

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE
CAMPINAS**

**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS, AMBIENTAIS E DE
TECNOLOGIAS**

LUIZ RODOLFO BARRETO DA SILVA

**MÉTODO PARA AFERIÇÃO DE DISTÂNCIA ENTRE NÓS
SENSORES BASEADO EM RSSI**

CAMPINAS

2014

LUIZ RODOLFO BARRETO DA SILVA

**MÉTODO PARA AFERIÇÃO DE DISTÂNCIA ENTRE NÓS
SENSORES BASEADO EM RSSI**

Dissertação apresentada como exigência para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, ao Programa de Pós-Graduação na área de concentração Gestão de Redes e Serviços, Pontifícia Universidade Católica de Campinas.

Orientadora: Profa. Dra. Lia Toledo Moreira Mota

CAMPINAS

2014

LUIZ RODOLFO BARRETO DA SILVA

MÉTODO PARA AFERIÇÃO DE DISTÂNCIA ENTRE NÓS

SENSORES BASEADO EM RSSI

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Profissional em Gestão de Redes de Telecomunicações do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias da Pontifícia Universidade Católica de Campinas como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Gestão de Redes de Telecomunicações.

Área de Concentração: Qualidade de Serviço em Teleinformática.

Orientadora: Profa. Dra. Lia Toledo Moreira Mota

Dissertação defendida e aprovada em 07 de fevereiro de 2014 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:

Profa. Dra. Lia Toledo Moreira Mota
Orientadora da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora
Pontifícia Universidade Católica de Campinas

Prof. Dr. Alexandre de Assis Mota
Pontifícia Universidade Católica de Campinas

Prof. Dr. Vicente Idalberto Becerra Sablón
Universidade Estadual de Campinas

Ficha Catalográfica
Elaborada pelo Sistema de Bibliotecas e
Informação - SBI - PUC-Campinas

t621.3851
S586m Silva, Luiz Rodolfo Barreto da.
Método para aferição de distância entre nós sensores baseado em RSSI
/ Luiz Rodolfo Barreto da Silva. – Campinas: PUC-Campinas, 2014.
121 p.

Orientadora: Lia Toledo Moreira Mota.
Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica de Campinas,
Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica.
Inclui bibliografia.

1. Redes de sensores sem fio. 2. Sistemas de comunicação sem fio. 3.
Sistemas de telecomunicação. 4. Sensoriamento remoto. I. Mota, Lia Toledo
Moreira. II. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Centro de Ciên-
cias Exatas, Ambientais e de Tecnologias. Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica. III. Título.

22.ed.CDD – t621.3851

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por toda vitória que Ele tem me dado até aqui.

A minha orientadora Profa. Dra. Lia Toledo Moreira Mota e ao Prof. Dr. Alexandre de Assis Mota, grandes amigos e incentivadores deste trabalho. A colaboração de ambos para o sucesso deste trabalho é de vital importância.

Aos amigos Msc. Edson Taíra Procópio e Prof. Dr. Omar Carvalho Branquinho, por todo auxílio ao longo do curso e em minhas pesquisas com RSSFs.

Agradeço ao meu irmão Paulo, primeiro por ser meu primeiro professor de informática, sem ele eu não estaria aqui hoje. E segundo pelo incentivo e força nestes dois anos de viagens semanais.

Aos meus pais César e Vera, por me escutarem milhares de vezes reclamar das obrigações e por me auxiliarem em tudo aquilo que lhes foi possível.

A Pontifícia Universidade Católica de Campinas pela concessão da bolsa de estudos para o Mestrado Profissional em Engenharia Elétrica.

E a todas as pessoas, a quem eu devo meu eterno agradecimento, que diretamente ou indiretamente contribuíram para minha formação integral como pessoa e profissional.

*"Se não sabes, aprende; se já sabes,
ensina."*

Confúcio

RESUMO

SILVA, Luiz Rodolfo Barreto da. Método para aferição de distância entre nós sensores baseado em RSSI. 2013. 121 folhas. Dissertação (Mestrado em Gestão de Redes de Telecomunicações) – Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2013.

Este trabalho aborda a elaboração de um método para a estimativa de distância de nós sensores em Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) em ambientes internos fechados, considerando necessidade de adaptação do método devido à presença de fatores aleatórios que podem influenciar a estimativa dessas distâncias. O método de estimativa apresentado é baseado em um indicador de intensidade de sinal, o RSSI (*Received Signal Strength Indicator*).

Termos de Indexação: redes de sensores sem fio, aferição de distância, RSSI.

ABSTRACT

SILVA, Luiz Rodolfo Barreto da. Method for distance measuring between sensor nodes based on RSSI. 2013. 121 pages. Master Degree Thesis (Master Program in Telecommunications Networks Management) – Department of Electrical Engineering, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2013.

This work discusses the development of a method for estimating the distance of sensor nodes in Wireless Sensor Networks (WSN) in indoor environments, considering the need for adaptation of the method due to the presence of random factors that may influence the estimation of such distances. The estimation method presented is based on a signal strength indicator, RSSI (Received Signal Strength Indicator).

Index terms: Wireless sensors networks, distance measuring, RSSI.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sinal emitido é refletido.....	23
Figura 2 - Sinal emitido é difratado	24
Figura 3 - Sinal de rádio sofre dispersão	25
Figura 4 - Refração de sinais de rádio	26
Figura 5 - Fluxo para Coleta de Dados.	47
Figura 6 - Exemplo de módulo BE900 (RADIUÍNO, 2013).....	51
Figura 7 - Módulo USARTBee (SEEDSTUDIO, 2013).....	52
Figura 8 - Layout do LabEI onde os experimentos foram realizados	52
Figura 9 - Sensores instalados na bancada para medição.	53
Figura 10 - Fluxograma de estimação de distâncias baseado em RSSI.....	58
Figura 11 - Calibração do sensor 0.	62
Figura 12 - Calibração do sensor 1.	62
Figura 13 - Calibração do sensor 2.	63
Figura 14 - Tela de cadastro de ligações entre nós sensores no <i>software</i>	66
Figura 15 - Tela de cadastro de coleta de dados no <i>software</i>	67
Figura 16 – Gráfico de dispersão baseado nas coletas brutas da 1ª medição.....	70
Figura 17 - Gráfico de dispersão baseado nas coletas brutas da 2ª medição.	71
Figura 18 - Gráfico de dispersão baseado nas coletas brutas da 3ª medição.	72
Figura 19 – Modelo linear para a 1ª medição.....	73
Figura 20 – Modelo linear para a 2ª medição.....	74
Figura 21 – Modelo linear para a 3ª medição.....	75

Figura 22 - Histograma de resultados do método aplicado na 1ª medição	77
Figura 23 - Histograma de resultados do método aplicado na 2ª medição	78
Figura 24 - Histograma de resultados do método aplicado na 3ª medição	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Médias das RSSI (1ª Medição) para as distâncias conhecidas.	69
Tabela 2 - Médias das RSSI (2ª Medição) para as distâncias conhecidas.	69
Tabela 3 - Médias das RSSI (3ª Medição) para as distâncias conhecidas.	69
Tabela 4 – Monitoramento do ambiente entre o 2º e 3º bloco de medições.	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AOA	<i>Angle Of Arrival</i>
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
FFD	<i>Full Function Device</i>
GHz	<i>Gigahertz</i>
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i>
Kbps	<i>Kilobytes por Segundo</i>
kHz	<i>Kilohertz</i>
LQI	<i>Link Quality Indicator</i>
MAC	Camada de Enlace de Dados
MHz	<i>Megahertz</i>
OID	<i>Object Identifier</i>
OSI	<i>Open System Interconnect</i>
PHY	Camada Física
QOS	Quality of Service
RFD	<i>Reduced Function Device</i>
RSSF	Rede de Sensores Sem Fio
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i>
TDOA	<i>Time Difference Of Arrival</i>
TOA	<i>Time Of Arrival</i>
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Contextualização do Problema.....	16
1.2. Objetivo	17
1.3. Resultados Obtidos	18
1.4. Organização da Dissertação.....	19
2. Propagação de Sinais em Ambientes INTERNOS FECHADOS	20
2.1. Sistemas Baseados em Rádio Frequência	20
2.2. Propagação de Sinais de Rádio	21
2.2.1. Reflexão	22
2.2.2. Difração	23
2.2.3. Dispersão	24
2.2.4. Refração	26
2.3. Atenuação	27
2.3.1. Perdas de Percurso.....	27
2.3.2. Variabilidade do Meio.....	28
2.4. Limite de Sensibilidade	28
2.5. Desvanecimento	29
2.5.1. Margem de Desvanecimento	30
2.6. Modelos de Propagação.....	30
2.6.1. Propagação em Ambientes Internos Fechados.....	31
3. Redes de Sensores sem Fio.....	32
3.1. Estrutura de Redes de Sensores sem Fio.....	32

3.1.1.	<i>Software</i> Embarcado.....	32
3.1.2.	<i>Hardware</i>	33
3.2.	Padrão IEEE 802.15.4	33
3.2.1.	Camada Física	35
3.2.2.	Camada de Enlace de Dados	36
3.3.	Plataforma Radiúino.....	38
3.3.1.	Received Signal Strength Indicator (RSSI)	38
3.3.2.	Modelo de Propagação Baseado em Espaço Livre	41
3.3.3.	Modelo de Propagação Baseado em Terra Plana	42
3.3.4.	Modelo de Propagação Baseado em RSSI.....	42
4.	Estimação da Distância entre nós sensores em redes de sensores sem fio... 44	
4.1.	Cálculo da Distância Entre Nós Sensores Base RSSI	44
5.	Prova do Conceito	47
5.1.	Método para Cálculo da Distância	47
5.1.1.	Coleta de Dados	48
5.1.1.1.	Equipamentos e <i>Softwares</i> Utilizados na Coleta de Dados	49
5.1.2.	Filtragem de Dados	54
5.1.3.	Estimação do Modelo Linear	54
5.1.4.	Método de Monitoramento do Ambiente	56
6.	Resultados Obtidos	59
6.1.	Calibração dos Sensores	59
6.2.	Coleta de Dados	63
6.3.	Estimação do Modelo Linear	68
6.4.	Monitoramento do Ambiente	79

7. Conclusão	82
7.1. Trabalhos Futuros.....	82
7.2. Publicações.....	83
8. Referências.....	84

1. INTRODUÇÃO

Desde a criação das unidades de medida, ocorrida por volta de 2000 AC, a humanidade busca maneiras de localizar objetos que não se encontram na linha de visão direta do observador, através da realização de medições de diferentes grandezas (SILVA, 2010). Exemplos disto são as chamadas paralaxes, formas de estimar distâncias entre dois pontos utilizando o ângulo de chegada de um determinado sinal. Inicialmente, foram utilizadas para determinar a distância da terra para as estrelas.

Neste contexto, é apresentada neste trabalho, uma metodologia para determinação da distância entre nós sensores, considerando a presença de obstáculos. A determinação dessa distância é realizada através da intensidade de sinal transmitido e recebido nas unidades de rádio dos nós sensores.

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

Diariamente, os sensores realizam o monitoramento de diversas grandezas em diferentes tipos de situações. Alguns exemplos são os sensores de incêndio, sensores meteorológicos, termômetros, balanças digitais, etc..

Muitas vezes, os sensores são utilizados para monitoramento de grandezas em ambientes inóspitos, como hospitais, selvas, plantações, etc., onde a presença de pessoas se torna difícil ou até mesmo desaconselhável. Nesses casos, a probabilidade de que não se tenha conhecimento da localização correta e exata dos nós sensores é alta e, assim, é desejável o desenvolvimento de um

método que seja capaz de determinar a localização dos mesmos através da realização de algum tipo de medição.

De forma mais específica, este trabalho foi motivado pelo problema da localização de recém-nascidos em hospitais, mais precisamente, as alas onde estes recém-nascidos se encontram, visto que cresce o número de os casos de sequestro de recém-nascidos em hospitais, como os casos ocorridos na semana de 17/02/2007, em Lisboa, Portugal (Diário de Notícias de Lisboa, 2007). A determinação da localização do recém-nascido torna-se possível através da medição da distância entre nós sensores.

Assim, o foco deste trabalho está na determinação da distância entre nós sensores, utilizando medições dos mesmos e, nos capítulos que se seguem, serão apresentados os desafios encontrados para a realização dessas medições e a metodologia estabelecida para a determinação da distância entre os nós sensores.

1.2. OBJETIVO

Este trabalho objetiva desenvolver uma metodologia e um algoritmo capazes de determinar as distâncias entre os nós sensores presentes em uma rede de sensores sem fio, através de medições de RSSI (*Received Signal Strength Indicator*), o indicador de potência de sinal recebido por um determinado sensor de uma rede de sensores sem fio.

Para tanto, alguns objetivos foram transpassados durante a elaboração deste trabalho. Esses objetivos são apresentados nos tópicos subsequentes.

- Metodologia para determinar a distância entre nós sensores - objetiva-se determinar um método para obtenção da distância entre um nó sensor cuja localização é desconhecida, e três pontos com localização conhecida. Essa distância pode ser determinada com base em medições de RSSI da comunicação do primeiro nó sensor com os demais.
- Implementação do algoritmo em linguagem computacional - objetiva-se, aqui, transcrever a metodologia proposta para uma linguagem computacional, facilitando a implantação de tal algoritmo em um ambiente corporativo.

1.3. RESULTADOS OBTIDOS

Como resultados deste trabalho foram obtidos:

- Implementação de uma RSSF (Rede de Sensores Sem Fio) para a realização de testes e experimentos para coleta das medições de RSSI;
- Formação de um banco de dados com as medições de RSSI realizadas;
- Desenvolvimento de uma metodologia para estimação da distância entre nós sensores de uma RSSF, utilizando as medições de RSSI coletadas;
- Implementação computacional da metodologia proposta.

1.4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

No Capítulo 2, são apresentados os sistemas baseados em propagação de sinais através de radiofrequência, enfatizando os fenômenos conhecidos que podem interferir nas ondas propagadas.

No capítulo 3, são apresentadas as RSSFs, os componentes dos nós sensores utilizados nas RSSFs e o modelo de propagação de sinais nas RSSFs.

No Capítulo 4, são apresentadas as técnicas de medição de distância em RSSFs, apresentando os componentes obrigatórios para a utilização destas técnicas e suas vantagens e desvantagens.

No Capítulo 5, são apresentados os modelos para estimar a distância entre dois pontos, utilizando a técnica de RSSI, definindo os cálculos para estimar as variáveis de ambiente necessárias para efetuar o cálculo matemático das estimativas de distância.

No Capítulo 6, é apresentada a metodologia aplicada para as coletas de dados e preparações para aplicar os modelos desenvolvidos ao longo do Capítulo 5.

No Capítulo 7, são apresentados os resultados obtidos a partir da metodologia proposta.

No Capítulo 8, são apresentadas as principais conclusões deste trabalho.

2. PROPAGAÇÃO DE SINAIS EM AMBIENTES INTERNOS FECHADOS

A propagação de sinais nos ambientes pode sofrer diversos tipos de interferências, que resultam na alteração do sinal originalmente propagado pelo emissor. Estas alterações podem fazer com que os pacotes trafegados pela rede sejam danificados, diminuindo o indicador de QoS (*Quality of Service*) da rede e tornando-a instável (PERES, 2010). No decorrer deste capítulo, serão descritos alguns destes fenômenos presentes na propagação de sinais em ambientes internos fechados.

2.1. SISTEMAS BASEADOS EM RÁDIO FREQUÊNCIA

Basicamente, um sistema baseado em rádio frequência utiliza o campo eletromagnético para transmitir sequências de dados através de alterações na frequência e amplitude do sinal trafegado, desta forma, utiliza a força eletromagnética de repulsão e atração de sinais para trafegar os sinais de rádio entre o transmissor e o receptor (MUSSOI, 2005). Diferente dos sistemas de transmissão de dados por luz (como laser e leitores de código de barras), onde há a necessidade de visada direta (detalhada na sessão 2.6) entre emissor e receptor do sinal, os sistemas baseados em rádio frequência podem transpor obstáculos presentes no ambiente para que o sinal enviado atinja seu receptor. (PINHEIRO, 2004).

Estas ondas são recebidas pelo receptor e transformadas em informações binárias, que quando convertidas, representam dados passíveis de processamento pelos interessados na informação. Como estas ondas podem

transpor obstáculos (transmissor e receptor não precisam estar em visada direta), os sistemas baseados em rádio frequência são bem difundidos em transmissões de diferentes alcances (VIERA, 2007).

Os obstáculos presentes no ambiente influenciam diretamente a transmissão dos sinais, atenuando-os e gerando diversos efeitos, conforme sessões posteriores. (PROCÓPIO, 2012).

2.2. PROPAGAÇÃO DE SINAIS DE RÁDIO

Sinais de rádio propagam-se no ambiente de maneira ampla, fazendo com que o sinal possa ser recebido em diversas partes do ambiente mapeado, de modo que o sinal transmitido pode atravessar objetos e obstáculos físicos, como paredes, portas e etc., variando suas características de acordo com os aspectos inerentes ao ambiente.

Exemplos destes aspectos do ambiente que podem interferir no sinal propagado são as variações de temperatura, o fluxo de partículas presentes no ar, pessoas, paredes, objetos e obstáculos em geral. Estas interferências do ambiente podem fazer com que a intensidade do sinal propagado a partir do emissor seja diferente da intensidade do sinal recebido pelo receptor, caracterizando a intensidade do sinal propagado como uma grandeza aleatória. Dependendo da situação, o sinal recebido pelo receptor pode possuir uma intensidade insuficiente, de forma que a comunicação entre emissor e receptor seja encerrada.

A intensidade do sinal é um parâmetro importante para a elaboração de modelos de propagação que levem em consideração diferentes fenômenos inerentes à comunicação via rádio. (RAPPAPORT, 1999). Os principais fenômenos envolvidos nesse tipo de comunicação são a reflexão, a refração, a difração e a dispersão, tratados nas sessões subsequentes deste capítulo.

2.2.1. REFLEXÃO

A polarização do sinal elétrico propagado nas ondas de rádio faz com que o sinal de rádio seja refletido por determinados tipos de superfície, o que gera uma interferência do meio de propagação, podendo causar o bloqueio do sinal transmitido, fazendo com que o sinal não chegue até o destino esperado.

Na reflexão, o ângulo de incidência (chegada) do sinal na superfície é igual ao ângulo de reflexão (saída da superfície), como se pode observar na Figura 1 (PROCÓPIO, 2012). Desta forma, se um determinado sinal chega à superfície com um ângulo de 30° , ele será refletido inversamente a 30° , de modo que ele trafejará no sentido oposto ao transmitido originalmente, mas com ângulo igual ao ângulo de incidência na superfície.

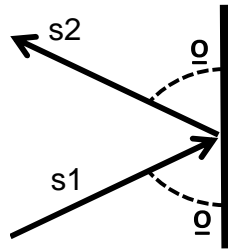


Figura 1 - Sinal emitido é refletido.

Onde:

s1 representa o sinal transmitido;

s2 representa o sinal refletido.

Nos casos onde o sinal foi recebido pela superfície reflexiva ao ângulo de 180° , o sinal retornará exatamente ao emissor do sinal, o que faz com que o emissor e o receptor do sinal sejam os mesmos equipamentos, eliminando os outros sinais que foram emitidos no mesmo ângulo do primeiro.

2.2.2. DIFRAÇÃO

Quando um sinal de rádio colide com uma superfície e divide-se em dois ou mais sinais de rádio, tem-se o fenômeno de difração. Esta colisão faz com que o sinal do rádio seja refletido em diversas direções, com sinais de menor intensidade, que atingem regiões fora do alcance original do rádio, conforme observado na Figura 2 (RAPPAPORT, 1999).

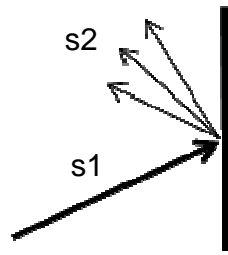


Figura 2 - Sinal emitido é difratado

Onde:

s1 representa o sinal transmitido;

s2 representa os sinais refletidos.

No caso da difração, o sinal pode ser difratado em qualquer direção, dependendo do ângulo e material do qual é composta a superfície difratora. (RAPPAPORT, 1999).

2.2.3. DISPERSÃO

Quando um sinal de rádio colide com uma superfície refletiva com diferentes ângulos de reflexão, como em uma superfície áspera ou altamente enrugada, o sinal é disperso em muitos outros sinais de rádio de menor intensidade.

Objetos presentes no ambiente como árvores e lâmpadas, podem fazer com que os sinais sejam dispersos e colidam com outros sinais emitidos, gerando

ruído de comunicação entre os elementos emissor e receptor dos sinais de rádio (RAPPAPORT, 1999).

A Figura 3 ilustra o fenômeno da dispersão. O sinal chega a uma superfície áspera e foi disperso em diversos sinais, o que ocasiona colisão entre os sinais de rede.

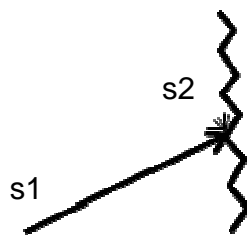


Figura 3 - Sinal de rádio sofre dispersão

Onde:

s1 representa o sinal transmitido;

s2 representa o sinal disperso.

Uma superfície áspera possui centenas de pequenas ondulações, que fazem com que o sinal seja refletido por diversos pontos, o que gera o efeito de dispersão do sinal. O sinal de rádio é dividido em tantos outros sinais, que a energia emitida originalmente pelo sinal é dividida de maneira que o sinal enfraquece a ponto de não ser mais detectado pelo possível receptor do sinal.

