

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

**FERNANDO PRANDO TRENTIN**

**PROJETO DE DIPLOMAÇÃO**

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

Porto Alegre

(2011)

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

**SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO E SENSORIAMENTO 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  
CO-ORIENTADOR PROF. MSC. IVAN MÜLLER

Porto Alegre  
(2011)

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

FERNANDO PRANDO TRENTIN

## **SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO E SENSORIAMENTO 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. Msc. Ivan Müller, UFRGS

Mestre pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Prof. Dr. Renato Ventura Bayan Henriques, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil

Porto Alegre, (Dezembro/2011).

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos meus pais e a minha família, em especial ao apoio em todos os momentos difíceis. Aos meus amigos, a minha namorada e demais pessoas que me auxiliaram ao longo do curso.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor Carlos Eduardo, por ter me acolhido no seu grupo de pesquisa, ao professor Ivan Müller, pelo auxílio e conselhos ao longo do projeto, pelo espaço concedido no laboratório, por todo apoio no trabalho e incentivo.

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

Aos amigos que fiz nessa caminhada, pela ajuda nos estudos e pelos momentos descontração. Ao meu primo Ricardo por ter convivido comigo nesse período todo de faculdade e ter me auxiliado nos testes do projeto.

À minha namorada Ingrith, por saber aguardar os momentos de dedicação ao curso e pelo suporte nas dificuldades, além do incentivo para eu sempre continuar no trilho certo.

Finalmente, à minha família, pois com certeza sem eles eu não estaria aqui. Obrigado por todo carinho, pela dedicação, por terem lutado por melhores condições e pelo empenho na minha educação. Em especial ao meu pai pelos conselhos, minha mãe pelas preocupações e a minha irmã por ajudar sempre que precisei.

## **RESUMO**

Os avanços da tecnologia trouxeram muitos benefícios e permitiram a criação de dispositivos eletrônicos cada vez menores, de baixo custo, baixo consumo, com capacidade de sensoriamento e comunicação. As redes de sensores sem fio, criadas com esses dispositivos, estão sendo empregadas em diversas áreas, podem estar presentes no uso residencial, industrial, militar, para monitoramento ambiental ou até mesmo na agricultura. Enquanto isso surge a possibilidade de empregar esse tipo de rede em situações onde, além dos dados que cada sensor envia, é importante determinar a sua localização, já que esses sensores podem ser fixos, móveis ou estarem distribuídos em alguma região de monitoramento.

O presente projeto visa o estudo e desenvolvimento de um sistema de localização e aquisição de dados de um dispositivo móvel participante de uma rede de sensores sem fio. Para tanto são analisados diferentes métodos para estimar a distância entre o nó móvel e os outros elementos fixos da rede de sensores sem fio, algoritmos para computar os dados e determinar a localização num plano de coordenadas e algumas topologias de implementação.

Nesse trabalho também são expostos os resultados práticos obtidos com a solução encontrada, com o intuito de analisar as vantagens e a viabilidade da aplicação do sistema proposto.

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

## **ABSTRACT**

Advances in technology have brought a lot of benefits and allowed the creation of smaller electronic devices, with lower costs, lower power consumption, and capable of remote sensing and communication. The Wireless Sensor Network (WSN), developed with these devices, are being used in several areas of technology and may be present in residential, industrial and military uses, environmental monitoring or even in agriculture. Meanwhile, there is a possibility of using this kind of networks in situations where, in addition to the data sent by each sensor, it is also important to determinate the sensor's location, since it can be fixed, mobile or distributed in a monitoring region.

This project aims to study and develop a localization system and data acquisition of a mobile device participant in a WSN. For this purpose several methods are analyzed to estimate the distance between the mobile node and the other fixed elements of the WSN, algorithms to compute the data and determine the localization on a coordinate plane and some implementation topologies.

This paper also exposes the practical results obtained with the found solution in order to analyze the advantages and feasibility of applying the proposed system.

**Keywords: Electrical Engineering. Wireless Sensor Network. Localization. Sensing.**

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	14
1.1	MOTIVAÇÃO .....	14
1.2	OBJETIVOS .....	15
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1	REDE DE SENSORES SEM FIO (RSSF) .....	17
2.1.1	APLICAÇÕES DAS RSSF .....	18
2.1.2	CARACTERÍSTICAS DO NÓ SENSOR .....	19
2.1.3	PADRÃO ZIGBEE IEEE 802.15.4 .....	20
2.1.4	Arquitetura do Padrão ZigBee.....	21
2.1.5	Camada Física PHY .....	22
2.1.6	Camada de Enlace (MAC).....	23
2.2	PROPAGAÇÃO DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS.....	24
2.3	MODELO DE PROPAGAÇÃO.....	24
2.4	REFLEXÃO E REFRAÇÃO.....	26
2.5	DIFRAÇÃO.....	27
2.6	ESPELHAMENTO .....	28
3	MÉTODOS PARA DETERMINAR A LOCALIZAÇÃO.....	29
3.1	TIME OF ARRIVAL (TOA).....	29
3.2	TIME DIFERENCE OF ARRIVAL (TDOA) .....	30
3.3	DIRECTION OF ARRIVAL (DOA) .....	31
3.4	RECEIVED SIGNAL STRENGTH INDICATOR (RSSI) .....	31
3.5	TRILATERAÇÃO .....	33
4	SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO .....	36
4.1	NÓS SENSORES .....	37
4.1.1	Nó Móvel.....	39
4.1.2	Nó Fixo.....	40
4.1.3	Antenas .....	40
4.2	APLICAÇÃO DO MÉTODO RSSI.....	46
5	IMPLEMENTAÇÃO .....	48
5.1	CONFIGURAÇÃO DA RSSF .....	48
5.2	SOFTWARE EMBARCADO.....	52
5.3	SOFTWARE DE MONITORAMENTO.....	56
6	TESTES, VALIDAÇÕES E RESULTADOS.....	63



<b>6.1</b>	<b>INSTALAÇÃO DOS NÓS FIXOS.....</b>	<b>64</b>
<b>6.2</b>	<b>CONFIRGURAÇÃO DO SOFTWARE E CALIBRAÇÃO.....</b>	<b>65</b>
<b>6.3</b>	<b>TESTES E VALIDAÇÕES.....</b>	<b>68</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>76</b>
<b>7.1</b>	<b>TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>78</b>
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>79</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Arquitetura de um nó sensor sem fio .....	19
Figura 2. Estrutura do padrão ZigBee .....	22
Figura 3. Reflexão de sinal .....	26
Figura 4. Reflexão e refração .....	27
Figura 5. Difração do sinal .....	28
Figura 6. Espelhamento do sinal .....	28
Figura 7. Trilateração com um nó de referência.....	33
Figura 8. Trilateração com dois nós de referência.....	34
Figura 9. Trilateração com três nós de referência. ....	34
Figura 10. Topologia da rede implementada. ....	36
Figura 11. MC1322x – Complilant Platform-in-Package. ....	38
Figura 12. MC1322x – Diagrama de blocos. ....	38
Figura 13. 1322X-SRB – Sensor Reference Board.....	39
Figura 14. 1322X-NBC – Network Coordinator Board. ....	40
Figura 15. Antena F-invertido (PIFA).....	41
Figura 16. Diagrama de irradiação antena F-invertido (PIFA) .....	42
Figura 17. Diagrama de irradiação antena omni-direcional. ....	43
Figura 18. Diagrama de irradiação horizontal e vertical da antena omni-direcional. ....	43
Figura 19. Antena setorial utilizada no projeto. ....	44
Figura 20. Polarização da antena setorial utilizada no projeto. ....	45
Figura 21. Polarização horizontal e vertical da antena setorial. ....	45
Figura 22. Configuração da rede implementada.....	49
Figura 23. Diagrama de troca de mensagens. ....	50
Figura 24. Fluxograma de operação – Nó Móvel.....	53
Figura 25. 1322X-NCB como Gateway. ....	54
Figura 26. 1322X-NCB como Nó Fixo. ....	54
Figura 27. Fluxograma de operação – Gateway.....	55
Figura 28. Fluxograma de operação – Nó Fixo.....	56
Figura 29. Fluxograma de operação – Nó Fixo.....	58
Figura 30. Interface gráfica do sistema de localização.....	59
Figura 31. Tela gráfica – Plano de Coordenadas.....	60
Figura 32. Tela gráfica – Temperatura e Qualidade do Link. ....	61
Figura 33. Tela gráfica – dados de entrada e dados de sensoriamento.....	62
Figura 34. Ambiente externo utilizados para os testes. ....	63
Figura 35. Planta baixa – localização dos nós sensores. ....	64
Figura 36. Planta baixa – localização dos nós sensores. ....	65
Figura 37. Comparação do erro para valores diferentes de N. ....	68
Figura 38. Plano de Coordenadas – Método 3 nós.....	69
Figura 39. Plano de Coordenadas – Método 4 média.....	70
Figura 40. Plano de Coordenadas – Método 3 em 4.....	71
Figura 41. Plano de Coordenadas – NM na posição real (5;0).....	72
Figura 42. Gráfico comparativo entre métodos.....	73
Figura 43. Gráfico – Movimentação real x estimada. ....	74

Figura 44. Monitoramento da temperatura, pressão e tensão de bateria do NM..... 75

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Quadro de dados enviados pelo Nó Móvel.....	50
<b>Tabela 2.</b> Quadro de dados enviados ao computador. ....	51
<b>Tabela 3.</b> Dados de entrada para o sistema de localização. ....	52
<b>Tabela 4.</b> Coordenadas dos Nós Fixos.....	65
<b>Tabela 5.</b> Valores possíveis para o parâmetro N. ....	67
<b>Tabela 6.</b> Valores de erro para os diferentes métodos.....	73

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

ANSI – American National Standards Institute

DOA – Direction of Arrival

GPS – Global Positioning System

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers

JTAG – Joint Test Action Group

LASCAR – Laboratório de Sistemas de Controle, Automação e Robótica

LQI – Link Quality Indicator

MAC – Medium Access Control

NF – Nó Fixo

NM – Nó Móvel

PC – Personal Computer

PHY – Physical Layer

PIFA – Printed Inverted F Antenna

RF – Rádio Frequência

RSSF – Rede de Sensores Sem Fio

RSSI – Received Signal Strength Indicator

SMA – Sub Miniature version A

SMAC – Simple Media Access Controller

TDOA – Time Difference of Arrival

TOA – Time of Arrival

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 MOTIVAÇÃO

Nos últimos anos, os avanços na tecnologia e o desenvolvimento de dispositivos eletrônicos de baixo consumo de energia e com capacidade de comunicação sem fio fizeram com que surgisse um novo campo na área da computação e ciência. Hoje as Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) podem ser desenvolvidas utilizando componentes de baixo custo e implementadas de diferentes formas. São constituídas por vários nós sensores espalhados em uma determinada área e um nó coordenador da rede, que se comunica com os outros nós sensores e coleta informações destes [1]. Essa tecnologia permite diversas aplicações, como por exemplo, monitoramento ambiental, uso militar, gerenciamento de suprimentos, automação industrial, residencial, rastreamento e coleta de informações.

Os nós desse tipo de rede operam em conjunto com outros equipamentos e normalmente estão distribuídos em regiões de difícil acesso, por isso é importante que essa tecnologia seja de baixo consumo, para que possa operar com baterias e tenha uma boa autonomia, sem precisar de recarga ou substituição de baterias. Por possuírem sensores integrados e um módulo de rádio frequência, esse tipo de nó é tipicamente de tamanho reduzido e baixo custo, o que permite a instalação de vários nós em uma mesma rede com um custo total de projeto pequeno [3].

Os sistemas de localização estão disponíveis no mercado em diferentes tecnologias, cada uma com sua peculiaridade. O mais conhecido e popular é o sistema *Global Positioning System* (GPS) [4], que através de uma rede de satélites consegue calcular a posição do nó, mas tem como desvantagem um maior consumo de energia e a limitação de trabalhar apenas ao ar livre. Existem também sistemas que utilizam ultrassom ou infravermelho, mas necessitam de uma linha de visão direta entre o nó transmissor e o alvo. Além de apresentar um custo de

hardware maior, esses sistemas não são indicados para regiões onde possam existir obstáculos entre a base e o nó móvel.

## 1.2 OBJETIVOS

Esse trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de um sistema de localização e coleta de informações de alvos móveis em uma rede de sensores sem fio. Esse projeto dá continuidade ao trabalho de conclusão de curso do aluno Paulo Motter, que já havia avaliado a possibilidade de implementar um sistema de localização semelhante utilizando a tecnologia ZigBee [2], porém sem fazer o sensoriamento do objeto alvo.

Os critérios chaves a serem considerados são: um baixo custo da aplicação final, fácil instalação e configuração interativa dos equipamentos, desenvolvimento e aprimoramento da interface gráfica para visualização de informações e rastreamento do objeto alvo e uma precisão satisfatória das coordenadas de localização.

O projeto foi desenvolvido junto ao Laboratório de Sistemas de Controle, Automação e Robótica (LASCAR) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e a tecnologia escolhida foi o padrão IEEE 802.15.4, muito utilizado atualmente para as RSSF pela sua simplicidade e distância satisfatória de alcance entre nós com baixo consumo de energia. Estava disponível para o projeto no laboratório um kit Freescale MC1322x, uma família de componentes de baixo consumo com o capacidade de comunicação embarcada.

Durante esse trabalho é estudada a melhor técnica para determinar a distância entre os sensores se utilizando uma rede de sensores sem fio de baixo custo. Também é desenvolvido um *firmware* para o módulo que desempenha a função de gerenciador da rede e um *software* para visualização das informações coletadas dos sensores.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

A organização do trabalho se dará da seguinte maneira:

O capítulo 2 traz fundamentos teóricos sobre a propagação das ondas eletromagnéticas, as redes de sensores sem fio, os padrões utilizados, o protocolo ZigBee, suas principais características e algumas aplicações.

No capítulo 3 será feita uma abordagem sobre os principais métodos para determinar a localização e a distância entre os nós, analisando a viabilidade do uso no projeto.

O capítulo 4 detalha a proposta do sistema de localização, especificado o que é um nó sensor e como a rede é formada.

No capítulo 5 é exposto o sistema de localização implementado, as topologias adotadas, os fluxogramas dos sensores, como as mensagens são trocadas e como os dados são enviados para análise em um computador pessoal. Esse capítulo também traz informações sobre o hardware utilizado no projeto, o kit Freescale Mc1322x.

O capítulo 6 apresenta os testes do sistema de localização proposto. Ele descreve como é feita a estimativa da distância entre os nós, a calibração dos módulos sensores e como os dados são apresentados no *software* que foi desenvolvido para visualização das informações.

O capítulo 7 resume as conclusões obtidas da análise dos resultados e traz propostas para projetos futuros relacionados ao mesmo tema desse trabalho.



## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 REDE DE SENSORES SEM FIO (RSSF)

As redes de sensores sem fio diferem das redes de computadores normais em diversos aspectos. Normalmente são formadas por vários elementos distribuídos em uma área e operam sem a ação humana direta. É importante que os dispositivos integrantes da rede tenham um baixo consumo de energia, pois muitas vezes eles estão distribuídos em regiões de difícil acesso e não é possível a troca ou substituição de baterias. Cada sensor é autônomo e coleta diversas informações do ambiente e os envia para os nós vizinhos, permitindo que sejam utilizados em várias aplicações.

As RSSF se tornaram possível devido ao enorme avanço da tecnologia em circuitos digitais e a miniaturização de sistemas mecânicos e micro-eletrônicos, permitindo um aumento no processamento de dados com um baixo consumo de energia.

Atualmente existem diversas aplicações desenvolvidas utilizando um ou mais nós sensores. As redes podem ser homogêneas ou heterogêneas em relação aos tipos, dimensões e funcionalidades de cada sensor. Os requisitos básicos para o funcionamento de uma RSSF são [2]:

- **Autonomia:** é essencial que cada dispositivo tenha um baixo consumo de energia, pois muitas vezes são espalhados em locais remotos, de difícil acesso e precisam funcionar por meses ou até mesmo anos sem necessidade de manutenção ou recarga de baterias.
- **Cooperação:** Através da cooperação, cada elemento da rede pode tomar uma ação baseado nas informações recebidas dos nós vizinhos da rede. Também

podem agrupar dados de diferentes fontes para o envio posterior a um elemento supervisor de rede.

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

### 2.1.1 APLICAÇÕES DAS RSSF

O potencial de uso de RSSF alcança um grande número de áreas, entre elas podemos listar:

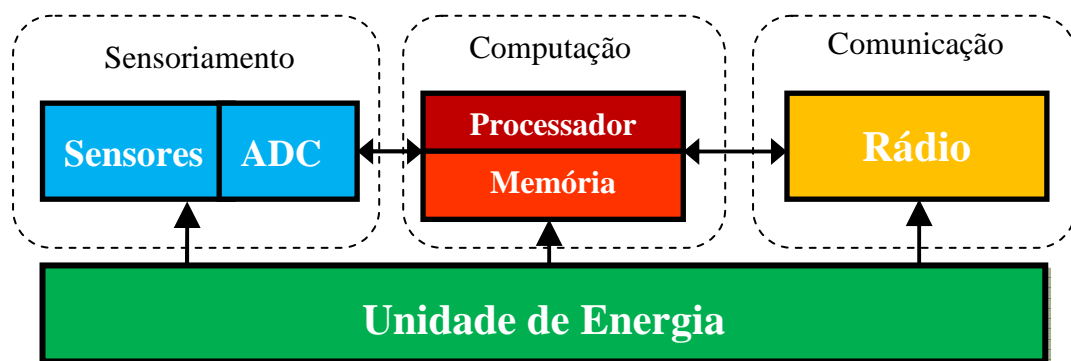
- Controle: para promover algum tipo de controle, sensores sem fio podem ser embutidos em “peças” numa linha de montagem para fazer testes nos processos de manufatura;
- Ambiente: para monitorar variáveis ambientais em locais internos ou externos, em residências, prédios, ou até mesmo florestas, desertos, vulcões;
- Segurança: para prover segurança em centros comerciais, estacionamentos;

- Tráfego: para monitorar o tráfego de veículos em rodovias, malhas em vias urbanas, etc;
- Militar: para monitorar o e detectar movimentos de inimigos, explosões, presença de material perigoso como gás venenoso ou radiação.

De forma geral, as RSSFs podem ser utilizadas em sistemas de segurança, controle e automação e também para monitoramento de ambientes, internos e externos.

