos tipos de materiais.
- f) Terreno: a irregularidade do terreno, causadora do mecanismo de dispersão, também pode interferir na potência do sinal recebido.

2.4 MODELOS DE PROPAGAÇÃO

Um modelo de propagação de sinais RF é uma representação matemática da propagação das ondas eletromagnéticas. Estes modelos têm como objetivo a possibilidade de prever, sob determinadas características, a potência de sinal quando este atinge o receptor. Estes modelos preveem a atenuação do sinal em função da frequência, distância entre o transmissor e o receptor, da altura da antena com respeito ao solo, entre outros fatores. Os modelos mais precisos levam em conta como possíveis fatores de atenuação as características do ambiente de propagação, assim como a presença de obstáculos no caminho percorrido pelas ondas eletromagnéticas que se propagam entre dois dispositivos sem fio.

Os modelos podem ser definidos como:

- a) Empíricos: baseados nas observações, relacionando basicamente atenuação de sinal e distância.
- b) Teóricos ou determinísticos: levam em consideração os dados topográficos do ambiente de propagação de ondas, resultando em relações usualmente mais complexas do que as observadas nos modelos empíricos.

Os modelos empíricos trazem resultados que se ajustam melhor à realidade, pois contabilizam maior gama de fatores que afetam a atenuação dos sinais transmitidos, no entanto, por se tratarem de situações específicas previamente estudadas, acabam por tornar-se um tanto mais limitados.

Já os modelos teóricos são mais genéricos, por serem baseados em princípio físicos, possibilitando um uso mais abrangente. No entanto, os resultados obtidos através destes modelos tendem a ser mais distantes da realidade, dada a dificuldade em contabilizar todos os parâmetros que influem na propagação do sinal.

Os modelos utilizados atualmente acabam sendo modelos híbridos, que levam em consideração situações específicas e conhecidas, mas também são influenciados pelos dados topográficos do meio, buscando, assim, o melhor dos dois tipos de modelos, trazendo resultados próximos à realidade, com razoável flexibilidade.

Como não existem modelos largamente utilizados que envolvam todos os tipos de ambiente, é comum que os modelos utilizados sejam divididos em modelos de propagação em ambientes interiores e exteriores. Em uma propagação realizada em ambientes interiores é comum que não exista linha de visada entre transmissor e receptor, de modo que a propagação dos sinais se dá, fundamentalmente, por reflexão, e transmissão nas paredes e por difração nas zonas laterais das divisórias.

2.4.1 Modelo de Atenuação em Espaço Livre

O modelo de atenuação em espaço livre consiste no modelo mais simplificado de atenuação, no qual se considera que existe linha de visada entre transmissor e receptor e que esta é a única forma de transmissão de sinais entre eles, assumindo, um ambiente ideal. Este modelo consiste na base sobre a qual todos os demais são construídos, sendo de grande importância, mesmo que seus resultados sejam os mais distantes de uma realidade de ambientes interiores.

Neste modelo, a atenuação do sinal no caminho livre de obstáculos é expressa apenas como a fração da potência da onda transmitida que chega ao receptor, por um determinado percurso. Em espaço livre, a energia irradiada por uma antena omni-direcional é espalhada sobre a superfície de uma esfera de raio ou diâmetro d , cuja área é $(4\pi d)^2$ (LASSONEN, 2003) como expressado por (1).

$$P_R = \frac{P_T \cdot G_T \cdot G_R \cdot \lambda_0^2}{(4\pi \cdot d)^2} \quad (1)$$

Onde P_R é a potência recebida, P_T é a potência transmitida, G_T e G_R são os ganhos no transmissor e no receptor que podem ser considerados iguais a 1 e assim eliminados da expressão (1), respectivamente, d é a distância entre transmissor e receptor e λ é o comprimento de onda do sinal. Conforme a equação de Friis, a atenuação de uma onda eletromagnética em espaço livre A_0 pode ser calculada como mostra a expressão (2).

$$A_0 = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 \quad (2)$$

Ainda, é conveniente que esta atenuação seja expressa em dB, conforme na expressão (3).

$$A_{0[dB]} = -20 \cdot \log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) \quad (3)$$

O modelo de atenuação em espaço livre, por se distanciar da realidade de propagação, serve como aferição inicial de perdas, permitindo que sejam feitas as primeiras estimativas sobre a rede que se pretende implementar.

2.4.2 Modelo de Atenuação Recomendado pela ITU-R P.1238-1

A União Internacional de Telecomunicações (ITU) publicou uma recomendação para que fossem modelados os efeitos da propagação de ondas de rádio, no que diz respeito à atenuação de sinais, sendo esta identificada como Recomendação (ITU-R P1238-1, 1999). Esta recomendação considera que, para que seja planejada a cobertura de um sinal de rádio, é necessário que se possuam dados exatos acerca da construção da planta onde se deseja realizar a implementação, no que diz respeito ao material utilizado para a construção, geometria e mobília, além dos diagramas de radiação das antenas utilizadas. A expressão (4) descreve um modelo que permite calcular a atenuação do sinal no percurso entre o emissor e o receptor.

$$A_{ITU[dB]} = 20 \cdot \log(f[MHz]) + N \cdot \log(d[m]) + L_f[dB] \cdot (n_p) - 28 \quad (4)$$

Onde f é a frequência do sinal transmitido, N é o coeficiente de perdas de potência com a distância, d é a distância entre emissor e receptor, L_f é o fator de perdas de penetração dos pisos e n_p é o número de pisos entre o emissor e o receptor.

A recomendação (ITU-R P1238-1, 1999) fornece tabelas obtidas através de medidas, para os parâmetros N e L_f , em várias frequências. Na Tabela 2 são mostrados os valores destes parâmetros na frequência de 2,4 GHz.

Tabela 2 Parâmetros N e L_f , Recomendação ITU-R P1238-1 para a frequência de 2,4 GHz.

Parâmetros	Residencial	Escritório	Comercial
N –Coeficiente de perdas de potência	28	30	22
L_f –Fator de perdas de penetração dos pisos	$4 \times n_p$	$15+4 \times (n_p-1)$	$6+3 \times (n_p-1)$

2.4.3 Modelo de Atenuação de um Degrau

O modelo de atenuação de um degrau considera a dependência linear entre as perdas de percurso e a distância logarítmica, analisando a propagação como um todo, onde a atenuação proveniente das paredes e pisos é quantificada através de um índice de decaimento de potência $A_{1d[dB]}$, sendo expresso pela expressão (5).

$$A_{1d[dB]} = A_{1[dB]} + 10 \cdot n \cdot \log(d_{[m]}) \quad (5)$$

Onde A_1 representa a atenuação do sinal a uma distância de 1 metro do receptor, n é o índice de decaimento de potência e d é a distância entre o emissor e o receptor.

O valor do índice de decaimento de potência depende do tipo de ambiente e, conforme aumenta o índice n , mais rapidamente o nível de sinal decai com a distância. Também é possível observar que para $n=2$, a expressão (5) é igual à expressão da atenuação de espaço livre. Ou seja, quando existe linha de visada desobstruída entre o emissor e receptor, este modelo usa $n=2$ e torna-se a expressão de atenuação em espaço livre. Geralmente, na propagação de sinais RF em interiores, o valor de n , pode variar entre 1,5 e 6 devido à presença de reflexões nas paredes e nos objetos contidos no meio de propagação. Conforme (KEENAN, 1990) existem valores estimados para vários tipos de ambiente, agrupados na Tabela 3.

Tabela 3 Valores do índice de decaimento de potência para diversos ambientes.

Ambiente	Índice de Decaimento de potência $-n$
Ambiente interior, com linha de visada livre.	1,5 a 2
Ambiente interior, com linha de vista obstruída.	2 a 4
Ambiente interior, com separação de 1 a 3 pisos, com obstrução de linha de vista.	4 a 6

Fonte: KEENAN, 1990

2.5 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DA DISTÂNCIA E LOCALIZAÇÃO

A seguir são descritos alguns métodos estudados para obtenção da distância entre os nós fixos da RSSF e o objeto alvo. A partir desta medida e das coordenadas dos nós de referência é possível obter a localização do objeto alvo através de métodos como triangulação e trilateração (PATWARI, 2005), que serão descritos mais adiante.

2.5.1 Direção de Chegada (DOA)

Conhecendo as coordenadas dos nós de referência, este método utiliza o ângulo de recepção do sinal para determinar a localização mediante triangulação. Como a antena recebe um sinal com maior intensidade quando apontada diretamente para um transmissor, este método necessita de uma antena móvel ou várias antenas fixas, uma para cada ângulo de recepção. O inconveniente neste caso é a necessidade de uma antena para cada ângulo de recepção.

2.5.2 Tempo de Chegada (TOA)

Este método baseia-se no cálculo do tempo em que um pacote de dados necessita para chegar ao receptor. Conhecendo este tempo e também a velocidade de propagação da onda eletromagnética no meio (aproximadamente a velocidade da luz no vácuo), é possível obter a distância entre os dispositivos. É importante também que os equipamentos envolvidos na transmissão e recepção dos pacotes estejam sincronizados para que seja válida a comparação do tempo de chegada dos pacotes (LANZISERA; LIN; PISTE, 2006). Considerando a velocidade da luz como velocidade de propagação, como é mostrado na expressão (6), o tempo que a onda leva para percorrer 1 metro será 3,3ns que é o tempo de propagação (T_p).

$$T_p = \frac{\text{distância}}{\text{velocidade}} = \frac{1 \text{ m}}{3 \times 10^8 \text{ m/s}} = 3,3 \text{ ns} \quad (6)$$

Considerando que o hardware escolhido tem um “clock” de 24 MHz, a expressão (7) mostra que a cada ciclo de “clock” a onda eletromagnética já terá percorrido 13,89 metros.

$$d_{clk} = \frac{1}{T_p} = \frac{41,67 \text{ ns/clk}}{3,3 \text{ ns/m}} = 13,89 \text{ m/ciclo de clock} \quad (7)$$

Considerando os dados acima se conclui que é inviável estimar a distância pelo tempo de propagação da onda no meio considerando ambientes fechados (curta distância entre nós) principalmente pela limitação de hardware e por ele possuir um valor de “clock” limitado

2.5.3 Diferença de Tempo de Chegada (TDOA)

A técnica de diferença de tempo de chegada assemelha-se ao método TOA descrito anteriormente, mas os sinais são enviados de fontes diferentes. Desta forma é possível verificar que um rádio está mais distante do que outro, podendo assim estimar a posição relativa do equipamento alvo. Este método exige a completa sincronização de todos os elementos, sendo que os nós transmissores devem enviar a mensagem ao receptor exatamente ao mesmo tempo, para que assim este possa calcular a diferença entre o tempo de chegada dos pacotes de cada transmissor. O TDOA, porém, tem algumas deficiências, permitindo apenas uma estimativa grosseira de qual equipamento se encontra mais perto do equipamento alvo. Além do mais, para o presente projeto este método apresenta o problema de baixo “*clock*” do microcontrolador utilizado.

2.5.4 Indicador de Intensidade do Sinal Recebido (RSSI)

A estimativa da distância entre transmissores de rádio também pode ser feita medindo a atenuação do sinal recebido. As ondas eletromagnéticas se propagam no meio e perdem potência conforme a distância percorrida aumenta.

Este método leva em consideração a atenuação de um sinal de rádio propagando-se no espaço. O valor da potência do sinal recebido normalmente é utilizado para obter o indicador de qualidade do enlace (LQI) em aplicações de monitoramento. Porém, ele também está diretamente relacionado à distância, diminuindo a potência quando se aumenta a distância entre transmissor e receptor.

As desvantagens desta técnica estão relacionadas às interferências que as ondas de rádio podem sofrer, alterando a medição de potência do sinal recebido e gerando erro nos resultados. Entre as principais fontes de interferência estão a reflexão, a refração e a absorção das ondas por objetos físicos.

Conforme a expressão (1) se consegue encontrar a potência do sinal do receptor. Considerando n como o índice de decaimento de potência dependente do tipo de ambiente, que tipicamente varia entre 2 e 5 e considerando também que para o estudo neste projeto a frequência não é alterada, para obter a diferença entre a potência recebida e a potência transmitida pode-se derivar a expressão (8), relacionando o valor da potência com a distância (HERNANDEZ, 2009).

$$\log\left(\frac{P_R}{P_T}\right) = 20 \cdot \log_{10}\left(\frac{\lambda_0}{4\pi}\right) - 10 \cdot n \cdot \log_{10}(d) \quad (8)$$

Simplificando a expressão (8) e considerando que o primeiro termo após a igualdade é constante, obtém-se a expressão (9):

$$\text{RSSI} = -10 \cdot n \cdot \log_{10}(d) + A_0 \quad [\text{dBm}] \quad (9)$$

RSSI: diferença entre a potência enviada e a recebida, em dBm;

n : índice de decaimento de potência dependente do tipo de ambiente, sendo então a potência relacionada com o inverso quadrático da distância;

A_0 : potência recebida no receptor a 1 metro de distância;

d : distância entre receptor e transmissor, em metros.

A constante n varia de acordo com o ambiente, devido a diferentes efeitos que podem surgir na propagação da onda, como por exemplo, efeitos de *multipath* (ondas percorrendo diferentes caminhos, devido a reflexões, difrações e refrações no ambiente até chegar ao receptor).

2.6 MODELOS DE LOCALIZAÇÃO

Tendo os dados referentes a distâncias entre os nós de referência e o nó móvel, é preciso utilizar-se de modelos para com esses dados inferir a localização espacial do objeto alvo. A seguir serão descritas algumas das técnicas utilizadas.

2.6.1 Trilateração

Conforme (AKYILDIZ, 2002) a trilateração é um método geométrico utilizado para localizar um objeto conhecendo-se a localização de três outros objetos ou nós fixos (b_1 , b_2 e b_3) e a distância entre esses objetos e o objeto alvo (O_{alvo}) da localização ou nó móvel (O). Para entender melhor como funciona a trilateração, considere a Figura 7.

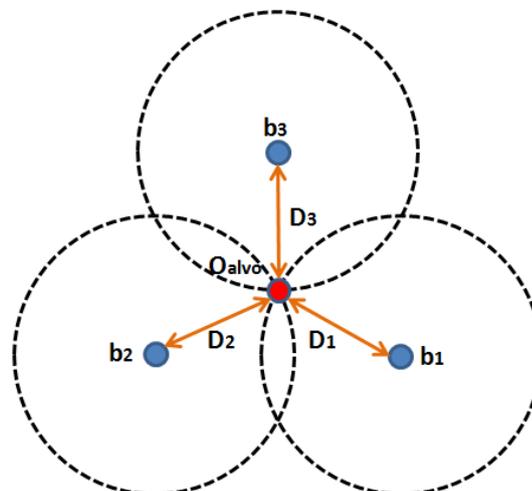


Figura 7 Trilateração com três nós de referência.

Se as distâncias D_1 , D_2 e D_3 e as posições dos nós fixos, b_1 , b_2 e b_3 são conhecidas, então, é possível calcular a posição de O_{alvo} . Seja (x_i, y_i) o par ordenado que contém as coordenadas do NF b_i , $1 \leq i \leq 3$, e, (x_0, y_0) , o par ordenado que contém as coordenadas do objeto alvo O_{alvo} . Nesse caso, deve-se ter:

$$\begin{cases} (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 = r_1^2 \\ (x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 = r_2^2 \\ (x_3 - x_0)^2 + (y_3 - y_0)^2 = r_3^2 \end{cases} \quad (10)$$

O ponto (x_0, y_0) deve satisfazer todas as equações dos círculos mostradas no sistema (10). Assim, resolvendo o sistema, obtêm-se os valores de (x_0, y_0) .

O caso mostrado na Figura 7 não representa de forma fidedigna o que ocorre na prática. Como as medidas de distâncias têm uma incerteza associada a elas, geralmente as circunferências não se interceptam como mostrado na mencionada figura. Devido a aquelas incertezas presentes, é mais provável que ocorram casos como o mostrado na Figura 8.

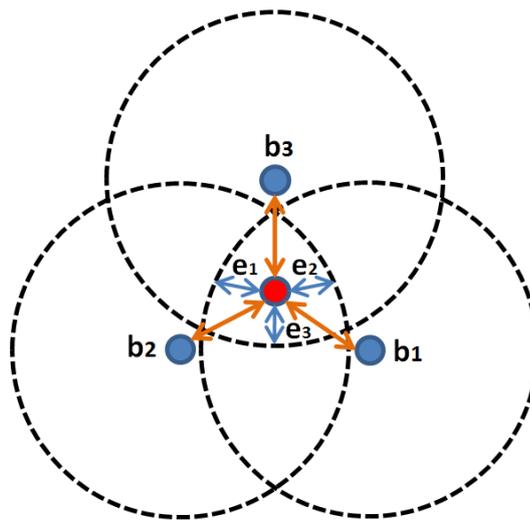


Figura 8 Diferença entre as distâncias reais e os raios das circunferências.

Na Figura 8, o objeto alvo (ponto vermelho) não pode ser localizado utilizando-se o método mencionado, uma vez que não há ponto de intersecção. Nesta situação, o que se faz é procurar minimizar a soma dos erros e_i (e_i é a diferença entre o raio r_i e a distância entre a posição do NF e o objeto alvo O_{alvo} com coordenadas (x_0, y_0)). Formula-se então uma nova equação para o problema representado pela expressão (11) como segue. Em uma rede bidimensional, são requeridas as estimativas de distância de no mínimo três nós de referências não colineares, conforme pode ser geometricamente ilustrado na Figura 8.

$$\begin{cases} (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 - r_1^2 = e_1 \\ (x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 - r_2^2 = e_2 \\ (x_3 - x_0)^2 + (y_3 - y_0)^2 - r_3^2 = e_3 \end{cases} \quad (11)$$

Desta forma, a situação passa a ser um problema de otimização, cujo objetivo é encontrar (x_0, y_0) que minimiza a soma dos erros, e_i , $1 \leq i \leq n$ (em que n corresponde ao número de circunferências) como mostrado na expressão (11).

2.6.2 Método de Localização por Análise de Padrão de Sinal

A determinação da localização por análise de padrão de sinal consiste em observar um conjunto bem especificado de características de um determinado sinal transmitido, para que através de comparações dessas informações com uma base de dados previamente gerada seja possível deduzir a localização do transmissor ou a posição na qual o receptor se encontra. A principal desvantagem desse método é o levantamento inicial da base de dados das características do sinal na região onde o sistema de localização será instalado exigindo infraestrutura e configuração elevadas para sua implantação. A geração dessa base de dados consiste em dividir a região em um *grid* de pontos onde serão coletadas as informações, criando-se dessa forma uma assinatura única do comportamento do sinal para cada ponto. É importante observar que sempre que existam mudanças no ambiente, por exemplo, na topologia dos pontos de referência ou da cobertura da rede poderá levar a necessidade de gerar uma nova base de dados para o sistema.

2.6.3 Método de Localização por Proximidade

Esse método executa a localização através da proximidade dos elementos de posição desconhecida com os nós de referência, determinando uma região específica da área de operação do sistema em que o elemento se encontra. Geralmente necessita da instalação de uma infraestrutura com grande número de nós de referência que são geralmente interligados por fio a um sistema central, o que implica uma elevada configuração inicial e manutenção do sistema. Os sistemas que implementam esse método, em geral, utilizam sinais infravermelho na determinação de proximidade, já que devido ao seu curto alcance é facilmente limitado pelos obstáculos do ambiente, como por exemplo, paredes.

