

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PAULO FERNANDO MOTTER

**SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO DE OBJETOS ALVO
UTILIZANDO REDE DE SENSORES SEM FIO**

Porto Alegre

2010

PAULO FERNANDO MOTTER

**SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO DE OBJETOS ALVO
UTILIZANDO REDE DE SENSORES SEM FIO**

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para Graduação em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: PROF. DR. CARLOS EDUARDO PEREIRA

Porto Alegre
2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PAULO FERNANDO MOTTER

SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO DE OBJETOS ALVO UTILIZANDO REDE DE SENSORES SEM FIO

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina de “Projeto de Diplomação”, do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Carlos Eduardo Pereira, UFRGS

Doutor pela Technische Universität Stuttgart – Stuttgart, Alemanha

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Eduardo Pereira, UFRGS

Doutor pela Technische Universität Stuttgart – Stuttgart, Alemanha

Prof. Dr. Marcelo Götz, UFRGS

Doutor pela Universität Paderborn – Paderborn, Alemanha

Mestre Rodrigo Schmidt Allgayer, UFRGS

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

Porto Alegre, Julho de 2010

DEDICATÓRIA

A Damiano Motter (*in memoriam*).

AGRADECIMENTO

Ao professor Carlos Eduardo Pereira por ter me acolhido no seu grupo de pesquisa, ao Rodrigo Schmidt Allgayer pelo esforço constante em me ajudar e aconselhar ao longo do projeto e ao Ivan Muller pelo espaço cedido, pelas diversas dicas e apoio ao trabalho.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, especialmente ao Departamento de Engenharia Elétrica e seus professores, pelo ensino de qualidade.

Aos companheiros de curso, àqueles que já se formaram e aos que ainda me acompanham. Aos que continuam na luta: não desistam, pois há luz no fim do túnel.

Aos amigos que me auxiliam na minha caminhada, tanto acadêmica como pessoal, e que tornam a vida mais tranquila e leve. Especialmente aos “*los proxenetas*” e à “*brotherhood*”, companheiros de todos os momentos.

À minha namorada Julia pela compreensão e pelo suporte nas dificuldades, além do incentivo para eu sempre continuar no trilho certo.

Finalmente, à minha maravilhosa família, pois com certeza sem eles eu não estaria aqui. Obrigado pelo carinho e dedicação. Em especial ao meu pai pelos conselhos e à minha mãe pelo amor, por ter sempre lutado por melhores condições e pelo empenho na minha educação.

RESUMO

O advento de redes de sensores sem fio trouxe muitos benefícios para a sociedade por suas características, como atividades colaborativas, baixo custo, aumento da autonomia dos equipamentos e tolerância a falhas. Por conta de suas vantagens, o número de aplicações que utilizam esse tipo de rede aumentou muito, podendo atuar em áreas militares, residenciais, industriais ou até mesmo na agricultura. Enquanto isso, surge a possibilidade de empregar esse tipo de rede para situações onde se precisa descobrir a localização de um determinado objeto, que participa da rede, mas cuja posição varia no tempo.

O presente trabalho visa o estudo e desenvolvimento de uma aplicação de localização através do uso de redes de sensores sem fio. Para tanto são analisadas os diferentes métodos para obter distâncias entre os nós da rede, algoritmos para sintetizar os dados e resultar nas coordenadas, bem como topologias de implementação.

Finalmente, buscam-se realizar simulações e testes práticos da solução encontrada, com o intuito de analisar a viabilidade e as vantagens do sistema proposto.

Palavras chaves: Engenharia Elétrica. Redes de Sensores Sem Fio. Localização.

ABSTRACT

The emergence of Wireless Sensor Networks brought many benefits to society for its characteristics, as collaborative tasks, low costs, the increase of the equipment's autonomy and higher tolerance to failures. As for its advantages, the number of applications that uses this kind of network has grown in the past few years, being used in military, residences, industries and even in agriculture sectors. Meanwhile, the possibility of employing the WSN arises in situations where the location of some unknown, a member of the network that changes position over time, needs to be found.

The present work aims at the study and development of a location application through the use of Wireless Sensor Networks. The task involves the analysis of different methods to obtain the distances between network nodes, algorithms to synthesize the data and to result in the final nodes coordinates, as well as the study of implementation's topologies.

Finally, simulations and practical tests are done in order to analyze the viability and advantages of the developed system.

Keywords: Electrical Engineering. Wireless Sensor Network. Localization.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Motivação.....	15
1.2	Objetivo.....	16
1.3	Organização do Trabalho.....	17
2	REDES DE SENSORES SEM FIO.....	19
2.1	Características Gerais	19
2.2	Características do Nó Sensor.....	21
2.3	Aplicações.....	23
3	IEEE 802.15.4 / ZIGBEE.....	26
3.1	A Camada Física (PHY)	26
3.2	A Camada de Enlace (MAC).....	28
3.3	Simple Media Access Controller (SMAC)	30
3.4	ZigBee.....	30
4	KIT MC1322XX FREESCALE	33
4.1	Características Gerais	33
4.2	Antenas.....	35
5	PROPAGAÇÃO DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS	41
5.1	Modelos de Propagação	41
5.2	Reflexão.....	43
5.3	Espalhamento.....	43
5.4	Difração.....	44
5.5	Zonas de Fresnel	44
5.6	Desvanecimento	45
6	MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE DISTÂNCIA	47
6.1	Direction of Arrival (DOA)	47
6.2	Time of Arrival (TOA)	47
6.3	Time Difference of Arrival (TDOA).....	48
6.4	Received Signal Strength Indicator (RSSI)	49
7	MODELOS DE LOCALIZAÇÃO	51
7.1	Fingerprinting.....	51
7.2	Trilateração.....	52
8	DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE.....	55
8.1	Topologia.....	55
8.2	Calibração	58
8.3	Software Embarcado	61

8.4	Software no Computador	66
8.5	Simulações.....	69
8.5.1	Sem ruído	70
8.5.2	Com ruído branco	71
9	TESTES.....	77
9.1	Ambiente Interno.....	77
9.1.1	Calibração.....	79
9.1.2	Medições utilizando 3 nós de referência	79
9.1.3	Medições utilizando 4 nós de referência	81
9.2	Ambiente Externo	83
9.2.1	Calibração.....	84
9.2.2	Medições utilizando 3 nós de referência	85
9.3	Conclusões dos Testes	86
10	ESTUDOS DE CASO	88
10.1	Ambient Assisting Living	88
10.2	Monitoramento de Animais em Fazendas.....	90
11	CONCLUSÃO.....	94
11.1	Trabalhos Futuros	96

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Topologia de uma Rede de Sensores Sem Fio.	19
Figura 2 - Evolução da tecnologia de sensores ao longo dos anos.	20
Figura 3 - Arquitetura de um nó sensor sem fio.	21
Figura 4 - Comunicação entre nós com (a) e sem sinalizadores (b).	29
Figura 5 - Pilha de protocolos IEEE 802.15.4 e ZigBee.	31
Figura 6 - Topologias de redes ZigBee.	32
Figura 7 - Circuito integrado MC13224V.	33
Figura 8 - Placas 1322x-NCB (a), SRB (b) e LPB (c).	34
Figura 9 - Antena-F (a) e omni-direcional (b).	35
Figura 10 - Diagrama de irradiação da antena-F.	37
Figura 11 - Diagrama de irradiação da antena omni-direcional.	38
Figura 12 - ROE da antena omni-direcional.	39
Figura 13 - ROE da antena omni-direcional com funcionamento divergente.	40
Figura 14 - Efeitos na propagação de ondas: reflexão (a), difração (b) e espalhamento (c).	43
Figura 15 - Efeitos de desvanecimentos no sinal propagado.	46
Figura 16 - Exemplo de localização por trilateração bi-dimensional.	53
Figura 17 - Exemplo de aplicação do projeto.	56
Figura 18 - Topologia de aplicação do projeto.	57
Figura 19 - Diagrama de troca de mensagens.	58
Figura 20 - Fluxo de dados entre o nó-base e o computador pessoal.	58
Figura 21 - Exemplo de levantamento de curva de calibração.	60
Figura 22 - Fluxograma de estados do nó móvel.	63
Figura 23 - Fluxograma de estados do nó de referência.	64
Figura 24 - Fluxograma de estados do nó base.	65
Figura 25 - Fluxograma de estados do <i>software</i> no computador.	67
Figura 26 - Tela do programa desenvolvido para execução no PC.	68
Figura 27 - Simulação da trajetória do objeto alvo.	70
Figura 28 - Tela do programa de localização exibindo a trajetória simulada.	71
Figura 29 - Gráfico de ruído branco aditivo.	72
Figura 30 - Simulação da trajetória do objeto alvo com ruído branco.	73
Figura 31 - Gráfico de erro na posição devido ao ruído branco, com 3 referências.	74
Figura 32 - Gráfico de erro na posição, com 4 referências e média de trilateração.	75
Figura 33 - Gráfico de erro na posição, com 4 referências excluindo o nó mais distante.	76
Figura 34 - Ambiente interno utilizado para os testes.	78
Figura 35 - Curva de calibração utilizando antenas omni-direcionais em ambiente interno. ...	79
Figura 36 - Erros do algoritmo de localização utilizando a antena omni-direcional.	80
Figura 37 - Erros do algoritmo de localização utilizando o nó móvel com antena F.	82
Figura 38 - Comparação entre percurso calculado e real.	83
Figura 39 - Ambiente externo utilizado para os testes.	83
Figura 40 - Curva de calibração utilizando antenas omni-direcionais em ambiente externo. .	84

Figura 41 - Erros do algoritmo de localização no ambiente externo.	86
Figura 42 - Exemplo de topologia de ambiente inteligente.	89
Figura 43 - Topologia de aplicação de monitoramento de animais.	91
Figura 44 - Leitura da aceleração do animal.	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Bandas de frequência e taxas de transferência da norma IEEE 802.15.4.....	27
Tabela 2 - Quadro da camada física da norma IEEE 802.15.4.....	27
Tabela 3 - Quadro da camada de enlace da norma IEEE 802.15.4.	28
Tabela 4 - Quadro de mensagem trocado entre os nós.	62
Tabela 5 - Quadro enviado via UART ao PC.....	66
Tabela 6 - Detalhe dos dados do Nó 1 enviado via UART ao PC.....	66
Tabela 7 - Erros do algoritmo de localização utilizando a antena omni-direcional.	80
Tabela 8 - Erros do algoritmo de localização para diferentes métodos de cálculo.....	82
Tabela 9 - Erros do algoritmo de localização no ambiente externo.....	85

LISTA DE ABREVIATURAS

AAL – Ambient Assisted Living

ANSI – American National Standards Institute

AP – Access Point

BPSK – Binary Phase Shift Keying

BSN – Body Sensor Network

CCA – Clear Channel Assessment

CI – Circuito Integrado

CSMA – Carrier Sense Multiple Access

CSMA/CA – Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance

DOA – Direction of Arrival

DSSS – Direct Sequence Spread Spectrum

ED – Energy Detection

FFD – Full Function Device

FPGA – Field-Programmable Gate Array

GPRS – General Packet Radio Service

GPS – Global Positioning System

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers

JTAG – Joint Test Action Group

LOS – Line of Sight

LQI – Link Quality Indicator

LR-WPAN – Low Rate Wireless Personal Area Network

MAC – Medium Access Control

NB – Nó-Base

NF – Nó-Fixo

NM – Nó-Móvel

O-QPSK – Offset Quadrature Phase Shift Keying

PC – Personal Computer

PHY – Physical Layer

PIFA – Printed Inverted F Antenna

PPDU – Physical Protocol Data Unit

RF – Rádio Frequência

RFD – Reduced Function Device

ROE – Relação de Ondas Estacionárias

RSSF – Rede de Sensores Sem Fio

RSSI – Received Signal Strength Indicator

SMA – Sub Miniature version A

SMAC – Simple Media Access Controller

TOA – Time of Arrival

TDOA – Time Difference of Arrival

UART – Universal Asynchronous Receiver/Transmitter

USB – Universal Serial Bus

VCL – Visual Component Library

WPAN – Wireless Personal Area Network

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

Nos últimos anos, o desenvolvimento tecnológico em setores como circuitos integrados, sensores e comunicações sem fio aumentou drasticamente, levando à concepção de novas arquiteturas e integrando diversas áreas, como é o caso das Redes de Sensores Sem Fio (RSSF), que possibilitam a intercomunicação de diferentes nós sensores espalhados em um determinado ambiente. As aplicações para tal tecnologia são diversas, como por exemplo, monitoramento, rastreamento, coordenação e coleta de informações [1].

Os nós desse tipo de rede são caracterizados por operarem em conjunto com os outros equipamentos participantes da RSSF e normalmente em áreas remotas ou de difícil acesso, sendo então necessário que estes equipamentos tenham baixo consumo de energia, visando um aumento no “tempo de vida”, sem a necessidade de troca ou recarga de baterias. Ainda, por possuírem apenas sensores integrados e um módulo de rádio frequência instalado, estes equipamentos são tipicamente de pequeno tamanho e baixo custo, o que permite a instalação de vários nós em uma mesma rede, com um pequeno custo total de projeto [2].

Sistemas de rastreamento e localização de objetos estão se tornando mais comuns, facilitando muitas atividades do cotidiano em diversas áreas, como militar, doméstica, agropecuária, entre outras. As aplicações podem envolver desde o rastreamento de um sensor em busca da coleta de dados de outros sensores em ambientes hostis até o acionamento de equipamentos em um ambiente residencial, baseado na localização do alvo.

Neste âmbito de RSSF, é fácil imaginar as vantagens que um sistema de localização teria em comparação a métodos já existentes. Considerando o *Global Positioning System* (GPS) [3], este normalmente não é operante em locais fechados devido ao bloqueio do sinal proveniente dos satélites geoestacionários. Mesmo considerando ambientes externos, seus

módulos têm um maior custo e consumo de energia, sendo argumentos críticos desfavoráveis em uma rede de sensores. Outros métodos de localização podem incluir medições por ultrassom ou ainda por infravermelho, contudo estes encontram como dificuldade a necessidade de linha de visada, tendo o objeto alvo que estar direcionado ao sensor fixo, além de não poder haver obstáculos no caminho e ser necessária a implementação de *hardwares* adicionais ao equipamento.

1.2 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um sistema de localização de alvos móveis utilizando uma rede de sensores sem fio. Os critérios chave a serem considerados são: baixo custo da aplicação final, fácil instalação e configuração dos equipamentos, desenvolvimento de uma interface gráfica para visualização e rastreamento do objeto alvo e uma precisão suficientemente satisfatória das coordenadas resultantes.

Para tanto, foi escolhido como norma o padrão IEEE 802.15.4, um dos mais utilizados atualmente para RSSF, justamente por sua simplicidade, desempenho, baixo consumo e distâncias satisfatórias de comunicação entre nós alcançadas. O *hardware* escolhido para o desenvolvimento do projeto é o kit Freescale MC1322xx disponível no Laboratório de Sistemas de Controle, Automação e Robótica (LASCAR) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Durante esse trabalho é estudada a melhor maneira de se implementar um sistema de localização utilizando redes de sensores sem fio e como obter a distância dos nós. Também é desenvolvido um *firmware* para utilização nos equipamentos do projeto, bem como uma aplicação gráfica supervisora que roda em um computador pessoal, recebe as informações dos participantes da rede e exibe os resultados na tela. Diversas simulações e testes são

executados de forma a obter resultados da aplicação desenvolvida, bem como testar possíveis alterações que possam trazer melhorias ao projeto final.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Os capítulos que seguem descrevem os conceitos envolvidos no estudo do trabalho, assim como as etapas de desenvolvimento para finalmente chegar-se aos testes e resultados práticos. O trabalho encontra-se organizado da seguinte forma:

- O Capítulo 2 explica o que são redes de sensores sem fio, suas características e suas aplicações;
- O Capítulo 3 detalha as normas IEEE 802.15.4 e SMAC utilizadas neste projeto, em suas diferentes camadas físicas e de enlace, bem com uma noção de outras normas associadas, como o ZigBee;
- O Capítulo 4 caracteriza os nós sensores utilizados no desenvolvimento do projeto;
- O Capítulo 5 estuda as propagações de ondas eletromagnéticas, seus modelos e efeitos que interferem na transmissão do sinal;
- O Capítulo 6 cita os diferentes métodos de obtenção da distância entre os nós, analisando suas viabilidades no presente projeto;
- O Capítulo 7 compara os algoritmos disponíveis para, a partir das diferentes distâncias conhecidas, obter a localização final do objeto alvo;
- O Capítulo 8 descreve o desenvolvimento dos programas implementados nos nós sensores e no computador pessoal, as topologias envolvidas, como as mensagens são trocadas, os diagramas de estados, o procedimento de calibração e finalmente simulações realizadas com o objetivo de comprovar a eficácia dos algoritmos desenvolvidos;

- O Capítulo 9 apresenta os resultados dos diferentes testes realizados, analisando os dados a fim de se obter uma melhor solução final;
- O Capítulo 10 traz exemplos de aplicação deste projeto, como ele pode ser implementado e os seus benefícios;
- O Capítulo 11 resume o projeto realizado, trazendo conclusões e propostas para projetos futuros relacionados ao tema aqui apresentado.

2 REDES DE SENSORES SEM FIO

2.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS

Redes de Sensores Sem fio (RSSF) consistem basicamente de sensores autônomos distribuídos espacialmente para cooperativamente monitorar condições ambientais, repassar essas informações a algum agente externo ou mesmo agir localmente de acordo com seu funcionamento. Este tipo de rede pode ser vista como uma evolução de redes sem fio ad-hoc, porém especialmente voltadas para execução de tarefas colaborativas, com maior confiabilidade e menor consumo de energia, não necessitando de uma estrutura pré-existente para prover comunicação entre os membros participantes da rede [4].

As RSSF só tornaram-se possíveis devido ao grande avanço da tecnologia em termos de circuitos digitais e sistemas mecânicos micro-eletrônicos (MEMS), que permitiram a miniaturização dos componentes, juntamente com o aumento no processamento de dados e a diminuição do consumo de energia. Todos esses fatores, aliados com as muitas aplicações em que as redes de sensores podem ser utilizadas, tornaram essa tecnologia extremamente utilizada atualmente [1].

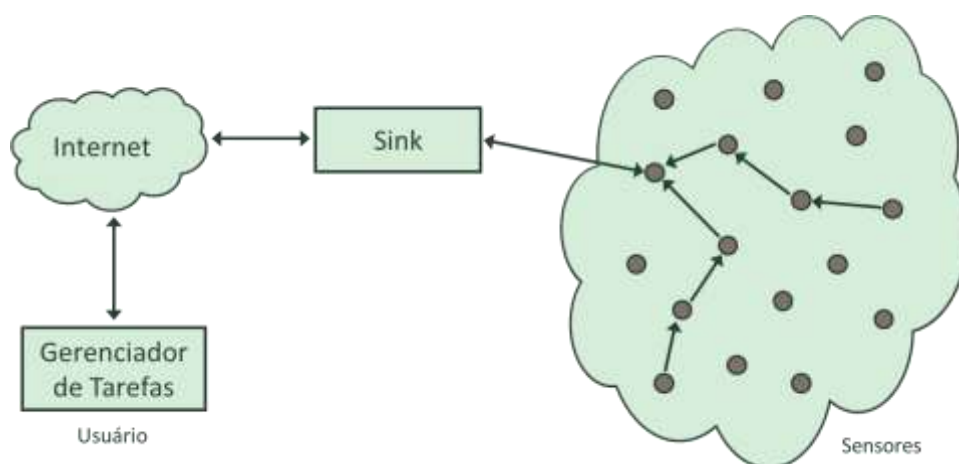


Figura 1 - Topologia de uma Rede de Sensores Sem Fio.

Cada nó participante da rede pode ser equipado com uma variedade de sensores, que não precisam ser os mesmos em todos os nós. Esses dispositivos então são capazes de

detectar determinados eventos em algum local específico, processando-o e tomando alguma decisão com base nele, seja agindo diretamente ou repassando a informação para os outros nós e, eventualmente, a um supervisor de tarefas. Além dos sensores, os nós possuem um módulo para comunicação sem fio com os outros membros da rede. A Figura 1 apresenta um exemplo de topologia de uma RSSF.

Conforme já citado, o desenvolvimento tecnológico, principalmente na área de semicondutores, permitiu uma grande expansão do segmento de sensores, bem como unidades de computação cada vez menores e com maior capacidade de processamento. A Figura 2 apresenta a evolução no tamanho dos sensores com o passar dos anos.

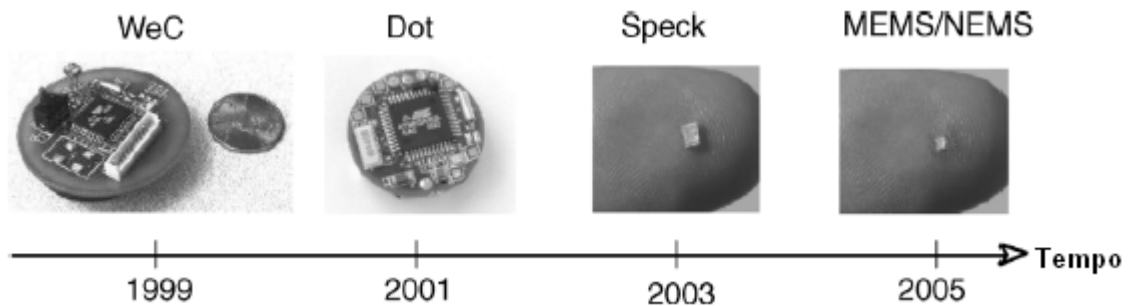


Figura 2 - Evolução da tecnologia de sensores ao longo dos anos.

Portanto, tamanho é um requisito fundamental exigido quando se está desenvolvendo um nó sensor, porém não é o único. Outros aspectos importantes que devem ser observados em uma RSSF são:

- **Cooperação:** esse talvez seja o ponto chave em torno da qual as redes de sensores se desenvolveram. Através da cooperação, os nós podem tomar ações baseadas nas informações de outros equipamentos que estão na mesma ou até em outra área. Também podem agrupar os dados para posteriormente enviá-los a um supervisor;
- **Autonomia:** o baixo consumo de energia é essencial para que o dispositivo possa ser operante durante muito tempo (na maioria das vezes funcionando por meses ou até anos) sem a necessidade de manutenção ou recarga, podendo

então os nós serem espalhados em áreas inóspitas, pois não requerem constante intervenção humana;

- Tolerância a falhas: visto que a rede deve possuir autonomia para funcionar sem intervenção externa, ela também deve ser confiável o suficiente para se auto-ajustar no caso da falha de algum dispositivo. Para isso, desenvolvem-se diversos algoritmos de correção de erros, roteamento de pacotes, redundância de mensagens entre outras. Em alguns casos, é importante também a segurança dos dados transmitidos, adicionando-se criptografia, autenticação ou outros algoritmos de proteção;
- Custo: este critério conflita com praticamente todos os outros aspectos. Quanto maior o desempenho, menor tamanho, maior confiabilidade e a autonomia, maior será o custo. No entanto, o projeto deve buscar balancear esses requisitos, buscando um ponto de equilíbrio. O baixo custo é importante, pois diversas aplicações necessitam de muitos equipamentos instalados, podendo o custo alto torná-las inviáveis.

2.2 CARACTERÍSTICAS DO NÓ SENSOR

Um típico nó participante de uma rede de sensores possui quatro unidades principais: energia, sensoriamento, computação e comunicação, que são exibidas na Figura 3.

