

RODRIGO HIROSHI MUROFUSHI

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE
POSICIONAMENTO INTERNO BASEADO NA
POTÊNCIA DO SINAL DE RESPOSTA DE UM
SISTEMA RFID**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2016

RODRIGO HIROSHI MUROFUSHI

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE POSICIONAMENTO
INTERNO BASEADO NA POTÊNCIA DO SINAL DE RESPOSTA DE
UM SISTEMA RFID**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos e Vibrações.

Orientador: Prof. Dr. José Jean-Paul Z. de S. Tavares.

UBERLÂNDIA - MG

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

M977d Murofushi, Rodrigo Hiroshi, 1988-
2016 Desenvolvimento de um sistema de posicionamento interno baseado na
potência do sinal de resposta de um sistema RFID / Rodrigo Hiroshi Murofushi. -
2016.
125 f. : il.

Orientador: José Jean-Paul Zanlucchi de Souza Tavares.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Radiofrequência Identificação - Teses. 3.
Processamento de sinais - Teses. 4. - Teses. I. Tavares, José Jean-Paul Zanlucchi
de Souza, 1962-. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621

Dedico este trabalho à todas as pessoas
que acreditam que o Brasil pode melhorar
através de uma educação de qualidade.

AGRADECIMENTOS

A Deus que me permitiu chegar à conclusão de mais uma etapa importante em minha vida.

Aos meus pais Jorge e Elza, minha irmã Tiemi e minha namorada Thaís, pelo carinho, suporte, compreensão e incentivo.

À Universidade Federal de Uberlândia, em especial à Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar esse curso.

Ao meu orientador Dr. José Jean-Paul Z. de Souza Tavares pelo esforço, empenho e por acreditar na conclusão deste trabalho.

Aos meus amigos do *MAPL (Manufacturing Automated Planning Lab)* pela cooperação, sugestões e principalmente pelo companheirismo.

À CAPES, FAPEMIG e CNPq pelo apoio financeiro oferecido durante a realização deste trabalho.

E a todos meus amigos.

MUROFUSHI, R. H., **Desenvolvimento de um sistema de posicionamento interno baseado na potência do sinal de resposta de um sistema RFID**. 2016. 111 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Resumo

Sistemas de posicionamento interno (IPS) localizam objetos em ambientes fechados, tais como edifícios, fábricas e armazéns. É possível projetar tal sistema utilizando várias tecnologias, dentre as quais pode-se citar, ultrassom, redes *wireless*, infravermelho, entre outros. Este trabalho visa apresentar um IPS baseado na tecnologia RFID integrado a um sistema de controle de uma bancada seletora de peças. Para isso, primeiramente, foi desenvolvido um IPS para um ambiente sem obstáculos afim de se conhecer melhor a tecnologia RFID e, posteriormente, foi projetado um IPS para um caso prático. A distância estimada entre uma antena e uma etiqueta eletrônica (*tag*) é calculada através da potência de resposta do sinal (RSSI) que a *tag* envia à antena. O método utilizado depende de calibração prévia e experimentos foram realizados para validar e verificar o desempenho do sistema. Quando não há obstáculos, o IPS implementado apresentou um erro absoluto de 5,9 cm considerando a distância de 20 a 130 cm e um erro absoluto de 2,3 cm no intervalo de 20 a 90 cm para ensaios estáticos. Já o IPS implementado na bancada seletora apresentou erro absoluto de aproximadamente 1,6 cm para o intervalo de 22 a 55 cm. O sistema foi capaz de selecionar corretamente peças em duas de três áreas previamente determinadas e na região que não se obteve sucesso houve pouca variação de RSSI, assim, necessitando de estudos mais aprofundados.

Palavras Chave: RFID. Sistema de Posicionamento Interno. RSSI. Tag.

MUROFUSHI, R. H., **Developing of an indoor positioning system based on the received signal strength indication of a RFID system**. 2016. 111 f. M. Sc. Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Abstract

Indoor positioning systems (IPS) locate objects in indoors environment, such as buildings, factories and warehouses. It is possible to design such system using several technologies, among which we can mention, ultrasound, wireless networks, infrared, among others. This dissertation presents an IPS based on RFID technology integrated to a selector bench. First, it was developed an IPS for a barrier-free environment in order to have a better understanding about the RFID technology and subsequently an IPS was designed for a practical study case. The estimated distance between an antenna and an electronic tag is calculated using the received signal strength indication (RSSI) from the tag. The method used depends on prior calibration and experiments conducted to validate and evaluate the system performance. The IPS designed to an environment without obstacles showed an absolute error of 5.9 cm considering the distance of 20 to 130 cm and an absolute error of 2.3 cm in the range of 20 to 90 cm for static testing and the IPS implemented in the selector bench obtained an absolute error of approximately 1.6 cm in the range of 22 to 55 cm. The system was able to select parts correctly in two of three predetermined areas and in the region that it did not work properly there was little change in RSSI.

Keywords: RFID. Indoor Positioning System. RSSI. Tag.

Lista de Figuras

Figura 2.1: Classificação dos IPSs (AL-AMMAR et al., 2014)	4
Figura 3.1: Esquema de funcionamento da tecnologia RFID (adaptado de MAINETTI; PATRONO; SERGI, 2014)	8
Figura 3.2: Diagrama para etiqueta passiva de RFID (LEME, 2009)	9
Figura 3.3: Diagrama para etiqueta semipassiva de RFID (LEME, 2009)	9
Figura 3.4: Diagrama para etiqueta ativa de RFID (LEME, 2009)	10
Figura 3.5: Ilustração de ocorrência de multipercursos (NAJNUDEL, 2004)	13
Figura 3.6: (a) Reflexão e Refração, (b) Difração, (c) Espalhamento (NAJNUDEL, 2004) ...	14
Figura 3.7: Visão geral da cobertura em função da precisão das tecnologias de posicionamento interno (adaptado de Mainetti, Patrono e Sergi, 2014)	20
Figura 3.8: AOA - Esquema simplificado (adaptado de BOUET; SANTOS, 2008)	21
Figura 3.9: (a) Lateração; (b) Angulação (adaptado de BOUET; SANTOS, 2008)	23
Figura 4.1: Áreas e atuadores da bancada de seleção de peças	31
Figura 4.2: Bancada seletora XC243 com a antena RFID	32
Figura 4.3: Diagrama eletropneumático da bancada seletora de peças e as ligações do Arduino e módulo Xbee	32
Figura 4.4: Estrutura do IPS e sistema de controle aplicado à bancada seletora de peças..	33
Figura 4.5: Fluxograma do algoritmo para leitura dos dados RSSI	35
Figura 4.6: Fluxograma do algoritmo que calcula a distância em tempo real	36
Figura 4.7: Diagrama de classes da comunicação serial	37
Figura 4.8: Antena monoestática da Acura Global	40
Figura 4.9: (a) Diagrama de irradiação horizontal a 915 MHz; (b) Diagrama de irradiação vertical a 915 MHz	41
Figura 4.10. Bancada de separação de peças XC243.	42
Figura 4.11. Peças metálicas e plásticas de três tamanhos distintos.	42
Figura 4.12. (a) Arduino Mega 2560; (b) Arduino Uno.....	43
Figura 4.13: (a) Xbee Shield para Arduino; (b) Xbee Explorer	46
Figura 4.14: Montagem da bancada para testes em uma sala sem obstáculos	48
Figura 5.1: Gráfico dos valores médios da RSSI em função da distância com intervalo de confiança para a média.....	50
Figura 5.2: Gráfico da distribuição dos resíduos para o modelo de segunda ordem	53
Figura 5.3: Gráfico do ajuste de curva e dos ensaios experimentais para o modelo de segunda ordem	54

Figura 5.4: Distância média estimada com intervalo de confiança para a média (sem obstáculos).....	56
Figura 5.5: Histograma de RSSIs na posição 70 cm.....	58
Figura 5.6: Estimação da distância nas posições: (a) 20 cm; (b) 30 cm; (c) 40 cm	58
Figura 5.7: Estimação da distância nas posições: (a) 50 cm; (b) 60 cm; (c) 70 cm	59
Figura 5.8: Estimação da distância nas posições: (a) 80 cm; (b) 90 cm; (c) 100 cm	59
Figura 5.9: Estimação da distância nas posições: (a) 110 cm; (b) 120 cm; (c) 130 cm	60
Figura 5.10: Gráfico dos valores médios do RSSI em função da distância com intervalo de confiança para a média (bancada).....	61
Figura 5.11: Gráfico dos valores médios da RSSI em função da distância com intervalo de confiança para a média (bancada).....	64
Figura 5.12: Distância média estimada com intervalo de confiança para a média (bancada).	65
Figura 5.13: Gráfico do decaimento de RSSI com a peça em movimento na esteira.	67
Figura 5.14: Gráfico de RSSI em função da distância para os dois modelos estimados	69
Figura 9.1: Gráfico da distribuição dos resíduos para o modelo de terceiro grau	84
Figura 9.2: Gráfico do ajuste de curva e dos ensaios experimentais para o modelo de terceiro grau	84
Figura 9.3: Gráfico da distribuição dos resíduos para o modelo da Eq. 8.2.....	85
Figura 9.4: Gráfico do ajuste de curva e dos ensaios experimentais para o modelo da Eq. 8.2	86
Figura 10.1: Decomposição do desvio de uma observação em relação à média global, $y_i - \bar{y}$, na soma das parcelas $y_i - \bar{y}$ e $y_i - \hat{y}_i$	107

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Diferentes classificações de IPS (AL-AMMAR et al., 2014).....	3
Tabela 3.1: Vantagens das tecnologias de IPS (AL-AMMAR et al., 2014)	18
Tabela 3.2: Desvantagens das tecnologias de IPS (AL-AMMAR et al., 2014).....	19
Tabela 3.3: Comparação das técnicas e algoritmos utilizados pelos autores apresentados no estado da arte.....	29
Tabela 4.1: Valores dos limites de atuação para cada atuador	31
Tabela 4.2: Metadados disponíveis na leitura de uma <i>tag</i>	39
Tabela 4.3: Características elétricas da antena	40
Tabela 4.4: Características operacionais da antena	40
Tabela 4.5. Lista de dispositivos utilizados na bancada.	42
Tabela 4.6: Características dos Arduinos Uno e Mega 2560.....	44
Tabela 4.7: Valores dos fatores selecionados.....	47
Tabela 5.1: Intervalo de confiança para a diferença entre as médias de duas distâncias vizinhas.....	52
Tabela 5.2: Comparação entre os modelos estudados	53
Tabela 5.3: ANOVA - Ensaio em ambiente sem obstáculo para o modelo de segunda ordem	54
Tabela 5.4: Valores das posições estimadas com intervalo de confiança e erro quadrático médio.....	56
Tabela 5.5: Erros absoluto e relativo e desvio padrão para o IPS sem obstáculo	57
Tabela 5.6: Valores da média e desvio padrão de RSSI com intervalo de confiança (bancada).	62
Tabela 5.7: Intervalo de confiança para a diferença entre as médias de duas distâncias vizinhas (bancada).....	63
Tabela 5.8: ANOVA - Ensaio da bancada seletora de peças para o modelo de segunda ordem	64
Tabela 5.9: Média, erros absoluto e relativo para o IPS da bancada	66
Tabela 5.10: Valores das posições estimadas com intervalo de confiança para a bancada.	66
Tabela 5.11: Médias dos erros absoluto, relativo e desvio padrão dos dois IPSs projetados.....	69
Tabela 8.1: Níveis alto e baixo do tempo de leitura e número e dados	77
Tabela 8.2: Setup dos experimentos realizados e a ordem de execução.....	78

Tabela 8.3: Valores dos fatores calculados e intervalo de confiança (fatorial 2^2)	79
Tabela 8.4: Níveis alto e baixo da orientação da <i>tag</i> , altura da antena e altura da <i>tag</i>	80
Tabela 8.5: Setup dos experimentos realizados e a ordem de execução	80
Tabela 8.6: Valores dos fatores calculados e intervalo de confiança (fatorial 2^3)	82
Tabela 9.1: ANOVA - Ensaio em ambiente sem obstáculo (modelo polinomial de terceiro grau)	83
Tabela 9.2: ANOVA - Ensaio em ambiente sem obstáculo para o modelo da Eq. 8.2.....	86
Tabela 11.1: Equações da ANOVA.....	111

Lista de Abreviações

ANOVA – *Analysis of Variance*
AOA – *Angle of Arrival*
AP – *Access Point*
API – *Application Programming Interface*
cm – centímetro
dBm – decibel miliwatt
dBi – *Decibel Isotropic*
DGPS – *Differential Global Positioning System*
DTOA – *Difference Time of Arrival*
EEPROM – *Electrically Erasable Programmable Read Only Memory*
EPC – *Electronic Product Code*
EQM – *Erro Quadrático Médio*
FCC – *Federal Communications Commission*
Gdl – Grau de liberdade
GPS – *Global Positioning System*
GPIO – *General Purpose Input/Output*
GSM – *Global System for Mobile*
I²C – *Inter-Integrated Circuit*
IC – Intervalo de Confiança
IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*
INS – *Inertial Navigation System*
IPS – *Indoor Positioning System*
IrDA – *Infrared Data Association*
IR – Infravermelho
ISO – *International Organization for Standardization*
KB – *Kilobytes*
kNN – *K-nearestneighbor*
LED – *Light emitting diode*
LHCP – *Left Hand Circular Polarization*
LOS – *Line of Sight*
mA – *miliampére*

MHz – *Megahertz*
ms – *milissegundos*
PA – *Ponto de acesso*
PDA – *Personal Digital Assistant*
PMA – *Algoritmo do Modelo de Propagação*
PVC – *Policloreto de Vinila*
PWM – *Pulse Width Modulation*
RF – *Radio Frequency*
RFID – *Radio Frequency Identification*
RSP – *Received Signal Phase*
RSSI – *Received Signal Strength Indication*
RxTx – *Receiver/Transmitter*
SLAM – *Simultaneous Localization and Mapping*
SPI – *Serial Peripheral Interface*
SRAM – *Static Random Access Memory*
TCP – *Transmission Control Protocol*
TDOA – *Time Diference of Arrival*
TOA – *Time of Arrival*
TOF – *Time of Flight*
UART – *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*
UDP – *User Datagram Protocol*
UHF – *Ultra High Frequency*
USB – *Universal Serial Bus*
UWB – *Ultra Wide Band*
Wi-Fi – *Wireless Fidelity*
WLAN – *Wireless Local Area Network*
ZB – *ZigBee*

Sumário

INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos	5
1.2 Justificativa	5
1.3 Organização do trabalho.....	6
TECNOLOGIAS UTILIZADAS NO SISTEMA DE POSICIONAMENTO.....	7
2.1 Tecnologia RFID e sua Aplicação em Sistemas de Posicionamento	7
2.1.1 Tipos de Etiquetas Eletrônicas (Tags)	8
2.1.2 Fatores mais influentes na potência do sinal de rádio frequência (RF)	10
2.2 Outras Tecnologias de IPS	14
2.2.1 Ultra Wide Band (UWB).....	14
2.2.2 Infravermelho (IR).....	14
2.2.3 Ultrassom	15
2.2.4 ZigBee	15
2.2.5 Redes locais sem fio (WLAN IEEE 802.11)	15
2.2.6 Rede de celular (GSM)	16
2.2.7 Bluetooth (IEE 802.15)	16
2.2.8 Imagem	17
2.2.9 Dead reckoning (Navegação Estimada).....	17
2.3 Comparação Entre as Tecnologias de IPS	18
2.4 Algoritmos Utilizados em IPS.....	20
2.4.1 Tempo de chegada (TOA)	20
2.4.2 Tempo de Chegada Diferencial (TDOA)	21
2.4.3 Ângulo de Chegada (AOA)	21
2.4.4 Potência do Sinal Recebido (RSSI)	21
2.4.5 Fase do sinal recebido (RSP)	22

2.5	Técnicas de Posicionamento Interno	22
2.5.1	Triangulação.....	22
2.5.2	Análise de cenário (fingerprinting)	23
2.5.3	Proximidade	24
2.5.4	Imagem	24
2.6	Estado da Arte.....	25
DEFINIÇÃO DO PROBLEMA E ESPECIFICAÇÃO DA SOLUÇÃO		30
3.1	Definição do problema.....	30
3.2	Especificação da Solução.....	31
3.2.1	IPS na bancada seletora de peças	31
3.2.2	Algoritmos de aquisição de dados e cálculo de distância	33
3.2.3	Comunicação do sistema.....	37
3.2.4	Principais Equipamentos	37
3.3	Análise Fatorial.....	46
3.3.1	Análise dos fatores de influência	47
RESULTADOS E ANÁLISE		49
4.1	IPS para um ambiente interno sem obstáculos.....	49
4.1.1	Etapas de calibração	49
4.1.2	Resultados experimentais.....	55
4.2	IPS para a bancada seletora de peças integrado ao sistema de controle	60
4.3	Comparação dos modelos dos IPS.....	68
CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS		70
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		72
APÊNDICE I		77
APÊNDICE II		83
APÊNDICE III		87
ANEXO I		104

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Sistemas de Identificação por Radiofrequência (RFID) contam com dois componentes principais para cumprir seu objetivo. Um leitor acoplado a uma antena que interroga várias *tags* ou etiquetas eletrônicas. As etiquetas devem ser ativadas pelo interrogador e respondem enviando uma *string* de identificação de volta para o leitor (SAAB; NAKAD, 2011).

A ampla adoção desta tecnologia pelas indústrias nos últimos anos tem como principal justificativa o conjunto de duas forças motrizes. Em primeiro lugar, os processos de fabricação de etiquetas RFID passivas foram muito simplificados e automatizados e, portanto, o custo de produção foi reduzido drasticamente. Em segundo lugar, agências governamentais e grandes varejistas que têm forçado fornecedores a adotar rapidamente esta tecnologia de uma forma sem precedentes. Outros fatores, tais como a capacidade de encriptação atraente e baixo consumo de energia, também contribuem para a adoção da tecnologia RFID (ZHOU; SHI, 2008).

Um uso genérico de sistemas RFID é o monitoramento de inventário em grande escala, entretanto outra aplicação dessa tecnologia que é pesquisada mundialmente nos últimos anos é a localização de objetos, trazendo assim, uma outra abordagem aos sistemas de automação.

Pode-se citar como exemplos de aplicação de um sistema de localização baseado na tecnologia RFID a localização de produtos depositados em um armazém, localização de equipamentos e profissionais dentro de um hospital, de um bombeiro em um estabelecimento em chamas, de cachorros policiais treinados para encontrar explosivos em um prédio, de equipamentos e ferramentas em uma fábrica (LIU et al., 2007), além de rastrear produtos em processos de produção e guiar turistas em museus (ZHOU; SHI, 2008). Também, com o avanço em automação e controle, diversas indústrias estão confiando mais nos Sistemas de Posicionamento Interno (do inglês, *Internal Positioning System* ou IPS) para operações tais

como, orientação de robôs, cooperação entre robôs e fábricas inteligentes (AL-AMMAR et al., 2014).

Apesar desse vasto universo de possibilidades de uso, a implantação de sistemas RFID ainda enfrenta obstáculos. Do ponto de vista prático, usuários e projetistas precisam considerar uma série de questões do ambiente e das características construtivas dos dispositivos RFID a fim de prover o sistema com as melhores condições de funcionamento da tecnologia (AZAMBUJA, 2011).

Quando se trata de sistemas de localização, o mais conhecido de todos é o GPS (*Global Positioning System*), que é amplamente utilizado em vários dispositivos eletrônicos atuais, tais como *smartphones* e veículos (MOURA, 2007). O GPS é um sistema de geolocalização que cobre toda a superfície do globo terrestre oferecendo um erro estimado de no máximo 10 metros em áreas abertas. Esse erro ainda pode ser reduzido para a ordem de centímetros fazendo-se uso de uma estação de referência, num sistema que é chamado de DGPS (*Differential Global Positioning System*). Ambos sistemas, GPS e DGPS, utilizam sinais enviados por satélites para que os dispositivos possam estimar sua localização, o que resulta em um problema: para um dispositivo realizar sua estimativa é necessário que os sinais de um número mínimo de satélites sejam recebidos por ele. Consequentemente, a fraca cobertura em ambientes internos reduz a precisão e faz com que esse sistema seja inviável de ser utilizado (LIU et al., 2007) tornando a tecnologia RFID uma alternativa a ser utilizada para tal finalidade. Obviamente, a localização de um objeto baseada na tecnologia RFID é uma adição conveniente e valiosa para as aplicações onde o rastreamento de itens por *tags* já é necessária (ZHOU; SHI, 2008).

Al-Ammar et al. (2014) afirmam que sistemas de posicionamento foram classificados de várias maneiras segundo diferentes pesquisadores. A Tabela 1.1 mostra um resumo das classificações que Al-Ammar et al. (2014) encontraram na literatura. Entretanto, os autores propuseram uma classificação diferente apresentada na Fig. 1.1.

Tabela 1.1: Diferentes classificações de IPS (AL-AMMAR et al., 2014)

Autor - Ano	Classificação baseada em:	Categorias
Collin et al. - 2003	Necessidade de <i>hardware</i>	Tecnologias que necessitam de hardware específico no estabelecimento e aqueles que já o possuem;
Gu et al. - 2009	Existência de rede	Tecnologias baseadas e não baseadas em redes;
	Arquitetura do sistema	Auto posicionamento, infraestrutura de posicionamento, arquitetura auto orientada e infraestrutura assistida;
	Principal meio de determinar posição	Ultrassom, radio frequência, magnetismo, visão e som audível;
Al Nuaimi and Kamel – 2011	Sistema instalado no estabelecimento	Sistema de posicionamento interno fixo e sistema de posicionamento para pedestres;
Chliz et al – 2011	Conhecimento a priori	Tecnologias paramétricas e não paramétricas;
Rainer Mautz – 2012	Tipo de sensor	Câmera, infravermelho, som, WLAN, e Wi-Fi, RFID, banda larga, sistemas de navegação por satélite com alta sensibilidade, sensor de navegação inercial, sistemas magnéticos, entre outros.

Atualmente existem diversas tecnologias para sistemas de localização para ambientes internos. Uma classificação interessante é dada por Al-Ammar et al. (2014). Em seu trabalho os autores dividiram os IPSs em duas principais categorias: aquelas que são dependentes do local onde o sistema vai operar e aquelas que são independentes do ambiente. Outros autores como Sanpechuda e Kovavisaruch (2008) e Yan et al. (2013) classificam os IPSs de forma semelhante, mas Al-Ammar et al. (2014) aborda tais sistemas de maneira mais abrangente, já que esses autores estudam várias tecnologias utilizadas atualmente aplicadas em IPSs.

Segundo Al-Ammar et al. (2014), as tecnologias de localização interna dependentes do local onde estão estabelecidas referem-se a tecnologias que dependem da instalação ou da utilização de um sistema específico para o estabelecimento e também do mapa local.

Os IPSs dependentes podem ser divididos em duas classes principais: tecnologias de posicionamento interno que exigem infraestrutura dedicada e tecnologias que utilizam a própria infraestrutura do edifício. A necessidade de infraestrutura dedicada é determinada de

acordo com a estrutura geral da maioria dos edifícios atuais; por exemplo, a maioria dos edifícios atuais contém Wi-Fi enquanto um sistema RFID é mais raro de se encontrar.

Por outro lado, as tecnologias que não dependem do local onde devem operar não necessitam de qualquer hardware especial no estabelecimento, como navegação estimada (do inglês *dead reckoning*) e tecnologias baseadas em imagem.

Na navegação estimada, a posição de um objeto é obtida baseando-se na sua posição atual, sua posição anterior, sua velocidade e direção em que o mesmo se move.

Já as tecnologias baseadas em imagem dependem sobretudo de uma câmera (por exemplo, sensor e processamento de imagem) e elas podem ser dependentes ou não do local onde são utilizados. Quando elas são dependentes, há a necessidade de se ter marcações especiais ou o mapa do local para que a localização seja possível de ser feita. Caso contrário elas são independentes.

A classificação geral está esquematizada na Fig 1.1 e essas tecnologias empregadas serão melhor explicadas no próximo capítulo.

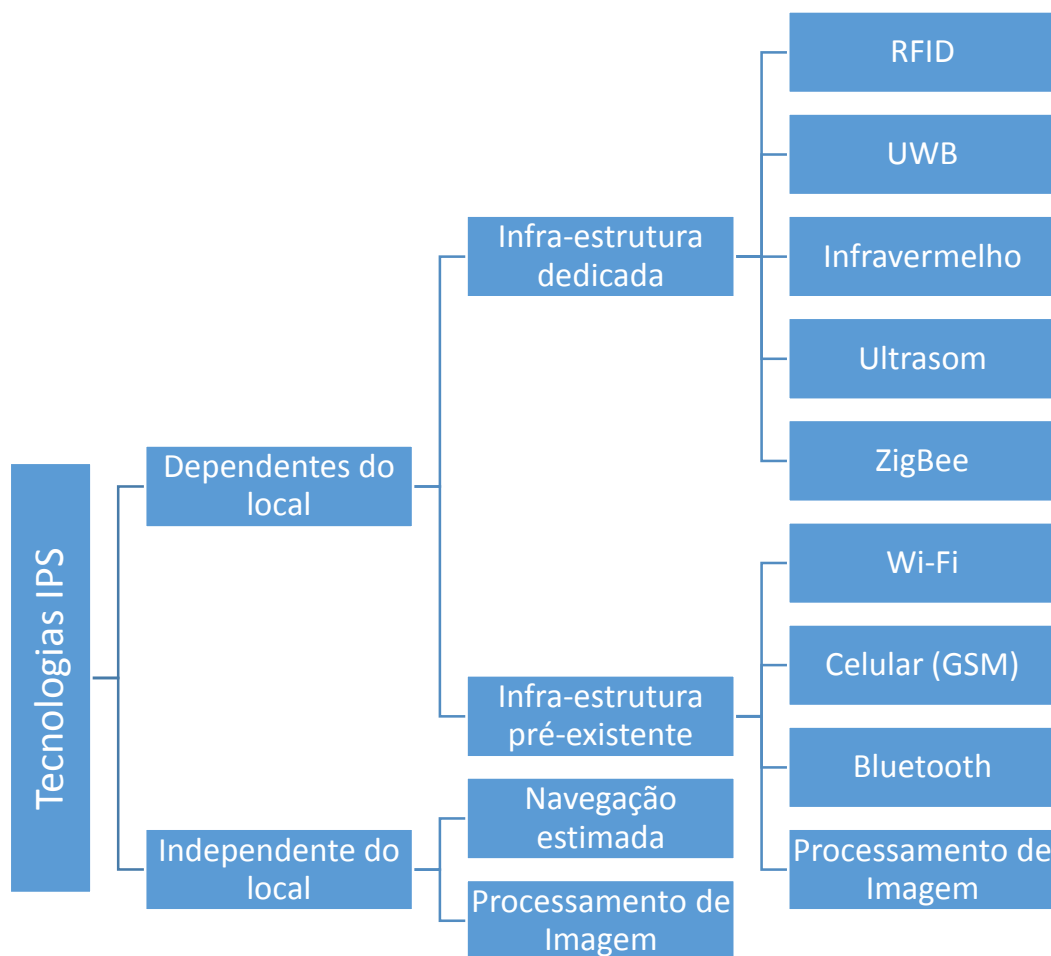


Figura 1.1: Classificação dos IPSs (AL-AMMAR et al., 2014)

1.1 Objetivos

O objetivo geral do trabalho é desenvolver um sistema de posicionamento interno baseado na tecnologia RFID aplicado a um sistema automatizado de separação de peças.