2.6.4 Método de Localização por Conectividade

Nesse método, a rede é modelada através de um sistema de equações referentes às localizações dos nós e a informação da conectividade dos elementos da rede é utilizada para impor um conjunto de restrições ao sistema de tal forma que seja possível obter uma solução, nem sempre única, de posição dos nós que satisfaça às equações. O desempenho desse método é fortemente influenciado pela densidade de nós na rede, sejam nós de referência, sejam nós de posição desconhecida.

2.7 PROBABILIDADES CONDICIONAIS DE BAYES

A seguir são apresentados os fundamentos matemáticos necessários para o adequado entendimento da regra fundamental da probabilidade e o teorema de Bayes.

2.7.1 Probabilidade Incondicional

Conforme (RUSSELL E NORVIG, 2004), a probabilidade incondicional ou probabilidade *a priori* é o grau de crença acordado para a proposição (variável) na ausência de quaisquer outras informações.

A representação de uma probabilidade incondicional associada a uma variável A é demonstrada na expressão (12), onde x_n representa a probabilidade associada ao evento n (JENSEN, 2001).

$$P(A) = (x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (12)$$

A probabilidade para cada evento x_n da variável A é um número no intervalo $[0,1]$, onde a distribuição das probabilidades para os estados satisfazem à expressão (13). Portanto, a somatória das probabilidades da variável A deve ser igual a 1 (JENSEN, 2001).

$$\sum_1^n P(A_{x_n}) = 1 \quad (13)$$

2.7.2 Probabilidade Condicional

A probabilidade condicional é a relação entre duas probabilidades *a priori*. Sempre que a declaração da probabilidade da variável A é condicionada por outros fatores conhecidos, é dito que essa possibilidade é condicional. A notação utilizada para relação condicional é

demonstrada na expressão (14), dado o evento b_n da variável B , a probabilidade do evento a_n da variável A (RUSSELL E NORVIG, 2004).

$$P(A|B) = \frac{P(A \wedge B)}{P(B)} \quad (14)$$

Dado $P(B) > 0$

2.7.3 Probabilidade Conjunta e Regra Fundamental da Probabilidade

Probabilidade conjunta é a probabilidade dado que $P(A = a_n)$ e $P(B = b_n)$ sejam verdadeiras simultaneamente (RUSSELL E NORVIG, 2004).

A probabilidade conjunta das variáveis A e B é obtida através da regra fundamental do cálculo da probabilidade, apresentada na expressão (15) (RUSSELL E NORVIG, 2004). Na expressão (16) é demonstrada a probabilidade conjunta no sentido contrário.

$$P(A \wedge B) = P(A|B) \cdot P(B) \quad (15)$$

$$P(A \wedge B) = P(B|A) \cdot P(A) \quad (16)$$

Diferentemente da probabilidade incondicional e condicional, a distribuição das probabilidades condicionais é dada pela expressão (17), onde n é o número de estados da variável A e m é o número de estados da variável B . Na tabela de probabilidade conjunta, a soma de todas as probabilidades devem ser iguais a 1 (JENSEN, 2001).

$$\sum_{1}^n \sum_{1}^m x_{nm} = 1 \quad (17)$$

Pode-se observar que as $P(A \wedge B)$ são idênticas às $P(B \wedge A)$; a única diferença é a forma da representação da tabela com as probabilidades conjuntas. Já nas probabilidades condicionais as $P(A|B)$ diferem das $P(B|A)$ (JENSEN, 2001).

2.7.4 Regra de Bayes

Na teoria da probabilidade a Regra de Bayes, mostra a relação entre uma probabilidade condicional e a sua inversa; por exemplo, a probabilidade de uma hipótese dada a observação de uma evidência e a probabilidade da evidência dada a hipótese. Esse teorema representa uma das primeiras tentativas de modelar de forma matemática a inferência estatística, feita por Thomas Bayes.

A Regra de Bayes é a expressão básica utilizada para propagar evidências nas Redes Bayesianas (JENSEN, 2001).

Nas Equações (18) e (19) deduz-se matematicamente a Regra de Bayes. Na expressão (18) é igualada a regra fundamental da probabilidade (expressão (15)) e a regra fundamental da probabilidade inversa (expressão (16)), ambas resultam na $P(A \wedge B)$ (RUSSELL E NORVIG, 2004).

$$P(A|B).P(B) = P(B|A).P(A) \quad (18)$$

A partir da expressão (18) é obtida então a Regra de Bayes, demonstrada na expressão (19) (JENSEN, 2001).

$$P(B|A) = \frac{P(A|B).P(B)}{P(A)} \quad (19)$$

Na expressão (20) é apresentado que a Regra de Bayes pode ser condicionada a mais variáveis (JENSEN, 2001).

$$P(B|A \wedge C) = \frac{P(A|B \wedge C).P(B|C)}{P(A|C)} \quad (20)$$

3. REVISÃO DA LITERATURA

Esta seção tem como objetivo dar um panorama geral sobre sistemas de localização em RSSF que se baseiam na informação da RSSI. O método usado para a realização das estimativas de localização é o que define cada sistema específico. Podem-se separar os métodos existentes em dois grupos: métodos determinísticos e métodos probabilísticos.

O artigo de (BAHL & PADMANABHAN, 2000), apresentou o primeiro sistema de localização *Wi-Fi* em ambientes internos chamado RADAR. O RADAR foi desenvolvido para redes sem fio baseado no padrão IEEE 802.11. O objetivo do sistema é realizar localização de dispositivos em prédios. O sistema usa o método de mapa de assinaturas e usa também a abordagem baseada em modelos de propagação de sinal. Segundo os autores, quando modelos de propagação de sinal são utilizados, o resultado obtido é mais pobre do que quando se utiliza mapa de assinaturas. O segundo método consegue alcançar uma estimativa da posição da ordem de 2 - 3 metros enquanto ao método de modelagem de propagação de sinal atinge uma estimativa de cerca de 4,3 metros. A presença deste tipo de infraestrutura no ambiente reduz o custo de implantação da solução de localização, uma vez que não é necessário estruturar o ambiente, como ocorre nas soluções baseadas em infravermelho e ultrassom.

O artigo de (ZHU et al., 2009) apresenta a implementação e validação da localização utilizando leituras da RSSI, modelos de rádio propagação e uma trilateração é realizada, estimando a posição do objeto alvo sobre redes WH. Os resultados obtidos após vários experimentos mostram erros médios menores que 4 metros, o que é considerado adequado para ambientes industriais.

(HAN et al., 2011) descreve um sistema colaborativo que melhora sistemas *Wi-Fi* existentes de baixa potência através de interfaces WH para lograr uma redução significativa de energia e prolongar o tempo de vida útil de dispositivos móveis. É proposta uma técnica para avaliar a redução de erro de propagação no sistema *HartFi*.

O artigo de (ZHU et al., 2012) apresenta a funcionalidade de *roaming* em WH. Adota diversas técnicas para melhorar a precisão da localização com 75 % dos erros abaixo de 5 metros de distância. Utiliza uma estrutura de colaboração que fornece um custo efetivo no sistema de localização com erro menor e custo baixo.

Em (MOTTER et al., 2011) é apresentado o desenvolvimento de uma aplicação para localização de nós sensores em RSSF. Utiliza o método de medição de distância através da RSSI. Foi desenvolvida a funcionalidade de calibração dos rádios, para obter parâmetros mais adequados com o local de operação do sistema.

Outros trabalhos exploram características estocásticas do RSSI observadas por um dispositivo em uma RSSF e sugere que métodos probabilísticos devem constituir o tipo de ferramenta indicado para realizar a estimativa da localização. Em (CASTRO et al., 2001) os autores desenvolveram o primeiro trabalho a sugerir uma proposta probabilística. Propõem uma rede bayesiana cuja implementação corresponde a um filtro bayesiano simples. Sugere-se ainda a criação de um novo nó na rede que representaria a localização do dispositivo em um instante anterior, o que modelaria a dependência entre estimativas consecutivas de localização. Em (ELNAHRAWY et al., 2004) são apresentados dois métodos: um determinístico e um probabilístico baseado em filtro bayesiano simples. A novidade deste trabalho foi fornecer os resultados obtidos em termos de área e não em termos de um ponto específico do ambiente. O artigo de (PENG and SICHITIU, 2007) Apresenta uma abordagem de localização probabilística baseada em RSSI distribuída para RSSF ao ar livre com medições de distância imprecisas. (FENG et al., 2006) desenvolve um modelo estatístico especialmente para erros de medição e tenta minimizar o erro pelo algoritmo baseado em gradiente. A abordagem é avaliada utilizando os dados coletados da rede de sensores e comparado o desempenho com vários outros métodos de detecção de localização. (CHANG and LIAO, 2009) apresentam a modelagem do problema de localização como um problema de estimativa estatística, e utiliza o método de estimativa de máxima verossimilhança para estimar a localização. Em (KADKHODA et al., 2010) é proposta a utilização de um sistema probabilístico de lógica difusa para ambientes ruidosos. O artigo de (BEKKALI and MATSUMOTO, 2008) apresenta o método de filtragem Bayesiano. A estimativa de localização é considerada como um problema de aprendizagem de máquina em que a tarefa é fazer a modelagem da distribuição do erro estimado na localização dentro de uma área específica com base em uma amostra de medições recolhidas em vários lugares dessa mesma área.

4. ANÁLISE DE DESEMPENHO DO MODELO DE LOCALIZAÇÃO

Todos os modelos baseiam-se, direta ou indiretamente, em distâncias obtidas através da observação da potência do sinal recebido. O desempenho do modelo de localização será avaliado levando em consideração (i) os efeitos do desvanecimento de larga escala do sinal e (ii) como a topologia influencia os resultados de localização.

4.1 MÉTRICAS DE DESEMPENHO DO MODELO DE LOCALIZAÇÃO

Todos os modelos baseiam-se, direta ou indiretamente, em distâncias obtidas através da observação da potência do sinal recebido. O desempenho do modelo de localização será avaliado levando em consideração os efeitos do desvanecimento de larga escala do sinal.

A medida elementar de desempenho de um modelo de localização é o erro de localização e_i , definido como a distância entre a posição verdadeira (x_i, y_i) e a posição estimada (\hat{x}_i, \hat{y}_i) , como é expressa na expressão (21).

$$e_i = \sqrt{(x_i - \hat{x}_i)^2 + (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (21)$$

A medida e_i informa a precisão da localização de um determinado nó para uma dada realização do processo de desvanecimento, o que equivale a uma realização na simulação. A partir desta medida, outras medidas de desempenho podem ser derivadas, como segue, e que serão utilizadas na análise apresentada neste capítulo.

4.1.1 Raiz do Erro Quadrático Médio

O desempenho médio do modelo de localização em toda a rede é tipicamente medido na literatura (COSTA, 2005; CHEN, 1999) por meio da raiz quadrática média, denotada por σ_e , mostrado na expressão (22).

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2} \quad (22)$$

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(x_i - \hat{x}_i)^2 + (y_i - \hat{y}_i)^2]} \quad (23)$$

4.1.2 Função de Distribuição Acumulada do Erro Quadrático Médio

A partir da coleção de valores de σ_e e com ajuda da função ECDF (*Empirical Cumulative Distribution Function*) do MATLAB, pode-se determinar a função de distribuição acumulada CDF (*Cumulative Distribution Function*), correspondente ao modelo de canal de propagação e a topologia de rede.

4.2 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA MODELAGEM DO CANAL DE PROPAGAÇÃO

O modelo de localização da trilateração é baseado na distância entre os nós, que são estimados a partir da potência do sinal recebido. Os erros de estimativa das posições têm como origem, portanto, os erros na estimativa das distâncias entre os nós.

Estes erros de estimativa de distância são causados por efeitos do canal de propagação no sinal recebido. Portanto, uma modelagem do canal de propagação adequada é necessária. O modelo de canal empregado inclui simulações em condições perfeitas, ou seja, sem ruído branco gaussiano.

4.2.1 Modelagem do canal de propagação sem ruído

Estas simulações foram inicialmente elaboradas para testar o desempenho do modelo de localização desenvolvido, em condições perfeitas de dados recebidos (ou seja, sem a influência dos efeitos do canal de propagação). Portanto, gerou-se uma simulação com 18 posições da trajetória do objeto alvo em um ambiente com dimensões de 10 x 10 metros como é mostrado na Figura 9. Os círculos correspondem às diversas posições do objeto alvo e os asteriscos representam as coordenadas obtidas através do algoritmo de trilateração. Foi possível verificar que o algoritmo atinge a mesma trajetória simulada. A expressão matemática que representa este modelo é a seguinte:

$$P_{L(dB)} = P_{L(d_0)} - 10 \cdot n \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (24)$$

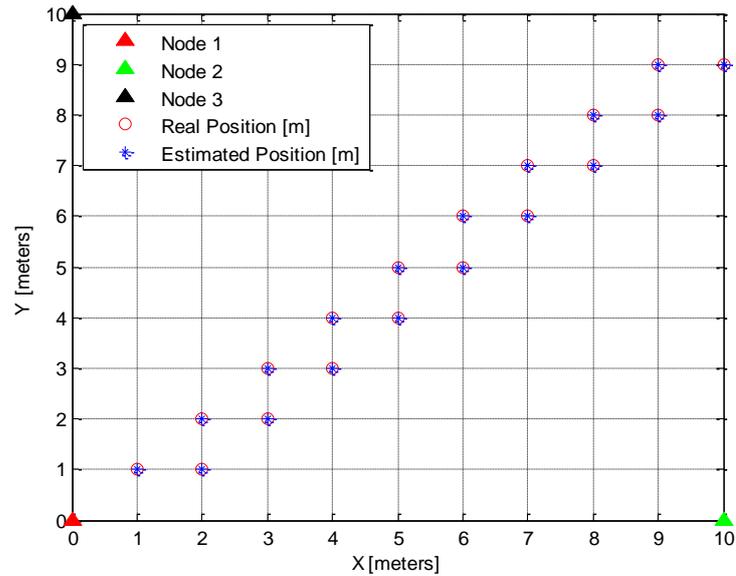


Figura 9 Simulação da trajetória zigzag do objeto alvo sem ruído.

4.2.2 Modelagem do canal de propagação com ruído

O desvanecimento de larga escala é tipicamente modelado como uma variável aleatória gaussiana x_σ com média zero e variância σ^2 , adicionada à potência do sinal recebido (KARL; WILLIG, 2005; RAPPAPORT, 2002). O valor da variância σ^2 depende do ambiente de propagação.

Este modelo matemático para determinar a potência recebida contempla as irregularidades do ambiente de propagação. A expressão matemática que representa este modelo é a seguinte:

$$P_{L(dB)} = P_{L(d_0)} - 10 \cdot n \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + x_\sigma \quad (25)$$

Onde $P_{L(dB)}$ representa as perdas no canal e $P_{L(d_0)}$ representa as perdas a uma distância de 1 metro. As perdas de propagação são determinadas em função da distância d , que representa a distância entre emissor e receptor. Um valor fixo presente na expressão do modelo é d_0 . Esta variável representa a distância de referência, que nas simulações realizadas fixou-se em 1 metro.

Para avaliar o comportamento do ruído em condições mais próximas de situações reais em ambientes internos, foi realizado um teste de comunicação sem fio no laboratório de comunicações (LACOM) da UFRGS. O objetivo desse teste foi medir uma situação característica da relação sinal/ruído em um ambiente com roteador wireless. Com o valor obtido determinou-se como o ruído afeta a transmissão de um sinal e obteve-se a informação necessária para modelar o canal de propagação através da adição de ruído branco gaussiano

nas simulações. Na Figura 10 pode-se observar o sinais captados pela antena conectada ao analisador de espectro Rohde & Schwartz FSH4 na faixa de frequência de 2,3 GHz até 2,6 GHz. Nele se vê o sinal transmitido pela fonte de 10 dBm situada a 5 metros de distância e recebido pelo analisador com uma potência de -32 dBm. Também se pode ver que o ruído ambiente apresenta uma potência aproximada de -72 dBm. Dessa forma, a relação sinal/ruído (S/N) equivale a 40 dB (-32 dBm - -72 dBm).

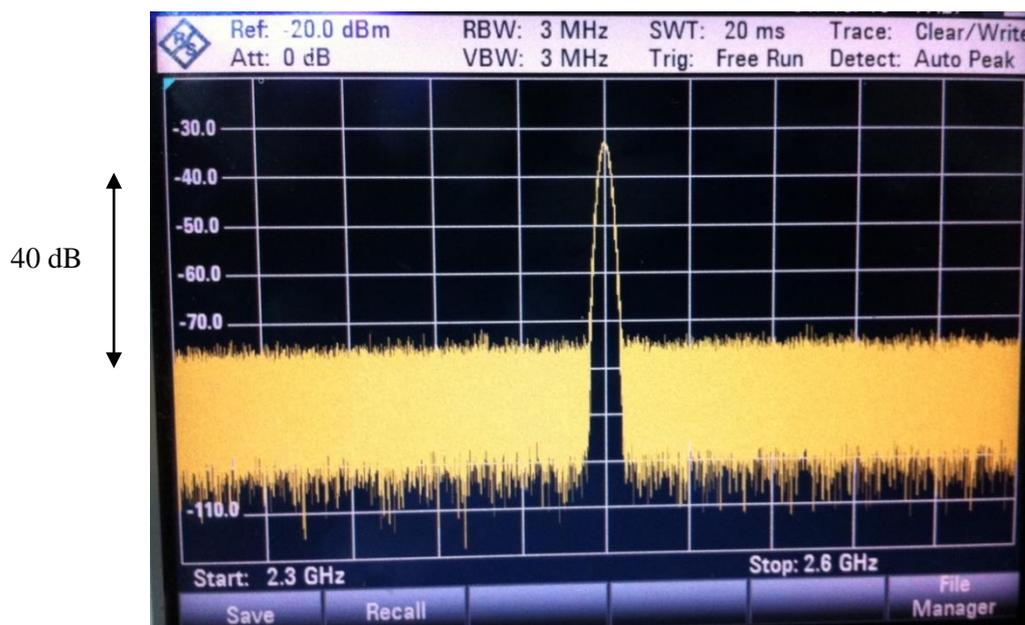


Figura 10 Medição do ruído presente no canal de propagação.

Levando em consideração o modelo de desvanecimento de larga escala do sinal, novamente foi gerada a simulação da trajetória do objeto alvo em um ambiente com dimensões de 10 x 10 metros, porém dessa vez inserindo o ruído branco gaussiano de média zero e com potência de 40 dB abaixo do sinal. Foi realizada uma estimativa experimental do ruído para utilizar nas simulações em uma situação próxima da real. O resultado é mostrado na Figura 11, onde os círculos correspondem à trajetória original e os asteriscos representam a trajetória com ruído inserido (com desvanecimento de larga escala, o valor da potência sofre desvios em torno de seu valor médio, o que leva a erros na estimativa da posição do dispositivo móvel). Portanto, gerou-se uma trajetória com 100 posições do objeto alvo e inserindo para cada posição 10 vezes um ruído aleatório equivalente a 0,0001 mW. Posteriormente foram realizadas as estimativas de localização na mesma quantidade de ruído (10 vezes) para cada uma das posições desconhecidas.