### 2.1.2 CARACTERÍSTICAS DO NÓ SENSOR

O elemento participante de um RSSF possui quatro blocos principais: sensoriamento, computação, comunicação e unidade de energia, conforme é exibido na Figura 1.



**Figura 1.** Arquitetura de um nó sensor sem fio

O bloco de sensoriamento é responsável pela medição de grandezas físicas e aquisição de dados do ambiente. O sinal que é enviado pelo sensor passa por um conversor analógico-digital que tem a função de enviar os dados obtidos para a unidade de processamento.

Conforme cada aplicação exija, existem muitos sensores que podem ser anexados a um nó e utilizados em uma RSSF. Nesse bloco podem, por exemplo, ser atribuídos sensores de temperatura, aceleração, sensores de pressão, umidade, detecção de gases, entre outros.

A unidade de computação é o bloco que faz a conversão das medidas adquiridas pelo sensor e as encaminha para o bloco de comunicação. Pode ser composta por um microcontrolador e algum recurso de memória para armazenar dados e enviar posteriormente. O ideal é que esse bloco não necessite de processamento elevado de dados, o que faz com que seu consumo seja menor e tenha maior autonomia.

A unidade de comunicação é a responsável por enviar e receber mensagens de outros nós sensores. É composta por um transceptor, normalmente rádio, e a comunicação é feita através de protocolos normalizados, garantindo a integridade e compatibilizando a comunicação entre os diferentes nós. 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).

A unidade de energia é a responsável por alimentar todas as outras unidades do nó. A fonte de energia normalmente é uma bateria e deve ter autonomia o suficiente para que o nó funcione por um período longo de tempo sem necessitar de manutenção. Podem ser adicionados ao nó recursos de gerenciamento de energia, fazendo o processador trabalhar em intervalos periódicos para a medição dos sensores e acionamento do rádio, diminuindo muito o consumo do equipamento. Alguns dispositivos podem apresentar módulos para recarregar suas baterias automaticamente por captação solar, aumentando a autonomia sem a necessidade de intervenção externa.

### 2.1.3 PADRÃO ZIGBEE IEEE 802.15.4

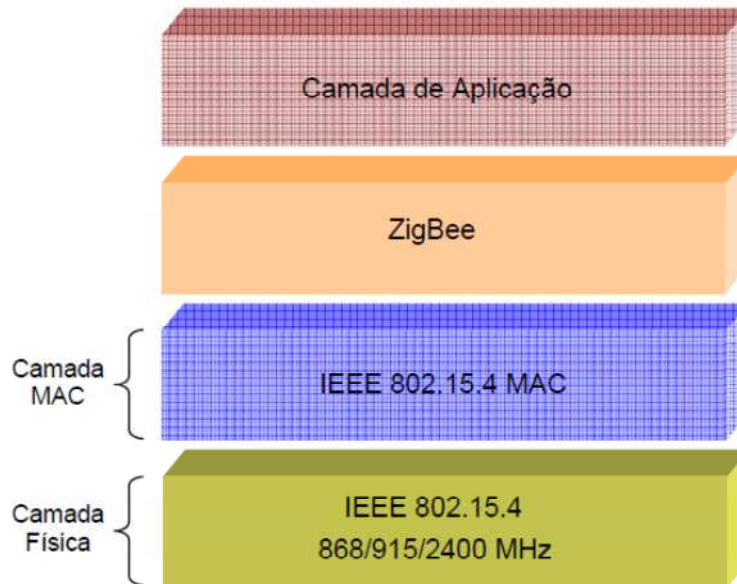
Como exposto no capítulo anterior, existem diferentes normas para a comunicação em uma RSSF. Neste projeto foi escolhida uma variação do padrão ZigBee, os módulos que

trabalham com esse padrão tem por característica um baixo custo e baixo consumo de energia, apresentando um alcance satisfatório e transmissão de dados com uma taxa pequena.

O padrão ZigBee foi desenvolvido por um consórcio de empresas (a *ZigBee Alliance*) em conjunto com o IEEE, visando o desenvolvimento de um protocolo padrão para RSSF. A norma IEEE 802.15.4 [9], desenvolvida pelo Institute of Electrical and Electronics Engineers, especifica o padrão para as camadas físicas (PHY) e de enlace (MAC) que são utilizadas para redes sem fio, de área pessoal e baixa taxa de transmissão, como é o caso do ZigBee.

#### 2.1.4 Arquitetura do Padrão ZigBee

Todos os módulos que trabalham com o padrão ZigBee possuem, necessariamente, um rádio transmissor/receptor IEEE 802.15.4, e um microcontrolador com a camada MAC embarcada em seu *firmware* [10]. A definição da camada física e da camada de acesso ao meio é responsabilidade da norma IEEE 802.15.4, enquanto que o ZigBee define as outras camadas. A arquitetura do padrão é representada pela Figura 2.



**Figura 2.** Estrutura do padrão ZigBee

#### 2.1.5 Camada Física PHY

A camada física definida pela norma IEEE 802.15.4 foi projetada para fornecer um alto grau de integração pela utilização do método de transmissão *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS). Esse método gera um padrão redundante de bits para cada bit de dado transmitido, espalhando o sinal com baixa potência em uma faixa grande de frequência e depois os dados são reorganizados no receptor [11].

A camada física pode operar em três diferentes bandas de frequência: 868/915/2400 MHz. 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 de 2,4 GHz pode ser utilizada em todo o mundo, suportando taxas de até 250 kbit/s.

É a camada física a responsável pelas tarefas de ativação e desativação do transceptor do rádio bem como a transmissão e recepção de dados. Nela também estão incluídas a

detecção de energia do canal ativo de comunicação e o indicador de qualidade do link (LQI) dos pacotes recebidos.

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.

#### 2.1.6 Camada de Enlace (MAC)

A camada de enlace permite a utilização de topologias múltiplas de rede e o controle de um grande número de dispositivos sem a necessidade de operações complexas.

Ela tem a tarefa de gerar sinalizadores (*beacons*) para a rede (caso for um nó coordenador) e também sincronizar com os *beacons* da rede (caso for uma rede *beaconed*). É responsável também pela segurança do dispositivo e por empregar mecanismos de acesso, além de prover enlace confiável entre duas camadas MAC de dispositivos diferentes.

Para a segurança na transmissão de dados pode ser utilizado um Padrão e Criptografia Avançado (AES), que possui rotinas de segurança com chaves de 128, 192 ou 256 bits. Sendo assim é possível garantir integridade e autenticidade nos frames de dados enviados pela camada MAC.

A Freescale [3] elaborou uma pilha de códigos em ANSI C com o nome de *Simple Media Access Controller* (SMAC) cujo principal objetivo é fornecer acesso à camada física do rádio de maneira simples e utilizando poucos recursos do microcontrolador. O SMAC foi utilizado nesse projeto como alternativa ao padrão Zigbee. Especialmente desenvolvido para operar com os rádios das séries MC1319X, MC1320X, MC1321X e MC1322X da Freescale,

o SMAC executa a função da camada MAC de forma mais simplificada. Com rotinas em C predefinidas é possível enviar pacotes, receber dados e medir o Indicador de Qualidade do Link (LQI), valor esse utilizado para determinar a distância entre receptor e transmissor.

## 2.2 PROPAGAÇÃO DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

A comunicação nas redes de sensores sem fio se baseia na transmissão de dados através de ondas de rádio. As obstruções e obstáculos entre os nós sensores prejudicam a transmissão de rádio e dificultam a análise dos dados

Esse capítulo descreve algumas das propriedades das ondas eletromagnéticas e aponta alguns efeitos que podem provocar interferências, como a reflexão e multicaminho das ondas eletromagnéticas.

## 2.3 MODELO DE PROPAGAÇÃO

Para prever a intensidade do sinal em um receptor quando um transmissor envia uma mensagem é utilizado um modelo de propagação da onda eletromagnética no espaço livre. Este modelo prevê que a potencia do sinal decai com o aumento da distância entre o transmissor e o receptor, como acontece na lei de função da potência. A Equação 1 é conhecida como Equação de Friis e descreve a propagação de uma onda eletromagnética no espaço livre [4].

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

$P_R$ , potência recebida, expressa em W ou dBm;

$P_T$ , potência transmitida, expressa em W ou dBm;

$G_R$ , ganho da antena do receptor, adimensional;



$G_T$ , ganho da antena do transmissor, adimensional;

$\lambda_0$ , comprimento de onda do sinal enviado, expresso em metros;

$d$ , distância separando o transmissor do receptor, expresso em metros;

$L$ , fator de perda do sistema não relacionado com a propagação ( $L \geq 1$ ).

Quando consideramos apenas as perdas referentes ao meio, podemos considerar os fatores de ganho das antenas e também  $L$  igual a 1 e retirá-los da equação. Sendo assim, chegamos à Equação 2:

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

Para analisar o decaimento da potência a Equação 2 é utilizada com valores de  $N$  maiores que 2. No caso da onda eletromagnética sofrer interferência construtiva, pode-se usar valores de  $N$  menores que 2. Tipicamente o  $N$  varia entre 2 e 5.

A Equação de Friis só é válida quando a distância entre o receptor e o transmissor é muito maior que a distância de Fraunhofer da Equação 3, e maior que o comprimento de onda.

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

$D$ , maior dimensão física da antena utilizada;

A frequência utilizada nesse projeto é de 2,4 GHz e o comprimento de onda igual a 12,5 cm. A dimensão das antenas utilizadas nesse projeto é pequena, da ordem do comprimento de onda, valores tão pequenos que não causam interferência na aplicação desse projeto.

As ondas eletromagnéticas podem sofrer interferências ambientais diversas como neblina ou chuva, causando degradação no sinal. Esses efeitos dependem da frequência utilizada, e podem ser modelados pela mesma equação de Friis ajustando  $N$  para valores maiores que 2.

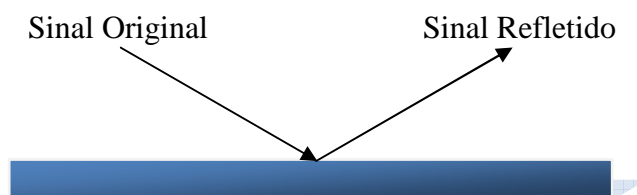
Além disso, em ambientes *indoor* a utilização da equação de Friis não é aconselhada. Para o uso *outdoor* essa equação pode ser utilizada com resultados satisfatórios. Dependendo da aplicação também existem outros modelos de propagação mais adequados.

As ondas eletromagnéticas sofrem outros efeitos que interferem na sua propagação, como é o caso da difração, reflexão, refração e espalhamento, detalhados abaixo.

#### 2.4 REFLEXÃO E REFRAÇÃO

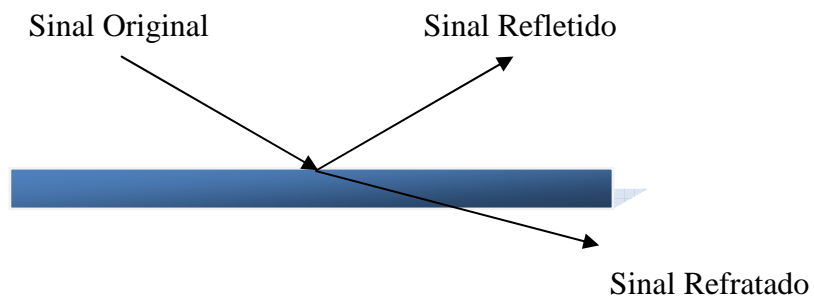
A reflexão ocorre quando um sinal de rádio frequência incide sobre um objeto com dimensões muito maiores que o comprimento de onda. As reflexões podem ser causadas pela incidência em prédios, paredes ou outros obstáculos, e dependendo da sua superfície o sinal refletido pode permanecer intacto ou sofrer perda por absorção de parte do sinal.

Esse efeito é ilustrado da Figura 3 e pode causar problemas como degradação ou cancelamento do sinal original. Em alguns casos é utilizado convenientemente.



**Figura 3.** Reflexão de sinal

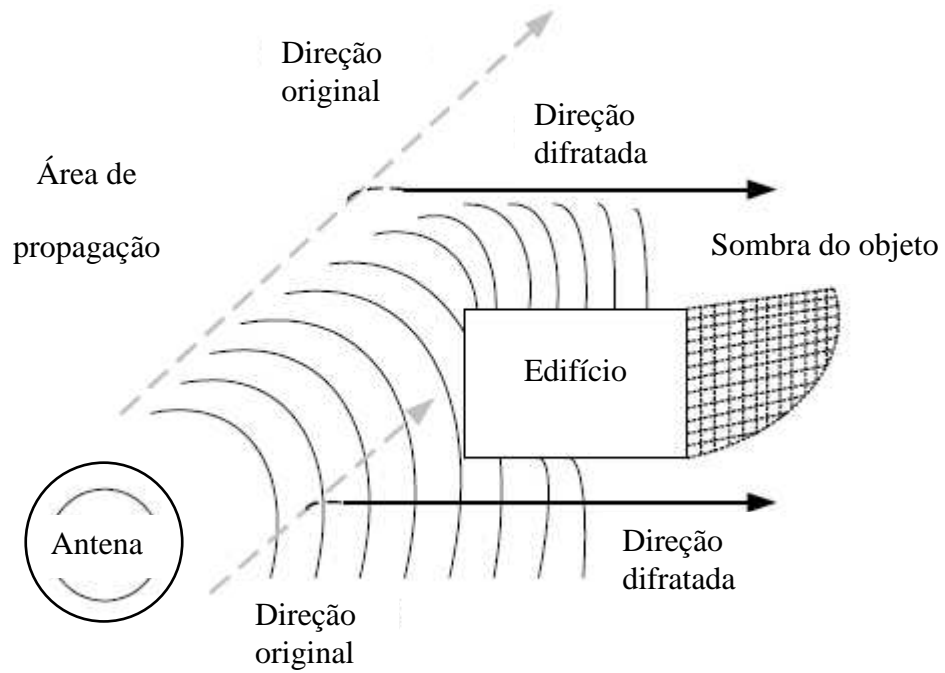
A refração é o desvio de uma onda de rádio ao passar por um meio de densidade diferente, conforme é ilustrado na Figura 4. Quando uma onda atravessa um meio de material diferente, parte da onda é refletida e parte da onda é refratada.



**Figura 4.** Reflexão e refração

## 2.5 DIFRAÇÃO

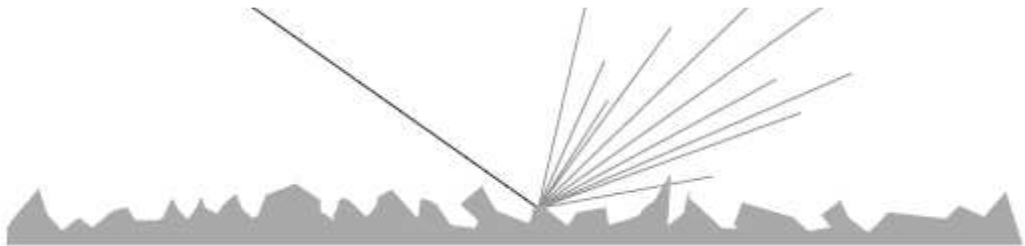
A difração ocorre quando o caminho entre o transmissor e o receptor encontra um obstáculo com pontas ou com bordas de tamanho irregular. O sinal sofre um desvio na sua direção, sendo difratado para a região de sombra do objeto, fazendo com que a onda seja curvada, como é ilustrado na Figura 5.



**Figura 5.** Difração do sinal

## 2.6 ESPELHAMENTO

Quando a onda atinge uma superfície muito irregular, ela pode ser refletida várias vezes, espalhando a onda em muitas direções. Também ocorre esse efeito quando a onda atinge algum obstáculo com dimensões da mesma ordem de grandeza de comprimento de onda do sinal. Esse fenômeno ocorre tipicamente quando a onda atinge plantas ou sinais de rua por exemplo. A Figura 6 ilustra esse fenômeno.



**Figura 6.** Espelhamento do sinal

### 3 MÉTODOS PARA DETERMINAR A LOCALIZAÇÃO

Redes sem fio utilizam ondas de rádio para que os elementos da rede possam se comunicar entre si. O padrão de rede Zigbee que foi adotado utiliza a frequência de rádio de 2,4 GHz a qual permite que sejam usados alguns métodos específicos para se determinar a localização dos nós [5].

A seguir são apresentados esses métodos e apontadas algumas conclusões sobre cada um deles. A partir das medidas encontradas e pelas coordenadas dos nós conhecidos é possível determinar a localização do Nó Móvel (NM) através dos métodos de triangulação e de trilateração [6], que serão descritos no Capítulo 6.

#### 3.1 TIME OF ARRIVAL (TOA)

Esse método estima a posição de um nó utilizando o tempo que um pacote de dados leva para sair do transmissor até chegar ao receptor. Com essa medida de tempo, sabendo que no ar as ondas eletromagnéticas se propagam aproximadamente na velocidade da luz (300.000 km/s), é possível determinar a distancia entre os dispositivos. Para que seja possível utilizar esse método é importante que os dispositivos envolvidos na comunicação estejam sincronizados para que seja válida a comparação do tempo de chegada dos pacotes [7].

Considerando a velocidade da luz como velocidade de propagação, como é mostrado na Equação 4, o tempo que a onda leva para percorrer 1 metro será 3,3ns.

$$T_{Propagação} = \frac{distância}{velocidade} = \frac{1\text{ m}}{3 \times 10^8} = 3,3ns \quad (4)$$

Considerando que o *hardware* escolhido tem um *clock* 24MHz, a Equação 5 mostra que a cada ciclo de *clock* a onda eletromagnética já terá percorrido 13,89 metros.

$$d_{clock} = \frac{\frac{1}{clock}}{T_{propagação}} = \frac{41,67ns/clk}{3,3ns/m} = 13,89 m/ciclo de clock \quad (5)$$

Considerando os dados acima se conclui que é inviável estimar a distancia pelo tempo de propagação da onda no meio, principalmente pela limitação de *hardware* e por ele possuir um valor pequeno de *clock*.

Para utilizar esse método são indicados transdutores de ultra-som ao invés das antenas, pois a velocidade de propagação se torna muito menor e o *clock* do microprocessador não necessita ser elevado. Porém, o acréscimo desse tipo de *hardware* encarece o sistema e aumenta o consumo do módulo, sendo portando não recomendado o uso em redes de sensores sem fio.

### 3.2 TIME DIFFERENCE OF ARRIVAL (TDOA)

A técnica de diferença de tempo de chegada também utiliza o tempo que a onda leva para se propagar no meio e se assemelha muito ao TOA, mas os sinais são enviados de fontes diferentes.