Objetivos específicos:

- Definir o tipo de abordagem a ser aplicada para implementar o IPS baseado em RFID;
- Projetar um IPS e implementá-lo em um sistema de manufatura, definindo a posição de um determinado objeto utilizando a tecnologia RFID;
- Integrar o IPS a um sistema de controle de manufatura de um sistema automatizado de separação de peças.

1.2 Justificativa

Por se tratar de uma tecnologia difundida no mercado e devido ao seu amplo potencial de flexibilidade e usabilidade, o RFID é uma ferramenta ainda em busca de um problema para solucionar. Utilizar essa tecnologia como um sistema de localização para ambientes internos onde sistemas de posicionamento global (GPS) não operam, bem como qualquer impedimento em se aplicar tecnologia dependentes do local baseada em infraestrutura pré-existente, é uma iniciativa válida para justificar sua aplicação de fato, principalmente em ambientes que forem necessários adotar o RFID.

Um sistema de posicionamento interno é uma ferramenta poderosa para o seu uso na automação industrial, fazendo com que a eficiência de vários processos seja aprimorada. Pode-se citar como exemplos, monitoramento de linhas de produção e processos logísticos, automação de armazéns, localização de veículos autônomos, ferramentas e pessoas em determinados ambientes. Além disso, em alguns casos, é possível utilizar um IPS baseado na tecnologia RFID integrado a outros sistemas IPS distintos de forma a obter uma acurácia maior da posição do item ou objeto específico.

1.3 Organização do trabalho

O Capítulo II apresenta um estudo das principais tecnologias utilizadas em sistemas de posicionamento interno com foco em RFID e os principais fatores de influência na potência de resposta do sinal RFID. Também será apresentado os principais algoritmos e técnicas de posicionamento, além do estado da arte referente aos IPSs baseados em RFID.

O capítulo III descreve o sistema no qual o IPS será utilizado e quais os requisitos deverão ser respeitados. Ainda, será feita a especificação da solução para o problema descrito apresentando a montagem do IPS numa bancada seletora de peças, algoritmos necessários e os principais equipamentos utilizados. Além disso, uma análise fatorial foi feita para definir os parâmetros de teste.

O Capítulo IV apresenta os resultados e análise dos dados obtidos, tanto do IPS implementado para um ambiente interno sem obstáculos, quanto do IPS integrado à bancada seletora de peças. No estudo do primeiro sistema citado, é avaliado qual modelo experimental, dentre os três propostos, tem maior representatividade, qual a região de operação é mais indicada e também analisada a sua performance. Já no segundo sistema, há uma avaliação do modelo experimental, de seu desempenho e testes em tempo real de separação de peças. Além disso, há uma comparação dos modelos obtidos nos dois ambientes estudados.

Por fim, no Capítulo V apresenta as conclusões e trabalhos futuros.

CAPÍTULO II

TECNOLOGIAS UTILIZADAS NO SISTEMA DE POSICIONAMENTO

Inicialmente, será apresentada a tecnologia RFID. Em seguida, serão descritas outras tecnologias que também são utilizadas em um projeto de IPS. Posteriormente, serão apresentados as principais técnicas de posicionamento e os algoritmos para localização interna, além de uma comparação entre elas. Ao final, será descrito o estado da arte de IPSs baseados em RFID que utilizam etiquetas passivas.

2.1 Tecnologia RFID e sua Aplicação em Sistemas de Posicionamento

Neste capítulo serão abordados os conceitos que envolvem um sistema RFID e quais os parâmetros que podem ser utilizados em um sistema de posicionamento. Também serão apresentadas as técnicas comumente utilizadas em um IPS.

A tecnologia RFID baseia-se no uso de um leitor de RFID equipado com uma ou mais antenas, leitor e transceptores ativos ou passivos mais conhecidos como *tags*. Um esquema que mostra o funcionamento dessa tecnologia é apresentado na Fig. 2.1. Tipicamente, os dados na etiqueta consistem não só em um número de série unívoco, mas também informação de aditivos (por exemplo, informação de posição) pode ser armazenado. A quantidade de dados que podem ser armazenados em uma *tag* depende do tamanho da sua memória. As características desta tecnologia fazem-na o candidato ideal para a rastreabilidade de vários produtos, como alimentos ou drogas ao longo da cadeia de suprimentos, como também é usado para muitos outros fins, incluindo a localização interna (MAINETTI; PATRONO; SERGI, 2014).

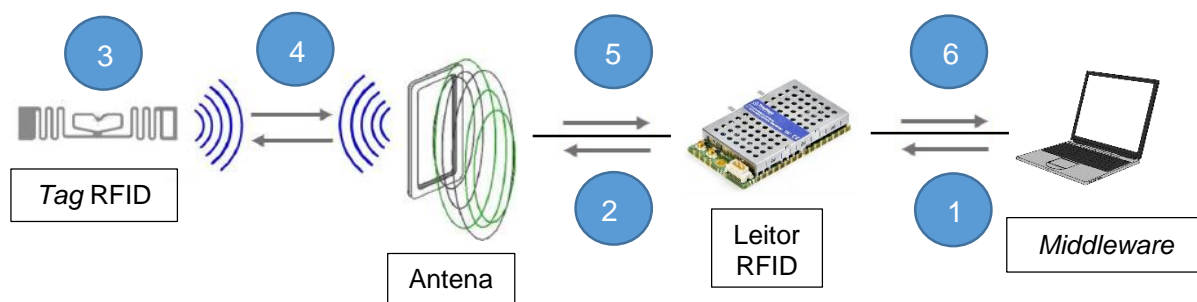


Figura 2.1: Esquema de funcionamento da tecnologia RFID (adaptado de MAINETTI; PATRONO; SERGI, 2014)

O processo de comunicação entre os componentes que compõem um sistema RFID foi dividido em seis passos:

- 1) O computador faz a requisição de leitura;
- 2) O leitor envia um sinal broadcast através da antena;
- 3) A *tag* recebe o sinal e é energizada;
- 4) A etiqueta envia a resposta de identificação de volta ao leitor;
- 5) A antena lê os dados e envia ao leitor;
- 6) O leitor lê os dados e os envia para o computador para processamento;

2.1.1 Tipos de Etiquetas Eletrônicas (Tags)

As *tags* RFID podem ser classificadas como passivas, ativas ou semipassivas dependendo das características de energização das mesmas. A primeira é alimentada através do sinal eletromagnético enviado pelo leitor que induz uma corrente na antena da *tag*. A segunda possui fonte de energia interna própria, enquanto a terceira trabalha utilizando ambas as formas de energização. Tanto *tags* ativas quanto passivas são utilizadas em sistemas de localização, sozinhas ou em combinação com outros tipos de sensores (SAAB; NAKAD, 2011).

Etiquetas Passivas

As etiquetas passivas não possuem bateria interna. Elas utilizam o sinal recebido do leitor como fonte de energia para alimentação do seu microchip e para sua comunicação com o leitor (modulação *backscatter*), e por não possuírem transmissores de rádio, este tipo de etiqueta modula o sinal recebido e o envia de volta ao leitor.

Desta forma, conforme representado na Fig. 2.2, sempre há a necessidade de o leitor enviar algum sinal para que haja alguma resposta desse tipo de etiqueta.

Sua desvantagem é o baixo alcance de comunicação (máximo de 10 metros) da etiqueta para o leitor, mas por serem pequenas e de simples construção possuem as vantagens de custo e de longa vida útil (AZAMBUJA, 2011).

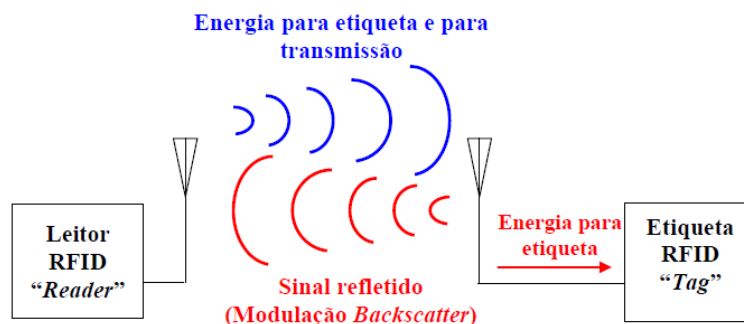


Figura 2.2: Diagrama para etiqueta passiva de RFID (LEME, 2009)

Etiquetas Semipassivas

Etiquetas semipassivas possuem bateria própria para alimentar o seu microchip, mas ainda utilizam energia do leitor para transmitir seu sinal refletido (modulação *backscatter*). Da mesma forma que as etiquetas passivas, estas só transmitem algum sinal após a transmissão do leitor. O princípio de funcionamento está apresentado na Fig. 2.3.

Por possuírem bateria, seu tempo de resposta é mais rápido e possuem um alcance maior (diversas leituras a uma velocidade de 80 Km/h a mais de 30 metros de distância), comparadas com as etiquetas passivas. Por outro lado, este fator diminui a vida útil da etiqueta, uma vez que a bateria tem que ser trocada periodicamente. Além disso, são maiores e mais caras (LEME, 2009).

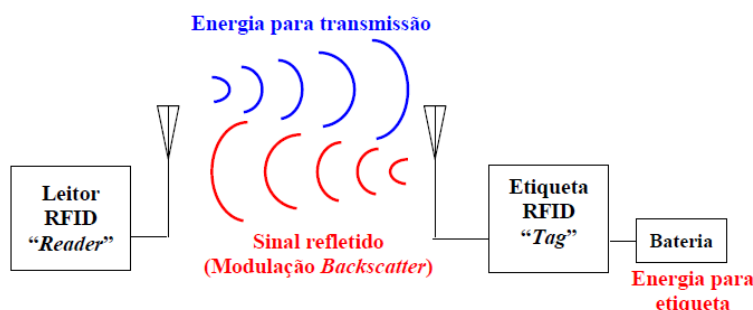


Figura 2.3: Diagrama para etiqueta semipassiva de RFID (LEME, 2009)

Etiquetas Ativas

Etiquetas ativas possuem sua própria fonte de potência (normalmente bateria ou energia solar) para alimentar o seu microchip e para transmitir seu sinal de rádio com seus dados para o leitor. Por esta propriedade, as etiquetas ativas possuem um melhor desempenho com relação ao alcance de transmissão (na ordem de centenas de metros), além de responderem a sinais de mais baixa potência e possuírem uma maior capacidade de memória, comparadas às etiquetas passivas. Por outro lado, são maiores e mais complexas, consequentemente, seu custo é mais alto e possuem um tempo de vida limitado.

Por possuírem alimentação e transmissão próprias, essas etiquetas podem emitir sinais com suas informações (identificações e dados adicionais), antes mesmo de serem interrogadas pelo leitor e independentemente da posição do leitor, ou seja, elas podem realizar um *broadcast* de seus dados. Esse mecanismo está representado na Fig. 2.4.

Esse tipo de etiqueta é utilizado em aplicações de rastreamento de equipamentos de alto valor ou de pessoas com um longo alcance, ou em situações comerciais onde é necessária uma etiqueta mais robusta devido às condições precárias do ambiente de transmissão (LEME, 2009).

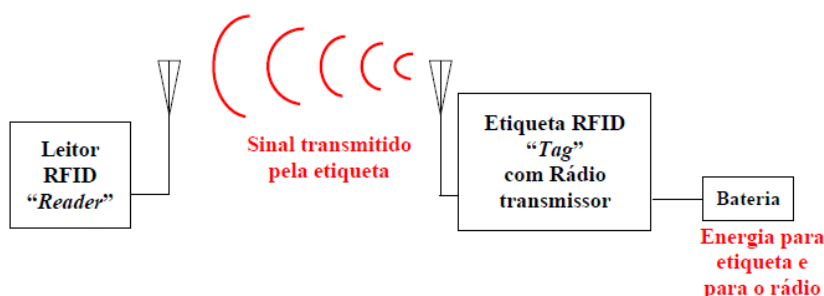


Figura 2.4: Diagrama para etiqueta ativa de RFID (LEME, 2009)

2.1.2 Fatores mais influentes na potência do sinal de rádio frequência (RF)

O conhecimento do meio de transmissão é indispensável quando se objetiva realizar um bom planejamento de cobertura e desempenho radioelétrico. Nos sistemas *wireless* o meio de propagação é o canal de rádio, cujas características e efeitos sobre a informação trafegada são de natureza complexa, impossibilitando uma análise completamente determinística, sugerindo assim a utilização de dados experimentais (NAJNUDEL, 2004).

Dependência com a distância

Um dos desafios para a localização de RFID é como modelar matematicamente a variação dos sinais de RF no espaço. Teoricamente, um modelo de propagação pode ser aplicado para calcular a distância de acordo com a potência do sinal ou do tempo de chegada e sabe-se que qualquer sinal tem seu nível de potência atenuado à medida que se propaga no meio. Este fato se dá, devido ao espalhamento do sinal no espaço, reduzindo a sua densidade de potência. No espaço livre sem obstruções, equação de transmissão de Friis (FRIIS, 1946) mostra que o nível de intensidade do sinal diminui a uma taxa inversamente proporcional à distância percorrida (ZHOU; SHI, 2008), como pode ser observado na Eq. 2.1:

$$P_r = P_t \frac{G_t G_r \lambda^2}{16L\pi^2 d^2} \quad (2.1)$$

Em que P_r é a potência recebida pela antena receptora (em Watts), P_t é a potência de entrada da antena transmissora (em Watts), G_t é o ganho da antena transmissora, G_r é o ganho da antena receptora, L é fator de perda do sistema, λ é o comprimento de onda do sinal, e d é a distância entre a antena transmissora e antena receptora. Com base nesta relação, pode-se estimar a distância entre a etiqueta RFID e o leitor se a intensidade do sinal recebido é conhecida.

Assim, a potência do sinal recebido ou *Received Signal Strenght Indication* (RSSI) pode ser modelada como uma variável linearmente decrescente numa escala logarítmica da distância. A RSSI a partir do i -ésimo transmissor pode ser formulada de acordo com a Eq. 2.2:

$$\hat{P}_i(d_i) = P_0 - 10n_p \log_{10} \frac{d_i}{d_0} + S_i \quad (2.2)$$

Em que $\hat{P}_i(d_i)$ é o estimador da potência recebida (em dB) a uma distância d_i , d_0 é a distância de referência, P_0 é a potência conhecida recebida a uma distância de referência (em dB), n_p é o coeficiente de perda do meio, e S_i é uma variável aleatória gaussiana de média nula em dB. Note que o expoente perda de percurso n_p pode ser obtido através da realização de medições na fase de inicialização ou ser tratado como um parâmetro desconhecido adicional (YAN et al., 2013).

No caso de um sinal se propagando no espaço livre (sem obstruções ou reflexões), esta atenuação tem uma relação quadrática com a distância percorrida pelo sinal. Em ambientes em que o relevo e a morfologia (ou obstáculos, como móveis, no caso de ambientes fechados) obstruem o caminho do sinal propagante, esta atenuação em relação à distância acentua-se podendo atingir uma dependência com a quarta ou quinta potência com a distância (NAJNUDEL, 2004).

Perda por penetração

As perdas de penetração em paredes e pisos são extraídas de medições que contemplam diversos efeitos de propagação, tais como, reflexão múltipla e refração. Além disso, vale considerar que objetos metálicos sólidos refletem grande parte do sinal incidente, impedindo a propagação através deles. Já objetos de madeira, plástico e feitos de tijolos refletem parte do sinal e permitem que uma parcela deste seja transmitido através dos mesmos. E também, a água e objetos úmidos tendem a absorver uma grande parte do sinal incidente (NAJNUDEL, 2004).

Quando as *tags* são colocados perto de metal a diretividade tende a aumentar (capacidade de uma antena/*tag* em direcionar ou concentrar energia numa dada direção do espaço) e a impedância de antena/*tag* pode mudar drasticamente reduzindo a eficiência na transferência de energia. Já perto de água ou de outros materiais de alta constante dielétrica a diretividade também aumenta e a eficiência diminui por causa de perdas dielétricas. Como a água tem uma grande constante dielétrica (aproximadamente 80), antenas/*tags* colocados perto da água tem mudança significativa na frequência de ressonância e podem não operar no modo de ressonância (AROOR; DEAVOURS, 2007).

Estas observações são válidas para obstáculos sólidos, pois a reflexão de um sinal em um objeto depende do comprimento de onda do sinal incidente e da largura do obstáculo.

Multipercursos

O efeito de multipercursos ou do inglês *multipath* é causado por três fenômenos, a reflexão, a difração e o espalhamento. Estes fenômenos permitem que um sinal atinja um destino por diferentes percursos, além do percurso direto (LOS ou *Line of Sight*), quando este existe. A interseção destes raios faz com que o sinal num dado ponto no espaço seja composto pelos diversos sinais, de modo construtivo, isto é, aumentando o nível de potência do sinal, ou de modo destrutivo, diminuindo o nível de potência do sinal (YAN et al., 2013). Esse fenômeno está apresentado na Fig. 2.5.

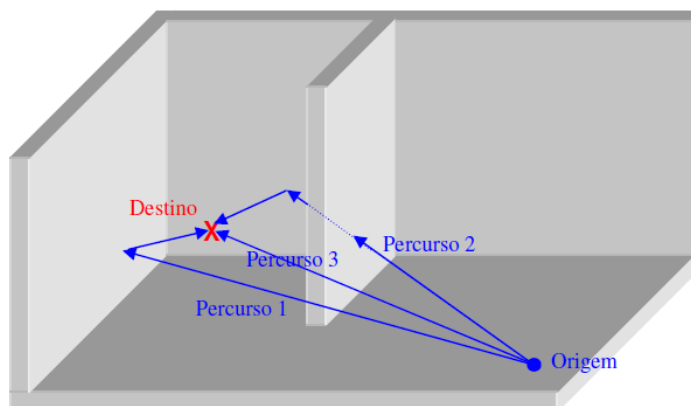


Figura 2.5: Ilustração de ocorrência de multipercursos (NAJNUDEL, 2004)

Reflexão, Refração, Difração e Espalhamento

A reflexão ocorre quando uma onda eletromagnética incide sobre um objeto de grandes dimensões, comparadas ao comprimento de onda do sinal incidente. Este efeito pode implicar em uma atenuação na potência do sinal, no caso de uma parte deste conseguir atravessar o obstáculo, e pode refletir a onda para diferentes direções (NAJNUDEL, 2004).

A refração ocorre quando uma onda atravessa um meio de densidade diferente do meio em que se propagava. Quando uma onda propagante no ar incide sobre a água ou uma superfície de vidro por exemplo, a direção da onda incidente muda. Uma parte do sinal é refletida e outra é refratada, continuando o percurso através do obstáculo, mas em uma direção diferente (NAJNUDEL, 2004).

Já a difração ocorre quando o percurso de uma onda é obstruído por um obstáculo de superfície irregular ou pela extremidade de um obstáculo. A difração depende fortemente da frequência da onda, em razão da obstrução do elipsoide de Fresnel. Em sinais de alta frequência, a difração pode inviabilizar uma transmissão entre dois pontos, entretanto, este efeito é muito útil para sinais de frequência mais baixa, como as faixas de celulares para fazer com que o sinal mude sua trajetória ao incidir sobre o topo de um edifício (NAJNUDEL, 2004).

O espalhamento ocorre quando uma onda eletromagnética incide sobre um objeto cujo tamanho é muito pequeno em relação o comprimento de onda do sinal incidente. Este efeito causa uma atenuação no sinal e como a reflexão, reflete o sinal para diferentes direções (NAJNUDEL, 2004).

Os fenômenos comentados estão representados visualmente na Fig. 2.6.

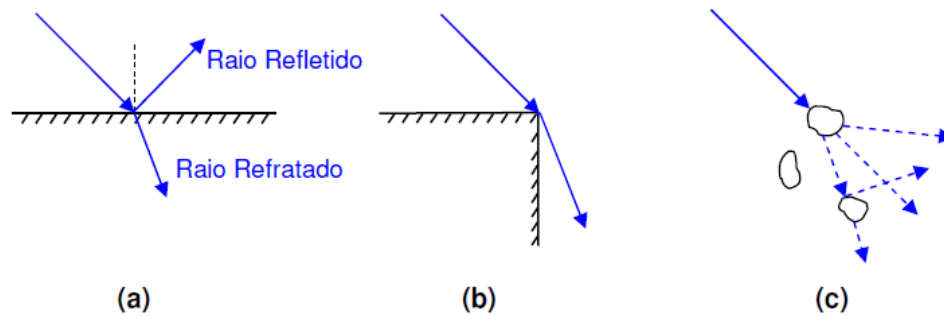


Figura 2.6: (a) Reflexão e Refração, (b) Difração, (c) Espalhamento (NAJNUDEL, 2004)

2.2 Outras Tecnologias de IPS

2.2.1 Ultra Wide Band (UWB)

A FCC (*Federal Communications Commission*) define UWB como um sinal de RF que ocupa uma porção do espectro de frequências que é maior do que 20% da frequência central, ou tem uma largura de banda maior do que 500 MHz. UWB é um canal de comunicação que transmite informações ao longo de uma vasta porção do espectro de frequências. Isso permite que os transmissores UWB consumam pouca energia durante a transmissão de grandes quantidades de dados. Esta tecnologia pode ser utilizada para sistemas de posicionamento devido ao tempo de chegada (do inglês, *Time of Arrival* ou TOA) ou da diferença de tempo de chegada (do inglês, *Time Difference of Arrival* ou TDOA) de sinais de RF para obter a distância entre o alvo e o ponto de referência (AL-AMMAR et al., 2014).

2.2.2 Infravermelho (IR)

Comunicação por infravermelhos faz uso do espectro de luz invisível abaixo da extremidade vermelha do espectro visível, o que faz com que esta tecnologia seja menos intrusiva comparada à sistemas baseados na luz visível. IR pode ser usado de duas formas diferentes; IR direto e difuso. IrDA (*Infrared Data Association*) é um exemplo de IR direto que usa um padrão de transmissão de dados ponto-a-ponto projetado para comunicações que exigem baixo consumo de energia, mas requer linha de visão entre os dispositivos além de ter um alcance relativamente curto. Por outro lado, IR difuso tem sinais mais fortes do que IR direto e, portanto, tem alcance maior (9-12) metros. O infravermelho difuso usa LEDs de ângulo de grande abertura que emitem sinais em várias direções. Assim, ela permite muitas conexões e não requer linha de visão direta (AL-AMMAR et al., 2014).

2.2.3 Ultrassom

O ultrassom é uma onda mecânica que é uma oscilação de pressão transmitida através de um meio material. Não há interferência com ondas eletromagnéticas e possui relativamente curto alcance. Sistemas de posicionamento de ultrassom usam o ar como meio de propagação e a distância relativa ou o intervalo entre dispositivos pode ser estimado utilizando as medições do tempo de chegada (do inglês *Time of Arrival* ou TOA) dos pulsos que viajam dos emissores para os receptores. Uma estimativa das coordenadas do emissor é possível por meio da técnica de multipercurso (*multipathing*) a partir de três ou mais receptores fixos implantados em locais conhecidos (AL-AMMAR et al., 2014).

2.2.4 ZigBee

A norma *ZigBee* oferece serviços de rede, segurança e suporte a aplicativos que operam de acordo com a especificação IEEE 802.15.4. O *ZigBee* é projetado para aplicações que exigem baixo consumo de energia, baixa taxa de transferência de dados e distâncias relativamente curtas. Um IPS usando a tecnologia *ZigBee* baseia-se na criação de uma rede *ZigBee* que consiste em vários nós sensores como referência, com posições físicas conhecidas e um nó alvo sem informação de localização. Uma vez que os nós podem comunicar uns com os outros, a intensidade do sinal de rádio recebido pelos sensores de referência é utilizada para o cálculo do posicionamento. Existem algoritmos diferentes de localização utilizando estas redes que podem obter resultados diferentes e alcançar um desempenho diverso em diferentes ambientes de teste (MAINETTI; PATRONO; SERGI, 2014).

2.2.5 Redes locais sem fio (WLAN IEEE 802.11)

Redes locais sem fio podem ser utilizadas para estimar a localização de um dispositivo móvel dentro dessa rede. A infraestrutura de WLAN é bastante difundida em muitos ambientes internos e devido ao aumento da demanda por comunicação sem fio, esta abordagem é amplamente pesquisada para a localização em ambientes internos. Por esta razão, uma das principais vantagens da técnica de localização usando Wi-Fi é a sua eficácia de custo devido à possibilidade de localizar a posição de quase todos os dispositivos Wi-Fi compatíveis sem a instalação de software/hardware adicional. Outra vantagem da utilização de WLAN é que LOS não é necessária já que existem métodos capazes de superar essa dificuldade. O método de posicionamento WLAN mais popular é aquele que faz uso da RSSI, que são relativamente fáceis de extrair em redes do padrão IEEE 802.11 (LIU et al., 2007).

A precisão da tecnologia Wi-Fi situa-se entre 20 e 40 m, mas pode ser melhorada através da implantação roteadores sem fios ou através da integração de outras tecnologias, e os resultados recentes falam de precisão de aproximadamente 3 a 5 metros. Além de precisão, muitas questões desafiadoras na tecnologia de localização WLAN são importantes, dentre elas, o consumo de energia. Na verdade, uma vez que os dispositivos móveis são geralmente pequenos e têm restrições de energia da bateria, uma questão desafiadora é como reduzir a energia necessária para a localização. Outra limitação WLAN é a atenuação do sinal do ambiente devido a componentes como paredes, móveis, portas e outras barreiras (MAINETTI; PATRONO; SERGI, 2014).

2.2.6 Rede de celular (GSM)

Rede de celular (GSM) ou Sistema Global para Comunicações Móveis estão disponíveis na maioria dos países e são maiores que a cobertura de WLAN. Ao contrário das WLAN, a rede GSM opera nas bandas licenciadas que impedem a interferência de outros dispositivos que operam na mesma frequência. Localização em ambientes internos baseado em rede móvel celular é possível se o edifício é coberto por várias estações base ou uma estação base com forte RSSI recebida pelos clientes. O método mais comum para localização em ambientes internos utilizando a rede GSM é a técnica conhecida como *fingerprinting* baseado na RSSI (AL-AMMAR et al., 2014).