2.2.4. REFRAÇÃO

Colisões com obstáculos acontecem a todo o momento em uma comunicação em ambientes internos fechados entre dois nós sensores. Como visto nas sessões 2.2.1 e 2.2.3, ao se chocar com um obstáculo, o sinal pode ser refletido ou disperso, gerando colisões entre as ondas de rádio. Mas, ao passar por um obstáculo com características que não modifiquem a rota do sinal transmitido, o sinal de rádio pode simplesmente mudar o ângulo de transmissão do mesmo.

A Figura 4 ilustra um caso onde o sinal é refratado (FONTANA, 2011).

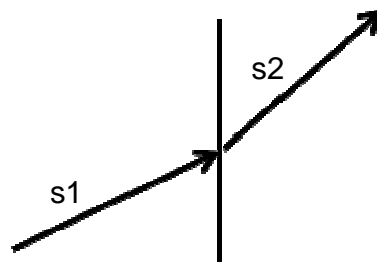


Figura 4 - Refração de sinais de rádio

Onde:

s1 representa o sinal transmitido;

s2 representa o sinal refratado.

Pode também ocorrer a reflexão e refração do sinal, onde parte do sinal é refletido e outra parte é refratada, gerando duas ondas distintas, uma com sentido

contrário ao ângulo de incidência da onda original e outra com alteração do ângulo de incidência, transpondo o obstáculo (PERES, 2010).

2.3. ATENUAÇÃO

Como visto nas sessões anteriores, os sinais de rádio podem sofrer diversos tipos de alteração no percurso do sinal, o que faz com que o sinal tenha uma trajetória diferente daquela originalmente esperada. Nessas mudanças de percurso, o sinal chegando com uma intensidade menor do que o esperado ao destinatário. Ao fenômeno de diminuição da intensidade do sinal no trajeto entre emissor e receptor, dá-se o nome de atenuação (PERES, 2010). Nas sessões subsequentes, serão apresentados alguns fatores que influenciam nesta perda de energia na comunicação entre transmissor e receptor.

2.3.1. PERDAS DE PERCURSO

Os efeitos citados na sessão 2.2 deste trabalho podem ser observados em ambientes internos fechados nas transmissões de sinais. Os obstáculos e objetos presentes no ambiente podem gerar os mais diversos efeitos no sinal, fazendo com que o mesmo se deprecie e até mesmo seja completamente eliminado (PROCÓPIO, 2012).

Esta depreciação é denominada de perda de percurso e precisa ser mensurada para que o cálculo da energia gasta para que o receptor receba o sinal transmitido seja realizado de maneira satisfatória.

2.3.2. VARIABILIDADE DO MEIO

Um ambiente interno fechado pode estar em constante alteração, com obstáculos e objetos mudando de posição a todo o momento (PERES, 2010). Devido a esta característica, o ambiente precisa ser mapeado com certa frequência, para que estes obstáculos e objetos sejam devidamente relacionados nos cálculos referentes ao ambiente em questão (PROCÓPIO, 2012). Logo, todo cálculo relacionado ao ambiente necessita de uma etapa de calibração e monitoramento do ambiente de maneira contínua, gerando, assim, um modelo matemático complexo que represente as variações de objetos e obstáculos presentes no ambiente.

2.4. LIMITE DE SENSIBILIDADE

Os sistemas de comunicação via rádio possuem um intervalo de frequência de operação. A operação de definição dos limites de recepção dos sinais eletromagnéticos é dado o nome de limite de sensibilidade. Esta calibração é necessária para que uma RSSF não interfira em outra RSSF, quando uma está próxima da outra.

A sensibilidade do transmissor e do receptor das ondas de rádio interfere na taxa de ruído e na transmissão do sinal, além dos objetos e obstáculos presentes no ambiente. A sensibilidade de operação do rádio é definida nas configurações de frequência de transmissão e recepção dos sinais. Desta forma, é necessária uma etapa de calibração dos sensores, anterior à utilização dos mesmos, para que os rádios receptores e transmissores presentes na rede

estejam conectados na mesma faixa de frequência e canal da portadora, de modo que a conexão entre eles seja possível (PROCÓPIO, 2012).

2.5. DESVANECIMENTO

O desvanecimento (ou *fading*) é usado para descrever uma alteração de amplitude sofrida pelo sinal transmitido, devido aos obstáculos presentes no ambiente. Esta alteração da amplitude é ocasionada quando o receptor do sinal recebe o mesmo sinal em versões distintas, modificadas durante o trajeto dos sinais entre os obstáculos e objetos presentes no ambiente (RAPPAPORT, 1999).

O desvanecimento gera alguns efeitos na transmissão dos dados, como (RAPPAPORT, 1999):

- Alterações na intensidade do sinal em um curto período de tempo/distância, o que faz com que o receptor efetue cálculos baseados em intensidade de sinal (ex.: RSSI) baseado em informações que não são válidas ao ambiente;
- Alteração da modulação do sinal e da portadora, criando sinais com múltiplos destinos e colisão de sinais durante o trajeto entre receptor e transmissor;
- Dispersão do sinal transmitido, provocando múltiplos sinais de baixa intensidade, com colisão e perda de pacotes entre os sinais.

Esses efeitos contribuem para a flutuação do sinal, gerando modelos incorretos de cálculo baseados em intensidade de recepção do sinal transmitido.

2.5.1. MARGEM DE DESVANECIMENTO

Com base na flutuação do sinal, é possível estabelecer o índice de desvanecimento sofrido pela transmissão. Esta informação é importante para o cálculo da potência que foi consumida entre a transmissão e a recepção do sinal. Com tal informação, é possível efetuar os cálculos dependentes da potência de sinal recebida com precisão (SANTANA, 2012).

Para estipular a margem de desvanecimento, é necessário o levantamento dos obstáculos presentes e objetos que causam ruídos na transmissão e geram os efeitos estudados na sessão 2.2.

Em ambientes internos fechados, este levantamento se torna complexo, pois a alteração do ambiente tende a ser constante, devido ao fluxo de pessoas, movimentação de componentes e equipamentos pelo ambiente, etc. Desta maneira, o modelo de propagação do sinal para a margem de desvanecimento (ou seja, a margem dentro da qual o sinal poderá variar sua amplitude durante a transmissão dos sinais de rádio) deve ser calculado com base em uma situação estática do ambiente, utilizando um coeficiente que pode ser recalculado periodicamente a partir dos obstáculos presentes no ambiente.

2.6. MODELOS DE PROPAGAÇÃO

No decorrer do trajeto entre transmissor e receptor do sinal, há troca energia com o ambiente à medida que o sinal trafega pelo ambiente. Mesmo em um ambiente onde ocorre a visada direta entre o receptor e o transmissor, parte

da energia é utilizada para que o sinal chegue ao receptor, ou seja, quanto maior a distância, maior a quantidade de energia trocada com o ambiente para que o sinal chegue a seu destino, bem como quanto maior a influencia do ambiente no sinal, menor será a intensidade com a qual o sinal chegará a seu destino (PELLEGRINI, 2010).

2.6.1. PROPAGAÇÃO EM AMBIENTES INTERNOS FECHADOS

O sinal em ambientes internos fechados sofre diversas interferências do ambiente, como demonstradas no tópico 2.2 deste trabalho, por se tratarem de espaços com grande quantidade de objetos e obstáculos que potencialmente estão em movimento. Esta característica é agravada pela presença de divisórias, paredes e objetos de construção civil presentes no ambiente no qual o sinal será propagado (PROCÓPIO, 2012).

Conforme citado anteriormente, a propagação de sinais, neste tipo de ambiente, é um desafio devido à possibilidade de variação constante do ambiente. Com a presença de tanta diversidade, é necessário ajuste nos modelos de cálculo baseados na intensidade do sinal recebido em intervalos de tempo menores que os intervalos de tempo em ambientes externos abertos (PELLEGRINI, 2010). Desta forma, a etapa de monitoramento do ambiente deve ser inserida durante as transmissões, para que os cálculos baseados na potência do sinal sejam precisos nos casos de medições em ambientes internos fechados.

3. REDES DE SENSORES SEM FIO

Um nó sensor sem fio é uma unidade computacional (ainda que de desempenho reduzido), dotada de sensores, que torna possível a medição de aspectos e fenômenos do ambiente no qual a unidade computacional está inserida. Esta unidade computacional é chamada de nó sensor e faz parte de uma rede de nós sensores (LOUREIRO *et al*, 2003).

Através destes nós sensores, é possível criar uma rede autônoma capaz de se organizar de maneira a realizar medições no ambiente, transmitindo-as através dos nós sensores até chegar a uma unidade central de processamento, para ser processada e utilizada para os devidos fins. No decorrer deste capítulo, é abordado o funcionamento de uma RSSF em detalhes.

3.1. ESTRUTURA DE REDES DE SENSORES SEM FIO

Basicamente, uma RSSF é composta por nós sensores. Assim como um computador pessoal, um nó sensor é dividido em duas partes: o *software* embarcado, responsável pelas aplicações do nó sensor, e o *hardware*, responsável pelos componentes físicos do sistema. Nos tópicos seguintes, são detalhadas estas duas partes.

3.1.1. SOFTWARE EMBARCADO

O *software* embarcado, ou *firmware*, é responsável pela operação do sistema interno dos nós sensores. Nele são implantadas as funcionalidades do nó

sensor, interligações lógicas entre os componentes presentes no *hardware* e processamento das interfaces com o meio externo (PROCÓPIO, 2012).

A principal funcionalidade do *software* embarcado são atividades de coleta, processamento e saída de informações, realizadas através dos sensores presentes no *hardware*. Esta funcionalidade é a que realiza as tarefas que o usuário destina ao nó sensor. Desta forma, sem esta funcionalidade, o nó sensor acaba não tendo utilidade para a RSSF.

3.1.2. HARDWARE

O *hardware* dos nós sensores é o conjunto de componentes que formam o nó sensor. Dentre estes componentes, podem-se citar os sensores, plugues, memória, processador, etc. Desta forma, as limitações do nó sensor também são ligadas ao *hardware* do mesmo. Como os componentes de *hardware* são todos físicos, são eles que consomem os recursos do nó sensor, como bateria, processador, memória e etc..

O *hardware* também é responsável pela comunicação de dados do sistema. A RSSF pode utilizar o padrão IEEE 802.15.4, como descrito na sessão 3.2 (PROCÓPIO, 2012).

3.2. PADRÃO IEEE 802.15.4

Diante da necessidade de criação de uma rede de dados sem fio, para tráfego de informações simples, como um comando de controle remoto para um dispositivo ou uma informação de leitura simples de um determinado dispositivo,

surgiu o padrão IEEE 802.15.4. Segundo (PINHEIRO, 2004), este padrão, homologado em maio/2003, veio para facilitar as tarefas simples dos usuários, como a eliminação dos fios e cabos que estes possuem em suas residências, seja interligando seus periféricos ao computador, seja ligando seu aparelho de reprodução de vídeo ao televisor.

Na estrutura deste padrão, (PINHEIRO, 2004) ressalta que colaboraram mais de 45 empresas que se interessaram inicialmente pelo novo padrão, formando o que chamaram de *ZigBee Alliance*. Pelo nome dado a esta associação, este padrão ficou popularmente conhecido como *ZigBee*.

O padrão 802.15.4 opera nas faixas de rádio chamadas ISM (*Industrial, Scientific and Medical*), que são as faixas de transmissão de ondas de rádio homologadas para tráfego de informações industriais, científicas e médicas, que possuem a característica de não requerem licença de funcionamento. As faixas consideradas neste meio são as faixas de 2,4GHz e 915/868MHz. Este padrão oferece banda de transmissão entre 10 e 115Kbps, com um intervalo de atuação entre 10 e 100m, dependendo da potência de transmissão e interferências presentes no ambiente onde o equipamento está instalado (PINHEIRO, 2004).

Dentro da rede formada por dispositivos do padrão 802.15.4, pode-se identificar dois tipos de dispositivos, baseados no tipo de arquitetura da rede: FFD (*Full Function Device*) e RFD (*Reduced Function Device*), descritas abaixo. Segundo (PINHEIRO, 2004):

- Arquitetura FFD: pode trabalhar com toda topologia do padrão, utilizando ao máximo os recursos disponíveis. Geralmente, são os coordenadores de rede e os dispositivos que necessitam de acesso de administração a outros dispositivos. Tais dispositivos possuem uma arquitetura mais complexa, o que pode lhes aumentar o custo quando comparados a outros tipos de dispositivo;
- Arquitetura RFD: trabalha com um número reduzido de instruções do padrão, onde se comunicam apenas com o coordenador de rede. Por possuírem um número reduzido de instruções, são mais baratos quando comparados aos dispositivos FFD. Neste trabalho, é apresentada uma implantação RFD na plataforma Radiúino, por ser uma plataforma livre, robusta e acessível à comunidade.

3.2.1. CAMADA FÍSICA

Segundo o padrão de redes OSI (*Open System Interconnect*), que é o padrão de camadas de rede de sistemas abertos, a camada física (PHY) é a camada responsável por realizar a comutação entre os sinais digitais e os sinais físicos para comunicação (recepção e transmissão dos dados) entre os nós sensores. Segundo (PEREIRA FILHO, 2012), ela fornece a interface necessária para que a camada de enlace de dados forneça seus serviços à plataforma. Basicamente, ela oferece dois tipos de serviços:

- *PHY Service Data*: responsável por trafegar os dados entre a camada PHY (responsável pela parte física da rede) e a camada MAC (*Medium Access Control*

- responsável pelo acesso às demais camadas do sistema), realizando o serviço de convergência do sinal de rádio em sinal digital para processamento;

- *PHY Management Service*: responsável pelas configurações necessárias para a operação do rádio e demais informações de gerência para as camadas superiores.

De modo geral, as funcionalidades da camada física se resumem a funcionalidades físicas, como a ativação e desativação do receptor/transmissor de rádio, controle de canal/frequência/potência/etc. e recepção dos sinais. As camadas física e de enlace de dados são as camadas que sofreram alterações em suas funcionalidades, quando comparadas às funcionalidades originais propostas pelo modelo OSI, para atender às necessidades da transmissão e recepção de dados das RSSFs.

3.2.2. CAMADA DE ENLACE DE DADOS

Seguindo as camadas do padrão OSI, a segunda camada que sofreu alterações foi a camada de enlace de dados, também conhecida por MAC. Segundo (PEREIRA FILHO, 2012), ela controla os *frames* de dados que são trafegados pela rede, corrige possíveis erros da camada física e controla os dispositivos de rede, associando-os e desassociando-os da rede de sensores sem fio. Dentre os serviços oferecidos pela MAC, destacam-se:

- *MAC Data Service*: responsável pelo transporte de informações entre as camadas do protocolo e as camadas MAC de outros nós sensores.

Basicamente, operacionaliza o nó sensor e permite sua comunicação com outros nós sensores.

- *MAC Management Service*: responsável pela identificação do nó sensor na rede e demais informações de gerência para as camadas superiores.

Os nós sensores devem operar de maneira flexível, adaptando-se a rede na qual ele está sendo inserido. Segundo (PEREIRA FILHO, 2012), dentre os modos de operação de redes de sensores sem fio, dois modos podem ser trabalhados de maneira satisfatória.

O modo *beacon-enabled* trabalha com pacotes sinalizadores, enviados periodicamente pela rede, para que o nó sensor coordenador identifique os nós sensores que estão em operação na rede. O pacote de dados enviado nesta sincronização é conhecido por *superframe* e, com ele, o nó sensor se sincroniza ao canal e atualiza sua lista de pacotes pendentes de transmissão na rede.

O modo *beaconless* dispensa esta tratativa de utilização de *superframes*, fazendo com que os nós sensores sempre fiquem em modo de recebimento de informações, lendo todos os pacotes que são disponibilizados na rede e descartando aqueles que não estão endereçados ao nó sensor em questão.

Ambos os modos possuem suas restrições, mas por questões de simplicidade de operação e devido ao objetivo deste trabalho, será utilizado o modo *beaconless*, para estimativa das distâncias.

3.3. PLATAFORMA RADIÚINO

A plataforma Radiúino é um *firmware* baseado na tecnologia Arduíno. Utiliza a banda de 915MHz, que é aberta para utilização, sem necessidade de liberação de faixa pela ANATEL. Esta plataforma foi concebida para trabalhar com transceptores CC1101 da Texas Instruments (RADIÚINO, 2012).

Este *firmware* utiliza um pacote de transmissão de dados de 52 bytes, facilmente ajustado para diversos tipos de medições de sensores em geral. Além disto, o *firmware* é facilmente configurável, com possibilidades de alteração do canal de rádio, potência de transmissão, endereço de rede (utilizando OID (*Object Identifier*), que fornece um identificador único a cada elemento da rede), entre outros parâmetros. Por esta facilidade de configuração e captura de dados, este *firmware* será utilizado neste trabalho.

3.3.1. RECEIVED SIGNAL STRENGTH INDICATOR (RSSI)

As conexões de RSSF são realizadas através de uma infinidade de tipos de sinais, como sinais de luz, sinais de rádio frequência, sinais *bluetooth*, entre outros. Nas medições de sinais de rádio, uma das maneiras de se obter um LQI (*Link Quality Indicator*) da rede, ou um indicador de qualidade da transmissão, é através do RSSI. O RSSI, que normalmente é uma medida calculada em dBm, indica a potência em que o sinal de rádio foi transmitido ou recebido por um determinado nó sensor (PARAMESWARAN, 2009).

Conforme citado anteriormente, a potência do sinal é afetada pelos elementos presentes no ambiente. O ambiente em si, mesmo sendo um ambiente *outdoor*, com a rede formada por nós sensores em linha de visada, já atenua o sinal pela própria distância entre os nós sensores e a superfície na qual o nó sensor está posicionado. Esta atenuação faz com que a potência do sinal seja menor na sua recepção (HYO-SUNG & WONPIL, 2009).

O RSSI é um indicador de intensidade de sinal de rádio. Através deste indicador, é possível estabelecer, em dBm, uma medida de intensidade do sinal recebido por um determinado receptor. Esta medida de energia é bastante difundida, por sua simplicidade de medição e por não necessitar de *hardware* adicional para a medida da intensidade do sinal (LUOMALA, 2012).

Para a medição de distância, o RSSI possui a vantagem citada de não necessitar de *hardware* adicional para realizar as medições, mas o grande problema é que qualquer objeto no ambiente pode influenciar na medição do RSSI, mesmo que este objeto não esteja na linha de visada entre o emissor e o receptor (PARAMESWARAN, 2009).

Entretanto, devido às vantagens apresentadas, o RSSI continua sendo uma maneira precisa para estimar a distância entre dois sensores. Para o cálculo da RSSI, é utilizada a seguinte fórmula (NI, 2012):

$$RSSI = P_0 + 10_n \text{Log}\left(\frac{d}{d_0}\right) + X \quad (1)$$

Onde:

$RSSI$ é a potência recebida do sinal de rádio (em dBm);

P_0 é a potência recebida na medida de referência do modelo (em dBm);

10_n é o resultado do cálculo do *path loss* da variável aleatória da influência do ambiente no sinal, visto que a influência do ambiente no sinal é uma variável cujo cálculo é influenciado por muitas outras variáveis, tornando seu cálculo, muitas vezes, impreciso e complexo;

d é a distância que o sinal percorreu (em cm);

D_0 é a distância de referência do modelo;

X é a variável que representa a influência do ambiente no sinal.

Com a Equação 1, é possível obter o valor de RSSI em dBm para uma determinada transmissão. Como será tratado no capítulo 5, com o isolamento da variável d e tendo o RSSI da medição conhecido, é possível realizar o cálculo da distância utilizando o modelo descrito na Equação 1.

3.3.2. MODELO DE PROPAGAÇÃO BASEADO EM ESPAÇO LIVRE

Em ambientes abertos, sem a presença de obstáculos e objetos entre transmissor e receptor, ou seja, em ambientes que proporcionam visadas diretas entre os nós sensores, é possível utilizar o modelo de espaço livre para prever a intensidade com a qual um sinal chegará a seu receptor (RAPPAPORT, 1999).

O modelo apresentado na Equação 2 dita que a intensidade do sinal transmitido declina à medida que a distância entre os nós sensores aumenta. Exemplos de uso deste modelo são os sistemas de comunicação via satélite, infravermelho e enlaces de micro-ondas (RAPPAPORT, 1999).

$$P_r(dB) = -10 \log_{10} \left(\frac{G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2}{(4\pi)^2 \cdot d^2} \right) \quad (2)$$

Onde:

G_t é o ganho da antena transmissora (em dB);

G_r é o ganho da antena receptora (em dB);

λ é o comprimento da onda;

d é a distância entre o transmissor e o receptor.

Como se pode observar, a interferência que o ambiente tem sobre o sinal não é considerada neste modelo, o que inviabiliza sua aplicação em ambientes internos fechados.

3.3.3. MODELO DE PROPAGAÇÃO BASEADO EM TERRA PLANA

Baseado no modelo de espaço livre nota-se que apesar do emissor e receptor do sinal estar em linha de visada direta, a própria superfície terrestre pode refletir o sinal trafegado. (PARSONS, 2000).

Como este modelo não considera a curvatura da terra em seu cálculo, apenas locais totalmente planos, o modelo de terra plana não pode ser utilizado para grandes medidas, como o modelo de espaço livre, apenas para locais onde os nós sensores estejam em visada direta e que sejam totalmente planos, o que reduz a utilização do modelo a apenas medições onde a reflexão da superfície altera significativamente os valores a curtas distâncias (PARSONS, 2000).