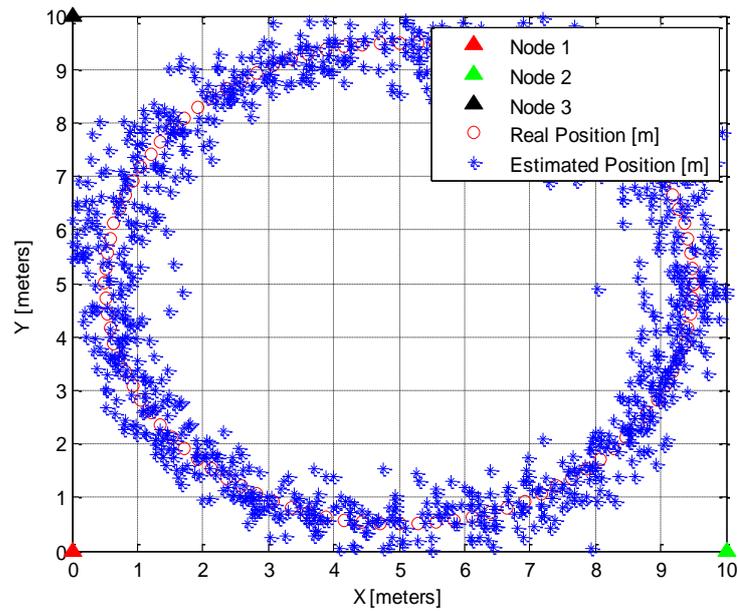


Figura 11 Simulação da trajetória circular do objeto alvo sem ruído.

É possível perceber que o ruído não inviabiliza a detecção do objeto alvo. Esta simulação foi testada várias vezes, a média de erro da distância com ruído à distância real é 0,513 metros, tendo valores máximos de erro chegando até 1,7107 metros, como mostrado na Figura 12. Os losangos representam os valores de erro para cada valor de amostra, enquanto a linha pontilhada exibe o valor médio de erro.

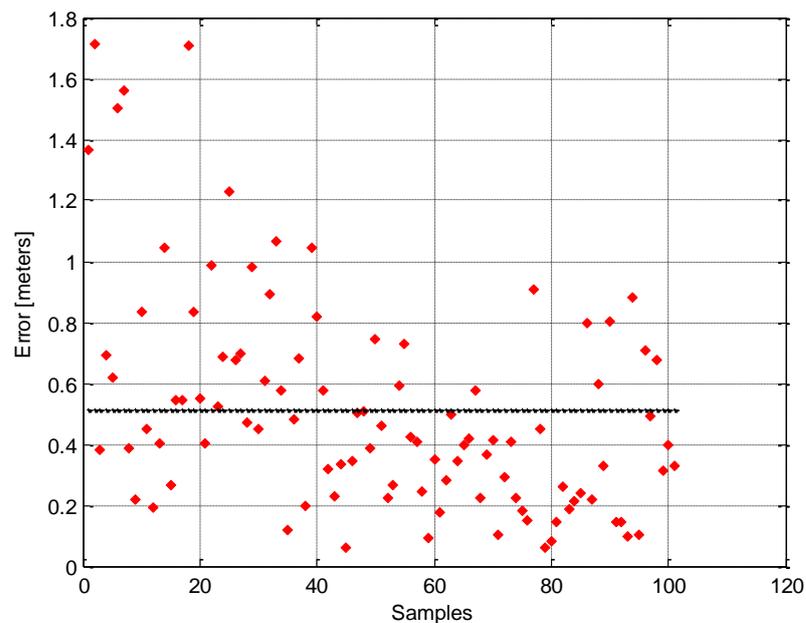


Figura 12 Erro na posição devido ao ruído branco, com três nós de referência.

4.3 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TOPOLOGIA

Para avaliar a influência da topologia foram realizadas simulações variando a quantidade e a configuração de nós de referência presentes no cenário.

4.3.1 Variando o Número dos Nós de Referência

Na Figura 13 apresenta como o erro de localização piora quando o número de nós de referência utilizados diminui. Quando isso ocorre, o objeto alvo obtém estimativas de distâncias de nós de referência que estão distantes dele. O aumento da distância reduz a qualidade da estimativa e, conseqüentemente, da localização obtida.

Conforme (MOTTER, 2011) para reduzir o erro na localização existe a alternativa de adicionar mais nós de referência para buscar assim redundância de dados e serem eliminados valores espúrios de erros na leitura de potência recebida. A Tabela 4 exibe os valores de erro médio, máximo e mínimos em relação à posição real dos cenários apresentados na Figura 13.

Tabela 4 Erros do algoritmo de localização variando a quantidade de nós de referência.

Tipo de Cálculo	Média de Erro [m]	Erro Máximo [m]	Erro Mínimo [m]
Quatro nós referência	0,288	0,793	0,031
Três nós referência	0,443	0,9131	0,1051

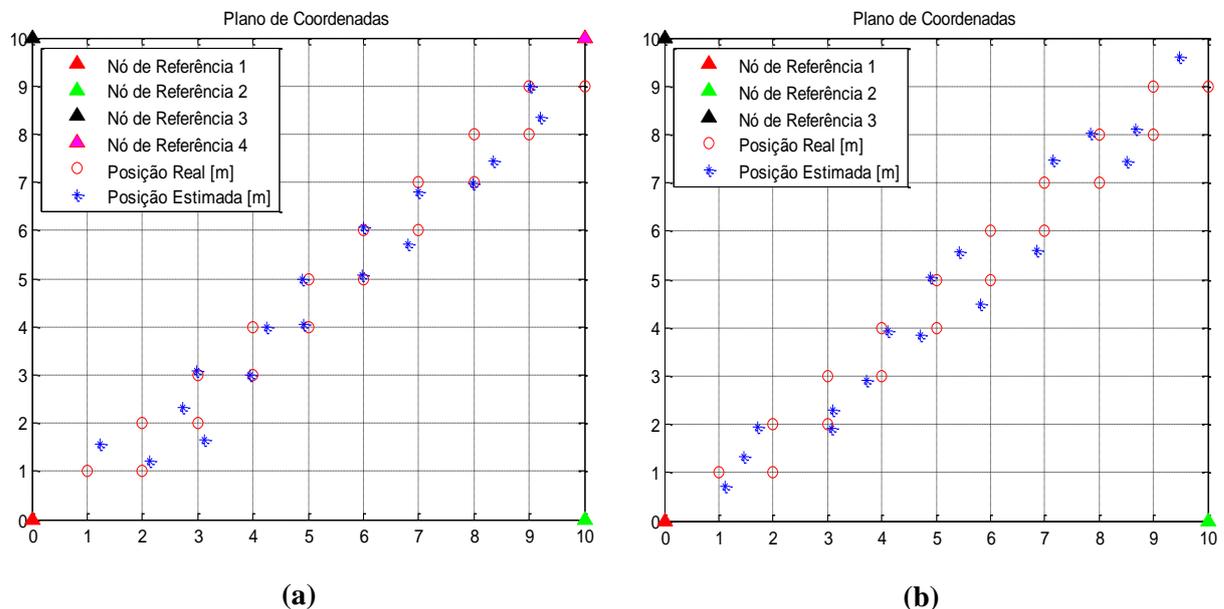


Figura 13 Resultado da localização associado ao número de nós de referência utilizados: (a) utilizando 4 nós de referência, (b) utilizando 3 nós de referência.

A Figura 14 mostra um gráfico com os valores de erro para cada amostra obtida e também a média dos erros.

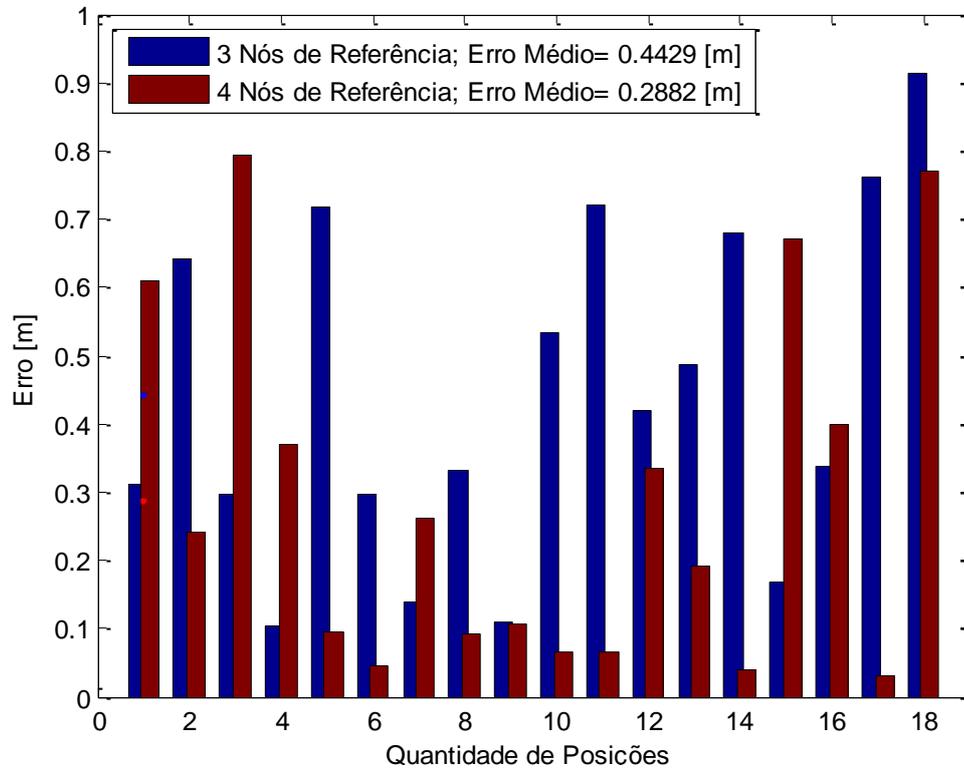


Figura 14 Erro da localização do objeto alvo em 18 posições diferentes associado ao número de nós de referência utilizados.

Inicialmente, observa-se o erro de localização cai com o aumento do número de nós de referência, pois haverá uma maior quantidade de informação para estimar a localização. No entanto, na Tabela 5 mostra também que após de certo número de nós de referência, não se tem grandes ganhos na diminuição do erro de localização caso mais nós de referência sejam adicionados.

Tabela 5 Erros do algoritmo de localização adicionando mais de 4 nós de referência.

Tipo de Cálculo	Média de Erro [m]	Erro Máximo [m]	Erro Mínimo [m]
Cinco nós referência	0,4014	1,1448	0,08
Seis nós referência	0,3947	1,0315	0,087
Sete nós referência	0,3177	0,9319	0,0179

4.3.2 Variando a configuração dos Nós de Referência

A Figura 15 mostra como a qualidade da localização pode variar dependendo da configuração geométrica dos nós de referência.

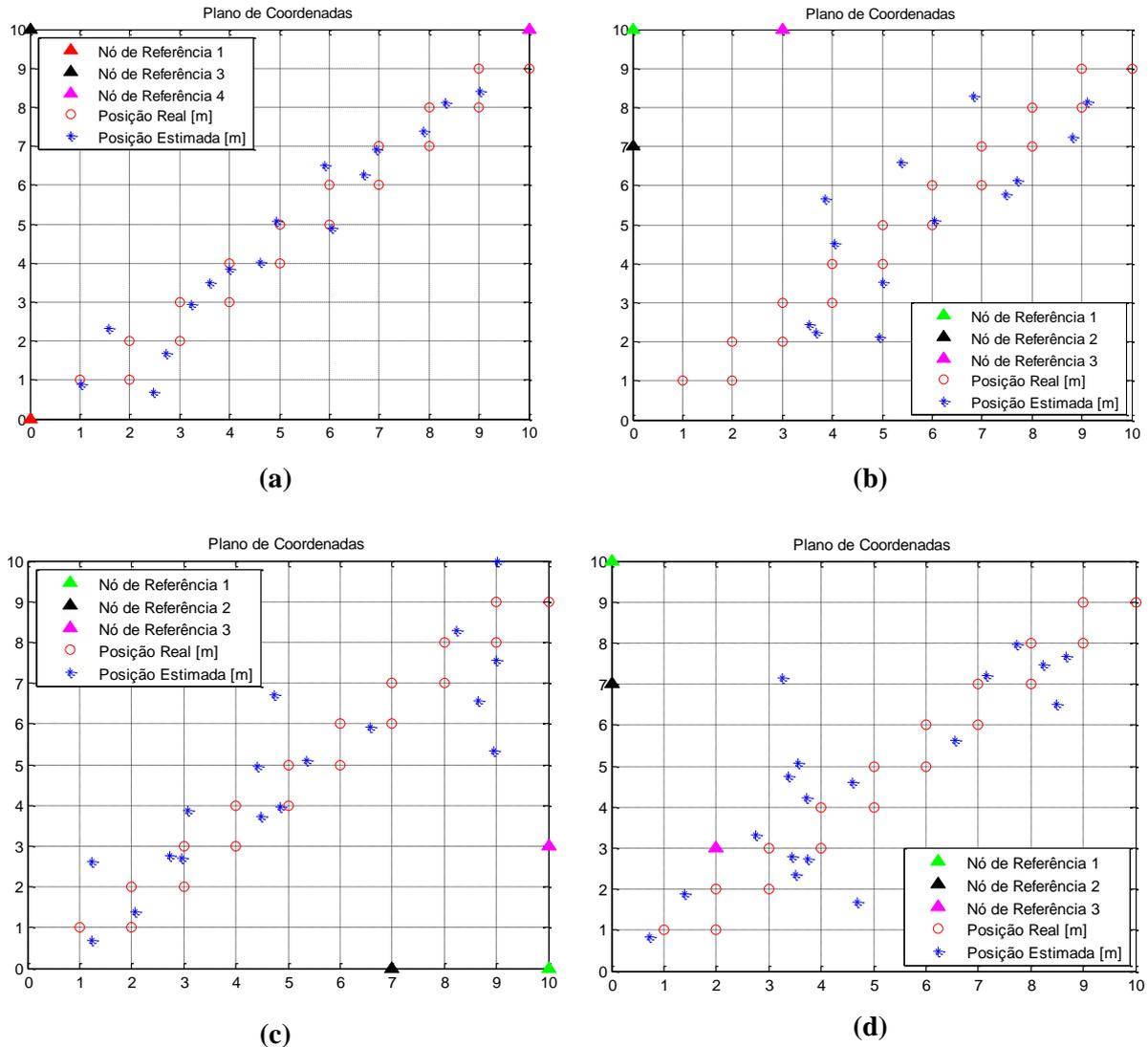


Figura 15 Resultado da localização utilizando diferentes topologias para os nós de referência. Esta figura mostra como a topologia tem grande influência na qualidade da localização: (a) nós de referência distribuídos nos cantos do cenário, (b) nós de referência posicionados na parte superior esquerda do cenário, (c) nós de referência posicionados na parte inferior direita do cenário, (d) nós de referência posicionados aleatoriamente.

O melhor resultado é obtido no caso (a), quando os nós de referência são distribuídos de forma a gerar uma melhor cobertura do caminho percorrido. Essa distribuição é a que produz as melhores estimativas de localização com erro médio de 0,4218 metros. O caso (d) é o pior resultado. O erro de localização na maior parte do caminho é muito grande devido a concentração dos nós de referência que estão fora da cobertura do caminho. Em todos os

casos foram utilizados os mesmos parâmetros de simulação. A qualidade da estimativa é função da distância. A Tabela 6 exibe os valores de erro médio, máximo e mínimos em relação à posição real dos cenários apresentados na Figura 15. A Figura 16 mostra um gráfico com os valores de erro para cada amostra obtida e também a média dos erros.

Tabela 6 Erros do algoritmo de localização variando a configuração dos nós de referência.

Configuração Geométrica	Média de Erro [m]	Erro Máximo [m]	Erro Mínimo [m]
Caso (a)	0,4218	1,4125	0,0886
Caso (b)	1,2103	2,8456	0,1077
Caso (c)	0,8916	2,6903	0,1522
Caso (d)	1,9487	6,9913	0,2683

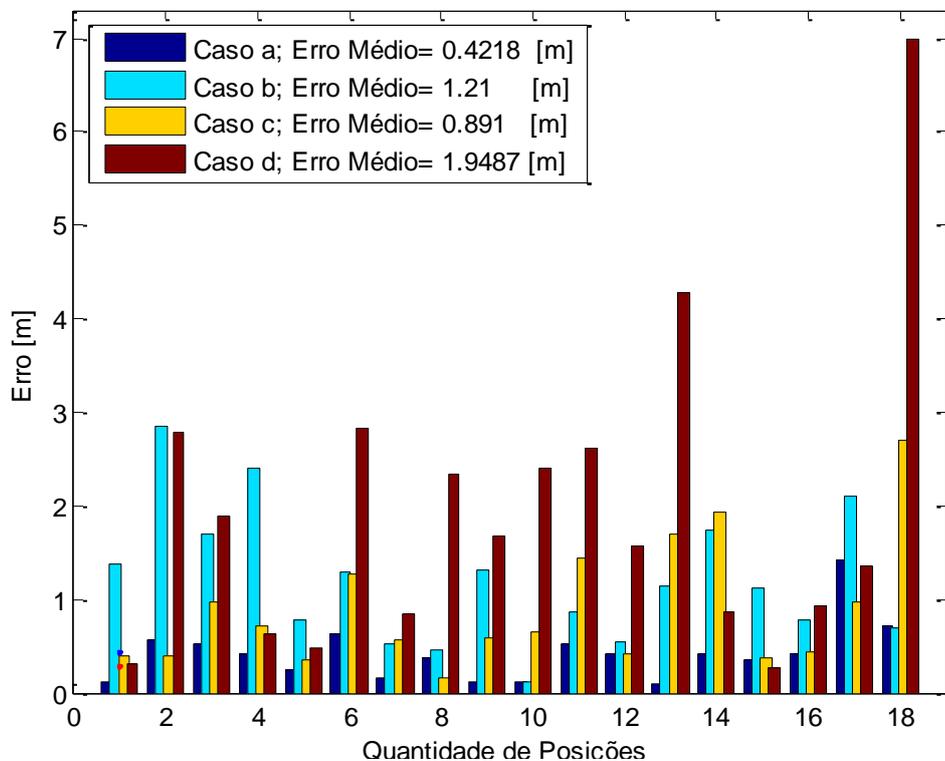


Figura 16 Erro da localização do objeto alvo em 18 posições diferentes associado à configuração geométrica dos nós de referência.

5. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL

Esta seção descreve alguns procedimentos, para o levantamento do plano de coordenadas do ambiente de teste, coleta de dados, características do algoritmo de localização e aparato experimental utilizado nos experimentos. Em seguida são descritos alguns detalhes da metodologia utilizada na realização dos experimentos. Conforme (RIBEIRO e CATEN, 2000) o uso de projeto de experimentos permite que se estruture a sequência de ensaios de forma a traduzir os objetivos preestabelecidos pelo pesquisador. Existem fatores que podem influenciar o desempenho do sistema, no entanto não, se consegue controlá-los. Alguns desses fatores são, por exemplo, a temperatura, umidade do dia, desgaste das ferramentas, e a habilidade e cansaço do operador.