Enquanto no TOA havia apenas um nó transmissor e um receptor, no TDOA existem mais nós transmissores e um nó receptor. Com o tempo de propagação do pacote de dados de cada um dos transmissores até o receptor é possível estimar a posição do nó receptor.

Esse método exige a completa sincronização de todos os elementos, sendo que os nós transmissores devem enviar a mensagem ao receptor exatamente ao mesmo tempo, para que assim este possa calcular a diferença entre o tempo de chegada dos pacotes de cada transmissor.

Uma deficiência ao utilizar esse método é que não é determinada a posição exata do nó receptor, apenas uma referência se o nó está mais próximo de um transmissor ou do outro.

Outro ponto importante, como já apontado no capítulo anterior, é o problema do baixo *clock* no microprocessador escolhido para o projeto, inviabilizando a utilização desse método.

### 3.3 DIRECTION OF ARRIVAL (DOA)

Sabendo as coordenadas dos nós fixos, esse método utiliza o ângulo de recepção de uma onda eletromagnética para determinar a localização via triangulação. Como a antena recebe um sinal com maior intensidade quando apontada diretamente para um transmissor, esse método necessita de uma antena móvel ou várias antenas fixas, uma para cada ângulo de recepção. Isso encarece o projeto e inviabiliza seu uso.

### 3.4 RECEIVED SIGNAL STRENGTH INDICATOR (RSSI)

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

Normalmente os elementos de uma rede sem fio possuem um parâmetro que indica a intensidade do sinal recebido, o *Link Quality Indicator* (LQI). A intensidade do sinal é medida para cada pacote enviado e pode ser usada em cálculos de trilateração contra outros nós de posição conhecida para encontrar a localização do nó alvo.

As desvantagens dessa técnica estão relacionadas às interferências que as ondas de rádio podem sofrer, alterando a medição de potência do sinal recebido e gerando erro nos cálculos. Entre as principais fontes de interferência estão a reflexão, a refração e a absorção das ondas por objetos físicos. Redes sem fio com frequências similares como o *Wi-Fi* também são fontes geradoras de interferência.

Apesar dessas desvantagens, a técnica de estimar a localização pela medida de potência do sinal recebido ainda é bastante atrativa, pois não nenhum *hardware* adicional é necessário. Com isso é possível otimizar o desempenho das baterias de cada nó, pois o consumo de energia cai quando temos poucos componentes externos e ainda há redução nos custos do projeto [8].

Pelos estudos de propagação, apresentados no Capítulo 2.2, com a Equação 2 conseguimos encontrar a potência do sinal no receptor. Nessa equação, considerando o  $n$  um fator de propagação no meio igual tipicamente entre 2 e 5, e admitindo que para esse estudo a frequência da onda não é alterada, a diferença entre a potencia transmitida e a recebida pode ser expressa pela Equação 6. Essa equação relaciona o valor de potência com a distância entre o transmissor e receptor.

$$\log\left(\frac{P_R}{P_T}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{\lambda_0}{4 \cdot \pi}\right) - 10 \cdot n \cdot \log d \quad (6)$$

Simplificando a Equação 6 e considerando que  $\log\left(\frac{P_R}{P_T}\right)$  seja constante, obtemos a

Equação 7:

$$RSSI = -10 \cdot n \cdot \log d + A \text{ (dbm)} \quad (7)$$

$RSSI$ , diferença entre a potencia enviada e a recebida, em dBm;

$n$ , constante de propagação do meio;

$A$ , potência recebida no receptor a 1 metros de distância;

$d$ , distância entre receptor e transmissor, em metros.

O valor de  $RSSI$  já está presente no protocolo IEEE 802.15.4, por ele é medido o Indicador de Qualidade do Link (LQI) dos pacotes recebidos. Seu valor é recalculado para cada nova recepção.



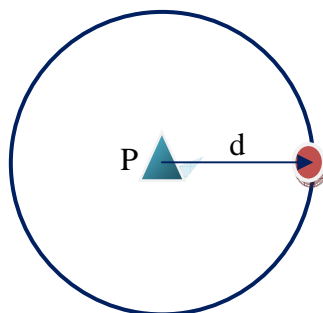
O valor de  $n$  depende do meio e das diversas interferências que a transmissão pode sofrer. Seu valor tipicamente varia entre 2 e 5, e essa variável deve ter seu valor obtido empiricamente em testes onde o sistema vai operar, de forma a proporcionar uma precisão maior no cálculo da localização.

Para o sistema de localização desenvolvido foi escolhido o método por determinação do valor de RSSI. No Capítulo 5 são apresentados mais detalhes sobre como o valor de RSSI é adquirido e como é feita a calibração do melhor valor de  $N$  para maior precisão do sistema.

### 3.5 TRILATERAÇÃO

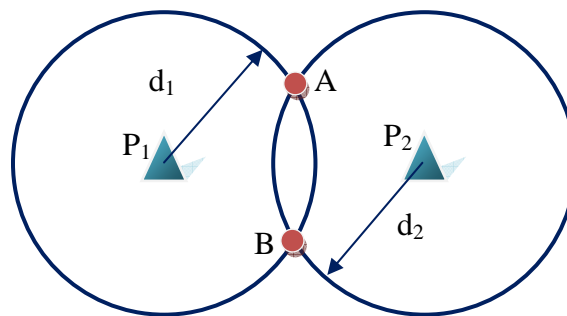
A trilateração é um método matemático utilizado para obter as coordenadas de um ponto a partir das distâncias deste até outros pontos de referência conhecidos. O cálculo é realizado com base na geometria de triângulos, do mesmo modo que a triangulação, com a diferença que o último utiliza a diferença entre ângulos para determinar as coordenadas.

Através de um dos métodos anteriores encontra-se a distância do ponto desejado até um ponto de referência, cuja posição é conhecida. Com esse valor de distância abre-se uma circunferência de possibilidades para a localização do ponto, como é mostrado na Figura 7.



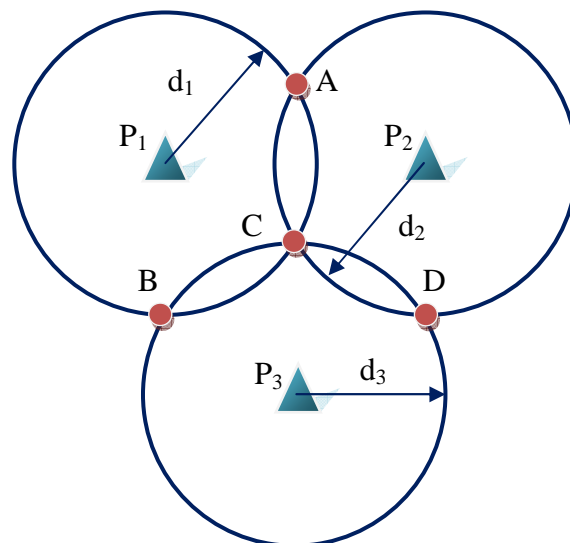
**Figura 7.** Trilateração com um nó de referência.

Com dois pontos de referência, temos duas circunferências que se interceptam, diminuindo assim as possíveis localizações para o nó alvo. Como é ilustrado na Figura 8, nesse caso o nó alvo estaria localizado entre os pontos A e B, onde  $d_1$  é a distância medida entre o ponto alvo e o ponto  $P_1$ ,  $d_2$  a distância entre o ponto alvo e o ponto  $P_2$



**Figura 8.** Trilateração com dois nós de referência.

Com três nós de referência possível reduzir as possibilidades de localização para apenas um ponto provável. Analisando a Figura 9, fica claro que o nó alvo está localizado no ponto C, intersecção entre as três circunferências.



**Figura 9.** Trilateração com três nós de referência.

Se os pontos de referência  $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$  tem suas coordenadas conhecidas, é possível através de  $d_1$ ,  $d_2$  e  $d_3$  determinar a posição do ponto C. Considerando um sistema de coordenadas  $x$  e  $y$  e como coordenadas do ponto C  $x_C$  e  $y_C$ , pela Equação 8 é possível calcular a distância entre dois pontos.

$$d^2 = (x - x_C)^2 + (y - y_C)^2 \quad (8)$$

Considerando agora os três pontos de referência  $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$  e as distâncias até o ponto C,  $d_1$ ,  $d_2$  e  $d_3$  temos o sistema mostrado na Equação 9. Resolvendo esse sistema pode ser obtido os valores de  $x_C$  e  $y_C$ .

$$\begin{bmatrix} d_1^2 \\ d_2^2 \\ d_3^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (x_1 - x_C)^2 + (y_1 - y_C)^2 \\ (x_2 - x_C)^2 + (y_2 - y_C)^2 \\ (x_3 - x_C)^2 + (y_3 - y_C)^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Isolando as variáveis  $x_C$  e  $y_C$  na Equação 6 podemos chegar na Equação 10, que possui forma matricial. Resolvendo esse sistema determina-se a posição  $(x_C, y_C)$  do nó alvo.

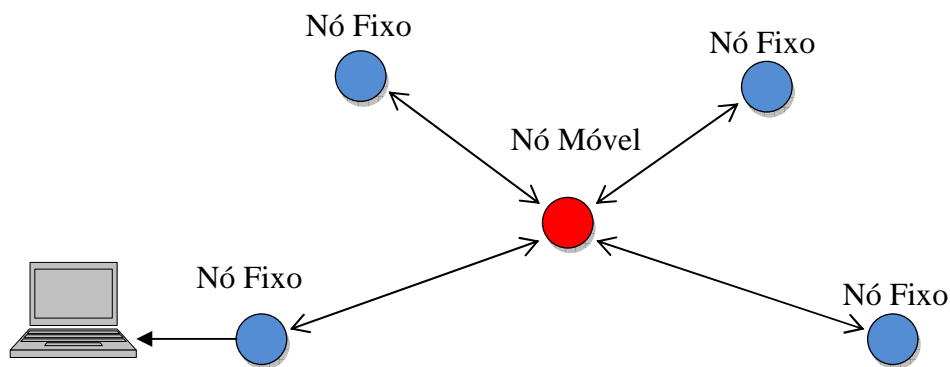
$$2 \cdot \begin{bmatrix} x_3 - x_1 & y_3 - y_1 \\ x_3 - x_2 & y_3 - y_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_C \\ y_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (d_1^2 - d_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2) \\ (d_2^2 - d_3^2) - (x_2^2 - x_3^2) - (y_2^2 - y_3^2) \end{bmatrix} \quad (10)$$

No presente projeto é estudado o método de trilateração com quatro pontos de referência, buscando diminuir os erros no sistema. Para utilizar 4 pontos de referência, a trilateração é aplicada em combinações de 3 em 3, e após é realizada a média dessa medida.

Com a média da trilateração entre os 4 pontos de referência, espera-se que quando ocorra um erro no cálculo da distância até um ponto de referência, esse erro seja diluído entre as outras medidas. Com essa abordagem é possível aumentar a precisão do sistema e obter melhores resultados.

#### 4 SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO

O sistema de localização proposto consiste em uma rede de sensores sem fio formada por Nós Fixos (NF) e um Nó Móvel (NM). A Figura 10 trás a topologia da rede, onde também está ilustrado o computador pessoal que recebe os dados enviados pelos nós fixos. Nesse computador é feita a análise dos dados em um software desenvolvido para o sistema.



**Figura 10.** Topologia da rede implementada.

O NM, cuja posição deseja-se determinar, é aquele que faz o sensoriamento do ambiente e envia os dados para um Nó Fixo (NF). Os nós fixos devem ter suas coordenadas conhecidas e são eles responsáveis por colher os dados do NM e enviá-los para um NF que exerce a função de coordenador da rede.

O NF ligado ao computador recebe o nome de Gateway, e como coordenador da rede é ele quem solicita os dados dos demais sensores. Após receber os dados dos outros nós fixos, o Gateway agrupa as informações em pacotes e envia para o software no computador.

Como explicado anteriormente, esse trabalho dá seqüência ao projeto do Paulo Motter, trazendo algumas melhorias importantes. No trabalho do Paulo a topologia era semelhante, mas não existia um nó coordenador de rede e os dados eram transmitidos periodicamente com intervalos de tempo variados, ocasionando colisões entre as mensagens e perda de pacotes.

Além disso, não havia sensoriamento, a mensagem que o NM enviava não continha informações sobre sensores, era enviada apenas uma mensagem de reconhecimento.

No projeto existiam três tipos diferentes de nós: Gateway, Nó Fixo e Nó Móvel.

O *Gateway* no projeto do Paulo tinha por função agrupar todos os pacotes que os nós fixos enviavam e transmitir esses dados via porta USB para um computador pessoal. O Gateway não tinha papel de coordenador e não transmitia mensagens ao NM.

Os NFs em intervalos de tempo diferentes pediam informação de reconhecimento ao NM. Logo depois com essa informação era medida a potência do sinal e os dados eram enviados ao *Gateway*.

O NM apenas esperava a solicitação de reconhecimento de cada NF e respondia à mensagem.

No sistema aqui proposto foram desenvolvidos dois tipos diferentes de nós: um nó flexível, que pode assumir função de *Gateway*, NF, ou NM, e um Nó Móvel com capacidade de sensoriamento. A seguir serão detalhados esses dois tipos de nós.

#### 4.1 NÓS SENSORES

Para a implementação desse projeto foi utilizado o Kit de Desenvolvimento MC1322x da Freescale, uma empresa especializada em circuitos integrados voltados para o mercado de sistemas embarcados. Nesse kit é utilizada a plataforma da série MC1322X, que apresenta um módulo de comunicação integrado em um circuito de baixo custo e baixo consumo, que utiliza o padrão IEEE 802.15.4, sendo otimizado para redes de sensores sem fio.

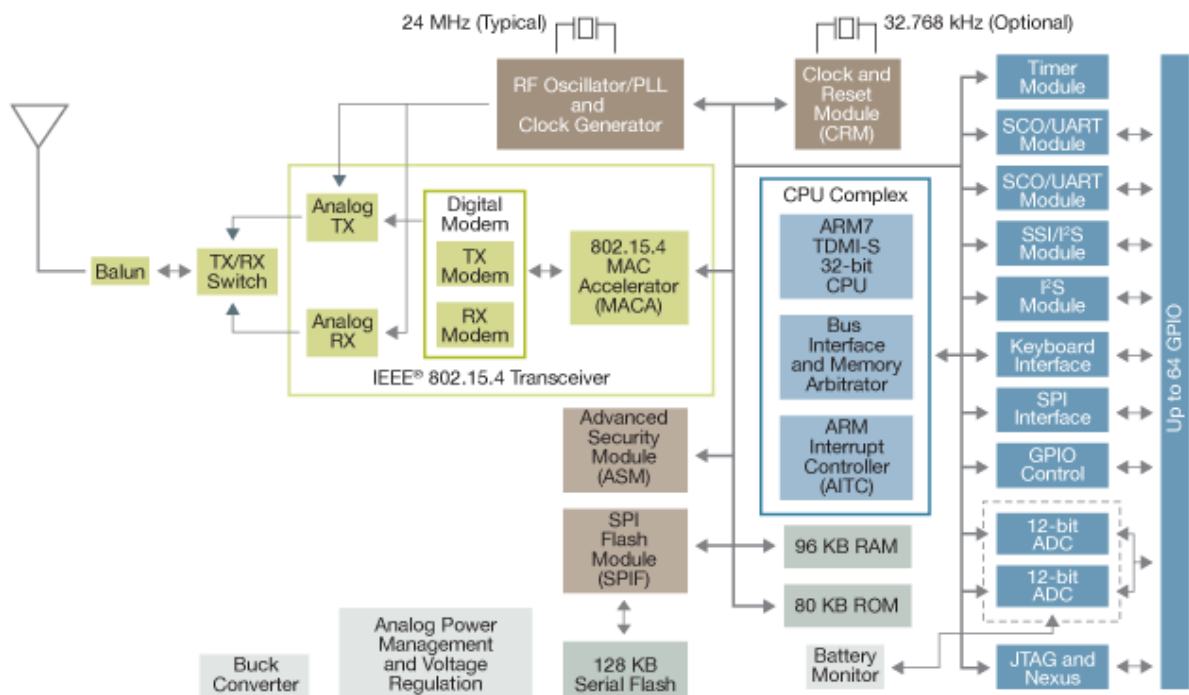
Essa plataforma contém o circuito integrado MC1322x, chamado também de *Platform-in-Package*. Ele leva esse nome pois num único circuito integrado, além de outros

blocos importantes, estão incluídos: um microcontrolador de 32-bits ARM7, um módulo transceptor IEEE 802.15.4, memória *Flash* RAM e memória ROM [9].

O MC1322x possui módulo transmissor e receptor de RF com balun integrado e opera na faixa de frequência de 2,4GHz, não necessitando de nenhum componente externo. Mesmo assim suas dimensões são reduzidas, a Figura 11 mostra o circuito integrado e seu encapsulamento. A Figura 12 traz detalhes sobre todos os recursos disponíveis nesse circuito integrado.



**Figura 11.** MC1322x – Compliant Platform-in-Package.



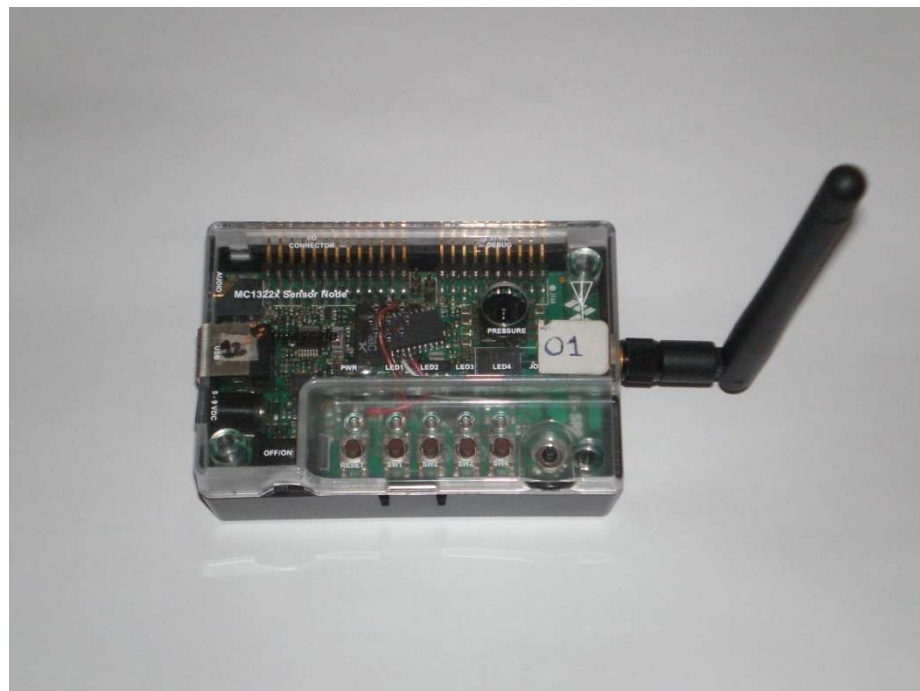
**Figura 12.** MC1322x – Diagrama de blocos.