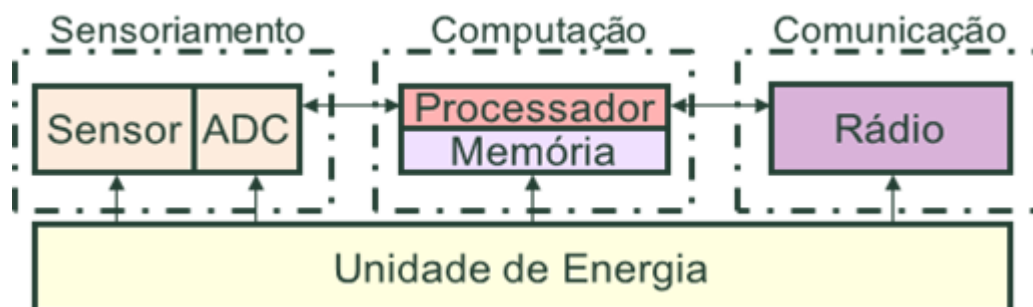


Figura 3 - Arquitetura de um nó sensor sem fio.

A unidade de sensoriamento caracteriza-se pela medição de grandezas físicas, que são adquiridas em sinais analógicos e são digitalizadas por um conversor analógico-digital, de forma que a unidade de computação possa corretamente processar as informações. Existem diversos tipos de sensores que podem ser utilizados em uma RSSF. Alguns exemplos das variáveis que podem ser monitoradas são listados abaixo:

- Luminosidade;
- Pressão;
- Temperatura;
- Campo eletro-magnético;
- Som;
- Umidade;
- Luz infravermelha;
- Componentes químicos;
- Composição do solo;
- Aceleração;
- Imagens;
- Presença;
- Estresse mecânico.

A unidade de computação é a responsável por realizar o processamento das informações adquiridas pelo sensor e de encaminhá-las à unidade de comunicação. É basicamente composta ou por um microcontrolador, ou microprocessador com uma memória anexada ou até mesmo por uma FPGA, sendo essas escolhas feitas de acordo com a aplicação.

A unidade de comunicação é composta pelo transceptor, normalmente um rádio, responsável pelo envio e recebimento de mensagens com os outros participantes da rede. A comunicação é feita baseada em protocolos normalizados, de forma a obter-se garantia e

compatibilidade de transmissão. As principais normas utilizadas para as RSSF são o IEEE 802.15.1 (Bluetooth), IEEE 802.15.3 (Ultra-Wideband), IEEE 802.15.4 (ZigBee ou WirelessHART) e IEEE 1451.

A unidade de energia é a responsável por alimentar todas as outras unidades do nó. É importante salientar que para muitas aplicações o tempo de autonomia é fundamental. Assim a fonte de energia, normalmente uma bateria, deve ser o suficiente para que o equipamento funcione por esse tempo sem a necessidade de intervenção humana. Outros aspectos para o baixo consumo também devem ser observados, como funcionalidades de *idle* para processador e o rádio, quando não estiverem sendo utilizados, e até mesmo a leitura dos sensores, pois quanto maior o tempo de captura de informações, mais energia é necessária. Existem alguns equipamentos que possuem módulos capazes de recarregar suas baterias sem a necessidade de intervenção externa, como por captação solar, aumentando assim a autonomia do nó sensor.

2.3 APLICAÇÕES

O potencial de uso de RSSF alcança um grande número de áreas [2], [4], [5], [6], dentre elas:

- Militar: detecção de inimigos, monitoramento de uma determinada área, rastreamento, identificação de tropas inimigas e aliadas ou controle dos equipamentos em estoque. Para estas aplicações, segurança é um dos mais importantes requisitos, sendo então implementados algoritmos de criptografia e assinaturas digitais;
- Industrial: controle de estoque (no sentido de saber a localização e a quantidade de um determinado item), funções de monitoramento e segurança

(como vazamento de gás ou produtos químicos) ou permissão de acesso somente a pessoas autorizadas (que carregam um nó receptor em seu crachá);

- Aviação: como substituto para as redes cabeadas;
- Ambiental: monitoramento de animais no seu habitat natural, podendo obter suas localizações e dados como sinais vitais, sem a necessidade de deslocamento de alguma unidade até o animal (como era feito quando utilizando sensores de localização e antenas direcionais). Ainda pode ser utilizado para monitoração de variáveis ambientais, como temperatura, umidade, velocidade do vento e qualidade do ar, ou ainda para detecção de queimadas e erosões;
- Agricultura: controle de umidade e nutrientes no solo, permitindo uma irrigação e fertilização mais precisa, além de monitorar o surgimento de pestes. Como citado anteriormente, pode monitorar a localização e os sinais vitais dos animais da fazenda;
- Medicina e saúde: monitoramento de pacientes e seus sinais vitais (possivelmente alarmando numa situação de emergência) ou ainda automaticamente administrar a medicação a ser tomada,
- Tráfego: monitoramento de vias, controle de fluxo de carros, vagas em estacionamentos, permitindo também a interação com os carros para informar o motorista das situações do trânsito;
- Residência: integração dos eletrodomésticos e equipamentos da casa, formando um ambiente inteligente. Podem-se controlar variáveis do ambiente (como luz, temperatura, umidade) de acordo com a presença das pessoas em um determinado cômodo, evitando assim desperdícios de energia. Pode trazer ainda maiores facilidades, quando considerando uma aplicação voltada para

peças portadoras de necessidades especiais, onde as portas podem abrir sozinhas quando a pessoa se aproximar, traçar automaticamente a rota que a cadeira de rodas deve percorrer, entre outras.

3 IEEE 802.15.4 / ZIGBEE

A norma IEEE 802.15.4 [7], desenvolvida pelo Institute of Electrical and Electronics Engineers, especifica o padrão para as camadas físicas (PHY – *Physical*) e de enlace (MAC – *Medium Access Control*) para redes de área pessoal sem fio de baixa taxa de transmissão (LR-WPAN – *Low Rate Wireless Personal Area Network*). Esta norma é mantida pelo grupo IEEE 802.15, que também é responsável por outras tecnologias sem fio, como o Bluetooth, por exemplo. Suas principais características são o baixo custo, a baixa taxa de transmissão de dados, reduzido consumo de energia e o alcance satisfatório de comunicação dos módulos que empregam a norma.

3.1 A CAMADA FÍSICA (PHY)

A camada física pode operar em 3 diferentes bandas de frequência: 868 MHz (1 canal), 915 MHz (10 canais) e 2.4 GHz (16 canais). As duas primeiras são reservadas para uso na Europa e América do Norte, suportando taxas de 20 e 40 kbit/s, respectivamente. A última banda pode ser utilizada em todo o mundo, suportando até 250 kbit/s. As três utilizam como método de transmissão o *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS), que reduz o consumo de energia devido à baixa potência utilizada na transmissão de dados. Ainda, a faixa de 2.4 GHz apresenta modulação por mudança na fase da portadora do tipo O-QPSK (*Offset Quadrature Phase Shift Keying*), na qual um símbolo enviado representa 4 bits de dados. As outras duas faixas de frequência utilizam modulação do tipo BPSK (*Binary Phase Shift Keying*), o tipo mais simples de PSK, onde cada símbolo representa 1 bit de dados. A Tabela 1 resume as diferenças entre as faixas de frequências possíveis para o IEEE 802.15.4.

Tabela 1 - Bandas de frequência e taxas de transferência da norma IEEE 802.15.4.

Banda de frequência (MHz)	Taxa de transferência (kbit/s)	Número de canais	Modulação
868	20	1	BPSK
915	40	10	BPSK
2450	250	16	O-QPSK

A camada física é responsável pelas seguintes tarefas:

- Ativação e desativação do transceptor do rádio;
- Detecção de energia do canal atual;
- Indicador de qualidade do link (LQI) dos pacotes recebidos;
- Enviar o pacote de limpeza do canal para o CSMA-CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*);
- Seleção da frequência do canal;
- Transmissão de dados e recepção.

O formato do pacote de nível físico (PPDU – *Physical Protocol Data Unit*) do IEEE 802.15.4 pode possuir até 127 bytes de *payload* (sem os cabeçalhos). O cabeçalho de sincronismo (SHR) possui as informações que permitem a sincronização do dispositivo com o pacote na recepção do mesmo. O cabeçalho físico (PHR) contém a informação do tamanho do quadro, enquanto o *payload* possui os dados da camada de enlace. O PPDU é mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Quadro da camada física da norma IEEE 802.15.4.

SHR		PHR		<i>Payload</i>
Preâmbulo	SFD – Flag fixo	Tamanho do quadro	Reservado	Dados
4 bytes	1 byte	7 bytes	1 byte	Variável

3.2 A CAMADA DE ENLACE (MAC)

A camada de enlace provê o acesso à camada física do rádio e é responsável pela comunicação ponto a ponto entre os nós. Essa camada possui as seguintes tarefas:

- Gerar sinalizadores (*beacons*) para a rede, no caso de um nó coordenador;
- Sincronizar com os *beacons* da rede;
- Suportar associação e dissociação às PANs (redes de acesso pessoal);
- Segurança do dispositivo;
- Empregar o mecanismo de acesso CSMA-CA;
- Empregar o mecanismo de *timeslot* garantido (GTS);
- Prover um enlace confiável entre duas camadas MAC.

A norma define quatro diferentes tipos de quadro: sinalizador (*beacon*), confirmação (*acknowledgment*) e comando. Todos eles são baseados no quadro genérico da camada de enlace, apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Quadro da camada de enlace da norma IEEE 802.15.4.

MHR				<i>Payload</i>	MFR
Controle de quadro	Número de sequência	Campos de endereço	Segurança auxiliar	Dados	FCS
2 bytes	1 byte	Até 20 bytes	Até 14 bytes	Variável	2 bytes

O cabeçalho da camada de enlace (MHR) contém as informações sobre o tipo de quadro, o número de sequência (que varia de acordo com o tipo de pacote enviado), as identificações de endereços (da rede PAN destinatária e remetente e o endereço do equipamento destinatário e remetente) e um campo que informa as opções de segurança utilizadas no quadro. O *payload* contém os dados provindos da camada acima e o rodapé do MAC (MFR) contém a sequência de verificação de erros no quadro.

Para a comunicação dos dispositivos com o nó coordenador, existem dois modos possíveis: utilizando ou não os sinalizadores gerados pelo nó coordenador, conforme ilustrado

na Figura 4. No caso de se utilizar o sinalizador, um dispositivo na rede deve esperar o *beacon* vindo do coordenador para então sincronizar com ele utilizando o CSMA-CA, disputando com os outros dispositivos durante o período de tempo CAP (*Contention Access Period*), ou esperando sua vez durante o período de CFP (*Contention Free Period*), no qual existem *timeslots* reservados pelo coordenador para cada equipamento na rede. Em ambos os casos, um pacote de *acknowledgement* é opcional.

Existe ainda a possibilidade de comunicação entre dispositivos não coordenadores no modo *peer-to-peer*, não necessitando sincronização com sinalizadores para a troca de mensagens.

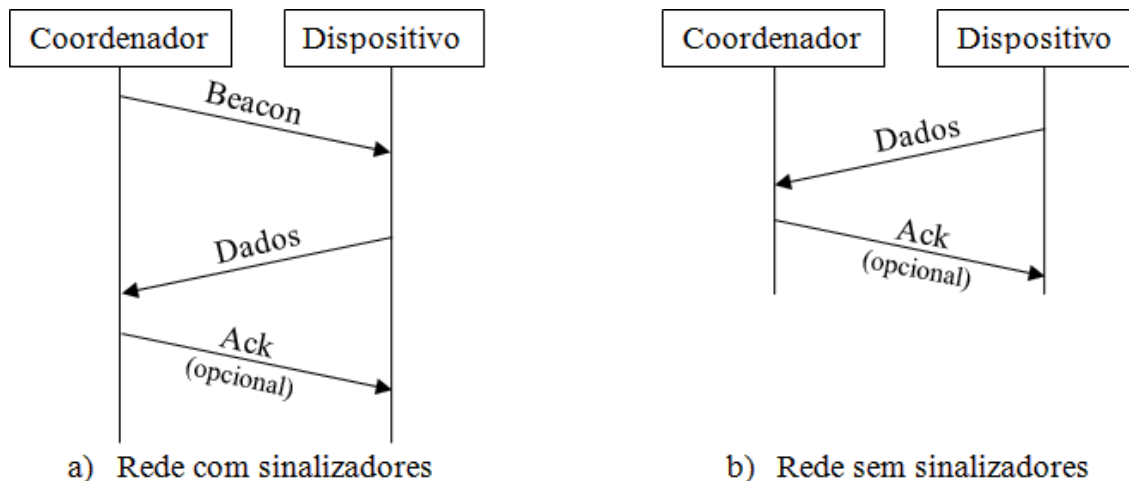


Figura 4 - Comunicação entre nós com (a) e sem sinalizadores (b).

A segurança na transmissão de dados é realizada na camada MAC. Para tanto é utilizado o Padrão de Criptografia Avançado (AES), o qual descreve rotinas de segurança utilizando chaves com comprimento de 128, 192 ou 256 bits. Desta forma obtém-se confidencialidade, integridade e autenticidade dos frames enviados pela camada MAC.

3.3 SIMPLE MEDIA ACCESS CONTROLLER (SMAC)

O *Simple Media Access Control* (SMAC) é uma pilha de códigos elaborada pela Freescale [8], baseada em ANSI C e também na camada física da IEEE 802.15.4. O seu principal objetivo é fornecer acesso à camada física do rádio de maneira simples, utilizando poucos recursos do microcontrolador, como o uso de pouca memória *Flash* (apenas 2,5 Kbits). O SMAC foi especialmente desenvolvido para operar nos rádios MC1319x, MC1320x, MC1321x e MC1322x da Freescale.

O SMAC para o MC1322x é uma camada de aplicação sobre a camada física, composto de várias primitivas que permitem acesso às funcionalidades do rádio, bem como seu gerenciamento.

3.4 ZIGBEE

O ZigBee [9] é uma especificação proprietária mantida pela ZigBee Alliance, que define os protocolos da camada de rede e aplicação sobre as camadas física e de enlace da norma IEEE 802.15.4. A pilha de protocolos da norma IEEE 802.15.4 e ZigBee é representada na Figura 5. Ainda que esta norma não tenha sido utilizada no projeto, foi incluída neste escopo, pois o seu uso foi inicialmente cogitado e posteriormente descartado em favor do SMAC, por sua simplicidade e cumprir com os requisitos exigidos.

Para garantir a interoperabilidade de equipamentos de diferentes fabricantes, o IEEE 802.15.4 definiu dois tipos de dispositivos: FFD (*Full Function Device*) e RFD (*Reduced Function Device*). O primeiro tipo pode operar como nó coordenador, organizando a rede, distribuindo endereços e comutando pacotes com outras redes, ou como nós finais. Já os RFDs, por terem *hardwares* mais simples, operam apenas como nós finais, podendo se comunicar apenas com outros nós da rede.



Figura 5 - Pilha de protocolos IEEE 802.15.4 e ZigBee.

As topologias em redes ZigBee podem ser do tipo estrela, agrupamento em árvore ou malha (*mesh*), conforme representadas na Figura 6. No primeiro tipo a topologia é centralizada, todos os dispositivos finais se comunicam apenas com o coordenador. A topologia em árvore adiciona um novo tipo de classe de dispositivo, os roteadores, que podem comunicar com o coordenador e com os nós finais, descentralizando um pouco a coordenação da rede. Por último, a topologia de malha permite que os nós roteadores se comuniquem entre si, aumentando ainda mais a descentralização da topologia.

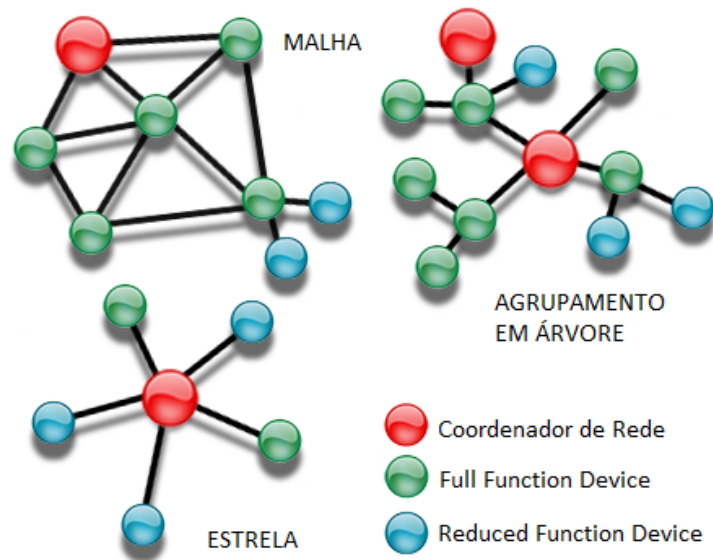


Figura 6 - Topologias de redes ZigBee.

4 KIT MC1322XX FREESCALE

4.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS

A companhia norte-americana de semicondutores Freescale, especializada em circuitos integrados voltados para o mercado de sistemas embarcados, desenvolveu uma plataforma integrada para módulos ZigBee, na série MC13224V [10]. Este circuito integrado foi especialmente criado para aplicações de baixo custo, baixo consumo e otimizado para redes sem fio, utilizando o padrão IEEE 802.15.4, adicionando as especificações ZigBee de protocolos de comunicação. O chip possui um microcontrolador 32-bits ARM7 integrado com desempenho de 24 MHz típico, juntamente com módulos transmissores e receptores de rádio-frequência (RF), operando na faixa de 2,4 GHz, com potência de emissão programável de -30 dBm a +4 dBm e sensibilidade de recepção de até -96 dBm.



Figura 7 - Circuito integrado MC13224V.

A Figura 7 ilustra o CI MC13224V, cujo encapsulamento mede 90 mm². O custo deste componente é de 14,70€ no varejo [11]. Além disso, este circuito integrado exige apenas um oscilador como componente externo, cujo custo estimado é de \$0,34 [12], sem considerar a antena. A solução final resulta em um equipamento de baixo custo, fácil de ser projetado e de tamanho reduzido, sendo uma ótima escolha para projetos de redes de sensores sem fio.

Para versões de avaliação, a Freescale desenvolveu o kit MC1322x contendo o CI MC13224V, voltado para aplicações de redes de sensores sem fio. O kit possui três tipos de equipamentos, todos possuindo como alguns aspectos básicos chaves, LEDs, porta USB (utilizando o protocolo UART para transferência dos pacotes), interface para programação e debug via JTAG (*Joint Test Action Group*) e entrada para fonte de alimentação externa ou bateria. Abaixo estão listados os equipamentos com suas características exclusivas:

- 1322x-NCB – Nó coordenador de rede, Figura 8(a): possui display de cristal líquido (LCD) e conector para antena externa. É um dispositivo FDD, sendo desenvolvido especialmente para ser o coordenador de rede, podendo exercer também a função de *gateway*, comunicando a RSSF com outra rede;
- 1322x-SRB – Nó sensor de referência, Figura 8(b): pode possuir diversos sensores diferentes, entre eles acelerômetro, medidor de temperatura e de pressão. Desenvolvido para ser o equipamento coletor de dados, podendo exercer também funções de roteamento de pacotes dentro da RSSF. Pode funcionar como um FDD ou um RFD;
- 1322x-LPB – Nó sensor de baixo consumo, Figura 8(c): dispositivo do tipo RFD, foi desenvolvido especialmente para baixo consumo de bateria, podendo ter sensores ligados a suas entradas como pontos de expansão.

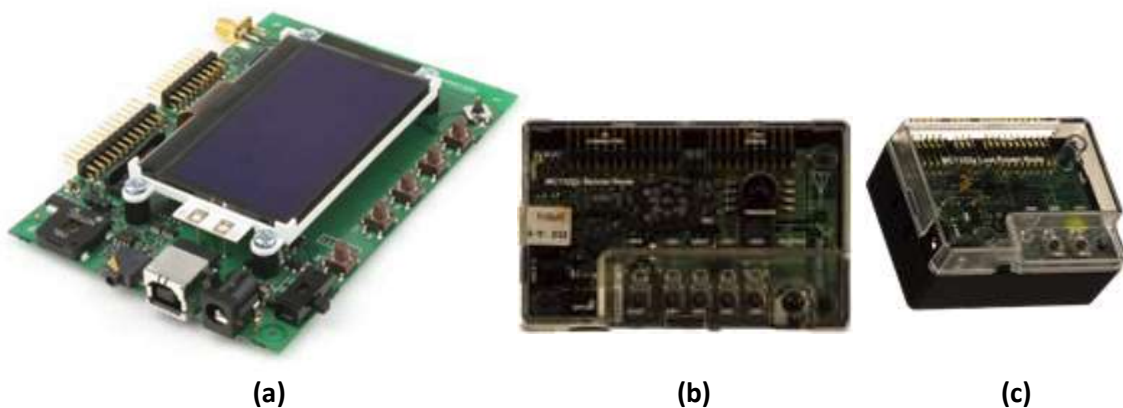


Figura 8 - Placas 1322x-NCB (a), SRB (b) e LPB (c).

Para o carregamento do *firmware* e depuração do mesmo é utilizado o *software* IAR Embedded Workbench, elaborado pela companhia sueca IAR Systems, através de um dispositivo JTAG conectado a um computador via USB. Este *software* permite a programação dos equipamentos utilizando a linguagem de programação C, que é posteriormente traduzida para *Assembly* e programada binariamente no circuito integrado.

4.2 ANTENAS

Os equipamentos do kit Freescale MC1322x podem possuir dois tipos de antena. Os nós SRB e LPB possuem a antena do tipo F, conhecida também como antena impressa F invertida (PIFA), ilustrada na Figura 9(a). Já o nó NCB possui, além da antena-F, um conector do tipo SMA (*SubMiniature version A*) de impedância 50Ω , que permite o uso de uma antena de dipolo externa. O kit utilizado neste projeto é acompanhado da antena omni-direcional Titanis [13], produzida pela empresa britânica Antenova e ilustrada na Figura 9(b). Ambas as antenas são especialmente desenvolvidas para melhores respostas na faixa de frequência de 2.4 GHz da norma IEEE 802.15.4.

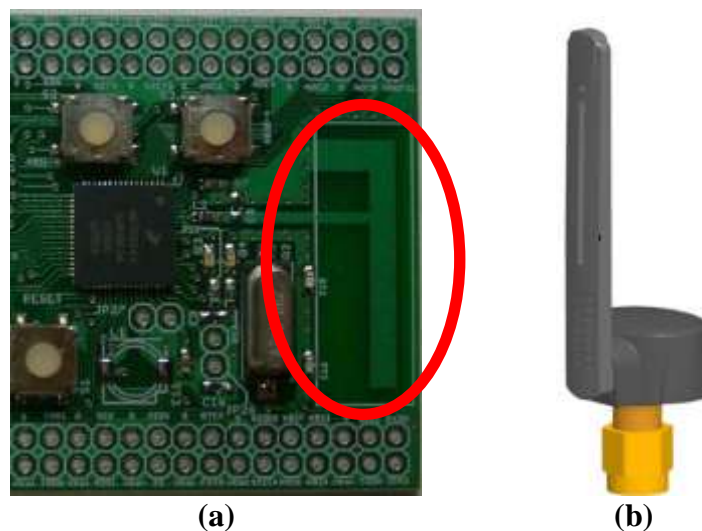


Figura 9 - Antena-F (a) e omni-direcional (b).