2.2.7 Bluetooth (IEEE 802.15)

Bluetooth é um padrão de rede sem fio e opera na frequência de 2,4 GHz. Em comparação com WLAN, o alcance é mais curto (tipicamente 10 a 15 m). Por outro lado, Bluetooth é um padrão mais “leve”, onipresente porque ele é incorporado na maioria dos dispositivos, como telefones celulares, assistentes digitais pessoais (PDAs), laptop, desktop, e outros dispositivos eletrônicos. Então, o uso da tecnologia *Bluetooth* em técnicas de localização permite a reutilização de dispositivos já equipados com esta tecnologia, assim adicionar um novo usuário para tal sistema não requer nenhum hardware adicional. Já que Bluetooth é uma tecnologia de relativamente baixo custo e baixa potência, o produto é eficiente para se projetar sistemas de localização voltada para ambientes internos. Além disso, as *tags Bluetooth* são transceptores relativamente pequenos. Como qualquer outro dispositivo *Bluetooth*, cada *tag* tem uma identificação única, que pode ser utilizada para ser localizada (LIU et al., 2007).

Uma das desvantagens do uso da tecnologia *Bluetooth* em localização é que, em cada identificação da localização, o dispositivo executa o procedimento da descoberta, e devido a isso, aumenta significativamente a latência de localização (10 a 30 s) e o consumo de energia. Por esta razão, dispositivo *Bluetooth* tem uma latência inadequada para aplicações de localização em tempo real. Outra desvantagem de um sistema de localização baseados em *Bluetooth* é que ele fornece uma precisão de cerca de 2 m a 3 m, com um atraso de aproximadamente 20 s (LIU et al., 2007).

2.2.8 Imagem

Tecnologias de posicionamento interno baseadas em processamento de imagem se utilizam de câmera e de visão computacional. Diferentes tipos de câmera podem ser usados como câmera de telefone celular, câmera omnidirecional, e câmeras tridimensionais. No entanto, o seu desempenho pode variar devido à quantidade de informação que pode ser extraído das suas imagens. O sucesso de tecnologias baseadas em imagem depende de fatores, tais como, melhoria e miniaturização dos atuadores, avanço na tecnologia dos detectores, o desenvolvimento de algoritmos de processamento de imagem, um aumento das taxas de transmissão de dados e recursos computacionais. Sistemas de posicionamento baseados em imagem podem ser classificadas em duas categorias principais: sistemas *egomotion*, que são aqueles que usam o movimento de uma câmera relativo a um cenário rígido para estimar a posição atual da câmera; e sistemas de sensores estáticos que localizam objetos em movimento nas imagens (AL-AMMAR et al., 2014).

2.2.9 *Dead reckoning* (Navegação Estimada)

Dead reckoning refere-se ao uso de sensores que fornecem a localização atual, calculada através de informações sobre a localização previamente estimada. A posição estimada é normalmente baseada em acelerômetros e giroscópio (TORRES-SOLIS; H.; CHAU, 2010). Os sensores inerciais referem-se a sensores que exploram a inércia para medir a aceleração linear (acelerômetro), ou a velocidade angular (giroscópio). A este respeito, um sistema de navegação inercial (INS) é aquele que utiliza sensores de movimento e sensores de rotação para calcular continuamente a posição, orientação e velocidade (ou seja, direção, velocidade e aceleração do movimento) de um objeto em movimento sem a necessidade de referências externa. Atualmente os smartphones modernos estão equipados com esses sensores inerciais e isso torna possível a realização de sistemas de localização interior de baixo custo, podendo até utilizar mais de uma técnica de localização (LIU et al., 2014).

2.3 Comparação Entre as Tecnologias de IPS

Nas Tabs. 2.1 e 2.2 estão apresentadas algumas vantagens e desvantagens, respectivamente, das tecnologias que podem ser utilizadas como IPS.

Analisando essas tabelas, pode-se dizer que não há uma tecnologia que possa ser empregada em qualquer situação, pois cada tecnologia tem suas limitações.

Tabela 2.1: Vantagens das tecnologias de IPS (AL-AMMAR et al., 2014)

Tecnologia	Vantagens
RFID	Penetrar sólidos, objetos não-metálicos; não exigem LOS entre transmissores e receptores de RF.
UWB	Alta precisão de posicionamento, mesmo na presença de multipercursos; passa efetivamente através das paredes, equipamentos e quaisquer outros obstáculos; e UWB não sofre interferência de outros sistemas de RF, se projetado adequadamente.
Infravermelho	Dado que sinais de IR não pode penetrar através das paredes, é adequado para a comunicação privada, porque não vai ser acessível fora da sala ou do edifício.
Ultrassom	Não requer LOS e não sofre interferência com as ondas eletromagnéticas.
ZigBee	Seus sensores exigem pouca energia e são de baixo custo em relação às outras tecnologias.
WLAN	O uso de redes que podem abranger mais de um edifício; grande quantidade de dispositivos equipados com conectividade WLAN; existem na maioria dos edifícios; LOS não é necessário.
Celular	O hardware de telefones móveis usuais pode ser utilizado, e praticamente não sofre interferência de outros dispositivos que operam na mesma frequência.
<i>Bluetooth</i>	Não requer LOS entre dispositivos de comunicação; <i>Bluetooth</i> é um padrão mais leve e altamente onipresente (incorporado na maioria dos telefones, PDAs, entre outros.
<i>Dead Reckoning</i>	Não requer hardware adicional, tais como sensores.
Processamento de Imagem	Tem maior precisão em comparação com outras tecnologias.

Tabela 2.2: Desvantagens das tecnologias de IPS (AL-AMMAR et al., 2014)

Tecnologia	Desvantagens
RFID	O sinal de RF depende da antena, a cobertura é relativamente pequena; não é facilmente integrada em outros sistemas; comunicação RF não são inerentemente seguras e consome mais energia do que os dispositivos de IR.
UWB	Alto custo dos equipamentos UWB; materiais metálicos e líquidos podem causar interferência no sinal UWB.
Infravermelho	Não penetra paredes, portanto, ele é normalmente é usado em pequenos espaços, como uma sala; exigem LOS entre emissor e receptor ao usar IR direto. Um problema com sistemas de infravermelhos difuso é que eles têm dificuldade em locais com luz fluorescente ou luz solar direta, porque as emissões infravermelhas destas fontes de luz podem gerar interferência nos sinais.
Ultrassom	Não penetra paredes sólidas, perda de sinal causado por obstrução; sinais falsos devido a reflexões, e interferência de sons de alta frequência.
ZigBee	Dado que ZigBee opera em bandas não licenciadas segundo o padrão internacional, ele fica vulnerável à interferência de uma ampla gama de tipos de sinais que utilizam a mesma frequência.
WLAN	Mudanças no ambiente, tais como a mudança de móveis de local, portas abertas/fechadas ou mesmo a presença de pessoas podem necessitar recálculo do mapa de potência do sinal predefinido, ou seja, uma recalibração do sistema.
Celular	Baixa confiabilidade devido a diferentes condições de propagação de sinal.
Bluetooth	Requer uma grande quantidade de células que são relativamente caras. Quanto maior o número de células, menor o tamanho de cada célula e, conseqüentemente, maior a precisão, mas mais células aumenta o custo de aquisição e instalação.
<i>Dead Reckoning</i>	Requer algoritmos relativamente complexos.
Processamento de Imagem	Exige LOS e a cobertura é limitada; requer alta capacidade de processamento.

O gráfico da Fig. 2.7 mostra a relação entre cobertura e precisão das tecnologias comentadas anteriormente.

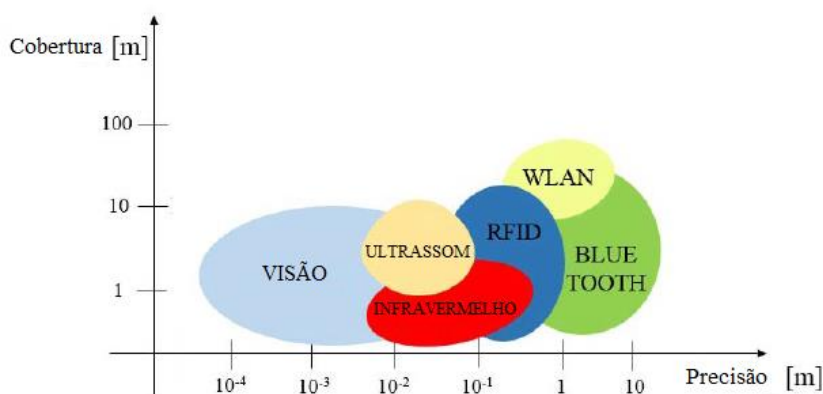


Figura 2.7: Visão geral da cobertura em função da precisão das tecnologias de posicionamento interno (adaptado de Mainetti, Patrono e Sergi, 2014)

2.4 Algoritmos Utilizados em IPS

2.4.1 Tempo de chegada (TOA)

TOA, também denominado por *Time of Flight* (TOF), mede o tempo de transmissão de sinal entre o receptor e o transmissor e é baseado na sincronização precisa do tempo de chegada de um sinal transmitido a partir de um dispositivo móvel para vários sinalizadores que recebem. A distância é determinada ao longo da duração da onda. Um transmissor envia uma mensagem com um *timestamp*¹ e quando o receptor recebe a mensagem, ele compara a hora efetiva de chegada ao tempo do *timestamp*. Esta diferença de tempo e a velocidade da luz são usados para calcular a distância entre o transmissor e o receptor. Em seguida, a localização do alvo é calculada utilizando a triangulação (FRIEDEWALD; PAPENBROOCK; HERZOG, 2013).

¹ Um *timestamp* é uma sequência de caracteres ou informação codificada que identifica quando um determinado evento ocorreu, normalmente dando data e hora do dia, às vezes com uma precisão de frações de segundos.

2.4.2 Tempo de Chegada Diferencial (TDOA)

O princípio da TDOA encontra-se na ideia de se determinar a localização relativa de um transmissor alvejado usando a diferença de tempo em que o sinal emitido por um alvo chega múltiplas unidades de medição. Três receptores fixos resultam em dois TDOAs e, assim, proporcionam um ponto de intersecção que é a localização estimada do alvo. Este método requer uma referência de tempo precisa entre as unidades de medição e assim como TOA, TDOA tem outros inconvenientes. Além disso, a propagação de rádio frequência sofre efeitos de multipercurso afetando, assim, o tempo de voo dos sinais (BOUET; SANTOS, 2008).

2.4.3 Ângulo de Chegada (AOA)

Usando o algoritmo de AOA, um receptor móvel calcula os ângulos de recepção de sinal para duas ou mais fontes com posições conhecidas. Para estimar uma posição em um plano com duas dimensões, abordagem AOA requer apenas dois transmissores. Para melhorar a precisão, três transmissores ou mais são utilizados para estimar a posição. A estimativa é realizada comparando a fase ou a amplitude do sinal entre múltiplas antenas. A partir desses cálculos, a posição do receptor alvo é triangulada pela intersecção da linha de ângulo de cada fonte de sinal (AL-AMMAR et al., 2014). A Figura 2.8 ilustra o funcionamento básico desse algoritmo.

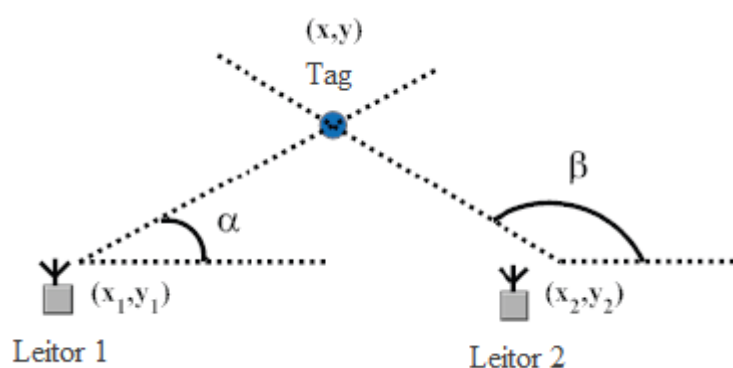


Figura 2.8: AOA - Esquema simplificado (adaptado de BOUET; SANTOS, 2008)

2.4.4 Potência do Sinal Recebido (RSSI)

Através da RSSI estima-se a distância de um nó desconhecido a um nó de referência a partir de alguns conjuntos de medições utilizando a atenuação da intensidade do sinal emitido. Este método só pode ser utilizado com os sinais de rádio. O método de localização

pela RSSI pode ser projetado usando um algoritmo de modelo de propagação ou de *fingerprinting*. O algoritmo do modelo de propagação (PMA) estabelece o modelo entre RSSI e a distância. Geralmente, quanto maior o valor da RSSI mais perto é ponto de acesso (AP). A atenuação da intensidade de sinal é inversamente proporcional à distância do em ambientes externos. Em contraste, é mais complexo em ambientes internos, devido à existência de obstáculos, como móveis, janelas e portas, equipamentos que podem causar a propagação multipercurso. Algoritmo *fingerprinting* foi analisado na subseção 2.5.2 (AL-AMMAR et al., 2014).

2.4.5 Fase do sinal recebido (RSP)

O método de RSP, também denominada fase de chegada (POA), utiliza o atraso, expressa como uma fração do comprimento de onda do sinal, para estimar a distância. Ela exige transmissores colocados em locais específicos e assume que eles emitem sinais senoidais puros. A localização pode ser realizada utilizando medições de fase e o mesmo algoritmo de TOA ou medições de diferença de fase e o mesmo algoritmo de TDOA. A desvantagem do método de RSP quando aplicado em ambientes internos é que esse algoritmo precisa de LOS (AL-AMMAR et al., 2014).

2.5 Técnicas de Posicionamento Interno

Em adição às tecnologias empregadas em projeto de sistemas de posicionamento internos, há várias técnicas que podem ser aplicadas. Uma ou mais técnicas podem ser aplicadas em conjunto para compensar as limitações de uma única técnica de posicionamento. Técnicas de posicionamento para ambientes interno foram classificados por Gu, Lo e Niemegeers (2009), em quatro classes de forma bem didática: (1) triangulação; (2) análise de cenário; (3) proximidade; e (4) análise por imagem.

2.5.1 Triangulação

A técnica de triangulação utiliza as propriedades geométricas de triângulos para calcular localizações de objetos. Triangulação pode ser dividida entre duas subcategorias, lateração e angulação. Lateração calcula a posição de um objeto através da medição da distância a partir de vários pontos de referência. Calculando a posição de um objeto em duas dimensões exige medidas de distância de três pontos não colineares, enquanto medições de

distância de quatro pontos não coplanares são necessários para três dimensões. A fim de medir a distância entre o objeto e as posições de referência em IPSs, existem duas abordagens principais: tempo de voo (do inglês, *Time of Flight ou TOF*) e de atenuação. Na abordagem de tempo de voo, é medido o tempo que o sinal leva para viajar entre o objeto e pontos de referência a uma velocidade conhecida. Enquanto na abordagem de atenuação, é medida a redução gradual da intensidade do sinal durante a transmissão, que aumenta à medida que a distância aumenta. Dada uma função correlacionando atenuação e a distância para um tipo de emissão e a resistência original da emissão, é possível calcular a distância de um objeto de alguns pontos de referência medindo a potência das emissões quando se atinge esses pontos de referência (BOUET; SANTOS, 2008).

Já angulação localiza um objeto calculando os ângulos em relação a vários pontos de referência. Em geral, angulação em duas dimensões são necessárias duas medidas de ângulo e uma medida do comprimento (por exemplo, a distância entre os pontos de referência). Em três dimensões, uma medida do comprimento, uma medição azimuth, e duas medidas de ângulo são obrigados para especificar a posição precisa (BOUET; SANTOS, 2008). A Figura 2.9 ilustra o funcionamento básico desse algoritmo.

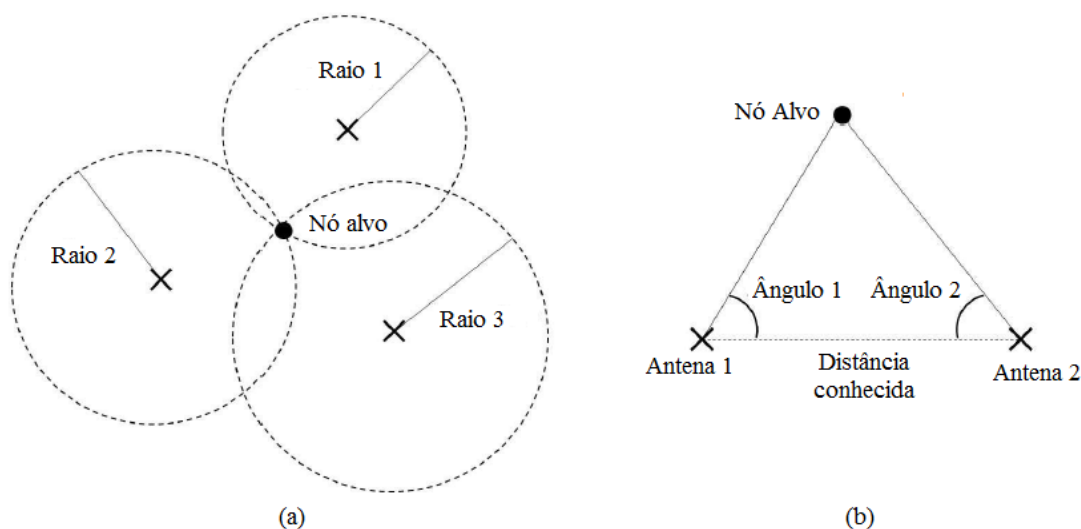


Figura 2.9: (a) Lateração; (b) Angulação (adaptado de BOUET; SANTOS, 2008)

2.5.2 Análise de cenário (*fingerprinting*)

Abordagem por análise de cenário são compostos por dois passos. Em primeiro lugar, informações sobre o ambiente (*fingerprinting*) são recolhidas, também conhecida como fase de treinamento. Em seguida, a localização do alvo é estimada comparando as medições realizadas em tempo real com o mapa gerado. Geralmente, são utilizados *fingerprints*

baseados em RSSI. As duas técnicas principais baseadas em *fingerprinting* são: *K-nearest neighbor* (kNN) também conhecido como o mapa de rádio ou RSSI, e métodos de probabilidade (BOUET; SANTOS, 2008).

A construção do mapa de rádio começa pela divisão da área de interesse em células. Valores RSSI dos sinais de rádio (por exemplo, intensidade do sinal Wi-Fi) transmitidos por APs (pontos de acesso múltiplo) são recolhidos em cada posição da área de interesse por um determinado período de tempo e armazenado no mapa de rádio. O principal desafio para as técnicas que se baseiam em *fingerprinting* é que a intensidade do sinal recebido pode ser afetada por difração, reflexão e dispersão em ambientes internos de propagação (AL-AMMAR et al., 2014).

2.5.3 Proximidade

A técnica de localização por proximidade examina a localização de um objeto alvo em relação a uma posição ou área conhecida. A presença do objeto é detectada usando um fenômeno físico com um alcance limitado. A técnica de localização por proximidade precisa de um número de detectores em posições conhecidas. Quando um alvo rastreado é detectado por um sensor, a posição do alvo é considerada na área ao redor do detector. Há três abordagens gerais para detecção de proximidade. O primeiro e mais básico tipo de detecção de proximidade é o contato físico com um objeto. Tecnologias para detectar contato físico incluem sensores de pressão, sensores de toque, e detectores de campo capacitivos. Outra abordagem é monitorar os pontos de acesso (APs) sem fios do celular quando um está no alcance de um ou mais pontos de acesso. A última abordagem é observar sistemas de identificação automática, como terminais de ponto-de-venda de cartão de crédito, histórico de *login* em computadores, registros de telefones fixo, e outros (LIU et al., 2007).

A técnica com base na proximidade depende de implantação densa de antenas quando se utiliza ondas de RF. Quando o alvo entra no alcance de uma única antena, a sua localização é assumida como sendo a mesma que este receptor. Quando mais que uma antena detecta o alvo, este é assumido estar na antena que recebe o sinal mais forte. Esta abordagem é simples de implementar, no entanto, a precisão é da ordem do tamanho das células (BOUET; SANTOS, 2008).

2.5.4 Imagem

O método de análise de imagem estima a localização de um ou mais pontos de interesse através das imagens. Geralmente, uma ou mais câmeras são fixadas na rota de

rastreamento do objeto para que se possa processá-las em tempo real. A partir das imagens, os alvos rastreados são identificados a partir de uma base de dados de retratos previamente obtidos (AL-AMMAR et al., 2014).

2.6 Estado da Arte

Os trabalhos acadêmicos apresentados a seguir são focados nas técnicas de localização utilizando a tecnologia RFID e etiquetas passivas feito por diversos métodos, a maioria já introduzida neste trabalho.

Saab e Nakad (2011) projetaram um IPS que utiliza a RSSI emitida pelas etiquetas eletrônicas. Nesse sistema, o leitor é posicionado num caminho predeterminado e as *tags* passivas são fixadas paralelamente à trilha do leitor com distância igual a 1,2 m entre elas. Para determinar a posição do leitor, o sistema utiliza a RSSI das duas *tags* mais próximas, utiliza um filtro de Kalman e um algoritmo iterativo para estimação da posição. Resultados experimentais mostram um erro de aproximadamente 0,1 m.

Ting et al. (2011) propõem um IPS baseado em RFID que utiliza quatro leitores posicionados nos vértices de uma área quadrada de 3x3 m, sendo esta subdividida em nove quadrados de 1x1 m. Primeiramente, é realizado uma calibração do sistema onde uma *tag* é colocada no centro de cada subárea e os dados da RSSI de cada leitor são armazenadas. Resultados experimentais mostram que dentre as 90 leituras realizadas (10 leituras para cada subárea), houve um acerto em 84 casos resultando numa taxa de acerto de aproximadamente 93%.

Wille, Broll e Winter (2011) realizaram um estudo sobre localização de uma ferramenta baseado em RFID para aplicação na medicina, em que os dados provindos do sistema de navegação fornecem ao cirurgião a localização de um instrumento em tempo real. Neste trabalho é utilizado uma técnica de aprendizagem de máquina para medir a diferença de fase em múltiplos pontos de leitura baseada em máquina de vetores de suporte. Primeiramente, são realizados experimentos para a aprendizagem da máquina e, posteriormente, a medição. Como resultados, os autores comprovam que é possível alcançar precisão próxima à 2 mm, valor suficiente para algumas aplicações médicas.

Errington, Daku e Prugger (2010) estimam a posição inicial de um robô para que seja possível utilizar uma técnica conhecida como localização e mapeamento simultâneo (SLAM). Este artigo investiga o conceito de utilização de uma matriz de *tags* RFID colocados em posições conhecidas (*fingerprinting*) para fornecer a posição inicial do veículo para o algoritmo

SLAM. Um estimador baseado em mínimos quadrados é apresentado e avaliado em experimento conduzido em uma mina de potássio no subsolo e em um ambiente interno da Universidade de Saskatchewan. Na mina de potássio, o menor erro médio foi de 20,49 cm, e no ambiente interno, com uma densidade de *tag* relativamente baixa, o menor erro médio foi de 75,53 cm. Segundo os autores, os resultados sugerem que o posicionamento baseado em RFID, usando esta abordagem de mínimos quadrados tem o potencial de fornecer a baixo custo uma estimativa posição inicial relativamente precisa.

Olszewski et al. (2013) projetaram um robô para navegação autônoma e utiliza a informação de um sistema de localização baseado em RFID com informações dados pelos sensores infravermelho e ultrassom. Para aumentar a precisão de um sistema de orientação, um método de triangulação é proposto para detectar com precisão a localização. O robô navega para um local designado com do monitoramento contínuo das etiquetas RFID nas imediações, localizando e calculando o caminho para o destino. A precisão alcançada foi de aproximadamente 30 cm.

DiGiampaolo (2010) propõe um sistema em que o usuário de um museu com deficiência visual se mova de forma autônoma utilizando uma grade de etiquetas RFID no ambiente para determinar a posição e para planejar a rota do visitante. *Tags* são implantados no teto formando uma malha permitindo uma pequena sobreposição de regiões adjacentes de leitura. O erro aproximado utilizando essa técnica é de aproximadamente 0,5 m.

DiGiampaolo e Martinelli (2012) propõem em seu trabalho um sistema de localização global que combina métodos de odometria com localização por RFID. Etiquetas RFID são colocadas no teto de uma sala e o robô navega sob essa região. A informação usada para a localização por RFID é a presença ou não da *tag* na zona de leitura do robô (*fingerprinting*). As informações dos dois sistemas são fundidas através de um filtro de Kalman e foi obtido precisão em torno de 0,1 m.

Em um estudo posterior, DiGiampaolo e Martinelli (2014) com o mesmo robô e mesmo cenário, os autores utilizaram uma técnica de localização por meio da fase do sinal de resposta das *tags* no teto da sala. A fase possui dependência não unívoca entre a posição do robô e a *tag*, mas na frequência considerada, seu valor é sensível ao deslocamento do robô. Para fundir os dados da odometria com os do sistema RFID foi utilizado um filtro de Kalman multi-hipótese. Nos ensaios experimentais, uma média de erro de estimativa posição de cerca de 4 cm é conseguida utilizando apenas duas etiquetas para uma área de cerca de 5 m².

Wang et al. (2013) apresentam um sistema de localização RFID híbrido utilizado para pedestres para superar o déficit de cobertura relacionado a etiquetas RFID passivas. Duas fontes extras são usadas para ajudar o sistema RFID: sensores de navegação inerciais (INS)

e nós ZigBee. Um filtro de partículas serve como um quadro de fusão. Um cenário de teste foi construído com 220 etiquetas RFID e 8 nós ZigBee implantados em um museu e diferentes algoritmos foram avaliados nesta implantação. Os resultados mostram que a abordagem híbrida produz localização robusta mesmo com um baixo número de *tags* e precisão aproximada de 4 m, mesmo para locais com alta quantidade de pessoas.

Hekimian-Williams et al. (2010) exploram o método de diferença de fase entre duas ou mais antenas de recepção para calcular a localização mais precisa de uma *tag* numa região. Segundo os autores, a técnica de localização por diferença de fase tem uma melhor precisão, robustez e sensibilidade quando integrado com outras medidas em relação a outras técnicas de localização usando RSSI. Em seus resultados experimentais ele mostra que precisão milimétrica pode ser atingida em situações ideais.