Os kits contendo o MC1322x são distribuídos em versões diferentes, em placas que possuem itens básicos como botões, LEDs, porta USB para interface UART e envio de dados via porta serial. Podem ser alimentados por baterias, via porta USB ou ainda por uma fonte de alimentação externa [9].

A seguir são apresentados os dois modelos diferentes desse Kit que foram utilizados no projeto.

#### 4.1.1 Nó Móvel

No projeto, foi utilizado como NM a placa 1322X-SRB (Sensor Reference Board) do Kit de desenvolvimento da plataforma MC1322x. Ilustrada na Figura 13, essa placa apresenta três sensores: acelerômetro, sensor de pressão e de temperatura. Funciona como nó coletor de dados do ambiente, mas também pode exercer função de roteador de pacotes.



**Figura 13.** 1322X-SRB – Sensor Reference Board

#### 4.1.2 Nó Fixo

Para o NF foi utilizada a placa 1322X-NCB (Network Coordinator Bord), ilustrada na Figura 14. Essa placa além de possuir botões e LEDs, também possui um display de cristal líquido (LCD) e um conector para antena externa. É um dispositivo desenvolvido especialmente para ser o coordenador na rede, podendo ter a função de *Gateway* e comunicar a rede de sensores sem fio com outra rede.



**Figura 14.** 1322X-NCB – Network Coordinator Board.

#### 4.1.3 Antenas

Originalmente os módulo 1322X-NCB e 1322X-SRB utilizados no projeto possuem uma antena tipo F, também conhecida como antena impressa F invertida (PIFA). Ilustrada na Figura 15, a antena possui esse nome por ter justamente o formato da letra F, porém invertida.



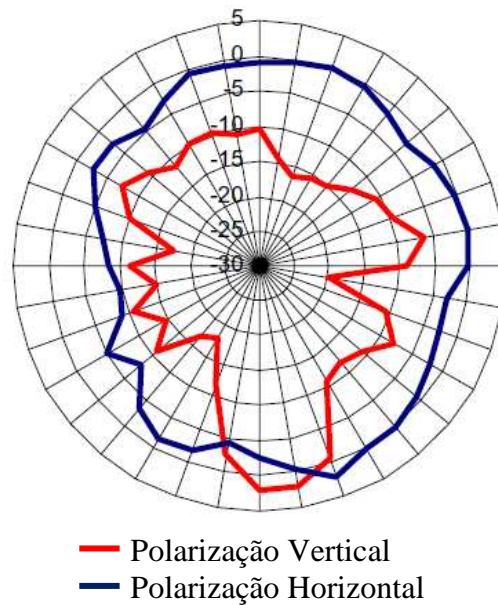


**Figura 15.** Antena F-invertido (PIFA)

Essa antena é impressa diretamente na placa de circuito impresso e tem suas medidas ajustadas (comprimento, largura, distância entre as trilhas e distância entre os planos da placa) para otimizar o ganho na frequência de operação do transmissor [10].

O diagrama de irradiação da antena PIFA para polarização horizontal e vertical é mostrada na Figura 16 [11], na escala dBi (ganho da antena comparado a uma hipotética antena isotrópica). A polarização indica a variação do campo elétrico em ondas eletromagnéticas planas. Para a polarização horizontal, o campo elétrico se manifesta no eixo  $x$  e o campo magnético no eixo  $y$ . Para a polarização vertical acontece o inverso.

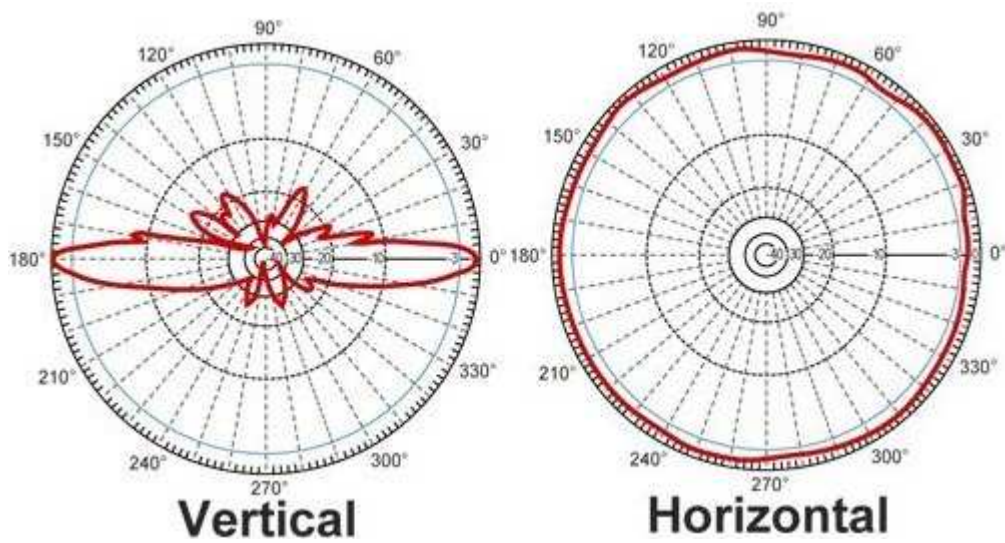
Analisando o diagrama podemos observar que a polarização horizontal é favorecida e concluímos que em aplicações com esse tipo de antena é importante que o transmissor e o receptor favoreçam a polarização horizontal. É importante notar que mesmo nessa polarização a irradiação não é homogênea para todas as direções.



**Figura 16.** Diagrama de irradiação antena F-invertido (PIFA)

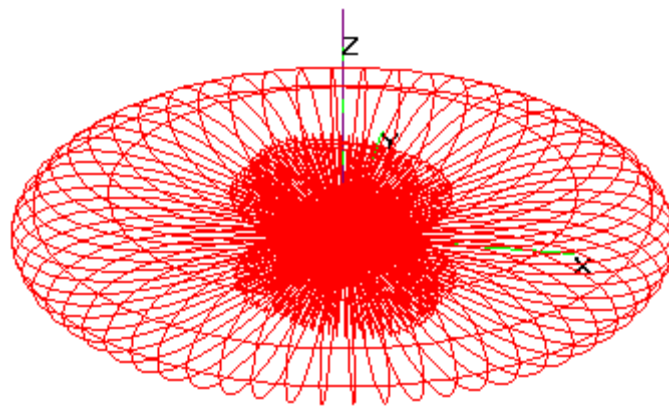
Para o sistema proposto é importante que a irradiação seja o mais homogênea possível, fazendo com que a precisão na determinação das coordenadas aumente. Por esse motivo as antenas F-invertido não são recomendadas.

O módulo 1322X-NBC ainda possui um conector SMA para que possa ser utilizada uma antena externa. O módulo 1322X-SRB originalmente não possuía um conector para antena externa, mas como nesse projeto não é aconselhado o uso da antena PIFA disponível na placa, foi integrado um conector nesse módulo e adicionada uma antena omni-direcional, cujo diagrama de irradiação é apresentado na Figura 17.



**Figura 17.** Diagrama de irradiação antena omni-direcional.

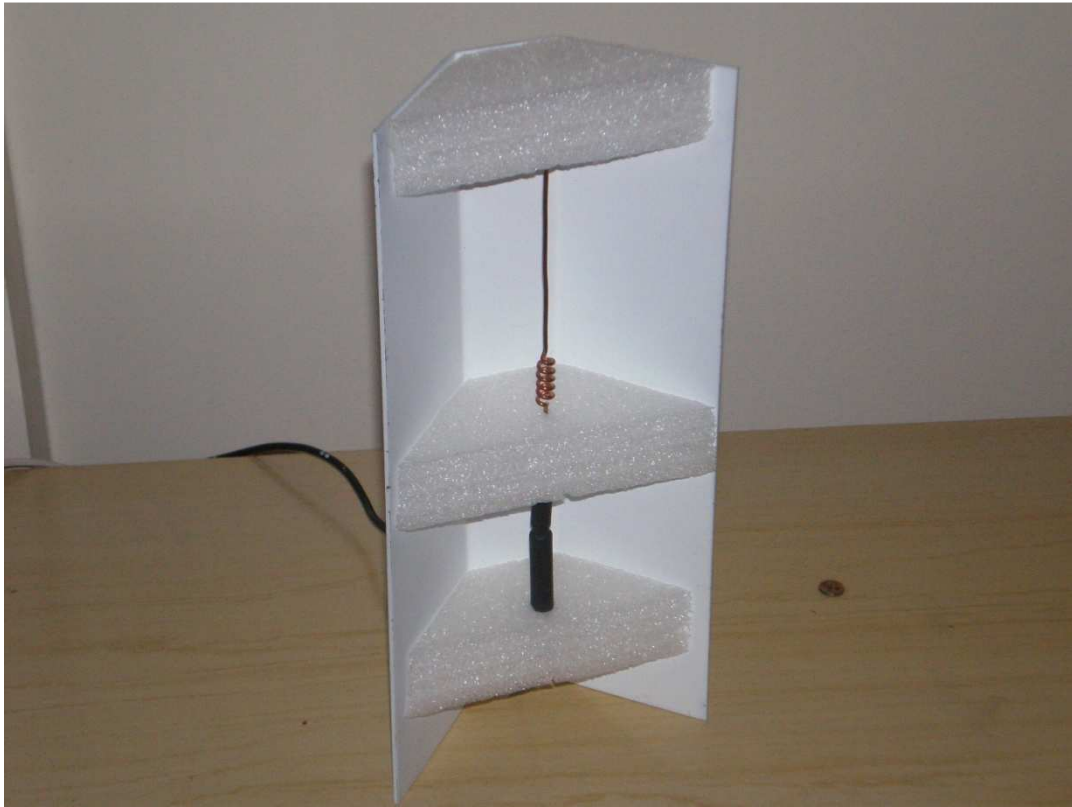
Nota-se que a polarização Horizontal para esse tipo de antena é homogênea. A Figura 18 traz o diagrama de irradiação tridimensional dessa antena, ilustrando a área de cobertura da mesma. Esse formato de área é importante para que a transmissão alcance todos os nós com uma potência semelhante, independente da orientação do NM no plano.



**Figura 18.** Diagrama de irradiação horizontal e vertical da antena omni-direcional.

Para os nós fixos não há necessidade do sinal das antenas se propagarem fora dos limites da área de localização. Foram utilizadas antenas setoriais como aquela apresentada na

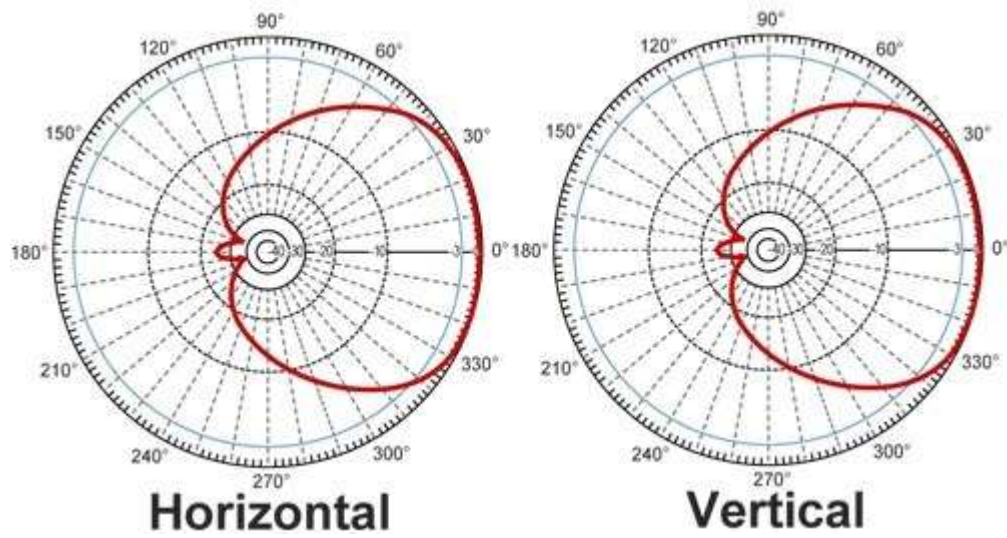
Figura 19. Esse tipo de antena direciona uma maior potência para uma determinada direção e deve ser apontada para o centro da área de interesse do sistema de localização.



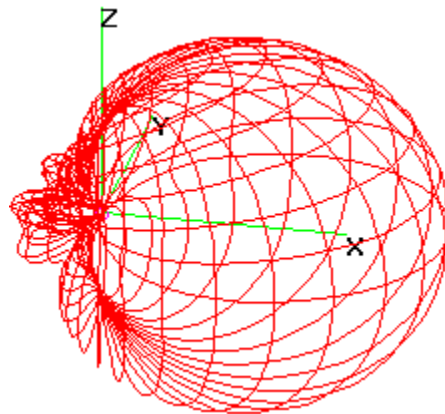
**Figura 19.** Antena setorial utilizada no projeto.

O diagrama de irradiação dessa antena está ilustrado na Figura 20. Nele podemos ver que a polarização horizontal se assemelha com a vertical e favorece uma direção. Antenas desse tipo conseguem abranger grandes distâncias com abertura de até 90 graus na horizontal.

A Figura 21 ilustra a área de cobertura de uma antena setorial. Comparando o formato da área de cobertura da antena setorial com a omni-direcional, percebe-se que aplicando esse tipo de antena, as chances de, dentro da área de cobertura, um ponto ficar fora do lóbulo de irradiação da antena são menores.



**Figura 20.** Polarização da antena setorial utilizada no projeto.



**Figura 21.** Polarização horizontal e vertical da antena setorial.

## 4.2 APLICAÇÃO DO MÉTODO RSSI

Para estimar as distâncias entre cada NF e o nó alvo foi utilizado o método RSSI, que estima a distância entre dois nós pela potência do sinal no receptor de RF. Como apresentado no Capítulo 3.4, a Equação 7 relaciona o valor de potência com a distância relativa entre dois nós.

$$\text{RSSI} = -10 \cdot n \cdot \log d + A \text{ (dBm)} \quad (7)$$

*RSSI*, diferença entre a potencia enviada e a transmitida, em dBm;

*n*, constante de propagação do meio;

*A*, potência recebida no receptor a 1 metros de distância;

*d*, distância entre receptor e transmissor, em metros.

O valor de RSSI na equação é um indicativo da qualidade da comunicação entre o nó transmissor e o nó receptor. Tipicamente esse valor está presente nos diversos protocolos de transmissão sem fio, como é o caso do padrão 802.15.4 utilizado.

Esse padrão define que o indicador de qualidade do link (LQI) é uma característica da potência do sinal ou da qualidade do sinal para cada pacote de dados recebido. A medida desse indicador é feita utilizando a detecção de energia no canal de comunicação ou utilizando estimativas de relação entre sinal e ruído ou uma combinação dos dois.

Pelo padrão, o valor de LQI deve ser calculado para cada pacote recebido e seu resultado deve estar disponível na camada de enlace MAC. Esse valor é guardado como um valor inteiro, na faixa de 0x00 até 0xFF (0 a 255). Esses valores são associados aos valores máximos e mínimos de sinais que podem ser detectados pelo receptor. Com esse valor é calculado o RSSI seguindo a Equação 11, dado em dBm.

$$\text{RSSI} = \left( \frac{85 \cdot \text{LQI}}{255} - 100 \right) \text{ (dBm)} \quad (11)$$

Depois de calculado o valor de RSSI, aplica-se o valor na Equação 7, resultado na Equação 12.

$$\left(\frac{85.LQI}{255} - 100\right) = -10.N.\log d + A \quad (12)$$

O valor de A na equação é a potência recebida à 1 metro de distância do transmissor. Como exposto no Capítulo 2.3, o valor de n é uma constante de propagação do meio, e varia com a interferência que a onda eletromagnética sofre se propagando no meio. Seu valor deve ser encontrado empiricamente para uma melhor aproximação da distância.

Reorganizando a Equação 11 nós podemos chegar na Equação 13, que é uma função que relaciona a distância com o valor encontrado para RSSI, já que n e A são constantes e relativas ao meio.

$$d = d = 10^{\left(\frac{RSSI-A}{-10.n}\right)} \quad (13)$$

d, distância entre receptor e transmissor, em metros.

Essa distância é calculada para cada um dos nós fixos pelo *software* no computador que recebe os dados de RSSI e aplica a trilateração para determinar as coordenadas do nó alvo.

## 5 IMPLEMENTAÇÃO

Nesse capítulo é apresentado o projeto do sistema de localização implementado, detalhando a topologia de rede, os fluxogramas dos nós sensores, os dados transmitidos e o *software* para a visualização destes na tela de um computador pessoal. Também são detalhadas informações importantes como a calibração e disposição dos nós.