3.3.4. MODELO DE PROPAGAÇÃO BASEADO EM RSSI

A propagação de um sinal de rádio impõe limitações no desempenho de sistemas de comunicação sem fio, devido ao fato de que o trajeto do sinal entre o emissor e o receptor pode variar de uma linha de visada, até um trajeto obstruído por inúmeros obstáculos (MACHADO, 2011).

Dentro dos modelos de propagação difundidos, os modelos de propagação em ambientes internos fechados são os que atualmente são mais pesquisados, devido ao seu alto grau de importância para aplicações em ambientes internos fechados e seu pequeno grau de desenvolvimento atual (MACHADO, 2011).

Para a determinação de um modelo de propagação, usualmente, é aplicada a fórmula de Friis, que indica que a potência do rádio diminui próximo do quadrado da distância entre o receptor e o transmissor, visto que o próprio ambiente e a trajetória do sinal degrada o sinal transmitido. A área efetiva entre o transmissor e o receptor pode ser obtida através da fórmula de Friis, representada pela Equação 3.

$$A_e = \frac{\lambda^2 G}{4\pi} \quad (3)$$

Onde:

A_e é a área efetiva entre o transmissor e o receptor do sinal (em cm);

λ^2 é o comprimento da onda do sinal transmitido (em m);

G é a soma do ganho das antenas transmissoras e receptoras.

Com a Equação 3, é possível o cálculo da área efetiva entre o transmissor e o receptor do sinal, desde que em linha de visada e em um ambiente sem nenhum tipo de influência do ambiente.

4. ESTIMAÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE NÓS SENSORES EM REDES DE SENSORES SEM FIO

Para estimar a distância entre nós sensor em ambientes internos fechados é relevante considerar que tais ambientes apresentam uma aleatoriedade na quantidade de objetos e obstáculos presentes no mesmo, de maneira que o modelo tenha de se adaptar periodicamente às novas condições que o ambiente oferece.

Assim, a metodologia proposta neste trabalho para determinar a distância entre nós sensores em uma RSSF é composta, também, por um método dinâmico de estimativa de distância.

4.1. CÁLCULO DA DISTÂNCIA ENTRE NÓS SENSORES BASE RSSI

Conforme descrito anteriormente, a intensidade da RSSI diminui de acordo com o aumento da distância entre transmissor e receptor, uma vez que, durante seu trajeto, o sinal consome parte da energia utilizada na transmissão para percorrer a distância citada. Logo, quanto maior a distância percorrida, mais energia o sinal utilizará para trafegar entre o transmissor e RSSI e a distância entre os nós sensores, é possível estimar essa distância entre transmissor e receptor a partir da coleta de medidas de RSSI desses nós.

Além disso, a presença de obstáculos e objetos no ambiente onde se encontram o transmissor e o receptor também influencia a intensidade do sinal recebido. Modelos de propagação baseados em RSSI apresentam dificuldade em

estimar as variáveis de ambiente quando o ambiente é dinâmico, pois estas variáveis podem mudar drasticamente, tornando a utilização de um modelo estático (que represente a relação entre RSSI e distância entre os nós sensores) inadequado. (GRACIOLI, 2011) (PROCÓPIO, 2012) (BISSATO & PERES 2009).

Muitos dos modelos de propagação descritos na literatura (GRACIOLI, 2011) trabalham em ambientes externos abertos, onde existe a propagação por espaço livre, método aplicado devido a diminuição na aleatoriedade da interferência dos objetos e obstáculos presentes quando comparado ao ambiente internos fechados. Esta aleatoriedade faz com que modelos estáticos de estimativa de distância sejam ineficientes quando utilizados em ambientes internos fechados, tornando necessária a utilização de um algoritmo adaptável para ajuste do modelo (GRACIOLI, 2011).

Métodos dinâmicos para ambientes internos fechados se adaptam ao ambiente de acordo com a definição de um parâmetro que inicia a adaptação do método. Esta adaptação pode ocorrer apenas em parte do método de estimativa (quando apenas as variáveis referentes a interferência do ambiente no método são recalculadas) ou no método inteiro (quando todo o método varia de acordo com o ambiente monitorado). Em modelos baseados em métodos matemáticos conhecidos (como a adaptação por regressão linear), o método é totalmente adaptado ao ambiente, gerando assim um novo método para a estimativa de distância (GRACIOLI, 2011).

Desta maneira, é necessário trabalhar com um modelo para estimativa de distâncias em ambiente internos fechados, que incorpore de maneira satisfatória as alterações do ambiente e que se adapte ao ambiente quando o modelo não for mais válido. No capítulo 5, é abordado o método matemático utilizado para estimar a distância entre nós sensores em ambientes internos fechados, trabalhando com a aleatoriedade do ambiente aqui descrita.

5. PROVA DO CONCEITO

A metodologia proposta neste trabalho para determinar a distância entre nós sensores encontra-se descrita a seguir.

5.1. MÉTODO PARA CÁLCULO DA DISTÂNCIA

O método para cálculo da distância entre dois nós sensores baseado em informações de intensidade de sinal pode ser representado pelo fluxograma ilustrado na Figura 5.

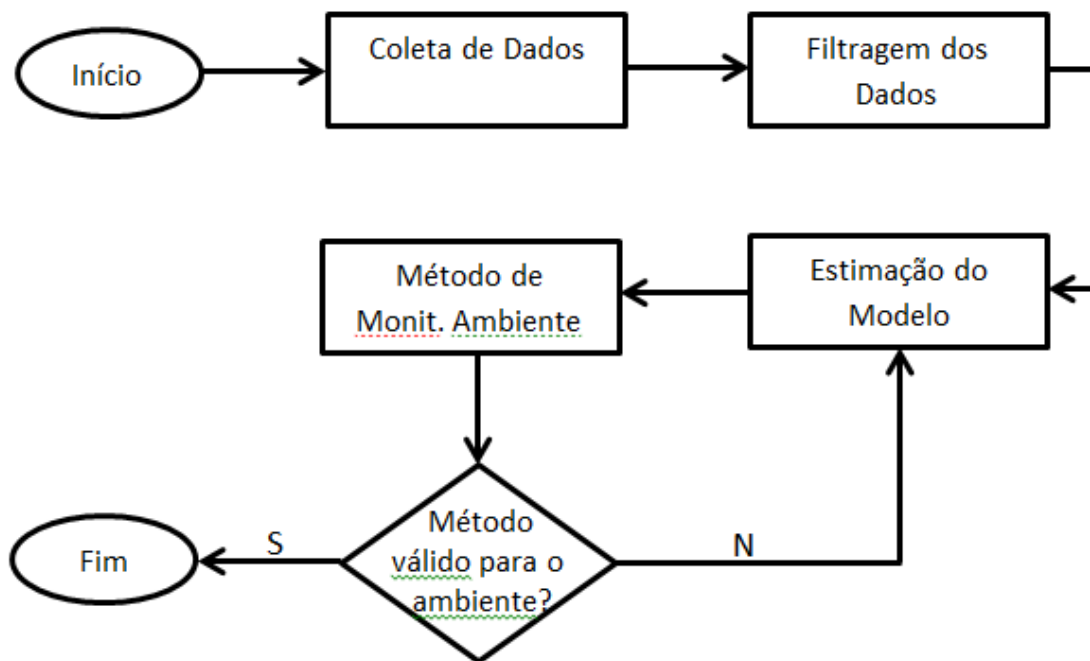


Figura 5 - Fluxo para Coleta de Dados.

Este método consiste das seguintes etapas:

- Coleta de dados, onde é realizada a coleta das informações necessárias para o método de cálculo de distância;
- Filtragem de dados, onde os dados considerados de comportamento atípico são desconsiderados na estimação de distâncias;
- Estimação do modelo que representa a relação entre intensidade de sinal recebido em dB e distância em cm entre os nós sensores;
- Método de monitoramento do ambiente, para validação do método aplicado e re-estimação do método em casos onde o método é inválido ao ambiente onde a estimativa de distancia será realizada.

Essas etapas estão descritas nos itens que se seguem.

5.1.1. COLETA DE DADOS

A coleta de dados deve ser realizada de maneira controlada, para a posterior calibração e definição de variáveis presentes no método de cálculo da distância. Inicialmente, é necessária a coleta de dados em distâncias de referência, para que o método possa realizar a primeira calibração do ambiente com as variáveis de estimação de distância, visto que, como citado anteriormente, estas variáveis são dinâmicas quanto à alteração dos objetos e obstáculos presentes no ambiente monitorado.

Esta coleta de dados (RSSI) é realizada entre os nós sensores cuja localização é conhecida, para que a interferência do ambiente no modelo seja inicialmente calculada, desenvolvendo, assim, um primeiro modelo relacionando RSSI e distância entre nós sensores.

Como as coletas iniciais são realizadas com sensores de localização conhecida, para definição inicial do método, é necessária a comprovação de que o método desenvolvido poderá de fato realizar estimar a distância entre nós sensores no ambiente selecionado. Esta etapa é necessária para ter-se certeza de que as alterações dos objetos e obstáculos presentes no ambiente não afetaram as medições de distância para o modelo utilizado. Uma maneira de se definir se as alterações de objetos e obstáculos do ambiente afetaram o método aplicado ao ambiente é definir, de maneira empírica, um limite de erro, para que caso este limite seja transpassado, o modelo seja estimado novamente. No trabalho apresentado, a aplicação da adaptação do método de acordo com a variância se deu de maneira empírica. Como a taxa de erro de um método recém-estimado não ultrapassou 5%, foi definida empiricamente, neste trabalho, esta taxa de erro como referência para as demais medições (como se pode observar no anexo C). Quando a medição realizada é superior a esta taxa de erro, o método é re-estimado.

5.1.1.1. EQUIPAMENTOS E *SOFTWARES* UTILIZADOS NA COLETA DE DADOS

Para a realização das coletas de dados, é necessária a utilização de alguns equipamentos (descritos posteriormente) para a criação da RSSF, envio e

recepção dos pacotes trafegados pela RSSF e recepção dos pacotes pelo computador para posterior cálculo da distância entre os nós sensores da rede.

Inicialmente, é necessária a utilização de um computador para o envio e recepção dos pacotes pela porta *serial*, para que o nó sensor de localização conhecida efetue o envio e a recepção dos pacotes contendo o RSSI e transmita ao computador para cálculo da distância entre este nó sensor e o nó sensor de localização desconhecida. Para tanto, o computador precisa ter instalado o *software* de desenvolvimento Eclipse, que no trabalho é executado na versão 4.1 64 bits, mas que pode ser executado em versão posterior, que utilizando um programa específico disponibilizado junto a este trabalho, efetue a comunicação entre o nó sensor de localização conhecida e o computador. (ECLIPSE, 2013)

Para a instalação do *software* Eclipse na versão 4.1, é necessária a instalação do *Java Development Kit* (JDK) na versão 1.45, que pode ser encontrada na referência (JDK, 2013). Já a biblioteca de desenvolvimento RXTX para simulação de comunicação da porta serial em uma porta USB do computador com o nó sensor, pode ser encontrada na referência (RXTX, 2013).

Com os *softwares* instalados no computador a ser utilizado, é necessária a configuração dos nós sensores que serão utilizados nas medições. Os nós sensores são divididos em duas categorias: nós sensores com localização conhecida, ligados a um computador para recepção das medidas de RSSI coletadas no ambiente (aqui descritos como nó base) e os nós sensores com localização desconhecida e móveis (aqui descritos como nó móvel).



Figura 7 - Módulo USARTBee (SEEDSTUDIO, 2013).

A etapa de coleta de dados foi dividida em três blocos de medições: um bloco de medições contendo cerca de 700 medições e dois blocos de medições contendo cerca de 600 medições. Estas medições foram realizadas no laboratório de eletrônica (LabEI) da PUC-Campinas. Este laboratório é descrito na Figura 8 (adaptado de PROCÓPIO, 2012).

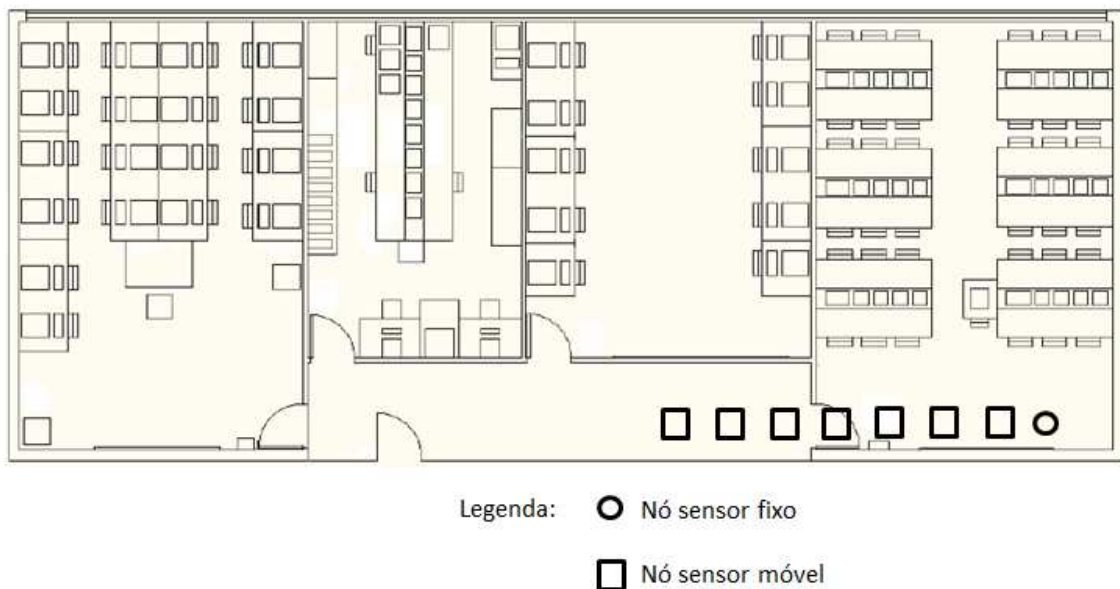


Figura 8 - Layout do LabEI onde os experimentos foram realizados

Na Figura 8, é possível identificar as bancadas de trabalho dos laboratórios. O círculo representa o nó sensor base, estático, que recebe informações dos nós sensores e os transmite para o computador, que armazena as leituras recebidas. Os nós sensores móveis são representados pelos quadrados destacados na Figura 8, mudando de lugar a cada medição. Cada quadrado possui a distância de 1 metro entre outro quadrado/círculo.

Na Figura 9, é possível observar a bancada montada para o 1º bloco de medições. Em destaque, os nós sensores instalados.



Figura 9 - Sensores instalados na bancada para medição.

A aplicação da metodologia proposta neste trabalho, conforme descrito no Capítulo 6, se baseia três blocos de coleta de dados citados, de modo a gerar três

modelos distintos, relacionando RSSI e a distância entre os nós sensores, cada um adaptado ao momento de coleta de dados no ambiente mostrado.

5.1.2. FILTRAGEM DE DADOS

A filtragem de dados coletados, relacionados a momentos de instabilidade nas medições, como situações anormais no ambiente de medição (por exemplo, presença de muitas pessoas em um ambiente onde normalmente o tráfego de pessoas é reduzido), é necessária para não comprometer a eficácia do método estimado de acordo com os dados coletados na etapa de coleta de dados.

Neste trabalho, a filtragem de dados foi realizada de forma a desconsiderar os dados classificados como anormais, conforme será detalhado no Capítulo 6.

5.1.3. ESTIMAÇÃO DO MODELO LINEAR

Para o cálculo da distância entre nós sensores baseado nas medições de RSSI, assume-se que existe uma relação linear entre a intensidade do sinal medida em dBm (RSSI) e a distância entre os nós sensores em cm. Esse modelo pode ser determinado através do Método dos Mínimos Quadrados que, particularmente para o caso linear, é denominado de regressão linear.

O Método dos Mínimos Quadrados (também conhecido por MMQ) foi criado por Gauss, para mensurar o deslocamento de planetas através de medições. Este método foi posteriormente adaptado para aplicação em grandezas

variáveis de medida, sendo utilizado em diversos casos de linearidade de medidas desconhecidas (PROCÓPIO, 2012) (MOTA, 2013).

O modelo linear, determinado através de regressão linear, é expresso pelas equações 3, 4 e 5.

$$y = b + a.x \quad (3)$$

Onde:

y corresponde a uma matriz contendo as medições de RSSI;

x corresponde a uma matriz contendo as distâncias entre nós sensores conhecidas;

b corresponde ao intercepto do modelo linear, determinado através da Equação 4;

a corresponde ao coeficiente angular do modelo linear, determinado através da Equação 5.

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (4)$$

Onde:

\bar{y} corresponde à média do vetor de medidas de RSSI;

\bar{x} corresponde à média do vetor de distâncias.

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5)$$

Onde:

i corresponde ao índice da amostra;

n corresponde ao número total de amostras.

Uma vez determinados a e b , pode-se escrever o modelo que representa a relação entre RSSI e a distância entre os nós sensores, através da Equação 3. A partir desse modelo, pode-se determinar a distância entre nós sensores para qualquer medida de RSSI, conforme descrito no Capítulo 6.

5.1.4. MÉTODO DE MONITORAMENTO DO AMBIENTE

Devido à aleatoriedade através da qual o ambiente pode influenciar a intensidade do sinal de RSSI, é necessário re-estimar o modelo linear quando a taxa de erro calculada for superior ao valor empírico definido como limite para

estimação do método. Assim, o modelo será re-estimado quando o valor coletado (em cm) para uma distância conhecida, somada a taxa de erro definida empiricamente, diferir do valor coletado como referência do modelo. Como citado, a taxa de erro tolerável do modelo é definida de maneira empírica, pois este valor definirá se os nós sensores de localização estática deverão adaptar ou não modelo linear. Como o método é adaptativo, a existência de uma base histórica de medições não é necessária, visto que a cada medição, o ambiente interno fechado pode possuir um novo arranjo de objetos e obstáculos.

Devido a esta característica de rearranjo dos objetos e a necessidade de reestimativa do modelo matemático baseado na variância da média das coletas do ambiente, caso ocorra uma alteração abrupta no ambiente monitorado, o modelo será adaptado à nova condição de trabalho, de acordo com o limite de variância definido empiricamente.

O método para monitoramento do ambiente encontra-se descrito no fluxograma da figura 10.

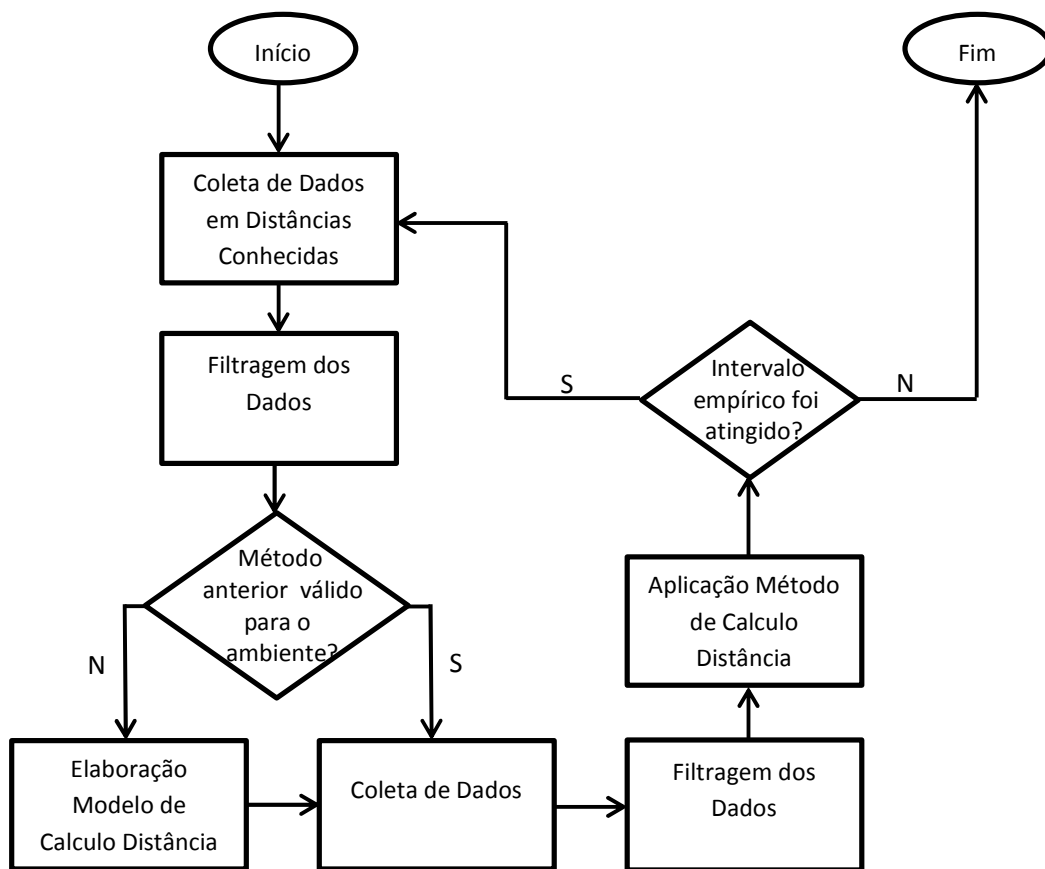


Figura 10 - Fluxograma de estimação de distâncias baseado em RSSI

Este fluxograma é descrito em algoritmo no anexo A deste trabalho, junto com o método completo de estimação de distância baseado em algoritmo.