A antena-F possui este nome por ter justamente o formato da letra “F”, porém invertida. Esta é uma antena diferenciada, pois é diretamente impressa numa placa de circuito

impresso (PCB). Trata-se de um tipo muito utilizado em aplicações de RSSF justamente pelo seu baixo custo, pequeno tamanho, razoável eficiência, simplicidade de implementação e quando a aplicação não requer grandes distâncias de comunicação. As medidas da antena (comprimento, largura, distância entre as trilhas e distância entre os planos da placa) determinam o ganho e a frequência para o qual a antena é otimizada [14].

O diagrama de irradiação da antena-F para polarização horizontal e vertical é exibido na Figura 10 [15], na escala de dBi (ganho da antena comparado a uma hipotética antena isotrópica). A polarização descreve a medida de variação do campo elétrico em ondas eletromagnéticas planas, sendo que na polarização horizontal o campo elétrico manifesta-se no eixo x e o campo magnético no eixo y , na polarização vertical o efeito é o contrário. Da análise deste diagrama pode-se concluir que a polarização horizontal é favorecida, o que deve ser levado em conta quando instalando os equipamentos para a aplicação final, de forma que ambas as antenas transmissoras e receptoras estejam favorecendo a polarização horizontal. Também é importante notar-se que mesmo nessa polarização a irradiação não é perfeitamente homogênea, obtendo-se maior ganho nas direções 0° e 90° quando comparadas à direção 180° .

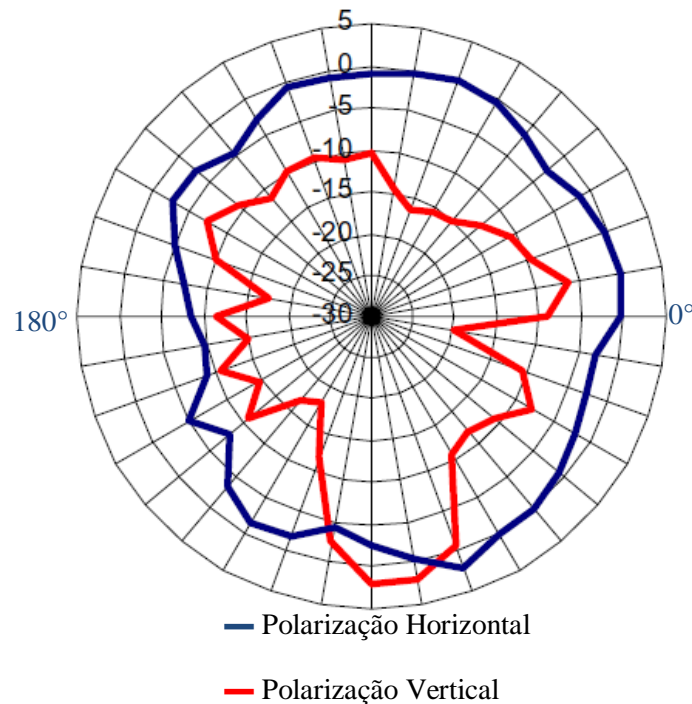


Figura 10 - Diagrama de irradiação da antena-F.

A antena omni-direcional é uma antena cujo padrão de irradiação é homogêneo para todas as direções de um mesmo plano. Por essa característica, ela é recomendada para aplicações onde se deseja uma potência distribuída em todo o ambiente, sem favorecer alguma direção específica. O diagrama dessa antena é ilustrado na Figura 11 [15], cuja escala é apresentada em dBi. É possível verificar que para a polarização vertical esta antena é praticamente homogênea, devendo então favorecer-se esse tipo de polarização quando da instalação dos equipamentos na aplicação final.

Como será exibido nos testes realizados no Capítulo 9, esta é a antena escolhida para ser utilizada justamente por sua característica de homogeneidade de irradiação, permitindo com que receptores em diferentes direções e a uma mesma distância do transmissor possam receber o sinal com aproximadamente a mesma potência.

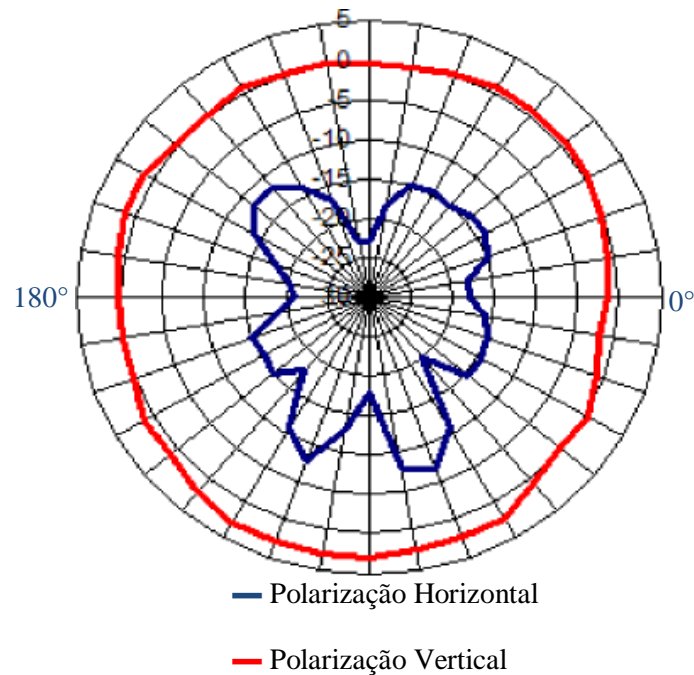


Figura 11 - Diagrama de irradiação da antena omni-direcional.

Um parâmetro importante quando da utilização de aplicações com antenas é a Relação de Ondas Estacionárias (ROE), que é a razão entre a amplitude da onda enviada pelo rádio à antena e a amplitude da onda refletida pela antena em direção ao próprio rádio [16]. Idealmente, deseja-se que não haja reflexão na conexão da antena com o rádio, o que se chama de casamento de impedância perfeito, para garantir a máxima transferência de energia para a antena. O valor 1 de ROE representa esse caso ideal e qualquer imperfeição fará com que este valor aumente. É importante notar que esta relação depende da frequência da onda utilizada, ou seja, diferentes antenas são otimizadas para diferentes faixas de frequência.

A Figura 12 exibe o ROE da antena omni-direcional Titanis medido com auxílio de um analisador de espectro. Para essa antena, a relação de onda estacionária é igual a 1,29 na frequência de 2405 MHz. Analisando o gráfico é possível perceber que os menores valores de ROE estão justamente no entorno da frequência de 2.4 GHz, que é a frequência utilizada pela norma IEEE 802.15.4.

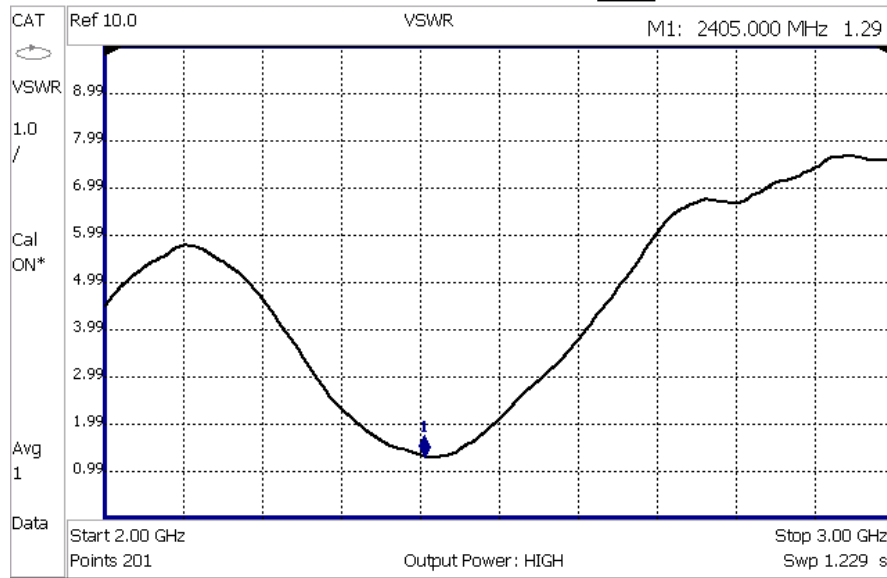


Figura 12 - ROE da antena omni-direcional.

Porém durante as medições das antenas, algumas apresentaram funcionamento defeituoso devido a deformações mecânicas, tendo uma relação de onda estacionária perto do valor de 10 para a frequência de 2405 MHz, além de possuírem seus menores valores em outra faixa de frequência, como ilustrado na Figura 13. Esses resultados ilustram a importância de serem realizados testes de medição de ROE anteriormente à instalação das antenas na aplicação final, pois as antenas defeituosas podem causar um desbalanceamento entre os nós presentes na aplicação, fazendo com que eles obtenham resultados diferentes, mesmo atuando em condições iguais, o que afetaria o resultado final, interferindo na precisão da localização.

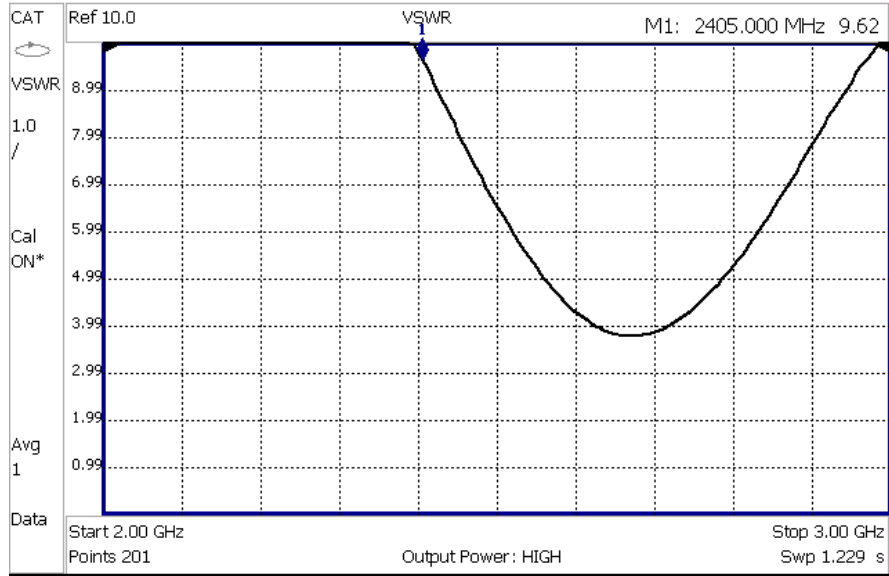


Figura 13 - ROE da antena omni-direcional com funcionamento divergente.

5 PROPAGAÇÃO DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

O canal de rádio utilizado na transmissão de dados coloca diversos limites fundamentais no desempenho de sistemas de comunicação sem fio. As obstruções no caminho e diversos efeitos que podem haver no ambiente, como reflexão e multicaminho, alteram as características de transmissão e dificultam a análise e predição na transmissão.

Este capítulo descreve basicamente as propriedades de ondas eletromagnéticas propagando em ambientes, modelos de transmissão, bem como os diversos efeitos que podem trazer interferências na recepção de dados.

5.1 MODELOS DE PROPAGAÇÃO

O modelo de propagação de ondas eletromagnéticas no espaço livre é utilizado para prever a intensidade do sinal recebido quando um transmissor o envia em um ambiente livre de obstáculos. Como a maioria dos modelos, este prevê que a potência do sinal decai com o aumento da distância de separação entre transmissor e receptor, como na lei de função da potência. A Equação 1, também conhecida como Equação de Friis, descreve a propagação de uma onda eletromagnética no espaço livre [17].

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

Onde:

- P_R é a potência recebida, expressa em dB ou dBm;
- P_T a potência transmitida, expressa em dB ou dBm;
- G_R é o ganho da antena do receptor, em unidades adimensionais;
- G_T é o ganho da antena do transmissor, em unidades adimensionais;
- λ_0 o comprimento de onda do sinal enviado, expresso em metros;
- d é a distância separando transmissor e receptor, expresso em metros;

- L é um fator de perda do sistema não relacionado à propagação ($L \geq 1$).

Para antenas iguais na recepção e transmissão, os ganhos das antenas podem ser considerados iguais a 1 e assim eliminados da equação. Considerando apenas as perdas em relação à propagação no espaço, o fator L também pode ser considerado 1 (sem perdas), sendo eliminado da equação. Com essas simplificações, chega-se a Equação 2.

$$P_R = P_T \cdot \left(\frac{\lambda_0}{4\pi \cdot d} \right)^n \quad (2)$$

Fora do espaço livre, a atenuação de uma onda eletromagnética é realizada por um valor maior que 2. Tipicamente, este valor n pode variar entre 2 e 5, porém valores até mesmo menores que 2 são possíveis no caso de interferência construtiva.

Importante salientar ainda que a Equação de Friis só é válida para distâncias entre transmissor e receptor muito maiores do que a Distância de Fraunhofer (d_f) e também maiores do que o comprimento de onda λ_0 . O valor de d_f é calculado a partir da Equação 3, onde D é a maior dimensão física da antena.

$$d_f = \frac{2 \cdot D^2}{\lambda_0} \quad (3)$$

Para antena omni-direcional utilizada neste projeto, a maior dimensão é de 6,25 cm [13]. Para esse valor e para a frequência de 2.4 GHz, a Distância de Fraunhofer é também de 6,25 cm e o comprimento de onda é de 12,5 cm, valores estes muito pequenos e que não interferem nas aplicações deste trabalho.

Diferenças no meio também causam atenuação do sinal, visto que as ondas não são transmitidas no vácuo neste projeto, único meio com propagação perfeita. No ar, efeitos como chuva e neblina causam uma maior degradação do sinal. Porém estes efeitos são dependentes da frequência e como também seguem a lei da potência, o efeito acaba sendo modelado implicitamente na Equação de Friis, com constante de propagação no meio diferente de 2.

Existem vários efeitos que possuem impactos importantes na propagação de sistemas sem fio. Os mais importantes entre eles são a reflexão, difração e espalhamento, ilustrados na Figura 14 (a), (b) e (c) respectivamente, que são melhores explicados no decorrer deste Capítulo.

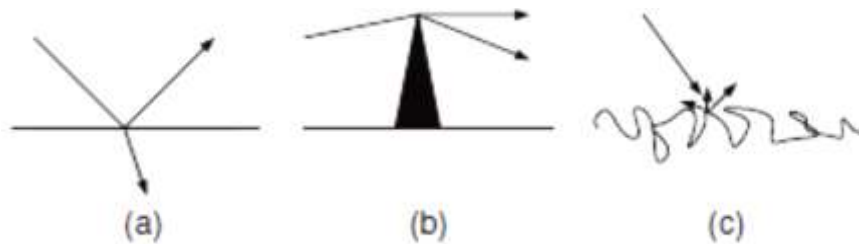


Figura 14 - Efeitos na propagação de ondas: reflexão (a), difração (b) e espalhamento (c).

5.2 REFLEXÃO

A reflexão ocorre quando uma onda eletromagnética propagando em um meio *A* atinge uma superfície de um meio *B*, que possui índice de propagação diferente. Desta forma, uma parte da onda é refletida de volta ao meio *A*, uma parte é transmitida ao meio *B* (com direção diferente daquela que a onda tinha no meio *A*, efeito chamado de refração) e uma parte é absorvida. Tipicamente, este efeito ocorre na superfície da terra, em edifícios ou em paredes.

5.3 ESPALHAMENTO

Quando uma onda eletromagnética atinge uma superfície irregular, esta pode ser refletida múltiplas vezes, causando um efeito de difusão da onda em várias direções. Esse efeito ocorre também quando o obstáculo tem dimensões da mesma ordem de grandeza ou menor do que o comprimento de onda do sinal. Na prática, este fenômeno ocorre em plantas e sinais de rua, por exemplo.

5.4 DIFRAÇÃO

Pelo Princípio de Huygen-Fresnel [18], todos os pontos de uma frente de onda podem ser considerados fontes para novas frentes de onda. Dessa forma, quando uma onda atinge um obstáculo com ponta, uma parte do sinal é difratada para a região de sombra do objeto, resultando em uma curva da onda. Este fenômeno depende da frequência, da fase e da polarização da onda incidente, bem como da geometria do obstáculo. Esse também é o mesmo fenômeno que permite aos sinais de rádio propagarem ao redor da superfície curva da terra.

5.5 ZONAS DE FRESNEL

As Zonas de Fresnel representam sucessivas regiões onde ondas secundárias (ondas que percorrem caminhos diferentes da onda principal devido à difração no meio de propagação) possuem uma distância de percurso entre o transmissor e receptor que é $n \cdot \lambda/2$ maior do que a distância total em linha de visada. Esse efeito resulta em diversas zonas concêntricas em forma de elipse e significa que os sinais dentro de uma mesma zona terão interferência construtiva ou destrutiva (sendo que a primeira zona é construtiva, a segunda destrutiva, a terceira construtiva novamente e assim segue).

A importância de se realizar este cálculo é a de ter certeza que não existem obstáculos dentro da primeira Zona de Fresnel, de forma a maximizar a potência do sinal recebida no transmissor. A Equação 4 descreve o raio do elipsóide de cada zona (r_n), onde λ é o comprimento de onda do sinal, n é o número da Zona de Fresnel, d_1 é a distância do transmissor até o ponto onde se calcula o raio e d_2 é a distância do receptor até esse mesmo ponto.

$$r_n = \sqrt{\frac{n \cdot \lambda \cdot d_1 \cdot d_2}{d_1 + d_2}} \quad (4)$$

Neste projeto a frequência da onda propagada é de 2.4 GHz. Sendo assim, a altura máxima da primeira zona, onde não deve haver nenhum obstáculo (e também a altura mínima que o nó deve estar do chão) é calculada pela Equação 5.

$$r_1 = 17,32 \sqrt{\frac{D}{4 \cdot 2,4\text{GHz}}} \quad (5)$$

A altura resultante é de 80 cm, quando a distância entre transmissor e receptor é de 20 metros, e de 1,76 metros com a distância de 100 metros. Desta forma, deve-se ter o devido cuidado com esse efeito e com os resultados aqui calculados quando instalando os equipamentos para a aplicação.

5.6 DESVANECIMENTO

O desvanecimento ocorre quando um sinal percorre mais de um caminho até chegar ao receptor, havendo uma diferença de fase na chegada devido aos diferentes atrasos das ondas secundárias, que podem causar efeitos de interferência construtiva ou destrutiva no sinal. Este efeito pode ser do tipo rápido (multicaminho) ou lento (sombra). O primeiro ocorre quando o transmissor ou o receptor estão se deslocando um em relação ao outro, acarretando em desvio de frequência (por efeito Doppler) e desvio de fase. Este tipo é caracterizado por variar rapidamente ao longo do tempo. Como exemplo, para a faixa de frequência de 2.4 GHz, o comprimento de onda é de 12,5 cm, ou seja, uma diferença na posição de 6,25 cm resulta na diferença entre interferência construtiva e destrutiva.

Já o desvanecimento lento é um efeito que pode ser causado por reflexões em grandes obstáculos, difrações e mudanças no índice de propagação do meio, sendo caracterizado por mudanças de potência lentas ao longo do tempo. A Figura 15 ilustra um sinal propagando no espaço, sujeito a ambos os tipos de desvanecimentos. A curva azul representa apenas o efeito de sombra, a curva vermelha mostra o efeito de multicaminho e a curva preta é o sinal final, sendo a superposição de ambas as curvas anteriores.

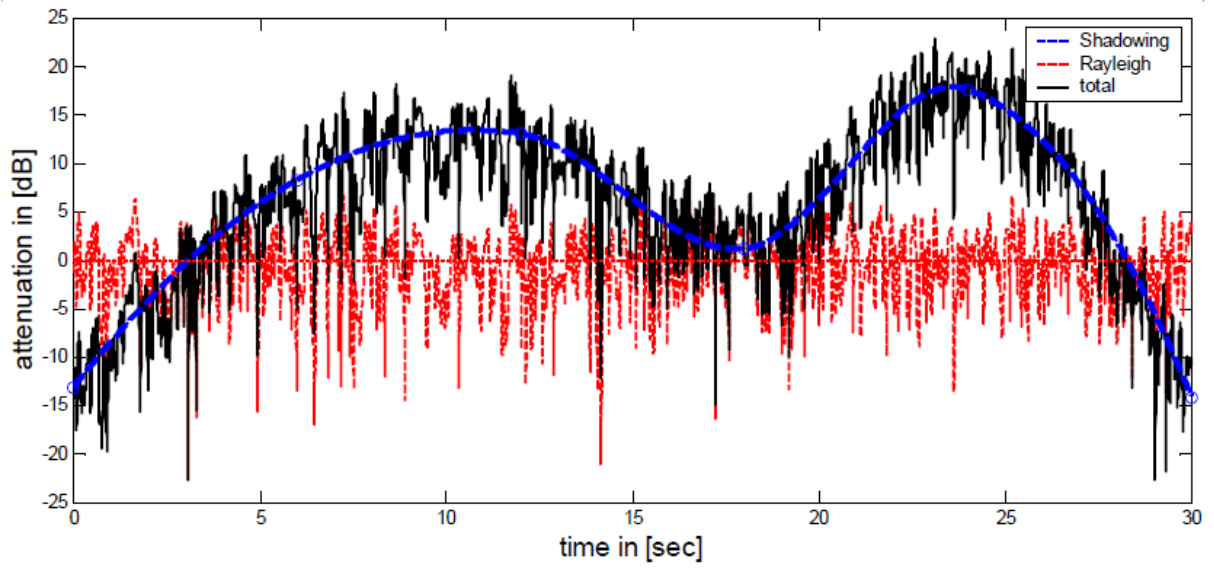


Figura 15 - Efeitos de desvanecimentos no sinal propagado.

6 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE DISTÂNCIA

A seguir são descritos alguns métodos estudados para obtenção da distância entre os nós fixos (NF) da RSSF e o nó móvel (NM). A partir desta medida e das coordenadas dos NFs é possível obter a localização do NM através de métodos como triangulação e trilateração [19], que serão descritos no Capítulo 7.

6.1 DIRECTION OF ARRIVAL (DOA)

Neste método utiliza-se o ângulo de recepção de uma onda eletromagnética, juntamente com as coordenadas previamente conhecidas dos nós-fixos, para determinar a direção da onda e calcular a posição do agente móvel via triangulação. O inconveniente neste caso é a necessidade de uma antena para cada ângulo de recepção, inviabilizando-o para utilização neste projeto, por adicionar custos ao *hardware*.

6.2 TIME OF ARRIVAL (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), é possível obter a distância entre os dispositivos. É importante também que os equipamentos envolvidos na transmissão e recepção dos pacotes estejam sincronizados, de forma a ser possível a comparação dos tempos de propagação dos pacotes no meio [20]. Utilizando apenas equações básicas e tendo uma visão superficial do problema, é possível tirar conclusões quanto a este método para o presente caso [21]:

$$T_{prop} = \frac{d}{c} = \frac{1m}{3.10^8} = 3,3 \text{ ns} \quad (6)$$

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

Considerando a velocidade da luz como 3×10^8 m/s, significa dizer que um sinal de rádio cobre um metro em aproximadamente 3,3 ns como tempo de propagação (T_{prop}), conforme a Equação 6. Considerando que o *hardware* utilizado no projeto possui um *clock* de 24 MHz, ou 41,67 nanosegundos/clock, a Equação 7 demonstra que cada ciclo de *clock* (d_{clk}) corresponde a 13,89 metros.

$$T_{send} = \frac{1bit}{250kbit/s} = 4\mu s \quad (8)$$

Na Equação 8 pode-se observar o cálculo para o tempo de envio de dados (T_{send}). Lembrando também que um módulo ZigBee envia dados a uma taxa de 250 kbit/s, significa 1 bit enviado a cada 4 microssegundos, um tempo muito superior ao tempo de propagação da onda, se considerando distâncias pequenas.