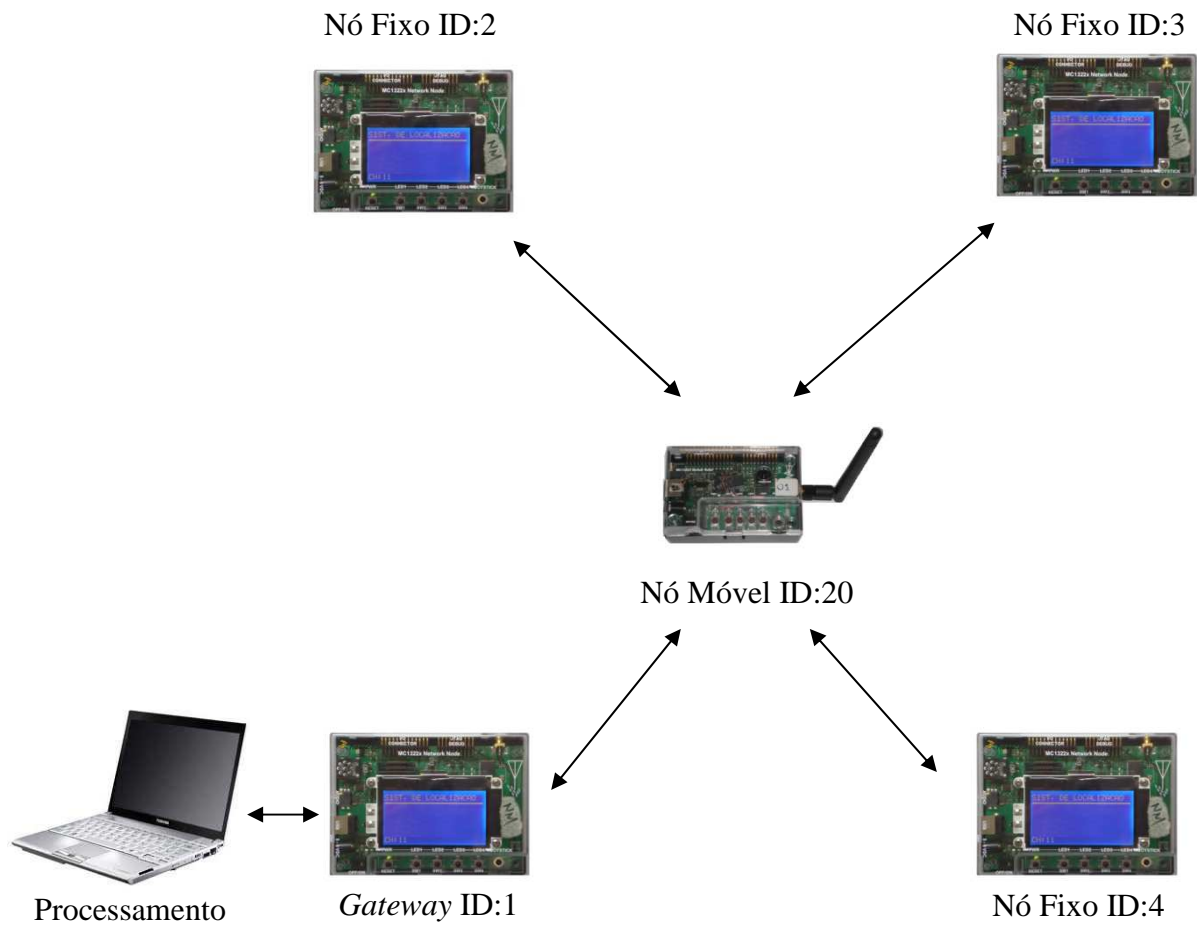
### 5.1 CONFIGURAÇÃO DA RSSF

Utilizando o método de trilateração apresentado no Capítulo 3.5, são necessários ao menos três pontos de referência para determinar a localização do NM. Esses três pontos serão fixos e devem ter suas coordenadas no plano XY conhecidas para que então possa ser determinada a posição relativa ao ponto móvel.

Nesse projeto é estudada a trilateração com quatro pontos de referência, portanto quatro NFs de posição conhecida e um NM cuja localização deve ser determinada. Numa RSSF real, formada por vários nós sensores, utilizar um ponto a mais como referência não implica em custos adicionais e pode trazer melhores resultados, como é apresentado nos testes realizados com esse sistema.

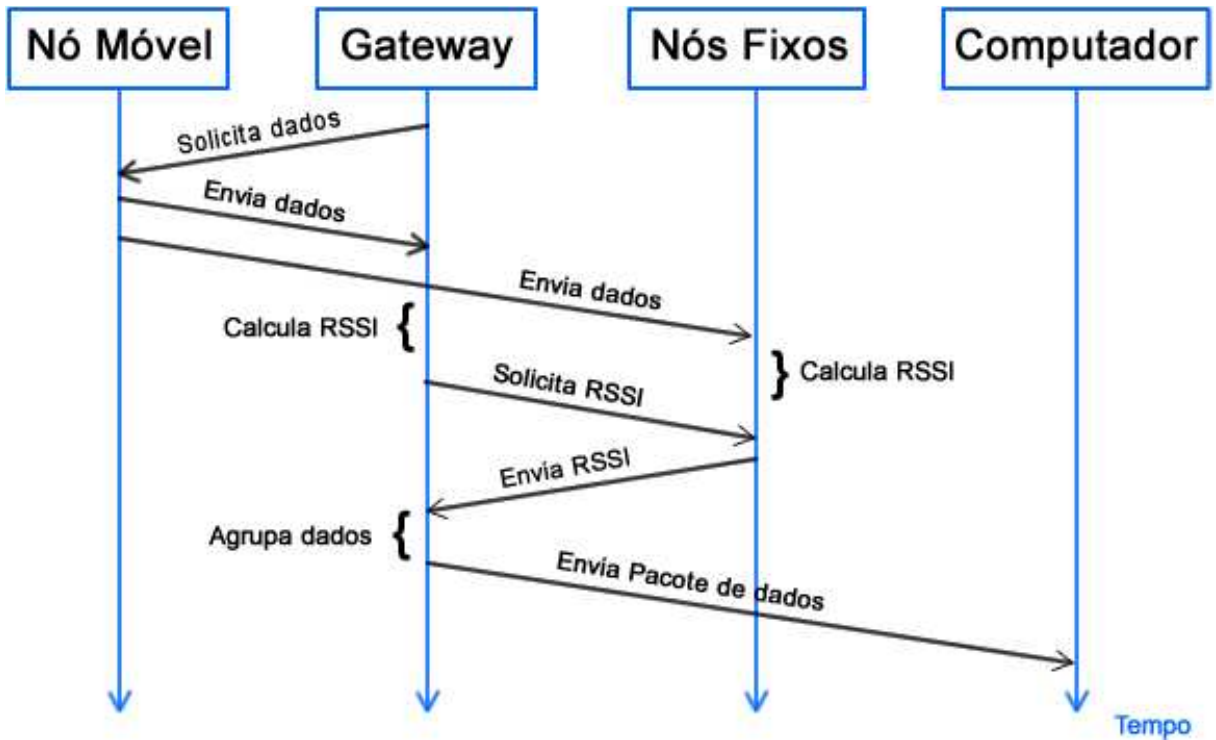
A topologia da rede de sensores é ilustrada na Figura 22, onde os nós fixos são rádios do modelo 1322X-NCB e o NM é do modelo 1322X-SRB. Cada nó da rede recebe um número de identificação, sendo que o nó com função de *Gateway* recebe identificação 1 e o NM 20. Essa identificação é utilizada como parâmetro na mensagem de rádio, assim é possível saber para qual nó sensor foi transmitida a mensagem. Ambos os módulos podem ser operador com bateria, através de fonte de alimentação externa ou ainda via porta USB.





**Figura 22.** Configuração da rede implementada.

O *Gateway* tem a função de coordenador da rede de sensores. É ele quem solicita ao NM medir e enviar as informações de sensoriamento. Depois de recebido um pacote de dados do NM, o coordenador calcula o valor de RSSI recebido e solicita para cada um dos nós fixos a leitura de RSSI. Na Figura 23 é exibida a troca de mensagens entre os rádios com referência no tempo.



**Figura 23.** Diagrama de troca de mensagens.

Após todos os Nós Fixos responderem, o *Gateway* envia o pacote de dados ao computador, onde um *software* faz a análise e os cálculos de trilateração. A Tabela 1 exhibe o conjunto de dados enviados pelo NM enquanto a Tabela 2 mostra o pacote de dados que é enviado ao computador.

**Tabela 1.** Quadro de dados enviados pelo Nó Móvel.

Byte	Definição
0	Identificação da rede
1	Identificação do Nó de destino
2	Identificação do Nó remetente
3	Dados do sensor de pressão do NM
4	Dados do sensor de pressão do NM
5	Dados do sensor de temperatura do NM

6	Dados do sensor de temperatura do NM
7	Dados da tensão da bateria do NM
8	Dados da tensão da bateria do NM

**Tabela 2.** Quadro de dados enviados ao computador.

Byte	Característica
0	Valor de RSSI medido pelo Nó ID 1
1	Valor de RSSI medido pelo Nó ID 2
2	Valor de RSSI medido pelo Nó ID 3
3	Valor de RSSI medido pelo Nó ID 4
4	Dados do sensor de pressão do NM
5	Dados do sensor de pressão do NM
6	Dados do sensor de temperatura do NM
7	Dados do sensor de temperatura do NM
8	Dados da tensão da bateria do NM
9	Dados da tensão da bateria do NM

Para a Tabela 1, o byte 0 informa a identificação da rede, o byte 1 o nó de destino da mensagem e o byte 2 o nó remetente. Os outros bytes contém as medições realizadas dos sensores presentes no NM.

A mensagem enviada ao computador contém todos os dados de RSSI necessários para determinar a localização do NM. A Tabela 3 sintetiza os dados que são usados como entrada para o sistema de trilateração, indicando os valores máximos e mínimos toleráveis e uma breve descrição sobre eles.

**Tabela 3.** Dados de entrada para o sistema de localização.

Nome	Valor Mínimo	Valor Máximo	Descrição
<b>RSSI</b>	40	98	Valores de RSSI medidos por cada NF.
<b>A</b>	30	50	Valor absoluto de RSSI medido a 1 metro de distância do NF.
<b>n</b>	1	8	Índice de propagação da onda no meio, seu valor é determinado empiricamente e apresenta valores típicos entre 2 e 5.
<b>X,Y</b>	-	-	Coordenadas X e Y de cada um dos Nós Fixos.

## 5.2 SOFTWARE EMBARCADO

Para a programação e debug cada placa do Kit da Feescale tem uma interface via JTAG (*Join Test Action Group*) por onde é feito o carregamento do *firmware* ao dispositivo. Para a programação é utilizado um *software* de uma empresa sueca, a IAR Systems, chamado IAR Embedded Workbench. Esse *software* permite a programação dos equipamentos utilizando a linguagem de programação C e também o debug em tempo real via JTAG.

A seguir são analisados os fluxogramas dos programas aplicados a cada tipo de nó sensor. Foram desenvolvidos dois tipos diferentes de *firmware*, um para os Nós Fixos e outro para sensoriamento do NM.

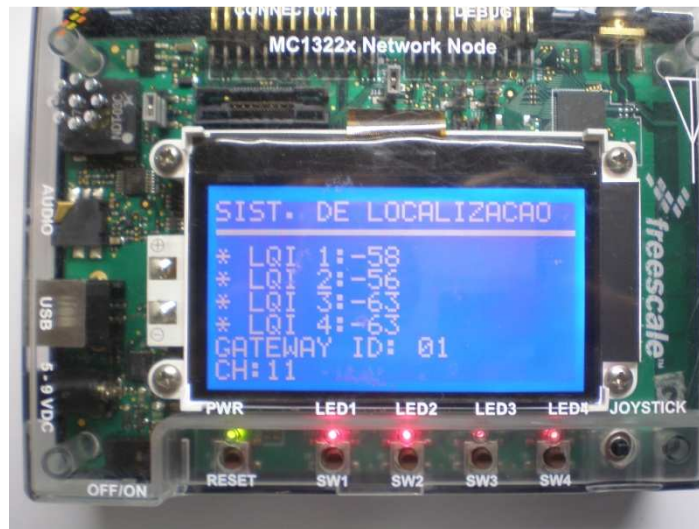
O NM enquanto percorre o ambiente monitorado deve permanecer com seu rádio ligado e esperando um comando do *Gateway* para realizar a medição de seus sensores e retornar uma mensagem com esses dados. Para tanto, foi implementado nesse *firmware* o fluxograma da Figura 24.



**Figura 24.** Fluxograma de operação – Nó Móvel.

Para os Nós Fixos foi desenvolvido um *firmware* flexível, onde o equipamento pode exercer a função de NF, Gateway ou até mesmo NM. O rádio 1322X-NCB utilizado apresenta display LCD e 4 chaves de entrada. Quando a chave 1 é pressionada, o equipamento tem sua função trocada. Pressionando a chave 2 é possível alterar o número de identificação do nó. A chave 3 desliga o display LCD aumentando a autonomia quando o módulo opera com baterias.

A Figura 25 apresenta o módulo operando como *Gateway* e a Figura 26 como NF. Quando em operação no modo Gateway, o display mostra os valores de LQI informado pelos outros nós. Quando em modo NF, apresenta o valor de LQI recebido do NM e os dados de temperatura e tensão da bateria.

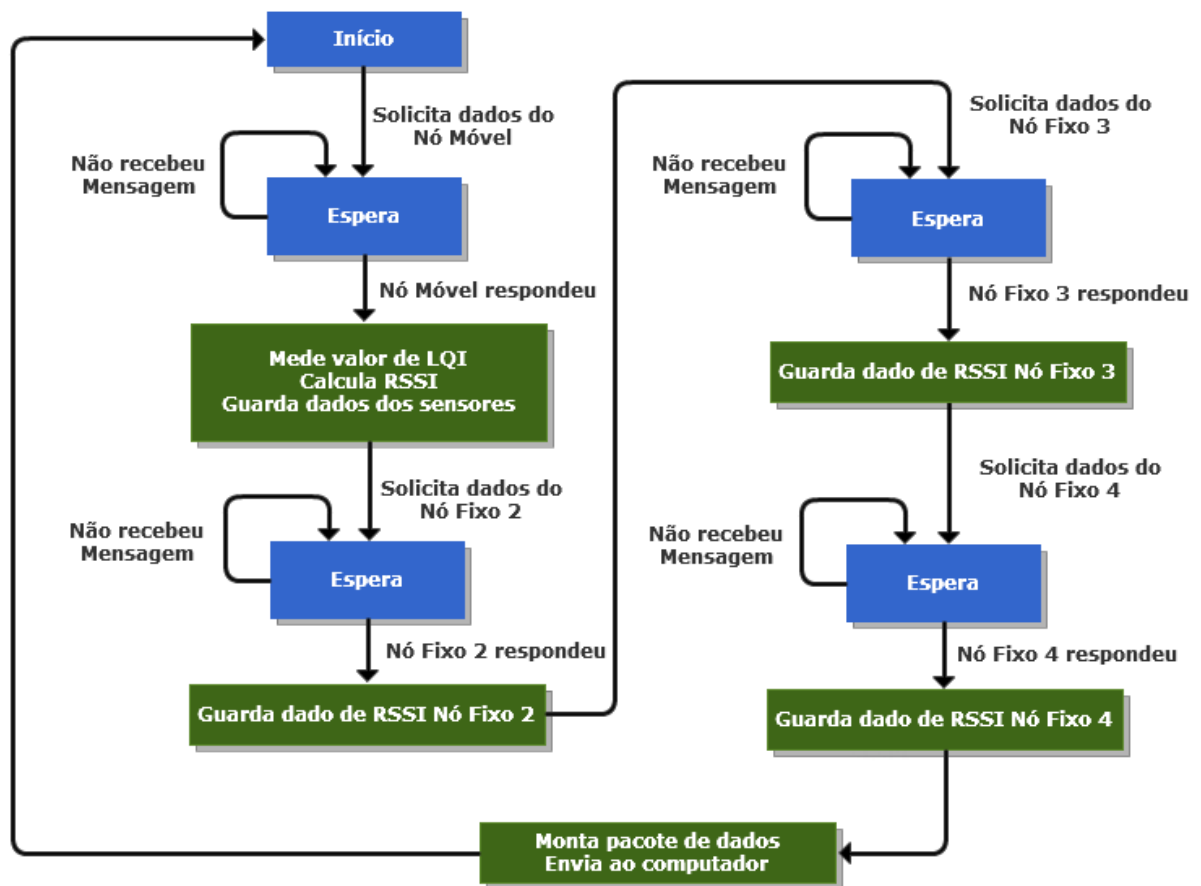


**Figura 25.** 1322X-NCB como Gateway.



**Figura 26.** 1322X-NCB como Nó Fixo.

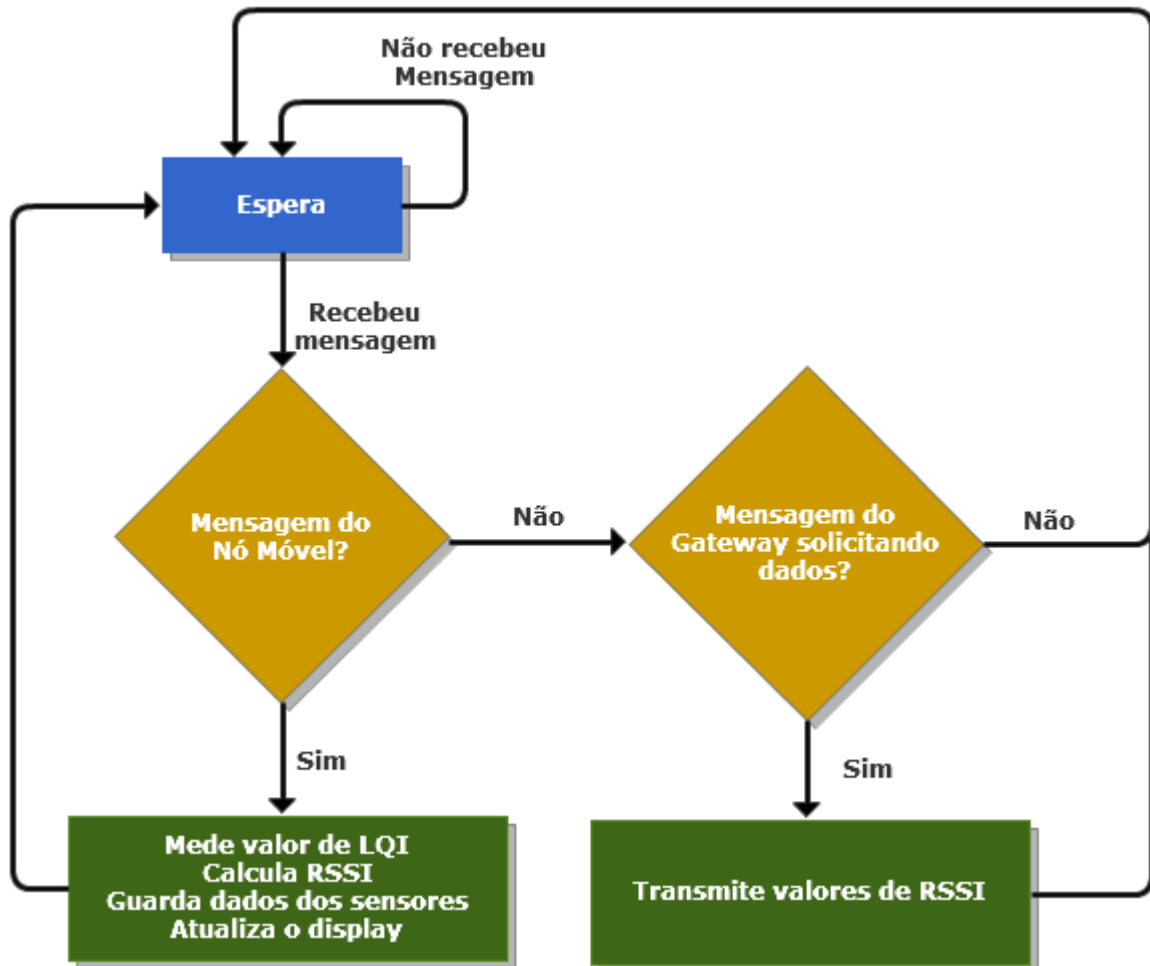
O fluxograma para o modo de Gateway é apresentado da Figura 27. Primeiramente esse nó solicita ao NM que faça a leitura dos sensores e lhe envie uma mensagem de volta. Com a mensagem recebida são armazenados os dados dos sensores e o valor de RSSI correspondente a recepção. Depois ele solicita aos outros Nós Fixos da rede que lhe enviem os valores de RSSI. Logo após, o Gateway monta um pacote com os dados recebidos e envia a um computador via porta USB, para que em um *software* desenvolvido sejam visualizados esses dados.