Vongkulbhisal e Zhao (2012) propõem um sistema de localização onde o local de etiquetas RFID passivas são determinadas pela varredura de feixes de radiação de múltiplas antenas RFID. Durante cada varredura, os ângulos horizontais e elevação da antena do leitor são registradas e esta informação do ângulo é usado no algoritmo desenvolvido para calcular a localização do *tag*. O sistema proposto exige um mínimo de duas antenas leitoras, sem a necessidade de etiquetas de referência. Os resultados experimentais obtidos a partir de um ambiente controlado demonstram um erro médio menor do que 20 cm.

Scherhäufl et al. (2013), apresentam um sistema de localização bidimensional para *tags* RFID passiva com base na avaliação da fase do sinal de resposta da *tag* utilizando várias antenas, onde uma é a transmissora e as outras restantes receptoras. Resultados experimentais mostram erro de localização menor do que 0,1 m para 99% das medições realizadas.

Nazemzadeh, Fontanelli e Macii (2013) propõem um sistema de localização para cadeira de rodas que possui como sensores, encoders, giroscópio e sistema RFID. Para fundir os dados dos sensores, foi utilizado um filtro de Kalman estendido e os resultados foram obtidos através de simulações. As etiquetas RFID foram colocadas em lugares com a posição conhecida. Como resultados, no pior cenário o erro médio quadrático obtido foi de aproximadamente 1 m e no melhor cenário 50 cm.

Savochkin et al. (2014) exploram um método ainda não citado neste trabalho que é a taxa de leitura das *tags*. Eles demonstram em seu estudo que a precisão de localização obtidos utilizando a taxa média do número de leituras é comparável à obtida utilizando a RSSI do sinal (mapa de RSSI).

Zhou, Zhang e Mo (2011) apresentam um IPS que localiza as etiquetas passivas RFID estimando o AOA (ângulo de chegada), utilizando a diferença de fase. A modelagem e

resultados experimentais mostram que a diferença de fase pode ser usada para localizar com precisão as etiquetas RFID obtendo um erro médio quadrático de $1,7^\circ$ nas medições das fases nos experimentos realizados.

Y. Chen e Z. Chen (2013) apresentam um controlador proporcional-integral-derivativo (PID) com o modelo de ajuste de curva para a localização de robôs móveis e estimativa de posição por meio de identificação passiva de rádio frequência (RFID). Este esquema é baseado em um robô móvel que carrega um módulo leitor RFID que lê as etiquetas passivas de baixo custo instaladas sob o piso em um padrão de grade. Neste trabalho, os autores projetam um controlador PID para que ele siga uma trajetória curvilínea e do erro menor utilizando as *tags* como referência. Como resultados, houve uma diminuição no erro de até 10% com relação ao sistema sem o controlador, pois na presença do controlador, o veículo faz uma maior quantidade de leituras das *tags*.

Montaser e Moselhi (2014) apresentam um trabalho sobre localização de materiais, mão de obra e equipamentos em construção civil afim de obter conhecimento sobre o status do projeto do andamento da obra. São mensurados os valores RSSI e são utilizados dois métodos de localização (triangulação e de proximidade) para identificar a localização do trabalhador. Essa metodologia foi testada em um canteiro de obras de construção real. Os resultados apresentados neste estudo demonstram o potencial para um método de baixo custo para estimação de localização e rastreamento de material em uma construção. Os resultados mostram um erro médio de 1,0 m e 1,9 m para a identificação da localização do usuário e rastreamento de material, utilizando o método de triangulação, respectivamente. Os resultados mostram também um erro médio de 1,9 m e 2,6 m, para identificação da localização do trabalhador e para rastreio de materiais usando o método de proximidade, respectivamente.

Na Tab. 2.3 está apresentado um quadro comparativo mostrando um resumo das técnicas de localização mostradas neste trabalho. Pode-se notar que a maior parte dos autores citados utilizaram análise de cenário através da RSSI, mas triangulação e soluções com ângulo de fase também foram exploradas significativamente. Outro ponto que pode ser observado é quanto à precisão dessas técnicas. Nota-se também que quando se utiliza RSP, a precisão do sistema é maior do que as outras técnicas, principalmente quando se utiliza RSSI, entretanto o alcance de leitura é menor.

Tabela 2.3: Comparação das técnicas e algoritmos utilizados pelos autores apresentados no estado da arte

Autor	Triangulação	Análise de Cenário	TOA	TDOA	AOA	RSSI	RSP
Saab e Nakad (2011)	X					X	
Ting <i>et al.</i> (2011)		X				X	
Wille; Broll; Winter (2011)	X						X
Errington; Daku; Prugger (2010)		X				X	
Olszewski et al (2013)	X		X				
DiGiampaolo (2010)		X				X	
DiGiampaolo e Martinelli (2012)		X				X	
DiGiampaolo e Martinelli (2014)	X						X
Wang et al (2013)		X				X	
Hekimian-Williams <i>et al.</i> (2010)							X
Vongkulbhisal e Zhao (2012)	X				X		
Scherhäufl et al (2013)							X
Nazemzadeh; Fontanelli; Macii (2013)		X				X	
Zhou; Zhang; Mo (2011)					X		X
Y. Chen e Z. Chen (2013)		X				X	
Montaser e Moselhi (2014)	X					X	
Total	6	7	1	0	2	9	5

CAPÍTULO III

DEFINIÇÃO DO PROBLEMA E ESPECIFICAÇÃO DA SOLUÇÃO

Neste capítulo será mostrado o detalhamento do problema a ser resolvido, bem como os principais equipamentos utilizados na implementação de um sistema de posicionamento utilizando RFID.

3.1 Definição do problema

O sistema de posicionamento por RFID será utilizado numa bancada seletora de peças onde estas são separadas em compartimentos diferentes de acordo com alguma necessidade específica.

O IPS projetado deverá ser capaz de separar uma peça para o compartimento correto acionando o atuador pneumático C1, C2 ou C3 quando a peça estiver localizada dentro da zona de ativação A1, A2 ou A3, respectivamente.

A bancada possui quatro compartimentos distintos denominados D1, D2, D3 e D4. Quando se deseja separar uma peça para o compartimento D1, D2 ou D3, os atuadores C1, C2 ou C3 deverão ser acionados, respectivamente. Para separar a peça para o compartimento D4, nenhum atuador é acionado.

Os atuadores pneumáticos, as zonas de ativação e os compartimentos estão apresentadas na Fig. 3.1 e os limites de cada área definidos arbitrariamente estão apresentados na Tab. 3.1.

O operador define qual o compartimento que uma determinada peça deve ser separada e a bancada será descrita com maiores detalhes no item 3.2.4.

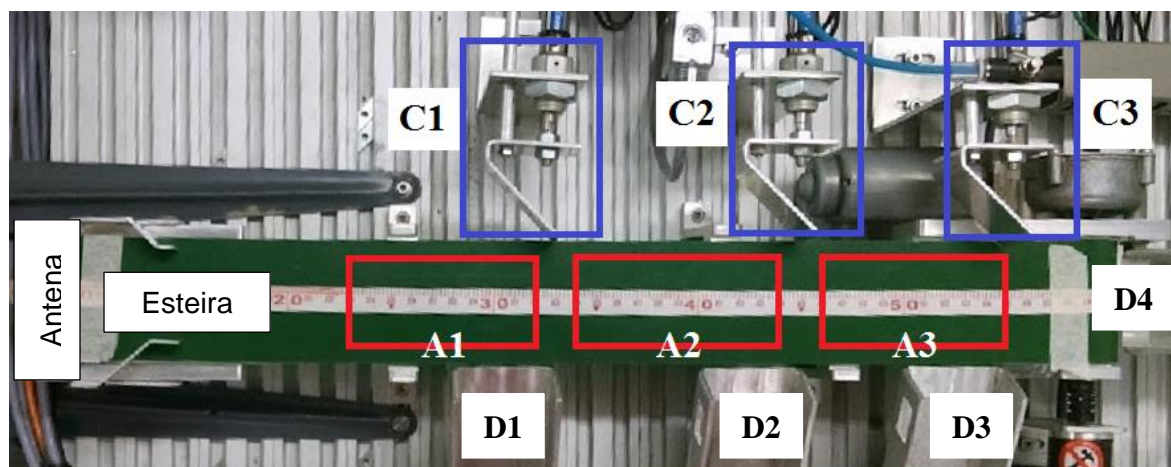


Figura 3.1: Áreas e atuadores da bancada de seleção de peças

Tabela 3.1: Valores dos limites de atuação para cada atuador

Atuador	Área	Limite mínimo (cm)	Limite máximo (cm)
C1	A1	24	32
C2	A2	34	42
C3	A3	44	55

3.2 Especificação da Solução

3.2.1 IPS na bancada seletora de peças

A lógica de controle da bancada está centralizada no computador. Ele é quem recebe os dados RSSI da antena e os processa para tomar uma decisão e, de acordo com o programa, determina quando os comandos são enviados e o momento que os atuadores entrarão em ação. As peças são colocadas na esteira de modo que *tag* nela fixada fique aproximadamente paralela à antena, já que o ângulo entre elas influencia no valor da RSSI.

O controle da bancada é realizado pelo Arduino e este é responsável por executar os comandos de ligar e desligar a esteira e avançar ou recuar os cilindros pneumáticos.

Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrônica de *hardware* livre e de placa única e será detalhado na seção 3.2.4.

Para o problema abordado neste trabalho, nenhum dos sensores apresentados na Tab. 3.5 foram utilizados, pois o sistema RFID é suficiente para a localização da peça. A bancada com a antena está apresentada na Fig. 3.2 e ela foi posicionada a aproximadamente 10 cm da esteira.

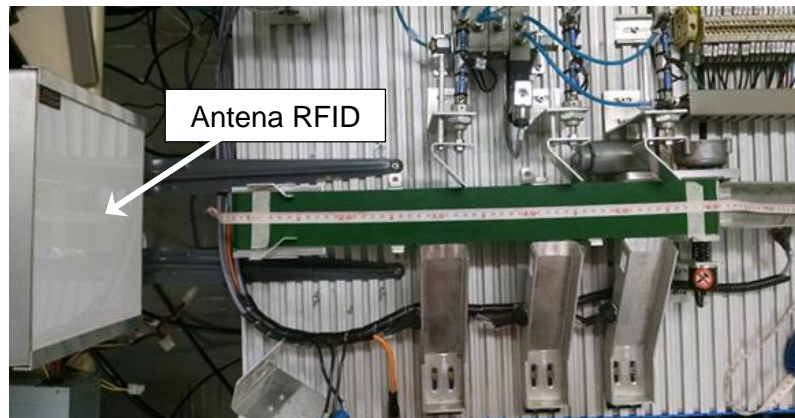


Figura 3.2: Bancada seletora XC243 com a antena RFID

A Figura 3.3 mostra o diagrama eletropneumático simplificado da bancada seletora ligado ao Arduino e este ao *Xbee*. As linhas sólidas são linhas de ar comprimido, enquanto as linhas pontilhadas são sinais elétricos. As válvulas solenoides são ativadas pelas portas 3, 4, 5 e 6 do Arduino e as portas de comunicação Rx e Tx, juntamente com a alimentação, são conectadas ao *Xbee*.

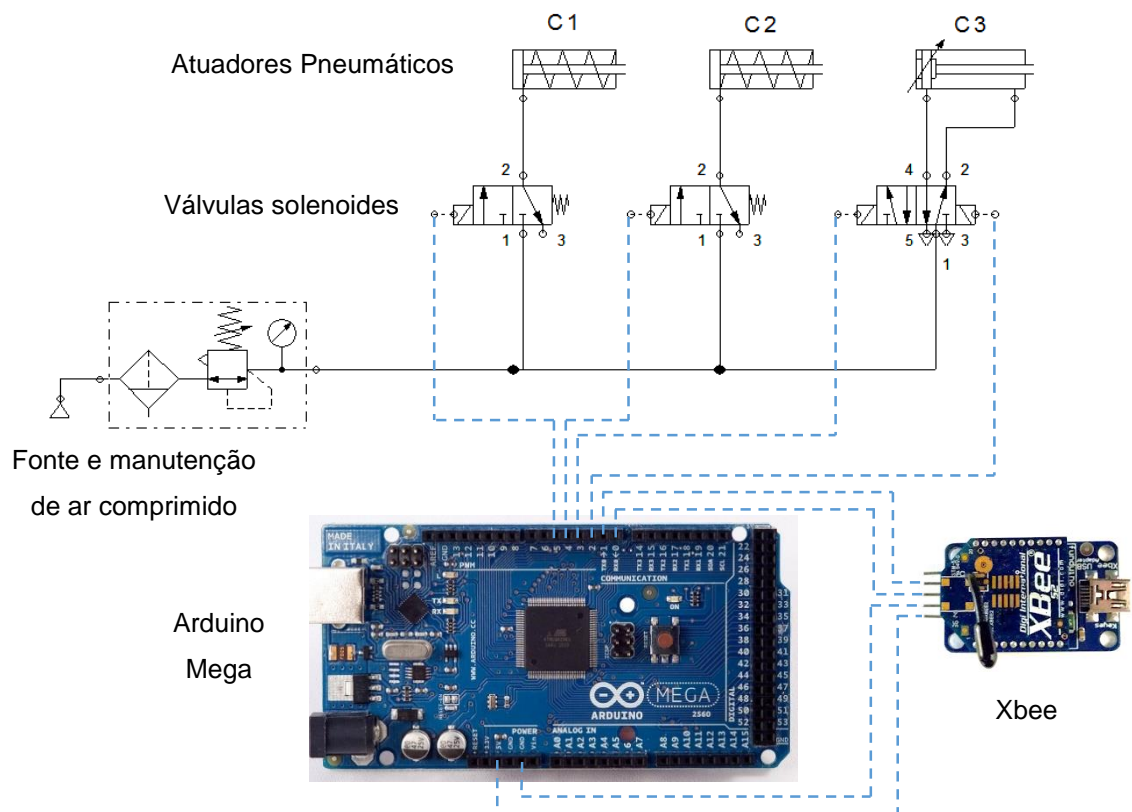


Figura 3.3: Diagrama eletropneumático da bancada seletora de peças e as ligações do Arduino e módulo *Xbee*

A Figura 3.4 ilustra um esquema do sistema de controle integrado à bancada seletora de peças que pode ser subdividida em dois sistemas, o IPS RFID, responsável por dar a informação da distância que uma peça está na esteira, e o sistema de controle que é responsável pela atuação das válvulas solenoides que comandam as válvulas e a esteira a partir do processamento da informação dada pelo IPS RFID.

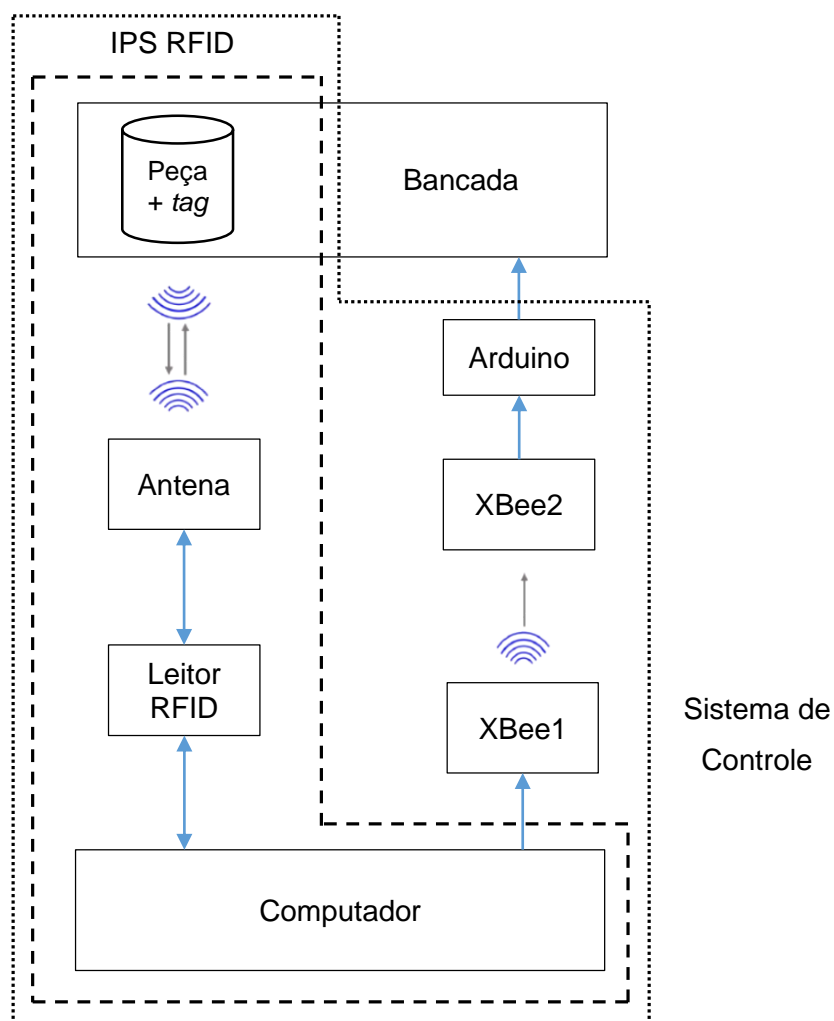


Figura 3.4: Estrutura do IPS e sistema de controle aplicado à bancada seletora de peças

3.2.2 Algoritmos de aquisição de dados e cálculo de distância

O primeiro algoritmo foi programado na linguagem Java e foi construído para a aquisição da potência de resposta da *tag* referente ao ensaio de calibração do sistema. O fluxograma desse algoritmo está apresentado na Fig. 3.5. Os passos do algoritmo estão descritos a seguir:

- 1) O usuário deve entrar com uma lista de argumentos (porta serial e entrada da antena);
- 2) É estabelecida a conexão do computador com o leitor;
- 3) Faz-se uma leitura de RSSI;
- 4) A cada leitura realizada, o algoritmo verifica se o dado não é nulo;
- 5) Caso a leitura tenha sido bem-sucedida, salva-se o dado e o algoritmo retorna ao passo 3 até que o número de dados coletados seja igual ao desejado.

Outro algoritmo também programado na linguagem Java foi construído para o cálculo da distância da *tag* à antena dado a RSSI como entrada. O fluxograma desse algoritmo está apresentado na Fig. 3.6. O procedimento tem vários passos em comum com o algoritmo anterior e possui basicamente as seguintes etapas:

- 1) O usuário deve entrar com uma lista de argumentos (porta serial e entrada da antena);
- 2) É estabelecida a conexão do computador com o leitor;
- 3) Faz-se uma leitura de RSSI;
- 4) A cada leitura realizada, o algoritmo verifica se o dado é não nulo;
- 5) Caso a leitura tenha sido bem-sucedida, armazena-se o dado em um *buffer* temporário de tamanho '*n*' para que seja possível fazer uma média aritmética dos '*n*' valores de armazenados; o tamanho do *buffer* é definido pelo usuário;
- 6) Retorna-se ao passo 3 até que o *buffer* temporário se complete;
- 7) Com o *buffer* completo, calcula-se a média aritmética dos valores nele contido;
- 8) Calcula-se o valor da distância através da equação encontrada na calibração e limpa-se o *buffer*;
- 9) Retorna ao passo 3 até que o número de leituras desejado seja atingido.

Os algoritmos programados estão apresentados no Apêndice III.

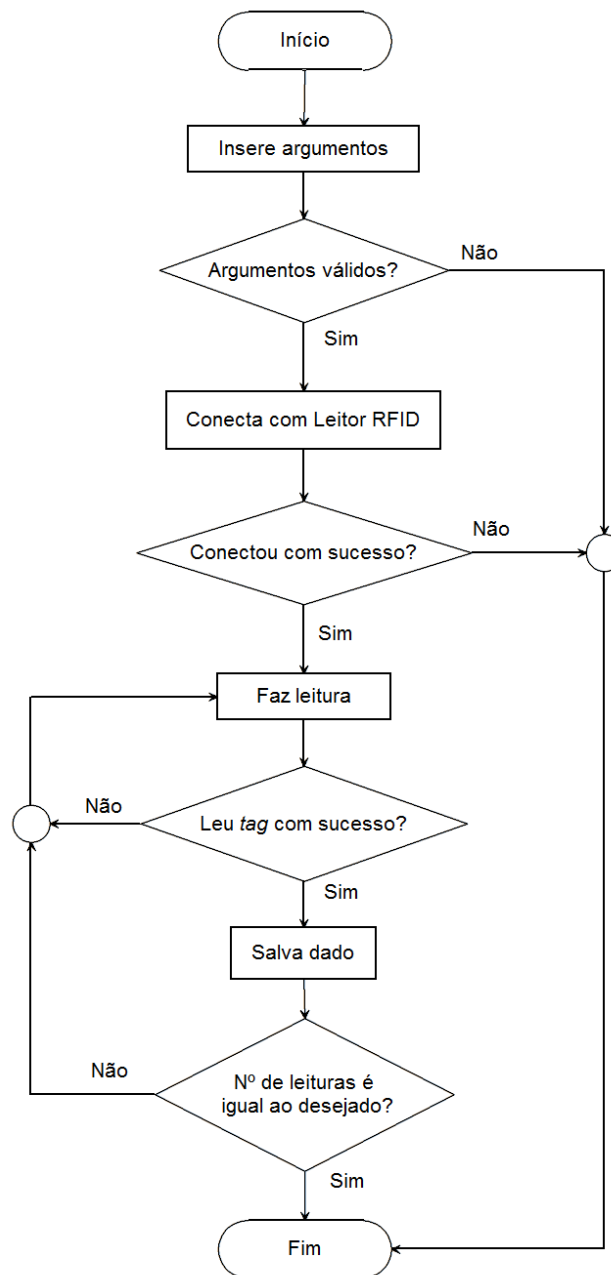


Figura 3.5: Fluxograma do algoritmo para leitura dos dados RSSI

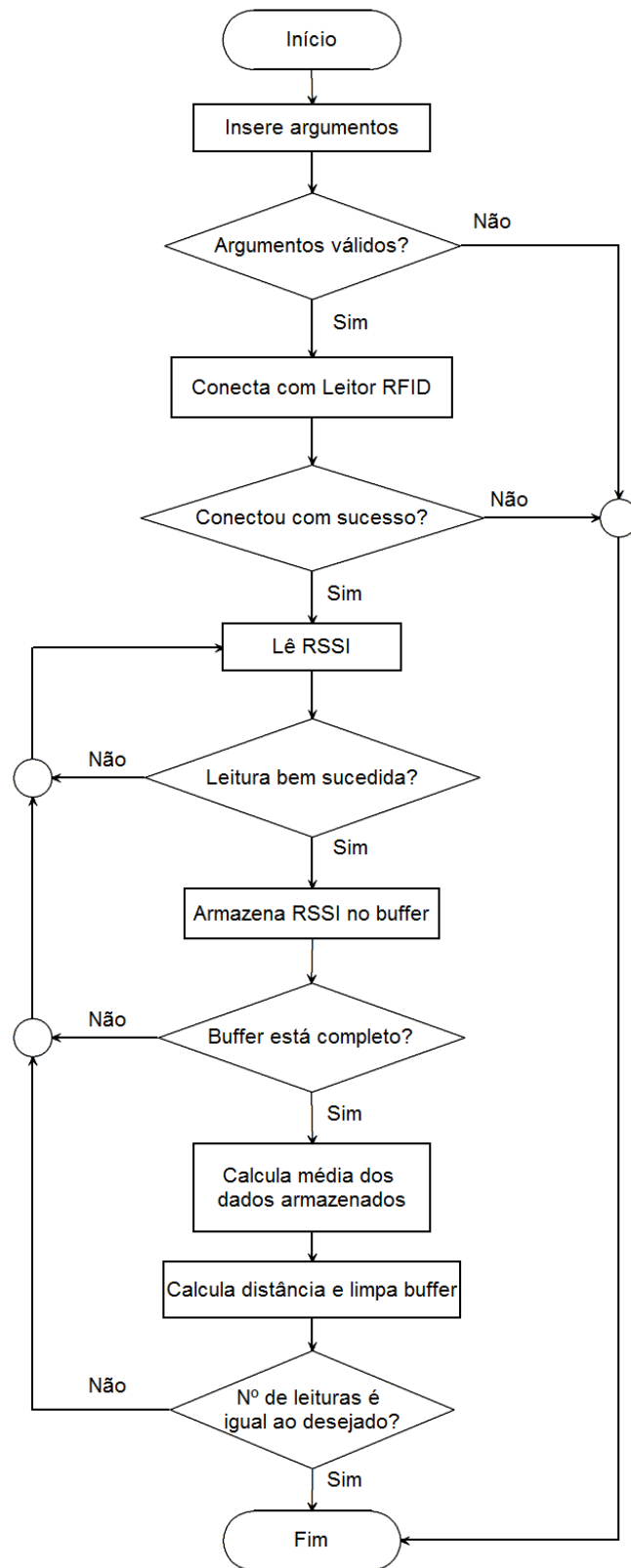


Figura 3.6: Fluxograma do algoritmo que calcula a distância em tempo real

3.2.3 Comunicação do sistema

O computador e o Arduino se comunicam através de comunicação serial sem fio utilizando dois módulos *XBee* que operam segundo o protocolo *ZigBee*. A direção da comunicação é do computador para o Arduino, uma vez que o este não envia nenhuma mensagem de resposta.

Para que o computador possa enviar dados para o Arduino, foram criadas duas classes, Controle Porta e Arduino, e elas estão relacionadas de acordo com o diagrama de classes apresentado na Fig. 3.7. O código está no Apêndice III.

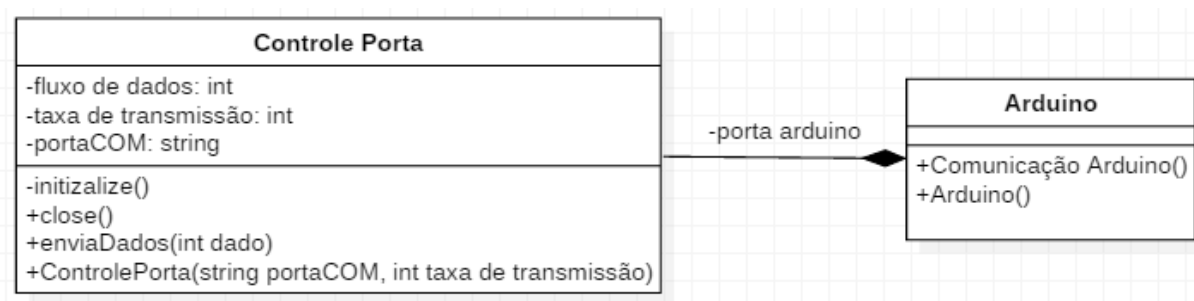


Figura 3.7: Diagrama de classes da comunicação serial

3.2.4 Principais Equipamentos

Os principais equipamentos selecionados para a realização dos experimentos estão listados e mais detalhados a seguir:

- Leitor RFID UHF Micro da ThingMagic;
- Antena UHF monoestática;
- Tag passiva UHF dipolo curto;
- Bancada de separação de peças XC243 da Exsto;
- Arduino Mega 2560;
- Dois módulos XBee S2 e adaptadores;
- Computador;
- Suporte para antena e tags;
- Cabos para as conexões.