O cálculo acima mostra a inviabilidade da medição de distância por tempo de vôo neste projeto, considerando ambientes fechados (curta distância entre nós) principalmente por limitação de *hardware*, por possuir um *clock* de baixa frequência.

6.3 TIME DIFFERENCE OF ARRIVAL (TDOA)

A técnica de diferença de tempo de chegada assemelha-se ao método TOA, porém este leva em conta a diferença de tempo de chegada entre sinais 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 alguns pressupostos, como a completa sincronização dos equipamentos participantes da rede, de forma que duas mensagens sejam enviadas ao mesmo tempo e a sua diferença de tempo no equipamento de chegada possa ser calculada a partir disso.

O TDOA, porém, tem algumas deficiências, como a não exatidão da distância entre os equipamentos fixos e o alvo, dando apenas uma idéia de qual equipamento se encontra mais perto do equipamento alvo. Além do mais, para o presente projeto este método apresenta o

mesmo problema de baixo *clock* do microcontrolador utilizado, como já descrito no Capítulo 6.2.

6.4 RECEIVED SIGNAL STRENGTH INDICATOR (RSSI)

Este método leva em consideração a atenuação de um sinal de rádio propagando no espaço. O valor da potência do sinal recebido normalmente é utilizado para obter o indicador de qualidade do link (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.

Pelos estudos de propagação de ondas eletromagnéticas no espaço livre (exibidos no Capítulo 5.1), tem-se a Equação 2 para a descrição da potência recebida no equipamento receptor. Considerando n como a constante de propagação dependente do meio, 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 (RSSI) pode-se derivar a Equação 9, relacionando o valor da potência com a distância [22]:

$$\log \frac{P_R}{P_T} = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{\lambda_0}{4\pi} \right) - 10 \cdot n \cdot \log_{10} d \quad (9)$$

Simplificando a Equação 9 e considerando que o primeiro termo após a igualdade é constante, obtém-se a Equação 10:

$$RSSI = -10 \cdot n \cdot \log_{10}(d) + A \quad (10)$$

- n : constante de propagação dependente do meio. No vácuo, esta constante tem o valor de 2, sendo então a potência relacionada com o inverso quadrático da distância (adimensional). Tipicamente, varia entre 2 e 5;
- d : distância entre transmissor e receptor (em metros);

- *RSSI*: diferença entre a potência recebida no receptor e a potência transmitida (em dBm);
- *A*: potência recebida no receptor a um metro de distância (em dBm);

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). Essa constante então deve ter o seu valor empiricamente testado no ambiente em que o projeto será executado, de forma a se obter uma maior precisão nos cálculos de distância. O Capítulo 8.2 fornece maiores detalhes a esse respeito.

7 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. Algumas das técnicas utilizadas são descritas neste capítulo.

7.1 FINGERPRINTING

O *fingerprinting*, ou impressão digital, é uma técnica que relaciona valores de potência de sinal e determinados pontos do ambiente com a distância em relação ao rádio [23]. A técnica constitui-se de duas fases: treinamento e estimação. A primeira fase consiste em dividir a área de implementação em diversos pontos. Para cada ponto então são obtidos valores únicos de sinal de potência recebido pelos nós de referência espalhados no ambiente. Todos esses valores são mapeados e armazenados em uma grande tabela ou banco de dados. Na fase de estimação, a aplicação recebe os valores de RSSI do nó móvel e busca a relação deles com a sua localização através da tabela obtida na primeira fase, baseando-se no fato de que cada ponto na área analisada terá propriedades diferentes e únicas, permitindo assim a identificação geográfica.

Esse método é conhecido por obter resultados mais precisos, justamente por ter um maior número de amostras e levar em conta toda a área a ser utilizada na aplicação. Essa melhoria nos dados, porém, tem custos: necessidade de maiores memórias para armazenar os dados de cada ponto e maior complexidade da calibração, tornando-se assim muito custosa e mais difícil de fazer sua portabilidade para outros ambientes. Ainda, em um ambiente cujas características mudam constantemente (por interferências de outras redes ou mesmo pelos objetos em seu interior trocarem muitas vezes de posição), esse método não é recomendado.

7.2 TRILATERAÇÃO

A trilateração consiste em um método matemático utilizado para obter as coordenadas de um determinado ponto a partir da distância de pontos de referência conhecidos até o ponto desconhecido. Utiliza-se da geometria de triângulos para a realização do cálculo, do mesmo modo que na triangulação, com a diferença que este último utiliza os ângulos para realizar o cálculo de coordenadas. Uma versão irmã desse método (multilateração, onde há mais de três pontos de referência) é utilizada em sistemas GPS [3].

Como a distância do ponto desejado à referência é conhecida, abre-se uma circunferência de possibilidades de localização do ponto. Com duas referências, as circunferências se interceptam em dois pontos, diminuindo assim as possíveis localizações do ponto. Para obter com certeza a localização do ponto em um espaço euclidiano bi-dimensional, necessita-se de três pontos de referência, sendo o local da interceptação das três circunferências o ponto cujas coordenadas são desejadas. Caso deseje-se utilizar este método num ambiente tri-dimensional, é necessário mais um ponto de referência e o cálculo da interceptação das esferas, cujos raios são a distância entre a referência e o ponto desconhecido.

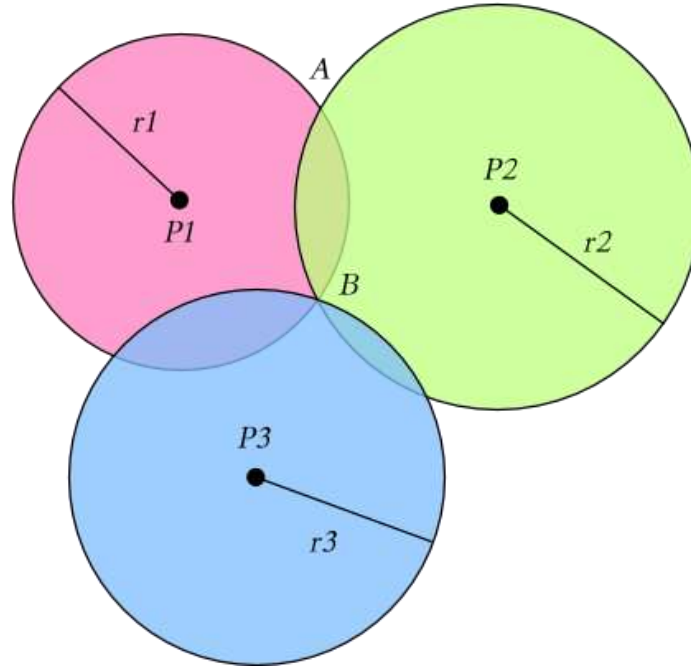


Figura 16 - Exemplo de localização por trilateração bi-dimensional.

Analisando a Figura 16, os pontos P_1 , P_2 e P_3 são pontos de referência. As distâncias r_1 , r_2 e r_3 para o ponto desejado são conhecidas. Ao interceptar as duas circunferências de raios r_1 e r_2 existem duas possibilidades de localização do ponto: A e B. Porém, ao utilizar a terceira referência de raio r_3 fica claro que o objeto está localizado em B.

Para descobrir as coordenadas do ponto B, considera-se então que as variáveis incógnitas são as suas componentes no eixo x e y, dadas por x_B e y_B . A distância entre dois pontos num sistema bi-dimensional pode ser calculada pela Equação 11.

$$d^2 = (x - x_B)^2 + (y - y_B)^2 \quad (11)$$

Considerando ainda os pontos de referência P_1 , P_2 e P_3 e suas distâncias ao ponto B r_1 , r_2 e r_3 , têm-se o seguinte sistema, demonstrado pela Equação 12, para resolução do problema, de onde podem ser obtidos os valores de x_B e y_B .

$$\begin{bmatrix} r_1^2 \\ r_2^2 \\ r_3^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (x_B - x_1)^2 + (y_B - y_1)^2 \\ (x_B - x_2)^2 + (y_B - y_2)^2 \\ (x_B - x_3)^2 + (y_B - y_3)^2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

A Equação 12 pode ainda ser reescrita, de forma matricial, a fim de isolar-se as variáveis x_B e y_B , chegando-se à Equação 13.

$$2. \begin{bmatrix} x_3 - x_1 & y_3 - y_1 \\ x_3 - x_2 & y_3 - y_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_B \\ y_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (r_1^2 - r_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2) \\ (r_2^2 - r_3^2) - (x_2^2 - x_3^2) - (y_2^2 - y_3^2) \end{bmatrix} \quad (13)$$

8 DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE

Este capítulo descreve os passos tomados quando realizando o projeto dos programas para a aplicação final, começando com o estudo da topologia a ser utilizada, passando por funcionalidades importantes que os *softwares* devem contemplar (como a calibração) e chegando finalmente ao desenvolvimento dos firmwares utilizados nos sensores e da aplicação gráfica que exibe os resultados. Por último são realizadas simulações para verificação do correto funcionamento do programa desenvolvido, bem como para testar outros métodos de cálculo.

8.1 TOPOLOGIA

A partir da análise do estado da arte apresentada neste trabalho, obteve-se um modelo de aplicação do projeto, de forma a alcançar os objetivos relacionados no início deste relatório, levando sempre em consideração os requerimentos de simplicidade, baixo custo e resultados satisfatórios. Para tanto, é utilizado CI MC13224V da Freescale, dentro do kit MC1322xx, conforme detalhado no Capítulo 4.

Para realizar o algoritmo de localização descrito no Capítulo 7, é preciso a utilização de pelo menos 3 nós fixos (NF), que funcionarão como referências por suas exatas localizações serem conhecidas. Ainda, para o processamento dos dados, um computador pessoal é necessário, porém para este receber as informações utiliza-se um nó base (NB), conectado ao PC via interface USB utilizando um dispositivo do tipo UART.

A concepção inicial do projeto baseia-se então em 3 nós fixos espalhados em um ambiente, 1 nó base plugado a um computador pessoal servindo como *gateway* e 1 nó-móvel (NM) se locomovendo no plano XY. Os NFs devem ser espalhados de maneira que os pacotes enviados por eles sempre consigam alcançar o NM, para o algoritmo de localização funcionar corretamente. Para isso, observam-se os limites de alcance do rádio utilizado, adicionando-se

uma margem de segurança para a certeza de que os pacotes sejam corretamente recebidos (em ambientes abertos, os nós fixos podem estar separados por maiores distâncias, porém em ambientes internos, devido a reflexões e imperfeições do meio, as distâncias entre os nós devem ser menores).

Esta concepção inicial de utilizar-se de apenas 3 nós de referência vem da idéia de manter-se baixo o custo e imaginando a aplicação mais simples possível. Porém, dependendo da RSSF utilizada, pode-se ter mais do que 3 sensores de referência, o que poderá aumentar a precisão dos dados obtidos, conforme testes e simulações realizados e descritos posteriormente neste trabalho.

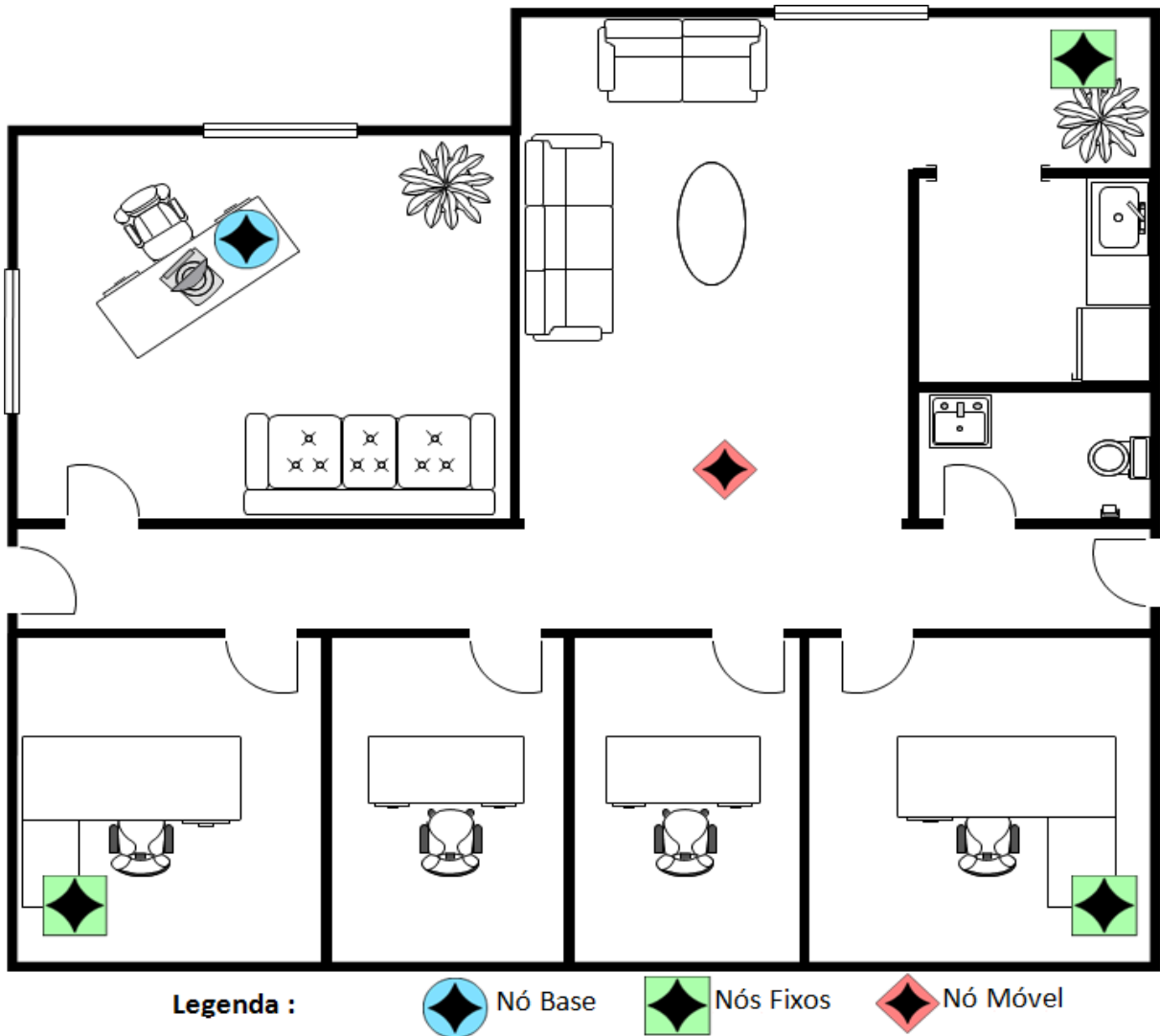


Figura 17 - Exemplo de aplicação do projeto.

A Figura 17 mostra um exemplo de aplicação do projeto, onde os NFs estão espalhados nos cantos do ambiente. O NM tem liberdade para movimentação pelos diferentes cômodos e o NB está fixo e conectado a um computador pessoal.

Os NFs enviam pacotes periodicamente, buscando resposta do NM. Se este estiver disponível e dentro do alcance, responderá com uma mensagem de confirmação (ACK – *Acknowledgement*) em forma de *broadcast* para os nós distribuídos no ambiente. Por sua vez, estes nós medem a potência do pacote recebido e repassam essa informação ao nó base, que agrupa estas informações e repassa ao computador pessoal. Esta topologia de troca de informações pode ser vista na Figura 18. Já a Figura 19 exhibe a ordem dos pacotes trocados entre os nós com referência no tempo.

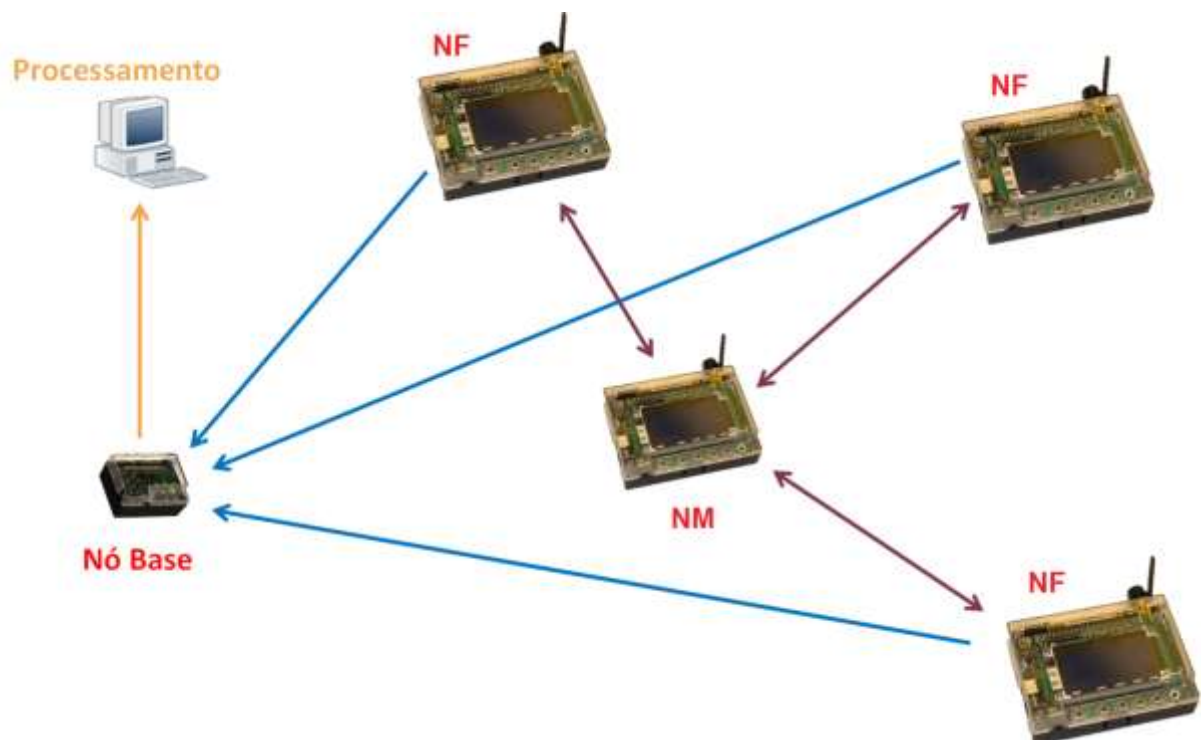


Figura 18 - Topologia de aplicação do projeto.

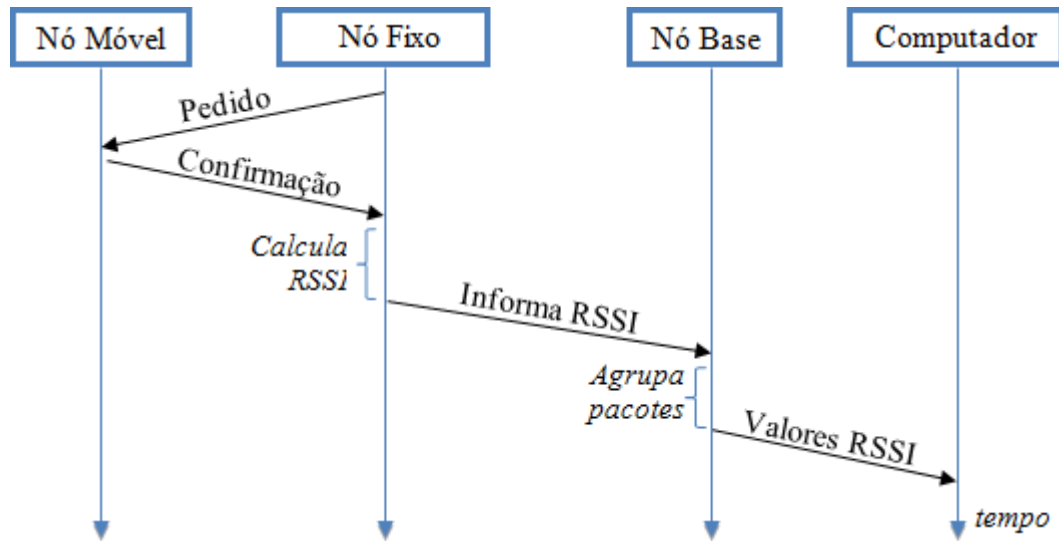


Figura 19 - Diagrama de troca de mensagens.

No computador, um *software* faz a conversão dos valores de potência em distância, através da Equação 10 previamente calibrada de acordo com o ambiente utilizado, conforme descrito no Capítulo 8.2. Essas distâncias alimentam o algoritmo de localização, que resultará nas coordenadas do nó móvel no ambiente. Esses valores são então repassados a uma aplicação gráfica para visualização da localização do objeto-alvo, também traçando a rota por ele realizada. Essa última parte pode ser visualizada no diagrama da Figura 20.

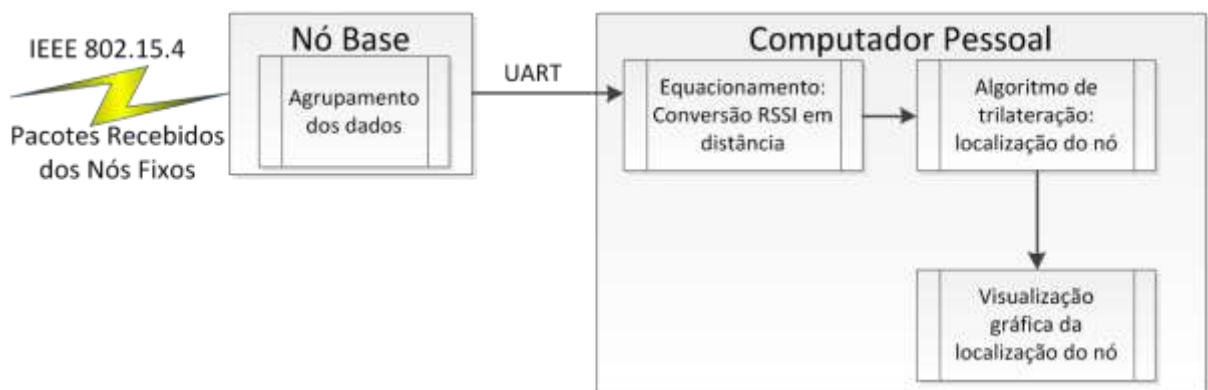


Figura 20 - Fluxo de dados entre o nó-base e o computador pessoal.

8.2 CALIBRAÇÃO

A rotina de calibração é realizada anteriormente à instalação definitiva da aplicação, com o intuito de obter parâmetros mais adequados com o local de operação do sistema.

Conforme estudo exibido no Capítulo 5, a propagação de ondas eletromagnéticas é perfeita apenas no vácuo. Em outros meios, o índice de propagação varia de acordo com o ambiente e até mesmo com as condições do ambiente no horário do teste realizado, por influência de fenômenos como multicaminho, espalhamento e desvanecimentos. Desta forma busca-se um refinamento dos parâmetros vistos na Equação 10 para obterem-se valores mais precisos, mesmo sabendo-se que as características do ambiente ainda poderão ser alteradas por efeitos de interferência de outras redes ou de obstáculos que possam surgir posteriormente à calibração.

Dois métodos para obtenção da distância entre dois rádios através da potência recebida foram explanados no Capítulo 7: a técnica de *fingerprinting* e o algoritmo de trilateração. O primeiro obtém resultados mais precisos, porém ao custo de uma maior complexidade de calibração. Sendo assim, este método é desaconselhado para aplicações cujas características variam muito ou que requerem portabilidade.

Portanto, optou-se neste projeto pela utilização do algoritmo de trilateração juntamente com o valor de RSSI, por possuir um procedimento simples de calibração.