**Figura 27.** Fluxograma de operação – Gateway.

A mensagem que o NM enviou é também recebida em todos os NFs que se encontram ao alcance do rádio. Cada um desses nós calcula o valor de RSSI da recepção e mostra no

display os dados de temperatura e tensão da bateria do NM. O fluxograma dessa seqüência é apresentado na Figura 28.



**Figura 28.** Fluxograma de operação – Nó Fixo.

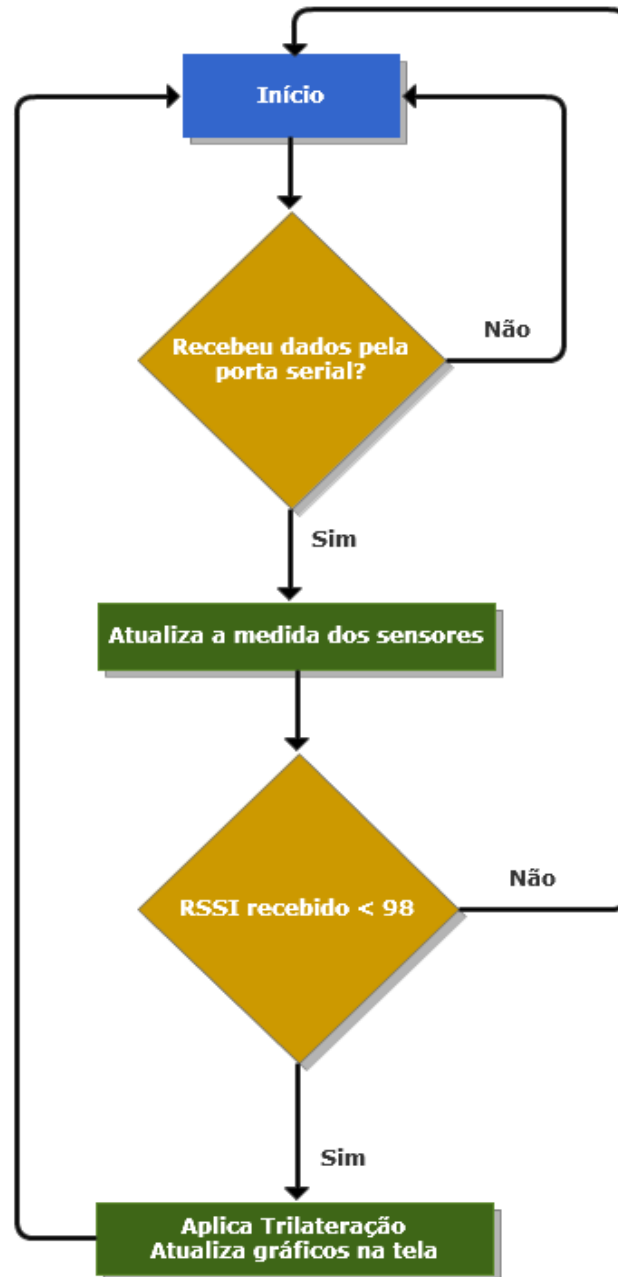
### 5.3 SOFTWARE DE MONITORAMENTO

Para processar os dados que o a RSSF enviava era necessária alguma ferramenta com suporte à conexão serial e algum ambiente com interface gráfica para apresentar na tela os dados processados. Para isso foi desenvolvida uma aplicação utilizando a linguagem de programação C++ e o *software* de desenvolvimento C++ Builder 6. Esse ambiente de



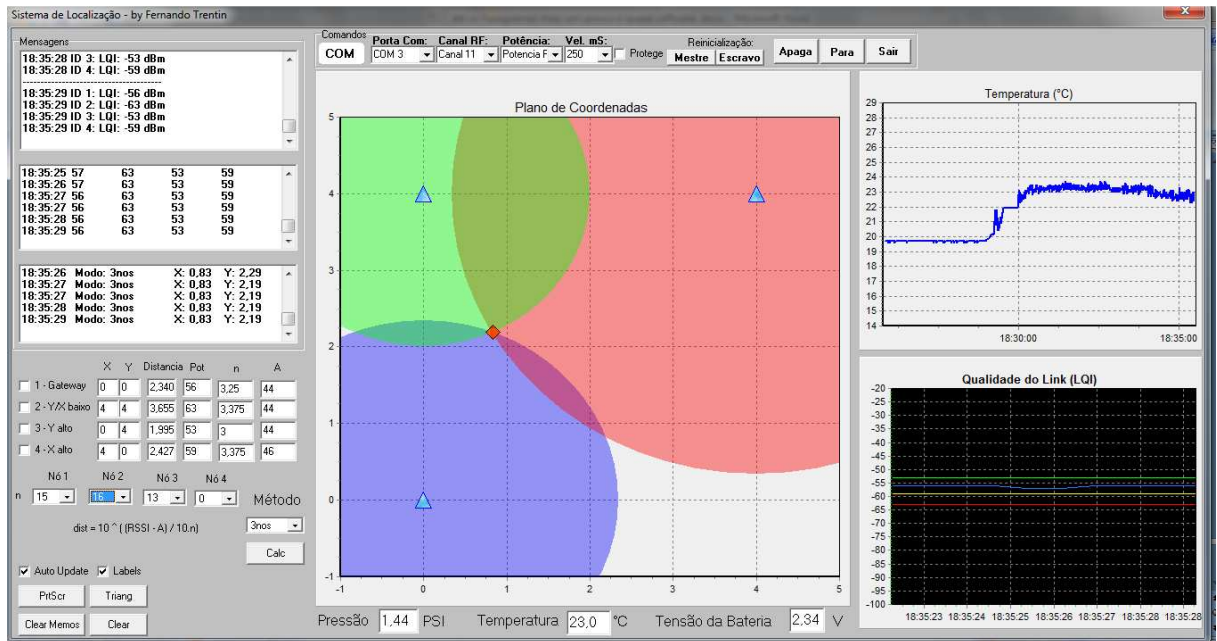
programação possui várias bibliotecas com componentes visuais e tem como opção a programação orientada a objetos, com vários recursos e entre eles o acesso à conexão serial.

O *software* desenvolvido monitora a porta serial que é ligada ao Gateway. A cada novo pacote de dados, é executado o fluxograma contido na Figura 29. Após receber os dados são atualizadas as medidas dos sensores e verificado se os valores recebidos para RSSI estão dentro dos limites apresentados anteriormente na Tabela 3. Caso estejam, é aplicado o método de trilateração e apresentado na tela os gráficos com os resultados.



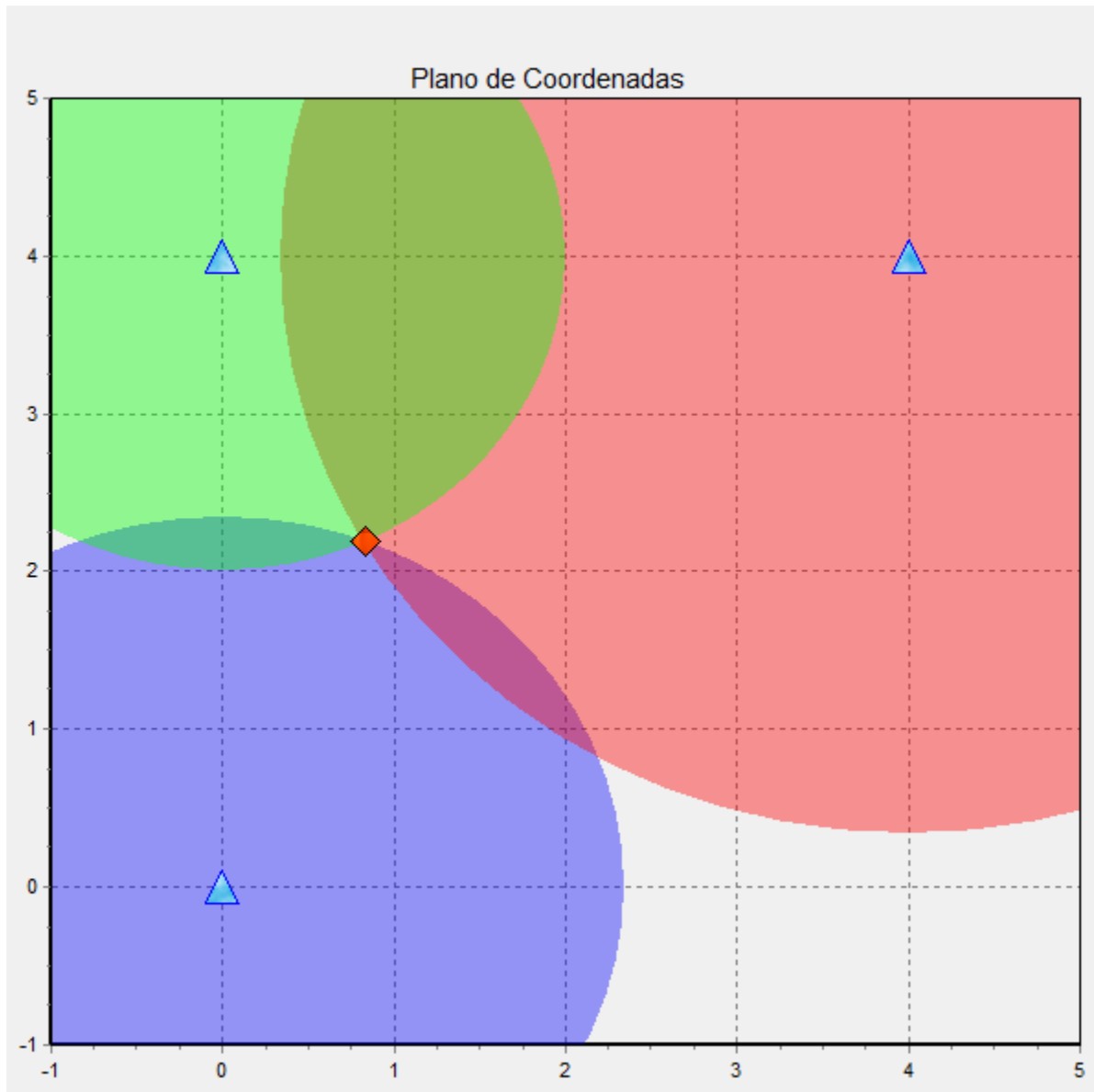
**Figura 29.** Fluxograma de operação – Nó Fixo.

A tela de interface criada está ilustrada na Figura 30. Nela podemos ver que existem três tipos de gráficos: Plano de Coordenadas, Temperatura e Qualidade do Link.



**Figura 30.** Interface gráfica do sistema de localização.

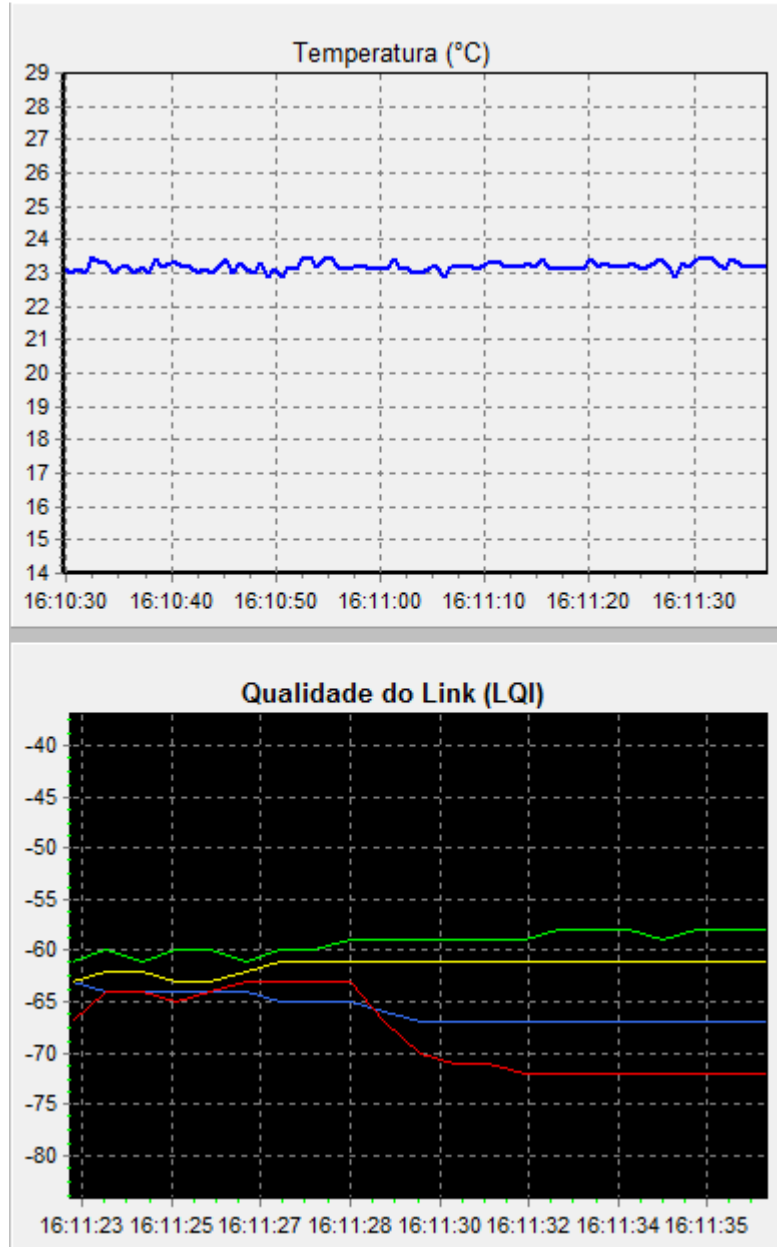
Na Figura 31 é apresentado o Plano de Coordenadas, onde são exibidos os pontos referentes aos NFs e também o ponto referente ao NM, cuja coordenada foi calculada pela trilateração. É plotado nesse gráfico também uma circunferência pra cada NF, cujo raio é uma estimativa da distância entre NM e o NF em questão. Percebe-se também que o ponto referente ao NM aparece próximo à área de intersecção dos círculos, validando assim o método de trilateração utilizado.



**Figura 31.** Tela gráfica – Plano de Coordenadas.

A Figura 32 traz os gráficos da Temperatura e da Qualidade do Link. Os valores desses gráficos são atualizados a cada pacote de dados recebidos, e fornecem um histórico sobre o sensoriamento do ambiente. A linha em azul no gráfico Temperatura corresponde ao valor medido pelo NM ao longo do tempo, enquanto as linhas coloridas do gráfico Qualidade do Link são os valores de RSSI calculados por cada um dos Nós Fixos. A linha em azul

corresponde ao valor enviado pelo Gateway, a linha em vermelho o valor enviado pelo NF 2, a verde pelo NF 3 e a amarela o valor enviado pelo NF 4.



**Figura 32.** Tela gráfica – Temperatura e Qualidade do Link.

O lado esquerdo da tela gráfica, ampliado na Figura 33, apresenta os dados de configuração das coordenadas dos nós fixos e também os dados de sensoriamento. Os campos destacados em vermelho devem ser fornecidos pelo usuário e se referem às coordenadas XY

dos Nós Fixos. Os campos em azul também devem ser fornecidos e são referentes à calibração dos nós. Os campos em verde são os dados de sensoriamento enviados pelo NM.

	X	Y	Distancia	Pot	n	A
<input type="checkbox"/> 1 - Gateway	0	0	2,340	56	3,25	44
<input type="checkbox"/> 2 - Y/X baixo	4	4	3,655	63	3,375	44
<input type="checkbox"/> 3 - Y alto	0	4	1,995	53	3	44
<input type="checkbox"/> 4 - X alto	4	0	2,427	59	3,375	46

	Nó 1	Nó 2	Nó 3	Nó 4	Método
n	15	16	13	0	3nos

dist =  $10^{((RSSI - A) / 10.n)}$

Auto Update  Labels

Calc

Pressão	1,44	PSI	Temperatura	23,0	°C	Tensão da Bateria	2,34	V
---------	------	-----	-------------	------	----	-------------------	------	---

**Figura 33.** Tela gráfica – dados de entrada e dados de sensoriamento.

Na Figura 33 pode-se observar um campo chamado Método. O *software* desenvolvido pode utilizar três métodos diferentes para estimar a localização do NM, são eles:

- 3 nós: calcula a posição do NM utilizando apenas a trilateração com os nós com identificação 1, 2 e 3 da RSSF.
- 4 média: calcula a posição utilizando a média do valor encontrado, fazendo todas as trilaterações possíveis com 4 nós de referência.
- 3 em 4: calcula a posição utilizando a trilateração com 3 nós, excluindo o nó mais distante.

## 6 TESTES, VALIDAÇÕES E RESULTADOS

Para sistema desenvolvido foram realizados alguns testes em ambiente externo, mas não livre de obstáculos. Pela teoria estudada, esse sistema pode ser utilizado em ambientes internos ou externos, visto que o transmissor e o receptor de rádio não precisam de uma linha de visada. Porém, em ambientes livre de obstáculos as ondas eletromagnéticas sofrem menor interferência e, portanto, espera-se que os resultados sejam mais precisos.