6. RESULTADOS OBTIDOS

A aplicação do método desenvolvido é descrita ao longo deste capítulo. Mais especificamente, os passos de calibração dos sensores, de coleta de RSSI no ambiente, de estimação do modelo e de aplicação do método de monitoramento do ambiente para re-estimação do método de estimativa de distâncias também são descritos de forma detalhada.

6.1. CALIBRAÇÃO DOS SENSORES

Tendo em vista que os sensores utilizados nos experimentos comunicam-se através de rádios que utilizam o transceptor CC1101, o processo de calibração deles envolve, basicamente, o ajuste do *offset* do cristal, alinhamento dos canais, potência do sinal transmitido, endereço do sensor (OID - *Object Identifier*) e taxa de transmissão da porta *serial* (RADIUINO, 2013).

O alinhamento dos canais deve ser realizado em todos os rádios que compartilharão a mesma rede. Com avanços de 200kHz a cada canal, o sistema permite a escolha entre 66 canais distintos. Estes canais possuem espaçamento de 200 kHz para que as transmissões dos canais não influenciem umas nas outras (RADIUÍNO, 2013).

A potência do sinal transmitido envolve seu ajuste com relação ao perímetro de alcance da rede, de modo que um mesmo canal seja utilizado diversas vezes em redes distintas, uma não interferindo nas transmissões da outra. As possíveis escolhas de potência transmitida são: -30dBm, -20dBm, -

15dBm, -10dBm, 0dBm, 5dBm, 7dBm e 10dBm, distribuídas em valores entre 0 e 7 no *firmware* do rádio (RADIUÍNO, 2013).

A escolha do OID determina o identificador único de um determinado nó na rede. Se um determinado rádio possuir o mesmo OID de outro rádio, poderá receber de outros sensores os mesmos comandos, e nas suas transmissões, possivelmente os pacotes entrarão em colapso e poderá haver a perda dos pacotes por conta do choque entre os pacotes. No caso da plataforma Radiuíno, cada rede pode possuir até 256 sensores(RADIUÍNO, 2013).

A escolha da taxa de transmissão da porta *serial* se resume aos nós sensores conectados aos computadores, que centralizam as informações e as armazenam em bases de dados, de modo a possibilitar análises históricas com os dados coletados, como utilizado para determinar a distância entre os sensores da rede em questão (RADIUÍNO, 2013).

O ajuste do *offset* do cristal do transceptor CC1101 é padronizado, como se segue. Utilizando *firmware* apropriado para a portadora de 915MHz, utilizando um aparelho analisador de espectro, coleta-se o valor do canal transmitido a um *offset* zerado (0x00, que contém os caracteres 0x concatenado ao valor 00 em números hexadecimais (que em formato decimal é 0)). Logo após, aplica-se a diferença entre este valor coletado e o valor para o canal de 915MHz. Com isto, insere-se o passo de frequência do transceptor, que representa a diferença do valor em kHz multiplicado pelo número coletado de *offset* (que por definição, para o transceptor CC1101 é 1,59). Com estes dois valores faz-se a divisão da

diferença do valor coletado com o valor de 915MHz, arredondando o valor das casas decimais e convertendo o resultado para número hexadecimal. Este procedimento pode ser resumido pela seguinte função computacional encontrada no *firmware* utilizado, descrito na sessão 5.1.1 (RADIÚNO, 2013):

$$\text{Offset} = \text{Hexadecimal}(\text{Arredondar}((915 - V_c) / P_f))$$

Onde:

Offset = Valor do *offset* para o cristal do transceptor;

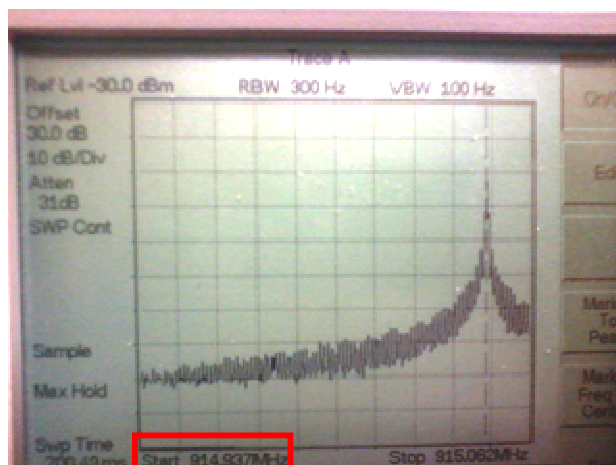
Hexadecimal = Função para converter números decimais para hexadecimais;

Arredondar = Função que arredonda as casas decimais dos números

V_c = Valor coletado com o *firmware* da portadora de 915MHz e valor de *offset* de 0x00.

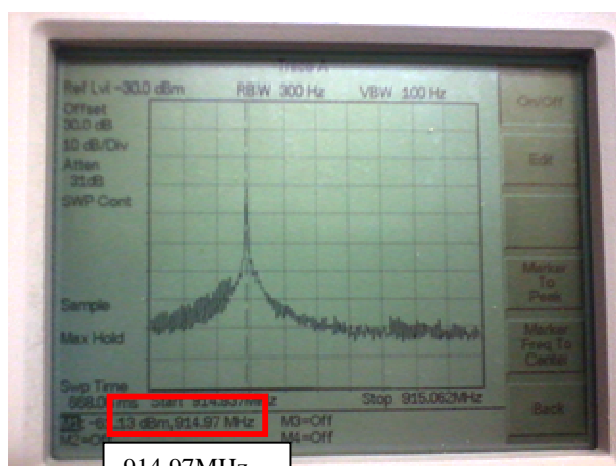
P_f = Passo de frequência do transceptor.

Nas Figuras 11, 12 e 13, pode-se observar a calibração dos sensores utilizados nos experimentos referentes a este trabalho. Em destaque, a frequência que os sensores estavam transmitindo antes da calibração. Após a calibração, os sensores devem transmitir na frequência de 915MHz.



914,937MHz

Figura 11 - Calibração do sensor 0.



914,97MHz

Figura 12 - Calibração do sensor 1.

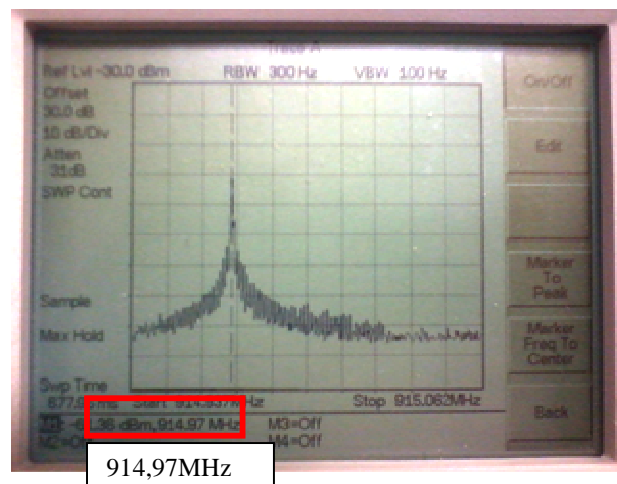


Figura 13 - Calibração do sensor 2.

É possível observar que os sensores estão, inicialmente, fora de calibração, como destacado nas Figuras 11, 12 e 13, visto que o ideal são os nós sensores transmitirem os sinais de rádio na frequência de 915MHz.

No anexo A, é apresentado o código fonte em .ino (extensão de arquivo de *firmware* dos módulos baseados em Arduino) para calibração e ajuste do *offset* dos rádios utilizados nos nós sensores.

6.2. COLETA DE DADOS

A etapa de coleta de dados foi realizada baseada nos documentos de recepção de informações da plataforma Radiúino (RADIÚINO, 2013). Para tanto, foi desenvolvida uma classe de coleta de dados em linguagem de programação Java capaz de realizar a coleta e a conversão dos valores coletados em valores usuais para o cálculo do método e a estimativa da distância entre os nós sensores.

A classe, basicamente, envia e recebe pacotes no formato padrão do Radiúino, se comunicando com o mesmo através de um emulador de porta serial que converte os sinais do sensor, e que liga sua porta serial *através* de um *driver* FTDI (*Future Technology Devices International*, *driver* desenvolvido para emular uma porta serial através de conexão USB) conectado a uma porta USB (*Universal Serial Bus*). Para a conversão dos valores de RSSI recebidos, é utilizada a seguinte expressão lógica descrita na Equação 6.

$$\text{SE } V_r > 128 \text{ ENTÃO} \quad (6)$$

$$RSSI = (((V_r - 256) / R_t) - F_a)$$

SENÃO

$$RSSI = ((V_r / R_t) - F_a)$$

Onde:

V_r = Valor recebido pela leitura

R_t = Retorno do sinal enviado

F_a = Fator de Ajuste

Devido a existência de uma condicional nessa expressão lógica, necessita-se considerar o ajuste de retirada de 2^8 quando o número é maior que 128, visto que, nesses casos, o número que representa a potência do sinal passa

a utilizar as 8 casas binárias reservadas a ele. O valor de retorno do sinal enviado considera o envio do sinal e a resposta do mesmo no retorno do sinal, devido a esse fato, usualmente este valor é de 2. O fator de ajuste de RSSI varia conforme o tipo de *hardware* utilizado. Para obter este valor, é necessário consultar o *datasheet* do transceptor utilizado. No caso deste experimento, o valor é fixado em 74 (RADIUÍNO, 2013).

O *software* utilizado para a coleta de dados (descrito na sessão 5.1.1.1) foi desenvolvido utilizando os fundamentos relacionados ao Radiuíno. É um *software* desenvolvido em linguagem de programação Java, onde é possível cadastrar os nós sensores que possuem sensores aplicados (denominados de sensores no *software*) e os sensores que estão conectados a um computador (denominados de base). As Figuras 14 e 15 ilustram, respectivamente, a tela de inserção da ligação de nós base e nós móveis e a tela de coleta de dados do *software* desenvolvido:

Projeto de Mestrado - Luiz Barreto

Cadastro de Bases Coleta de Dados

Porta COM: COM1

OID Base: 0

OID Sensor: 1

Time Out(ms): 500

Taxa Bits: 9600

Novo OID Base: 0

Novo OID Sensor: 0

Trocar ID

Apagar Base

Adicionar Base

Porta	Base	Sensor	Taxa Bits	TimeOut
-------	------	--------	-----------	---------

Figura 14 - Tela de cadastro de ligações entre nós sensores no *software*.

Na Figura 14, é possível observar o cadastro de nós sensores, separados entre nós base (que estão ligados a um computador) e nós sensores (que são os nós móveis).

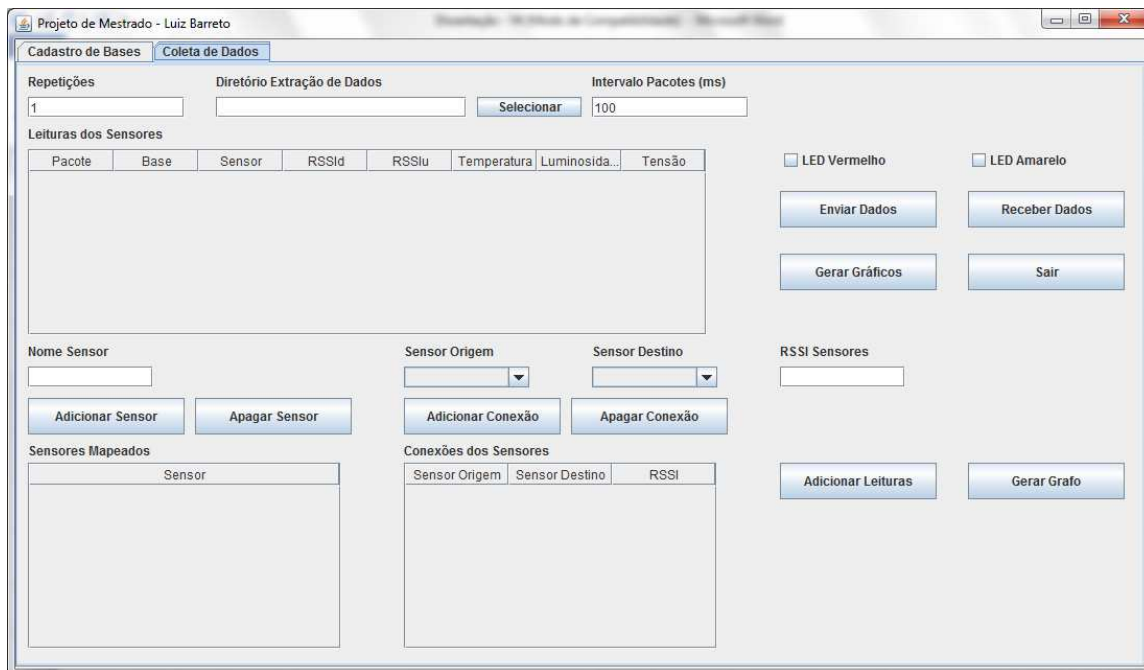


Figura 15 - Tela de cadastro de coleta de dados no *software*.

Na Figura 15, é possível acompanhar a coleta de dados, observando os dados que estão sendo coletados pelo nó base cadastrado na tela descrita na Figura 14. O manual de operação do *software* está disponível no Apêndice.

Com o *software* descrito, é possível realizar a coleta dos dados para as medições de distância de maneira automática. O *software* exporta os resultados em formato “.CSV”, com conteúdo separado por ponto-e-virgula, o que facilita no momento de leitura dos dados através de *softwares* de planilha eletrônica disponíveis no mercado.

A saída da coleta de dados utilizada está disponível no anexo C.

6.3. ESTIMAÇÃO DO MODELO LINEAR

Baseado nos resultados coletados, foi aplicado a regressão linear para estimação do modelo linear que representa a relação entre RSSI e distância entre nós sensores. Inicialmente, foram realizadas as medidas conhecidas do ambiente, para a primeira adaptação do modelo ao ambiente estudado.

Com base nas medidas disponibilizadas no Anexo C deste trabalho, para a aplicação da técnica de regressão linear descrita no capítulo 5, é necessário o cálculo das médias das leituras da RSSI para estimar o modelo linear que representa a relação entre a intensidade do sinal em dBm e a distância entre os nós sensores em cm no ambiente.

Para 1º bloco de dados, foram realizadas 574 medições no dia 30/10/13, início das medições às 19:25. Para 2º bloco de dados, foram realizadas 546 medições no dia 30/10/13, início das medições às 18:50. Para 3º bloco de dados, foram realizadas 567 medições no dia 30/10/13, início das medições às 20:10. As médias das distâncias para as 3 medições são apresentadas nas Medições 1, 2 e 3 (médias das RSSI coletadas).

Todas as coletas de dados foram realizadas com os nós sensores a altura de 45 cm, para que os nós sensores ficassem mais fáceis de serem deslocados no ambiente pelo autor. Para que fosse padronizado o pacote considerado a cada medição, apenas a RSSI do 1º pacote de cada medição foi considerado como a RSSI da respectiva medição.

Medição 1:

Tabela 1 - Médias das RSSI (1ª Medição) para as distâncias conhecidas.

Distância (em cm)	100	200	300	400	500	600	700
Média da RSSI (em dBm)	-61,2600	-62,5450	-66,4700	-72,2200	-82,6413	-76,0455	-83,8500

Medição 2:

Tabela 2 - Médias das RSSI (2ª Medição) para as distâncias conhecidas.

Distância (em cm)	100	200	300	400	500	600
Média da RSSI (em dBm)	-59,2350	-65,8100	-77,1650	-82,5577	-80,9450	-83,1765

Medição 3:

Tabela 3 - Médias das RSSI (3ª Medição) para as distâncias conhecidas.

Distância (em cm)	100	200	300	400	500	600	700
Média da RSSI (em dBm)	-59,1050	-64,8200	-69,5850	-79,0957	-82,6364	-76,5510	-82,1250

Com as médias de RSSI relacionadas à distância apresentadas nas Tabelas 1, 2 e 3, é aplicado um gráfico de dispersão de pontos para que seja possível visualizar os pontos classificados como entrada com comportamento atípico (*outlier*).

Analisando os gráficos das Figuras 16, 17 e 18, são visualizados pontos classificados como entrada com comportamento atípico (*outlier*), destacados nas

caixas em vermelho nas Figuras 16, 17 e 18. Esses pontos foram considerados como comportamento atípico, uma vez que o valor médio dos valores de RSSI coletados não seguiu a linearidade esperada para a medição, fornecendo um valor superior de RSSI, ao invés da suposição de um valor inferior de RSSI, como observado nas demais coletas de dados realizadas para o método estimado no ambiente.

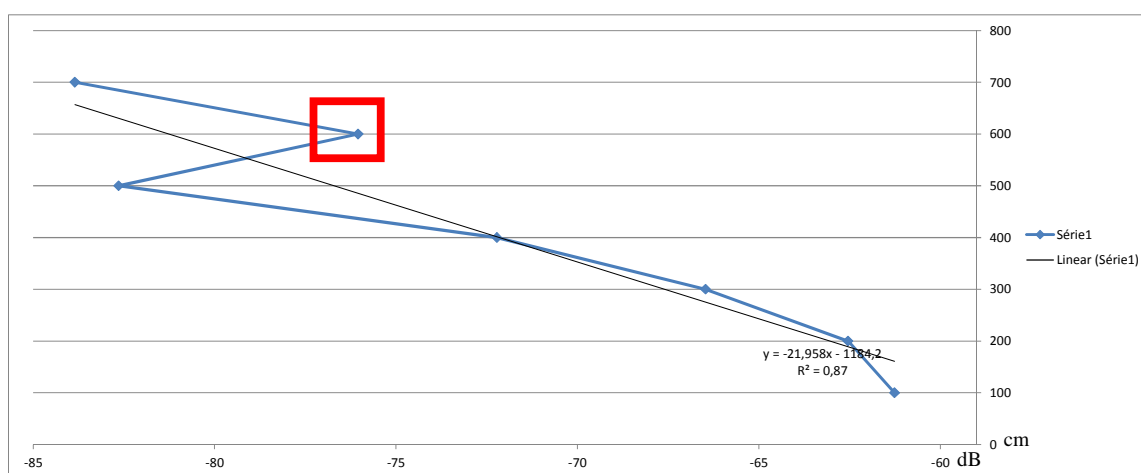


Figura 16 – Gráfico de dispersão baseado nas coletas brutas da 1ª medição.

Como é observado na Figura 16 é apresentado o valor de 0,870 para R^2 , que representa o coeficiente de linearidade, que representa a linearidade do modelo em comparação entre as medidas realizadas, numa escala de 0 a 1. O valor apresentado representa que a 87,0% dos valores presentes seguem a linearidade esperada no modelo.

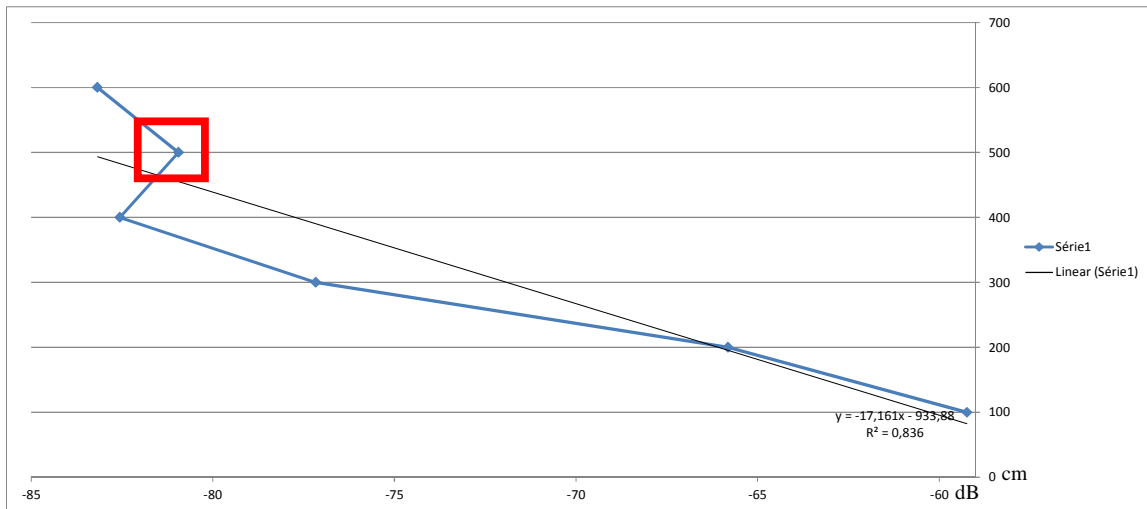


Figura 17 - Gráfico de dispersão baseado nas coletas brutas da 2ª medição.

Como é observado na Figura 17, é apresentado o valor de 0,836 para R^2 , que representa o coeficiente de linearidade, que representa a linearidade do modelo em comparação entre as medidas realizadas, numa escala de 0 a 1. O valor apresentado representa que a 83,6% dos valores presentes seguem a linearidade esperada no modelo.