A realização da calibração segue os seguintes passos:

1. Instalação dos nós fixos (nós de referência e nó base) nos locais definitivos da aplicação;
2. Conexão do computador ao nó base utilizando cabo USB e execução do *software* desenvolvido neste projeto (Capítulo 8.4);
3. Chamar a funcionalidade de “Calibração” do programa acima mencionado;
4. Disposição do nó móvel a uma determinada distância de algum nó de referência, que deve ser medida. No *software*, entrar com o valor de distância e obter a leitura de potência recebida pelo nó de referência em questão;

5. Repetição do item 4 quantas vezes se achar necessário. Quanto maior o número de medidas realizadas, maior é a precisão da calibração final;
6. Finalização da função de “Calibração”. A aplicação está pronta para ser normalmente utilizada.

A função de “Calibração” do *software* guarda em uma tabela as potências lidas pelo nó de referência nas respectivas distâncias medidas. Em seguida o valor do logaritmo na base 10 de todas as distâncias é calculado, de forma que ao traçar-se o gráfico de valores RSSI x $\log_{10}(\text{distância})$ o resultado aproximado seja uma reta, conforme pode ser visualizado no exemplo de levantamento de curva da Figura 21.

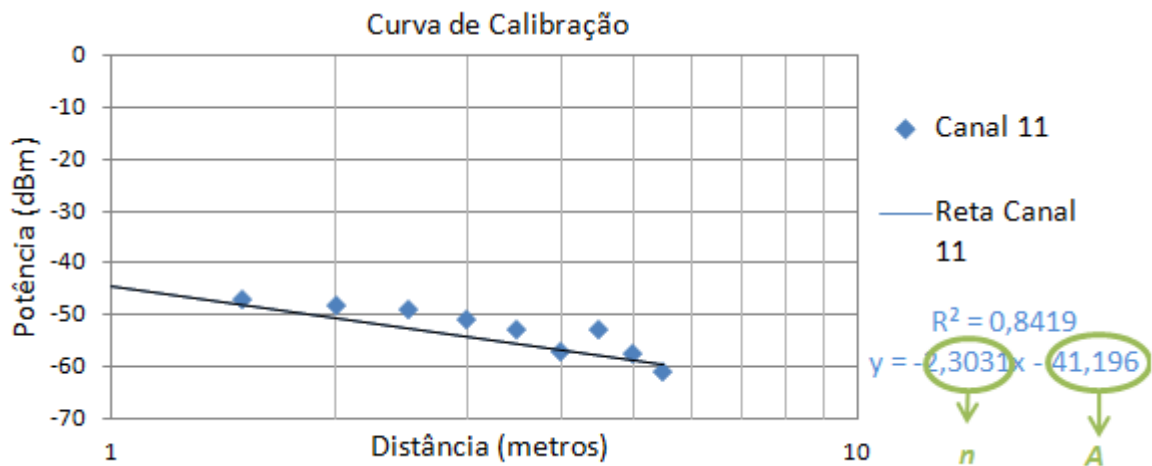


Figura 21 - Exemplo de levantamento de curva de calibração.

Para obter a reta que mais se aproxima dos valores obtidos, o método dos mínimos quadrados é utilizado, conforme as Equações 17, 18 e 19, onde Z é a matriz com os valores de x , b é o vetor-coluna com os valores de y , t é o vetor contendo as constantes $[n \ A]$ e o número total de pontos é representado por m .

$$\min \|Z \cdot t - b\|_2 \quad (17)$$

$$n = \frac{(\sum_{i=1}^m x_i \cdot y_i) - m \cdot \bar{x} \cdot \bar{y}}{(\sum_{i=1}^m x_i^2) - m \cdot \bar{x}^2} \quad (18)$$

$$A = y - n \cdot x \quad (19)$$

O resultado é a equação da reta exemplificada na Equação 20, onde os coeficientes obtidos são justamente aqueles necessários para o correto cálculo da Equação 10 e destacados na Figura 21 .

$$y = n. x + A \quad (20)$$

8.3 SOFTWARE EMBARCADO

Cada tipo diferente de equipamento participante da rede (nó móvel, base e fixo), possui um *firmware* com funcionalidades distintas. O escopo deste trabalho cobre o desenvolvimento de funcionalidades relacionadas à camada de rádio dos equipamentos, como troca de mensagens e leitura de valores RSSI.

Para desenvolvimento dos *firmwares* foi utilizada a linguagem de programação C no ambiente de programação do *software* IAR Embedded Workbench, que permite posteriormente o carregamento no circuito integrado e a utilização de funcionalidades de *debug* com a interface JTAG.

Devido ao objetivo de se ter uma aplicação simples, foi escolhida a utilização da camada de enlace SMAC, descrita no Capítulo 3.3, que não possui funcionalidades e suporte a camadas superiores de aplicação, porém também mantém o código mais enxuto e simples, além de proporcionar as funcionalidades necessárias quando utilizando o rádio.

A Tabela 4 exibe o quadro de mensagens trocado entre os nós. Cada campo do quadro representa um byte, sendo assim o quadro completo possui 10 bytes e representa os dados que são enviados dentro do campo de *payload* do quadro da camada física, apresentado na Tabela 2. Quando a aplicação requisitar, o tamanho do pacote pode ser aumentado, adicionando-se mais informações após o byte de número 9.

Tabela 4 - Quadro de mensagem trocado entre os nós.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Tipo de Frame	ID de rede	ID de Destino	Tipo do Remetente	Canal	ID do Remetente	Comando via Ar	Valor do Comando	Reservado ou LQI	Reservado ou LQI

O byte 0 indica o tipo de quadro enviado, que pode ser de dois tipos: comando ou dados. O pacote de comando é utilizado para pedir informações específicas ao nó remoto ou para executar alguma função específica, como troca da potência de envio do rádio, executar o procedimento de detecção de energia nos canais ou até mesmo reiniciar o equipamento. O byte 6 indica o tipo de comando a ser utilizado e o byte 7 passa o valor do respectivo comando, quando necessário (por exemplo: valor do novo canal a ser utilizado). Com a aplicação em funcionamento normal, utiliza-se apenas o quadro de dados, o qual possibilita a troca de mensagens entre os nós, desconsiderando os valores recebidos nos bytes 6 e 7.

O byte 1 informa o identificador da rede sendo utilizada para a troca de pacotes. Para o correto funcionamento da aplicação, todos os dispositivos devem estar configurados com o mesmo identificador de rede. O byte 2 contém o identificador único do rádio de destino da mensagem a ser enviada, enquanto o byte 5 possui o ID único do rádio que está enviando o pacote. O byte 4 informa qual o canal da norma IEEE 802.15.4 está sendo utilizado para troca de mensagens.

O byte 3 possui o identificador de tipo de equipamento dentro da topologia, que pode ser 3 tipos: *R* - referência, *E* - nó alvo e *G* - *gateway*. O identificador de tipo é utilizado quando o nó não conhece o endereço dos outros participantes, de forma a ser ao menos como tratar a mensagem recebida ou enviada. Por exemplo: se o nó de referência não souber o endereço do nó móvel, pode colocar como ID de destino o identificador de tipo *E*, de forma que todos os objetos alvo que estiverem na rede e receberem a mensagem responderão ao nó de referência (que por sua vez poderá obter corretamente o ID do nó remetente através do byte 5). Já no caso do *gateway*, este não precisa saber o identificador de nenhum dos nós na

rede. Para ele, basta diferenciar entre nó móvel, cuja mensagem será descartada, e de referência, cuja mensagem será tratada.

Os bytes 8 e 9 não são utilizados quando os NFs enviam mensagens de pedido ao NM e tão pouco quando este envia a resposta. Estes bytes são utilizados apenas quando o nó fixo envia um pacote de dados ao nó base com o valor, em 16 bits, do LQI calculado na resposta do NM.

A seguir serão analisadas as sequências de estados do programa implementado em cada nó de uma maneira mais generalizada. Detalhes mais técnicos e não relevantes neste escopo, como inicializações de interfaces e obtenção de dados, não são aqui descritos.

O nó móvel, enquanto se desloca no ambiente, deve estar sempre com a interface de rádio com o modo de recepção habilitado e esperando a chegada de pacotes dos nós de referência. Ao chegar uma mensagem, esta é analisada para verificar sua procedência. Sendo ela de um nó fixo, uma resposta é enviada para o remetente da mensagem. Logo em seguida o modo de recepção é novamente habilitado e volta-se ao estado de espera. Essa sequência pode ser visualizada na Figura 22.

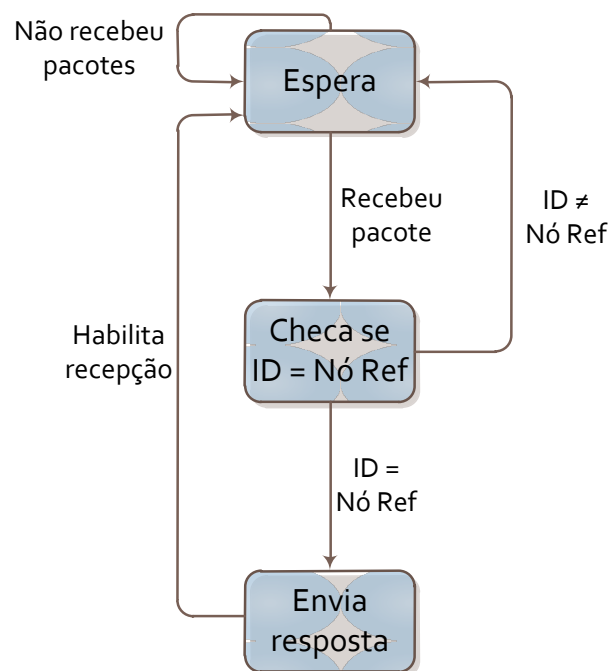


Figura 22 - Fluxograma de estados do nó móvel.

O nó fixo mantém-se no estado de espera, atentando a um chamado de interrupção devido ao estouro do *timer* ou à recepção de um pacote. Toda vez que o *timer* estoura, o NF envia uma mensagem com o objeto alvo como endereço de destino, a fim de receber uma resposta do mesmo. Logo após o envio da mensagem, volta-se ao estado de espera, enquanto o *timer* é zerado. Ao receber um pacote, o NF analisa se esta mensagem tem como remetente o objeto alvo. Caso positivo, o valor da potência recebida é lido e armazenado em uma variável, para então passar como informação dentro de um pacote ao nó base. Após o envio, a recepção de pacotes é novamente habilitada e volta-se ao estado de espera. Na Figura 23 é possível a visualização deste processo.

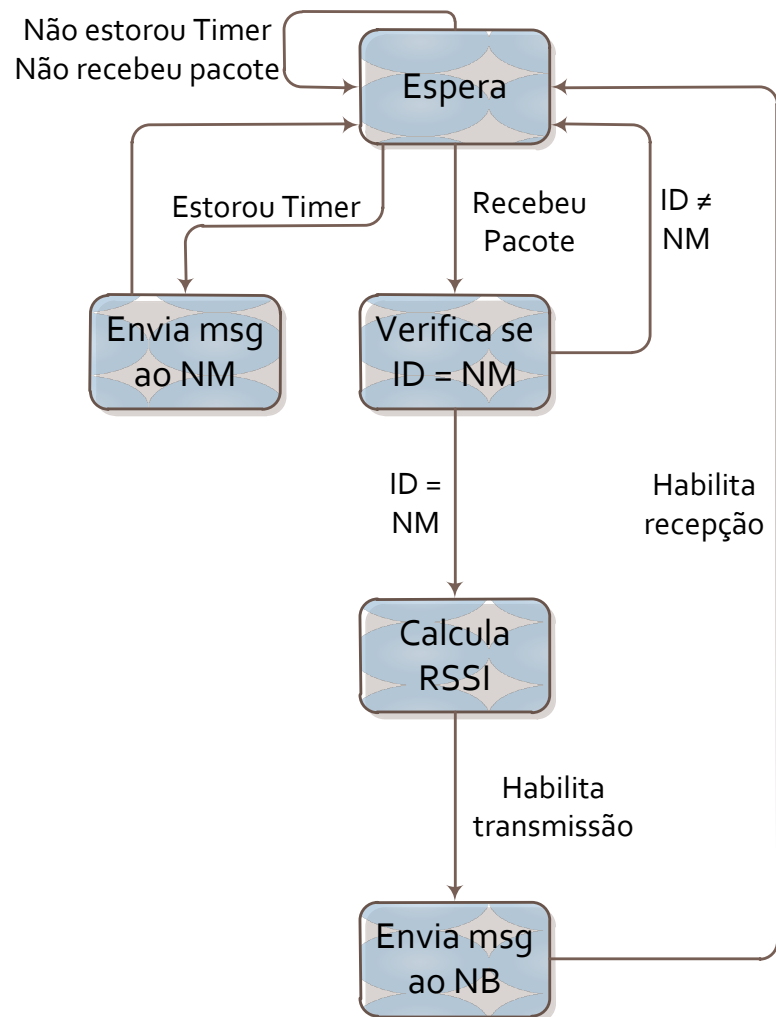


Figura 23 - Fluxograma de estados do nó de referência.

O nó base, conectado ao computador, mantém-se no estado de espera de um pacote proveniente dos nós de referência. Quando um pacote é recebido, analisa-se se a procedência é um NF. Caso positivo, o NB guarda o identificador do nó remetente, bem como o valor de RSSI que estava dentro do pacote recebido. Em seguida a interface UART é habilitada e as informações recém adquiridas são repassadas ao computador pessoal. Tendo finalizado o envio, a interface UART é desabilitada e a recepção via rádio é novamente habilitada, voltando-se ao estado de espera de outros pacotes. O fluxo desse processo pode ser visto na Figura 24.

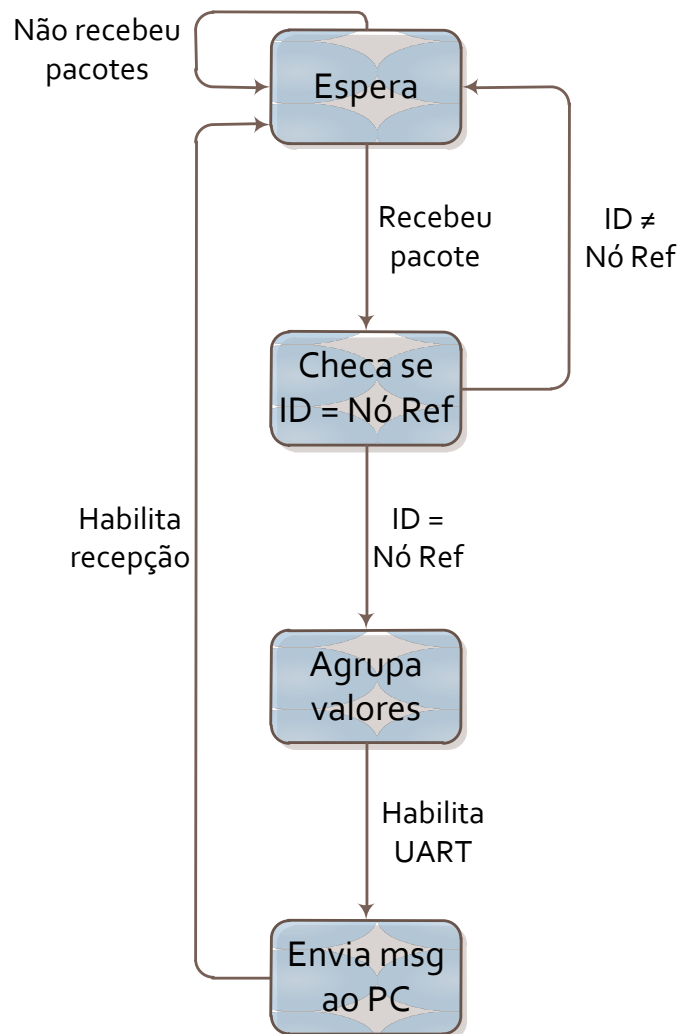


Figura 24 - Fluxograma de estados do nó base.

A Tabela 5 exibe a estrutura do pacote enviado via UART pelo nó base ao computador pessoal. O byte 0 informa o tipo de quadro, podendo ser de dois tipos: comando ou dados. O

pacote de comando é utilizado apenas no sentido inverso, quando o computador envia um pacote ao NB para a execução de alguma atividade, portanto não sendo utilizado em operação normal. O último byte contém um *checksum* de paridade, para que o programa no computador pessoal possa detectar se houve erros na transmissão.

Tabela 5 - Quadro enviado via UART ao PC.

0	1 - 4	5 - 8	...	Último
Tipo de Frame	Infos Nó 1	Infos Nó 2	...	Paridade

Os bytes de 1 a 4 contém as informações relativas ao primeiro nó de referência que mandou informações. Os bytes de 5 a 8 contém as informações do segundo nó e assim segue. Dessa forma o tamanho total do pacote enviado via serial depende do número de nós na rede, devendo que ser configurado previamente. As informações sobre cada nó podem ser vistas na Tabela 6, que mostra os dois primeiros bytes enviando o valor de LQI, o terceiro byte contendo o identificador do nó de referência e o quarto byte não sendo utilizado na aplicação.

Tabela 6 - Detalhe dos dados do Nó 1 enviado via UART ao PC.

1	2	3	4
LQI	LQI	ID do Nó	Reservado

8.4 SOFTWARE NO COMPUTADOR

Para fazer o processamento dos dados recebidos pela RSSF e também a posterior visualização, necessitava-se de uma ferramenta que tivesse suporte à conexão serial e um ambiente com interface gráfica. Optou-se então por desenvolver a aplicação utilizando a linguagem de programação C++ e o *software* de desenvolvimento Borland C++ builder 6. Este ambiente de programação possui muitas vantagens, entre elas a programação orientada a objetos e a utilização de VCLs, bibliotecas de componentes visuais que podem ser

adicionadas ao projeto, objetivando o complemento de funcionalidades, como a conexão serial e a biblioteca gráfica.

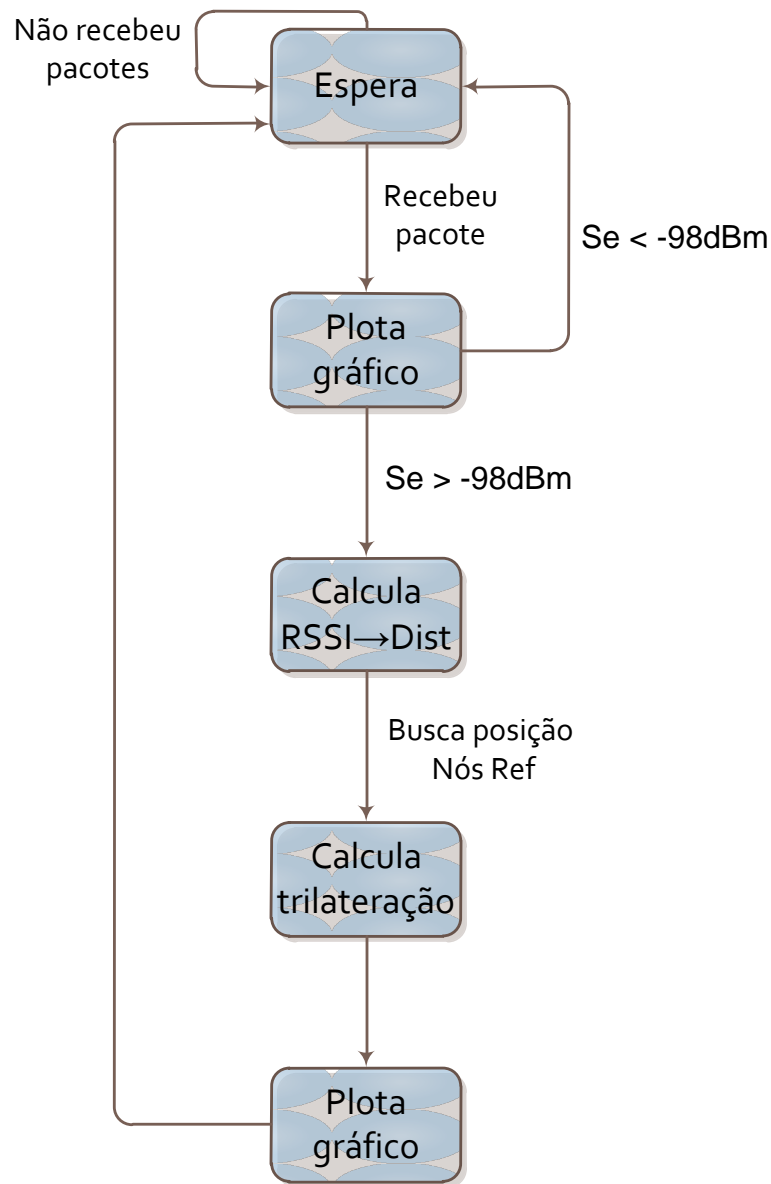


Figura 25 - Fluxograma de estados do *software* no computador.

A Figura 25 exibe o fluxograma de estados do programa desenvolvido para ser executado no computador pessoal. Através da interface serial, o programa recebe os pacotes enviados pelo nó base, que contém os valores de RSSI medidos pelos nós de referência. Esses valores são traçados em tempo de execução pela aplicação gráfica, de forma a se obter as curvas de potência para os diferentes referenciais. Se os valores estiverem dentro dos níveis aceitáveis (no caso, se forem maiores que -98 dBm), o programa calcula os valores de

distância a partir dos valores de potência e dos coeficientes da Equação 10, previamente calibrados. Caso contrário, os valores são apenas apresentados graficamente e a função de localização não é executado. As distâncias calculadas são utilizadas para alimentar o algoritmo de trilateração, conforme Capítulo 7.2, utilizando também a localização dos nós de referência previamente configurada no *software*. Finalmente o programa exibe, em um ambiente gráfico, a localização espacial do objeto alvo, bem como dos NFs para se ter a referência espacial. Após o cálculo, o programa retorna ao estado de espera de dados via interface serial.

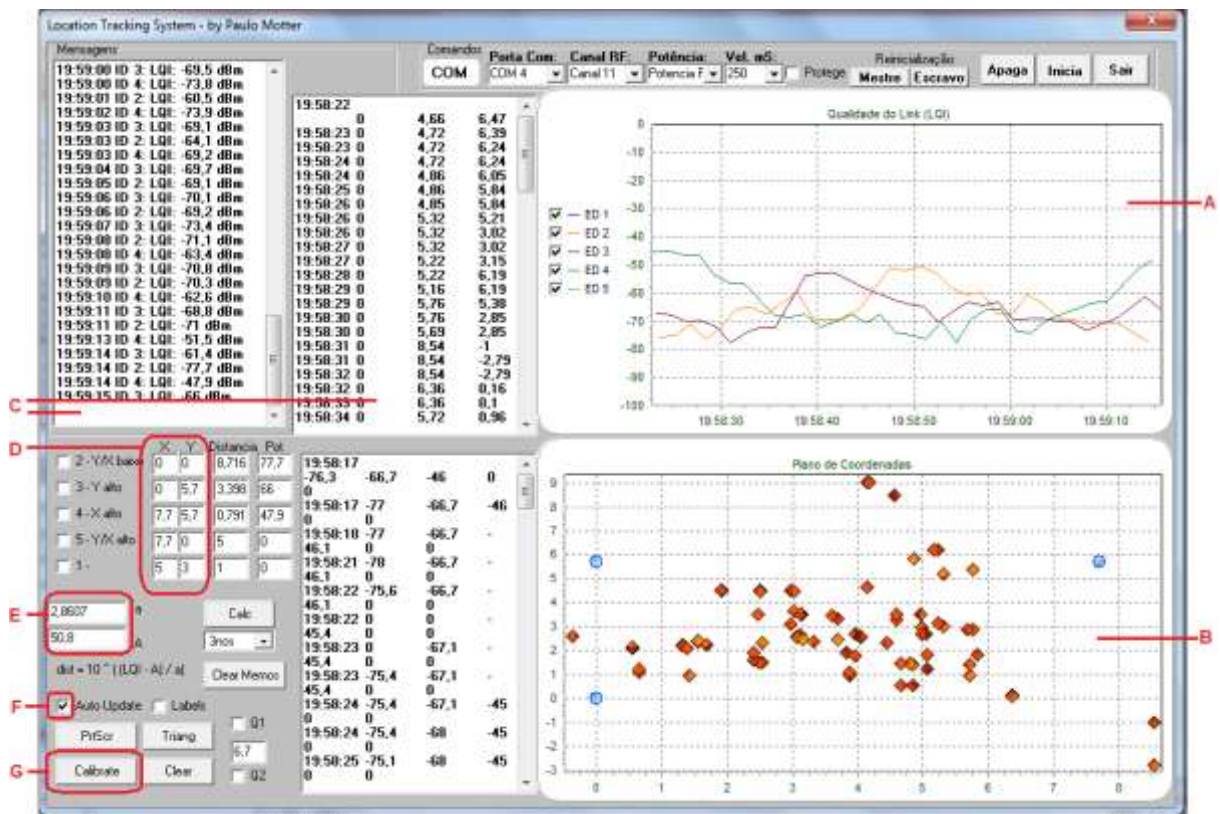


Figura 26 - Tela do programa desenvolvido para execução no PC.