Leitor RFID UHF Micro da ThingMagic

O Micro foi projetado para atender as demandas de alto desempenho de leitores RFID portáteis ou fixos. Este leitor de RFID UHF oferece duas portas de antenas e suporta a transmitir sinal de até 30 dBm. As conexões laterais de sinais, alimentação e RF permite que o módulo seja soldado diretamente para uma placa-mãe como um componente padrão, podendo ser embarcado com facilidade numa aplicação mais específica.

As principais características do módulo leitor RFID Micro incluem:

- Tamanho pequeno: 46 (largura) x 26 (profundidade) x 4,0 (altura) milímetros;
- Suporte para o protocolo EPCglobal Gen2 (ISO 18000-6C) (IP-X e ISO 18000-6B opcional);
- Suporte para duas antenas monoestática RF;
- Níveis de leitura e gravação em separado, comando ajustável de -5 dBm a 30 dBm em passos de 0,5 dB;
- 28 ligações placa de ponta ou Molex conector de perfil baixo, proporcionando o acesso a alimentação DC, comunicação, portas GPIO (*General Purpose Input and Output*);
- Comunicação de dados via UART e USB 2.0;
- Duas portas 3,3V bidirecionais configuráveis como entrada (sensor) ou saída (indicador);
- Taxa de leitura de 750 *tags*/segundo usando as configurações de alto desempenho;
- Máxima distância de leitura de uma *tag* próxima de 9 m, com antena de 6 dBi.

Além disso, o leitor Micro pode ser programado em três linguagens diferentes, Java, C e C# tendo como base o guia MercuryAPI, que tem o objetivo de fornecer uma interface de programação comum a todos os produtos da ThingMagic.

Isso é possível através da biblioteca de APIs que a fabricante fornece, possibilitando ao usuário construir um algoritmo que possa cumprir seu objetivo específico. Pois, com as funções implementadas nessa biblioteca, o programador é aquele que define a lógica de funcionamento do leitor tornando o produto versátil para diversas aplicações.

A ThingMagic também disponibiliza alguns exemplos de software de como executar algumas funções simples do leitor. Um desses programas foi utilizado como base para a construção do algoritmo desenvolvido nesse trabalho, uma vez que as funções de conexão do leitor com o computador, parâmetros de inicialização, verificação de erro, entre outras são padronizados independente da aplicação.

O leitor possui resolução de RSSI de 1 dBm.

Além do código EPC de cada *tag*, o leitor pode retornar outros dados, conhecido como metadados que estão apresentados na Tab. 3.2. Um deles é valor da RSSI emitida pela *tag* que será largamente utilizada neste trabalho. Nessa função o próprio leitor faz várias leituras durante um período de tempo determinado pelo usuário e é retornado o maior valor entre os valores obtidos.

Tabela 3.2: Metadados disponíveis na leitura de uma *tag*

Meta Dado	Descrição
Identificação da antena	A antena na qual a <i>tag</i> foi lida. Se a mesma etiqueta é lida em mais do que uma antena, haverá uma entrada para cada antena em que a etiqueta foi lida. Quando estiver usando um multiplexador, se configurado corretamente, a identificação da antena se dará na porta da antena lógica que a <i>tag</i> for lida.
Contador de leitura	Número de vezes que uma <i>tag</i> foi lida em uma determinada antena.
<i>Timestamp</i>	O momento em que a etiqueta foi lida, em relação ao momento em que o comando para ler foi emitido, em milissegundos.
Dados da <i>tag</i>	Quando chamada a função para se ler os dados contidos na etiqueta (<i>TagReadData</i>), ela conterá os primeiros 128 dados do tipo <i>word</i> retornados de cada <i>tag</i> .
Frequência	A frequência na qual a <i>tag</i> foi lida.
Fase da tag	Fase média da resposta da <i>tag</i> em graus (0°-180°)
LQI/RSSI	Potência do sinal recebido da <i>tag</i> em dBm.
Estado da GPIO	O estado do sinal (alto ou baixo) de todos os pinos do GPIO quando uma <i>tag</i> foi lida.

Mais detalhes sobre o hardware e como programar o leitor Micro da ThingMagic pode ser encontrado no endereço eletrônico <http://www.thingmagic.com/index.php/embedded-rfid-readers/micro>.

Antena UHF monoestática

A antena UHF monoestática da Acura Global pode ser utilizada em ambientes internos e externos, com partes metálicas em inox e alumínio. E é compatível com qualquer leitor que seja capaz de utilizar antenas monoestática, uma foto da antena é apresentada na Fig. 3.8.



Figura 3.8: Antena monoestática da Acura Global

As características elétricas e operacionais da antena estão apresentadas das Tabs. 3.3 e 3.4, respectivamente, e o diagrama de irradiação na Fig. 3.9.

Tabela 3.3: Características elétricas da antena

Faixa de frequência	902-928 MHz
Ganho	6 dBi (máx.)
Abertura do feixe em 3dBm	77° (horizontal), 72° (vertical)
Polarização	LHCP (circular)
Axial Ratio	902-928 MHz @ 3,5 dB (máx.)
F/B Ratio	-14 dB (típico)
Impedância de entrada	50 (Ohm)
Potência de entrada	6 W (máx.)
Proteção	Aterramento DC

Tabela 3.4: Características operacionais da antena

Dimensões	208 x 204 x 28,5 mm
Peso	0,7 kg
Conector	TNC fêmea reverso
Encapsulamento	Plástico (frente) e Alumínio (base)
Temperatura de operação	-20°C a 65°C
Fixação	4 roscas e porcas M6 em aço inox

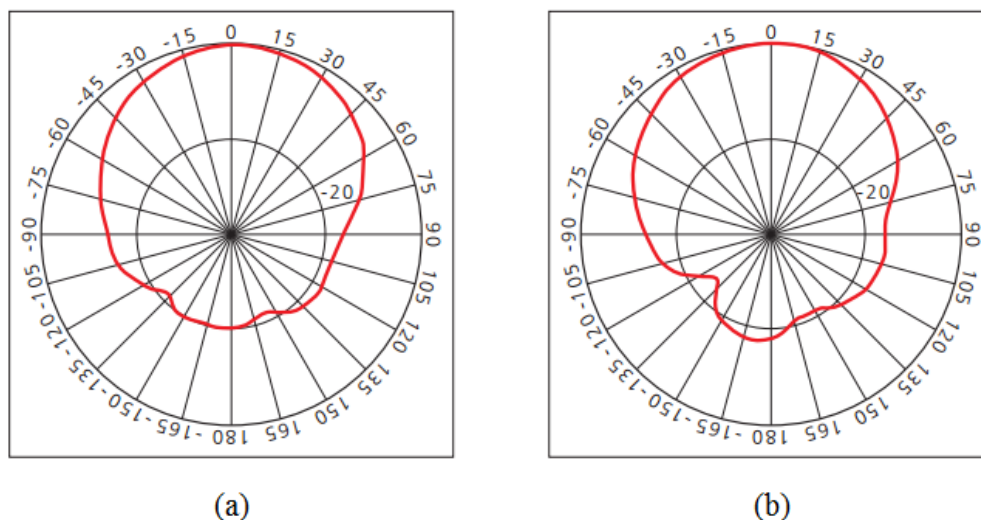


Figura 3.9: (a) Diagrama de irradiação horizontal a 915 MHz; (b) Diagrama de irradiação vertical a 915 MHz

Bancada de separação de peças XC243 da Exsto

Originalmente, a bancada de separação de peças da Exsto (XC243) possui quatro compartimentos diferentes para as peças. Três compartimentos dependem de atuadores pneumáticos para que as peças sejam selecionadas corretamente e o outro quando não depende de atuador. A foto da bancada está apresentada na Fig. 3.10. A Tab. 3.5 mostra todos os dispositivos da bancada. Os sensores óptico retro reflexivo, o sensor indutivo e o sensor capacitivo são utilizados na identificação da peça. Após a classificação o sistema atuará pelas válvulas avançando ou recuando os cilindros a fim de separar as peças. Os sensores de passagem de peça indicam o final da separação de uma peça.

Normalmente, as peças separadas são de dois tipos (metálica ou plástica) e três tamanhos (pequena, média ou grande). A Fig 3.11 mostra as peças utilizadas na separação. As peças plásticas possuem duas cores (branco ou preto). A esteira possui cerca de 45 cm e sua velocidade é de aproximadamente 5,6 cm/s.



Figura 3.10. Bancada de separação de peças XC243.

Tabela 3.5. Lista de dispositivos utilizados na bancada.

Dispositivo	Quantidade
Sensor óptico retro reflexivo (identifica tamanho da peça)	3
Sensor indutivo digital (identifica peça metálica)	1
Sensor capacitivo digital (identifica fim da identificação de peça)	1
Sensor de passagem de peça	4
Cilindro dupla-ação com embolo magnético e regulador de velocidade	1
Cilindro simples-ação (retorno por mola) com embolo magnético e silenciador na via de escape	2
Válvula 5/2 vias com duplo acionamento elétrico e acionamento manual de emergência	1
Válvula 3/2 vias com acionamento simples elétrico, retorno por mola e acionamento manual de emergência	2
Motor 24 VDC	1

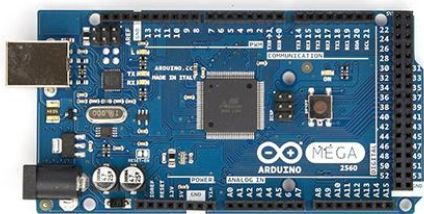


Figura 3.11. Peças metálicas e plásticas de três tamanhos distintos.

Arduino

Arduino é uma plataforma eletrônica de código aberto baseada em *hardware* e *software* de fácil utilização. A plataforma tem origem em 2005 na cidade de Ivrea, na Itália e buscava interagir em projetos escolares de forma a ser mais barato que os outros sistemas de prototipagem da época. Atualmente é uma plataforma bastante difundida mundialmente e tem o intuito de ser uma plataforma de rápida e fácil programação.

Segundo um levantamento realizado por Ferreira (2015), atualmente existem 21 diferentes modelos de Arduino que se diferenciam entre si geralmente pela quantidade de memória, microcontrolador instalado, quantidade de entradas e saídas analógicas e digitais, quantidade de portas PWM, tipos de conectores de interface, entre outros. A Fig. 3.12 mostra dois modelos de Arduinos, um Arduino Mega 2560 e um Arduino Uno. A Tab. 3.6 apresenta as características destas duas placas e suas principais diferenças estão no microcontrolador (ATmega328 para o Uno e ATmega2560 para o Mega), na quantidade entradas e saídas digitais (14 no Uno e 54 no Mega), na quantidade de entradas analógicas (6 no Uno e 16 no Mega) e nas memórias *Flash* SRAM e EEPROM (que são quatro vezes maior no Mega).



(a)



(b)

Figura 3.12. (a) Arduino Mega 2560; (b) Arduino Uno

Tabela 3.6: Características dos Arduinos Uno e Mega 2560

Arduino	Uno	Mega 2560
Microcontrolador	ATmega328	ATmega2560
Tensão de operação	5V	5V
Tensão de entrada (recomendado)	7-12 V	7-12 V
Tensão de entrada (limites)	6-20 V	6-20 V
Pinos de entrada e saída digital	14 (sendo 6 saídas PWM)	54 (sendo 15 saídas PWM)
Pinos de entrada analógica	6	16
Corrente DC por pino de entrada e saída	40 mA	40 mA
Corrente DC por pino 3.3V	50 mA	50 mA
Memória Flash	32 KB com 0.5 KB usada pelo <i>bootloader</i>	256 KB com 8 KB usada pelo <i>bootloader</i>
SRAM	2 KB	8 KB
EEPROM	1 KB	4 KB
Velocidade do <i>Clock</i>	16 MHz	16 MHz

O Arduino possui diversos protocolos de comunicação integrados a placa ou que podem ser utilizados através de *Shields*² comercialmente adquiridos. Dentre estes protocolos estão o padrão de comunicação serial, I²C, SPI, ethernet, Wi-Fi, X-10, entre outros.

O padrão de comunicação serial é a UART ou USART e todos os Arduinos têm pelo menos uma porta serial. Esta porta serial padrão comunica-se tanto pelas portas digitais 0 (*Rx*) e 1 (*Tx*) quanto com um computador via cabo USB. A porta *Rx* é para recebimento de dados enquanto que a porta *Tx* é para transmissão de dados. Quando esse padrão é utilizado as portas digitais 0 e 1 não podem ser utilizadas nem como entrada nem como saída.

² *Shields* são placas que podem ser acopladas ao Arduino estendendo suas capacidades (<https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoShields>).

Alguns Arduinos possuem mais de uma porta de comunicação serial como é o caso do Arduino Mega que possui quatro portas seriais. Para a comunicação entre dois dispositivos seriais é necessário a ligação física da porta *Rx* do primeiro dispositivo com a porta *Tx* do outro e a porta *Tx* do primeiro com a porta *Rx* do outro dispositivo. Para que haja a troca de dados é necessário que os dispositivos estejam com os pinos de terra das placas interligados.

O padrão *I²C* no Arduino utiliza a biblioteca *Wire.h* e para a implementação do barramento são necessários dois pinos (SDA para os dados e SCL para o *clock*) que variam de acordo com a placa. No Arduino Uno usa-se os pinos analógicos A4 (SDA) e A5 (SCL), enquanto que no Arduino Mega 2560 os pinos utilizados são os digitais 20 (SDA) e 21 (SCL).

Há duas formas de se utilizar essa biblioteca no Arduino para comunicação entre os dispositivos. Na primeira forma o mestre escreve enquanto que o escravo recebe os dados. Já na segunda forma o mestre recebe os dados enviados pelo escravo.

Outro protocolo de comunicação serial é o *Serial Peripheral Interface* (SPI) utilizado para comunicação de microcontroladores com dispositivos periféricos ou outros microcontroladores. Para este protocolo também há sempre um mestre (comumente o microcontrolador) que controla os dispositivos periféricos.

O Arduino também é capaz de se conectar à internet seja através de um módulo *ethernet*, ou da própria placa Arduino Ethernet ou Yún. O módulo é baseado no *chip* ethernet Wiznet W5100 que fornece uma rede IP capaz de utilizar os protocolos TCP e UDP e suporta simultaneamente quatro conexões com *socket*. O módulo comunica-se com o microcontrolador pelo barramento SPI apresentado anteriormente e utiliza o conector padrão RJ-45.

Além da comunicação Ethernet via cabo, o Arduino pode se conectar à internet de forma wireless com o módulo Wi-Fi ou com o Arduino Yún. O módulo permite a comunicação wireless através do padrão IEEE 802.11b/g. Assim como o módulo Ethernet o módulo Wi-Fi fornece a rede IP com os protocolos TCP e UDP.

Xbee

Os módulos Xbee 802.15.4 suportam comunicação ponto-a-ponto ou multiponto sem roteamento, de modo que eles estão prontos para estabelecer a comunicação entre pares entre dois módulos sem qualquer configuração.

O XBee com ZNet 2.5 ou ZB firmwares são projetados para formar redes com topologia em estrela, árvore ou malha, onde há uma hierarquia de dispositivos e um coordenador sempre é necessário. Cada módulo ZB deve ter seu firmware configurado como coordenador, roteador ou ponto de extremidade antes que se possa começar a comunicação.

Em uma rede ZigBee deve haver apenas um coordenador que gere toda a rede. Pode haver vários roteadores anexado a cada coordenador e muitos dispositivos finais que podem se comunicar diretamente com um coordenador ou passam mensagens para outros dispositivos finais através do roteador ou do coordenador. Apesar de que cada módulo deve ser configurado para um papel específico, a vantagem é que se pode formar redes mais amplas do que com os módulos de 802.15.4. O protocolo ZigBee permite configurar um link de rádio entre os módulos que estão distantes uns dos outros, enviando mensagens através de vários roteadores de um *endpoint* até outro *endpoint*. Também pode-se fazer redes em que os *endpoints* economizam energia ao dormir e não perdem mensagens mesmo dormindo. Para conectar o Xbee com o Arduino, um *shield* ou um módulo denominado *Xbee Explorer* deverá ser utilizado assim como apresentado na Fig. 3.13.

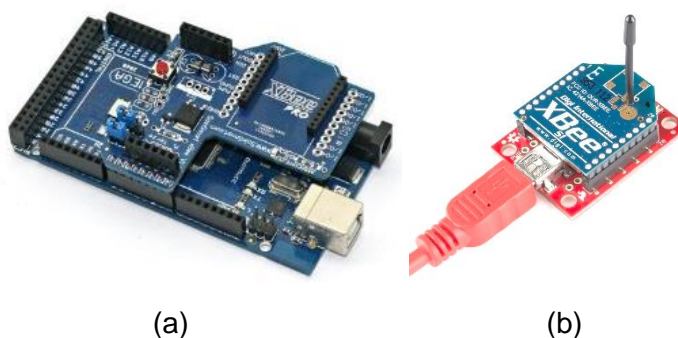


Figura 3.13: (a) Xbee Shield para Arduino; (b) Xbee Explorer

3.3 Análise Fatorial

Antes de se fazer os experimentos, é necessário estudar quais fatores influenciam significativamente na RSSI emitida pela *tag* e definir os seus valores. Para tal, foi realizado o estudo utilizando o método fatorial completo apresentado no Anexo I. Os fatores estudados estão apresentados em seguida:

- 1) Tempo de leitura;
- 2) Número de dados;
- 3) Altura da *tag* em relação ao piso;
- 4) Altura da antena em relação ao piso;
- 5) Orientação da *tag*.

Os fatores foram separados em dois grupos: o primeiro possui tempo de leitura e número de dados e o segundo a altura da *tag* e da antena em relação ao piso e a orientação da *tag*.

3.3.1 Análise dos fatores de influência

Para se analisar a influência desses fatores duas baterias de testes foram planejadas utilizando o método dos fatoriais completos 2^2 (duas variáveis) e 2^3 (três variáveis).

O primeiro experimento é utilizado para analisar a influência do tempo de leitura e da quantidade de dados coletados sobre o valor da RSSI médio. Verificou-se que não há influência significativa no resultado utilizando os valores adotados no experimento.

O segundo experimento realizado teve como objetivo analisar se outros três fatores têm influência significativa nos resultados. Eles são a orientação da *tag*, a altura da antena e altura da *tag* em relação ao piso. O fator que mais influenciou é a orientação da *tag*, sendo que os maiores valores médios de RSSI são obtidos quando a etiqueta está na posição vertical. Os dois estudos estão apresentados no Apêndice I. Os valores dos fatores de influência estudados estão apresentados na Tab. 3.7.

Tabela 3.7: Valores dos fatores selecionados

Fator	Valor
Tempo de Leitura	400 ms
Quantidade de Dados	200
Orientação da <i>tag</i>	Vertical
Altura da antena	30 cm
Altura da <i>tag</i>	30 cm

A montagem para os experimentos realizados no ambiente interno está apresentada na Fig. 3.14 com a ressalva de que a *tag* nos testes de calibração e validação do modelo está na posição vertical.

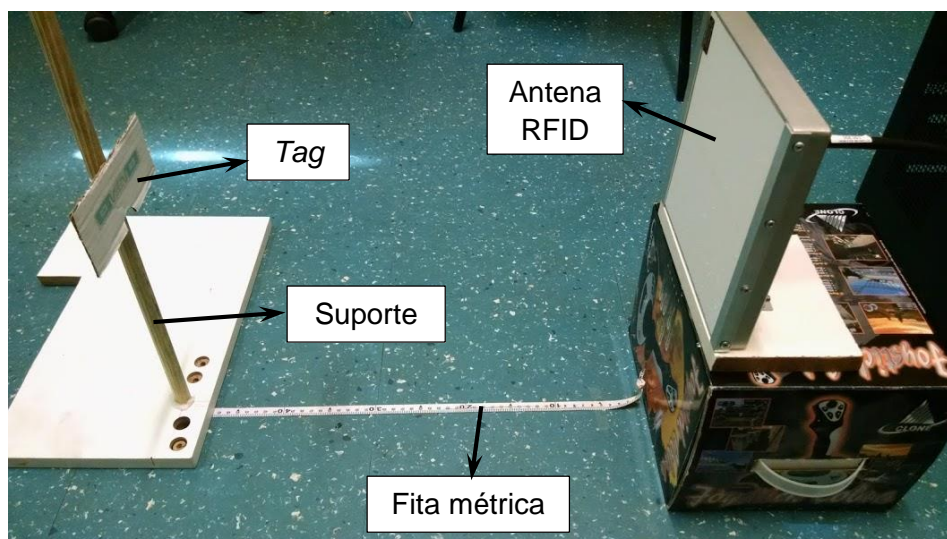


Figura 3.14: Montagem da bancada para testes em uma sala sem obstáculos

Para os ensaios de calibração foram coletados 200 valores de RSSI para cada valor de distância. As distâncias foram escolhidas arbitrariamente variando de 10 cm em 10 cm, iniciando na posição 10 até 200 cm. Observando que a ordem de realização dos ensaios foi aleatorizada para diminuir a presença de erros sistemáticos.

A validação do modelo obtido é feita utilizando a análise de variância (ANOVA) realizando-se dois ensaios, um para a obter o modelo e outro para comparar com o mesmo, assim, tem-se um critério quantitativo para julgar se o modelo encontrado é uma boa representação dos dados experimentais ou se é necessário utilizar uma expressão matemática diferente como referência. A teoria resumida da ANOVA está no Anexo I.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E ANÁLISE

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nos experimentos realizados do IPS para ambiente interno sem obstáculos e do IPS integrado à bancada seletora de peças, além de comparar os dois modelos escolhidos.

4.1 IPS para um ambiente interno sem obstáculos

Inicialmente, será discutido sobre a calibração do IPS e em seguida os resultados utilizando o modelo escolhido para um ambiente interno sem obstáculos. Os experimentos foram executados numa sala que contém computadores, cadeiras, móveis, equipamentos eletrônicos, entre outros.

4.1.1 Etapa de calibração

Foram realizados dois ensaios para a calibração do sistema. A primeira bateria de testes, denominado de ensaio 1, foi utilizada para analisar qual a distância máxima que o sistema consegue medir ou a partir de qual ponto não há diferença significativa das medições e estimar uma relação entre a RSSI emitida pela *tag* e a distância da antena à etiqueta RFID. A outra bateria de testes denominada de ensaio 2 tem o objetivo de validar o modelo obtido através de uma análise de variância (ANOVA) e determinar o erro de medição em cada ponto.

Os dados dos dois ensaios estão apresentados na Fig. 4.1 com os respectivos intervalos de confiança para o desvio padrão em cada posição com significância (α) igual 5%.

Os *outliers* extremos foram retirados de modo que pontos não representativos não interferissem nos resultados.

As medições foram feitas de 10 em 10 cm, iniciando da posição 10 cm até 200 cm.

Fazendo uma análise visual na Fig. 4.1, nota-se que a distância de 10 até 100 cm, com exceção das posições 50 e 90 cm, há sobreposição dos intervalos de confiança para a média evidenciando uma boa repetitividade nessa faixa. Entretanto, o que determinará qual a faixa de operação é o teste de diferença entre as médias de dois pontos consecutivos.

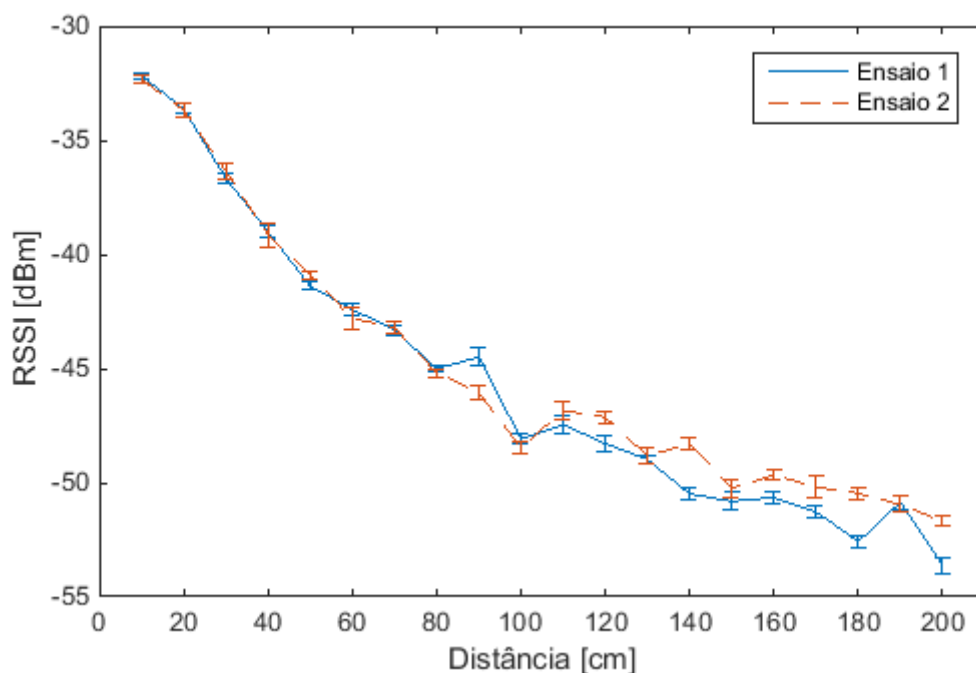


Figura 4.1: Gráfico dos valores médios da RSSI em função da distância com intervalo de confiança para a média

Em seguida foi calculado o intervalo de confiança³ através do teste *t-Student* (apresentado no Anexo I) para a diferença das médias entre as medições de dois pontos vizinhos (considerando que as amostras possuem variâncias iguais), por exemplo, 10 e 20 cm e apresentados na Tab. 4.1. Pode-se observar que o zero está contido no intervalo da diferença entre as médias relativas à 140 e 150 cm, assim, estatisticamente, não há diferença entre as medidas. Esse comportamento também ocorre para as duas posições subsequentes, evidenciando que a partir da posição 150 cm as medidas não possuem diferenças

³ Todos os intervalos de confiança foram calculados considerando que as amostras são homocedásticas (possuem variâncias iguais)

significativas num intervalo de 10 cm de distância. Nas posições 180, 190 e 200 cm, estatisticamente, houve diferença entre as médias, porém pode-se dizer que isso ocorreu devido aos erros experimentais, de ruídos externos e dos fatores que influenciam a potência do sinal de RF apresentados no item 2.1.2, porque a tendência de não haver diferença entre as médias iniciou-se a partir de 150 cm. Os intervalos calculados que contém o zero estão destacados em negrito na mesma tabela.