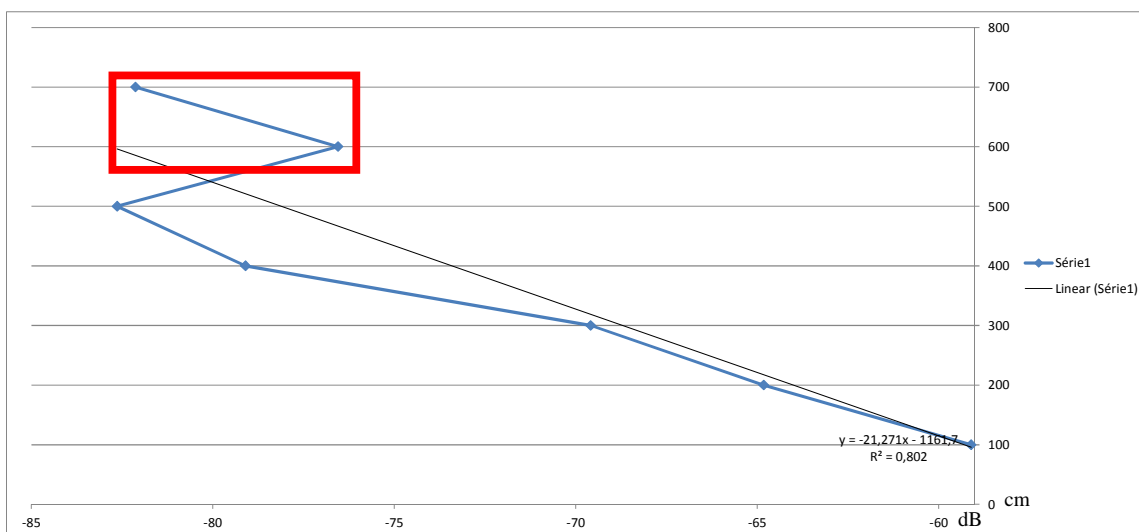


Figura 18 - Gráfico de dispersão baseado nas coletas brutas da 3ª medição.

Como é observado na Figura 18, é apresentado o valor de 0,802 para R^2 , que representa o coeficiente de linearidade, que representa a linearidade do modelo em comparação entre as medidas realizadas, numa escala de 0 a 1. O valor apresentado representa que a 80,2% dos valores presentes seguem a linearidade esperada no modelo.

Eliminando os pontos classificados como entrada com comportamento atípico (*outlier*), tem-se como resultado, os modelos lineares, determinados através de regressão linear (Equações (3), (4) e (5)), apresentados junto às linhas de tendência ilustradas nas Figuras 19, 20 e 21.

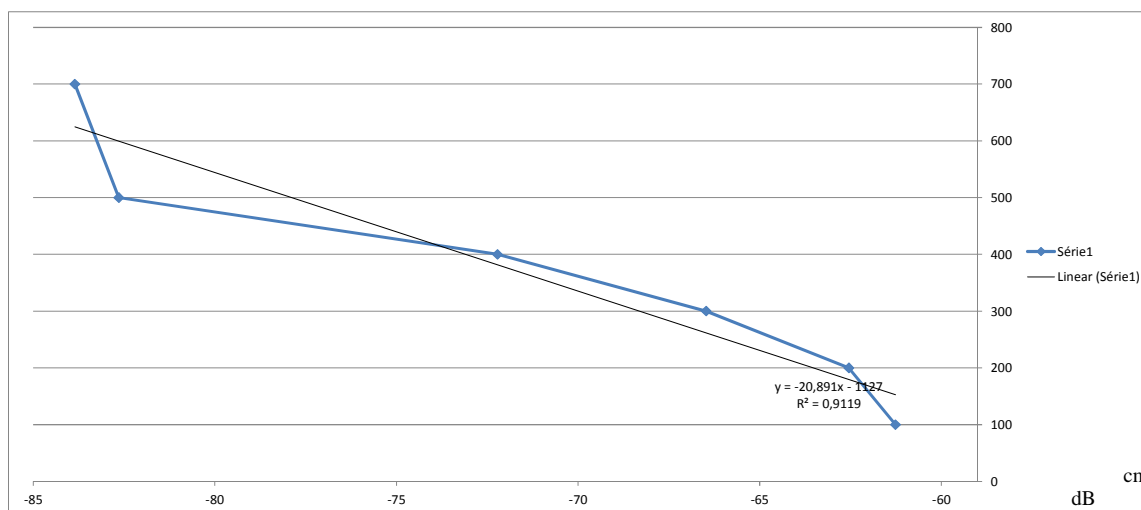


Figura 19 – Modelo linear para a 1ª medição.

Como é observado na figura 19, é apresentado o valor de 0,912 para R^2 , que representa um aumento na linearidade da primeira medição quando comparado ao valor de 0,870 anterior. Logo, com a eliminação dos pontos de comportamento atípico, o modelo apresentou linearidade superior ao modelo anterior.

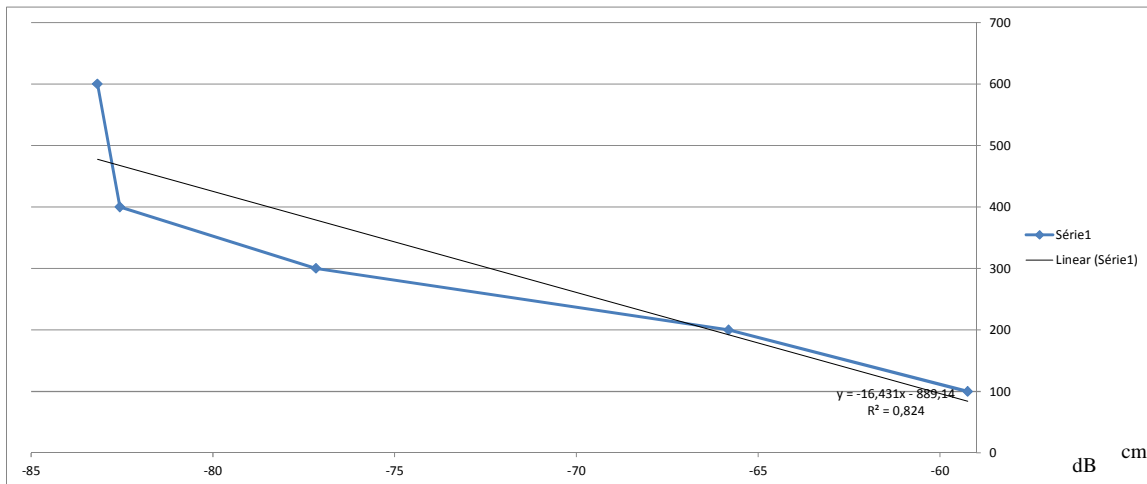


Figura 20 – Modelo linear para a 2ª medição.

Como é observado na figura 20, é apresentado o valor de 0,824 para R^2 , que representa uma diminuição na linearidade da primeira medição quando comparado ao valor de 0,836 anterior. Logo, com a eliminação dos pontos de comportamento atípico, o modelo apresentou linearidade inferior ao modelo anterior.

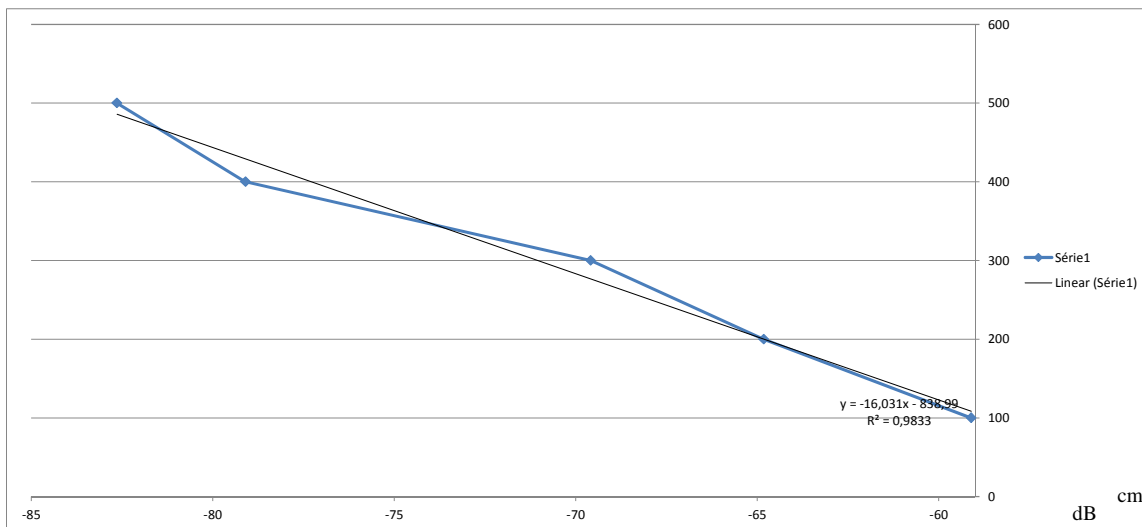


Figura 21 – Modelo linear para a 3ª medição.

Como é observado na figura 21, é apresentado o valor de 0,983 para R^2 , que representa um aumento na linearidade da primeira medição quando comparado ao valor de 0,802 anterior. Logo, com a eliminação dos pontos de comportamento atípico, o modelo apresentou linearidade superior ao modelo anterior. Quando comparado aos resultados das figuras 19 e 20, é observada a linearidade superior deste modelo quando comparados aos demais.

Assim, os modelos lineares obtidos para cada medição estão descritos pelas Equações 7, 8 e 9, para posterior aplicação destes no ambiente onde a distância será estimada.

Para 1ª medição:

$$\text{Distância} = -20,891 * \overline{RSSI} - 1127,000 \quad (7)$$

Para 2ª medição:

$$\text{Distância} = -16,431 * \overline{RSSI} - 889,140 \quad (8)$$

Para 3ª medição:

$$\text{Distância} = -16,031 * \overline{RSSI} - 838,990 \quad (9)$$

Nos métodos apresentados nas Equações 7, 8 e 9, é possível observar que houve uma realocação das variáveis descritas na sessão 5.1.3, onde é apresentado o modelo linear. Esta realocação das variáveis se dá para que o método seja aplicado de maneira mais fácil pelo utilizador do método.

A partir dos modelos estimados, pode-se determinar a distância entre nós sensores com base em medições de RSSI. Aplicando o modelo definido pela Equação 7 tem-se os resultados apresentados no apêndice A deste trabalho. Na Figura 22, é apresentado o histograma dos resultados da aplicação do método no 1º bloco de medições, com sua taxa de erro média:

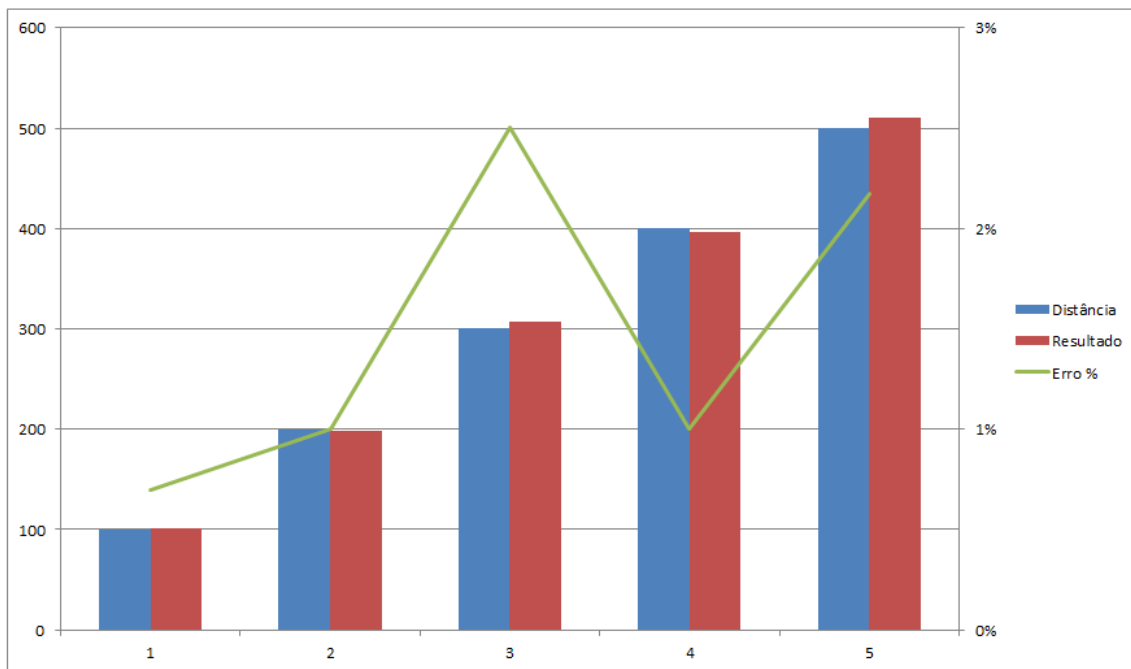


Figura 22 - Histograma de resultados do método aplicado na 1ª medição

A partir dos modelos estimados, pode-se determinar a distância entre nós sensores com base em medições de RSSI. Aplicando o modelo definido pela Equação 8 tem-se os resultados apresentados no apêndice A deste trabalho. Na Figura 23, é apresentado o histograma dos resultados da aplicação do método no 2º bloco de medições, com sua taxa de erro média:

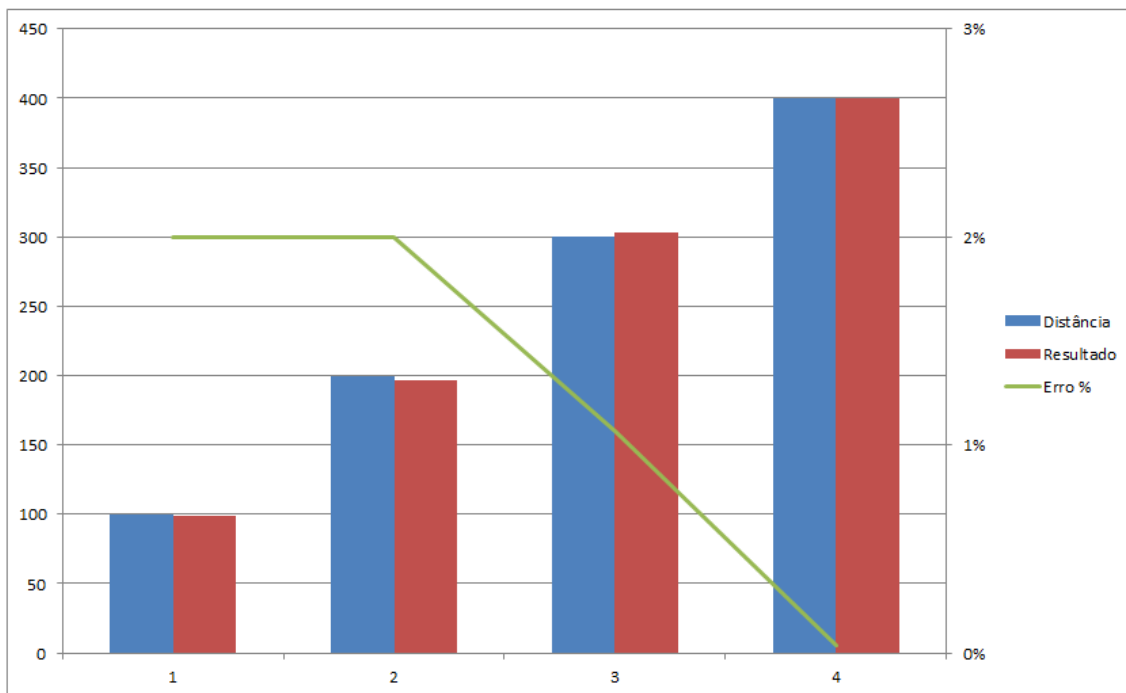


Figura 23 - Histograma de resultados do método aplicado na 2ª medição

A partir dos modelos estimados, pode-se determinar a distância entre nós sensores com base em medições de RSSI. Aplicando o modelo definido pela Equação 9 tem-se os resultados apresentados no apêndice A deste trabalho. Na Figura 24, é apresentado o histograma dos resultados da aplicação do método no 3º bloco de medições, com sua taxa de erro média:

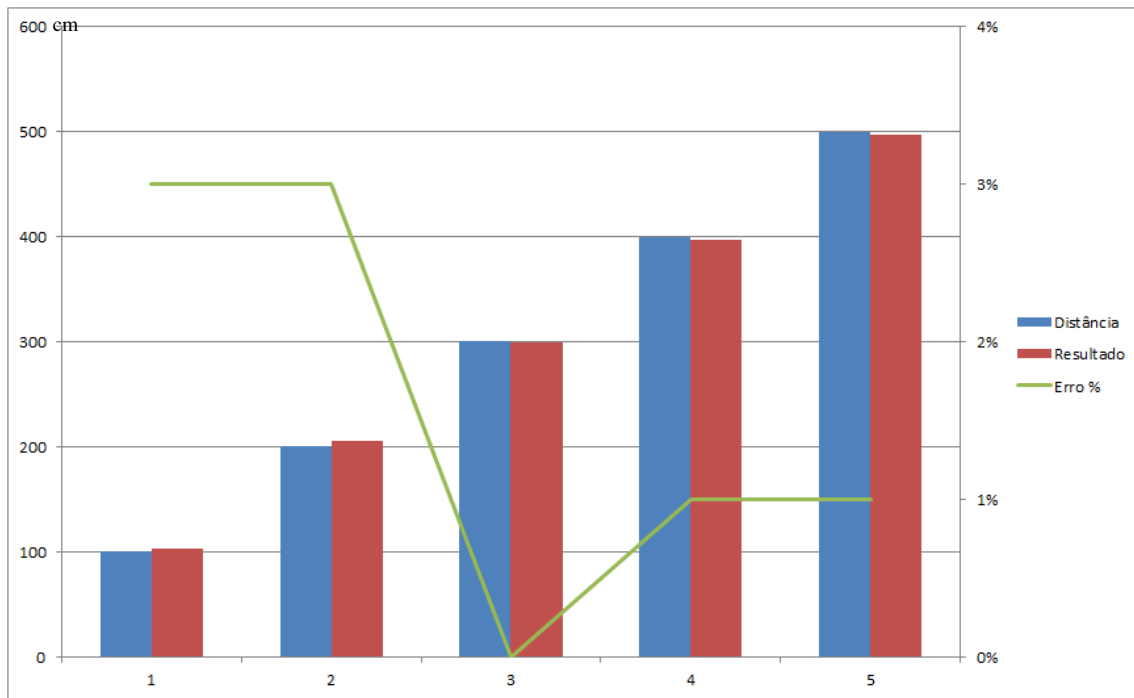


Figura 24 - Histograma de resultados do método aplicado na 3ª medição

Como se observa, a taxa de erro da aplicação do método diminui conforme o aumento da distância, mas mesmo em distâncias curtas, o método possui baixa taxa de erro nos resultados de sua aplicação.

6.4. MONITORAMENTO DO AMBIENTE

Para que os resultados do modelo apresentado representem a distância entre os nós sensores no ambiente monitorado, é necessário (como citado nos Capítulos 4 e 5) o reprocessamento do método de cálculo da distância entre os sensores. A variável adotada como um indicador de quando é necessário calibrar o ambiente é a variância da média das leituras de RSSI coletadas no ambiente. O limite dessa variância, a partir do qual existe a necessidade de calibração do

ambiente é definido de maneira empírica. Como a quantidade de medidas, definida de maneira empírica, para um determinado ambiente é de aproximadamente 100 para cada ponto de medição nos experimentos realizados neste trabalho, foi adotada a necessidade de reavaliação do método quando a variância ultrapassar 5% da taxa de erro (previamente definida no capítulo 5). Com esta medida, o método deve ser ajustado para aumento da precisão.

A Tabela 4 apresenta um trecho de medições que se referem ao final do 2º bloco de medições e início do 3º bloco de medições. Os blocos foram diferenciados de forma que na tabela as medições do 2º bloco estão apresentadas em fundo branco, enquanto as medições do 3º bloco são apresentadas em fundo cinza.

Tabela 4 – Monitoramento do ambiente entre o 2º e 3º bloco de medições.

RSSI	Distância	Resultado	Taxa de Erro
...
-78,5	400	400,6935	0%
-78	400	392,478	-2%
-78	400	392,478	-2%
-78,5	400	400,6935	0%
-78,5	400	400,6935	0%
-77,5	400	384,2625	-4%
-76,5	400	367,8315	-8%
-77,5	400	384,2625	-5%
-77	400	376,047	-7%
-76,5	400	367,8315	-9%
...

← Momento da reestimação do método.

Observa-se na Tabela 4 o aumento da taxa de erro quando o ambiente sofreu alterações, causando a necessidade de reestimação do modelo aplicado.

Pode-se observar um aumento significativo na taxa de erro a partir da transição do 2º para o 3º bloco de medições. Especificamente a partir da segunda medida do 3º bloco de medições, quando o erro atinge 8%, é executado o procedimento de reestimação do método. Assim, o modelo identificado para o 2º bloco de medições, dado por:

$$Distância = -16,431 * \overline{RSSI} - 889,14 \quad (9)$$

Será substituído pelo modelo para o 3º bloco de medições, após o acúmulo de 20 medições de RSSI neste 3º bloco, identificado anteriormente como:

$$Distância = -16,031 * \overline{RSSI} - 838,99 \quad (10)$$

7. CONCLUSÃO

Este trabalho tratou do desenvolvimento de uma metodologia para determinar a distância entre nós sensores de um RSSF, com base em medições de RSSI. Para tanto, foi implementada uma RSSF que serviu de base para a coleta de dados (RSSI e distância entre nós sensores), que foram utilizados para estimar modelos relacionando RSSI e a distância entre nós sensores.

Nesse trabalho, assumiu-se que a relação entre RSSI e a distância entre nós sensores era linear, sendo que os modelos foram determinados através de regressão linear. Uma vez determinados, os modelos são capazes de estimar a distância entre nós sensores com base em medições de RSSI, sendo que os erros entre as distâncias reais e a distâncias calculadas pelo modelo puderam ser considerados baixos, validando os modelos estimados.