A Figura 26 exibe a tela do programa desenvolvido. Na parte superior direita (indicado pela letra A) é possível visualizar os diferentes valores RSSI medidos pelos nós de referência, traçados em um gráfico temporal. Por sua vez, abaixo (no item B) encontra-se o resultado do algoritmo de trilateração em um plano de coordenadas, sendo que os círculos azuis representam os nós de referência e os losangos vermelhos representam as diversas posições

do nó móvel dentro do ambiente, que podem ser apresentadas independentemente uma das outras ou interligadas de acordo com a ordem recebida, de forma a ser traçada a rota percorrida pelo NM.

As informações das mensagens exibidas em *C* são apenas para depuração e desenvolvimento do sistema, não sendo utilizadas na aplicação final. As coordenadas fixas dos nós de referência devem ser configuradas nos painéis mostrados no item *D*.

Foram desenvolvidas algumas outras ferramentas para o programa, como a função de calibração, acionada pelo botão exibido no item *G*. O usuário deve apenas colocar o objeto alvo a diferentes distâncias de algum nó de referência e entrar com essas distâncias no *software*, que por sua vez lê o valor de RSSI para traçar um gráfico relacionando distâncias e potência, para obtenção dos coeficientes do ambiente, que são exibidos no item *E*. Consulte o Capítulo 8.2 para maiores detalhes sobre a calibração.

O programa pode calcular o algoritmo de trilateração e mostrar o resultado no plano de coordenadas apenas quando solicitado pelo usuário ou ainda toda vez que o computador recebe um pacote novo do nó base, bastando habilitar a caixa no item *F*. Este último é ideal para aplicações onde se deseja obter o rastreamento do objeto alvo.

8.5 SIMULAÇÕES

Para obter maior segurança e verificar a confiabilidade do algoritmo de trilateração implementado no programa, algumas simulações foram executadas. O principal objetivo é excluir o algoritmo de trilateração de qualquer erro na localização final do objeto alvo que possa surgir. Também foram testadas algumas opções de melhorias, como a adição de equipamentos de referência na rede. Para realização das simulações, o *software* Matlab[®] foi utilizado, devido a sua facilidade em realizar operações algébricas e da representação gráfica de expressões matemáticas.

8.5.1 Sem ruído

A primeira simulação foi elaborada para testar o algoritmo de trilateração implementado, em condições perfeitas de dados recebidos (ou seja, sem ruídos nas amostras). Para tanto, no Matlab gerou-se uma trajetória utilizando curvas paramétricas, cujas coordenadas do eixo x são calculadas pela Equação 14 e do eixo y pela Equação 15, de forma a simular a trajetória do objeto alvo em um ambiente com dimensões de 10 x 10 metros. O gráfico dessa trajetória traçado pelo Matlab pode ser visualizado na Figura 27.

$$x = p_x + 8.t + a.\sin(2.\pi.t) \quad (14)$$

$$y = p_y + 10.t + b.\sin(2.\pi.t) \quad (15)$$

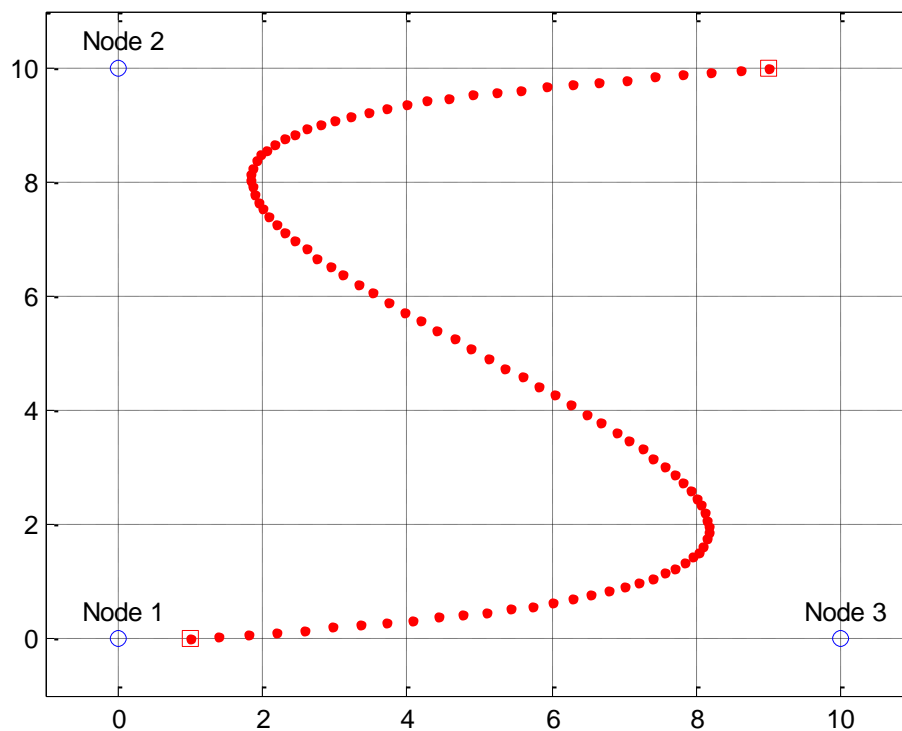


Figura 27 - Simulação da trajetória do objeto alvo.

Para esta simulação, foram traçados 100 pontos e adotados os valores: $a = 5$; $b = -1$; $p_x = 1$; $p_y = 0$, com t variando entre $[0,1]$, com intervalo de 0,01 entre cada ponto.

Inseriu-se, no programa de localização desenvolvido neste trabalho, a tabela de dados com as distâncias entre as coordenadas do alvo e os nós, com o intuito de verificar se o algoritmo de trilateração obtém a mesma trajetória. O resultado é plenamente satisfatório,

tendo o algoritmo desenvolvido atingido a proposta. A Figura 28 exibe a tela capturada do programa exibindo a trajetória simulada. Os losangos vermelhos representam as diversas posições do objeto alvo e os círculos em azul são os nós de referência.

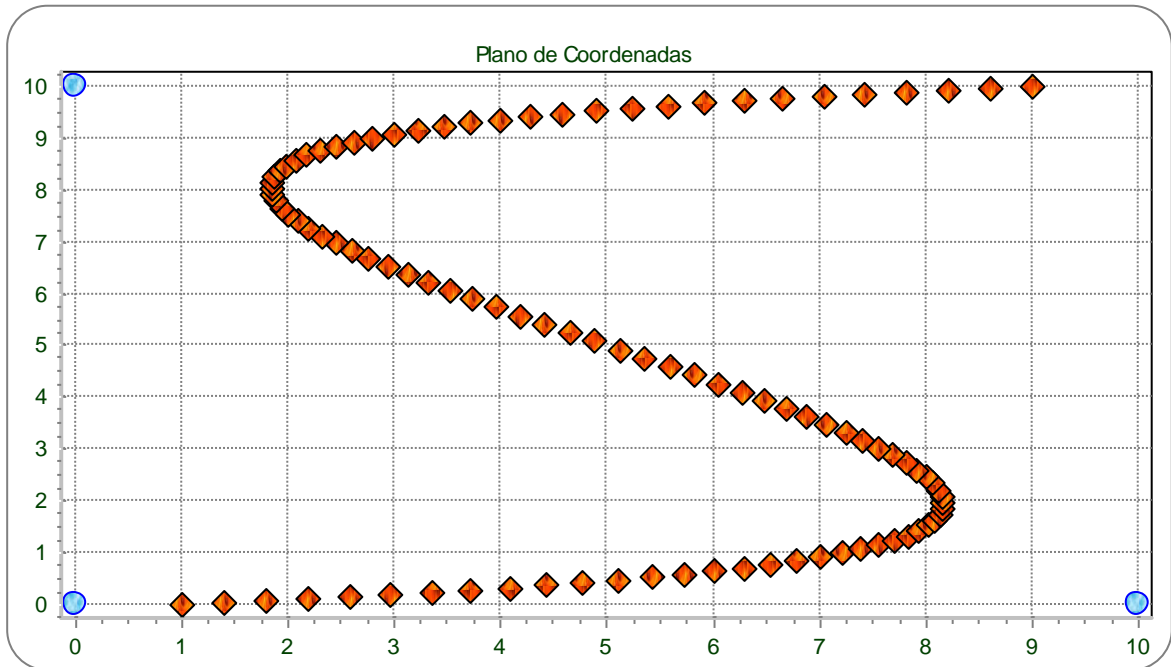


Figura 28 - Tela do programa de localização exibindo a trajetória simulada.

8.5.2 Com ruído branco

O objetivo dessa segunda simulação é testar os resultados do algoritmo de localização quando os dados recebidos possuem ruídos, dessa forma diminuindo a precisão e aproximando-se mais de uma situação real.

Segundo fontes bibliográficas [6], [17], a modelagem da interferência pode ser bem aproximada a um ruído do tipo branco, onde X_σ representa valores aleatórios em uma distribuição Gaussiana com média zero e variância igual a σ^2 , conforme ilustra a Figura 29 . A esse modelo dá-se o nome de desvanecimento log-normal, cuja fórmula é exibida na Equação 16, onde PL representa as perdas no canal e PL_{d0} as perdas a uma distância de 1 metro.

$$PL = PL_{d0} + 10 \cdot n \cdot \log_{10} d + X_\sigma \quad (16)$$

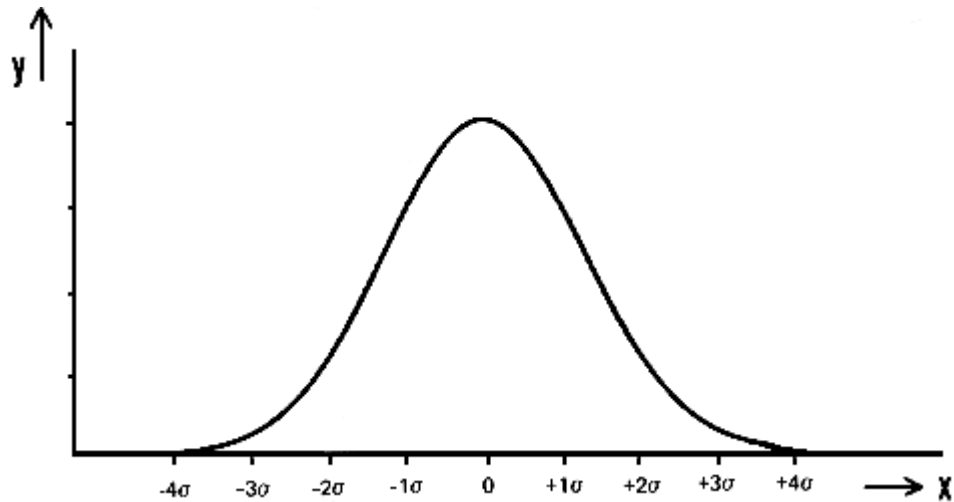


Figura 29 - Gráfico de ruído branco aditivo.

Tendo em consideração o proposto modelo log-normal, utilizou-se o Matlab novamente para gerar a trajetória do objeto alvo com as mesmas funções das Equações 14 e 15, porém dessa vez inserindo um ruído X_σ associado a uma curva Gaussiana de média zero e variância de 1 metro. O resultado é mostrado na Figura 30, onde os asteriscos em vermelho correspondem a trajetória original e os pontos em azul representam a trajetória com ruído inserido.

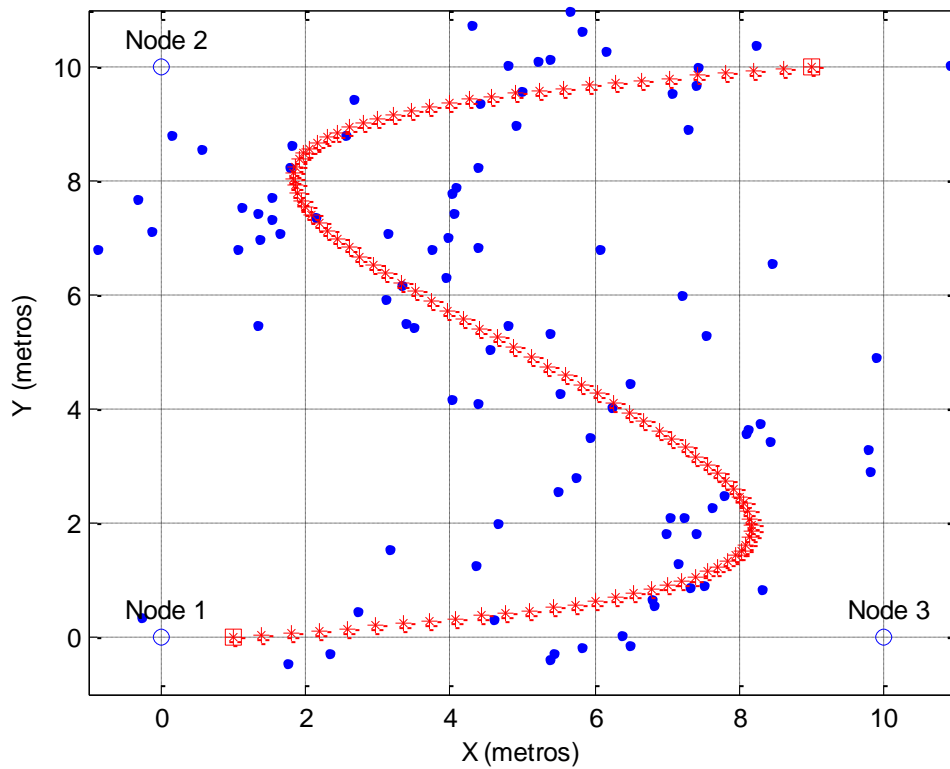


Figura 30 - Simulação da trajetória do objeto alvo com ruído branco.

É possível perceber que o ruído altera significativamente o algoritmo, dispersando os pontos resultantes em torno da trajetória real. Testando múltiplas vezes esta situação, a média de erro da distância com ruído para a distância real é de 1,41 metros, tendo valores máximos de erro chegando até 4,5 metros, representados na Figura 31. Os pontos em azul representam os valores de erro para cada valor de amostra, enquanto a linha pontilhada exibe o valor médio de erro.

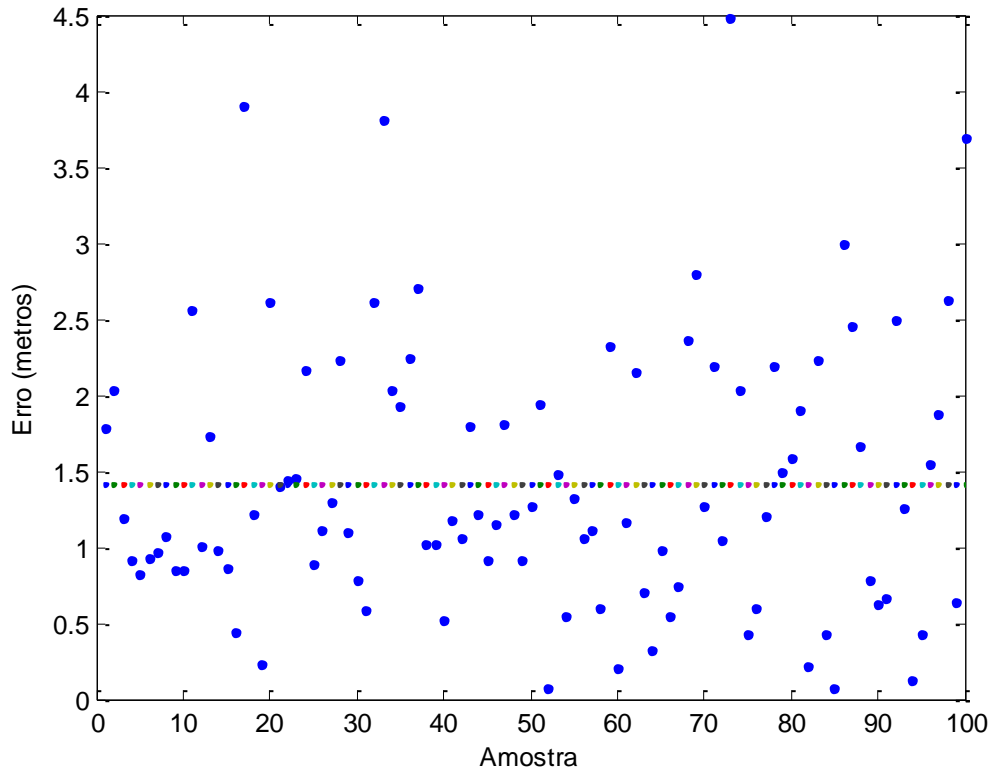


Figura 31 - Gráfico de erro na posição devido ao ruído branco, com 3 referências.

Buscando alternativas para reduzir o erro devido ao ruído, foi investigada a opção de serem adicionados mais nós de referência na aplicação, buscando assim uma redundância de dados e eliminando valores espúrios de erros na leitura de potência recebida.

Dois métodos principais de se calcular a posição com nós redundantes foram testados: via média de sucessivas trilaterações (cada trilateração utilizando apenas 3 nós de referência e depois é feita a média do resultado de cada iteração) e a eliminação de um nó de referência do cálculo de trilateração, aquele que possivelmente recebeu com maior ruído o sinal de potência.

Para comparar os métodos, utilizou-se novamente do Matlab para fazer as simulações. A trajetória com ruído é a mesma apresentada na Figura 30. O resultado do método da média de trilaterações é apresentado na Figura 32, onde o erro médio gira em torno de 1,04 metros, com valores máximos de erro não chegando a 3 metros, o que se traduz por uma melhora de aproximadamente 37% em relação aos resultados da Figura 31, onde se utilizou apenas 3 nós para calcular a posição do objeto alvo.

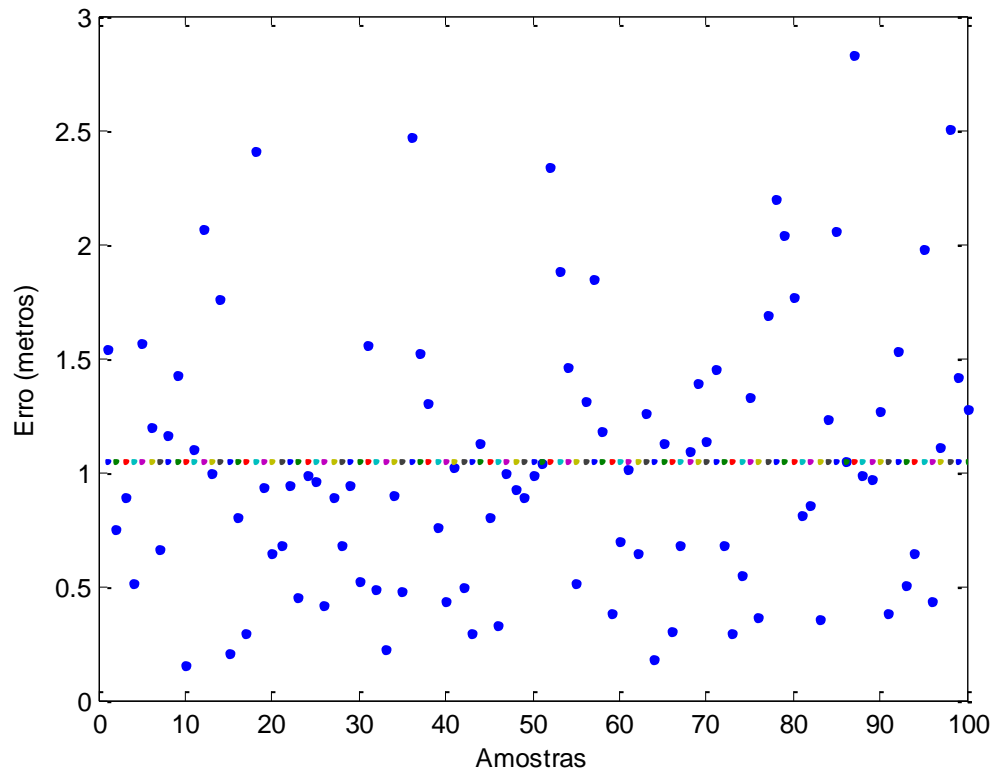


Figura 32 - Gráfico de erro na posição, com 4 referências e média de trilateração.

A Figura 33 exibe o resultado da simulação utilizando 4 nós de referência, porém excluindo do cálculo o nó que apresenta o menor valor de potência (que se traduz na prática pela exclusão do nó mais distante do objeto alvo). O erro máximo também não passou dos 3 metros e o valor médio de erro ficou em torno de 1,12 metros, tendo uma melhora de 27% em relação à situação com 3 nós de referência. Este valor, porém, ficou abaixo do método anterior, da média de trilaterações, onde o erro médio foi de 1,04 metros.

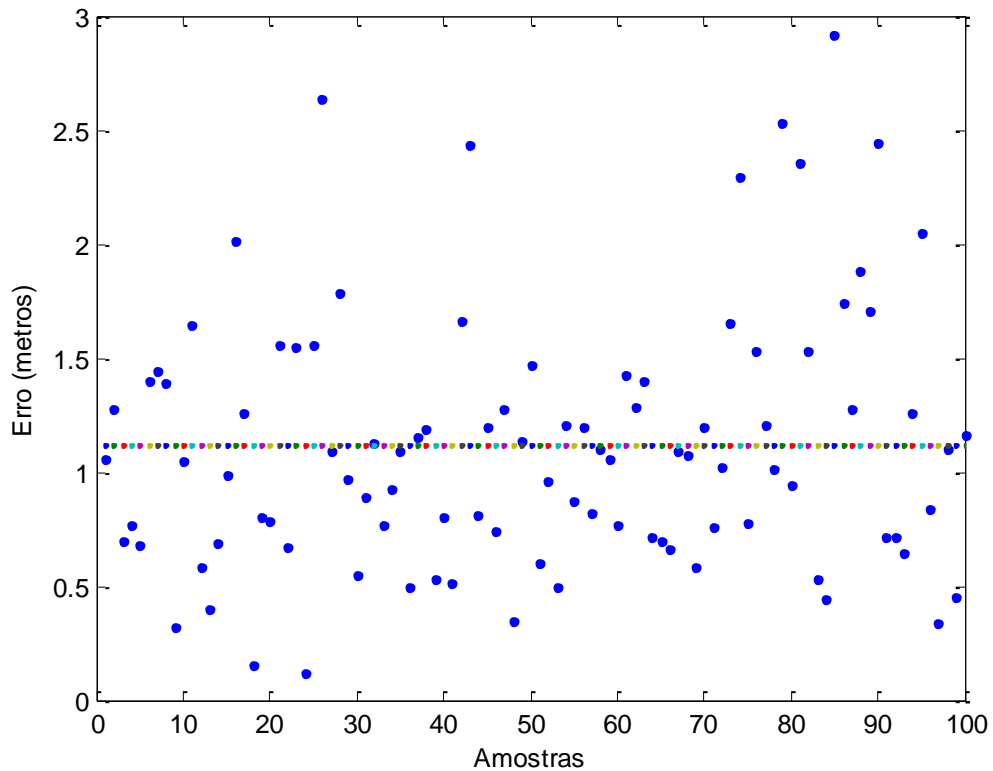


Figura 33 - Gráfico de erro na posição, com 4 referências excluindo o nó mais distante.