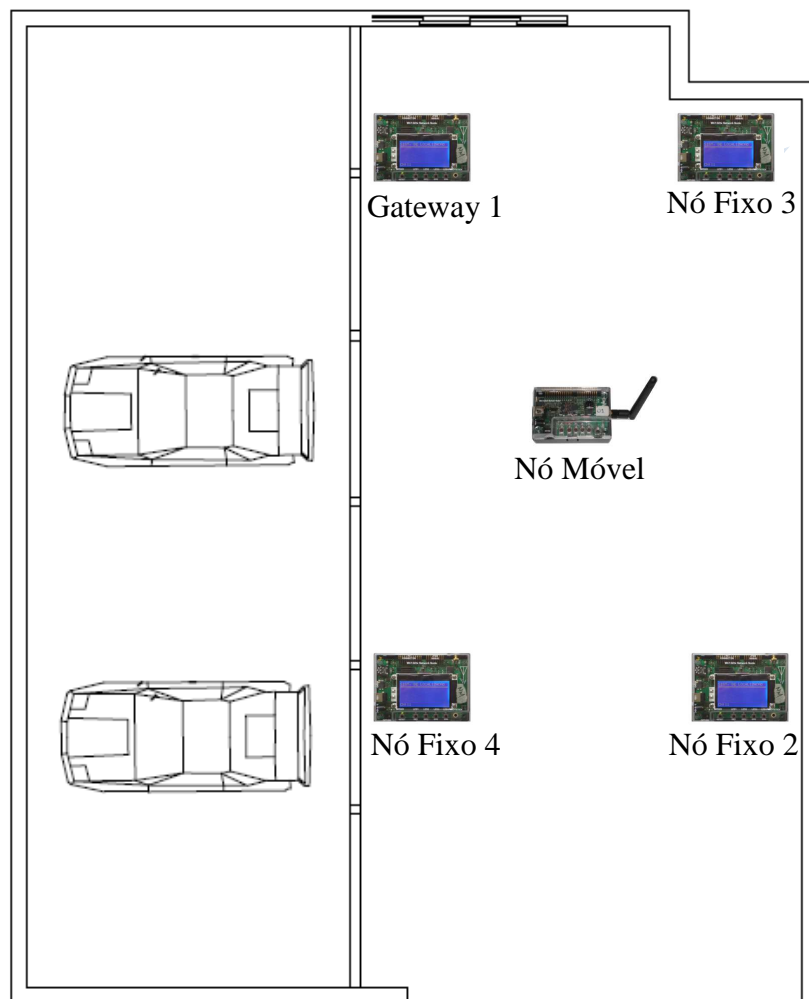
O sistema foi testado em área aberta, na garagem de um condomínio, representada na Figura 34. A área livre onde o sistema foi instalado tem dimensões de 6 x 12 metros, possui paredes em parte de seu perímetro e alguns obstáculos como carros e plantas.



**Figura 34.** Ambiente externo utilizados para os testes.

## 6.1 INSTALAÇÃO DOS NÓS FIXOS

O sistema utiliza quatro Nós Fixos para determinar a localização, e eles foram dispostos no ambiente como ilustrado na Figura 34. Foi atribuído um plano de coordenadas para a garagem e os Nós Fixos receberam suas coordenadas conforme a Tabela 4.



**Figura 35.** Planta baixa – localização dos nós sensores.



**Tabela 4.** Coordenadas dos Nós Fixos.

Identificação de rede	Coordenadas (X,Y)
Gateway 1	(0,0)
Nó Fixo 2	(9,5)
Nó Fixo 3	(0,5)
Nó Fixo 4	(9,0)

## 6.2 CONFIGURAÇÃO DO SOFTWARE E CALIBRAÇÃO

Depois de determinar a posição de cada nó, e instalá-los no local definitivo de operação, é necessário entrar com esses dados no *software* e realizar uma calibração para o que a distância seja calculada corretamente. Os campos que devem ser preenchidos na janela do *software* estão ilustrados na Figura 36.

	X	Y	Distancia	Pot	n	A
<input type="checkbox"/> 1 - Gateway	0	0	2,85	67	2,375	48
<input type="checkbox"/> 2 - Y/X baixo	9	5	3	68	2,375	48
<input type="checkbox"/> 3 - Y alto	0	5	2	59	2,375	46
<input type="checkbox"/> 4 - X alto	9	0	1	62	2,375	48

Nó 1      Nó 2      Nó 3      Nó 4

n 8 8 7 8      Método

dist =  $10^{[(RSSI - A) / 10.n]}$

Auto Update     Labels

3nos  
3nos  
4media  
3em4

**Figura 36.** Planta baixa – localização dos nós sensores.

O procedimento de configuração segue os seguintes passos:

1. Definir o posicionamento de cada nó, e guardar suas coordenadas.

2. Conectar o NF com função de Gateway via USB ao computador com o *software*.
3. Executar o *software* e entrar com os dados das coordenadas de cada nó nos campos marcados em vermelho na Figura 36.
4. Para cada nó no sistema, no campo marcado em azul na Figura 36, entrar com o valor de A (correspondente a medida de RSSI recebida a 1 metro de distância entre o NF e o NM).
5. Determinar qual o melhor valor para N (índice de propagação da onda no meio) e, no campo marcado em verde, aplicar um valor para cada nó.
6. Escolher o método de cálculo a ser utilizado (“3nos”, “4media” ou “3em4”).
7. Clicar em “Auto Update” para que o sistema calcule automaticamente a posição no NM e plote suas coordenadas no gráfico.

Para o passo de número 4, valor de A é determinado posicionando o NM a uma distância de 1 metro em frente a cada um dos NFs. O valor de RSSI medido então é passado o *software* no campo do respectivo NF.

O passo mais crítico é o de número 5, determinar o valor do índice de propagação da onda no meio. Como tratado anteriormente, o parâmetro n descreve quanto a potência do sinal decai quando a distância até o nó transmissor aumenta. Seu valor é altamente dependente do ambiente. A única maneira de determinar esse valor é empiricamente [12].

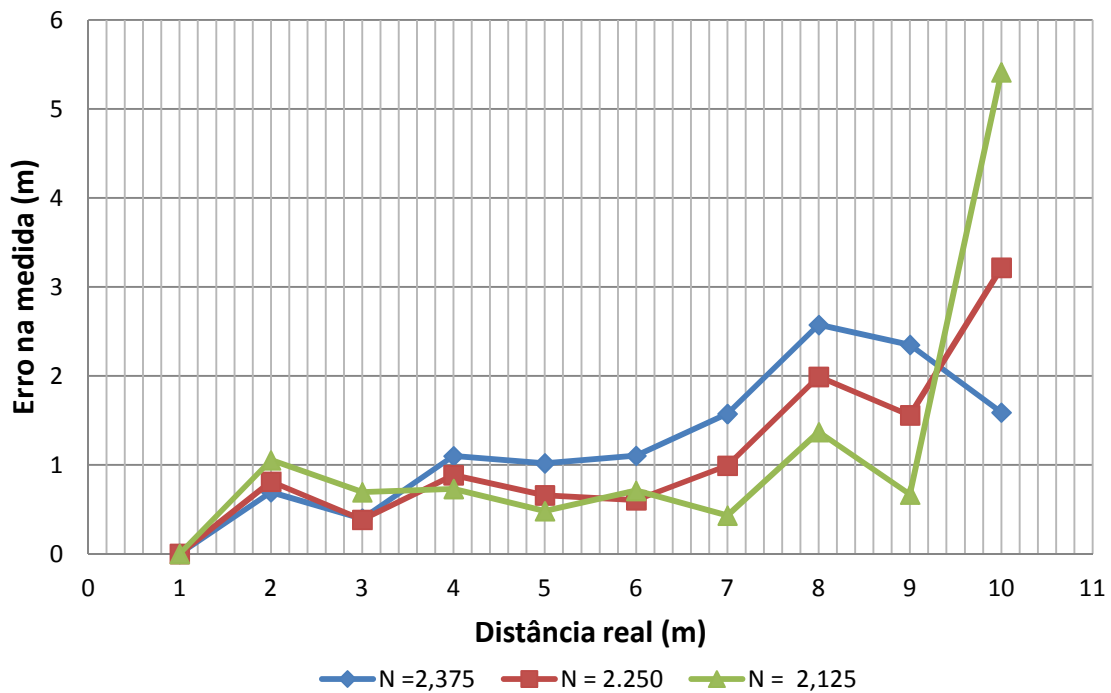
No *software* desenvolvido, pode-se escolher valores de N entre 1 e 8. Valores menores que 2 são aplicados quando a interferência do ambiente é construtiva. Os valores de N possíveis de serem escolhidos no *software* seguem um índice de 0 a 31, seus valores estão representados na Tabela 5. A conversão dos valores de N com base no índice dessa tabela foi

utilizada para diminuir a complexidade para a calibração do sistema. No *software*, o usuário deve escolher para cada NF um índice de  $n$ , podendo variar de 0 a 31.

**Tabela 5.** Valores possíveis para o parâmetro  $N$ .

Índice de $N$	Valor de $n$	Índice de $N$	Valor de $n$
0	1.000	16	3.375
1	1.250	17	3.500
2	1.500	18	3.625
3	1.750	19	3.750
4	1.875	20	3.875
5	2.000	21	4.000
6	2.125	22	4.125
7	2.250	23	4.250
8	2.375	24	4.375
9	2.500	25	4.500
10	2.625	26	4.625
11	2.750	27	5.000
12	2.875	28	5.500
13	3.000	29	6.000
14	3.125	30	7.000
15	3.250	31	8.000

Após alguns testes medindo o valor de RSSI em diversos pontos, ficou comprovado quem melhores resultados eram alcançados com valores de  $N$  entre 2 e 2,5. O gráfico na Figura 37 faz uma comparação entre o erro na estimativa da distância utilizando três valores diferentes para  $N$ , sendo que o valor medido de RSSI a 1 metro foi de -48 dBm.



**Figura 37.** Comparação do erro para valores diferentes de N.

Percebe-se no gráfico que bons resultados foram alcançados com  $N = 2,125$  na faixa de distância menores que 8 metros. Pode ser observado também que para a distância de 10 metros, esse índice apresentou um erro muito mais elevado que os outros. Entretanto, considerando as dimensões do ambiente onde o sistema foi instalado, esse valor de índice foi o mais adequado.

### 6.3 TESTES E VALIDAÇÕES

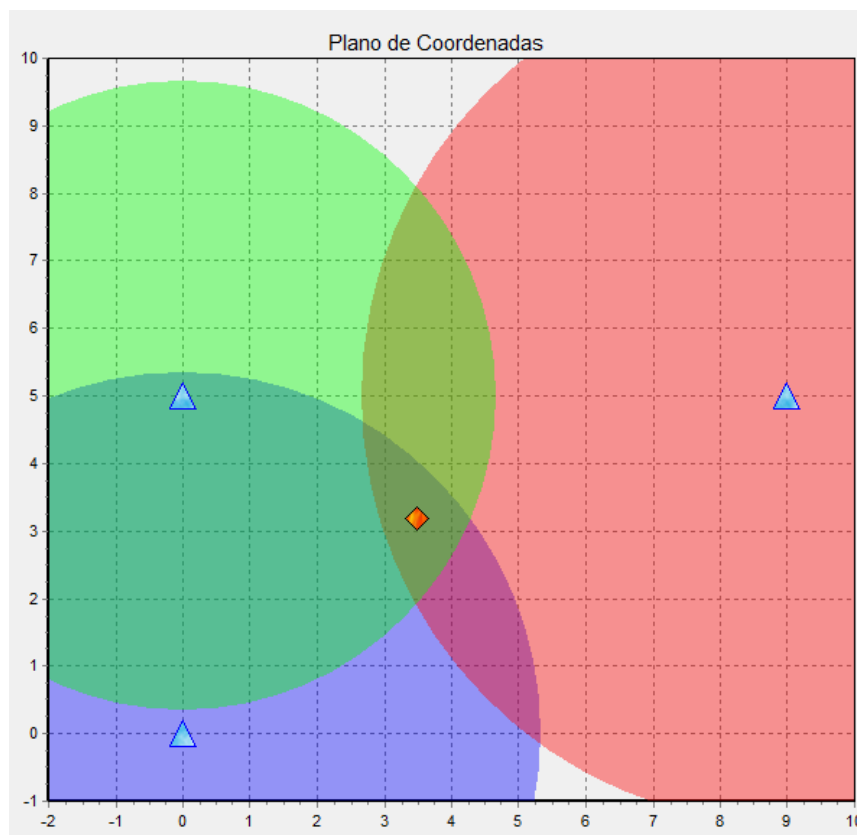
#### 6.3.1 Localização

O sistema possui três métodos distintos para o cálculo da localização no NM utilizando da trilateração. Conforme o Capítulo 5.3, é possível utilizar a trilateração com 3 nós de referência, com 4 nós, ou com os 3 melhores nós entre 4 nós de referência.

O *software* dispõe de uma janela gráfica com o nome de Plano de Coordenadas, onde é plotado um triângulo azul indicando a posição de cada NF bem como uma circunferência

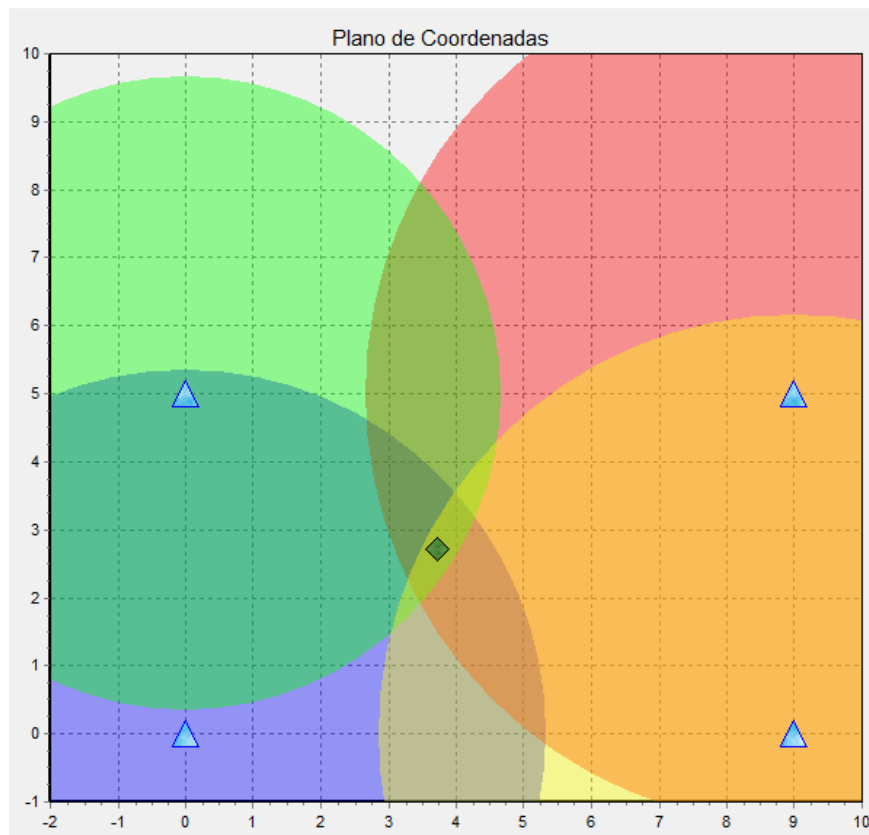
para cada nó, dando a idéia de distância ao NM, plotado como um losango. Sua localização é provavelmente a área de intersecção desses círculos.

Para o método dos 3 nós, apresentado na Figura 38, o *software* ignora o 4º nó e plota no gráfico as coordenadas e circunferências relativas, fazendo a trilateração destes e apontando a posição do NM na tela. Observamos que nesse caso o NM está apontado próximo ao centro da área de intersecção dos círculos.



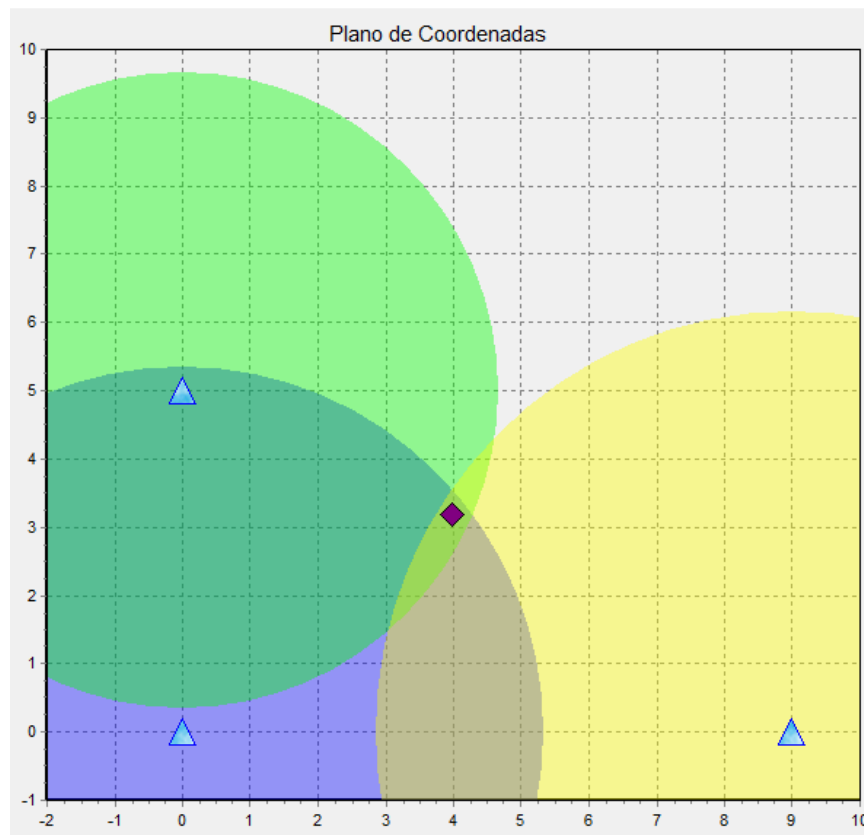
**Figura 38.** Plano de Coordenadas – Método 3 nós.

O método com 4 nós realiza todas trilaterações possíveis com combinações de 4 nós tomados 3 a 3. Cada resultado é somado e ao fim das trilaterações é dividido pelo número de combinações possíveis, gerando uma média das trilaterações. A Figura 39 ilustra o gráfico para esse método, onde todos os pontos aparecem plotados.