Além disso, pôde-se concluir que a estimação de distâncias entre nós sensores para ambientes internos fechados pode ser realizada de maneira satisfatória, desde que o modelo utilizado se adapte ao ambiente, incorporando, assim, as mudanças dinâmicas ocorridas no ambiente, o que, neste trabalho, foi possível a partir da aplicação do método de monitoramento do ambiente.

7.1. TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros pode-se destacar:

- Utilização de modelos dinâmicos para representar a relação entre RSSI e distância entre sensores;
- Utilização de métodos de estimação dinâmica de modelos como, por exemplo, o Filtro de Kalman;
- Utilização das distâncias estimadas pelos modelos em algoritmos de trilateração para a determinação do posicionamento de nós sensores em uma RSSF.

7.2. PUBLICAÇÕES

O trabalho apresentado gerou as seguintes publicações:

PROCOPIO, E. T. ; MOTA, A. A. ; MOTA, L. T. M. ; SILVA, L. R. B. .
Received signal strength indication modeling in indoor wireless sensor networks.
American Journal of Applied Sciences, v. 10, p. 1043-1049, 2013. (Publicado).

SILVA, L. R. B.; MOTA, L. T. M. ; MOTA, A. A. . *Method for Measuring Distances Between Sensor-Nodes Based on Signal Strength.* *Journal Of Universal Computer Sciences*, 2014. (Submetido).

8. REFERÊNCIAS

- [1] BISATTO, A.; PERES, A.. Localização de Estação sem Fio Utilizando Trilateração. XII Seminário Intermunicipal de Pesquisa, 2009, Guaíba/RS. Disponível em <http://paginas.fe.up.pt/~ee02108/trilatera%C3%A7%C3%A3o.pdf>. Acesso em 25/09/2013, 20:35.
- [2] ČAPKUN, S.. *Secure Positioning in Wireless Networks. IEEE Journal On Selected Areas In Communication*, Vol. 24, No. 2, Fevereiro/2006. Páginas 221-232. Disponível em http://www.syssec.ethz.ch/research/secpos_JSAC.pdf. Acesso em 25/09/2013, 18:30.
- [3] CHEUNG, K. *et al. Least Squares Algorithms for Time-of-Arrival-Based Mobile Location. IEEE Transactions on Signal Processing*. Vol. 52, No. 4, Abril/2004. Páginas 1121 – 1128.
- [4] Diário de Notícias de Lisboa. Especial Crianças Desaparecidas. Edição Impressa de 16/02/2007. Disponível em http://www.dn.pt/especiais/interior.aspx?content_id=1048671&especial=Crian%C7as%20desaparecidas&seccao=SOCIEDADE. Acesso em 02/11/2013, às 10:18.
- [5] ECLIPSE. Eclipse versão 4.1 64 bits. 2013. Disponível em <http://www.eclipse.org/>. Acesso em 05/12/2013, às 20:50.
- [6] FONTANA, E. Eletromagnetismo - Parte II. Universidade Federal de Pernambuco, 2011. Disponível em

<http://www.ufpe.br/fontana/Eletromagnetismo2/EletromagnetismoWebParte02/mag2cap8.htm>. Acesso em 22/08/2013, às 14:33.

- [7] GRACIOLI, G. *et al.* *Evaluation of an RSSI-based Location Algorithm for Wireless Sensor Networks*. *IEEE Latin America Transactions*, Vol. 9, No. 1, Março 2011. Páginas 96-101. Disponível em http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5876427&tag=1. Acesso em 05/09/2013, às 19:50.
- [8] GUSTAFSSON, F., GUNNARSSON, F.. *Positioning Using Time-Difference of Arrival Measurements*. *Vinnova's Competence Center ISIS*. 2003. Disponível em <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.64.3068&rep=rep1&type=pdf>. Acesso em 19/06/2013, 20:40.
- [9] HYO-SUNG, A & WONPIL, Y.. *Environmental-Adaptive RSSI-Based Indoor Localization*. *IEEE Transactions On Automation Science and Engineering*, Vol. 6, No. 4, Outubro 2009. Páginas 626-633.
- [10] JDK. JDK versão 7.45 64 bits. 2013. Disponível em <http://www.oracle.com/technetwork/pt/java/javase/downloads/index.html>. Acesso em 05/12/2013, às 20:53.
- [11] LOUREIRO, A. *et al.*. XXI Congresso Brasileiro de Redes de Computadores. 2003. Páginas 179-226. Disponível em http://www.sensornet.dcc.ufmg.br/publica/pdf/179_Loureiro_Nogueira_Ruiz_Mini_Nakamura_Figueiredo.pdf. Acesso em 22/09/2013, 13:55.

- [12] LUOMALA, J.; HAKALA, I.. *Towards Adaptive Localization in Wireless Sensor Networks. Ubiquitous Positioning, Indoor Navigation, and Location Based Service (UPINLBS)*, 2012. Páginas 1-8.
- [13] MACHADO, R.. Propagação em Sistemas Rádio Móveis. Grupo de Pesquisa em Processamento de Sinais e Comunicações, Universidade Federal de Santa Maria, 2011. Disponível em <http://coral.ufsm.br/gpscom/professores/Renato%20Machado/telefoniaml>. Acesso em 21/09/2013, 14:15.
- [14] MOTA, L.T.M. *in* Notas de Aula da Disciplina Tópicos em Gestão de Serviços. Disciplina Integrante do Programa de Mestrado Profissional em Gestão de Redes de Telecomunicações. 1º Semestre 2013.
- [15] MUSSOI, F. L. R.. Fundamentos de Eletromagnetismo. Edição 3.2. Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, 2005. Disponível em http://diacca.ifrn.edu.br/wiki/lib/exe/fetch.php?media=corpodocente:giancarlos.barbosa:fundamentos_de_eletromagnetismo_-_cefet-sc.pdf. Acesso em 23/02/2014, 09:35.
- [16] NI, H. *et al.* *An Improved Method of Self-Adaptive Localization for Wireless Sensor Network in Dynamic Indoor Environment. 31st Chinese Control Conference*. Hefei, China. 2012
- [17] OLIVEIRA FILHO, K.; SARAIVA, M.. Determinação de Distâncias Astronômicas. 2012. Disponível em <http://astro.if.ufrgs.br/dist/dist.htm>. Acesso em 02/11/2013, às 08:50.
- [18] PARAMESWARAN, A. *et al.* *Is RSSI a Reliable Parameter in Sensor Localization Algorithms – An Experimental Study. 28th Symposium on*

- Reliable Distributed Systems*, 2009. Disponível em http://www.cse.buffalo.edu/srds2009/F2DA/f2da09_RSSI_Parameswaran.pdf. Acesso em 21/09/2013, 10:45.
- [19] PARSONS, J. D. *The Mobile Radio Propagation Channel*, Segunda Edição. Wiley, Nova Jersey, 2000.
- [20] PELLEGRINI, A. Análise de propagação de sinais de Rádio Frequência em redes wireless utilizando cabos irradiantes com configurações diferentes em ambiente *indoor*. Trabalho de Conclusão de Curso, Curso de Engenharia da Computação. Centro Universitário de Brasília, 2010.
- [21] PENG, R.; SICHITIU, M.. *Angle of Arrival Localization for Wireless Sensor Networks. SECON '06. 2006 3rd Annual IEEE Communications Society on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*. Páginas 374-382.
- [22] PEREIRA FILHO, J. G. A Camada Física do Padrão IEEE 802.15.4. Material de Aula. Mestrado: Tópicos Especiais em Informática: Redes de Sensores sem Fio. 2012. Disponível em <http://www.inf.ufes.br/~zegonc/material/Redes%20de%20Sensores%20sem%20Fio/>. Acesso em 28/08/2013, às 15:22.
- [23] PERES, A. Mecanismo de Autenticação Baseado na Localização de Estações Sem Fio Padrão 802.11. Tese de Doutorado em Ciência da Computação Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre 2010.
- [24] PINHEIRO, J. M. S. *As Redes com Zigbee*. 2004. Disponível em http://www.projetoderedes.com.br/artigos/artigo_zigbee.php. Acesso em 26/08/2013, às 09:17.

- [25] PINHEIRO, J. M. S. RFID, Identificação por Rádio Frequência. 2004. Disponível em http://www.projetoderedes.com.br/artigos/artigo_identificacao_por_radiofrequencia.php. Acesso em 16/09/2013, 13:20.
- [26] PROCÓPIO, E.T. Identificação de Modelo Matemático para Representar Transmissão de Rede de Sensores sem Fio em Ambientes Construídos (Mestrado Profissional em Gestão de Redes de Telecomunicações) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, SP, 2012.
- [27] RADIÚINO, Sobre o Radiuíno. Disponível em <http://www.radiuino.cc/node/8>. Acesso em 18/09/2013, 20:10.
- [28] RADIÚINO, 2013. Material de estudo. Disponível em www.radiuino.cc. Acesso em 05/12/2013, às 21:12.
- [29] RAPPAPORT, T. S. *Wireless Communications. Principles & Practice*. Primeira Edição. Prentice Hall, PTR. Nova Jersey, EUA. 1999.
- [30] RXTX, RXTX *Java library for serial ports* versão 2.1 64 bits. 2013. Disponível em <http://rxtx.qbang.org/wiki/index.php/Download>. Acesso em 05/12/2013, às 20:54.
- [31] SANTANA, H. Cálculo de Sistema Rádio Enlace Digital. Notas de Aula da Disciplina de Comunicação de Dados. Universidade Santa Cecília, Santos, 2012. Disponível em http://professores.unisanta.br/santana/downloads%5CTelecom%5CSistemas_Telecom%5CRadio%5CCalculo_Radio.pdf. Acesso em 15/09/2013, 10:05.

- [32] SEEDSTUDIO. *USARTBee module for CC1101 transceivers*. Disponível em www.seeedstudio.com. Acesso em 05/12/2013, às 21:22.
- [33] SILVA, M. Unidades de Medida ao Longo da História. 2010. Disponível em <http://www.mundoeducacao.com/matematica/unidades-medida-ao-longo-historia.htm>. Acesso em 15/10/2013, 19:55.
- [34] VIERA, A. *et al.* Tecnologia de Identificação por Radio Frequência. Revista Eletrônica de Biblioteconomia e Ciências de Informação, Florianópolis, Nº 24, 2007. Páginas 182-202. Disponível em <http://periodicos.ufsc.br/index.php/eb/article/download/1518-2924.2007v12n24p182/416>. Acesso em 16/09/2013, 14:02.
- [35] WANG, G. *et al.* *On Received-Signal-Strength Based Localization with Unknown Transmit Power and Path Loss Exponent*. *IEEE Wireless Communications Letters*, Vol. 1, No. 5, OCTOBER 2012.

Anexos

Anexo A – Programa .ino para ajuste do *offset* para cada nó sensor.

Arquivo Radiuino_Base_PORTADORA.ino

```

#include <RADIUINO.h>
#include <EEPROM.h>
#include <SPI.h>

#include "Headers.h"

// Firmware version
#define FIRMWARE_VERSION = 1.0;    // 1.0 Firmware version
byte int_rx = 0;                    // Initialization of Receive
Interrupt - RFBee generates an interrupt at startup that cannot be
treated
byte int_buff = 0;                  // Initialization of Buffer
Overflow Interrupt - RFBee generates an interrupt at startup that
cannot be treated

// Setup function. Run once at startup
void setup(){

    // Physic layer initialization
    Phy.initialize();

    // Mac layer initialization
    Mac.initialize();

    // Network layer initialization
    Net.initialize();

    // Attaching interruption for RF transmissions
    attachInterrupt(0, ISRVreceiveData, RISING);
    attachInterrupt(1, ISRVBufferOverflow, RISING);
    pinMode(GD00, INPUT);

    // Initialize timer1, and set a 1 mili second period
    Timer1.initialize(1000000);

    // Attaches ISRVtimer1() as a timer overflow interrupt
    Timer1.attachInterrupt(ISRVtimer1);

    // Writing initialization message
    Serial.print("Radiuino! Base");
}

void loop(){

    // Wait for commands from PC to network
    if (Serial.available() > 0){
        Phy.receiveSerial();
    }
}

```

```

}

// Handle packet receive interrupt
void ISRVreceiveData(){

    if (int_rx == 0) {
        int_rx = 1;
        return;
    }

    // Echo any info received from network to PC
    if ( digitalRead(GD00) == HIGH ) {

        // Receive data from RF
        if (Phy.receive(&g_pkt) == ERR)
            return;

        Phy.sendSerial(&g_pkt);
    }

    return;
}

// Handle buffer overflow interrupt
void ISRVBufferOverflow() {

    if (int_buff == 0) {
        int_buff = 1;
        return;
    }

    cc1101.Strobe(CC1101_SFRX);
    cc1101.Strobe(CC1101_SRX);

    return;
}

// Handle Timer interrupt
void ISRVtimer1()
{

    return;
}

```

Arquivo Headers.h

```

#ifndef HEADERS_H
#define HEADERS_H 1

/*
*****
*
* Packet definition

```

```

*****
*/
typedef struct {

    // Physical header
    byte PhyHdr[4];

    // MAC header
    byte MACHdr[4];

    // Network header
    byte NetHdr[4];

    // Transport header
    byte TranspHdr[4];

    // 6 ADC Payload
    byte AD0[3];
    byte AD1[3];
    byte AD2[3];
    byte AD3[3];
    byte AD4[3];
    byte AD5[3];

    // 6 I/O Payload
    byte IO0[3];
    byte IO1[3];
    byte IO2[3];
    byte IO3[3];
    byte IO4[3];
    byte IO5[3];

} packet;

packet g_pkt;

/*
*****
*
*   INCLUDES FROM Net.h
*****
*/

#ifndef NET_H
#define NET_H 1

class NET
{
public:
    NET(void);
    inline void initialize(void);
    inline void send(packet * pkt);
    inline void receive(packet * pkt);

    byte ID_Base;
private:

```

```

};

extern NET Net;

#endif

/*
*****
*
*   INCLUDES FROM Mac.h
*****
*/

#ifndef MAC_H
#define MAC_H 1

class MAC
{
public:
    MAC(void);
    inline void initialize(void);
    inline void send(packet * pkt);
    inline void receive(packet * pkt);

private:
};

extern MAC Mac;

#endif

/*
*****
*
*   INCLUDES FROM Phy.h
*****
*/

#ifndef PHY_H
#define PHY_H 1

#define BUFFLEN  CC1101_PACKET_LEN
byte serialData[BUFFLEN + 1]; // 1 extra so we can easily add a /0

class PHY
{
public:
    PHY(void);
    inline void initialize();
    inline void send(packet * pkt);
    inline int receive(packet * pkt);

    void sendSerial(packet * pkt);

```

```

void receiveSerial(void);

byte txFifoFree(void);
void setChannel(byte channel);
void setPower(byte power);

byte POWER;           // Power
byte CHANNEL;         // Channel
int SERIAL_BAUDRATE; // Serial baudrate

private:
    int initCC1101Config(void);
};

// Deviation = 14.282227
// Base frequency = 914.999969
// Carrier frequency = 914.999969
// Channel number = 0
// Carrier frequency = 914.999969
// Modulated = false
// Modulation format = ASK/OOK
// Manchester enable = false
// Sync word qualifier mode = 30/32 sync word bits detected
// Preamble count = 4
// Channel spacing = 199.951172
// Carrier frequency = 914.999969
// Data rate = 1.19948
// RX filter BW = 58.035714
// Data format = Normal mode
// CRC enable = true
// Device address = 0
// Address config = No address check
// CRC autoflush = false
// PA ramping = false
// TX power = 0

const byte
CC1101_registerSettings[CC1101_NR_OF_CONFIGS][CC1101_NR_OF_REGISTERS] PROGMEM = {
{
    0x04, // IOCFG2      GDO2 Output Pin Configuration
    0x07, // IOCFG0      GDO0 Output Pin Configuration
    0x47, // FIFOTHRESH  RX FIFO and TX FIFO Thresholds
    0x34, // PKTLEN      Packet Length
    0x04, // PKTCTRL1    Packet Automation Control
    0x04, // PKTCTRL0    Packet Automation Control
    0x00, // ADDR        Device Address
    0x00, // CHANNR      Channel Number
    0x06, // FSCTRL1     Frequency Synthesizer Control
    0x00, // FSCTRL0     Frequency Synthesizer Control
    0x23, // FREQ2       Frequency Control Word, High Byte
    0x31, // FREQ1       Frequency Control Word, Middle Byte
    0x3B, // FREQ0       Frequency Control Word, Low Byte
    0xF5, // MDMCFG4     Modem Configuration
    0x83, // MDMCFG3     Modem Configuration

```

```

    0x33, // MDMCFG2      Modem Configuration
    0x22, // MDMCFG1      Modem Configuration
    0xF8, // MDMCFG0      Modem Configuration
    0x31, // DEVIATN      Modem Deviation Setting
    0x18, // MCSM0        Main Radio Control State Machine
Configuration
    0x16, // FOCCFG      Frequency Offset Compensation
Configuration
    0x6C, // BSCFG      Bit Synchronization Configuration
    0x03, // AGCCTRL2    AGC Control
    0x40, // AGCCTRL1    AGC Control
    0x91, // AGCCTRL0    AGC Control
    0x56, // FRENDR      Front End RX Configuration
    0x11, // FREND0      Front End TX Configuration
    0xE9, // FSCAL3      Frequency Synthesizer Calibration
    0x2A, // FSCAL2      Frequency Synthesizer Calibration
    0x00, // FSCAL1      Frequency Synthesizer Calibration
    0x1F, // FSCAL0      Frequency Synthesizer Calibration
    0x59, // FSTEST      Frequency Synthesizer Calibration
Control
    0x81, // TEST2      Various Test Settings
    0x35, // TEST1      Various Test Settings
    0x09, // TEST0      Various Test Settings

```

```

}
};

```

```

const                                     byte
CC1101_paTable[CC1101_NR_OF_CONFIGS][CC1101_PA_TABLESIZE] PROGMEM
={
// -30  -20   -15  -10    0    5    7    10
  {0x03,0x0E,0x1E,0x27,0x8E,0x84,0xCC,0xC3}, // Config 0 , 902
Mhz
};

```

```
extern PHY Phy;
```

```
#endif
```

```
#endif
```

Arquivo _1_Phy.ino

```
#include "Headers.h"
```

```
//----- Constructor -----
-----
```

```
PHY::PHY(){
```

```
}
```

```
void PHY::initialize(void)
```

```
{
```



```

//+++++
//
// AJUSTE DE POTÊNCIA
//+++++
// -30 -20 -15 -10 0 5 7 10 - Potência em dBm
// 0 1 2 3 4 5 6 7 - Número que deve
ser colocado na potência
POWER = 4; // Power

//+++++
//
// AJUSTE DO CANAL
//+++++
// Canal vai de 0 a 64. Canal com espaçamento de 200 kHz de 915
MHz a 928 MHz
CHANNEL = 0; // Channel

//+++++
//
// TAXA DA SERIAL PARA CONEXÃO DA BASE COM O
COMPUTADOR
//+++++
// Taxa de comunicação com a serial
SERIAL_BAUDRATE = 9600; // Serial baudrate

// Configuring serial baudrate
Serial.begin(SERIAL_BAUDRATE);

// Initialize RF transceptor (cc1101)
cc1101.PowerOnStartUp();

// Initialize RF transceptor configuration
initCC1101Config();

// Set Channel to be used
setChannel(CHANNEL);

// Set Power to be used
setPower(POWER);
}

// Read available data from Serial
void PHY::receiveSerial(void) {
    byte len; // Length of received data in Serial port
    byte fifoSize = 0; // Length of current TXFIFO

    static byte pos = 0; // Total amount of received byte in Serial
port

    // Read serial port and increased the old position
    len = Serial.available() + pos;

```

```

// Only process at most BUFFLEN chars
if (len > BUFFLEN ) {
    len = BUFFLEN;
}

// Check how much space we have in the TX fifo
fifoSize = Phy.txFifoFree(); // The fifoSize should be the
number of bytes in TX FIFO

// Reset variables and exit function
if ( fifoSize <= 0){
    Serial.flush();
    pos = 0;
    return;
}

// Don't overflow the TX fifo
if (len > fifoSize) {
    len = fifoSize;
}

// Finally read the Serial buffer
for (byte i = pos; i < len; i++){
    serialData[i] = Serial.read(); // serialData is our global
serial buffer
}

delayMicroseconds(1000); //
=====

// Verify if we have more data to receive
if ((Serial.available() > 0) && (len < CC1101_PACKET_LEN)){
    pos = len; // Keep the current bytes in the buffer and wait
till next round.
    return;
}

if (len == sizeof(packet)){

    // Transmit message using RF
    Phy.send((packet *)serialData);

    pos = 0; // Serial databuffer is free again.
}
else {
    Serial.flush();
    pos = 0;
    return;
}
}

// Transmit data to Serial
void PHY::sendSerial(packet * pkt) {

    // Write to serial based on output format:
    // Payload len, Source, Dest, Payload, Rssi, Lqi