É fácil entender a melhora dos resultados quando adicionados mais nós à topologia, pois dessa forma o erro associado a um nó acaba sendo diluído no algoritmo.

Já o método de média de trilaterações obteve resultados melhores na simulações do que o método que exclui o menor sinal de potência, pois o erro aqui adicionado não dependia da distância. Porém, em ambientes reais os erros podem estar associados a maiores distâncias. Por isso a importância de serem realizados testes práticos comparativos entre os métodos de cálculo.

9 TESTES

Buscando obter resultados práticos da aplicação de localização desenvolvida neste trabalho, diversos testes foram realizados, tentando-se obter a maior precisão possível nos resultados e também comparar os diferentes métodos de se resolver o problema, bem como os diferentes ambientes em que se pode instalar o projeto.

Como já estudado no Capítulo 5, a propagação da onda eletromagnética pode sofrer diferentes atenuações (ou até mesmo ganhos, no caso de interferências construtivas) de acordo com o ambiente e com os obstáculos que nele se encontram. Assim, os testes foram separados em dois grandes grupos: ambiente interno e ambiente externo. O primeiro, tipicamente uma casa, escritório ou até um galpão de fábrica, é caracterizado por ter um espaço menor e com maior número de obstáculos, o que em teoria faria com que o sinal variasse mais com o meio, obtendo talvez erros de maiores magnitudes. Já o segundo ambiente caracteriza-se por maiores extensões, bem como menor número de obstáculos, o que pode significar um melhor desempenho na aplicação final.

Para todos os testes buscou-se sempre as melhores condições de realização, sempre lembrando as características analisadas também no Capítulo 5, como a altura mínima que o nó deve estar do chão, a fim de não haver reflexões dentro da primeira zona de Fresnel. Também foi dada especial atenção às antenas utilizadas, pois como visto no Capítulo 4.2, o mesmo tipo de antena pode apresentar diferentes tipos de ganho (devido a alguma imperfeição na sua fabricação ou algum choque posterior), o que pode acarretar em desbalanceamento entre os nós participantes da trilateração, resultando em erros nas medidas de localização.

9.1 AMBIENTE INTERNO

O local escolhido para serem realizados estes testes foi a sala 301A do Instituto Eletrotécnico da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. É uma sala de aula normal, com

mesas e cadeiras que foram deixadas no lugar durante a execução dos testes, com o intuito de se obter resultados mais próximos de aplicações reais, em que existirão obstáculos para atenuar o sinal. A sala tem as dimensões de 9 x 6 metros e está representada na Figura 34.



Figura 34 - Ambiente interno utilizado para os testes.

Conforme estudos realizados no Capítulo 4.2, as antenas omni-direcionais possuem melhor desempenho para esta aplicação, pois elas são mais homogêneas quanto à transmissão do sinal do que a antena F-invertida. Dessa forma, no primeiro teste cinco nós foram utilizados para a aplicação, sendo que quatro deles utilizavam a antena omni-direcional Titanis (um nó atuando como objeto alvo e três nós como referências) e um nó utilizando a antena F-invertida, atuando como estação base, função que não requer cuidados especiais com antenas e transmissão.

9.1.1 Calibração

Conforme o Capítulo 8.2, o primeiro passo após a instalação dos equipamentos nos seus devidos locais é a calibração dos coeficientes do modelo de propagação, de forma a se obter resultados mais precisos de acordo com as condições do ambiente. Para tanto, utilizou-se o nó móvel, um dos nós de referência e a funcionalidade “Calibração” do *software* desenvolvido nesse trabalho. A Figura 35 mostra a curva de calibração encontrada na escala logarítmica. Analisando os pontos de medidas obtidos, pode-se notar que existe uma variação de cada medida à equação de aproximação que define o comportamento da potência nesse ambiente devido aos efeitos de desvanecimento. Existe um erro associado à aproximação linear dos pontos medidos e que é representado pelo índice R^2 . O quanto mais próximo de 1 este índice chegar, menor é o erro de linearização.

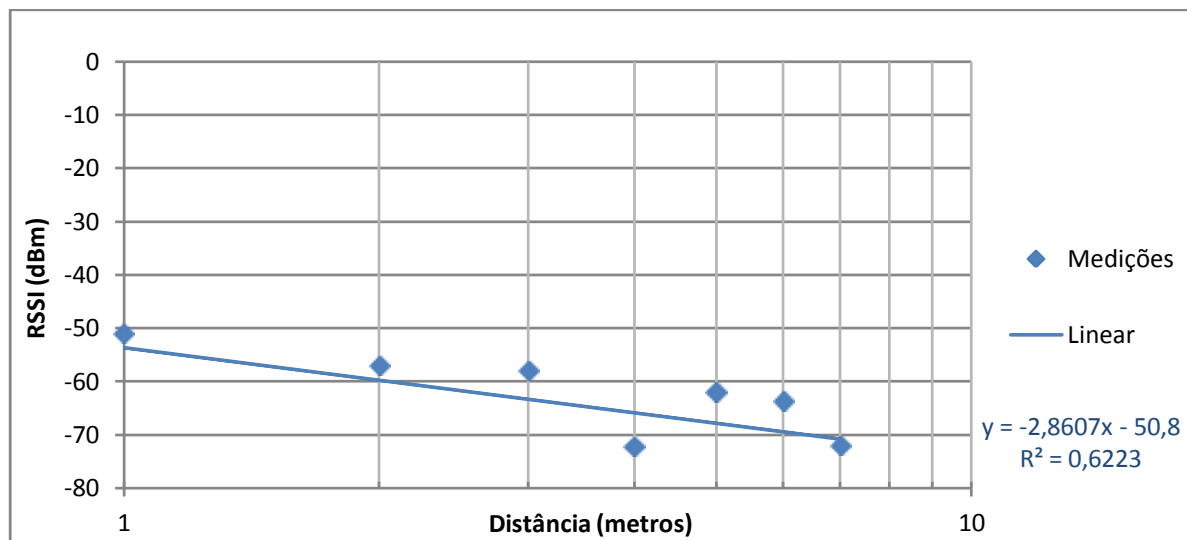


Figura 35 - Curva de calibração utilizando antenas omni-direcionais em ambiente interno.

9.1.2 Medições utilizando 3 nós de referência

Para realizar as medições, o objeto alvo foi deslocado dentro do ambiente de testes, enquanto os nós de referência recebiam as mensagens de resposta do nó móvel e mediam a potência recebida. Esses valores eram então repassados à aplicação de localização, através do nó base, que calculava a localização do objeto. Durante este procedimento, a posição real do

objeto alvo foi marcada, a fim de ser comparada com a posição calculada e possibilitar a extração do erro das medições. Os nós fixos foram posicionados em três dos quatro cantos disponíveis na sala, nas posições (0 ; 0), (0 ; 5,7) e (7,7 ; 5,7) metros. Para a comparação, amostras em 8 posições diferentes foram obtidas. A Tabela 7 apresenta os valores de erro (distância entre posição real e posição calculada) médio, máximo e mínimos absolutos. A Figura 36 mostra um gráfico com os valores de erro para cada amostra obtida e também a média dos erros.

Analisando os dados obtidos, nota-se que apenas a amostra de número 6 tem erro quase nulo (0,08 metros). Em todas as demais, o erro é próximo de 1 metro ou até maior.

Tabela 7 - Erros do algoritmo de localização utilizando a antena omni-direcional.

Tipo de Cálculo	Média de Erro	Erro Máximo	Erro Mínimo
3 nós	1,66 m	3,06 m	0,08 m

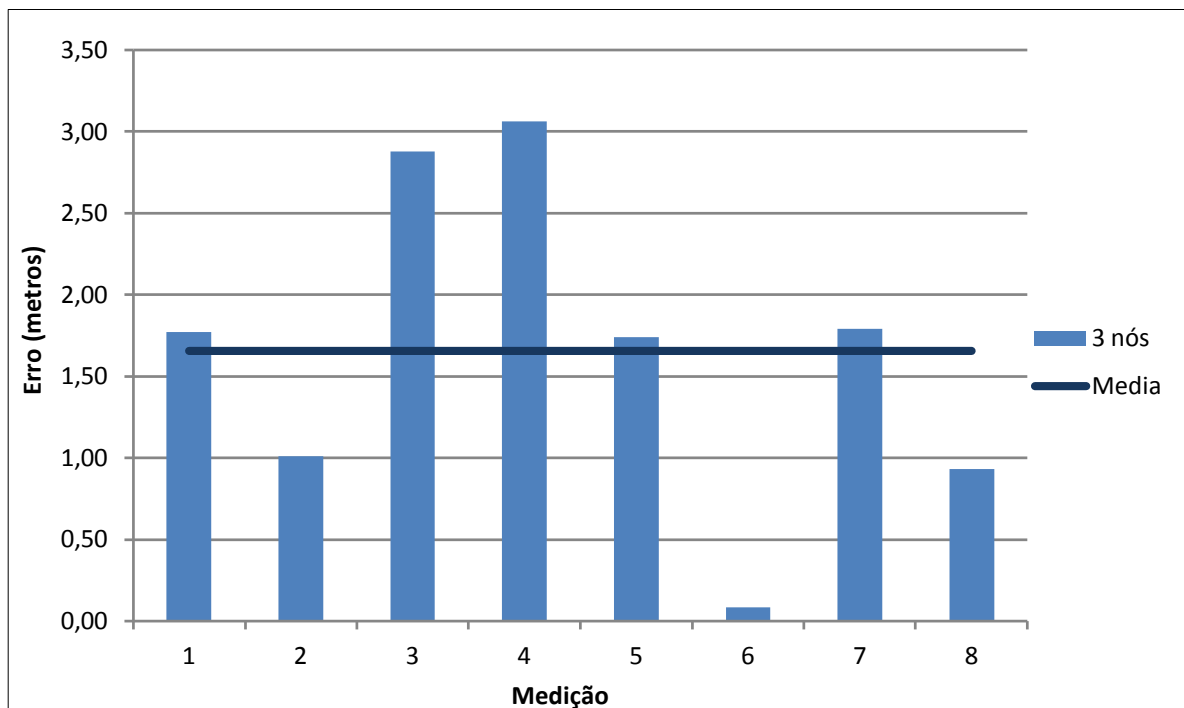


Figura 36 - Erros do algoritmo de localização utilizando a antena omni-direcional.

9.1.3 Medições utilizando 4 nós de referência

Conforme estudado no Capítulo 8.5, uma tentativa de melhorar os resultados obtidos é aumentado o número de nós de referência para fazer a leitura da potência de sinal recebida. Por isso outra bateria de testes foi organizada com o intuito de comparar praticamente os resultados para diferentes números de referências.

Devido à indisponibilidade de mais um equipamento com antena omni-direcional, optou-se por colocar os quatro nós com antena omni-direcional como fixos e um equipamento com antena F-invertida como móvel, para que uma possível piora que pudesse ocorrer nas leituras fosse propagada de forma igual a todas as referências de medição. O quarto nó fixo foi posicionado no outro canto livre da sala, na posição (7,7 ; 0) metros.

Três diferentes métodos de calcular a localização foram testados e são descritos a seguir:

- 3 nós: utilizam-se apenas os mesmos três nós do método anterior. A média de erros, ou Média A, é representada pela linha azul, com valor de 2,21 metros;
- 4 média: um quarto nó de referência é adicionado à topologia para realização das medições. Para obtenção das coordenadas é feita a média de todas as trilaterações possíveis, cada uma usando três medidas por vez. A média de erros, ou Média B, é representada pela linha vermelha, com valor de 1,85 metros;
- 3 entre 4: utiliza igualmente 4 referenciais de medições de distância, porém descarta-se a medida com pior indicador de potência, para retirar valores espúrios devido à distância ou obstáculos, calculando então a trilateração com as três melhores medições. A média de erros, ou Média C, é representada pela linha verde, com valor de 1,84 metros;

Os resultados desses novos testes são então apresentados na Tabela 8 e na Figura 37.

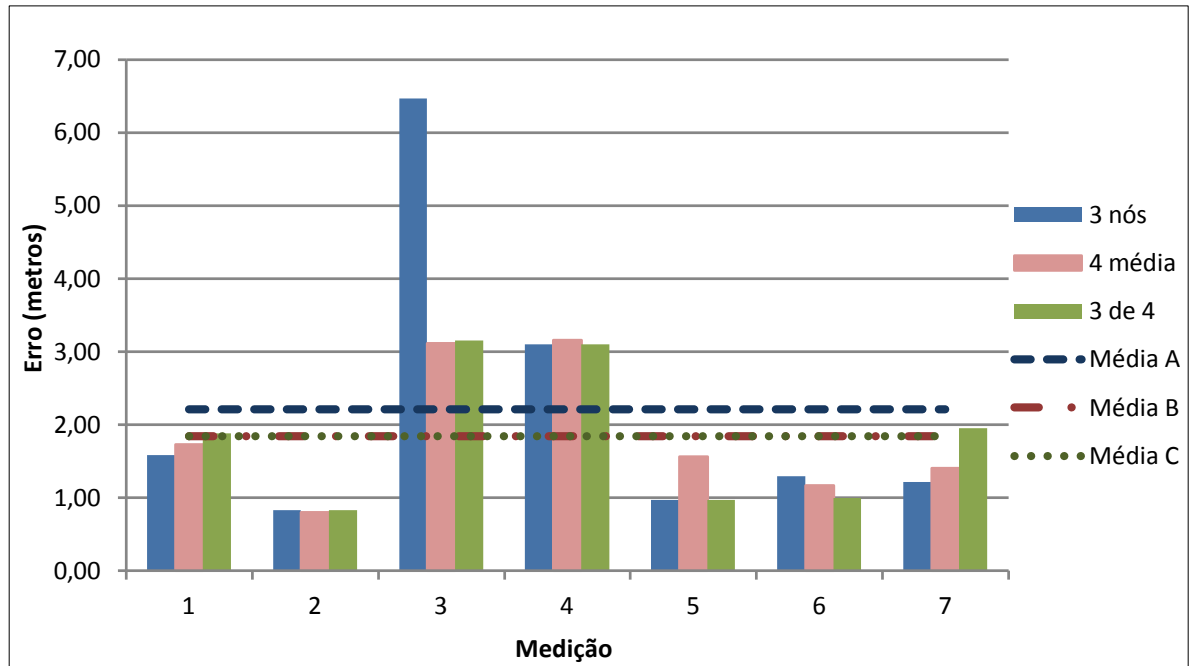


Figura 37 - Erros do algoritmo de localização utilizando o nó móvel com antena F.

Tabela 8 - Erros do algoritmo de localização para diferentes métodos de cálculo.

Tipo de Cálculo	Média de Erro	Erro Máximo	Erro Mínimo
3 nós	2,21 m	6,47 m	0,83 m
Média de 4 nós	1,85 m	3,16 m	0,79 m
3 entre 4 nós	1,84 m	3,15 m	0,83 m

A Figura 38 exibe o percurso encontrado pelo programa para o método média de 4 nós. Os losangos em laranja exibem os resultados dos pontos calculados pelo algoritmo, enquanto os triângulos verdes representam a real posição do objeto. Os círculos azuis representam os nós de referência. É possível observar que há um erro para cada medida, comparando-a com a real localização do objeto, porém é possível perceber que a rota calculada assemelha-se bastante à rota real percorrida.

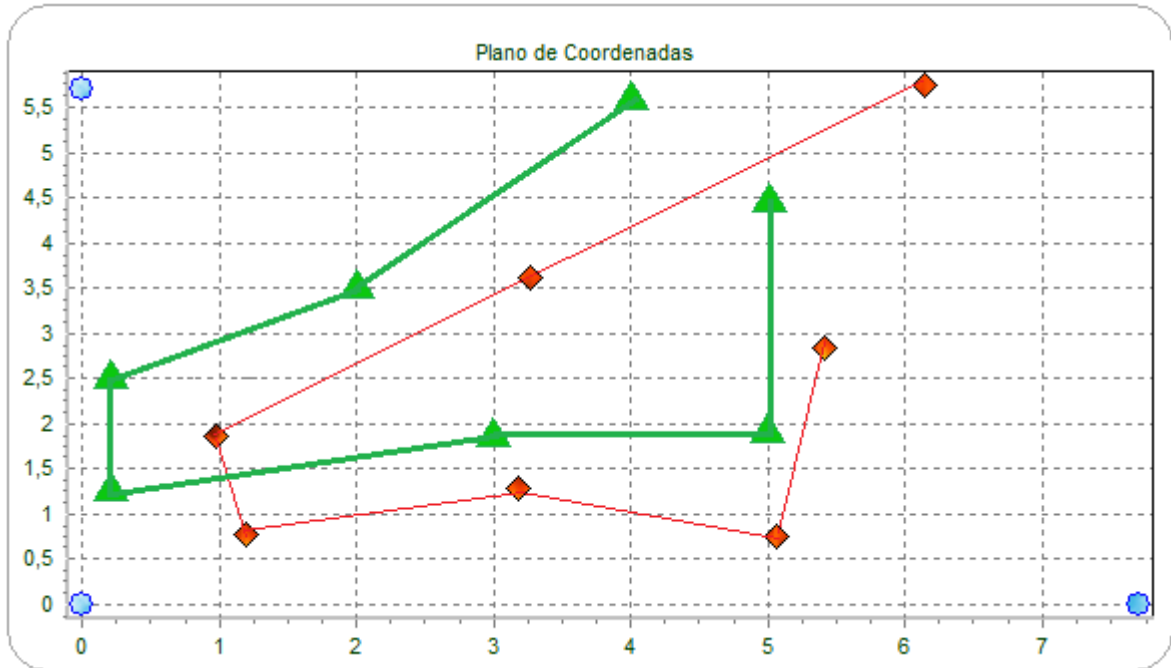


Figura 38 - Comparação entre percurso calculado e real.

9.2 AMBIENTE EXTERNO

O local selecionado para a realização dos testes externos foi um sítio na região da Lomba do Pinheiro, em Porto Alegre. Foi escolhido um local plano e aberto, sem obstáculos presentes, para poder comparar o projeto com a situação onde haviam objetos no caminho da propagação. A Figura 39 exibe o local escolhido.



Figura 39 - Ambiente externo utilizado para os testes.

Novamente, foram escolhidos quatro nós com antenas omni-direcionais, atuando três deles como nós referenciais e um como nó móvel. O nó base conectado a um notebook possuía a antena F.

As dimensões do local selecionado eram de 8 x 15 metros, sendo que os referenciais foram instalados nos cantos, mais especificamente nas posições (0 ; 0), (0 ; 15) e (8 ; 0) metros.

9.2.1 Calibração

A calibração foi realizada da mesma forma que no Capítulo 9.1.1, instalando primeiro os nós fixos, utilizando a função de calibração do programa desenvolvido nesse trabalho e colocando o objeto alvo a diferentes distâncias medidas de um referencial, obtendo os valores de potência relativos. A Figura 40 mostra o gráfico resultante.

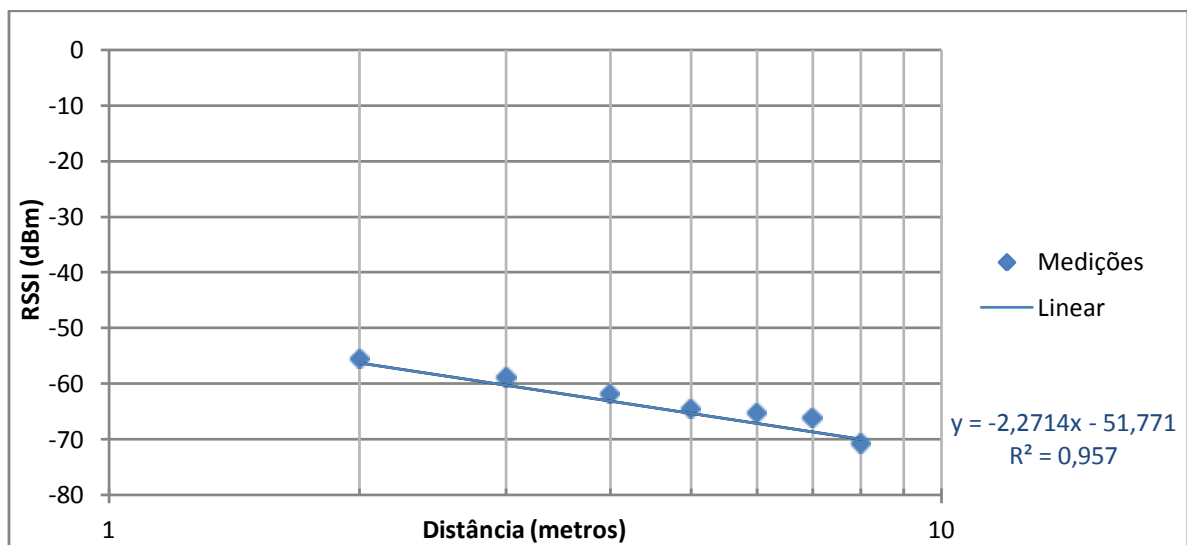


Figura 40 - Curva de calibração utilizando antenas omni-direcionais em ambiente externo.

Uma primeira constatação importante já pode ser feita, quando comparando com a calibração feita no ambiente interno: as medições obtidas aproximam-se muito mais da reta resultante, individualmente, do que no outro caso. O valor de R^2 , que é justamente o coeficiente que mede o erro associado de cada ponto à reta resultante pelo método dos mínimos quadrados, é de 0,957 para este teste, muito melhor do que o valor de 0,6223 do

teste anterior. Isso significa que o ambiente externo realmente é mais homogêneo e possui menos interferências.

9.2.2 Medições utilizando 3 nós de referência

Para as medições, o objeto alvo foi deslocado no ambiente de testes, enquanto os nós de referência recebiam e mediam a potência recebida. Esses valores eram então repassados à aplicação de localização, através do nó base, para o cálculo das coordenadas. Durante este procedimento, a posição real do objeto alvo foi marcada, a fim de ser comparada com a posição calculada e extrair o erro das medições.

Para a comparação, 8 amostras de localização foram obtidas e os resultados são mostrados a seguir. A Tabela 9 exibe os valores de erro médio, máximo e mínimos absolutos em relação à posição real. A Figura 41 mostra um gráfico com os valores de erro para cada amostra obtida e também a média dos erros.

Tabela 9 - Erros do algoritmo de localização no ambiente externo.