A fim de realizar-se um experimento bem planejado é necessário identificar as restrições experimentais (número máximo de ensaios, equipamento e pessoal disponíveis, tempo disponível, etc.), identificar as variáveis de resposta de interesse.

5.1 O AMBIENTE DE TESTES

Os testes foram realizados em uma área selecionada com dimensões de 100 x 100 metros, na região da Lomba do Pinheiro, Porto Alegre. Na realização dos testes buscou-se um local isolado de fontes de interferência não controladas (roteadores e demais sinais da banda de frequência de 2,4GHz) e mais longe possível de obstáculos físicos que pudessem alterar os resultados, o que pode significar um melhor desempenho do algoritmo de localização. A Figura 17 ilustra o local com os seis nós de referência distribuídos no ambiente. Os círculos vermelhos correspondem aos nós de referência posicionados aleatoriamente pelo terreno. A Tabela 7 apresenta as coordenadas dos nós de referência para os dois experimentos realizados. O levantamento das coordenadas geográficas foi determinado a partir das medições de distâncias entre os nós de referência.

5.1.1 Planejamento do Levantamento

- a) Percorrer a área a levantar;
- b) Definir o tipo, o grau de precisão e os métodos conforme possibilidades e finalidade (em função do grau de precisão o levantamento foi rápido, pouco preciso; só utilizando trena; medição só de distâncias, também foi levado em consideração que os nós devem estar a alturas mínimas do chão, a fim de evitar interferências na primeira zona de Fresnel);

- c) Identificar os pontos e alinhamentos que permitam determinar os limites do terreno;
- d) Desenhar o croqui do terreno com os principais pontos geográficos a levantar e seu entorno.

5.1.2 Medições de campo

- a) Equipamento e acessórios mínimos necessários: trena, papel milimetrado, estaca e marreta;
- b) Medições necessárias: distâncias entre todos os nós de referência para descrever as dimensões, forma e posição relativa do terreno em relação ao entorno;

5.1.3 Desenho croqui do terreno

Desenhar o croqui consiste em traçar no papel milimetrado uma figura semelhante à representação gráfica da área levantada. Adotam-se convenções que permitem representar as dimensões reais em escalas menores. É definida a origem do sistema de coordenadas para caracterizar as coordenadas num sistema de referência XY e evitar coordenadas negativas.

Tabela 7 Coordenadas dos nós de referência utilizados nos experimentos.

Apelido nó referência	Experimento 1 e 2	
	X [m]	Y [m]
Nick 1-1016	70	0
Nick 2-1007	39,5	31
Nick 3-1003	46	52
Nick 4-1022	3,5	55,5
Nick 5-1015	77	87
Nick 6-1026	14	96



Figura 17 Área do local onde foram distribuídos os nós de referência para realizar os experimentos.

5.2 APARATO EXPERIMENTAL

Para realizar os experimentos foram utilizados os seguintes dispositivos: um Gateway da Emerson (modelo 1420A) além dos seis rádios protótipo compatíveis com o protocolo WirelessHART (MULLER et al., 2011) e um computador para o armazenamento dos pacotes coletados. A Figura 18 apresenta o equipamento da Emerson e a Figura 19 apresenta os protótipos. Abaixo as principais características dos equipamentos utilizados.

5.2.1 Gateway

Conforme (a folha de dados do produto *Smart Wireless Gateway*) o gateway gerencia automaticamente comunicações sem fio em ambientes que mudam constantemente.

- Fabricante: Rosemount – Emerson Process Management;
- Modelo: 1420A;
- Tensão de entrada: 24 VDC
- Corrente necessária: 500mA
- Antena: Omnidirecional integrada (PBT/PC);
- Rádio frequência 2,4-2,5 GHz (DSSS)

- RS-485: 2 *links* de comunicação para conexão Modbus
- Taxa de transmissão: 57600, 38400, 19200 ou 9600;
- Ethernet: porta de comunicação 10baseT/ 100base-TX;
- Protocolo: Modbus RTU
- Suporte a Modbus TCP/IP e OPC com 32 bits
- 100 dispositivos WirelessHART: taxa máxima de transmissão 60 s
- 50 dispositivos WirelessHART: taxa máxima de transmissão 15 s
- Latência de rede: 100 dispositivos WirelessHART: 10 s
50 dispositivos WirelessHART: 5 s



Figura 18 Smart Wireless Gateway 1420A - Emerson.

5.2.2 Rádio protótipo

Modulo de comunicação para válvulas possui um firmware desenvolvido para o padrão WirelessHART ((MULLER et al., 2011).

- MCU 13224 da Freescale;
- Antena 20 dBm (100mW);
- Amplificador (LNA/PA CC2591);
- Conexão de programação e debug JTAG.

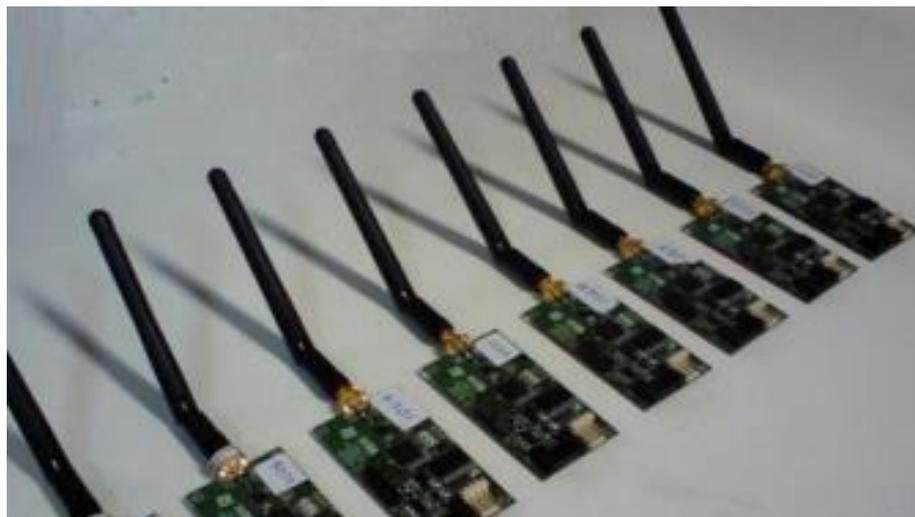


Figura 19 Protótipos compatíveis com o protocolo.

5.3 COLETA DE DADOS

A coleta de dados ocorreu em dois testes iguais feitos em dois dias diferentes. Para repetir o experimento no segundo dia utilizaram-se as mesmas posições do primeiro experimento marcado através de estacas no chão. A duração dos experimentos foi aproximadamente 5 horas no período de manhã entre às 08:00 hs e 13:00 hs. Cada um dos experimentos foi realizado uma vez. Foram utilizados códigos específicos desenvolvidos em (WINTER, 2010) para coletar RSSI dos dispositivos compatíveis com o protocolo WirelessHART. O software após estabelecer conexão com o gerenciador da rede passou a registrar os diversos dados associados aos comandos do protocolo WirelessHART. A resposta dos comandos 780 e 787 enviados pelos dispositivos da rede, informam respectivamente, o nível de sinal dos vizinhos descobertos não linkados e dos vizinhos com os quais possui *links* para comunicação.

A sequência de inicialização do experimento ocorreu com a ligação e configuração do software de coleta. Em seguida, foi realizada a ligação do gateway e finalizando com a ligação dos protótipos (foram ligados individualmente, entrando na rede um rádio por vez). A rede operou com seis nós de referência (dispositivos de apelidos 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8). Os rádios foram ajustados com uma potência de saída de 10 dBm. Conforme (HART COMMUNICATION FOUNDATION, 2007a), o experimento deve levar em consideração o tempo após de cada deslocamento do objeto alvo, devido a que o fator de amortecimento (*damping*) utilizado no relatório da RSSI realiza o cálculo da ponderação da potência instantânea com a média da potência recebida até o momento de realizar a medição. Um tempo de 10 minutos de intervalo entre os posicionamentos deve ser necessário para

estabelecer o valor médio do RSSI medido. Por isso, para cada aquisição de RSSI, entre 10 a 16 amostras de dados eram coletadas. As amostras foram coletadas no arquivo. Todos os resultados experimentais apresentados foram produzidos *off-line*.

A Tabela 8 apresenta a média das quatro ultimas amostras de RSSI medidas pelo objeto alvo para o experimento 1. As leituras foram coletadas para as diferentes posições de deslocamento do objeto alvo com apelido 1 *LongTag* 1006. Os rádios foram ajustados para uma saída de potência de 10 dBm. Pode-se observar, dada mobilidade pelo objeto alvo, o aumento da distância entre este e os nós de referência influenciaram na potência recebida.

Tabela 8 Leitura RSSI pelo objeto alvo para o experimento 1.

Posição nó móvel	RSSI [dBm]					
	Nós de Referência - Nick LongTag					
	1-1016	2-1007	3-1003	4-1022	5-1015	6-1026
1-1006	-64	-63,75	-74	-78,25	-73,5	-74
2-1006	-66	-53,25	-60	-76,75	-65	-69
3-1006	-66	-54	-59	-76	-65	-69
4-1006	-71,5	-64	-55	-72,5	-64,75	-65
5-1006	-76	-70	-64	-74	-69	-64,25
6-1006	-81,6	-71,5	-64,5	-76,75	-70	-59,5

A Tabela 9 apresenta a média das quatro ultimas amostras de RSSI medidas pelo objeto alvo para o experimento 2. As leituras foram coletadas para as diferentes posições de deslocamento do objeto alvo com apelido 1 *LongTag* 1006. Os rádios foram ajustados para uma saída de potência de 10 dBm. Pode-se observar que para as diferentes posições pelo objeto alvo os valores das leituras RSSI indicam a proximidade deste nó em relação ao nó de referência.

Tabela 9 Leitura RSSI pelo objeto alvo para o experimento 2.

Posição nó móvel	RSSI [dBm]					
	Nós de Referência - Nick LongTag					
	1-1016	2-1007	3-1003	4-1022	5-1015	6-1026
1-1006	-69,75	-34	-63,5	-65	-65	-72
2-1006	-69	-61	-54,6	-64	-69	-73,75
3-1006	-72	-65	-56	-65	-67	-70
4-1006	-71	-74	-65	-56	-65	-71
5-1006	-81	-71,33	-68	-68	-58	-73
6-1006	-75	-67	-64	-74	-60	-74

5.4 CALIBRAÇÃO

A calibração foi realizada após a coleta com o objetivo de obter parâmetros mais adequados para utilizá-los como entrada no algoritmo de localização. Conforme a fundamentação teórica no Capítulo 2, a propagação de ondas eletromagnéticas no vácuo é perfeita. Em outros meios, de acordo ao ambiente o índice de propagação varia devido à influência de fenômenos de desvanecimentos, espalhamentos entre outros. Desta maneira busca-se obter valores mais adequados nos parâmetros descritos na expressão (9) para atingir a resultados com melhor qualidade na estimativa da localização. O valor do parâmetro A_0 correspondente à medida de RSSI descrito na expressão (9) é determinado posicionando o objeto alvo a uma distância de 1 metro em frente de qualquer nó de referência. A Figura 20 mostra a RSSI do objeto alvo para determinar o valor do parâmetro A_0 , realizado nos experimentos 1 e 2.

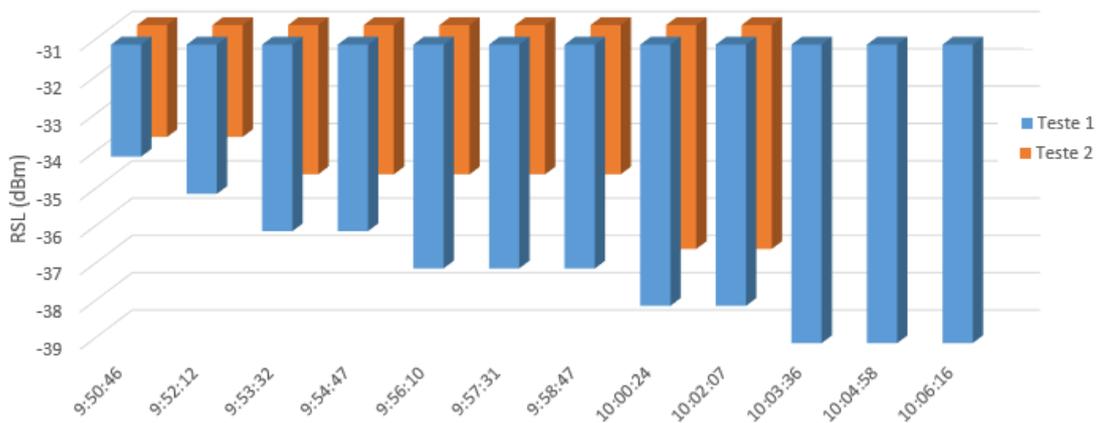


Figura 20 RSSI do objeto alvo a 1 metro de distância dos nós de referência.

A Tabela 10 mostra os dados obtidos nos experimentos 1 e 2 que foram utilizados como entrada para o algoritmo de trilateração, indicando os valores mínimos e máximos toleráveis e uma breve descrição.

Tabela 10 Dados de entrada para o algoritmo de trilateração.

Nome	Valor Mínimo	Valor Máximo	Descrição
RSSI [dBm]	-34	-97	Valores de RSSI medidos por cada Nó de referência
A_0 [dBm]	-34	-39	Valores de RSSI medido a 1 metro de distância do nó de referência
n	2	5	Índice de decaimento de potência, depende do tipo de ambiente. Este valor é determinado empiricamente e apresenta valores típicos entre 2 e 5

5.5 CARACTERÍSTICAS DO ALGORITMO DE LOCALIZAÇÃO

Para levantar os parâmetros necessários para o funcionamento do modelo de atenuação com a distância foram realizados experimentos com dispositivos compatíveis com o protocolo WirelessHART. O modelo é utilizado para estimar a distância entre o objeto alvo e os nós de referência. Pode-se obter a função que relaciona a distância com o valor encontrado para RSSI, já que n e A_0 são constantes e relativas ao meio.

$$d = d_0 \cdot 10^{(A_0 - RSSI)/10 \cdot n} \quad (26)$$

d , distância entre receptor e transmissor (em metros);

A_0 , potência recebida no receptor a 1 metro de distância;

n , Índice de decaimento de potência, depende do tipo de ambiente;

$RSSI$, diferença entre a potência recebida no receptor e a potência transmitida (em dBm).

Uma vez que a distância seja estimada, é utilizado o método de trilateração descrito no capítulo 3.6.1, por tanto, são necessários pelo menos três RSSI provindos de nós de referência distintos para funcionar. É necessário determinar, linearizar e resolver o sistema de equações da trilateração para o cálculo da posição do objeto alvo, utilizando as distâncias estimadas da etapa anterior. Para avaliar o desempenho da técnica, é calculado o erro de localização em relação à posição real do objeto alvo.

No contexto deste trabalho, o funcionamento do algoritmo pode ser descrito da seguinte forma: dado um conjunto de nós de referência C_{Nr} distribuídos em diferentes pontos no cenário com coordenadas conhecidas x_i, y_i , além de um vetor com os valores de potência recebida $rssi_N$ pelo objeto alvo. Sejam combinados de 3 a 3 a C_{Nr}^3 e $rssi_N^3$ para $N = 6$, obtendo 20 combinações de nós de referência. Em cada iteração deve-se calcular e armazenar

rss_i, rss_j, rss_k da n -ésima combinação no conjunto $rss_{i,j,k}$. A seguir é realizado o cálculo da distância $dist_{i,j,k}$ através da expressão (26). Para cada iteração são utilizados os valores armazenados no conjunto $rss_{i,j,k}$, além dos parâmetros n e A_0 levantados nos experimentos. O passo a seguir consiste em determinar, linearizar e resolver o sistema de equações de trilateração descrito na expressão (10) para obter x_n, y_n posição. O algoritmo encerra sua execução, calculando o erro e_n da n -ésima posição estimada em relação à posição real do objeto alvo.

Algoritmo para estimar a localização

Entrada: Conjunto nós de referência $C_{Nr} = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$
 Coordenadas do conjunto $C_{Nr}, x_i y_i = \{x_1 y_1, x_2 y_2, \dots, x_n y_n\}$
 Conjunto rss_N , parâmetros n e A_0
Saídas: Coordenadas do objeto alvo

1 Sejam combinados de 3 a 3 a C_{Nr}^3 e rss_N^3 para $N = 6$
 2 **para todo** rss_N^3 **faça**
 3 criar um conjunto de rss_i, rss_j, rss_k para n -ésima combinação
 4 **fim para**
 5 **para todo** d_i determinar
 6 a distância entre os nós de referência e o objeto alvo, através da expressão (26)
 7 $d_{i,j,k} = d_0 \cdot 10^{(A_0 - rss_{i,j,k})/10 \cdot n}$
 8 **fim para**
 9 //determinar o sistema de equações da trilateração para calcular a posição relativa do objeto
 10 // alvo
 11 **para todo** x_j e y_j **faça**
 12 $(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 = d_i^2$
 13 $[x, y] = A^{-1} \cdot b$
 14 $e_n = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$
 15 **fim para**
 16 // determinar a média, valores mínimos e máximos do erro
 17 $mean(e_n), \min(e_n), \max(e_n)$

5.6 RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS

Foram realizados dois experimentos. A topologia da rede dos experimentos baseia-se conforme foi descrito anteriormente no capítulo 5.1 (ambientes de testes) e capítulo 5.2 (aparato experimental). O algoritmo desenvolvido faz a conversão dos valores de potência em distância, através da expressão (9) previamente calibrada de acordo ao ambiente utilizado. Essas distâncias alimentam o algoritmo de localização, que resultará nas coordenadas do objeto alvo.

5.6.1 Experimento 1

A Figura 21 mostra o cenário onde o Experimento 1 foi realizado. O objeto alvo percorreu o caminho pela linha vermelha, onde os triângulos vermelhos indicam os diferentes posicionamentos para realizar a coleta RSSI. As distâncias entre as diferentes posições do objeto alvo variam entre 20 a 26 metros. O objetivo do experimento é avaliar o comportamento do método de localização produzido *off-line*.



Figura 21 Área com distribuição dos nós de referência e caminho percorrido pelo objeto alvo para o experimento 1.

A Tabela 11 mostra os valores de erro médio, máximo e mínimos em relação à posição real do experimento 1. Pode-se observar que a média de erro não passou dos 5

metros, conforme (ZHU et al., 2012) para aplicações típicas na indústria de automação erros menores a 5 metros são satisfatoriamente aceitos. A

Figura 22 mostra o gráfico com os valores de erro para cada amostra obtida e também a média dos erros.

Tabela 11 Erros do algoritmo de localização para o experimento 1.