Os pontos cujos valores do intervalo de confiança (limite inferior e superior) são negativos, como na comparação entre as posições 80 e 90 cm ($i = 9$) e também 100 e 110 cm ($i = 11$), podem apresentar erros superiores aos dos outros pontos estimados pelo modelo, pois eles têm a tendência de se afastar da curva. Esses valores estão sublinhados na Tab. 4.1.

Então, o ajuste de curva foi realizado com os pontos de 10 a 140 cm, assim como os ensaios de validação.

Para a escolha do melhor modelo que se ajusta melhor aos dados, foram estudados ajustes de várias funções, elas estão apresentadas nas Eqs. 4.1, 4.2 e 4.3:

$$RSSI(d) = a_1 d^2 + a_2 d + a_3 + \varepsilon_i \quad (4.1)$$

$$RSSI(d) = a_1 d^3 + a_2 d^2 + a_3 d + a_4 + \varepsilon_i \quad (4.2)$$

$$RSSI(d) = a_1 \frac{1}{d^2} + a_2 \frac{1}{d} + a_3 + \varepsilon_i \quad (4.3)$$

Onde, $RSSI(d)$ é a potência do sinal recebido em dBm, d é a distância em cm e ε_i é o erro aleatório associado à determinação experimental.

Tabela 4.1: Intervalo de confiança para a diferença entre as médias de duas distâncias vizinhas

i	Média RSSI [dBm]	Posição [cm]	Intervalo de confiança: $\mu_{i-1} - \mu_i$ [dBm], $i = 2, \dots, 20$	
			Limite Inferior	Limite Superior
1	-32,17	10	-	-
2	-33,62	20	1,26	1,64
3	-36,67	30	2,82	3,28
4	-39,00	40	2,01	2,65
5	-41,39	50	2,11	2,67
6	-42,41	60	0,78	1,26
7	-43,26	70	0,58	1,12
8	-45,01	80	1,58	1,92
9	-44,50	90	<u>-0,69</u>	<u>-0,32</u>
10	-48,08	100	3,44	3,91
11	-47,45	110	<u>-0,85</u>	<u>-0,39</u>
12	-48,37	120	0,67	1,16
13	-48,98	130	0,37	0,84
14	-50,62	140	1,41	1,87
15	-50,81	150	-0,06	0,44
16	-50,99	160	-0,05	0,44
17	-51,2	170	-0,01	0,54
18	-52,74	180	1,21	1,81
19	-50,90	190	-2,14	-1,62
20	-53,61	200	2,47	2,92

Os cálculos foram realizados para os três candidatos a modelo do sistema com o intuito de escolher o melhor. Os parâmetros mais importantes estão apresentados na Tab. 4.2. Nesta, é possível verificar que os dados de R^2 do modelo de segundo e terceiro grau estão muito próximos entre si e também da unidade, porém quando se compara a razão MQ_R/MQ_r , o modelo de segundo grau tem significativa vantagem, já que, quanto maior essa razão, melhor. Já o modelo apresentado na Eq. 4.3 não apresentou nenhum dos parâmetros melhores que os demais. Então, o modelo escolhido foi o de segundo grau dado pela Eq. 4.4. O estudo dos outros dois modelos está apresentado no Apêndice II.

Tabela 4.2: Comparação entre os modelos estudados

Modelo ajustado	MQ_R/MQ_r	R^2
$RSSI(d) = 0,0009d^2 - 0,2659d - 29,4649$	722,0	0,983
$RSSI(d) = 0,000003d^3 + 0,0017d^2 + 0,3140d - 28,7635$	490,9	0,984
$RSSI(d) = -4164,683 \frac{1}{d^2} + 616,427 \frac{1}{d} - 52,521$	372,9	0,967

O modelo obtido através do método dos mínimos quadrados está apresentado na Eq. 4.4.

$$RSSI(d) = 0,0009d^2 - 0,2659d - 29,4649 \quad (4.4)$$

O valor da razão $MQ_R/MQ_r = 722,0$ e $F_{2,11} = 3,98$, e pela regra prática, a razão é pelo menos dez vezes maior que o valor de referência indicando que a equação é um bom modelo para o sistema. Além disso, observando o gráfico da distribuição dos resíduos na Fig. 4.2 pode-se notar que não há evidência visual de alguma tendência.

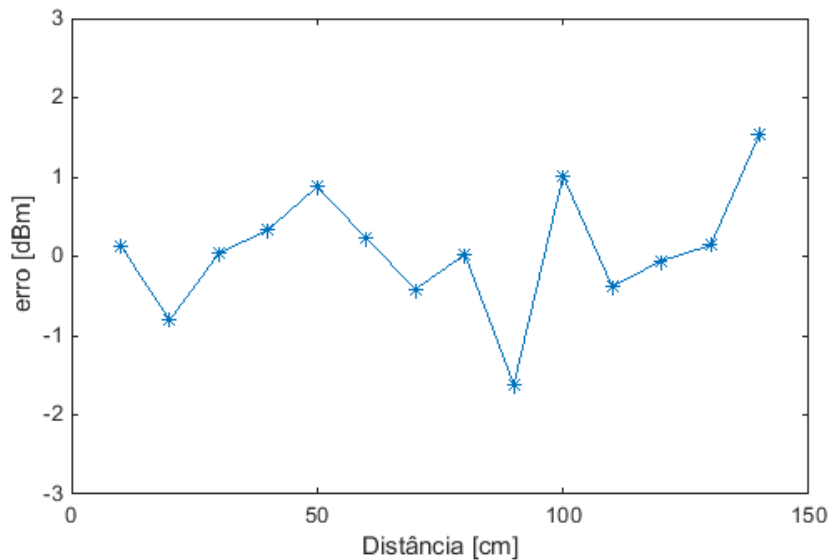


Figura 4.2: Gráfico da distribuição dos resíduos para o modelo de segunda ordem

Para validar o modelo foi realizado uma ANOVA utilizando o ensaio 2, lembrando que os dados utilizados estão no intervalo de 10 a 140 cm. Os ensaios 1 e 2 juntamente com o ajuste de curva estão apresentados no gráfico da Fig. 4.3 e os valores da ANOVA na Tab. 4.3.

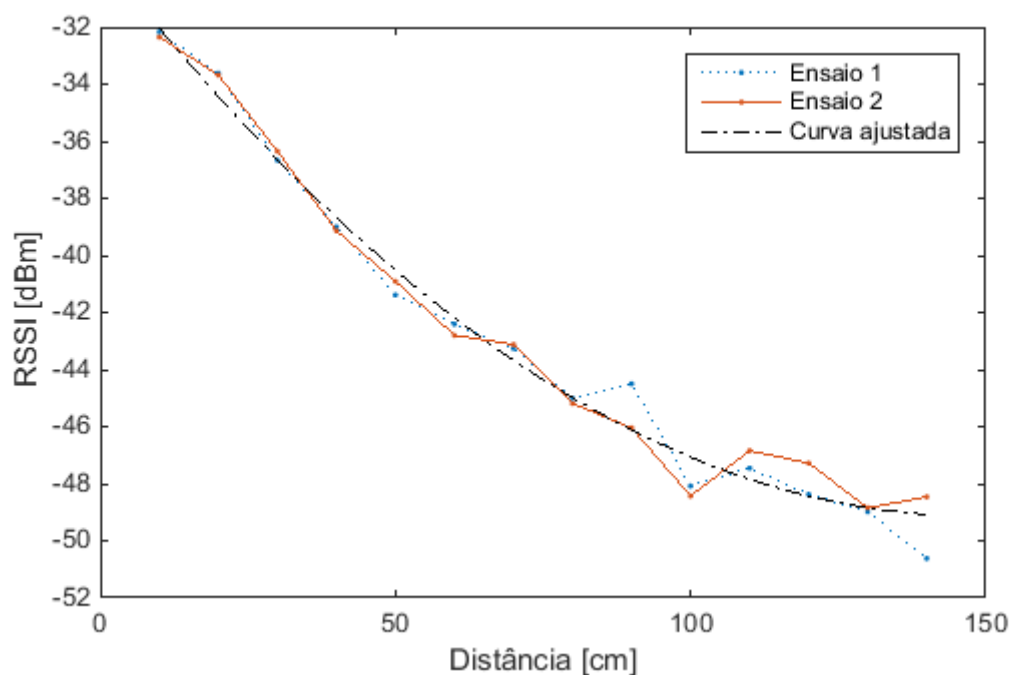


Figura 4.3: Gráfico do ajuste de curva e dos ensaios experimentais para o modelo de segunda ordem

Tabela 4.3: ANOVA - Ensaio em ambiente sem obstáculo para o modelo de segunda ordem

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Nº de graus de liberdade (gdl)	Média Quadrática
Regressão	828,9	2	414,4
Resíduos	14,3	25	0,6
Falta de Ajuste	9,7	11	0,9
Erro Puro	4,6	14	0,3
Total	843,2	27	

% de variação explicada: 98,3

% máxima de variação explicável: 99,4

Comparando a porcentagem de variação explicável com a porcentagem de variação explicada, verifica-se que estão bem próximas, indicando que o modelo obtido representa o sistema de maneira satisfatória.

Vale ressaltar que os experimentos possuem erros de posicionamento da peça e há variação do ângulo entre a *tag* e a antena.

4.1.2 Resultados experimentais

Afim de testar o modelo escolhido na subseção anterior, foram utilizados os dados de RSSI coletados no ensaio 2 da fase de calibração para as posições de 20 até 130 cm variando-se a distância de 10 em 10 cm, mas nem todos os valores de potência lidos foram utilizados, pois os *outliers* extremos foram retirados.

O gráfico das distâncias médias estimadas juntamente com seus respectivos intervalos de confiança para a média e significância de 5% está apresentado na Fig. 4.4 e os valores na Tab. 4.4. Nesta, também foi calculado o erro quadrático médio (EQM).

Também foram computados os erros absoluto e relativo com os valores das médias da Tab. 4.4 e apresentados na Tab. 4.5. Nota-se que, de acordo com os dados apresentados nessas tabelas, a distância estimada a partir de 100 cm apresenta erro absoluto maior do que 10 cm. Assim, o IPS projetado perde precisão para estimar distâncias maiores do que 100 cm. Também, os valores dos desvios padrão e do EQM tendem aumentar para distâncias a partir de 90 cm tornando a medição de posição imprecisa à medida que se afasta dessa posição. Considerando todas as posições, o erro médio absoluto é de 5,9 cm e relativo de 7,7% e quando considerado o intervalo de 20 a 90 cm o erro médio absoluto é de 2,3 cm e relativo de 5,4%.

Tabela 4.4: Valores das posições estimadas com intervalo de confiança e erro quadrático médio

Referência [cm]	Média [cm]	IC para média [cm]		Desvio Padrão [cm]	IC para desvio padrão [cm]		EQM [cm]
		Inferior	Superior		Inferior	Superior	
20	17,1	16,7	17,6	1,6	1,3	1,9	3,3
30	29,4	28,7	30,1	2,3	2,0	2,9	2,4
40	43,1	42,2	44,0	3,1	2,6	3,8	4,4
50	52,5	52,0	53,1	1,9	1,6	2,4	3,1
60	64,3	63,5	65,1	2,9	2,4	3,6	5,1
70	66,8	65,8	67,9	3,6	3,0	4,5	4,7
80	81,3	80,5	82,2	3,0	2,5	3,7	3,2
90	89,3	86,9	91,6	8,2	6,9	10,3	8,2
100	122,8	119,6	126,0	11,3	9,4	14,0	25,4
110	98,3	95,1	101,6	11,4	9,5	14,2	16,2
120	103,1	98,9	107,2	14,6	12,2	18,1	22,2
130	131,2	127,9	134,5	11,7	9,8	14,6	11,7

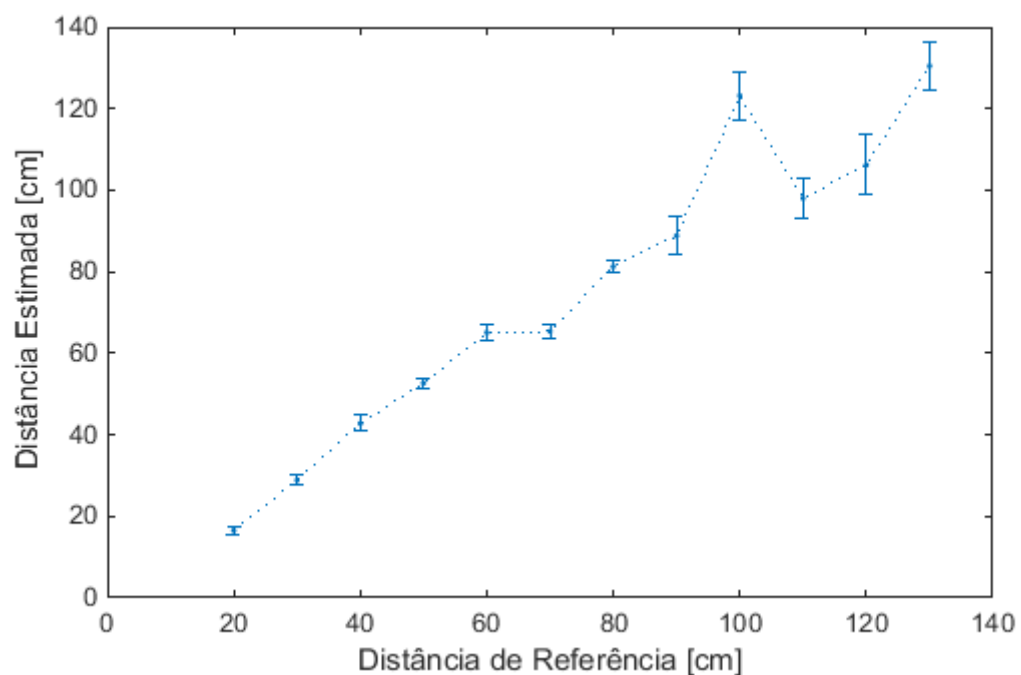


Figura 4.4: Distância média estimada com intervalo de confiança para a média (sem obstáculos).

Tabela 4.5: Erros absoluto e relativo e desvio padrão para o IPS sem obstáculo

Referência [cm]	Média [cm]	Erro absoluto [cm]	Erro relativo [%]	Desvio Padrão [cm]
20	17,1	2,9	14,5	1,6
30	29,4	0,6	2,0	2,3
40	43,1	3,1	7,8	3,1
50	52,5	2,5	5,0	1,9
60	64,3	4,3	7,2	2,9
70	66,8	3,2	4,6	3,6
80	81,3	1,3	1,6	3,0
90	89,3	0,7	0,8	8,2
100	122,8	22,8	22,8	11,3
110	98,3	11,7	10,6	11,4
120	103,1	16,9	14,1	14,6
130	131,2	1,2	0,9	11,7
Média Global:		5,9	7,7	6,3
Média de 20 a 90 cm		2,3	5,4	3,3

Dos dados coletados no ensaio 2, 150 pontos foram selecionados aleatoriamente para participar da avaliação que simula a aquisição de dados em tempo real. Dentre esses pontos, foram realizadas a média aritmética de três pontos e calculou-se a distância com a função inversa da Eq. 4.4 apresentada na Eq. 4.5. Como os valores de RSSI lidos são números inteiros, então, para uma determinada distância, a quantidade de valores distintos é pequena, cerca de 4 ou 5 valores distintos como pode ser observado no histograma da Fig. 4.5 relativo à posição 70 cm. Além disso, a variação de apenas 1 dBm causa uma variação da distância, utilizando a Eq. 4.5, de aproximadamente 7 cm. Assim, fazendo a média entre três pontos, os valores de RSSI poderão ter valores intermediários entre dois números inteiros consecutivos.

$$d(RSSI) = \left| \frac{0,2660 - \sqrt{0,2660^2 - 4 \times 0,0009 \times (-29,4649 - RSSI)}}{2 \times 0,0009} \right| \quad (4.5)$$

A Equação 4.5 é válida no intervalo de 10 a 140 cm.

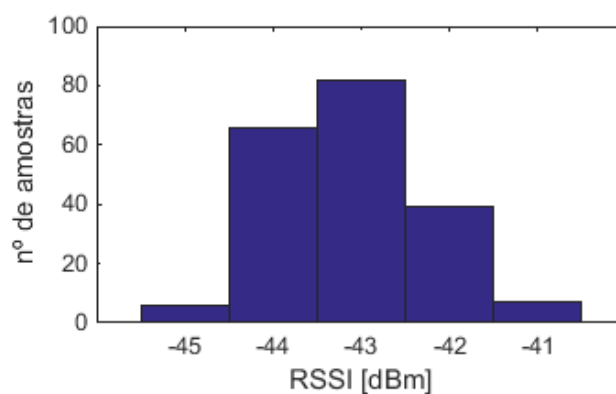


Figura 4.5: Histograma de RSSIs na posição 70 cm

Nos gráficos apresentados nas Figs. 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9 fica visualmente mais evidente o comportamento descrito no parágrafo anterior. Foram calculados 50 valores de distância utilizando o procedimento anteriormente descrito.

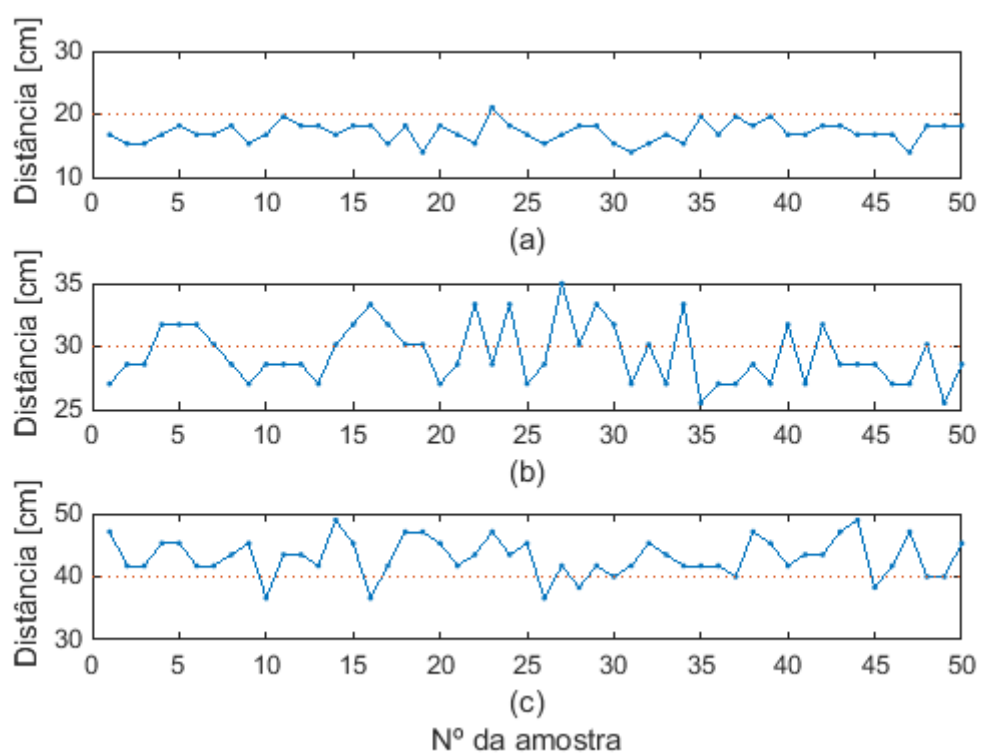


Figura 4.6: Estimação da distância nas posições: (a) 20 cm; (b) 30 cm; (c) 40 cm

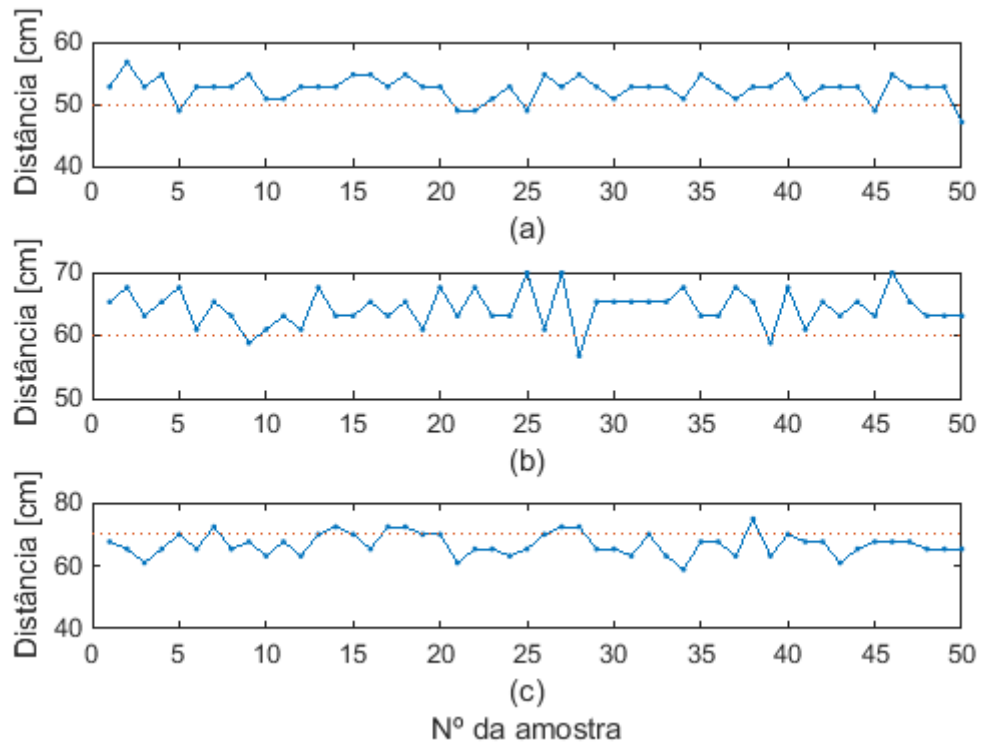


Figura 4.7: Estimação da distância nas posições: (a) 50 cm; (b) 60 cm; (c) 70 cm

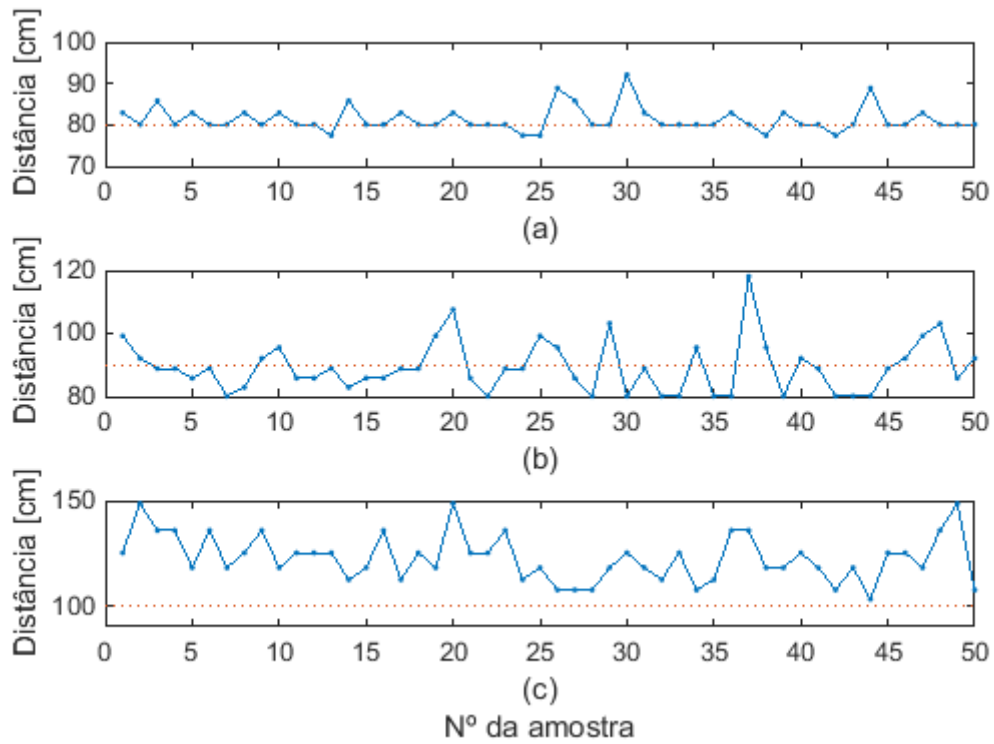


Figura 4.8: Estimação da distância nas posições: (a) 80 cm; (b) 90 cm; (c) 100 cm

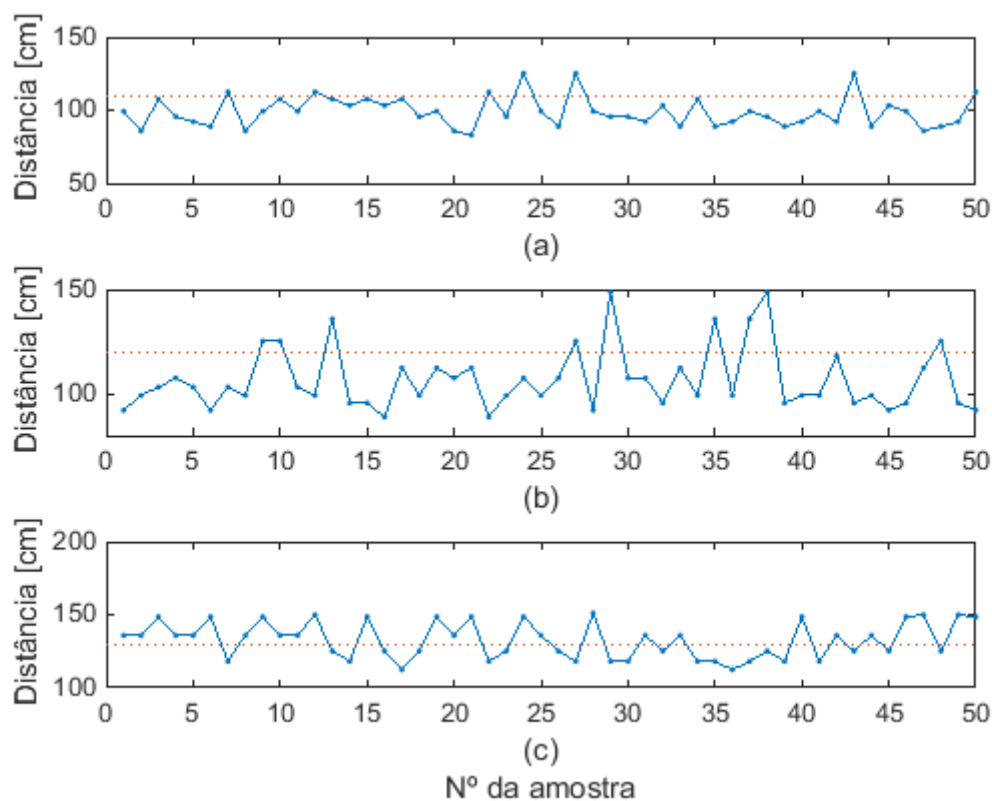


Figura 4.9: Estimação da distância nas posições: (a) 110 cm; (b) 120 cm; (c) 130 cm

4.2 IPS para a bancada seletora de peças integrado ao sistema de controle

Conhecendo melhor o comportamento do sistema de posicionamento interno para um ambiente interno sem obstáculos, nesta subseção será apresentado o projeto para o IPS a ser utilizado na bancada para separação de peças e integrado ao sistema de controle da mesma. A intenção de se utilizar um IPS numa bancada seletora de peças é ver sua performance em um equipamento de uso industrial, porque este possui cilindros pneumáticos, relés, motores, estrutura metálica, cabos de energia, entre outros.