```

```

    Serial.write((byte *)pkt, sizeof(packet)); // Data
}

// Read available txFifo size and handle underflow
byte PHY::txFifoFree(void) {

    byte size;

    cc1101.Read(CC1101_TXBYTES, &size);

    // Handle a potential TX underflow by flushing the TX FIFO as
    // described in section 10.1 of the CC 1100 datasheet
    if (size >= 64){ // State got here seems not right, so using
    size to make sure it no more than 64
        cc1101.Strobe(CC1101_SFTX);
        cc1101.Read(CC1101_TXBYTES,&size);
    }

    return (CC1101_FIFO_SIZE - size);
}

void PHY::setChannel(byte channel)
{
    cc1101.Write(CC1101_CHANNR, channel);
}

void PHY::setPower(byte power)
{
    cc1101.setPA(0, power);
}

int PHY::initCC1101Config(void){

    // Load the appropriate configuration
    cc1101.Setup(0);

    // Set my address
    cc1101.Write(CC1101_ADDR, Net.ID_Base);

    // Set PA config
    cc1101.setPA(0, 7);

    // Put cc1101 in tranceiver mode
    cc1101.Strobe(CC1101_SIDLE);
    delay(1);
    cc1101.Write(CC1101_MCSM1 , 0x0F );
    cc1101.Strobe(CC1101_SFTX);
    cc1101.Strobe(CC1101_SFRX);
    cc1101.Strobe(CC1101_SRX);

    return OK;
}

// Send data via RF
inline void PHY::send(packet * pkt){

```

```

byte *txData = (byte *)pkt;

cc1101.Strobe(CC1101_SIDLE);

// Payload data (Burst)
cc1101.WriteBurst(CC1101_TXFIFO, txData, sizeof(packet)); //
Write len bytes of the serialData buffer into the CC1101 TXFIFO

// Go to TX state
cc1101.Strobe(CC1101_STX);

// Wait until all bytes are sent
while(1){
    byte size;
    cc1101.Read(CC1101_TXBYTES, &size);
    if( size == 0 ){
        break;
    }
    else{
        cc1101.Strobe(CC1101_STX);
    }
}

}

// Receive data via RF
inline int PHY::receive(packet * pkt){

    byte stat, rssi, lqi;

    // Payload data (Burst)
    cc1101.ReadBurst(CC1101_RXFIFO, (byte *)pkt, sizeof(packet)); //
    Discard address bytes from payloadLen

    // RSSI
    cc1101.Read(CC1101_RXFIFO, &rssi);

    // LQI
    stat = cc1101.Read(CC1101_RXFIFO, &lqi);

    // Check if destination address is ID_Base
    if (pkt->NetHdr[0] != Net.ID_Base)
    {
        return ERR;
    }

    // Handle potential RX overflows by flushing the RF FIFO as
    // described in section 10.1 of the CC 1100 datasheet
    if ((stat & 0xF0) == 0x60){
        cc1101.Strobe(CC1101_SFRX); // Flush the RX buffer
        return ERR;
    }

    pkt->PhyHdr[2] = rssi;
    pkt->PhyHdr[3] = lqi;

```

```

    return OK;
}

//----- Preinstantiate Physic object -----
-----

PHY Phy = PHY();

```

Arquivo _2_MAC.ino

```

#include "Headers.h"

//----- Constructor -----
-----

MAC::MAC(){

    // Não existe implementação nesta versão

}

void MAC::initialize(void) {

}

inline void MAC::send(packet * pkt) {

    return;
}

inline void MAC::receive(packet * pkt) {

    return;
}

//----- Preinstantiate Network object -----
-----

MAC Mac = MAC();

```

Arquivo _3_Net.ino

```

#include "Headers.h"

//----- Constructor -----
-----

NET::NET(){

}

void NET::initialize(void) {

```

```

//+++++
+++++
//
//          ENDEREÇO DA BASE
//+++++
+++++
    ID_Base = 1;    // Identificação da base
}

inline void NET::send(packet * pkt) {
    return;
}

inline void NET::receive(packet * pkt) {
    return;
}

//----- Preinstantiate Network object -----
-----

NET Net = NET();

```

Anexo B – Algoritmo para estimar distâncias

```

### Algoritmo Inicial
Início
Variável Novo_Sensor      Caractere(1);
Variável Sensor            Sensor;
Variável Leitura_RSSI     Inteiro;
Variável Passo_Frequencia Inteiro;
Variável Offset            Caractere(2);
Novo_Sensor = "N";
Faça enquanto Novo_Sensor = "N"
  Escreva "Digite o Passo de Frequência: ";
  Leia Passo_Frequencia;
  Offset = "";
  Execute Sensor.Envia_Sinal(Leitura_RSSI);
  Offset = Hex(Arredondar((915 - Leitura_RSSI) /
  Passo_Frequencia));
  Escreva "Offset: " + Offset;
  Escreva "Deseja calibrar um novo sensor? (S/N): ";
  Leia Novo_Sensor;
Fim Faça;
Fim;

### Algoritmo Principal
Início
Variável Novo_Sensor      Caractere(1);
Variável Nova_Medicação  Caractere(1);
Variável Endereço[]      Inteiro;
Variável Canal[]         Inteiro;
Variável Offset[]        Caractere(2);
Variável Taxa_Serial[]   Inteiro;
Variável Potencia[]      Inteiro;
Variável Ligação_Sensores[][] Inteiro;
Variável Num_Medições    Inteiro;
Variável Contador        Inteiro;
Variável Contador_Matriz Inteiro;
Variável Arquivo_Medições Arquivo;
Variável Data_Arquivo    Caractere(8);
Variável Pacote          Caractere(3);
Variável Base_Variável   Caractere(3);
Variável Sensor          Caractere(3);
Variável RSSI            Caractere(6);
Variável Data_Hora       Caractere(20);
Variável Entrada_Sensor[] Inteiro;
Variável Saída_Sensor[]  Inteiro;
Variável Sensor          Sensor;
Novo_Sensor = "N";
Contador = 0;
Contador_Matriz = 0;
Data_Arquivo = Ext.Texto(DataSistema(),7,4) +
  Ext.Texto(DataSistema(),4,2) + Ext.Texto(DataSistema(),1,2);
Faça enquanto Novo_Sensor = "N";
  Escreva "Digite a Potência: ";
  Leia Potencia[Contador_Matriz];
  Escreva "Digite o Canal de Comunicação: ";
  Leia Canal[Contador_Matriz];

```

```

Escreva "Digite o Offset de Ajuste: ";
Leia Offset[Contador_Matriz];
Escreva "Digite a Taxa da Serial: ";
Leia Taxa_Serial[Contador_Matriz];
Contador_Matriz++;
Escreva "Deseja inserir um novo sensor? (S/N): ";
Leia Novo_Sensor;
Fim Faça
Novo_Sensor          = "N";
Contador_Matriz      = 0;
Faça enquanto Novo_Sensor = "N";
  Escreva "Digite o Sensor Base: ";
  Leia Ligação_Sensores[Contador_Matriz][0];
  Escreva "Digite o Sensor Nó: ";
  Leia Ligação_Sensores[Contador_Matriz][1];
  Escreva "Deseja inserir uma nova ligação? (S/N): ";
  Leia Novo_Sensor;
Fim Faça
Contador_Matriz      = 0;
Arquivo_Medições.Nome = "D:\Arquivo_Medições_" + Data_Arquivo +
  ".csv"
Arquivo_Medições.Abrir();
Faça enquanto Contador < Num_Medições
  Faça enquanto Ligação_Sensores [Contador_Matriz][0] = nulo
    Entrada_Sensor[0] = Ligação_Sensores [Contador_Matriz][0];
    Entrada_Sensor[1] = Ligação_Sensores [Contador_Matriz][1];
    Sensor.AbrirSerial(Entrada_Sensor);
    Sensor.EnviaSinal();
    Saída_Sensor      = Sensor.ReceberSinal();
    Pacote            = Saída_Sensor[0];
    Base               = Saída_Sensor[1];
    Sensor             = Saída_Sensor[2];
    RSSI              = Saída_Sensor[3];
    Data_Hora         = DataSistema() + HoraSistema();
    Arquivo_Medições.Escreva = Pacote + Base + Sensor + RSSI +
    Data_Hora;
    Sensor.FecharSerial();
  Fim Faça;
Fim Faça;
Arquivo_Medições.Fechar();
Fim;

```


Anexo C – Resultados das medições (distâncias X RSSI em dBm)

1ª medição:

Pacote	Distâncias						
	100 cm	200 cm	300 cm	400 cm	500 cm	600 cm	700 cm
1	-62,0	-63,0	-66,0	-74,0	-84,0	-75,0	-83,5
2	-61,5	-62,5	-66,0	-72,5	-82,0	-75,0	-85,5
3	-61,0	-62,5	-66,0	-72,0	-83,5	-76,0	-80,0
4	-61,5	-63,0	-66,5	-72,5	-82,5	-74,5	-82,5
5	-62,0	-62,5	-67,5	-74,5	-82,5	-77,5	-84,0
6	-61,0	-62,5	-67,0	-72,0	-83,0	-76,0	-86,0
7	-61,5	-62,5	-66,0	-73,0	-82,0	-77,5	-84,5
8	-62,0	-63,0	-66,5	-75,5	-85,5	-78,0	-83,5
9	-61,0	-62,5	-67,0	-74,0	-82,5	-75,5	-84,0
10	-61,5	-62,5	-65,0	-74,5	-82,0	-76,5	-83,0
11	-62,0	-62,0	-66,0	-73,0	-84,5	-76,5	-86,0
12	-62,0	-62,5	-67,0	-72,0	-85,5	-74,5	-86,0
13	-61,0	-62,0	-66,0	-73,5	-80,5	-76,0	-84,5
14	-61,0	-62,5	-66,5	-71,5	-82,5	-77,5	-84,5
15	-61,0	-62,5	-66,0	-71,5	-83,5	-76,5	-87,0
16	-61,5	-62,5	-66,5	-71,0	-83,5	-77,0	-84,5
17	-62,0	-62,5	-66,5	-71,0	-81,5	-74,5	-84,0
18	-62,5	-62,5	-66,5	-72,0	-82,0	-75,5	-85,5
19	-61,5	-62,5	-66,0	-72,0	-82,5	-76,5	-83,0
20	-60,5	-62,5	-66,5	-76,0	-83,5	-74,5	-81,0
21	-60,0	-62,5	-67,0	-73,5	-81,0	-75,5	-81,0
22	-60,5	-62,0	-67,0	-72,0	-82,5	-74,5	-84,0
23	-61,0	-62,5	-66,5	-74,0	-82,0	-74,5	-83,5
24	-61,5	-63,0	-67,0	-71,5	-81,5	-76,5	-82,5
25	-61,5	-63,0	-67,0	-71,0	-83,0	-75,5	-84,5
26	-61,5	-62,5	-66,5	-72,0	-82,0	-76,5	-84,5
27	-61,0	-62,5	-67,0	-74,0	-83,0	-76,0	-82,5
28	-61,5	-62,0	-67,0	-73,5	-84,0	-77,0	-82,5
29	-61,0	-62,0	-66,0	-72,0	-81,5	-76,5	-83,5
30	-62,0	-63,0	-66,5	-70,5	-81,5	-77,0	-84,5
31	-62,5	-63,0	-66,0	-71,0	-82,5	-75,5	
32	-60,5	-62,0	-66,5	-74,0	-82,5	-77,0	
33	-62,0	-63,0	-66,5	-73,0	-83,5	-77,0	
34	-61,5	-61,5	-66,0	-71,5	-82,0	-76,0	
35	-61,5	-62,5	-67,0	-72,5	-82,0	-75,5	
36	-62,0	-62,5	-66,0	-70,0	-82,0	-77,5	

Pacote	Distâncias						
	100 cm	200 cm	300 cm	400 cm	500 cm	600 cm	700 cm
37	-61,5	-62,5	-66,5	-71,5	-81,0	-76,0	
38	-61,5	-62,5	-66,0	-72,0	-82,5	-75,0	
39	-61,5	-62,0	-66,5	-72,5	-83,5	-77,0	
40	-62,0	-62,5	-67,0	-72,0	-84,5	-76,0	
41	-61,5	-62,5	-67,0	-72,0	-81,5	-75,5	
42	-62,0	-62,0	-66,5	-73,0	-82,0	-77,0	
43	-61,0	-62,5	-66,5	-72,0	-82,0	-76,5	
44	-61,0	-63,0	-65,5	-71,0	-83,0	-76,5	
45	-61,5	-62,0	-67,0	-72,0	-83,5	-77,0	
46	-61,0	-62,0	-66,5	-73,5	-82,5	-76,5	
47	-61,0	-62,5	-67,0	-71,0		-76,5	
48	-61,0	-62,5	-67,0	-73,0		-76,5	
49	-61,5	-62,0	-66,0	-72,5		-75,5	
50	-62,0	-62,5	-66,5	-72,5		-75,5	
51	-62,0	-62,0	-67,0	-73,0		-76,5	
52	-60,5	-62,0	-66,0	-73,0		-76,5	
53	-61,0	-61,5	-67,0	-72,5		-77,5	
54	-61,0	-62,0	-66,5	-73,0		-75,0	
55	-60,5	-62,5	-66,0	-72,0		-77,0	
56	-60,5	-62,5	-66,5	-71,5		-76,0	
57	-61,0	-62,0	-66,5	-71,5		-75,5	
58	-61,5	-62,0	-66,5	-74,0		-76,0	
59	-61,0	-62,5	-67,5	-72,5		-75,0	
60	-61,0	-62,5	-67,0	-71,5		-77,0	
61	-61,0	-62,5	-66,5	-70,5		-76,5	
62	-60,5	-61,5	-66,5	-71,5		-75,0	
63	-61,0	-62,5	-66,5	-72,5		-75,0	
64	-60,5	-62,0	-68,0	-72,0		-76,0	
65	-60,5	-62,5	-68,0	-73,5		-76,5	
66	-61,0	-62,5	-66,0	-71,5		-76,0	
67	-61,0	-62,5	-66,0	-72,0		-77,0	
68	-61,0	-62,5	-66,5	-74,0		-76,5	
69	-61,0	-62,0	-67,5	-72,5		-75,0	
70	-61,0	-62,0	-66,0	-72,0		-76,5	
71	-61,0	-62,5	-66,0	-71,0		-75,5	
72	-62,0	-62,5	-66,5	-72,0		-76,5	
73	-61,5	-63,0	-67,0	-72,5		-75,0	
74	-61,5	-62,0	-67,0	-72,5		-75,5	
75	-61,0	-62,5	-66,5	-71,0		-75,5	

Pacote	Distâncias						
	100 cm	200 cm	300 cm	400 cm	500 cm	600 cm	700 cm
76	-61,0	-63,5	-65,0	-71,5		-75,0	
77	-61	-62,0	-65,5	-71,0		-75,0	
78	-61,0	-62,5	-67,0	-71,5		-75,5	
79	-61,0	-62,5	-65,5	-72,0		-76,0	
80	-61,5	-63,0	-66,5	-71,5		-77,5	
81	-61,0	-63,5	-66,5	-71,5		-76,5	
82	-61,5	-63,0	-67,0	-72,0		-79,0	
83	-61,5	-62,5	-66,5	-72,5		-75,5	
84	-61,5	-62,5	-66,0	-71,5		-76,0	
85	-62,0	-62,0	-66,0	-72,0		-75,5	
86	-61,0	-63,0	-65,5	-72,0		-77,0	
87	-61,0	-63,0	-67,0	-72,5		-76,0	
88	-61,5	-63,0	-66,5	-71,5		-76,0	
89	-61,5	-63,0	-66,0	-72,0		-76,5	
90	-60,5	-63,0	-66,0	-71,0		-76,0	
91	-61,5	-63,0	-66,0	-72,5		-76,0	
92	-61,0	-63,5	-66,0	-71,5		-76,0	
93	-61,5	-63,5	-66,5	-72,5		-75,0	
94	-61,0	-64,0	-66,0	-71,5		-76,0	
95	-61,0	-63,0	-66,5	-71,5		-75,0	
96	-61,0	-63,5	-65,5	-71,5		-76,5	
97	-61,0	-63,5	-66,5	-71,0		-74,5	
98	-60,5	-63,0	-66,5	-71,5		-76,5	
99	-61,0	-63,0	-66,0	-72,5		-74,5	
100	-61,0	-63,0	-68,0	-70,0			

2ª Medição:

Pacote	100 cm	200 cm	300 cm	400 cm	500 cm	600 cm
1	-59,0	-65,5	-77,5	-83,0	-80,5	-83,0
2	-59,0	-65,5	-77,0	-84,5	-81,5	-83,0
3	-59,0	-65,5	-77,0	-85,0	-81,5	-84,0
4	-59,0	-66,5	-77,5	-83,0	-82,0	-81,0
5	-59,5	-65,0	-75,5	-84,0	-80,5	-80,5
6	-59,5	-65,5	-76,5	-82,0	-81,5	-84,5
7	-59,0	-66,0	-77,5	-81,5	-82,5	-81,5
8	-59,5	-67,0	-77,0	-79,5	-80,0	-81,5
9	-59,5	-67,0	-77,0	-83,5	-82,0	-84,0
10	-59,5	-65,5	-76,5	-84,5	-82,0	-81,5
11	-59,5	-66,0	-77,5	-80,5	-80,0	-85,0
12	-59,0	-65,5	-77,0	-79,5	-81,0	-83,0
13	-59,5	-65,5	-78,5	-81,0	-80,5	-84,5
14	-59,5	-65,5	-76,0	-82,5	-83,5	-82,0
15	-59,5	-68,5	-77,0	-81,0	-80,5	-84,5
16	-59,5	-66,5	-78,5	-81,5	-82,5	-84,5
17	-59,0	-65,0	-79,0	-81,0	-82,0	-85,0
18	-59,0	-65,0	-77,5	-84,0	-81,0	-84,5
19	-59,0	-66,5	-77,5	-83,0	-81,0	-82,0
20	-59,5	-65,5	-77,5	-82,0	-79,5	-84,5
21	-59,5	-65,5	-78,0	-83,0	-80,5	-83,0
22	-59,0	-65,5	-78,0	-80,0	-82,5	-82,5
23	-59,5	-66,5	-79,0	-83,5	-79,5	-84,0
24	-59,5	-66,0	-79,0	-84,5	-80,0	-86,5
25	-59,5	-67,0	-77,0	-83,0	-81,0	-83,0
26	-59,0	-66,0	-75,5	-81,5	-82,5	-85,0
27	-59,0	-65,5	-77,5	-81,0	-81,0	-85,0
28	-59,0	-67,0	-77,5	-81,0	-79,5	-84,0
29	-59,5	-66,0	-77,5	-83,0	-81,5	-82,0
30	-59,5	-66,5	-77,5	-84,5	-80,0	-83,0
31	-59,0	-66,0	-78,0	-83,0	-82,5	-84,0
32	-59,0	-66,0	-76,5	-81,5	-79,5	-82,5
33	-59,0	-65,0	-76,0	-83,5	-80,5	-85,0
34	-59,5	-65,5	-77,0	-82,5	-81,0	-83,0
35	-59,0	-67,5	-75,0	-81,0	-81,0	-82,0
36	-59,5	-65,5	-78,0	-83,0	-82,5	-82,0
37	-59,0	-65,5	-76,0	-82,0	-82,5	-82,0
38	-59,0	-64,5	-79,0	-85,0	-82,5	-85,0
39	-58,5	-65,5	-80,0	-81,5	-82,0	-83,5

Pacote	100 cm	200 cm	300 cm	400 cm	500 cm	600 cm
40	-59,5	-66,0	-79,0	-82,0	-80,0	-81,5
41	-59,5	-66,5	-77,0	-83,5	-80,5	-83,0
42	-59,5	-66,5	-75,5	-82,0	-81,5	-84,0
43	-59,5	-65,5	-75,5	-81,5	-81,5	-82,0
44	-59,0	-66,0	-75,5	-85,5	-80,0	-84,0
45	-59,0	-65,5	-77,0	-83,5	-80,5	-82,0
46	-59,5	-65,5	-76,0	-83,5	-81,0	-82,5
47	-59,0	-65,5	-75,0	-81,5	-83,0	-82,5
48	-59,5	-66,5	-78,5	-81,5	-80,0	-84,5
49	-59,5	-64,5	-77,0	-82,5	-80,5	-82,5
50	-59,5	-66,5	-76,0	-83,5	-80,5	-83,0
51	-59,5	-65,0	-78,0	-83,0	-79,0	-82,5
52	-59,0	-66,0	-77,0	-83,5	-79,0	-83,0
53	-59,5	-66,5	-78,5	-82,0	-82,0	-84,0
54	-59,5	-66,0	-78,0	-83,5	-81,0	-85,0
55	-59,0	-65,5	-75,5	-81,0	-79,5	-85,5
56	-59,0	-65,5	-79,0	-82,5	-79,5	-83,0
57	-59,0	-66,0	-78,5	-83,5	-81,0	-83,5
58	-59,0	-65,0	-79,5	-82,5	-80,5	-83,0
59	-59,0	-66,0	-78,5	-82,0	-82,0	-82,5
60	-59,0	-65,5	-79,0	-84,0	-79,5	-83,5
61	-59,0	-65,5	-76,5	-83,0	-81,5	-83,0
62	-59,0	-66,0	-76,5	-83,0	-83,0	-83,0
63	-59,0	-66,0	-78,5	-83,0	-80,0	-81,5
64	-59,0	-65,5	-75,5	-83,0	-82,0	-82,0
65	-59,0	-65,5	-77,0	-82,5	-80,0	-82,0
66	-59,0	-65,5	-77,0	-82,5	-80,0	-82,0
67	-59,0	-65,0	-77,0	-83,5	-81,0	-82,0
68	-59,0	-65,5	-76,5	-84,0	-82,0	-82,5
69	-59,0	-65,0	-76,5	-83,0	-82,5	
70	-59,5	-64,5	-77,0	-83,0	-80,5	
71	-59,5	-65,5	-76,5	-84,5	-82,0	
72	-59,5	-65,0	-76,5	-82,5	-80,5	
73	-59,0	-65,0	-78,0	-81,0	-81,5	
74	-59,0	-65,5	-78,5	-81,5	-80,5	
75	-59,5	-66,0	-77,5	-81,0	-79,5	
76	-59,0	-66,0	-78,5	-80,5	-80,5	
77	-59,5	-66,0	-78,5	-82,5	-81,0	
78	-59,5	-65,0	-75,5	-83,0	-80,5	
79	-59,0	-65,5	-76,0		-79,5	