Tipo de Cálculo	Média de Erro [m]	Erro Mínimo [m]	Erro Máximo [m]
Combinação de três nós referência	4,68	0,385	37,24

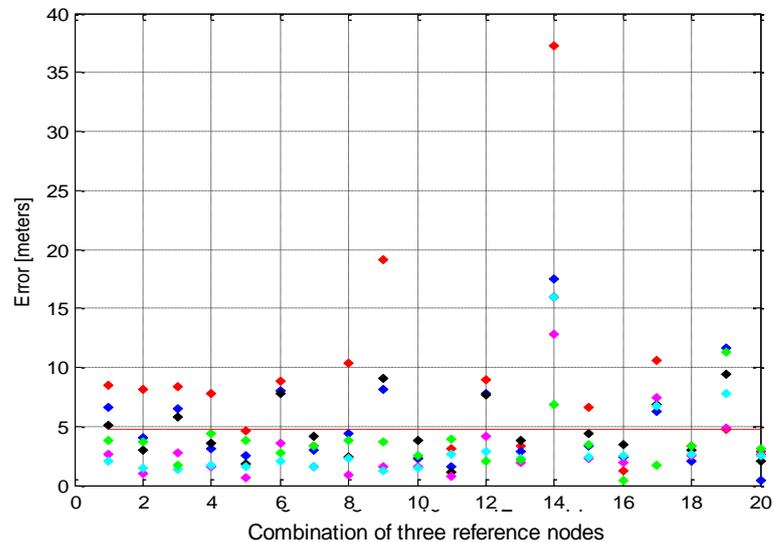


Figura 22 Erro na posição, conjunto de três nós de referência e média da trilateração para experimento 1.

A Figura 23 mostra a função de distribuição cumulativa CDF do erro da distância no experimento 1. Pode-se observar a obtenção de erros menores de 5 metros em 72% das estimativas de localização. Por tanto, o desempenho do método para estimar a localização atinge resultados bons.

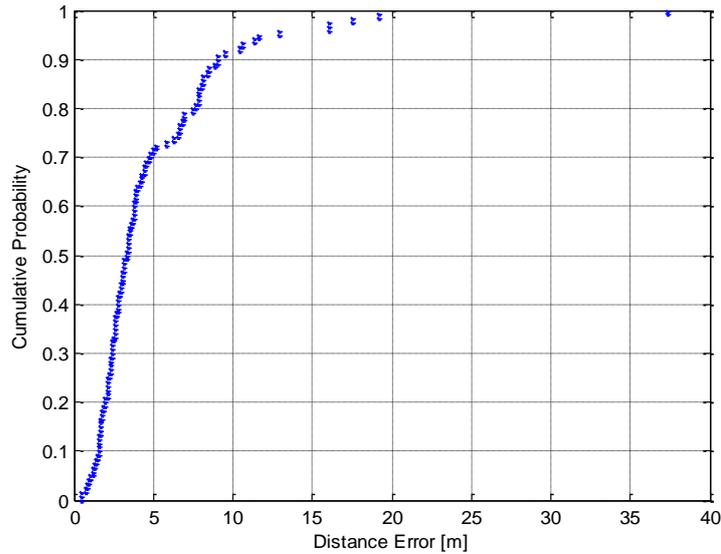


Figura 23 Erro de distância utilizando CDF para experimento 1.

5.6.2 Experimento 2

A Figura 24 mostra o cenário onde o Experimento 2 foi realizado. As posições dos nós de referência no experimento dois foram as mesmas do primeiro experimento. O objeto alvo percorreu o caminho pela linha vermelha, onde os triângulos vermelhos indicam os diferentes posicionamentos para realizar a coleta RSSI. As distâncias entre as diferentes posições do objeto alvo variam entre 10 a 20 metros. O objetivo do experimento é avaliar o comportamento do método de localização produzido *off-line*, realizado através da combinação de conjuntos de três nós de referência em relação à totalidade dos mesmos distribuídos no cenário.

A Tabela 12 exhibe os valores de erro médio, máximo e mínimos em relação à posição real do cenário apresentado na Figura 24. A Figura 25 mostra o gráfico com os valores de erro para cada amostra obtida e também a média dos erros.

Tabela 12 Erros do algoritmo de localização para o experimento 2.

Tipo de Cálculo	Média de Erro [m]	Erro Mínimo [m]	Erro Máximo [m]
Três nós referência	4,2865	0,2078	48,0691



Figura 24 Área com distribuição dos nós de referência e caminho percorrido pelo objeto alvo para o experimento 2.

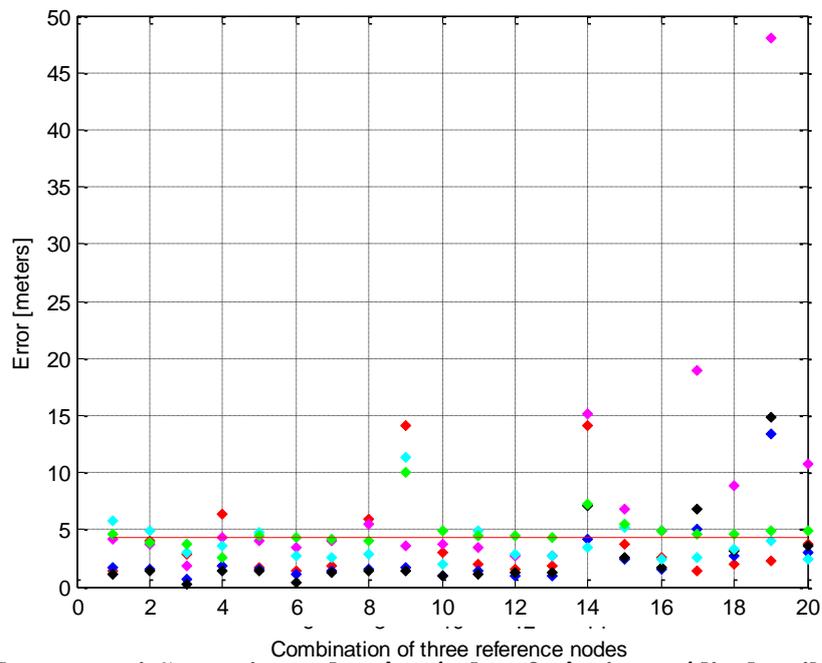


Figura 25 Erro na posição, conjunto de três nós de referência e média da trilateração para experimento 2.

Na Figura 26 mostra a função de distribuição cumulativa CDF do erro da distância no experimento 2. Pode-se observar a obtenção de erros menores de 5 metros em 80% das estimativas de localização.

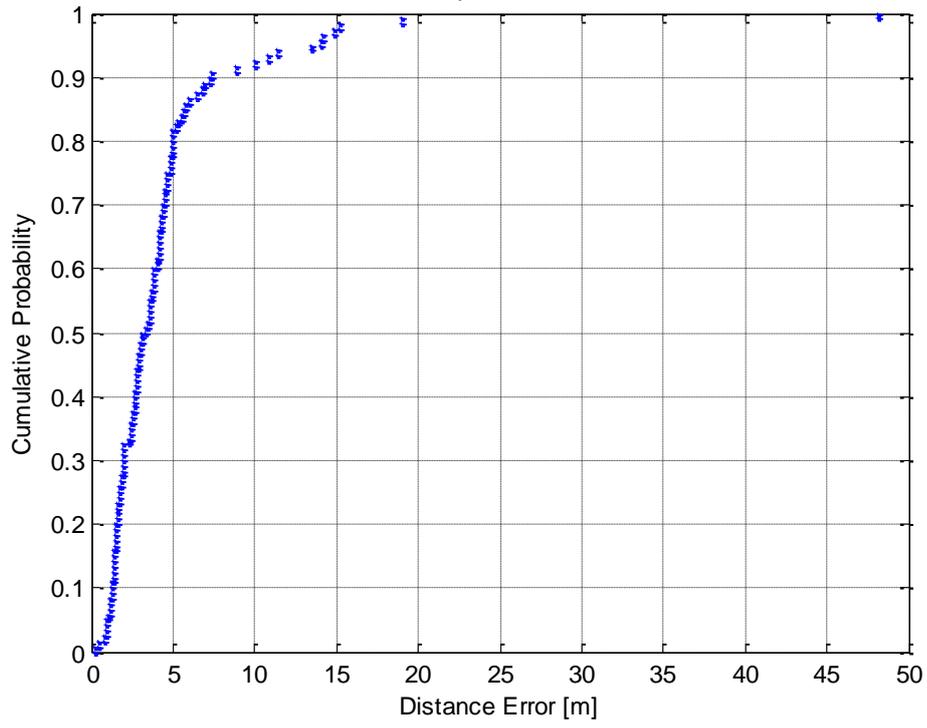


Figura 26 Erro de distância utilizando CDF para experimento 2.

6. PROPOSTA DA DISSERTAÇÃO: DETERMINAÇÃO DE TRANSMISSORES PARA TRILATERAÇÃO COM BAIXO ERRO ATRAVÉS DA ESCOLHA DE CRITÉRIOS EMPÍRICOS

Dentre as principais características de localização do nó alvo surge à necessidade de avaliar quais são os principais fatores que influenciam a qualidade da localização. A proposta deste trabalho é desenvolver e avaliar critérios de escolha para obter conjuntos de três transmissores com probabilidade de erro abaixo de 5 metros. A avaliação dos critérios empíricos é realizada através da construção de uma tabela de probabilidade conjunta obtida a partir da aplicação da regra de Bayes em dados experimentais com erro de posicionamento conhecido.

6.1 CRITÉRIOS EMPÍRICOS PARA ESCOLHA DE TRANSMISSORES

Foram criados dois critérios empíricos a partir dos valores obtidos dos experimentos. O primeiro para avaliar a influência da distribuição dos nós de referência na estimativa de localização. Denominou-se esse critério de “Critério de geometria” e o mesmo é independente da posição do nó alvo. O segundo avalia, através da potência do sinal recebido pelo nó alvo, a proximidade deste a um conjunto de três nós de referência. Denominou-se esse critério de “Critério de iluminação”, pois está relacionado à soma de potência sofrida pelo sinal dos três nós de referência escolhidos. Esse critério está fortemente relacionado à posição do nó alvo e é independente da posição dos nós de referência (fixos). A metodologia adotada para criar cada critério é mostrada a seguir.

6.1.1 Critério empírico de geometria

Este critério depende apenas dos nós de referência escolhidos. Presuma-se que uma correta estimativa de posição está relacionada com a equidistância entre os nós de referência escolhidos. Leva-se em consideração que não existam nós de referência colineares. Isso porque, em um conjunto colinear de fontes de referência, o determinante do sistema de equações da trilateração vai ser zero e esse não será inversível. O valor da geometria é um número obtido a partir da diferença entre os ângulos internos do triângulo e 60 graus (valor ângulo interno triângulo equilátero). O limiar a partir do qual uma geometria é considerada boa é definido em um desvio padrão acima da média das geometrias normalizadas. A Figura 27 mostra um exemplo de uma topologia de rede representada por triângulos formados pelas

combinações de 3 a 3 dos nós de referência. A seguir são descritos os passos da metodologia adotada para criar o critério da geometria.

- a) Realizar a combinação de todos os nós de referência em conjunto de três fontes
- b) Criar uma matriz para preencher a nova lista dos grupos de fontes resultantes da combinação em termos de coordenadas
- c) Calcular as distâncias dos grupos formados pelas três fontes resultantes da combinação (formar triângulos)
- d) Calcular os ângulos destes triângulos através da lei do cosseno
- e) Considerar que a melhor formação tenha os ângulos mais próximos a um triângulo equilátero (ângulos de 60 graus)
- f) Calcular o modulo da diferença entre ângulos do equilátero (60°) e ângulos calculados do triângulo candidato
- g) Realizar a soma dos ângulos do item anterior e buscar-se o menor valor de todos
- h) Inverter os valores anteriores e então normalizá-los pelo menor.

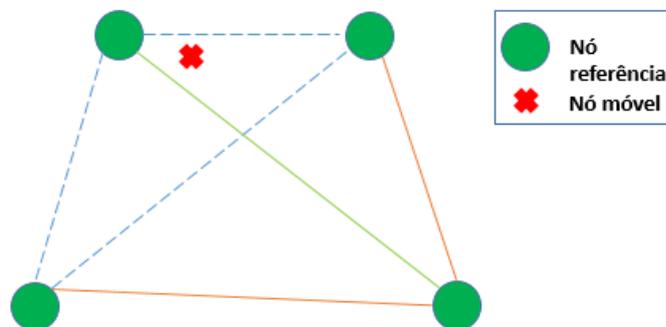


Figura 27 Topologia de uma rede representada por triângulos pela combinação 3 a 3 dos nós referência.

6.1.2 Critério de iluminação

Este critério depende da potência recebida dos nós escolhidos e da posição do nó alvo. Presuma-se que uma estimativa correta está diretamente relacionada com a intensidade do sinal recebido. O valor da iluminação é a soma das potências recebidas pelo nó alvo para cada combinação de fontes. Inicialmente optou-se por nomear esse critério como “iluminação”. Embora se refira a quanto o sinal chega atenuado vindo dos transmissores é melhor definido como a potência total incidente no alvo pelos três nós de referência escolhidos. Pode ser feita uma analogia direta com a luz, pois ela se refere a quantidade total

de iluminação que chega ao nó alvo, assim, o nome iluminação parece mais adequado para o critério. O limiar a partir do qual uma iluminação é considerada boa é definido um desvio padrão acima da média das somas das potências transmitidas por cada conjunto. A seguir são descritos os passos da metodologia adotada para criar o critério de atenuação.

- a) Realizar a combinação de todos os nós de referência em conjunto de três fontes
- b) Criar uma matriz para preencher a nova lista dos grupos de fontes resultantes da combinação em termos de potência recebida pelo nó móvel
- c) Passar a matriz de potência descrita no passo anterior de dBm a mW
- d) Realizar a soma das potências em mW para cada combinação de fontes
- e) O resultado da soma de potências passa de mW a dBm.

6.2 CRITÉRIOS EMPÍRICOS - CENÁRIOS POSSÍVEIS

A Figura 28 representa a qualidade dos critérios empíricos geometria e iluminação através de possíveis cenários combinando as fontes 3 a 3. Pode-se observar no caso (a) as fontes combinadas 2, 3 e 4, os critérios de geometria e iluminação são considerados aceitáveis relacionando à equidistância entre os nós de referência e a intensidade do sinal recebido pelo nó alvo (o asterisco representa o nó alvo). O caso (b) as fontes combinadas 1, 3 e 4 apresentam ainda uma aceitável equidistância entre os nós de referência, mas a iluminação recebida pelo nó alvo é fraca, sendo este critério inaceitável. O caso (c) as fontes combinadas são 1, 2 e 3 a equidistância entre os nós de referência está muito longe de um triângulo equilátero, mas a iluminação recebida pelo nó alvo é intensa, ou seja, o critério de iluminação é aceitável. No caso (d) as fontes combinadas 1, 2 e 4 não mantêm a equidistância de um triângulo equilátero, além disso a iluminação recebida pelo nó alvo é fraca, sendo ambos critérios inaceitáveis.

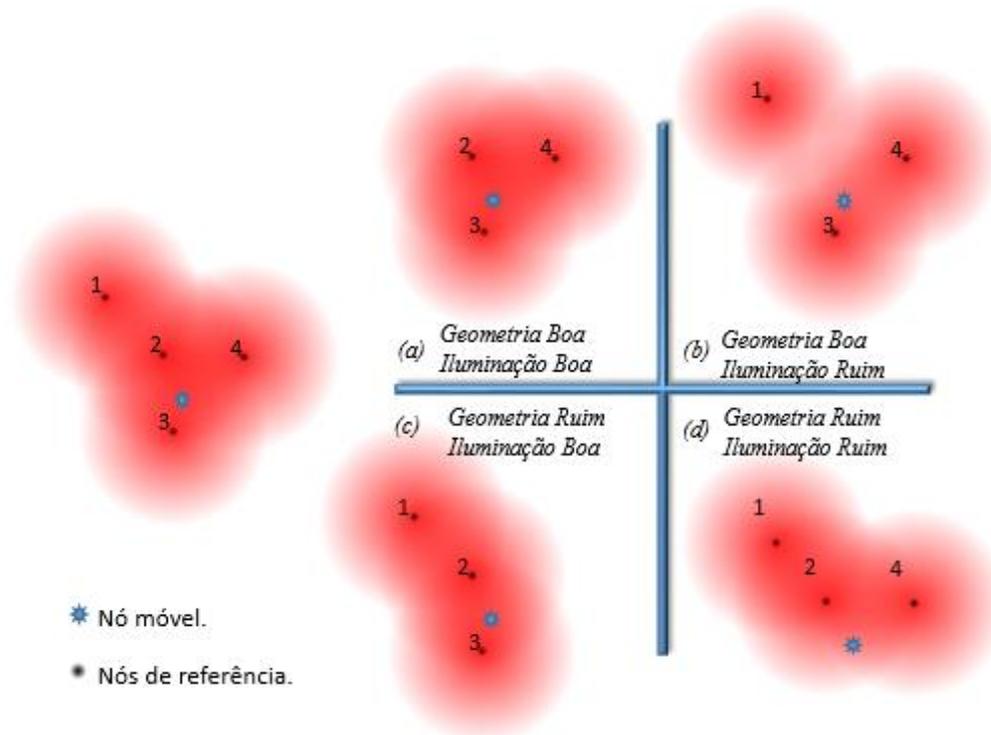


Figura 28 Possíveis Cenários para avaliar a qualidade dos critérios de geometria e iluminação.

6.3 AVALIAÇÃO PROBABILÍSTICA DOS CRITÉRIOS EMPÍRICOS

Presume-se que os critérios definidos levem a escolha de algum conjunto de três nós de referência adequados para trilateração. Ou seja, se os critérios atenderem determinado padrão de qualidade, os nós escolhidos irão apresentar erro baixo. Assim, os critérios adequados, ao serem calculados a partir de um conjunto de três potências quaisquer recebidas, tornam-se **evidências que levam a uma trilateração com erro baixo**.

6.3.1 Avaliação da qualidade dos critérios.

Pode-se avaliar a qualidade dos critérios construídos calculando-se a probabilidade que os mesmos possuem de levar a um erro baixo dado que se conheça tal erro típico da configuração. Para isso se necessita calcular, a partir de um conjunto de treinamento com erro de posicionamento conhecido, **a probabilidade que um determinado critério tenha de levar a um erro baixo (menor a 5 metros)**.

Para que se possam aplicar corretamente os critérios é então necessário:

- Construir um conjunto de casos a partir de um experimento de treinamento. No caso a tabela de localização obtida a partir das potências lidas no experimento 1 (Tabela 8).
- Avaliar o erro de posicionamento (diferença entre a posição estimada e a posição real do nó alvo) para cada uma das combinações de três nós de referência e para cada posição do nó alvo.
- Calcular a probabilidade à priori do erro de posicionamento ser baixo.
- Definir um limiar para cada critério.
- Calcular a probabilidade à priori (incondicional) de cada critério ser satisfatório.
- Calcular a probabilidade condicional de cada critério ser satisfatório dado que o erro seja baixo.
- Calcular as probabilidades condicionais conjuntas dos critérios serem ambos satisfatórios dado que o erro seja baixo.
- Montar a **tabela da probabilidade conjunta** do erro ser baixo dado que as evidências (critérios) sejam aceitáveis, para cada uma das posições do nó alvo, através da aplicação da **regra de Bayes**.

6.3.2 Escolha dos nós de referência adequados.

Uma vez montada a tabela de probabilidade conjunta, a partir do experimento de treinamento, aplica-se a mesma para obter-se um conjunto de três nós de referência adequados. Note-se que a tabela poderá indicar mais de um grupo com erro de posicionamento aceitável. No caso aplicou-se o conjunto de medidas apresentados na Tabela 9 como teste.