Assim como no projeto do IPS para o ambiente sem obstáculos, também há de se fazer a calibração do sistema para analisar qual o melhor modelo a ser utilizado. Na Fig. 4.10 está apresentado o gráfico dos valores médios da RSSI em função da distância com o intervalo de confiança para a média do ensaio de calibração realizado para a bancada e a Tab. 4.6 contém valores do desvio padrão e intervalo de confiança para o mesmo, além dos dados presentes na Fig. 4.10. Esses valores foram coletados de 3 em 3 cm da posição 10 até

55 cm, que são as extremidades da esteira e as leituras dos dados foram realizadas em ordem aleatória para a diminuição de erros sistemáticos. Os intervalos de confiança da média e desvio padrão foram computados com significância de 5%.

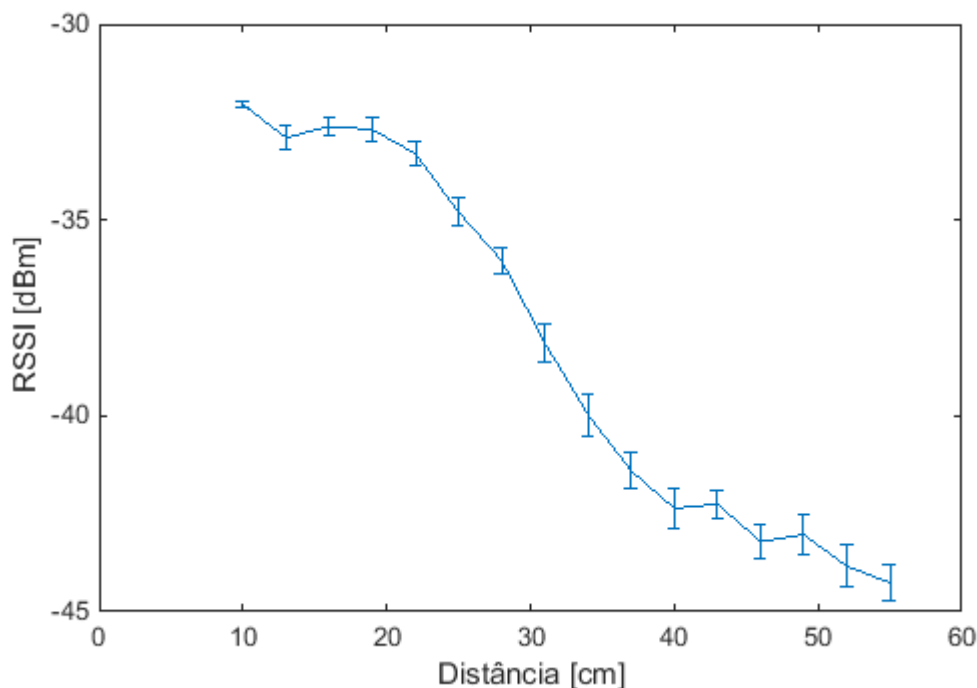


Figura 4.10: Gráfico dos valores médios do RSSI em função da distância com intervalo de confiança para a média (bancada)

Posteriormente, foram calculados o intervalo de confiança através do teste F para a diferença das médias entre as medições de dois pontos vizinhos, assim como foi feito na subseção anterior e apresentado na Tab. 4.7. Os testes acusaram que a diferença entre as médias das posições 40 e 43 cm e também 46 e 49 cm é nula (destacados em **negrito** na Tab. 4.7), ou seja, não há diferença expressiva nos valores de RSSI lidos entre essas duas posições. Entretanto, o teste entre as posições 43 e 46 cm e também 49 e 52 cm indica que há diferença entre suas respectivas médias indicando que o decaimento do sinal nessa região é menos acentuado ou mais suave. Uma das possíveis causas desse fenômeno, além de reflexão, absorção, refração, ou outras causas discutidas na seção 2.1.2, é a presença do motor da esteira situado embaixo da esteira próxima a região A3. Tal comportamento pode ser observado na Fig. 4.10 e pode afetar o acionamento o atuador nessa região.

Outro argumento que pode ser citado é que o ponto de inflexão da Eq. 4.6 é de aproximadamente 53,2 cm, ou seja, valores vizinhos a esse ponto não tem variação de amplitude significativa.

Para fazer o ajuste da curva apresentada Fig. 4.10, primeiramente, foi testado o modelo de maior sucesso no IPS para um ambiente fechado sem obstáculos, o de segunda ordem. A expressão matemática obtida da RSSI em função da distância é a Eq. 4.6 e o gráfico da mesma juntamente com o ensaio de validação está apresentado na Fig. 4.11.

$$RSSI(d) = 0,0108d^2 - 1,1501d - 13,1039 \quad (4.6)$$

Tabela 4.6: Valores da média e desvio padrão de RSSI com intervalo de confiança (bancada).

Referência [cm]	Média [dBm]	IC para média [dBm]		Desvio Padrão [dBm]	IC para desvio padrão [dBm]	
		Inferior	Superior		Inferior	Superior
10	-32,0	-32,1	-32,0	0,2	0,2	0,3
13	-32,9	-33,1	-32,7	0,8	0,7	0,9
16	-32,6	-32,7	-32,5	0,6	0,6	0,7
19	-32,7	-32,8	-32,5	0,7	0,6	0,9
22	-33,3	-33,5	-33,1	0,8	0,7	0,9
25	-34,8	-35,0	-34,6	0,9	0,8	1,0
28	-36,0	-36,2	-35,9	0,8	0,7	1,0
31	-38,1	-38,4	-37,9	1,3	1,1	1,5
34	-40,0	-40,2	-39,7	1,4	1,2	1,6
37	-41,4	-41,6	-41,2	1,2	1,0	1,4
40	-42,4	-42,6	-42,1	1,3	1,1	1,5
43	-42,2	-42,4	-42,1	0,9	0,8	1,0
46	-43,2	-43,4	-43,0	1,1	1,0	1,3
49	-43,0	-43,3	-42,8	1,2	1,1	1,4
52	-43,8	-44,1	-43,6	1,4	1,2	1,6
55	-44,3	-44,5	-44,0	1,2	1,0	1,3

Tabela 4.7: Intervalo de confiança para a diferença entre as médias de duas distâncias vizinhas (bancada)

i	Média RSSI [dBm]	Posição [cm]	Intervalo de confiança: $\mu_{i-1} - \mu_i$ [dBm], $i = 2, \dots, 16$	
			Limite Inferior	Limite Superior
1	-32,0	10	-	-
2	-32,9	13	0,69	1,00
3	-32,6	16	-0,48	-0,09
4	-32,7	19	-0,11	0,27
5	-33,3	22	0,40	0,83
6	-34,8	25	1,25	1,73
7	-36,0	28	1,00	1,48
8	-38,1	31	1,80	2,40
9	-40,0	34	1,46	2,20
10	-41,4	37	1,08	1,78
11	-42,4	40	0,62	1,30
12	-42,2	43	-0,42	0,20
13	-43,2	46	0,68	1,24
14	-43,0	49	-0,51	0,15
15	-43,8	52	0,44	1,17
16	-44,3	55	0,07	0,77

Invertendo a Eq. 4.6, obtém-se a expressão da distância em função da RSSI representado pela Eq. 4.7 válida somente para o intervalo de 10 a 55 cm.

$$d(RSSI) = \left| \frac{1,1501 - \sqrt{(-1,1501)^2 - 4 \times 0,0108 \times (-13,1039 - RSSI)}}{2 \times 0,0108} \right| \quad (4.7)$$

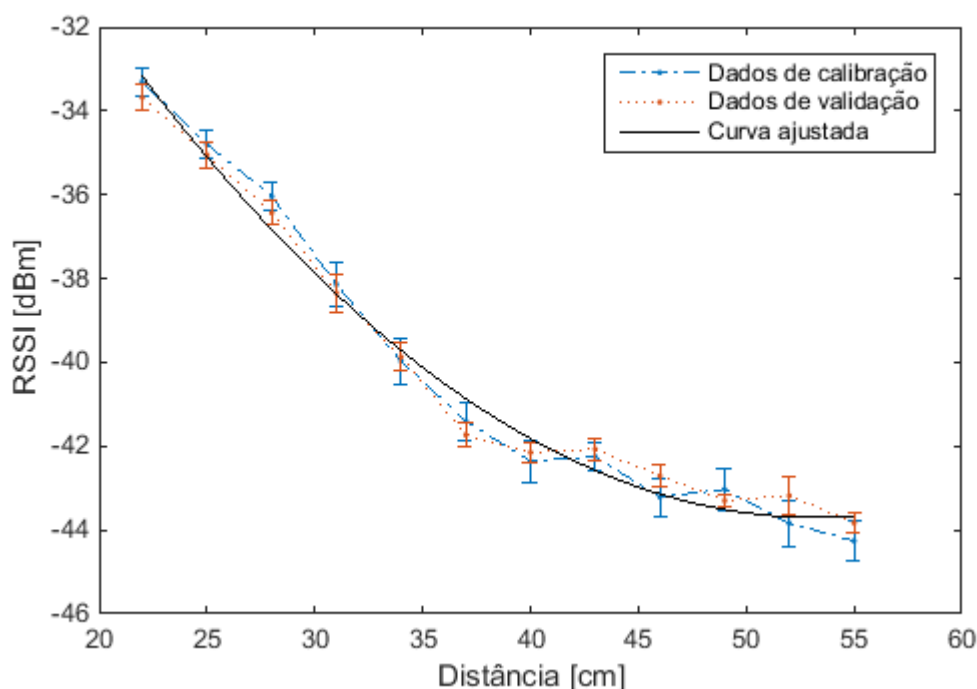


Figura 4.11: Gráfico dos valores médios da RSSI em função da distância com intervalo de confiança para a média (bancada)

Também foi realizada a ANOVA para analisar o quão o modelo proposto, apresentado na Eq. 4.6, se aproxima dos dados experimentais. Obteve-se um bom ajuste com 98,5% de variação explicada perante a 99,7%, valor máximo possível. Os valores das somas, graus de liberdade (gdl) e médias quadráticas também estão apresentadas na Tab. 4.8. Como o modelo em questão obteve um valor de porcentagem de variação explicada próxima ao valor máximo possível, não há necessidade de testar outros como na subseção anterior.

Tabela 4.8: ANOVA - Ensaio da bancada seletora de peças para o modelo de segunda ordem

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Nº de graus de liberdade (gdl)	Média Quadrática
Regressão	285,5	2	142,76
Resíduos	4,3	21	0,20
Falta de Ajuste	3,5	9	0,39
Erro Puro	0,8	12	0,06
Total	289,8		

% de variação explicada: 98,5

% máxima de variação explicável: 99,7

Subsequentemente, as posições foram calculadas utilizando a Eq. 4.7 com os dados coletados no ensaio para validação da ANOVA. O gráfico da Fig. 4.12 mostra a distância estimada juntamente com o intervalo de confiança para a média ($\alpha = 5\%$) e a Tab. 4.9 apresenta os valores da média, erros absoluto e relativo para as posições de referência exibidas. Pode-se notar no gráfico da Fig. 4.12, à medida que a distância aumenta, os valores do intervalo de confiança da média também tendem a se ampliar. Uma explicação possível é que à medida que se chega perto do ponto de inflexão da curva da Fig. 4.11, aproximadamente 53,2 cm, uma pequena variação na RSSI gera uma variação maior do que um ponto mais distante dessa região específica. A Tab. 4.10 apresenta os valores do intervalo de confiança para a média e desvio padrão.

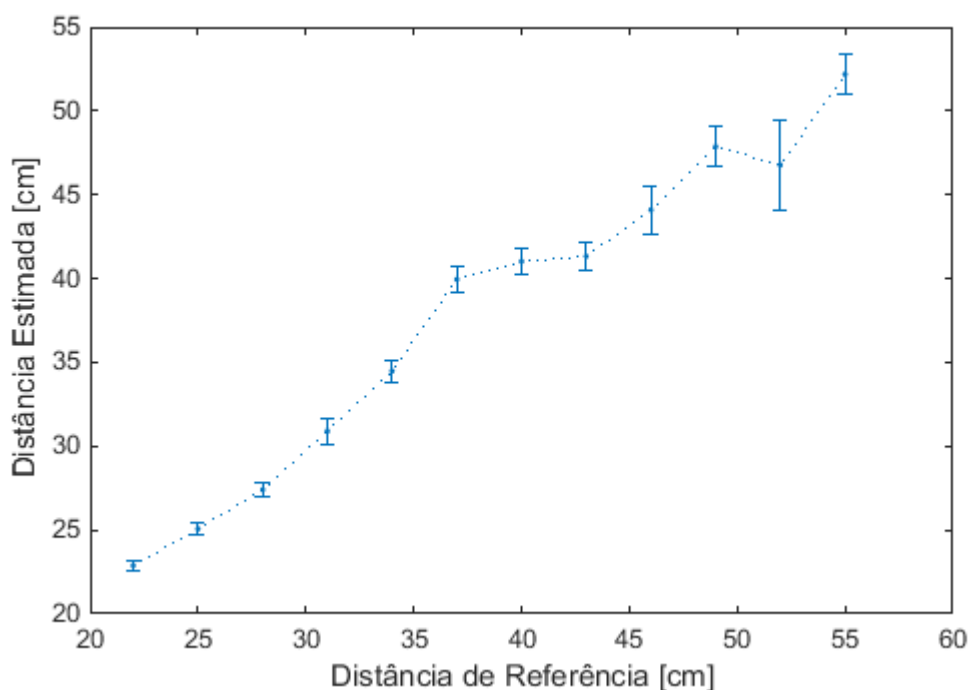


Figura 4.12: Distância média estimada com intervalo de confiança para a média (bancada).

A média aritmética do erro absoluto apresentado na Tab. 4.9 é de 1,6 cm e a relativa de 3,8% para o intervalo de 22 a 55 cm.

Tabela 4.9: Média, erros absoluto e relativo para o IPS da bancada

Referência [cm]	Média [cm]	Erro absoluto [cm]	Erro relativo [%]	Desvio Padrão [cm]
22	22,7	0,7	3,3	0,6
25	24,9	0,1	0,4	0,7
28	27,3	0,7	2,5	0,8
31	30,7	0,3	1,0	1,4
34	34,5	0,5	1,4	1,1
37	39,6	2,6	7,1	1,3
40	41,4	1,4	3,4	1,3
43	41,5	1,5	3,5	1,6
46	43,7	2,3	4,9	2,5
49	47,4	1,6	3,2	2,1
52	47,6	4,4	8,4	4,7
55	51,5	3,5	6,3	2,0
Média Global:		1,6	3,8	1,7

Tabela 4.10: Valores das posições estimadas com intervalo de confiança para a bancada

Referência [cm]	Média [cm]	IC para média [cm]		Desvio Padrão [cm]	IC para desvio padrão [cm]	
		Inferior	Superior		Inferior	Superior
22	22,7	22,7	23,0	0,6	0,5	0,7
25	24,9	24,9	25,3	0,7	0,6	0,8
28	27,3	27,2	27,6	0,8	0,7	1,0
31	30,7	30,5	31,3	1,4	1,1	1,7
34	34,5	34,2	34,8	1,1	1,0	1,4
37	39,6	39,6	40,3	1,3	1,1	1,6
40	41,4	40,6	41,4	1,3	1,1	1,7
43	41,5	40,9	41,8	1,6	1,3	1,9
46	43,7	43,4	44,8	2,5	2,1	3,1
49	47,4	47,3	48,5	2,1	1,7	2,6
52	47,6	45,4	48,1	4,7	3,9	5,8
55	51,5	51,6	52,8	2,0	1,7	2,5

Outra avaliação realizada foi sobre o decaimento da RSSI com a peça em movimento na esteira. No caso, o sinal foi obtido avaliando a média aritmética entre uma amostra (o próprio valor), duas amostras e três amostras consecutivas. O gráfico do decaimento da RSSI está apresentado na Fig. 4.13. Neste, pode-se notar que quando o número de amostras utilizadas para calcular a média aumenta, a curva tende a ser mais suave e dois pontos consecutivos são mais espaçados entre si.

Como o período de leitura de um valor de RSSI é de aproximadamente 150 ms, a peça desloca de aproximadamente 2,5 cm em 450 ms fazendo três aquisições (velocidade da esteira é de aproximadamente 5,6 cm/s). Assim, o erro gerado no cálculo da média é menor do que a extensão da faixa de operação de qualquer um dos atuadores pneumáticos, não afetando, portanto, o funcionamento do sistema.

Outro ponto que pode ser destacado é, ao se utilizar somente um valor, como a variação de 1 dBm gera uma variação na distância de aproximadamente 1,7 cm de acordo a Eq. 4.7, essa oscilação pode deixar a localização da peça muito imprecisa, então, quanto mais suave a curva, melhor.

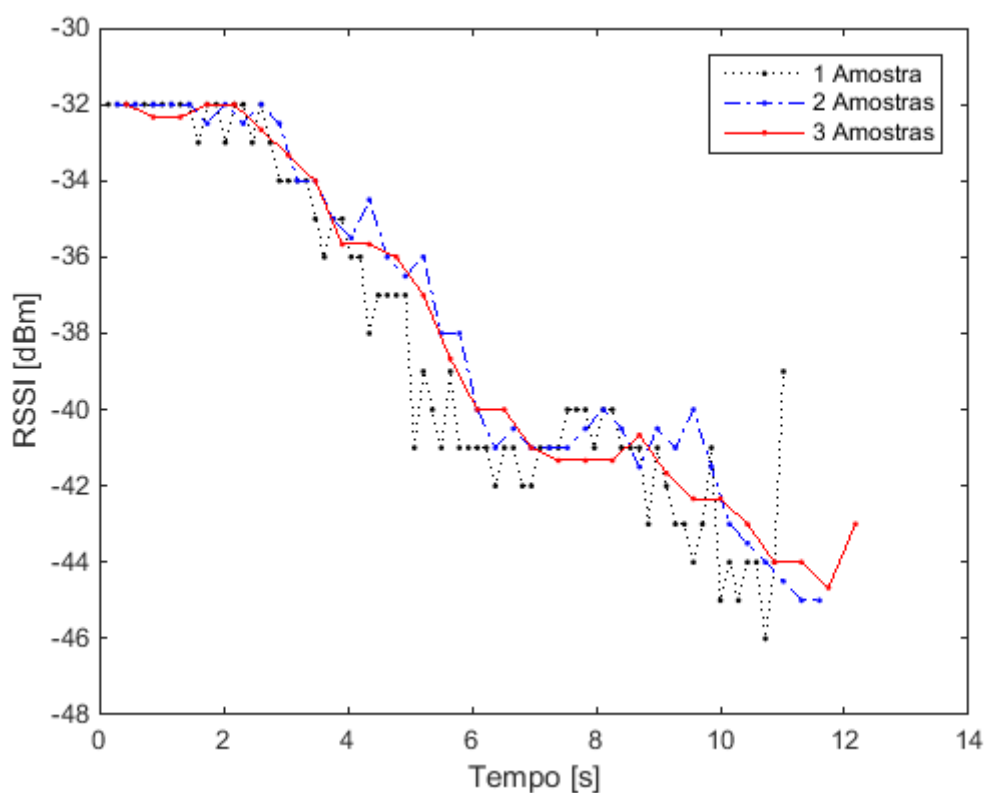


Figura 4.13: Gráfico do decaimento de RSSI com a peça em movimento na esteira.

Posteriormente, foram realizados ensaios experimentais utilizando o modelo proposto na Eq. 4.7 para separar peças utilizando os atuadores C1 e C2 referentes às zonas de

ativação A1 e A2, apresentadas na Fig. 4.7. Nos testes, todas as peças foram separadas com sucesso para ambos compartimentos determinados pelo operador. A separação de peça na zona A3 não foi implementada devido à baixa variação de potência a partir da posição 42 cm como já comentado e também pela limitação do tempo para o término dessa fase da pesquisa, visto que seria necessário um estudo mais aprofundado para melhorar o desempenho do IPS nessa região.

4.3 Comparação dos modelos dos IPS

O gráfico dos modelos propostos pelas Eqs. 4.4 e 4.6 está apresentado na Fig. 4.14. Pode-se notar que no ambiente sem obstáculos o decaimento da RSSI é bem menor do que na bancada. Isso já era esperado, já que a bancada possui vários componentes que alteram a propagação das ondas de rádio absorvendo, refletindo-as, criando multipercursos, entre outros fatores já discutidos no Capítulo II.

Outro fator que pode ter contribuído na diferença dos modelos obtidos foi o material no qual a *tag* está fixada. Nos testes realizados no ambiente interno sem obstáculos a etiqueta foi fixada em um pedaço de papelão. Já na bancada, a mesma estava acomodada em um pedaço de conduíte de PVC.

Comparando os erros entre os dois IPSs projetados, cujos valores de erros absoluto, relativo e desvio padrão estão apresentados na Tab. 4.11, o para a bancada possui erro e desvio padrão médios menor, por consequência é mais preciso. Porém ele tem um alcance máximo menor do que o para ambiente sem obstáculos (55 cm perante 90 cm).

Agora analisando a razão entre a magnitude dos desvios padrão para os dois sistemas em relação aos seus respectivos erros absoluto, constata-se que eles possuem uma variação de pelo menos o valor da média, pois o desvio padrão médio obtido é de mais de 100% do valor da média. Tal fato implica num sistema de medição impreciso, já que as medidas realizadas terão uma grande variação. Esse comportamento é outra justificativa para fazer várias leituras antes do sistema tomar alguma decisão.

Tabela 4.11: Médias dos erros absoluto, relativo e desvio padrão dos dois IPSs projetados

IPS	Erro absoluto [cm]	Erro relativo [%]	Desvio padrão [cm]	Desvio padrão/ Erro absoluto [%]
Ambiente sem obstáculos	2,3	5,4	3,3	143
Bancada seletora	1,6	3,8	1,7	102

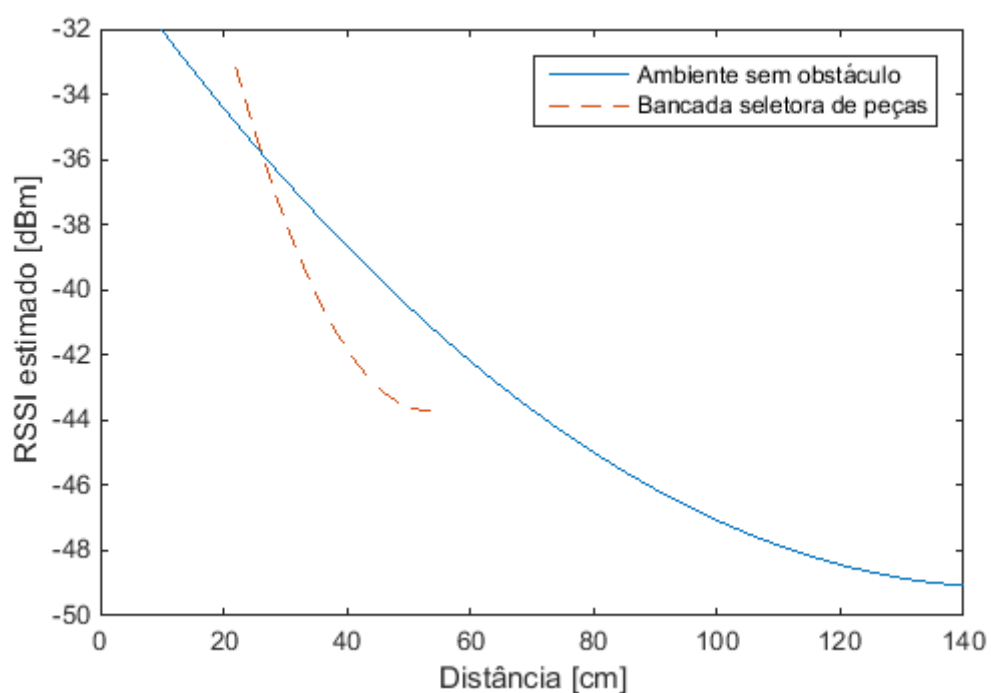


Figura 4.14: Gráfico de RSSI em função da distância para os dois modelos estimados

Vale também ressaltar que os testes também têm como fontes de erro a variação no posicionamento da *tag* e o ângulo formado entre a antena e a etiqueta, visto que ambas devem estar paralelas entre si para adquirir o valor de potência máximo em uma determinada posição.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O projeto de um sistema de posicionamento interno, baseado em tecnologia RFID utilizando a RSSI do sinal emitido pela etiqueta integrada com a bancada seletora de peças, foi realizado com sucesso para as regiões A1 e A2, pois a bancada selecionou as peças de acordo com os requisitos desejados. Já para a região A3, essa implementação não foi possível devido à baixa variação de RSSI no local. Um estudo mais detalhado sobre as possíveis soluções para melhorar o desempenho do IPS nessa região é necessário, podendo utilizar vários modelos no qual cada um é empregado em regiões distintas, ou ferramentas de aprendizado de máquina, tais como, redes neurais artificiais e máquinas de vetores de suporte e também filtragem estocástica, como filtro de Kalman estendido e filtro de partículas.

O modelo matemático do decaimento da RSSI do polinômio de segundo grau teve uma boa representação, obtendo 98,3% referente ao IPS para ambientes internos sem obstáculos e 98,5% para a bancada seletora de peças, implicando que os modelos obtidos tiveram uma boa aproximação.

Quando não há obstáculos, o IPS projetado apresentou um erro absoluto de 5,9 cm considerando a distância de 20 a 130 cm e um erro absoluto de 2,3 cm no intervalo de 20 a 90 cm para ensaios estáticos. O sistema apresentou desvios padrão médio de 3,3 cm na primeira configuração e 1,6 cm na segunda.

Já o IPS feito para a bancada seletora apresentou erro absoluto de aproximadamente 1,6 cm para o intervalo de 22 a 55 cm e desvio padrão de 1,7 cm.

O primeiro IPS projetado apresenta menor precisão do que o segundo, porém aquele é capaz estimar distâncias maiores, já que é um ambiente com menos propensão à fatores de influência na RSSI. Porém, ambos sistemas apresentaram alto desvio padrão, mais de 100% do erro absoluto, implicando em uma metodologia de localização de baixa acurácia.