Pacote	100 cm	200 cm	300 cm	400 cm	500 cm	600 cm
80	-59,0	-64,5	-76,5		-81,0	
81	-59,0	-68,0	-77,5		-80,5	
82	-59,5	-65,5	-76,0		-81,0	
83	-60,0	-66,5	-77,0		-83,0	
84	-59,5	-66,0	-78,0		-82,5	
85	-59,5	-66,0	-76,0		-81,0	
86	-59,0	-65,5	-77,0		-81,0	
87	-59,0	-66,5	-77,5		-80,5	
88	-59,5	-66,5	-77,0		-81,0	
89	-59,0	-66,5	-76,5		-81,5	
90	-59,0	-66,0	-76,5		-81,0	
91	-59,0	-66,0	-76,5		-79,5	
92	-59,5	-66,0	-77,0		-79,5	
93	-59,0	-65,5	-74,5		-79,5	
94	-59,5	-66,0	-78,5		-81,0	
95	-59,5	-65,5	-77,5		-80,5	
96	-59,0	-66,0	-75,5		-80,0	
97	-59,5	-66,0	-77,0		-79,5	
98	-59,0	-65,5	-77,0		-81,5	
99	-59,5	-65,5	-76,0		-81,0	
100	-59,5	-65,5	-77,5		-81,0	

3ª medição:

Pacote	100 cm	200 cm	300 cm	400 cm	500 cm	600 cm	700 cm
1	-58,5	-65,0	-68,0	-76,0	-80,0	-75,0	-83,5
2	-58,0	-66,5	-69,5	-78,5	-79,0	-75,5	-83,5
3	-59,0	-66,0	-70,5	-77,5	-82,5	-76,0	-79,0
4	-59,0	-67,0	-70,5	-79,5	-82,0	-77,0	-82,5
5	-63,0	-62,5	-70,5	-76,5	-85,0	-75,0	-83,0
6	-58,5	-63,5	-70,0	-77,5	-81,5	-74,5	-80,5
7	-59,5	-64,5	-69,5	-77,0	-83,0	-74,0	-84,5
8	-59,0	-65,5	-67,0	-76,5	-82,5	-75,0	-82,0
9	-58,5	-65,0	-69,0	-76,5	-83,5	-74,5	-85,5
10	-59,5	-65,0	-71,5	-77,5	-86,0	-75,5	-83,5
11	-59,0	-67,0	-71,5	-77,0	-82,0	-76,0	-82,5
12	-59,0	-65,0	-73,0	-77,0	-84,0	-75,5	-79,5
13	-59,0	-65,5	-71,0	-77,5	-83,5	-75,0	-80,0
14	-59,0	-65,0	-70,5	-77,5	-82,0	-75,5	-79,5
15	-59,0	-65,0	-70,0	-78,0	-84,0	-76,0	-79,5
16	-59,0	-65,5	-71,0	-76,5	-84,5	-75,5	-81,5
17	-59,0	-65,0	-70,5	-76,5	-83,0	-73,0	-83,0
18	-59,0	-66,0	-70,0	-80,0	-81,5	-71,5	-82,0
19	-59,0	-65,0	-70,5	-76,0	-83,5	-72,5	-80,0
20	-59,0	-65,0	-71,5	-80,0	-82,5	-75,0	-87,5
21	-59,0	-65,0	-71,0	-76,0	-83,0	-76,0	
22	-59,0	-65,5	-70,5	-78,5	-84,5	-76,0	
23	-59,0	-65,5	-71,0	-79,0	-84,0	-75,0	
24	-58,0	-65,5	-71,0	-78,5	-84,0	-76,5	
25	-58,5	-66,0	-71,0	-77,0	-83,0	-71,5	
26	-58,5	-65,0	-70,5	-76,5	-81,5	-79,0	
27	-58,5	-66,0	-70,0	-76,5	-83,0	-77,5	
28	-59,0	-65,5	-70,5	-77,0	-83,0	-78,0	
29	-58,5	-65,0	-71,5	-79,0	-86,0	-79,5	
30	-58,5	-66,5	-71,5	-81,0	-83,0	-78,0	
31	-59,0	-65,5	-71,0	-82,5	-82,5	-79,5	
32	-59,5	-65,0	-71,5	-82,0	-83,5	-76,5	
33	-59,0	-65,0	-71,0	-82,0	-82,5	-75,0	
34	-59,0	-66,0	-70,0	-81,5	-82,5	-76,0	
35	-59,0	-66,0	-70,5	-79,5	-82,0	-77,5	
36	-59,0	-65,5	-70,5	-81,0	-80,5	-76,0	
37	-59,0	-66,0	-70,5	-80,0	-84,5	-80,0	
38	-58,5	-66,0	-70,0	-81,5	-82,0	-79,5	
39	-58,5	-65,5	-69,5	-81,0	-84,0	-76,0	

Pacote	100 cm	200 cm	300 cm	400 cm	500 cm	600 cm	700 cm
40	-60,5	-65,0	-71,0	-80,0	-81,5	-77,5	
41	-58,5	-65,0	-70,5	-81,5	-83,0	-78,0	
42	-59,5	-65,0	-70,5	-82,0	-81,5	-78,5	
43	-59,5	-65,0	-71,0	-82,5	-82,0	-76,5	
44	-62,0	-65,5	-71,0	-81,5	-83,5	-77,5	
45	-60,0	-66,0	-71,0	-81,5	-82,5	-76,5	
46	-60,5	-64,5	-70,5	-80,5	-82,0	-76,5	
47	-59,0	-66,5	-70,5	-80,5	-81,0	-76,0	
48	-58,5	-65,0	-71,0	-82,0	-82,0	-77,0	
49	-59,0	-65,0	-69,0	-82,5	-80,5	-76,5	
50	-59,5	-65,5	-72,5	-81,0	-79,5	-79,0	
51	-58,5	-66,5	-69,5	-82,5	-80,0	-77,0	
52	-59,0	-64,0	-70,5	-81,5	-80,5	-76,0	
53	-59,0	-64,5	-71,5	-82,0	-84,0	-76,0	
54	-59,0	-64,5	-70,5	-79,5	-85,0	-76,0	
55	-58,5	-64,0	-70,0	-80,5	-82,0	-76,0	
56	-59,0	-65,5	-73,0	-82,0		-77,0	
57	-59,0	-64,5	-69,5	-79,0		-77,0	
58	-58,5	-64,5	-71,0	-81,5		-75,5	
59	-59,0	-65,0	-72,0	-80,0		-75,0	
60	-59,5	-64,0	-69,0	-77,5		-78,5	
61	-59,0	-64,5	-72,5	-78,0		-77,5	
62	-59,0	-65,5	-68,5	-75,0		-75,0	
63	-59,0	-65,0	-69,5	-75,0		-79,0	
64	-59,0	-64,0	-69,5	-76,5		-82,0	
65	-59,5	-64,5	-69,5	-76,5		-84,0	
66	-59,0	-65,0	-69,0	-76,5		-81,0	
67	-59,5	-64,0	-68,5	-85,0		-79,5	
68	-59,0	-63,5	-67,0	-79,5		-76,5	
69	-59,0	-65,5	-68,5	-80,0		-75,5	
70	-58,5	-63,5	-67,0	-75,5		-79,0	
71	-59,0	-64,0	-69,0	-77,0		-77,0	
72	-59,0	-65,0	-68,5	-75,5		-78,5	
73	-59,0	-64,5	-68,5	-81,5		-78,5	
74	-59,0	-65,5	-67,5	-76,5		-77,5	
75	-59,5	-64,0	-68,0	-80,0		-76,5	
76	-59,0	-64,0	-66,5	-79,0		-77,0	
77	-59,5	-64,5	-68,0	-80,5		-78,5	
78	-59,0	-64,0	-68,5	-79,5		-77,0	
79	-59,0	-63,5	-67,5	-80,0		-75,0	

Pacote	100 cm	200 cm	300 cm	400 cm	500 cm	600 cm	700 cm
80	-59,5	-64,0	-68,0	-81,0		-76,5	
81	-59,0	-63,0	-68,0	-82,0		-76,0	
82	-59,0	-64,0	-68,0	-80,5		-75,5	
83	-59,0	-63,5	-67,5	-80,0		-74,5	
84	-59,0	-64,0	-68,0	-80,5		-75,0	
85	-59,5	-64,0	-68,0	-82,0		-76,0	
86	-58,5	-64,0	-68,0	-76,5		-77,0	
87	-59,0	-64,0	-67,5	-78,5		-75,5	
88	-59,0	-63,5	-68,5	-73,0		-75,5	
89	-59,0	-64,0	-67,0	-80,5		-75,0	
90	-59,0	-63,5	-68,0	-77,0		-75,5	
91	-59,0	-64,0	-68,5	-77,0		-75,0	
92	-58,5	-64,0	-68,5	-79,0		-75,5	
93	-59,0	-64,5	-67,0	-77,5		-76,0	
94	-60,0	-64,0	-68,5	-82,5		-75,0	
95	-59,5	-64,0	-67,5			-78,0	
96	-59,0	-63,5	-68,0			-77,0	
97	-59,5	-64,0	-67,0			-75,5	
98	-59,5	-64,5	-68,0			-79,5	
99	-59,5	-64,0	-67,5				
100	-60,0	-64,5	-66,5				

Apêndices

Apêndice A – Resultados das medições (distâncias X RSSI em dBm) para aplicação do modelo

Medição 1

RSSI	Distância	Resultado	Taxa de Erro
-58,5	100	95,1235	-5%
-59,0	100	105,5690	6%
-59,0	100	105,5690	6%
-59,0	100	105,5690	6%
-59,0	100	105,5690	6%
-58,5	100	95,1235	-5%
-58,5	100	95,1235	-5%
-59,0	100	105,5690	6%
-58,5	100	95,1235	-5%
-59,0	100	105,5690	6%
-59,0	100	105,5690	6%
-58,5	100	95,1235	-5%
-59,0	100	105,5690	6%
-58,5	100	95,1235	-5%
-58,5	100	95,1235	-5%
-63,5	200	199,5785	0%
-63,0	200	189,1330	-5%
-63,0	200	189,1330	-5%
-63,0	200	189,1330	-5%
-64,0	200	210,0240	5%
-63,5	200	199,5785	0%
-64,0	200	210,0240	5%
-63,5	200	199,5785	0%
-63,5	200	199,5785	0%
-63,0	200	189,1330	-5%
-63,0	200	189,1330	-5%
-63,5	200	199,5785	0%
-63,5	200	199,5785	0%
-64,0	200	210,0240	5%
-64,0	200	210,0240	5%
-68,0	300	293,5880	-2%
-69,0	300	314,4790	5%
-69,0	300	314,4790	5%
-69,0	300	314,4790	5%
-68,5	300	304,0335	1%

RSSI	Distância	Resultado	Taxa de Erro
-68,0	300	293,5880	-2%
-68,5	300	304,0335	1%
-69,0	300	314,4790	5%
-68,5	300	304,0335	1%
-69,0	300	314,4790	5%
-69,0	300	314,4790	5%
-68,5	300	304,0335	1%
-68,5	300	304,0335	1%
-69,0	300	314,4790	5%
-68,5	300	304,0335	1%
-73,0	400	398,0430	0%
-73,5	400	408,4885	2%
-72,5	400	387,5975	-3%
-73,0	400	398,0430	0%
-73,0	400	398,0430	0%
-73,0	400	398,0430	0%
-73,5	400	408,4885	2%
-73,5	400	408,4885	2%
-72,5	400	387,5975	-3%
-72,5	400	387,5975	-3%
-72,5	400	387,5975	-3%
-73,0	400	398,0430	0%
-72,5	400	387,5975	-3%
-73,0	400	398,0430	0%
-72,5	400	387,5975	-3%
-77,0	500	481,6070	-4%
-78,0	500	502,4980	0%
-78,0	500	502,4980	0%
-78,0	500	502,4980	0%
-78,0	500	502,4980	0%
-79,0	500	523,3890	5%
-78,0	500	502,4980	0%
-78,5	500	512,9435	3%
-78,5	500	512,9435	3%
-79,0	500	523,3890	5%
-78,5	500	512,9435	3%
-79,0	500	523,3890	5%
-79,0	500	523,3890	5%
-78,5	500	512,9435	3%
-79,0	500	523,3890	5%

Medição 2

RSSI	Distância	Resultado	Taxa de Erro
-59,5	100	88,5045	-11%
-60,0	100	96,7200	-3%
-60,5	100	104,9355	5%
-60,5	100	104,9355	5%
-59,5	100	88,5045	-11%
-60,0	100	96,7200	-3%
-60,0	100	96,7200	-3%
-60,5	100	104,9355	5%
-60,5	100	104,9355	5%
-59,5	100	88,5045	-11%
-60,5	100	104,9355	5%
-60,0	100	96,7200	-3%
-60,5	100	104,9355	5%
-60,0	100	96,7200	-3%
-60,0	100	96,7200	-3%
-65,5	200	187,0905	-6%
-66,0	200	195,3060	-2%
-65,5	200	187,0905	-6%
-66,0	200	195,3060	-2%
-66,5	200	203,5215	2%
-66,5	200	203,5215	2%
-66,0	200	195,3060	-2%
-66,5	200	203,5215	2%
-66,5	200	203,5215	2%
-66,5	200	203,5215	2%
-66,0	200	195,3060	-2%
-66,0	200	195,3060	-2%
-65,5	200	187,0905	-6%
-66,0	200	195,3060	-2%
-66,5	200	203,5215	2%
-73,0	300	310,3230	3%
-72,5	300	302,1075	1%
-72,0	300	293,8920	-2%
-73,0	300	310,3230	3%
-73,0	300	310,3230	3%
-73,0	300	310,3230	3%
-72,5	300	302,1075	1%
-72,5	300	302,1075	1%

RSSI	Distância	Resultado	Taxa de Erro
-72,0	300	293,8920	-2%
-73,0	300	310,3230	3%
-72,0	300	293,8920	-2%
-72,5	300	302,1075	1%
-72,5	300	302,1075	1%
-73,0	300	310,3230	3%
-72,0	300	293,8920	-2%
-79,0	400	408,9090	2%
-78,5	400	400,6935	0%
-78,0	400	392,4780	-2%
-79,0	400	408,9090	2%
-79,0	400	408,9090	2%
-79,0	400	408,9090	2%
-78,5	400	400,6935	0%
-78,5	400	400,6935	0%
-78,0	400	392,4780	-2%
-78,0	400	392,4780	-2%
-78,5	400	400,6935	0%
-78,0	400	392,4780	-2%
-78,0	400	392,4780	-2%
-78,5	400	400,6935	0%
-78,5	400	400,6935	0%

Medição 3

RSSI	Distância	Resultado	Taxa de Erro
-58,5	100	98,8235	-1%
-59,0	100	106,8390	7%
-59,0	100	106,8390	7%
-58,5	100	98,8235	-1%
-59,0	100	106,8390	7%
-58,5	100	98,8235	-1%
-59,0	100	106,8390	7%
-59,0	100	106,8390	7%
-59,0	100	106,8390	7%
-59,0	100	106,8390	7%
-59,0	100	106,8390	7%
-58,0	100	90,8080	-9%
-58,5	100	98,8235	-1%
-58,5	100	98,8235	-1%
-59,0	100	106,8390	7%
-65,0	200	203,0250	2%
-64,5	200	195,0095	-2%
-65,5	200	211,0405	6%
-65,0	200	203,0250	2%
-65,0	200	203,0250	2%
-65,0	200	203,0250	2%
-65,5	200	211,0405	6%
-65,0	200	203,0250	2%
-65,0	200	203,0250	2%
-65,5	200	211,0405	6%
-65,0	200	203,0250	2%
-65,0	200	203,0250	2%
-65,5	200	211,0405	6%
-65,0	200	203,0250	2%
-65,5	200	211,0405	6%
-71,0	300	299,2110	0%
-71,5	300	307,2265	2%
-71,5	300	307,2265	2%
-71,0	300	299,2110	0%
-71,5	300	307,2265	2%
-71,0	300	299,2110	0%
-71,0	300	299,2110	0%
-70,5	300	291,1955	-3%

RSSI	Distância	Resultado	Taxa de Erro
-70,5	300	291,1955	-3%
-71,0	300	299,2110	0%
-70,5	300	291,1955	-3%
-70,5	300	291,1955	-3%
-71,0	300	299,2110	0%
-71,0	300	299,2110	0%
-72,0	300	315,2420	5%
-77,5	400	403,4125	1%
-76,5	400	387,3815	-3%
-77,5	400	403,4125	1%
-77,0	400	395,3970	-1%
-76,5	400	387,3815	-3%
-76,5	400	387,3815	-3%
-77,5	400	403,4125	1%
-77,0	400	395,3970	-1%
-77,5	400	403,4125	1%
-78,0	400	411,4280	3%
-76,5	400	387,3815	-3%
-77,0	400	395,3970	-1%
-76,5	400	387,3815	-3%
-78,5	400	419,4435	5%
-77,0	400	395,3970	-1%
-83,0	500	491,5830	-2%
-82,5	500	483,5675	-3%
-83,5	500	499,5985	0%
-84,0	500	507,6140	2%
-83,5	500	499,5985	0%
-84,5	500	515,6295	3%
-83,0	500	491,5830	-2%
-83,5	500	499,5985	0%
-83,0	500	491,5830	-2%
-82,5	500	483,5675	-3%
-83,5	500	499,5985	0%
-84,5	500	515,6295	3%
-83,0	500	491,5830	-2%
-83,5	500	499,5985	0%
-82,5	500	483,5675	-3%

Apêndice B – Manual de operação *software* Java

Basicamente, o *software* desenvolvido no trabalho funciona através de um cadastro simples e a operação em si. Para o cadastro, são apresentados os seguintes requisitos:

Porta COM: são listadas as portas que estão em operação no momento no computador. É necessária a seleção da porta ao qual o nó sensor está instalado.

OID Base / OID Sensor / Novo OID Base / Novo OID Sensor: Local para inserção dos *Object Identifiers* (OID) atuais e novos dos nós sensores, respectivamente.

Time Out: Tempo máximo para um pacote transmitido ser declarado perdido.

Trocar ID: Troca do OID dos nós sensores.

Apagar Base: Apaga uma relação entre dois nós sensores.

Adicionar Base: Cadastra uma relação entre dois nós sensores.

Figura A – Tela de cadastro de Nós Sensores

Na Figura B, é apresentada a tela para coleta de dados. Nota-se que é possível estabelecer o local onde será salvo o arquivo CSV com as medidas

realizadas, a quantidade de medidas realizadas e sequência, além do intervalo de tempo entre os pacotes.

Repetições: quantidade de vezes em sequência que um pacote será transmitido.

Diretório Extração de Dados: diretório onde os resultados coletados na tabela de Leituras dos Sensores serão armazenados em arquivo CSV.

Intervalo de Pacotes: intervalo de tempo entre cada repetição do pacote.

Enviar Dados: envia dados ao outro sensor.

Receber Dados: envia/recebe pacotes a outro nó sensor.

Gerar Gráficos: gera gráficos de leitura dos sensores.

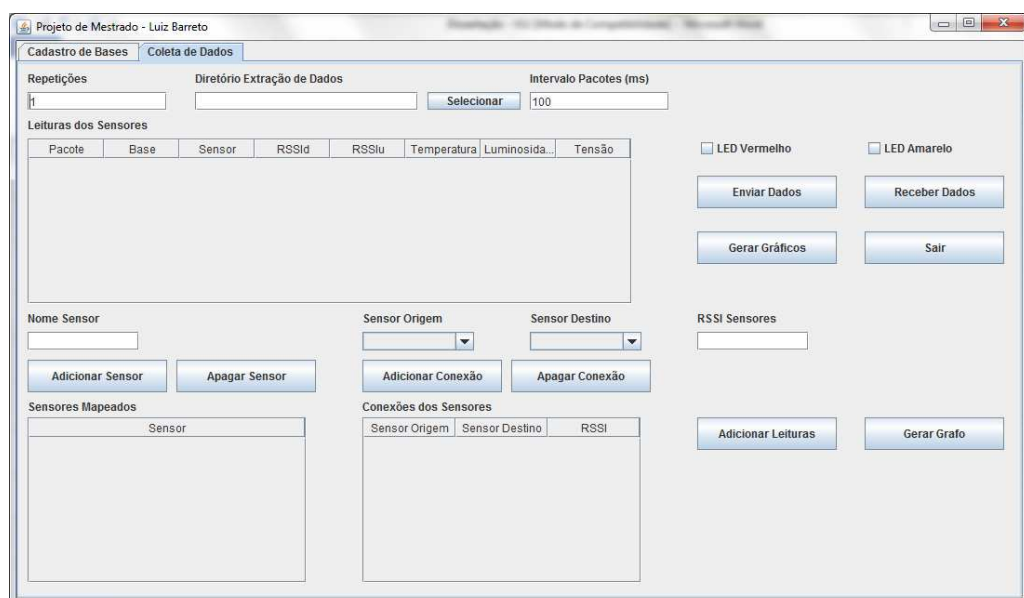


Figura B – Tela de coleta de dados

Com o *software* apresentado, foram realizadas as medidas presentes no trabalho. Com ele, é possível também realizar novas medidas, para aplicação em outros métodos estimados e em outros usos relacionados a medições com a plataforma Rádúino.