Antes, entretanto, é necessário escolher, para a aplicação mais adequada do critério de iluminação, qual das posições do nó alvo no experimento de treinamento está mais próxima da posição em teste. Isso para que a avaliação da qualidade do critério de iluminação seja feita em relação a essa posição.

Pode-se fazer essa avaliação de proximidade calculando-se a trilateração do conjunto de teste e procurando-se a posição do nó alvo mais próximo no experimento de treinamento. Utilizou-se, entretanto, uma forma ainda mais simples de localização aproximada. Calcula-se

a média das potências das combinações do treinamento e compara-se com a média das potências do conjunto de teste. A menor distância euclidiana indica o nó alvo mais próximo.

Uma vez escolhido o conjunto adequado, basta avaliar a qualidade do critério e verificar o mesmo na tabela de probabilidade conjunta.

O critério de geometria não depende da posição do móvel e tem aplicação imediata.

6.4 APLICAÇÃO DOS CRITÉRIOS EMPÍRICOS NO EXPERIMENTO

Para se validar os critérios definidos se utiliza os experimentos do item 5.6. O primeiro experimento irá formar o conjunto de treinamento com os erros de posicionamento conhecidos e o segundo o conjunto de teste onde se utiliza o erro de posicionamento apenas para verificar o acerto do método.

6.4.1 Definição dos limiares.

Define-se um limiar para o erro conhecido equivalente a 5 metros e para cada um dos critérios que estabelecerá se o valor do critério é aceitável ou inaceitável de forma absoluta. Para o critério de geometria o limiar é 0,77, definido através da média adicionada de um desvio padrão. É considerado um critério aceitável para valores acima do limiar caso contrário é considerado inaceitável. Para o critério da iluminação, por ser um critério que depende da posição do nó alvo, a definição do limiar é diferente para cada uma das posições.

6.4.2 Cálculo da trilateração- experimento de treinamento.

Combina-se 3 a 3 os 6 nós de referência. Pode-se observar na Tabela 13, coluna primeira as possíveis combinações das fontes. Calcula-se a trilateração de cada combinação em cada posição do nó alvo (6 posições). Finalmente determina-se o erro de posicionamento a partir do conhecimento da posição, mostrado na Tabela 13 a partir da coluna 2 até a 7.

Tabela 13 Erro de localização da trilateração do experimento de treinamento.

Combinações 3 a 3 dos nós de referência			Erro Estimado para a posição 1	Erro Estimado para a posição 2	Erro Estimado para a posição 3	Erro Estimado para a posição 4	Erro Estimado para a posição 5	Erro Estimado para a posição 6
4	5	6	8,4543	6,5828	5,1353	2,5736	2,0954	3,8493
3	5	6	8,0799	4,0588	2,9712	0,9541	1,5034	3,7401
3	4	6	8,3588	6,5319	5,7364	2,7609	1,3418	1,6396
3	4	5	7,7629	3,0499	3,5992	1,5217	1,6992	4,3999
2	5	6	4,6274	2,5621	1,7715	0,6531	1,5824	3,7443
2	4	6	8,7789	7,9794	7,7857	3,5192	2,0354	2,7302
2	4	5	3,3123	3,0142	4,1958	1,5321	1,5459	3,3908
2	3	6	10,3732	4,3771	2,3515	0,9195	2,2768	3,7690
2	3	5	19,1644	8,0923	9,0118	1,5839	1,2825	3,7133
2	3	4	2,2682	2,2752	3,8170	1,5265	1,4331	2,4731
1	5	6	3,0737	1,6178	1,1469	0,7831	2,6823	3,9544
1	4	6	8,9567	7,7500	7,6377	4,1572	2,8945	2,0429
1	4	5	3,3813	2,9090	3,8431	1,9337	2,2456	2,2073
1	3	6	37,2463	17,5108	15,9493	12,8324	15,9633	6,8831
1	3	5	6,5638	3,3606	4,4305	2,3247	2,3866	3,4741
1	3	4	1,1950	2,3728	3,4494	1,8923	2,5569	0,4030
1	2	6	10,5387	6,2561	6,8834	7,4105	6,7627	1,6907
1	2	5	3,2811	2,0296	3,0075	2,5334	2,5862	3,3350
1	2	4	4,7606	11,5830	9,4220	4,9083	7,8299	11,2901
1	2	3	2,8482	0,3850	2,0607	2,6760	2,4919	3,0914

6.4.3 Cálculo dos critérios - experimento de treinamento.

Combina-se 3 a 3 os 6 nós de referência. Calcula-se os critérios de geometria e iluminação conforme a metodologia descrita nos itens 6.1.1 e 6.1.2. Pode-se observar na Tabela 14 coluna 2 os valores calculados para o critério de geometria e nas colunas 3 até 8 os valores calculados para o critério de iluminação.

Tabela 14 Valores dos critérios de geometria e iluminação.

Combinações 3 a 3 dos nós de referência			Critério Geometria posições 1 até 6	Critério Iluminação para a posição 1	Critério Iluminação para a posição 2	Critério Iluminação para a posição 3	Critério Iluminação para a posição 4	Critério Iluminação para a posição 5	Critério Iluminação para a posição 6
4	5	6	0,67736520	-70,0243	-63,3418	-63,3046	-61,5032	-62,6637	-59,0548
3	5	6	0,7127734	-69,0556	-58,41	-57,6928	-54,1868	-60,4584	-58,0221
3	4	6	0,7985364	-70,2418	-59,4043	-58,508	-54,5164	-60,8951	-58,245
3	4	5	0,6504327	-70,0243	-58,7375	-57,9581	-54,4935	-62,4887	-63,2244
2	5	6	0,6255034	-62,9570	-52,862	-53,5426	-59,791	-62,206	-58,8846
2	4	6	0,7012700	-63,2196	-53,1171	-53,8383	-61,1319	-62,8765	-59,158
2	4	5	0,7749002	-63,1756	-52,9509	-53,6427	-61,0275	-65,756	-67,1686
2	3	6	0,7355587	-62,9989	-52,3229	-52,7036	-54,1155	-60,5852	-58,1033
2	3	5	0,7396094	-62,9570	-52,1841	-52,5522	-54,0945	-62,0482	-62,7934
2	3	4	1	-63,2196	-52,4013	-52,7859	-54,417	-62,6928	-63,4994
1	5	6	0,5801393	-63,1643	-61,5907	-61,5907	-61,4147	-62,7831	-59,1047
1	4	6	0,5697667	-63,4402	-63,9988	-63,9556	-63,5334	-63,5579	-59,3928
1	4	5	0,5578924	-63,3938	-62,3022	-62,2729	-63,3536	-67,1937	-68,9261
1	3	6	0,5565740	-63,2082	-58,6104	-57,8621	-54,4986	-60,9742	-58,2864
1	3	5	0,6229428	-63,1643	-58,0482	-57,3842	-54,4757	-62,6033	-63,3561
1	3	4	0,6266478	-63,4402	-58,954	-58,1383	-54,829	-63,3438	-64,1695
1	2	6	0,5608258	-60,6570	-52,917	-53,607	-61,0506	-63,002	-59,2092
1	2	5	0,6366276	-60,6325	-52,7581	-53,4213	-60,9482	-66,0031	-67,5028
1	2	4	0,6277972	-60,7844	-53,007	-53,7086	-62,7973	-67,827	-70,0503
1	2	3	0,8159833	-60,6570	-52,231	-52,6033	-54,3995	-62,8131	-63,6399

6.4.4 Cálculo das probabilidades incondicionais – experimento treinamento.

Tabela-se os critérios como aceitáveis ou inaceitáveis conforme seus limiares. O limiar a partir do qual uma geometria é considerada aceitável é definido em um desvio padrão acima da média das geometrias normalizadas. O limiar a partir do qual uma Iluminação é considerada aceitável é definido um desvio padrão acima da média das somas das potências transmitidas por cada conjunto. O limiar correspondente ao erro de localização é 5 metros (erros aceitáveis < 5 metros e erros inaceitáveis > 5 metros), o limiar para o critério de geometria é 0,77 (geometrias aceitáveis > 0,77 e geometrias inaceitáveis < 0,77) e o limiar para o critério de iluminação é -66,0208 dBm (iluminações aceitáveis > -66,0208 e iluminações inaceitáveis < -66,0208).

Determina-se as probabilidades incondicionais via contagem para os critérios de geometria, iluminação e erro de localização obtidos para a primeira posição do nó alvo. Note-se na Tabela 15 colunas 2, 4 e 6 a definição de critérios aceitáveis ou inaceitáveis através da utilização de lógica 1 ou 0. Pode-se observar em relação aos 20 casos possíveis, que para o erro de localização temos 9 casos aceitáveis, para o critério de geometria temos 4 casos aceitáveis e para o critério de iluminação temos 16 casos aceitáveis.

Tabela 15 Probabilidade incondicional via contagem dos critérios e erro de localização obtidos para a primeira posição do nó alvo.

Erro	eb	Geometria	gb	Iluminação	ib
8,4543	0	0,6773652	0	-70,0243	0
8,0799	0	0,71277349	0	-69,0556	0
8,3588	0	0,7985364	1	-70,2418	0
7,7629	0	0,65043279	0	-70,0243	0
4,6274	1	0,62550345	0	-62,9570	1
8,7789	0	0,70127003	0	-63,2196	1
3,3123	1	0,77490024	1	-63,1756	1
10,3732	0	0,73555874	0	-62,9989	1
19,1644	0	0,73960942	0	-62,9570	1
2,2682	1	1	1	-63,2196	1
3,0737	1	0,58013935	0	-63,1643	1
8,9567	0	0,56976679	0	-63,4402	1
3,3813	1	0,55789244	0	-63,3938	1
37,2463	0	0,55657401	0	-63,2082	1
6,5638	0	0,6229429	0	-63,1643	1
1,1950	1	0,6266478	0	-63,4402	1
10,5387	0	0,56082584	0	-60,6570	1
3,2811	1	0,63662767	0	-60,6325	1
4,7606	1	0,62779724	0	-60,7844	1
2,8482	1	0,81598336	1	-60,6570	1
	9		4		16

Obtém-se as probabilidades incondicionais para o erro P(erro), critério de geometria P(geometria) e o critério de iluminação de serem aceitáveis (bom) ou inaceitáveis (ruim) apresentados na Tabela 16 colunas 2, 4 e 6.

Tabela 16 Probabilidade incondicional dos critérios e erro de localização de serem aceitáveis ou inaceitáveis para a primeira posição do nó alvo.

Erro máx:	5	Geo min:	0,77	Ilumin máx:	-64,0208
Erros bons	9	Geo boas:	4	Ilum boa	16
P(erro bom)	0,45	P(geo boa)	0,2	P(Ilum boa)	0,8
P(erro ruim)	0,55	P(geo ruim)	0,8	P(Ilum ruim)	0,2

6.4.5 Cálculo das probabilidades condicionais para o critério de geometria – experimento treinamento.

A probabilidade condicional é calculada relacionando o erro com os critérios. Tabela-se a geometria conforme alcance erro aceitável ou erro inaceitável, mostrado na Tabela 17 colunas 5 até 8 através da utilização de logica 1 ou 0. Foram definidas as seguintes abreviaturas conforme está descrito na Tabela 17, erro aceitável (eb), geometria aceitável (gb), geometria aceitável e erro aceitável (gb[^]eb), geometria aceitável e erro inaceitável (gb[^]er), geometria inaceitável e erro aceitável (gr[^]eb) e geometria inaceitável e erro inaceitável (gr e er).

Tabela 17 Probabilidade incondicional via contagem relacionando o erro de localização com o critério de geometria para a primeira posição do nó alvo.

Erro	eb	Geometria	Gb	gb[^]eb	gb[^]er	gr[^]eb	gr[^]er
8,4543	0	0,6773652	0	0	0	0	1
8,0799	0	0,7127735	0	0	0	0	1
8,3588	0	0,7985364	1	0	1	0	0
7,7629	0	0,6504328	0	0	0	0	1
4,6274	1	0,6255034	0	0	0	1	0
8,7789	0	0,70127	0	0	0	0	1
3,3123	1	0,7749002	1	1	0	0	0
10,3732	0	0,7355587	0	0	0	0	1
19,1644	0	0,7396094	0	0	0	0	1
2,2682	1	1	1	1	0	0	0
3,0737	1	0,5801393	0	0	0	1	0
8,9567	0	0,5697668	0	0	0	0	1
3,3813	1	0,5578924	0	0	0	1	0
37,2463	0	0,556574	0	0	0	0	1
6,5638	0	0,6229429	0	0	0	0	1
1,1950	1	0,6266478	0	0	0	1	0
10,5387	0	0,5608258	0	0	0	0	1
3,2811	1	0,6366277	0	0	0	1	0
4,7606	1	0,6277972	0	0	0	1	0
2,8482	1	0,8159834	1	1	0	0	0
	9		4	3	1	6	10

Determina-se as probabilidades condicionais $P(\text{Geo} \mid \text{erro})$ para o critério de geometria através da expressão (27), utilizando os valores previamente calculados das probabilidades incondicionais que relacionam o critério de geometria e o erro de localização .

$$P(\text{Geo} \mid \text{erro}) = \frac{P(\text{Geo} \wedge \text{erro})}{P(\text{erro})} \quad (27)$$

Obtém-se as probabilidades condicionais da geometria ser aceitável (ou não) dado que se conhece o erro mostrados na Tabela 18, coluna 2, linhas 3, 6, 9 e 12.

Tabela 18 Probabilidade condicional relacionando o erro de localização com o critério de geometria para a primeira posição do nó alvo.

gb ^ eb	3
P(gb ^ eb)	0,15
P(gb eb)	0,33333333
gb ^ er	1
P(gb ^ er)	0,05
P(gb er)	0,09090909
gr ^ eb	6
P(gr ^ eb)	0,3
P(gr eb)	0,66666667
gr ^ er	10
P(gr ^ er)	0,5
P(gr er)	0,90909091

6.4.6 Cálculo das probabilidades condicionais para o critério de iluminação – experimento treinamento.

A probabilidade condicional é calculada relacionando o erro com os critérios. Tabela-se a iluminação conforme alcance erro aceitável ou erro inaceitável, mostrado na Tabela 19 colunas 5 até 8 através da utilização de logica 1 ou 0. Foram definidas as seguintes abreviaturas conforme está descrito na Tabela 19, erro aceitável (eb), iluminação aceitável (ib), iluminação aceitável e erro aceitável (ib^eb), iluminação aceitável e erro inaceitável (ib^er), iluminação inaceitável e erro aceitável (ir^eb) e iluminação inaceitável e erro inaceitável (ir e er).

Tabela 19 Probabilidade incondicional via contagem relacionando o erro de localização com o critério de iluminação para a primeira posição do nó alvo.

Erro	eb	Iluminação	ib	ib ^{eb}	ir ^{eb}	ib ^{er}	ir ^{er}
8,4543	0	-70,0243	0	0	0	0	1
8,0799	0	-69,0556	0	0	0	0	1
8,3588	0	-70,2418	0	0	0	0	1
7,7629	0	-70,0243	0	0	0	0	1
4,6274	1	-62,9570	1	1	0	0	0
8,7789	0	-63,2196	1	0	0	1	0
3,3123	1	-63,1756	1	1	0	0	0
10,3732	0	-62,9989	1	0	0	1	0
19,1644	0	-62,9570	1	0	0	1	0
2,2682	1	-63,2196	1	1	0	0	0
3,0737	1	-63,1643	1	1	0	0	0
8,9567	0	-63,4402	1	0	0	1	0
3,3813	1	-63,3938	1	1	0	0	0
37,2463	0	-63,2082	1	0	0	1	0
6,5638	0	-63,1643	1	0	0	1	0
1,1950	1	-63,4402	1	1	0	0	0
10,5387	0	-60,6570	1	0	0	1	0
3,2811	1	-60,6325	1	1	0	0	0
4,7606	1	-60,7844	1	1	0	0	0
2,8482	1	-60,6570	1	1	0	0	0
	9		16	9	0	7	4

Determina-se as probabilidades condicionais $P(\text{Ilum} | \text{erro})$ para o critério de iluminação através da expressão (28), utilizando os valores previamente calculados das probabilidades incondicionais que relacionam o critério de iluminação e o erro de localização.

$$P(\text{Ilum} | \text{erro}) = \frac{P(\text{Ilum} \wedge \text{erro})}{P(\text{erro})} \quad (28)$$

Obtém-se as probabilidades condicionais da iluminação ser aceitável (ou não) dado que se conhece o erro mostrados na Tabela 20, coluna 2, linhas 3, 6, 9 e 12.

Tabela 20 Probabilidade condicional relacionando o erro de localização com o critério de iluminação para a primeira posição do nó alvo.

ib^{eb}	9
P(ib ^{eb})	0,45
P(ib eb)	1
ir^{eb}	0
P(ir ^{eb})	0
P(ir eb)	0
ib^{er}	7
P(ib ^{er})	0,35
P(ib er)	0,63636364
ir^{er}	4
P(ir ^{er})	0,2
P(ir er)	0,36363636

6.4.7 Regra de Bayes – probabilidade de erro dos critérios individualmente.

Uma vez avaliadas as probabilidades incondicionais e condicionais dos critérios individualmente, o que se necessita saber qual é a probabilidade do erro ser aceitável dado que se conheça a geometria e iluminação.

Aplica-se a regra de Bayes a partir das probabilidades incondicionais e condicionais. Determina-se através das expressões (29) e (30) as probabilidades de se obter baixo erro de localização dado que se conheça a qualidade das evidências INDIVIDUALMENTE.

$$P(\text{erro} | \text{Geo}) = \frac{P(\text{Geo} | \text{erro}) \cdot P(\text{erro})}{P(\text{Geo})} \quad (29)$$

$$P(\text{erro} | \text{Ilum}) = \frac{P(\text{Ilum} | \text{erro}) \cdot P(\text{erro})}{P(\text{Ilum})} \quad (30)$$

Na Tabela 21 é apresentado os valores obtidos do cálculo da regra de Bayes da primeira posição do nó alvo para o critério de geometria utilizando a expressão (29).

Tabela 21 Regra de Bayes critério de geometria para a primeira posição do nó alvo.

P(E G)	Geo Aceitável	Geo Inaceitável
Erro Aceitável	0,75	0,375
Erro Inaceitável	0,25	0,625

Na Tabela 22 é apresentado os valores obtidos do cálculo da regra de Bayes da primeira posição do nó alvo para o critério de iluminação utilizando a expressão (30).

Tabela 22 Regra de Bayes critério de iluminação para a primeira posição do nó alvo.

P(E IL)	Ilum. Aceitável	Ilum. Inaceitável
Erro Aceitável	0,5625	0
Erro Inaceitável	0,4375	1

6.4.8 Probabilidades conjuntas – experimento treinamento.

São avaliados os critérios de geometria e iluminação em conjunto dado que se conhece o erro de localização.

Tabele-se a conjunção dos critérios com o erro (Geometria \wedge Iluminação \wedge erro) através da utilização de logica 1 ou 0, como é apresentado na Tabela 23.

Tabela 23 Probabilidade incondicional via contagem da conjunção dos critérios com o erro de localização para a primeira posição do nó alvo.