Tipo de Cálculo	Média de Erro	Erro Máximo	Erro Mínimo
3 nós	2,91	4,94	1,20

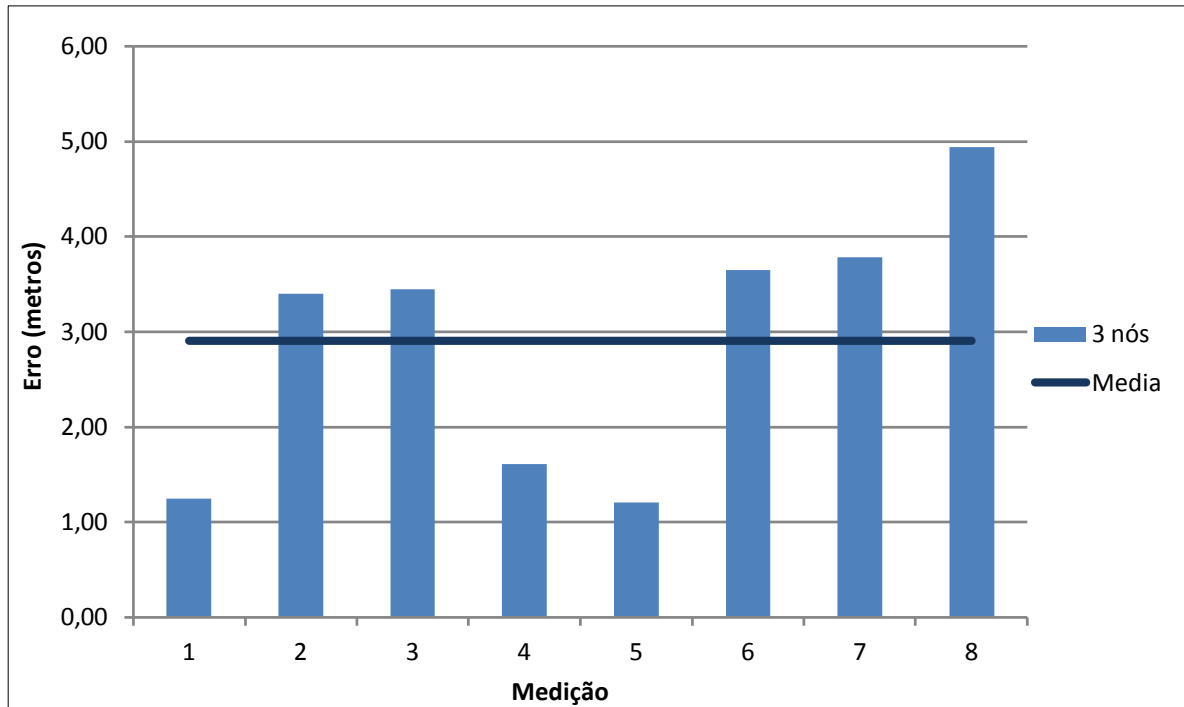


Figura 41 - Erros do algoritmo de localização no ambiente externo.

Pelos resultados apresentados, nota-se uma piora nos valores obtidos, quando comparando estes aos testes realizados no Capítulo 9.1.2, quando pelos estudos teóricos e mesmo pelos resultados da calibração os testes externos deveriam ter melhores resultados.

De fato, após ser investigado o fato, notou-se que os nós envolvidos na aplicação estavam desbalanceados, ou seja, obtinham diferentes valores de potência recebida para a mesma distância do nó móvel. Ao serem trocadas as antenas entre os rádios, notou-se que os erros acompanharam as antenas. Infelizmente, pelo fato do local ser afastado e também pelo curto prazo para a entrega desse relatório, novos testes externos não puderam ser realizados a tempo.

9.3 CONCLUSÕES DOS TESTES

Nos testes em ambiente interno foi observado um aumento do erro (considerando apenas o método de cálculo com três referências) quando comparando o teste onde todos os nós possuíam a antena omni-direcional com aquele em que o nó móvel possuía a antena F, em

que a média de erros fica 33% pior. Este fenômeno confirma os estudos realizados no Capítulo 4.2 e deve-se principalmente à falta de homogeneidade da irradiação da antena F invertida. Logo, para melhores resultados realmente é importante utilizar a antena omnidirecional.

Analisando os resultados da Figura 37 e da Tabela 8, nota-se que o aumento do número de referências traz uma diminuição do erro. Comparando-se os resultados para os métodos média de 4 nós e 3 nós, nota-se uma melhora de 19,5%, porém menor do que os 37% encontrados na simulação do Capítulo **Error! Reference source not found.** Essa simulação também previa que o método das médias de trilaterações teria melhor desempenho do que o método de excluir a pior medida recebida, todavia na prática essa diferença foi quase nula, podendo-se dizer que os dois métodos obtiveram os mesmos desempenhos nos testes realizados.

Infelizmente pelas condições não ideais dos nós durante os testes em ambiente externo, a comparação deste com o ambiente interno ficou comprometida e sem resultados práticos reais. Ainda assim, nota-se a potencial melhora do sinal quando fazendo medições utilizando apenas um nó referencial, como durante a calibração. Os valores obtidos aproximam-se muito mais da curva, sendo que o erro de cada medida para a reta calculada pelos mínimos quadrados é muito menor quando comparado ao erro encontrado no ambiente interno.

10 ESTUDOS DE CASO

Neste capítulo são apresentadas duas aplicações práticas para o projeto desenvolvido neste trabalho, seus objetivos, quais as vantagens de se utilizar este método e como aplicá-lo.

10.1 AMBIENT ASSISTING LIVING

O *Ambient Assisting Living* (AAL) é um programa desenvolvido por diversas entidades, como por exemplo o *AAL Joint Programme* [24], composto por 20 membros da União Européia, e a Aliança AAL [25], organizada pelo Instituto Fraunhofer da Alemanha. O grande objetivo deste projeto é a assistência a pessoas durante o dia-a-dia, através do uso de dispositivos eletrônicos. Um dos grandes motivadores por trás desse trabalho é o aumento do número de pessoas morando sozinhas em seus domicílios, aliado à extensão da expectativa de vida e da busca de melhores condições para pessoas portadoras de necessidades especiais.

Essa aplicação foca em proporcionar melhorias na qualidade de vida de um determinado usuário no seu ambiente doméstico através da monitoração, controle e adição de funcionalidades que permitam um maior conforto. O projeto é intimamente ligado com sistemas de Ambientes Inteligentes, que promovem segurança, conforto, economia e melhorias de acessibilidade [26], e com redes biométricas de sensores (*Body Sensor Network*, BSN), que proporciona monitoramento das condições vitais dos pacientes, bem como o envio de alertas quando em situações de emergências [27]. Ambas as tecnologias se utilizam de redes de sensores sem fio, pois permitem a interação com os diversos sensores espalhados no ambiente ou no corpo do usuário, além do foco para aplicações de baixo custo e grande autonomia.

Um exemplo de ambiente inteligente pode ser observado na Figura 42, onde diversos sensores são espalhados pela residência e conectados através de uma rede sem fio do tipo ZigBee.



Figura 42 - Exemplo de topologia de ambiente inteligente.

Neste âmbito onde já existe uma rede de sensores sem fio completa, o projeto elaborado neste trabalho se encaixa perfeitamente, pois permite a localização do indivíduo no ambiente e a monitoração dos seus percursos na residência sem a necessidade de equipamentos adicionais.

Os casos de uso para essa aplicação são muitos. No âmbito de saúde, pode-se fazer uma análise comportamental do paciente, verificando se esse passa muito tempo na cama ou assistindo televisão, por exemplo. Aliado a um sensor do tipo acelerômetro, é possível a elaboração de um sistema para detecção de quedas do paciente a partir de súbitas mudanças na velocidade e orientação do movimento, bem como se o monitor detectar que ele está muito tempo parado em algum lugar que não deveria estar.

Ainda, a localização do indivíduo permite certos confortos e auxílios relacionados à interação com o ambiente. Pode-se programar a residência para a execução de tarefas

automaticamente com a aproximação da pessoa, como abertura de portas de cômodos ou da geladeira, sendo de grande ajuda principalmente para pessoas portadoras de necessidades especiais. O ligar e desligar de aparelhos domésticos e das luzes ambientes pode estar atrelada à presença do indivíduo em determinado cômodo, bem como a climatização (temperatura) do local. A aplicação de localização também pode ser empregada colocando nós em objetos importantes que se costuma perder, como remédios e chaves. Com isso, a pessoa pode consultar o agente de monitoração para saber a localização do item desejado.

Finalmente, a grande vantagem da utilização da aplicação de localização via RSSF em AAL, em comparação a outros métodos, é a possibilidade de concentrar tudo em poucos *hardwares*, visto que basta utilizar os módulos de rádio dos sensores já implementados na residência e no corpo do usuário para obter os dados, sem a necessidade de adição de vários sensores espalhados pela casa.

10.2 MONITORAMENTO DE ANIMAIS EM FAZENDAS

O objetivo deste estudo é o de implementar uma solução de baixo custo para monitoramento e rastreamento de animais [28], de forma a melhorar a metodologia utilizada normalmente nas fazendas, onde necessita-se de intervenção humana para aquisições de dados, além não haver uma rastreabilidade do animal. Com essas funcionalidades implementadas, pode-se monitorar os sinais vitais e o seu bem estar, de forma a agir preventivamente evitando situações emergenciais e até mesmo salvando a vida dos animais, em alguns casos. Pode-se também monitorar as variáveis do ambiente, com o intuito de saber a temperatura, umidade e índice de radiação ao qual o animal está exposto. Ainda, a rastreabilidade permite o estudo do comportamento do animal e também inibe o abigeato.

Um projeto que utilize uma rede de sensores sem fio encaixa muito bem nos requisitos do projeto, pois é especialmente focado para o uso de nós sensores espalhados no ambiente

(no caso, fixados em cada animal), além de possuir funcionalidades de rastreabilidade (foco deste trabalho) sem a necessidade de adição de equipamentos. O GPS pode ter vantagem sobre sistemas RSSF por possuir maior precisão de dados, porém nesta aplicação a precisão da RSSF é suficiente. Ainda, esta última possui vantagens como o menor custo, menor consumo de energia (o que resulta também em maiores intervalos entre as manutenções dos equipamentos) e a garantia de funcionalidade mesmo em zonas sombreadas (que no caso do GPS pode atenuar o sinal dos satélites, impedindo o recebimento do sinal).

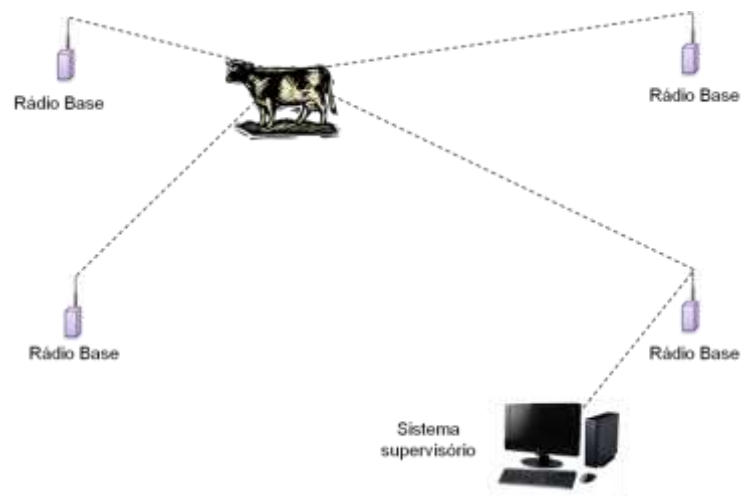


Figura 43 - Topologia de aplicação de monitoramento de animais.

A Figura 43 exemplifica a topologia de aplicação do sistema de monitoramento. Um nó sensor fica no animal, podendo-se utilizar um colar ou um brinco para tal fim. Diversos nós base são espalhados pelo ambiente, com o objetivo de se ter uma área de cobertura completa das possíveis localizações do animal. Por fim, um sistema supervisor agrupa os dados colhidos e faz o processamento, podendo-se analisar os dados e até eventualmente alarmar em situações de emergências.

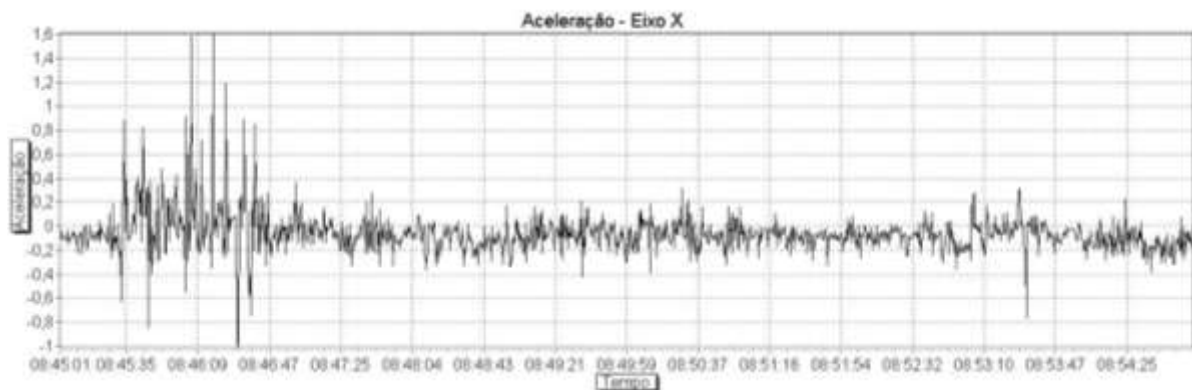


Figura 44 - Leitura da aceleração do animal.

Está planejado o uso de sensores de temperatura, luminosidade e aceleração, inclusive alguns testes com este último já foram realizados e o resultado é apresentado na Figura 44. O gráfico mostra a aceleração em um dos eixos de uma vaca variando no tempo. É possível identificar picos na aceleração nos instantes iniciais, que correspondem a uma fuga do animal (que foi propositalmente perturbado para que ele corresse).

Para o sistema de rastreamento, o sistema desenvolvido neste trabalho adapta-se muito bem, pois atende os requisitos do projeto. Conforme já relatado aqui, a aplicação utiliza-se dos rádios dos nós sensores para troca de mensagens, havendo a medição do valor do sinal de potência recebida nos nós de referência (nós base neste estudo) e depois reenviando os dados colhidos para o sistema supervisor, através de um nó *gateway*, conectado ao computador através da interface USB. Na aplicação gráfica inserem-se as coordenadas dos diversos nós de referência utilizados. Com a funcionalidade implementada do *auto update*, o *software* automaticamente calcula a posição dos nós fixados nos animais, através do algoritmo de trilateração, e traça os pontos correspondentes às coordenadas no gráfico.

É interessante notar que neste sistema pode-se elaborar um modelo de localização com fusão de dados, tanto dos valores RSSI obtidos pelos nós de referência, como também dos valores de aceleração obtidos pelo sensor. Se por alguma interferência externa (como algum grande obstáculo) o sinal de potência for atenuado, haverá um erro no resultado final do algoritmo de trilateração. Porém, se utilizado o sensor de aceleração em conjunto, pode-se

descartar súbitas mudanças nos valores de RSSI recebidos se não houver picos de aceleração, evitando assim resultados de falsa movimentação do animal.

11 CONCLUSÃO

As redes de sensores sem fio evoluíram muito nos últimos anos devido à demanda por aplicações colaborativas, com grande número de dispositivos participantes, de pequeno tamanho e fácil instalação.

Utilizando estas redes tem-se a oportunidade de criar sistemas de localização com características diferentes dos atuais, como o funcionamento em ambientes internos, a não necessidade de linha de visada e principalmente o pequeno consumo de energia e o baixo custo.

Neste trabalho foi elaborado um sistema para localização de dispositivos participantes de uma RSSF e cujas coordenadas não são conhecidas ou variam no tempo. Para sua implementação foram utilizados os microcontroladores da família MC1322x da Freescale, que possuem um microprocessador ARM-7 e um rádio padrão IEEE 802.15.4 encapsulados. O desenvolvimento do projeto passou pela escolha do método de medição de distância através do indicador de potência recebida do sinal (RSSI), após serem analisados outros métodos e verificado que este era o mais indicado para a situação. As etapas posteriores foram os estudos de propagação de ondas eletromagnéticas, diagrama de irradiação das antenas utilizadas no projeto e métodos de obtenção das coordenadas a partir de diferentes distâncias entre pontos.

Após todos os estudos, foi elaborada uma topologia para implementação do projeto utilizando no mínimo três referenciais para medir a potência, um nó como objeto a ter sua localização descoberta, um nó base para agrupar os dados e enviar a um computador pessoal, que é utilizado na execução do algoritmo e visualização gráfica das coordenadas do objeto. Foi ainda desenvolvida uma funcionalidade de calibração dos rádios, para adequar os parâmetros dos cálculos ao ambiente, diminuindo os erros associados. Todos os *firmwares* dos sensores e o programa do PC foram desenvolvidos ao longo do trabalho.

Simulações foram realizadas, utilizando o *software* Matlab, buscando a confirmação dos algoritmos desenvolvidos e de possíveis opções de melhora dos resultados, bem como testes práticos em ambientes distintos para certificação dos resultados.

A aplicação final funcionou corretamente, obtendo automaticamente as coordenadas do nó móvel na medida em que ele se desloca no ambiente.

É importante salientar que alguns pontos devem ser levado em consideração para melhorar a eficácia do projeto. Os nós devem estar a alturas mínimas do chão, a fim de evitar interferências na primeira zona de Fresnel. A antena omni-direcional resulta em menores erros devido a sua maior homogeneidade em comparação à antena F-invertida, que pode ser implementada em uma aplicação cuja precisão não é tão importante, a fim de baixar o custo. Porém, é importante ter cuidados especiais com as antenas omni-direcionais, certificando-se do bom estado delas, a fim de evitar desbalanceamento de ganho entre os nós participantes da rede. O aumento do número de referenciais implica em uma melhoria nos resultados, devido à diluição de um eventual erro associado a um nó. Pelos estudos teóricos e pelos resultados obtidos nas calibrações, tem-se a expectativa de que a aplicação tem melhor desempenho em ambientes externos, apesar de não haver dados conclusivos práticos.

Por fim, é interessante notar que a aplicação aqui desenvolvida é totalmente viável e o seu desempenho, em comparação com outros métodos, dependerá da aplicação. Se os requisitos forem o baixo custo, a não adição de novos *hardwares* (quando já presente uma RSSF), o uso em ambientes internos ou mesmo não sendo fundamental a precisão, a localização via redes de sensores sem fio leva vantagens.

11.1 TRABALHOS FUTUROS

O projeto de localização de objetos móveis utilizando redes de sensores sem fio foi realizado com o intuito de ser estudada a viabilidade de implementação prática deste trabalho, além de serem analisados os resultados que verifiquem se há vantagens em relação aos métodos existentes.

Foram desenvolvidos *softwares* e *firmwares* para testes durante o projeto, porém este não foi implementado em nenhuma situação prática, como rastreamento de animais ou ambientes inteligentes. Como trabalho futuro, este projeto pode ser aprimorado visando uma aplicação específica, realizando testes no real local de implementação e verificando o correto funcionamento do sistema quando transportando os valores dos sensores nas mensagens de rádio.

Ainda, maiores estudos podem ser realizados utilizando fusão de dados para aumento da precisão, de acordo com a disponibilidade de sensores na rede que possam auxiliar com informações para obtenção da localização de objetos. Neste âmbito, poderiam ser estudados os efeitos que um segundo nó móvel teria no sistema, se traria interferências ou ainda realizar estudos de localização em *multi-hops* (utilizar as coordenadas recém calculadas de um dos nós móveis para localizar um segundo objeto alvo).

BIBLIOGRAFIA

1. **LOUREIRO, A., et al.** *Redes de Sensores Sem Fio*. 2003. XXI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores.
2. **AKLYILDIZ, I. F., et al.** A Survey on Sensor Networks. *IEEE Communications Magazine*. August 2002.
3. **UBLOX.** *GPS Essentials of satellite navigation. Compendium*. 2009.
4. **SOHRABY, K., MINOLDI, D. e ZNATI, T.** *Wireless Sensor Networks - Technology, Protocols and Applications*. 2007.
5. **ALLGAYER, R.** *Arquitetura Reconfigurável Rede de Sensores sem Fio*. 2008.
6. **KARL, H. e WILLIG, A.** *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. [S.l.] : Wiley-Interscience, 2005. ISBN: 978-0470519233.
7. **802.15.4, IEEE.** *IEEE Standard for Information Technology Part 15.4: wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for low-rate wireless personal area networks (LR-WPANS)*. 2006.
8. **FREESCALE.** *Simple Media Access Controller - User's Guide*. 2008.
9. **ZIGBEE.** Página da associação ZigBee Alliance. [Online] Acessado em Abril de 2010. <http://www.zigbee.org/>.
10. **FREESCALE.** *MC1322x Advanced ZigBee - Compliant SoC Platform for the 2.4GHz IEEE 802.15.4 Standard. Reference Manual*. 2009. www.freescale.com/files/rf_if/doc/data_sheet/MC1322x.pdf.
11. **FARNELL.** Premier Farnell Group Shopping Website. [Online] Acessado em Junho de 2010. <http://www.farnell.com/>.
12. **FIORIN, R.** *Latest SoC solution to meet easily ZigBee*. 2008.
13. **ANTENOVA.** *Titanis 2.4GHz swivel SMA antenna - Product Specification*. 2010.
14. **SORAS, C., KARABOIKIS, M., TSACHTSIRIS, G. e MAKIOS, V.** *Analysis and design of an inverted-F antenna printed on a PCMCIA card for the 2.4 GHz ISM band*. 2002.
15. **FREESCALE.** *Application Note on Compact Integrated Antennas*. 2006.
16. Reflection Coefficient Tutorial. [Online] Acessado em Maio de 2010. <http://www.fourier-series.com/rf-concepts/reflection.html>.
17. **RAPPAPORT, T. S.** *Wireless Communications: Principles & Practice*. [S.l.] : Prentice Hall, 2002. ISBN: 978-0130422323.
18. **STRATTON, J. A.** *Electromagnetic Theory*. [S.l.] : Wiley-IEEE Press, 2007. ISBN: 978-0470131534.
19. **PATWARI, N., et al.** *Locating the Nodes*. s.l. : IEEE Signal Processing Magazine, 2005.

20. **LANZISERA, S., LIN, D. e PISTE, K.** *RF Time of Flight Ranging for Wireless Sensor Network Localization*. 2006.
21. **MEIKE, R.** Location, Location, Location (Radio). [Online] Acessado em Abril de 2010. http://blogs.sun.com/roger/entry/location_location_location_radio.
22. **HERNANDEZ, O., et al.** *Position Location Monitoring Using IEEE 802.15.4/ZigBee technology*. 2009. <http://www.freescale.com/files/microcontrollers/doc/brochure/PositionLocationMonitoring.pdf>.
23. **KAEMARUNGS, K.** *Design of indoor positioning systems based on location fingerprinting technique*. 2005.
24. **AAL JOINT PROGRAMME.** Página da Ambient Assisted Living Joint Programme. [Online] Acessado em Junho de 2010. <http://www.aal-europe.eu/>.
25. **FRAUNHOFER INSTITUTE.** Página da Aliança AAL no Instituto Fraunhofer. [Online] Acessado em Junho de 2010. http://www.fraunhofer.de/en/institutes-research-establishments/groups-alliances/Ambient_Assisted_Living.jsp.
26. **RIVA, G., VATALARO, F. e DAVIDE, F.** *Ambient Intelligence (Emerging Communication)*. 2005.
27. **YANG, G.Z.** *Body Sensor Networks*. [S.l.] : Springer, 2006. ISBN: 978-1846282720.
28. **MULLER, I.** *Sistema de Baixo Custo para Rastreamento e Monitoramento de Animais Através de Rede de Sensores Sem Fio*. 2010.