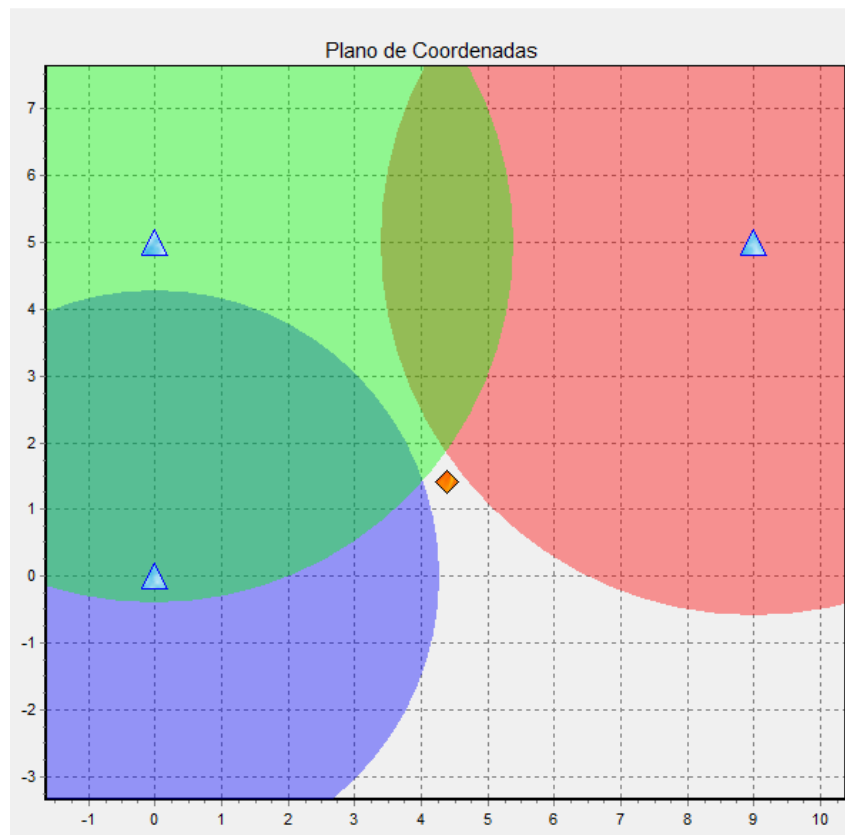
**Figura 39.** Plano de Coordenadas – Método 4 média.

No método dos 3 melhores nós, é excluído o nó com pior valor recebido de RSSI e a trilateração é realizada com os nós restantes. Ao fim, como pode ser observado da Figura 40, também é plotado no gráfico, os três nós e suas circunferências, mas não é plotado o nó excluído do cálculo de trilateração.



**Figura 40.** Plano de Coordenadas – Método 3 em 4.

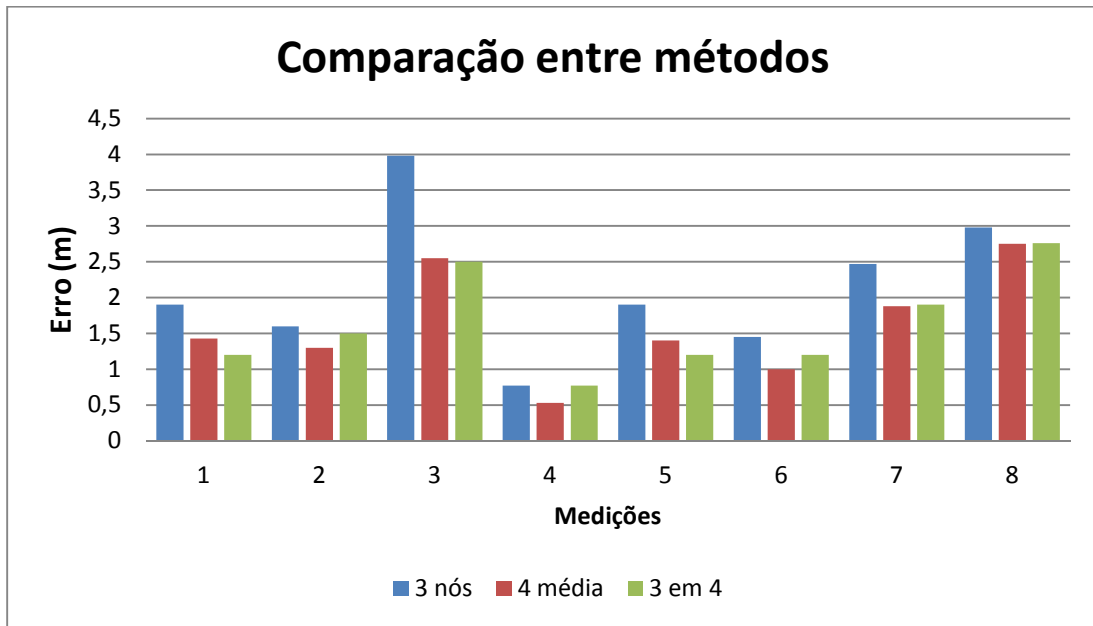
Durante os testes foram realizadas várias medidas e comparados os erros obtidos entre os três métodos possíveis. Em muitos pontos medidos, onde houve grandes discrepâncias no erro da medida para cada NF e as circunferências não se intersectavam. A Figura 41 ilustra um ponto onde ocorreu essa situação. O NM estava posicionado do ponto (5;0) e mesmo sem a intersecção dos círculos, através da trilateração, sua posição foi calculada com um erro de 1,55 metros na posição (4,38;1,42).



**Figura 41.** Plano de Coordenadas – NM na posição real (5;0).

A Figura 42 representa um gráfico com o erro em relação à posição calculada, utilizando cada um dos métodos. A Tabela 6 indica os valores de erro máximos e mínimos obtidos, bem como a média de erro em cada método.





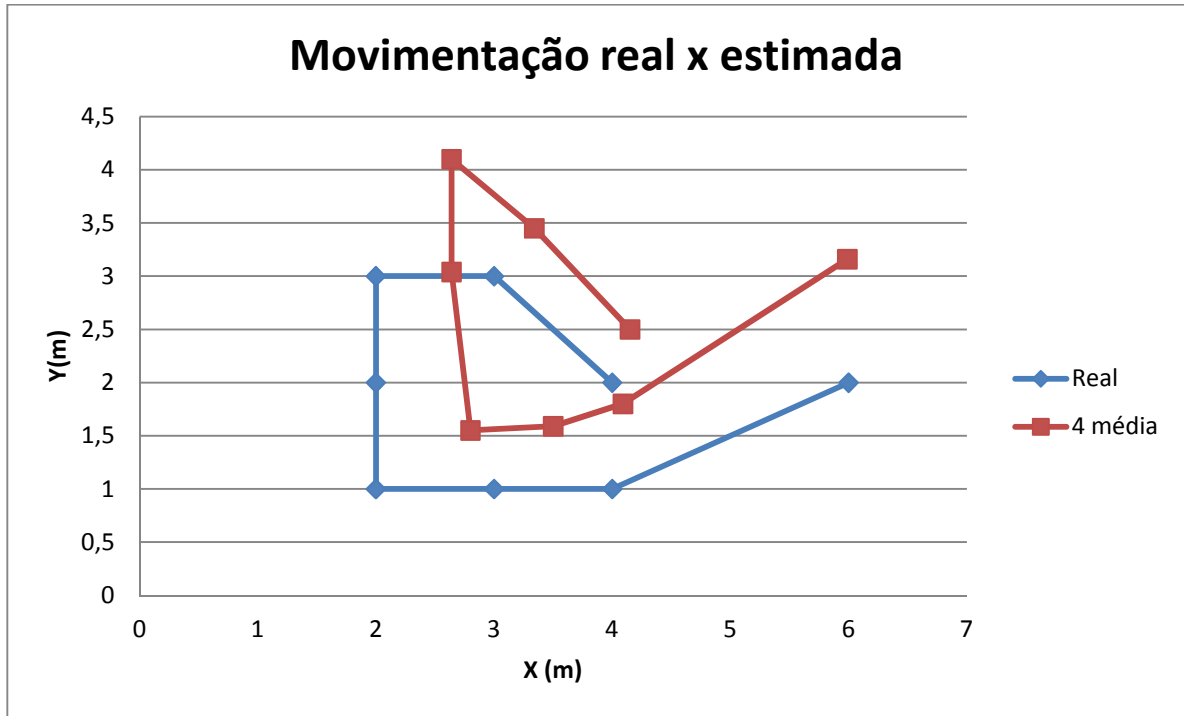
**Figura 42.** Gráfico comparativo entre métodos.

**Tabela 6.** Valores de erro para os diferentes métodos.

Método	Erro Mínimo (m)	Erro Máximo (m)	Erro médio (m)
3 nós	0,77	3,98	2,13
4 média	0,53	2,72	1,60
3 em 4	0,77	2,76	1,62

Pelos testes realizados, nota-se que ao utilizar 4 nós de referência com a média da trilateração entre eles, o erro na estimativa da distância diminui. No método que exclui o nó mais distante do cálculo da trilateração os erros ficaram bem próximos ao método da que faz uso da média, sendo assim pode-se afirmar que os dois métodos apresentaram o mesmo desempenho nos testes.

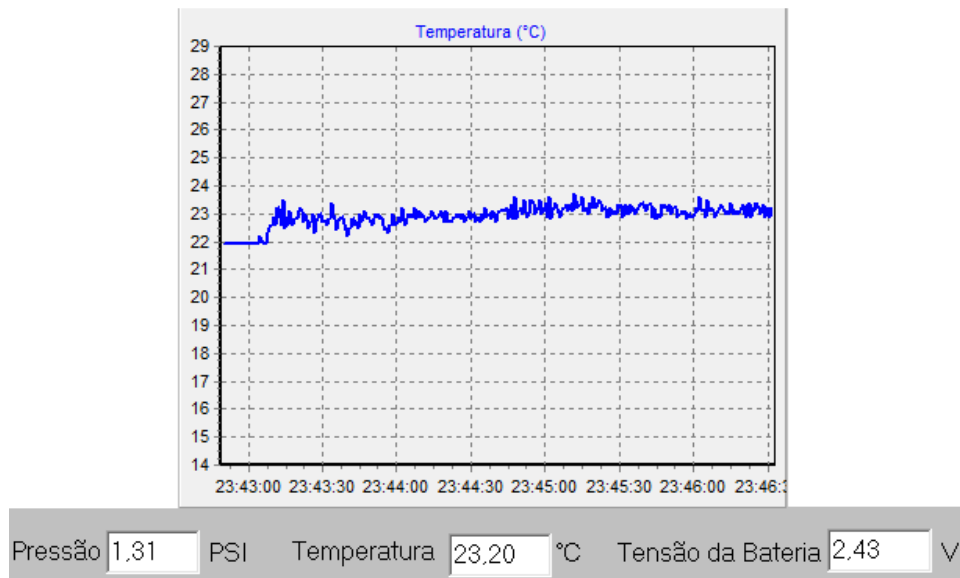
No gráfico da Figura 43 foi feita uma simulação do NM se movimentando na área de monitoramento. Percebe-se que embora existam erros entre as posições reais e aquelas estimadas, o trajeto executado é semelhante ao calculado pelo *software*.



**Figura 43.** Gráfico – Movimentação real x estimada.

### 6.3.2 Sensoriamento

Além de poder determinar a localização do NM, o sistema também recolhe informações sobre sensores instalados nesse dispositivo. No projeto desenvolvido o NM é capaz de enviar dados referentes à temperatura, pressão e tensão de sua bateria. Em aplicações reais, diversos tipos de sensores podem ser empregados em inúmeras áreas. A Figura 44 ilustra alguns dados monitorados na tela do *software*.



**Figura 44.** Monitoramento da temperatura, pressão e tensão de bateria do NM.

Um dos objetivos desse estudo que dá continuidade ao trabalho do Paulo Motter é implementar uma solução de baixo custo para o monitoramento e rastreamento de animais em fazendas [13] e incluir a coleta de dados. Com o sistema proposto, além de monitorar o ambiente numa fazenda, por exemplo, é possível recolher dados sobre o animal, monitorar sua saúde e seu comportamento.

Uma RSSF se encaixa perfeitamente nessa aplicação, pois tem um custo reduzido e um baixo consumo de energia, garantindo maiores intervalos entre a manutenção dos equipamentos. A precisão do sistema para esse tipo de aplicação é suficiente. O NM ficaria preso ao animal por um brinco ou colar e transmitiria os dados para antenas espalhadas na fazenda.

Estão previstos para esse sistema sensores de temperatura, luminosidade e aceleração. Também servirá para inibir o furto de animais e monitorar dados como temperatura, índice de radiação ao qual o animal fica exposto, umidade e outras variáveis do ambiente.

## 7 CONCLUSÕES

Devido à grande evolução das redes de sensores sem fio nos últimos anos, surgiram muitas aplicações onde redes são formadas por vários dispositivos, de dimensões reduzidas e fácil instalação. Sistemas de localização baseados em RSSF diferem dos atuais, pois funcionam em ambientes internos, possuem um baixo consumo e baixo custo, além de não ter a necessidade de linha de visada entre as antenas.

O presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um sistema capaz de recolher dados e determinar a localização de um dispositivo participante de uma RSSF, cujas coordenadas não são conhecidas ou variam no tempo.

Para implementação do trabalho foi utilizado um kit de desenvolvimento com microcontroladores da família MC1322x da Freescale, que operam com rádios padrão IEEE 802.15.4 na frequência de 2,4 GHz. Após serem analisados alguns métodos para a determinação da localização, pelo baixo custo de aplicação e compatibilidade com o *hardware* disponível, foi escolhido o método de medição da distância através do indicador de potência do sinal (RSSI). Nas etapas seguintes foram estudadas as influências que a propagação das ondas de rádio poderia sofrer, bem como as equações para determinar as distâncias entre os nós da rede e obter as coordenadas do objeto alvo.

Após esses estudos, foi estipulada uma topologia de rede utilizando quatro pontos fixos de referência, com coordenadas conhecidas, e um ponto móvel com coordenadas a serem calculadas. Para tanto um dos Nós Fixos (NF) na RSSF foi implementado com função de coordenador da rede, sendo ele responsável por solicitar dados do Nó Móvel (NM) e os valores de RSSI dos outros NFs. Esse nó coordenador, também chamado de Gateway, tinha a função de agrupar os dados recebidos em pacotes e os enviá-los a um computador pessoal

(PC). Assim que os dados eram recebidos no PC, um *software* aplicava o algoritmo de trilateração e exibia os dados referentes à localização do NM na tela.

O sistema de localização também foi implementado com função de sensoriamento. Além dos dados das coordenadas XY do NM estavam disponíveis informações sobre a tensão da bateria desse dispositivo, dados do sensor de temperatura e do sensor de pressão. Em uma tela amigável na janela do *software* são exibidos gráficos com o valor de RSSI medido e a temperatura ao longo do tempo, sendo uma ferramenta útil na análise dessas variáveis.

Todos os *firmwares* dos sensores e o programa no PC foram desenvolvidos ao longo do trabalho. A aplicação final funcionou corretamente e com precisão satisfatória, localizando o objeto alvo e apresentando dados dos seus sensores.

Para uma melhor aproximação dos resultados alguns pontos são importantes para serem observados. A antena omni-direcional do NM provou melhores resultados quando comparada com a antena F-invertida por ser mais homogênea em sua irradiação horizontal. Entretanto, alguma imperfeição na antena pode comprometer o ganho de potência visto pelos outros nós da rede. Em alguns testes girando o NM em seu próprio eixo havia variações significativas nos valores de RSSI medidos, agravando assim o erro da medida.

Como era esperado, a utilização de 4 NFs de referência trouxe uma melhoria nos resultados obtidos quando comparado ao método de 3 NFs. A aplicação do método da média entre os 4 NFs dilui o erro provocado pelo nó mais afastado. Embora não tenha sido possível realizar testes em um ambiente externo livre de obstáculos, pelos estudos teóricos tem-se a expectativa de melhores resultados.

## 7.1 TRABALHOS FUTUROS

O presente projeto foi realizado com o intuito de ser estudada a viabilidade para sua implementação prática, além de serem verificadas vantagens e resultados que justifiquem a utilização desse método.

Como trabalho futuro esse projeto pode ser aprimorado e os *firmwares* e o *software* desenvolvido podem ser aplicados em situações práticas. O mesmo sistema pode ser testado com outros modelos de rádio, módulos quem contenham sensores específicos para determinada aplicação ou que possuam um alcance maior na transmissão.

Podem ser estudados também os efeitos que um segundo Nó Móvel teria no sistema, verificando se aumentariam as interferências na comunicação e na propagação das ondas. Além disso, com mais de um NM, as coordenadas recém calculadas de para o primeiro poderiam ser referência no cálculo da localização do próximo nó.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. **LOUREIRO, A., et al.** *Redes de Sensores Sem Fio*. 2003. XXI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores.
- [2]. **MOTTER, P.** *Sistema de Localização de Objetos Alvo Utilizando Rede de Sensores Sem Fio*. 2010.
- [3]. **AKLYILDIZ, I. F., et al.** A Survey on Sensor Networks. *IEEE Communications Magazine*. August 2002.
- [4]. **FREESCALE.** *Simple Media Access Controller - User's Guide*. 2008.
- [5]. **RAPPAPORT, T. S.** *Wireless Communications: Principles & Practice*. [S.l.] : Prentice Hall, 2002. ISBN: 978-0130422323.
- [6]. **MANNINGS, R.** Ubiquitous positioning. Norwood: Artech House, 2008.
- [7]. **PATWARI, N., et al.** *Locating the Nodes*. s.l. : IEEE Signal Processing Magazine, 2005.
- [8]. **LANZISERA, S., LIN, D. e PISTE, K.** *RF Time of Flight Ranging for Wireless Sensor Network Localization*. 2006.
- [9]. **MAO, G; FIDAN, B; ANDERSON, B D.O.** *Wireless Sensor Network Localization Techniques*. 2007. School of Electrical and Information Engineering, University of Sydney, Sydney, Austrália.
- [10]. **FREESCALE.** *MC1322x Advanced ZigBee - Compliant SoC Platform for the 2.4GHz IEEE 802.15.4 Standard. Reference Manual*. 2009.
- [11]. **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.
- [12]. **FREESCALE.** *Application Note on Compact Integrated Antennas*. 2006.
- [13]. **TEXAS INSTRUMENTS.** *Application Note AN042, CC Locations Engine*. 2006.

- [14]. **MÜLLER, I.** *Sistema de Baixo Custo para Rastreamento e Monitoramento de Animais Através de Rede de Sensores Sem Fio.* 2010.