Erro	eb	Geometria	Iluminação	gb	ib	gb [^] ib [^] eb	gb [^] ib [^] er	gr [^] ib [^] eb	gr [^] ib [^] er	gb [^] ir [^] eb	gb [^] ir [^] er	gr [^] ir [^] eb	gr [^] ir [^] er
8,454	0	0,677	-70,024	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
8,080	0	0,713	-69,056	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
8,359	0	0,799	-70,242	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
7,763	0	0,650	-70,024	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
4,627	1	0,626	-62,957	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
8,779	0	0,701	-63,220	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
3,312	1	0,775	-63,176	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
10,373	0	0,736	-62,999	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
19,164	0	0,740	-62,957	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
2,268	1	1,000	-63,220	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
3,074	1	0,580	-63,164	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
8,957	0	0,570	-63,440	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
3,381	1	0,558	-63,394	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
37,246	0	0,557	-63,208	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
6,564	0	0,623	-63,164	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
1,195	1	0,627	-63,440	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
10,539	0	0,561	-60,657	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
3,281	1	0,637	-60,633	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
4,761	1	0,628	-60,784	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
2,848	1	0,816	-60,657	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
				4	16	3	0	6	7	0	1	0	3

Obtém-se as probabilidades incondicionais via contagem da conjunção dos critérios de geometria e iluminação serem aceitáveis ou inaceitáveis, apresentados na Tabela 24, colunas 2, 4, 6 e 8. Na Tabela 25 colunas 2, 5, 8, 11, 14, 17, 20 e 23 são apresentadas as probabilidades incondicionais da conjunção dos critérios com o erro de localização.

Tabela 24 Probabilidade incondicional da conjunção dos critérios para a primeira posição do nó alvo.

gb^{ib}	3
P(gb^{ib})	0,15
gr^{ib}	13
P(gr^{ib})	0,65
gb^{ir}	1
P(gb^{ir})	0,05
gr^{ir}	3
P(gr^{ir})	0,15

Determina-se as probabilidades condicionais $P(\text{Geometria} \wedge \text{Iluminação} \mid \text{erro})$ para o critério de iluminação através da expressão (31), utilizando os valores previamente calculados das probabilidades incondicionais que relacionam o critério de geometria, iluminação e o erro de localização.

$$P(\text{Geo} \wedge \text{Ilum} \mid \text{erro}) = \frac{P(\text{Geo} \wedge \text{Ilum} \wedge \text{erro})}{P(\text{erro})} \quad (31)$$

Obtém-se as probabilidades condicionais da conjunção dos critérios com o erro serem aceitáveis (ou não) mostrados na Tabela 25, coluna 2, linhas 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 e 24.

Tabela 25 Probabilidade condicional da conjunção dos critérios com o erro de localização para a primeira posição do nó alvo.

gb[^]ib[^]eb	3
P(gb [^] ib [^] eb)	0,15
P(gb[^]ib eb)	0,33333333
gb[^]ib[^]er	0
P(gb [^] ib [^] er)	0
P(gb[^]ib er)	0
gr[^]ib[^]eb	6
P(gr [^] ib [^] eb)	0,3
P(gr[^]ib eb)	0,66666667
gr[^]ib[^]er	7
P(gr [^] ib [^] er)	0,35
P(gr[^]ib er)	0,63636364
gb[^]ir[^]eb	0
P(gb [^] ir [^] eb)	0
P(gb[^]ir eb)	0
gb[^]ir[^]er	1
P(gb [^] ir [^] er)	0,05
P(gb[^]ir er)	0,09090909
gr[^]ir[^]eb	0
P(gr [^] ir [^] eb)	0
P(gr[^]ir eb)	0
gr[^]ir[^]er	3
P(gr [^] ir [^] er)	0,15
P(gr[^]ir er)	0,27272727

6.4.9 Regra de Bayes – probabilidade conjuntas.

Aplica-se a regra de Bayes a partir das probabilidades incondicionais e condicionais da conjunção dos critérios com o erro. Determina-se através da expressão (32) as probabilidades de se obter baixo erro de localização dado que se conheça a qualidade das evidências $P(\text{erro} | \text{Geometria} \wedge \text{Iluminação})$. Os dados apresentados nas tabelas são obtidos da primeira posição do nó alvo.

$$P(\text{erro} | \text{Geo} \wedge \text{Ilum}) = \frac{P(\text{Geo} \wedge \text{Ilum} | \text{erro}) \cdot P(\text{erro})}{P(\text{Geo} \wedge \text{Ilum})} \quad (32)$$

A Tabela 26 apresenta a probabilidade conjunta utilizando-se a regra de Bayes. Finalmente obtém-se a probabilidade de erro baixo dada a qualidade do critério de geometria, a probabilidade de obter erro baixo dada a qualidade do critério de iluminação, a probabilidade de obter erro baixo dada a qualidade da conjunção dos critérios geometria e iluminação.

Tabela 26 Probabilidade conjunta.

Parâmetros:	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Posição 4	Posição 5	Posição 6
Limiar do erro	5	5	5	5	5	5
Limiar critério Geometria	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77
Limiar critério Atenuação	-64,0208	-56,507465	-56,55364	-58,028895	-63,13859	-62,08957

PROBABILIDADES REGRA DE BAYES:

P(eb Gb)	0,75	0,75	0,75	1	1	1
P(eb Gr)	0,375	0,5625	0,5625	0,875	0,8125	0,875
P(er Gb)	0,25	0,25	0,25	0	0	0
P(er Gr)	0,625	0,4375	0,4375	0,125	0,1875	0,125
P(eb ib)	0,5625	0,6	0,6	0,9	0,8571	0,9
P(eb ir)	0	0,6	0,6	0,9	0,8333	0,9
P(er ib)	0,4375	0,4	0,4	0,1	0,1429	0,1
P(er ir)	1	0,4	0,4	0,1	0,1667	0,1
P(eb Gb^ib)	1	1	1	1	1	1
P(eb Gr^ib)	0,4615	0,4286	0,4286	0,8571	0,8182	0,8889
P(eb Gb^ir)	0	0	0	1	1	1
P(eb Gr^ir)	0	0,6667	0,6667	0,8889	0,8	0,8571
P(er Gb^ib)	0	0	0	0	0	0
P(er Gr^ib)	0,5385	0,5714	0,5714	0,1429	0,1818	0,1111
P(er Gb^ir)	1	1	1	0	0	0
P(er Gr^ir)	1	0,3333	0,3333	0,1111	0,2	0,1429

Pode-se notar que só o critério de geometria atende os requisitos de erro baixo em 100% casos, nas posições 4, 5 e 6. Os critérios de geometria e iluminação conjugados atendem os requisitos de erro baixo para todas as posições. Note-se que os nós alvos próximos das posições 4, 5 e 6, segundo a Tabela 26, apresentam 100% de chances de possuírem erro aceitável quando se escolhe um conjunto de nós de referência com geometria aceitável.

6.5 APLICAÇÃO DA TABELA DE PROBABILIDADE CONJUNTA NO EXPERIMENTO DE TESTE

Faz-se a verificação da tabela aplicando-se os critérios calculados a partir dos dados do experimento 2 ou teste.

6.5.1 Aplicação da tabela de probabilidade conjunta - trilateração.

Combina-se 3 a 3 os 6 nós de referência. Calcula-se a trilateração de cada combinação na posição de teste do nó alvo. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 27.

Tabela 27 Erro de localização da trilateração do experimento de teste.

Combinações 3 a 3 dos nós de referência			Erro Estimado para a posição 1	Erro Estimado para a posição 2	Erro Estimado para a posição 3	Erro Estimado para a posição 4	Erro Estimado para a posição 5	Erro Estimado para a posição 6
4	5	6	1,3695	1,6474	1,105	4,0948	5,7565	4,5413
3	5	6	4,0531	1,5711	1,3233	3,7846	4,8671	3,9288
3	4	6	2,8534	0,705	0,2078	1,8815	2,9887	3,6852
3	4	5	6,3994	1,7791	1,4303	4,3277	3,5394	2,5536
2	5	6	1,7094	1,5585	1,3241	4,0385	4,8104	4,3983
2	4	6	1,4619	1,0697	0,3872	3,5014	2,7526	4,2508
2	4	5	1,8502	1,3246	1,1972	4,0349	2,4879	4,1779
2	3	6	5,8809	1,4783	1,3281	5,5145	2,7887	4,0892
2	3	5	14,0667	1,6731	1,3199	3,6047	11,3082	10,0134
2	3	4	3,0162	0,8912	0,929	3,7799	1,9517	4,8251
1	5	6	1,9155	1,4013	1,1276	3,4864	4,8312	4,4408
1	4	6	1,5015	0,8867	1,2067	2,7034	2,8045	4,3882
1	4	5	1,898	0,901	1,1785	2,6366	2,6571	4,368
1	3	6	14,0416	4,1551	7,1453	15,1952	3,3943	7,2881
1	3	5	3,7534	2,4032	2,5942	6,7607	5,1952	5,549
1	3	4	2,5292	1,5085	1,7507	4,9313	2,3499	4,8404
1	2	6	1,4116	5,097	6,8571	18,9535	2,6205	4,5592
1	2	5	1,9008	2,6812	3,088	8,8039	3,3234	4,5415
1	2	4	2,2831	13,3661	14,7847	48,0691	3,9956	4,8799
1	2	3	3,7549	2,9507	3,5406	10,785	2,3825	4,8401

6.5.2 Aplicação da tabela de probabilidade conjunta - Cálculo dos critérios.

Combina-se 3 a 3 os 6 nós de referência. Calcula-se os critérios de geometria e iluminação conforme a metodologia descrita nos itens 6.1.1 e 6.1.2. Pode-se observar na Tabela 28 coluna 2 os valores calculados para o critério de geometria e nas colunas 3 até 8 os valores calculados para o critério de iluminação.

Tabela 28 Valores dos critérios de geometria e iluminação

Combinações 3 a 3 dos nós de referência			Critério Geometria posições 1 até 6	Critério Iluminação para a posição 1	Critério Iluminação para a posição 2	Critério Iluminação para a posição 3	Critério Iluminação para a posição 4	Critério Iluminação para a posição 5	Critério Iluminação para a posição 6
4	5	6	0,677365203	-61,5767	-62,4705	-62,1059	-55,3647	-57,4630	-59,6673
3	5	6	0,712773492	-60,8302	-54,3944	-55,5108	-61,4759	-57,4630	-58,4227
3	4	6	0,798536404	-60,8302	-54,0808	-55,3341	-55,3647	-64,3522	-63,2082
3	4	5	0,65043279	-59,6692	-53,9888	-55,1890	-55,0247	-57,2082	-58,4227
2	5	6	0,625503447	-33,9959	-60,1665	-62,1059	-63,6104	-57,6735	-59,0681
2	4	6	0,70127003	-33,9959	-59,0847	-61,3522	-55,7986	-65,4940	-65,5417
2	4	5	0,774900244	-33,9931	-58,7998	-60,7989	-55,4243	-57,4064	-59,0681
2	3	6	0,735558739	-33,9944	-53,6614	-55,3341	-63,6104	-65,4940	-61,9556
2	3	5	0,739609417	-33,9917	-53,5777	-55,1890	-61,7246	-57,4064	-57,9652
2	3	4	1	-33,9917	-53,3163	-55,0247	-55,4243	-64,0827	-61,9556
1	5	6	0,580139346	-63,1404	-65,3172	-64,4055	-63,2322	-57,8437	-59,7003
1	4	6	0,569766792	-63,1404	-62,4705	-63,1937	-55,7337	-66,6444	-69,5372
1	4	5	0,557892436	-61,3172	-61,8716	-62,3743	-55,3647	-57,5663	-59,7003
1	3	6	0,556574009	-62,1063	-54,3944	-55,7268	-63,2322	-66,6444	-63,2833
1	3	5	0,622942899	-60,6106	-54,2956	-55,5681	-61,4759	-57,5663	-58,4475
1	3	4	0,626647802	-60,6106	-53,9888	-55,3892	-55,3647	-64,8822	-63,2833
1	2	6	0,560825837	-33,9982	-60,1665	-63,1937	-67,0185	-68,8047	-65,671
1	2	5	0,636627669	-33,9954	-59,8042	-62,3743	-63,6104	-57,7821	-59,0969
1	2	4	0,627797239	-33,9954	-58,7998	-61,5767	-55,7986	-66,1969	-65,671
1	2	3	0,815983358	-33,994	-53,5777	-55,3892	-63,6104	-66,1969	-62,0117

6.5.3 Aplicação da tabela de probabilidade conjunta – Escolha do grupo

Determinação do grupo experimental mais próximo ao nó alvo de teste. Forma simples que se encontra para que se aplique o critério de iluminação em forma adequada.

A Tabela 29 mostra os valores do critério de iluminação das combinações prévias (experimento 1). A Tabela 30 apresenta os valores do critério da iluminação das combinações à posição desconhecida do nó alvo.

Tabela 29 Valores do critério de iluminação das combinações prévias.

Iluminação Treinamento (prévia) [dBm]					
P1	P2	P3	P4	P5	P6
-70,0243	-63,3418	-63,3046	-61,5032	-62,6637	-59,0548
-69,0556	-58,41	-57,6928	-54,1868	-60,4584	-58,0221
-70,2418	-59,4043	-58,508	-54,5164	-60,8951	-58,245
-70,0243	-58,7375	-57,9581	-54,4935	-62,4887	-63,2244
-62,9570	-52,862	-53,5426	-59,791	-62,206	-58,8846
-63,2196	-53,1171	-53,8383	-61,1319	-62,8765	-59,158
-63,1756	-52,9509	-53,6427	-61,0275	-65,756	-67,1686
-62,9989	-52,3229	-52,7036	-54,1155	-60,5852	-58,1033
-62,9570	-52,1841	-52,5522	-54,0945	-62,0482	-62,7934
-63,2196	-52,4013	-52,7859	-54,417	-62,6928	-63,4994
-63,1643	-61,5907	-61,5907	-61,4147	-62,7831	-59,1047
-63,4402	-63,9988	-63,9556	-63,5334	-63,5579	-59,3928
-63,3938	-62,3022	-62,2729	-63,3536	-67,1937	-68,9261
-63,2082	-58,6104	-57,8621	-54,4986	-60,9742	-58,2864
-63,1643	-58,0482	-57,3842	-54,4757	-62,6033	-63,3561
-63,4402	-58,954	-58,1383	-54,829	-63,3438	-64,1695
-60,6570	-52,917	-53,607	-61,0506	-63,002	-59,2092
-60,6325	-52,7581	-53,4213	-60,9482	-66,0031	-67,5028
-60,7844	-53,007	-53,7086	-62,7973	-67,827	-70,0503
-60,6570	-52,231	-52,6033	-54,3995	-62,8131	-63,6399
-64,02078	-56,507465	-56,55364	-58,028895	-63,13859	-62,08957

Tabela 30 Valores do critério de iluminação das combinatórias na posição desconhecida do nó alvo.

Iluminação teste [dBm]					
Px1	Px2	Px3	Px4	Px5	Px6
-61,5767	-62,4705	-62,1059	-55,3647	-57,4630	-59,6673
-60,8302	-54,3944	-55,5108	-61,4759	-57,4630	-58,4227
-60,8302	-54,0808	-55,3341	-55,3647	-64,3522	-63,2082
-59,6692	-53,9888	-55,1890	-55,0247	-57,2082	-58,4227
-33,9959	-60,1665	-62,1059	-63,6104	-57,6735	-59,0681
-33,9959	-59,0847	-61,3522	-55,7986	-65,4940	-65,5417
-33,9931	-58,7998	-60,7989	-55,4243	-57,4064	-59,0681
-33,9944	-53,6614	-55,3341	-63,6104	-65,4940	-61,9556
-33,9917	-53,5777	-55,1890	-61,7246	-57,4064	-57,9652
-33,9917	-53,3163	-55,0247	-55,4243	-64,0827	-61,9556
-63,1404	-65,3172	-64,4055	-63,2322	-57,8437	-59,7003
-63,1404	-62,4705	-63,1937	-55,7337	-66,6444	-69,5372
-61,3172	-61,8716	-62,3743	-55,3647	-57,5663	-59,7003
-62,1063	-54,3944	-55,7268	-63,2322	-66,6444	-63,2833
-60,6106	-54,2956	-55,5681	-61,4759	-57,5663	-58,4475
-60,6106	-53,9888	-55,3892	-55,3647	-64,8822	-63,2833
-33,9982	-60,1665	-63,1937	-67,0185	-68,8047	-65,671
-33,9954	-59,8042	-62,3743	-63,6104	-57,7821	-59,0969
-33,9954	-58,7998	-61,5767	-55,7986	-66,1969	-65,671
-33,994	-53,5777	-55,3892	-63,6104	-66,1969	-62,0117
-47,688875	-57,41136	-58,856805	-59,363195	-61,708565	-61,583885

Pode-se observar na última linha da Tabela 30 que as potências médias se aproximam de acordo com as cores marcados do conjunto de treinamento (Tabela 29) P2, P4 e P6. Utiliza-se uma métrica euclidiana para calcular a distância (erro ou diferença) entre a média das potências da combinatória referente à posição desconhecida (Tabela 30, última linha) e a média das potências das combinatórias prévias (Tabela 29, última linha). O cálculo anterior é utilizado para definir a posição mais próxima ao conjunto de medidas a priori (do treinamento) é o mais adequado para aplicação do critério da iluminação, definindo assim, os limiares respectivos do critério de iluminação.

6.5.4 Aplicação da tabela de probabilidade conjunta – Escolha das combinações

Verifica-se o a escolha das combinações dos nós de referência observando-se o valor do erro das posições desconhecidas. Note-se nas tabelas, que todas as combinações que possuem critérios de geometria e iluminação adequados possuem erro abaixo de 5 metros.

A Tabela 31 mostra em destaque as combinações escolhidas e seus respectivos erros para o primeiro conjunto de posições do nó alvo. Note-se na Tabela 31 que todas as combinações que possuem geometria é iluminação aceitável possuem erro abaixo de 5 metros.

Tabela 31 Validação dos Resultados para a primeira posição do nó alvo do experimento de teste.

Geo	Px1	ib	Gb	ib^Gb	Erro obtido trilateração
0,6773652	-61,5767	0	0	0	1,3695
0,71277349	-60,8302	0	0	0	4,0531
0,7985364	-60,8302	0	1	0	2,8534
0,65043279	-59,6692	0	0	0	6,3994
0,62550345	-33,9959	1	0	0	1,7094
0,70127003	-33,9959	1	0	0	1,4619
0,77490024	-33,9931	1	1	1	1,8502
0,73555874	-33,9944	1	0	0	5,8809
0,73960942	-33,9917	1	0	0	14,0667
1	-33,9917	1	1	1	3,0162
0,58013935	-63,1404	0	0	0	1,9155
0,56976679	-63,1404	0	0	0	1,5015
0,55789244	-61,3172	0	0	0	1,898
0,55657401	-62,1063	0	0	0	14,0416
0,6229429	-60,6106	0	0	0	3,7534
0,6266478	-60,6106	0	0	0	2,5292
0,56082584	-33,9982	1	0	0	1,4116
0,63662767	-33,9954	1	0	0	1,9008
0,62779724	-33,9954	1	0	0	2,2831
0,81598336	-33,994	1	1	1	3,7549
		10	4	3	

A Tabela 32 mostra em destaque as combinações escolhidas e seus respectivos erros para o segundo conjunto de posições do nó alvo. Note-se na Tabela 32 que todas as combinações que possuem geometria é iluminação aceitável possuem erro abaixo de 5 metros.

Tabela 32 Validação dos Resultados para a segunda posição do nó alvo do experimento de teste.

Geo	Px2	ib	Gb	ib^Gb	Erro obtido trilateração
0,6773652	-62,4705	0	0	0	1,6474
0,71277349	-54,3944	1	0	0	1,5711
0,7985364	-54,0808	1	1	1	0,705
0,65043279	-53,9888	1	0	0	1,7791
0,62550345	-60,1665	0	0	0	1,5585
0,70127003	-59,0847	0	0	0	1,0697
0,77490024	-58,7998	0	1	0	1,3246
0,73555874	-53,6614	1	0	0	1,4783
0,73960942	-53,5777	1	0	0	1,6731
1	-53,3163	1	1	1	0,8912
0,58013935	-65,3172	0	0	0	1,4013
0,56976679	-62,4705	0	0	0	0,8867
0,55789244	-61,8716	0	0	0	0,901
0,55657401	-54,3944	1	0	0	4,1551
0,6229429	-54,2956	1	0	0	2,4032
0,6266478	-53,9888	1	0	0	1,5085
0,56082584	-60,1665	0	0	0	5,097
0,63662767	-59,8042	0	0	0	2,6812
0,62779724	-58,7998	0	0	0	13,3661
0,81598336	-53,5777	1	1	1	2,9507
		10	4	3	

A Tabela 33 mostra em destaque as combinações escolhidas e seus respectivos erros para o terceiro conjunto de posições do nó alvo. Note-se na Tabela 33 que todas as combinações que possuem geometria é iluminação aceitável possuem erro abaixo de 5 metros.

Tabela 33 Validação dos Resultados para a terceira posição do nó alvo do experimento de teste.

Geo	Px3	ib	Gb	ib^Gb	Erro obtido trilateração
0,6773652	-62,1059	0	0	0	1,105
0,71277349	-55,5108	1	0	0	1,3233
0,7985364	-55,3341	1	1	1	0,2078
0,65043279	-55,1890	1	0	0	1,4303
0,62550345	-62,1059	0	0	0	1,3241
0,70127003	-61,3522	0	0	0	0,3872
0,77490024	-60,7989	0	1	0	1,1972
0,73555874	-55,3341	1	0	0	1,3281
0,73960942	-55,1890	1	0	0	1,3199
1	-55,0247	1	1	1	0,929
0,58013935	-64,4055	0	0	0	1,1276
0,56976679	-63,1937	0	0	0	1,2067
0,55789244	-62,3743	0	0	0	1,1785
0,55657401	-55,7268	1	0	0	7,1453
0,6229429	-55,5681	1	0	0	2,5942
0,6266478	-55,3892	1	0	0	1,7507
0,56082584	-63,1937	0	0	0	6,8571
0,63662767	-62,3743	0	0	0	3,088
0,62779724	-61,5767	0	0	0	14,7847
0,81598336	-55,3892	1	1	1	3,5406
		10	4	3	

A Tabela 34 mostra em destaque as combinações escolhidas e seus respectivos erros para o quarto conjunto de posições do nó alvo. Note-se na Tabela 34 que todas as combinações que possuem geometria é iluminação aceitável possuem erro abaixo de 5 metros.

Tabela 34 Validação dos Resultados para a quarta posição do nó alvo do experimento de teste.

Geo	Px4	ib	Gb	ib^Gb	Erro obtido trilateração
0,6773652	-55,3647	1	0	0	4,0948
0,71277349	-61,4759	0	0	0	3,7846
0,7985364	-55,3647	1	1	1	1,8815
0,65043279	-55,0247	1	0	0	4,3277
0,62550345	-63,6104	0	0	0	4,0385
0,70127003	-55,7986	1	0	0	3,5014
0,77490024	-55,4243	1	1	1	4,0349
0,73555874	-63,6104	0	0	0	5,5145
0,73960942	-61,7246	0	0	0	3,6047
1	-55,4243	1	1	1	3,7799
0,58013935	-63,2322	0	0	0	3,4864
0,56976679	-55,7337	1	0	0	2,7034
0,55789244	-55,3647	1	0	0	2,6366
0,55657401	-63,2322	0	0	0	15,1952
0,6229429	-61,4759	0	0	0	6,7607
0,6266478	-55,3647	1	0	0	4,9313
0,56082584	-67,0185	0	0	0	18,9535
0,63662767	-63,6104	0	0	0	8,8039
0,62779724	-55,7986	1	0	0	48,0691
0,81598336	-63,6104	0	1	0	10,785
		10	4	3	

A Tabela 35 mostra em destaque as combinações escolhidas e seus respectivos erros para o quinto conjunto de posições do nó alvo. Note-se na Tabela 35 que todas as combinações que possuem geometria é iluminação aceitável possuem erro abaixo de 5 metros.

Tabela 35 Validação dos Resultados para a quinta posição do nó alvo do experimento de teste.

Geo	Px5	ib	Gb	ib^Gb	Erro obtido trilateração
0,6773652	-57,4630	1	0	0	5,7565
0,71277349	-57,4630	1	0	0	4,8671
0,7985364	-64,3522	0	1	0	2,9887
0,65043279	-57,2082	1	0	0	3,5394
0,62550345	-57,6735	1	0	0	4,8104
0,70127003	-65,4940	0	0	0	2,7526
0,77490024	-57,4064	1	1	1	2,4879
0,73555874	-65,4940	0	0	0	2,7887
0,73960942	-57,4064	1	0	0	11,3082
1	-64,0827	0	1	0	1,9517
0,58013935	-57,8437	1	0	0	4,8312
0,56976679	-66,6444	0	0	0	2,8045
0,55789244	-57,5663	1	0	0	2,6571
0,55657401	-66,6444	0	0	0	3,3943
0,6229429	-57,5663	1	0	0	5,1952
0,6266478	-64,8822	0	0	0	2,3499
0,56082584	-68,8047	0	0	0	2,6205
0,63662767	-57,7821	1	0	0	3,3234
0,62779724	-66,1969	0	0	0	3,9956
0,81598336	-66,1969	0	1	0	2,3825
		10	4	1	

A Tabela 36 mostra em destaque as combinações escolhidas e seus respectivos erros para o sexto conjunto de posições do nó alvo. Note-se na Tabela 36 que todas as combinações que possuem geometria é iluminação aceitável possuem erro abaixo de 5 metros.

Tabela 36 Validação dos Resultados para a sexta posição do nó alvo do experimento de teste.

Geo	Px6	ib	Gb	ib^Gb	Erro obtido trilateração
0,6773652	-59,6673	1	0	0	4,5413
0,71277349	-58,4227	1	0	0	3,9288
0,7985364	-63,2082	0	1	0	3,6852
0,65043279	-58,4227	1	0	0	2,5536
0,62550345	-59,0681	1	0	0	4,3983
0,70127003	-65,5417	0	0	0	4,2508
0,77490024	-59,0681	1	1	1	4,1779
0,73555874	-61,9556	1	0	0	4,0892
0,73960942	-57,9652	1	0	0	10,0134
1	-61,9556	1	1	1	4,8251
0,58013935	-59,7003	1	0	0	4,4408
0,56976679	-69,5372	0	0	0	4,3882
0,55789244	-59,7003	1	0	0	4,368
0,55657401	-63,2833	0	0	0	7,2881
0,6229429	-58,4475	1	0	0	5,549
0,6266478	-63,2833	0	0	0	4,8404
0,56082584	-65,671	0	0	0	4,5592
0,63662767	-59,0969	1	0	0	4,5415
0,62779724	-65,671	0	0	0	4,8799
0,81598336	-62,0117	1	1	1	4,8401
		13	4	3	

7. CONCLUSÕES

7.1 CONCLUSÕES GERAIS

As conclusões mais relevantes do presente são descritas a seguir:

A presente dissertação abordou o desenvolvimento de um algoritmo de localização para redes sem fio. O modo mais comum de realizar localização baseada em sinal de rádio frequência (RF) é utilizar a potência do sinal recebido *Received Signal Strength Indication* (RSSI) dos transmissores presentes no ambiente. A ideia foi utilizar a relação entre o RSSI e a distância entre transmissor e receptor. Com relação aos experimentos, o ambiente permitiu verificar a viabilidade do algoritmo desenvolvido através da métrica de desempenho da raiz quadrática média. Para o caso de estudo os resultados das métricas de desempenho foram satisfatórios;

Para avaliar aspectos envolvidos na localização foi necessário entender quais são os fatores que mais afetam a qualidade da localização de sistemas baseados em RF. Foram apresentados dois fatores de fundamental importância nesse aspecto. Primeiro, a configuração geométrica dos nós de referência. Segundo, o número de nós de referência. Os estudos de caso apresentados mostram a forma como foram distribuídos no ambiente e como afetam significativamente a qualidade da localização;

O trabalho abordou a criação e avaliação de critérios de escolha para obter conjuntos de três transmissores com probabilidade de erros de localização baixos. A avaliação dos critérios é feita através da construção de uma tabela de probabilidade conjunta obtida a partir da aplicação da regra de Bayes em dados experimentais com erro de posicionamento conhecido. O critério de geometria está associado a posição dos transmissores e o critério de potência está associado a posição do ponto alvo. Um resultado importante no desenvolvimento do trabalho foi a constatação que uma técnica probabilística foi capaz de avaliar um conjunto de critérios que obtiveram sucesso ao preverem erros menores do que 5 metros em 100% dos casos através da escolha adequada dos transmissores. Isso leva a concluir que, embora o limite desse trabalho tenha sido estabelecido em 5 m, erros de distâncias menores podem ser obtidas.

7.2 SUGESTÕES PARA FUTURO TRABALHOS E PESQUISAS

As possíveis sugestões que possam ser considerados para trabalhos futuros são:

- Ampliar o número de experimentos para verificar o potencial do algoritmo para escolha de sensores de baixo erro;
- Realizar medidas em ambientes fechados verificando a capacidade do método;
- Analisar com mais profundidade a independência ou não dos critérios;
- Ampliar o algoritmo para incluir aprendizagem bayesiana buscando reduzir ainda mais o erro de localização;
- Ampliar nos experimentos a quantidade de nós de referência e um gerenciador WH;
- Ampliar o algoritmo de localização para incluir informação do número de saltos na rede.
- Utilizar os critérios apresentados nessa dissertação para escolher rotas otimizadas para a rede WH.

REFERÊNCIAS

- AKYILDIZ, I. F. et al. Wireless Sensor Networks: A survey. **Computer Networks**, Amsterdam, v. 38, n. 4, p. 393-422, Mar. 2002.
- ANDERSEN, J.B. et al. Propagation Measurements and Models for Wireless Communications Channels. **IEEE Communications Magazine**, New York, v. 33, p. 42-49, Jan. 1995.
- BAHL, P.; PADMANABHAN, V. An In-Building RF-based User Location and Tracking System. In: COMPUTER AND COMMUNICATIONS SOCIETIES CONFERENCE, 2000, Aviv. **Proceedings...** New York: IEEE, Mar 2000. v. 12, p. 775-784.
- BEKKALI, A.; MATSUMOTO, M. Bayesian Sensor Model for Indoor Localization in Ubiquitous Sensor Network. In: INNOVATION IN NGN: FUTURE NETWORK AND SERVICES. K-INGN, 2008, Geneva. **Proceedings...** New York: IEEE, May 2008. p. 285-292.
- CASTRO, P. et al. A Probabilistic Room Location Service for Wireless Networked Enviroments. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON UBIQUITOUS COMPUTING (UBICOMP), 2001, Atlanta. **Proceedings...** Berlin: Springer-Verlag, 2001. p. 18-34.
- CHANG, C.H.; LIAO, W. A Probabilistic Model for Relative Location Estimation in Wireless Sensor Networks. **IEEE Communications Letters**, New York, v. 13, p. 893-895, Dec 2009.
- CHEN, D. et al. **WirelessHART: Real-Time Mesh Network for Industrial Automation**. New York: Springer, 2010.
- CHEN, P. A Non-Line-of-Sight Error Mitigation Algorithm in Location Estimation. In: WIRELESS COMMUNICATIONS AND NETWORKING CONFERENCE, 1999, New Orleans. **Proceedings...**New York: IEEE, 1999, p. 316-320.
- CHINTALAPUDI, K. et al. Indoor Localization Without the Pain. In: INTERNACIONAL CONFERENCE ON MOBILE COMPUTING AND NETWORKING, 2010, New York. **Proceedings...** New York: MOBICOM'10, Sept 2010, p. 173-184.
- COSTA, J.A. et al. Achieving High-Accuracy Distributed Localization in Sensor Networks. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ACOUSTICS, SPEECH, AND SIGNAL PROCESSING, 2005, Philadelphia. **Proceedings...** New York: IEEE, 2005. p. 641-644.
- ELNAHRAWY, E. et al. The Limits of Localization using Signal Strength: a Comparative Study. In: SENSOR AND AD HOC COMMUNICATIONS AND NETWORKS SECON, 2004, Santa Clara. **Proceedings...** New York: IEEE, Oct 2004. p. 406-414.

- FENG, J. et al. Location Discovery using Data-Driven Statistical Error Modeling. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER COMMUNICATIONS INFOCOM, 2006, Barcelona. **Proceedings...** New York: IEEE, April 2006. p. 1-14.
- HAN, S. et al. HartFi: An Energy-efficient Localization System. In: ACM SIGCOMM WORKSHOP, 2011, Toronto. **Proceedings...** [S.l.]: ACM Sigcom, August 2011. p. 25-30.
- HART COMMUNICATION FOUNDATION. **HCF_SPEC-290:WirelessHART Device Specification.** Austin, 2008c.
- HART COMMUNICATION FOUNDATION. **HCF_SPEC-065:2.4GHZ DSSS O-QPSK Physical Layer Specification.** Austin, 2007.
- HART COMMUNICATION FOUNDATION. **HCF_SPEC-075:TDMA Data Link Layer Specification.** Austin, 2008a.
- HART COMMUNICATION FOUNDATION. **HCF_SPEC-085: Network Management Specification.** Austin, 2009.
- HART COMMUNICATION FOUNDATION. **HCF_SPEC-155:Wireless Command Specification.** Austin, 2008b.
- HAZAS, M. A Novel Broadband Ultrasonic Location System. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON UBIQUITOUS COMPUTING (UBICOMP), 2002, Göteborg. **Proceedings...**Berlin: Springer, 2002. p. 264-280.
- HERNANDEZ, O. **Position Location Monitoring Using IEEE 802.15.4/ZigBee Technology.** Disponível em: <<http://www.freescale.com/files/microcontrollers/doc/brochure/PositionLocationMonitoring.pdf>>. Acesso em: 03 Mar. 2014.
- JENSE, F. **Bayesian Networks and Decision Graphs.** 1. ed. New York: Springer-Verlag, 2001.
- KADKHODA, M. et al. A Probabilistic Fuzzy Approach for Sensor Location Estimation in Wireless Sensor Networks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FUZZY SYSTEMS FUZZ, 2010, Barcelona. **Proceedings...** New York: IEEE, July 2010. p. 1-5.
- KARL, H.; WILLIG, A. **Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks.** Hoboken: Wiley-Interscience, 2005.
- KEENAN J. M.; MOTLEY A. J. Personal Communication Radio Coverage in Buildings at 900 MHz and 1700 MHz. **Electronics Letters**, New York, v. 8, n. 1, p. 19-24, 1990.
- KOTZ, D. et al. **The Mistaken Axioms of Wireless Network Research.** Technical Cidade Report, TR2003-67. Department of Computer Science, Dartmouth College. Hanover, New Hampshire: Dartmouth College, 2003.
- KRUMM, J. **Minimizing Calibration Effort for an Indoor 802.11 Device Location Measurement System.** Disponível em: <<http://research.microsoft.com/pubs/68919/tr-2003-82.pdf>>. Acesso em: 05 Fev. 2014.

- LANZISERA, S et al. **RF Time of Flight Ranging for Wireless Sensor Network Localization**. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON INTELLIGENT SOLUTIONS IN EMBEDDED SYSTEMS, 2006 IEEE, 2006, Vienna. **Proceedings...** New York: IEEE, 2006. p. 1-12.
- LASSONEN, K. **Radio Propagation Modeling**. Disponível em: <http://www.cs.helsinki.fi/u/floreen/adhoc/laasonen_slides.pdf>. Acesso em: 15 Mar. 2014.
- LISBOA, M. **Localização em Ambientes Internos Utilizando Múltiplas Tecnologias Sem Fio**. 2011. 145 p. Tese (Mestrado em Ciência da Computação) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.
- LOUREIRO, A. et al. Redes de Sensores Sem Fio. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE REDES DE COMPUTADORES (SBRC) 21, 2003, Natal. **Anais...** Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Computação (SBC), 2003. p. 179-226.
- MOTTER, P. et al. Practical Issues in Wireless Sensor Network Localization Systems Using Received Signal Strength Indication. In: SENSOR APPLICATIONS SYMPOSIUM (SAS), 2011, San Antonio. **Proceedings...** New York: IEEE, 2011. p. 227-232.
- MULLER, I.; NETTO, J.C.; PEREIRA C.E. WirelessHART Field Devices. **IEEE Instrumentation & Measurement Magazine**, New York, v. 14, p. 20-25, Dec. 2011.
- NICULESCU, D., NATH, B. Ad-Hoc Positioning System. In: GLOBAL TELECOMMUNICATIONS CONFERENCE (GLOBECOM), 2001, Texas. **Proceedings...** New York: IEEE, 2001. v.15, p. 2926-2931.
- PATWARI, N. et al. Locating the nodes: cooperative localization in wireless sensor networks. **IEEE Signal Processing Magazine**, New York. v. 22, n. 4, p. 54-69, July 2005.
- PENG, R.; SICHITIU M. L. Probabilistic Localization for Outdoor Wireless Sensor Networks. **ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review**, New York, v. 11, p. 3-14, Jan. 2007.
- RAPPAPORT, T. S. **Wireless Communications: Principles and Practice**. 2nd. ed. San Antonio: Prentice Hall, 2002.
- RIBEIRO, J.; CATEN, C. **Projeto de Experimentos**. Porto Alegre: UFRGS, 2000.
- RUSSELL, S.; NORVIG, P. **Inteligência Artificial**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elseiver, 2004.
- TRENTIN, F. P. **Sistema de Localização e Sensoriamento de Objeto Alvo Utilizando Redes de Sensores Sem Fio**. 2011.80 p. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
- WHANG, N.; ZHANG, N.; WHANG, M. Wireless Sensors in Agriculture and Food Industry Recent Development and Future Perspective. **Computer and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v.50, n. 1, p. 1-14, Jan. 2006.
- WINTER, J. M. **Software de Análise de Roteamento de Dispositivos WirelessHART**. 2010. 117 p. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

ZHU, X. et al. A Location-determination Application in WirelessHART. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EMBEDDED AND REAL-TIME COMPUTING SYSTEMS AND APPLICATIONS (RTCSA), 2009, Beijing. **Proceedings...** New York: IEEE, 2009, p. 263-270.

ZHU, X. et al. RoamingHART: A Collaborative Localization System on WirelessHART. In: REAL TIME AND EMBEDDED TECHNOLOGY AN APPLICATIONS SYMPOSIUM (RTAS), 2012, Beijing. **Proceedings...** New York: IEEE, 2012, p. 241-250.