Como desvantagens, o sistema de posicionamento interno baseado em tecnologia RFID desenvolvido neste trabalho necessita de calibração e, caso a antena mude de posição ou algum componente que possa interferir na RSSI emitida pela *tag* seja inserido, a calibração deverá ser feita novamente.

O desenvolvimento dessa pesquisa teve como principal dificuldade a escolha dos equipamentos corretos para obter a RSSI emitida pela *tag*, dado que esta é muito baixa e qualquer ruído externo influencia no seu valor.

Outro ponto que pode ser destacado é a diferença dos sistemas de posicionamento projetados, um foi feito para estimar a distância em um local onde não há obstáculos entre a antena e a *tag* e o outro foi concebido para um equipamento que utiliza componentes industriais. Salientando que, mesmo em ambientes heterogêneos, o IPS baseado em RFID é possível de ser implementado.

Outras funcionalidades que podem ser estudadas e incorporadas no sistema consistem em implementar a separação de peças pelo *tagID*, separar peças de acordo com a identificação das mesmas em uma ordem preestabelecida, bem como separar mais de uma peça simultaneamente.

Também é possível projetar um IPS utilizando outras técnicas ou algoritmos de localização, além de outros equipamentos, tais como, antenas, leitores RFID e *tags*.

Ainda, a informação da posição pode ser utilizada como pré-condição na PNRD (Redes de Petri Inserida em Base de Dados RFID), ou seja, é possível integrar um IPS baseado em RFID com a PNRD.

Além disso, outro trabalho futuro é analisar a influência do ângulo entre a antena e a etiqueta, verificar sua influência na RSSI da resposta da *tag* e projetar um sistema de posicionamento bidimensional ou mesmo tridimensional através de outras técnicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-AMMAR, Mai A.; ALHADHRAMI, Suheer; AL-SALMAN, AbdulMalik; ALARIFI, Abdulrahman; AL-KHALIFA, Hend S.; ALNAFESSAH, Ahmad; ALSALEH, Mansour; Comparative Survey of Indoor Positioning Technologies, Techniques, and Algorithms. **2014 International Conference On Cyberworlds**, [s.l.], p.245-252, out. 2014. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE).

AROOR, S.; DEAVOURS, D. Evaluation of the State of Passive UHF RFID: An Experimental Approach. **IEEE Systems Journal**, [s.l.], v. 1, n. 2, p.168-176, dez. 2007. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE).

AZAMBUJA, Marcelo Cunha de. **Modelos e técnicas para simulação de sistemas UHF de identificação por rádio frequência**. 2011. 136 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência da Computação, Faculdade de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

BARROS NETO, Benício de; SCARMINIO, Ieda Spacino; BRUNS, Roy Edward. **Como fazer experimentos: Pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. 2. ed. Campinas, Sp: Editora Unicamp, 2001. 401 p.

BOUET, Mathieu; SANTOS, Aldri L. dos. RFID tags: Positioning principles and localization techniques: Positioning principles and localization techniques. **2008 1st Ifip Wireless Days**, [s.l.], p.1-5, nov. 2008. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE).

CHEN, Young-long; CHEN, Zhi-rong. A PID Positioning Controller with a Curve Fitting Model Based on RFID Technology. **Journal Of Applied Research And Technology**, [s.l.], v. 11, n. 2, p.301-310, abr. 2013. Elsevier BV. Disponível em: <<http://api.elsevier.com/content/article/PII:S1665642313715402?httpAccept=text/xml>>. Acesso em: 30 dez. 2015.

DIGIAMPAOLO, Emidio. A passive-RFID based indoor navigation system for visually impaired people. **2010 3rd International Symposium On Applied Sciences In Biomedical And Communication Technologies (i)**, Rome, p.1-5, nov. 2010. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE).

DIGIAMPAOLO, Emidio; MARTINELLI, Francesco. A Passive UHF-RFID System for the Localization of an Indoor Autonomous Vehicle. **IEEE Transactions On Industrial Electronics**, [s.l.], v. 59, n. 10, p.3961-3970, out. 2012. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE).

DIGIAMPAOLO, Emidio; MARTINELLI, Francesco. Mobile Robot Localization Using the Phase of Passive UHF RFID Signals. **IEEE Transactions On Industrial Electronics**, [s.l.], v. 61, n. 1, p.365-376, jan. 2014. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE).

ERRINGTON, Angus F. C.; DAKU, Brian L. F.; PRUGGER, Arnfinn F.. Initial Position Estimation Using RFID Tags: A Least-Squares Approach. **IEEE Trans. Instrum. Meas.**, [s.l.], v. 59, n. 11, p.2863-2869, nov. 2010. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE).

FERREIRA, Marco. V. M. **Avaliação de projeto e implementação de redes de dispositivos centralizados e distribuídos aplicados em sistemas a evento discreto de baixa criticidade e baixo custo**. 2015. 169 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015.

FRIEDEWALD, Olaf; PAPENBROOCK, Joern; HERZOG, Michael A.. Analysis of the Radio Propagation Model at RFID Applications. **Proceedings Of 2013 European Conference On Smart Objects, Systems And Technologies (smartsystech)**. Erlangen/nuremberg, Germany, p. 1-4. jun. 2013.

FRIIS, H.t.. A Note on a Simple Transmission Formula. **Proceedings Of The Ire**, [s.l.], v. 34, n. 5, p.254-256, maio 1946. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE).

GU, Yanying; LO, Anthony; NIEMEGEREERS, Ignas. A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, [s.l.], v. 11, n. 1, p.13-32, mar. 2009. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE).

HEKIMIAN-WILLIAMS, Cory; GRANT, Brandon; LIU, Xiuwen. Accurate localization of RFID tags using phase difference. **2010 IEEE International Conference On Rfid (IEEE Rfid 2010)**, Orlando, FL, p.89-96, abr. 2010. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE).

LEME, Cláudia Barucke Marcondes Paes. **Utilização da Tecnologia RFID aplicada no Espectro Óptico para Avaliação dos Recursos Disponíveis em**. 2009. 111 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

LIU, Hui; ZHOU, Zijiang; HE, Chunhui; HUANG, Xiao. Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems. **IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. C**, [s.l.], v. 37, n. 6, p.1067-1080, nov. 2007. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE).

LIU, Yang; DARABI, Houshang; BANERJEE, Pat; LIU, Jing. Indoor localization using smartphone inertial sensors. **2014 11th Workshop On Positioning, Navigation And Communication (WPNC)**, [s.l.], p.1-6, mar. 2014. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE).

MAINETTI, Luca; PATRONO, Luigi; SERGI, Ilaria. A survey on indoor positioning systems. **2014 22nd International Conference On Software, Telecommunications And Computer Networks (softcom)**, [s.l.], p.111-120, set. 2014. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE).

MONTASER, Ali; MOSELHI, Osama. RFID indoor location identification for construction projects. **Automation In Construction**, Montréal, v. 39, p.167-179, abr. 2014. Elsevier BV.. Disponível em: <http://api.elsevier.com/content/article/PII:S092658051300109X?httpAccept=text/xml>. Acesso em: 30 nov. 2015.

MOURA, André Iasi. **WBLS: um sistema de localização de dispositivos móveis em redes Wi-Fi**. 2007. 120 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

NAJNUDEL, Marcelo. **Estudo de Propagação em Ambientes Fechados para o Planejamento de WLANs**. 2004. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação

em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

NAZEMZADEH, Payam; FONTANELLI, Daniele; MACII, David. An indoor position tracking technique based on data fusion for ambient assisted living. **2013 IEEE International Conference On Computational Intelligence And Virtual Environments For Measurement Systems And Applications (civemsa)**, Milan, p.7-12, jul. 2013. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE).

OLSZEWSKI, Brian; FENTON, Steven; TWOREK, Brian; LIANG, Jiao; YELAMARTHI, Kumar. RFID positioning robot: An indoor navigation system. **IEEE International Conference On Electro-information Technology , Eit 2013**, Rapid City, Sd, p.1-6, maio 2013. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE).

SAAB, S. S; NAKAD, Z S. A. Standalone RFID Indoor Positioning System Using Passive Tags. **IEEE Trans. Ind. Electron.**, [s.l.], v. 58, n. 5, p.1961-1970, maio 2011. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE).

SANPECHUDA, T.; KOVAVISARUCH, L.. A review of RFID localization: Applications and techniques. **2008 5th International Conference On Electrical Engineering/electronics, Computer, Telecommunications And Information Technology**, Krabi, v. 2, p.769-772, maio 2008. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE).

SAVOCHKIN, A.; MICKHAYLUK, Y.P.; ISKIV, V.M; SCHEKATURIN, A.A.; LUKYANCHIKOV, A.V.; SAVOCHKIN, D.A.. Passive RFID system for 2D indoor positioning. **2014 20th International Conference On Microwaves, Radar And Wireless Communications (mikon)**, Gdansk, p.1-3, jun. 2014. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE).

SCHERHAUFL, Martin; PICHLER, Markus; SCHIMBÄCK, Erwin; MÜLLER, Dominikus J. ZIROFF, Andreas; STELZER, Andreas. Indoor Localization of Passive UHF RFID Tags Based on Phase-of-Arrival Evaluation. **IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques**, [s.l.], v. 61, n. 12, p.4724-4729, dez. 2013. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE).

TING, S.I.; KWOK, S.K.; TSANG; ALBERT H.C.; HO, GEORGE T.S.; The Study on Using Passive RFID Tags for Indoor Positioning. **International Journal Of Engineering Business Management**, [s.l.], p.9-15, fev. 2011. InTech.

TORRES-SOLIS, Jorge; H., Tiago; CHAU, Tom. A Review of Indoor Localization Technologies: towards Navigational Assistance for Topographical Disorientation. **Ambient Intelligence**, [s.l.], p.51-84, 1 mar. 2010. InTech.

VONGKULBHISAL, Jayakorn; ZHAO, Yan. An RFID-based indoor localization system using antenna beam scanning. **2012 9th International Conference On Electrical Engineering/electronics, Computer, Telecommunications And Information Technology**, Phetchaburi, p.1-4, maio 2012. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE).

WANG, H.; HUANG, Chun-Hong; CHERR, Yong-Si; ZHENG, Li-Jie. Hybrid RFID system-based pedestrian localization: A case study. **2013 10th Workshop On Positioning, Navigation And Communication (wpnc)**, Dresden, p.1-6, mar. 2013. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE).

WILLE, Andreas; BROLL, Magdalena; WINTER, Susanne. Phase difference based RFID navigation for medical applications. **2011 IEEE International Conference On Rfid**, Orlando, FL, p.98-105, abr. 2011. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE).

YAN, Junlin; TIBERIUS, C. J. M.; JANSSEN, G. J. M.; TEUNISSEN, P. J. G.; BELLUSCI, G. Review of range-based positioning algorithms. **IEEE Aerospace And Electronic Systems Magazine**, [s.l.], v. 28, n. 8, p.2-27, ago. 2013. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE).

ZHOU, Junru; ZHANG, Hongjian; MO, Lingfei. Two-dimension localization of passive RFID tags using AOA estimation. **2011 IEEE International Instrumentation And Measurement Technology Conference**, Binjiang, p.1-5, maio 2011. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE).

ZHOU, Junyi; SHI, Jing. RFID localization algorithms and applications—a review. **J Intell Manuf**, [s.l.], v. 20, n. 6, p.695-707, 28 ago. 2008. Springer Science + Business Media.

APÊNDICE I

ANÁLISE FATORIAL COMPLETO 2^2 e 2^3

Através da análise fatorial é possível verificar quais fatores são mais influentes no sistema, bem como o relacionamento entre as mesmas. A teoria detalhada sobre fatorial completo de 2^2 (dois níveis e duas variáveis) e 2^3 (dois níveis e três variáveis) não será abordada neste apêndice. Será apresentado somente os cálculos, as matrizes e as tabelas utilizadas no estudo. O procedimento executado está de acordo com o livro de Barros Neto, Scarminio e Bruns (2001).

Como o leitor M6 Micro da ThingMagic® retorna o valor máximo das leituras realizadas durante um período de tempo escolhido pelo usuário e não se sabia qual seria um valor adequado para calcular a média para os ensaios de calibração, foi realizada uma análise com esses dois fatores utilizando a análise de fatorial completo.

Primeiramente, foram definidos dois níveis para cada variável de acordo com a Tab. 7.1, sendo que o nível baixo é representado pelo sinal (-) e nível alto (+).

Tabela 7.1: Níveis alto e baixo do tempo de leitura e número e dados

Variável	Nível Baixo (-)	Nível Alto (+)
Tempo de leitura [ms]	300	600
Número de dados	100	200

A altura da *tag* e da antena em relação ao piso e também a distância entre a antena e a etiqueta foram mantidas fixadas em 30 cm e 140 cm, respectivamente, de modo que esses fatores não influenciassem o experimento.

Para calcular a variância e um intervalo de confiança para os efeitos (influência de cada variável na resposta) foram realizados dois experimentos com cada combinação dos

fatores. A Tabela 7.2 apresenta a configuração e a ordem de execução dos experimentos escolhido de forma aleatória.

Tabela 7.2: Setup dos experimentos realizados e a ordem de execução

Tempo de leitura (T)	Número de dados (D)	Ordem
-	-	3
-	+	2
+	-	4
+	+	1
-	-	8
-	+	5
+	-	7
+	+	6

Em seguida é construída uma matriz onde cada coluna representa o efeito de um dos fatores estudados inclusive o efeito cruzado, que é o efeito que uma variável exerce sobre outra. A matriz X possui todos os valores com módulo iguais a 1 mudando apenas o sinal de acordo com as colunas da Tab. 7.2 ou do produto entre elas. Essa matriz é conhecida como tabela de coeficientes de contraste e está apresentada na Eq. 7.1.

$$X = \begin{matrix} & \begin{matrix} M & T & D & TD \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{matrix} & \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (7.1)$$

Os termos da primeira coluna da matriz X é sempre unitário (indica o termo constante), a segunda e terceira são referentes ao tempo de leitura (T) e número de dados (D) como já explicado e a última coluna é o produto das colunas de T e D.

Agora, define-se:

$$\mathbf{y} = [y_1 \ y_2 \ y_3 \ y_4 \ y_5 \ y_6 \ y_7 \ y_8]^T \quad (7.2)$$

e

$$\mathbf{b} = [b_1 \ b_2 \ b_3 \ b_4 \ b_5 \ b_6 \ b_7 \ b_8]^T \quad (7.3)$$

Sendo \mathbf{y} o vetor que contém os valores de RSSI dos ensaios e \mathbf{b} o vetor dos coeficientes do efeito de cada variável ou suas iterações.

O vetor \mathbf{y} pode ser escrito conforme a Eq. 7.4 e isolando \mathbf{b} obtêm-se a Eq. 7.6 multiplicando a Eq. 7.5 por X^T .

$$\mathbf{y} = X\mathbf{b} \quad (7.4)$$

$$X^T\mathbf{y} = X^T X\mathbf{b} \quad (7.5)$$

$$\mathbf{b} = (X^T X)^{-1} X^T \mathbf{y} \quad (7.6)$$

Posteriormente, é calculado o intervalo de confiança para os valores dos efeitos usando a distribuição de *t-Student* de acordo com a Eq. 7.7.

$$\hat{\eta} - t_v \times s(\text{efeito}) < \eta < \hat{\eta} + t_v \times s(\text{efeito}) \quad (7.7)$$

Onde η é o valor verdadeiro de um efeito (valor populacional), $\hat{\eta}$ estimativa desse valor obtida a partir dos ensaios realizados no experimento, t_v é o valor de Student para v graus de liberdade.

Se o intervalo de confiança conter o valor zero, quer dizer que o fator referente a esse intervalo não possui influência significativa. Os valores dos fatores com seus respectivos intervalos de confiança com 95% de confiança estão apresentados na Tab. 7.3. Nesta, nota-se que o zero está incluso nos intervalos dos dois fatores suas combinações que poderiam influenciar diretamente na resposta do sistema (T, D e TD), então eles não influenciam diretamente na resposta do sistema.

Tabela 7.3: Valores dos fatores calculados e intervalo de confiança (fatorial 2^2)

Fator	Valor	IC para o fator	
		Limite inferior	Limite Superior
M	-53,8	-54,04	-53,63
T	-0,23	-0,64	0,18
D	0,10	-0,31	0,51
TD	-0,21	-0,62	-0,20

A seguir segue o estudo de um fatorial completo de três variáveis (2^3): orientação da *tag* (O), altura da antena (h) e altura da *tag* (H) em relação ao piso. A Tab. 7.4 mostra os níveis alto e baixo escolhidos para a análise fatorial.

Tabela 7.4: Níveis alto e baixo da orientação da *tag*, altura da antena e altura da *tag*

Variável	Nível Baixo (-)	Nível Alto (+)
Orientação da <i>tag</i> (O)	Horizontal	Vertical
Altura a antena (h)	30	50
Altura da <i>tag</i> (H)	30	50

O tempo de leitura e o número de dados coletados para cada ensaio foram fixados em 500 ms e 200 pontos, respectivamente.

Para calcular a variância e um intervalo de confiança para os efeitos (influência de cada variável na resposta) foram realizados dois experimentos para cada configuração. A Tab. 7.5 mostra a configuração dos fatores utilizados e a ordem de execução dos experimentos escolhidas de forma aleatória.

Tabela 7.5: Setup dos experimentos realizados e a ordem de execução

Orientação da <i>tag</i> (O)	Altura da <i>tag</i> (H)	Altura da antena (h)	Ordem
-	-	-	5
-	-	+	1
-	+	-	7
-	+	+	2
+	-	-	13
+	-	+	10
+	+	-	12
+	+	+	11
-	-	-	3
-	-	+	8
-	+	-	6
-	+	+	4
+	-	-	9
+	-	+	14
+	+	-	16
+	+	+	15

Analogamente à análise anterior, define-se as matrizes X , y e b pelas Eqs. 7.8, 7.9 e 7.10:

$$X = \begin{matrix} & \begin{matrix} M & O & H & h & OH & Oh & Hh & OHh \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{matrix} & \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (7.8)$$

$$y = [y_1 \ y_2 \ y_3 \ y_4 \ y_5 \ y_6 \ y_7 \ y_8 \ y_9 \ y_{10} \ y_{11} \ y_{12} \ y_{13} \ y_{14} \ y_{15} \ y_{16}]^T \quad (7.9)$$

e

$$b = [b_1 \ b_2 \ b_3 \ b_4 \ b_5 \ b_6 \ b_7 \ b_8 \ b_9 \ b_{10} \ b_{11} \ b_{12} \ b_{13} \ b_{14} \ b_{15} \ b_{16}]^T \quad (7.10)$$

O vetor b foi obtido através da Eq 7.6 e os intervalos de confiança pela Eq. 7.7. Os valores dos fatores com seus respectivos intervalos de confiança com 95% de confiança estão apresentados na Tab. 7.6. Pode-se observar que na mesma tabela há intervalos em que o zero não está incluído, significando que são fatores significativos e que influenciam no sistema. O mais significativo é a orientação da *tag*, ou seja, quando se muda a orientação da etiqueta da horizontal para a vertical, a RSSI do sistema tende a aumentar. Os valores destacados em negrito não foram considerados relevantes, porque o zero está contido no intervalo de confiança calculado ou interações de três ou mais fatores não foram considerados significantes. Os outros fatores têm influência expressiva no resultado, entretanto é de uma menor magnitude.

Tabela 7.6: Valores dos fatores calculados e intervalo de confiança (fatorial 2³)

Fator	Valor	IC para o fator	
		Limite inferior	Limite Superior
M	-49,85	-50,13	-49,64
O	3,37	2,81	3,92
H	-0,81	-1,23	-0,38
h	-0,56	-0,98	-0,13
OH	0,44	0,23	0,65
Oh	-0,11	-0,33	0,10
Hh	0,78	0,56	1,00
OHh	-0,69	-0,90	-0,48

APÊNDICE II

ESTUDO DA FUNÇÃO DE CALIBRAÇÃO DO IPS SEM OBSTÁCULOS

Neste apêndice será apresentado o estudo das outras duas funções apresentadas pelas Eqs. 4.2 e 4.3. O modelo foi estudado na mesma região de distância de 10 a 140 cm.

Primeiramente, foi estudado o modelo proposto pela Eq. 4.2 resultando nos valores apresentados pela Eq. 8.1.

$$RSSI(d) = 0,000003d^3 + 0,0017d^2 + 0,3140d - 28,7635 \quad (8.1)$$

O valor da razão $MQ_R/MQ_r = 490,9$ e $F_{2,11} = 3,7$ e pela regra prática, a razão é pelo menos dez vezes maior que o valor de referência indicando que a equação é um bom modelo para o sistema. O valor de R^2 encontrado foi de 0,984 que também é próximo à unidade reforçando o que foi evidenciado. Por fim, o gráfico da distribuição dos resíduos na Fig. 8.1 não apresenta nenhuma tendência comprometendo, assim, o ajuste.

O gráfico da curva ajustada está na Fig. 8.2.

Tabela 8.1: ANOVA - Ensaio em ambiente sem obstáculo (modelo polinomial de terceiro grau)

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Nº de graus de liberdade (gdl)	Média Quadrática
Regressão	829,7	3	276,6
Resíduos	13,5	24	0,6
Falta de Ajuste	8,9	10	0,9
Erro Puro	4,6	14	0,3
Total	843,2	27	
% de variação explicada: 99,4			
% máxima de variação explicável: 98,4			

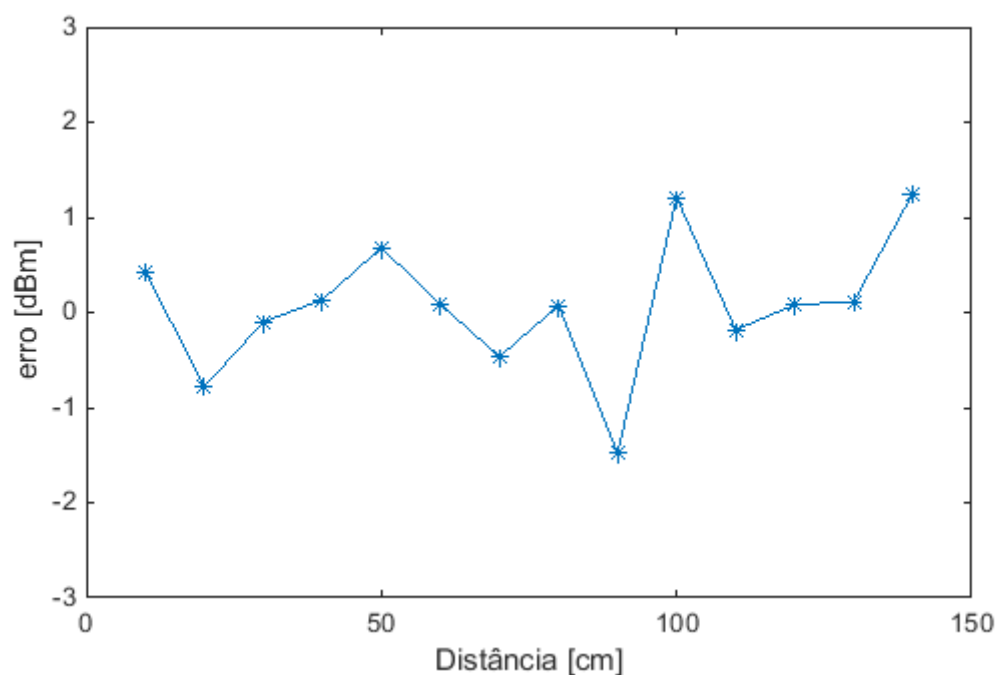


Figura 8.1: Gráfico da distribuição dos resíduos para o modelo de terceiro grau

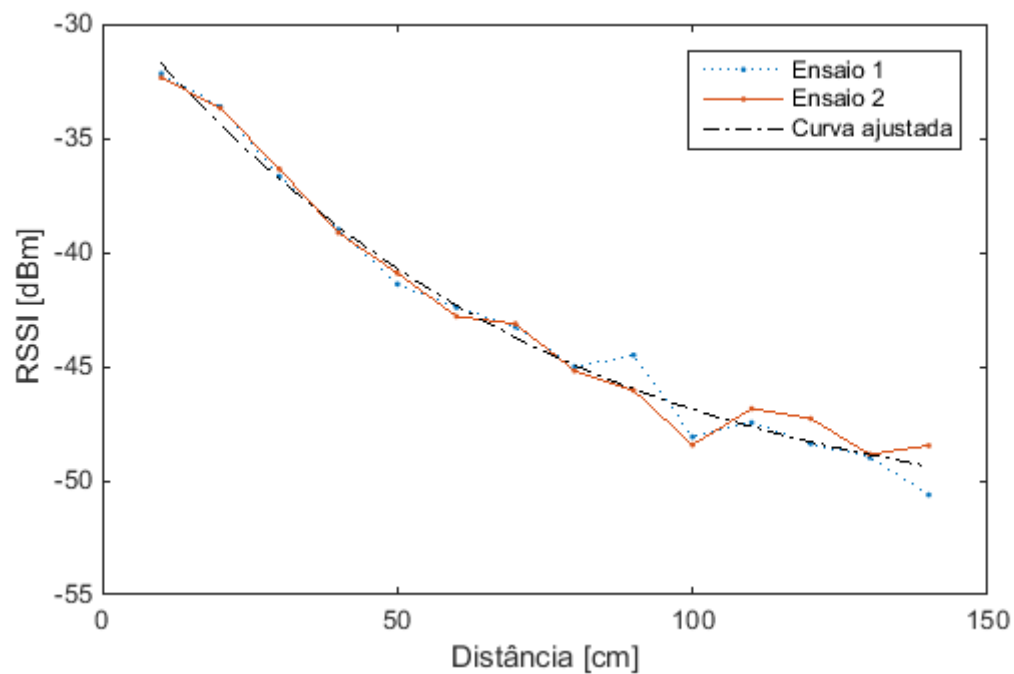


Figura 8.2: Gráfico do ajuste de curva e dos ensaios experimentais para o modelo de terceiro grau

Observando a Tab. 8.2, nota-se que a diferença entre a porcentagem da variação explicada e a máxima porcentagem de variação explicável é de 1%, evidenciando que o modelo de terceiro grau é um candidato passível de ser adotado.

O outro modelo estudado é dado pela Eq. 4.3 e é apresentado já com os valores dos coeficientes na Eq. 8.2.

$$RSSI(d) = -4164,683 \frac{1}{d^2} + 616,427 \frac{1}{d} - 52,521 \quad (8.2)$$

O valor da razão $MQ_R/MQ_r = 372,9$ e $F_{2,11} = 4,0$ e pela regra prática, a razão não é dez vezes maior que o valor de referência indicando que a equação pode não ser um bom modelo. O valor de R^2 encontrado foi de 0,967. Por fim, o gráfico da distribuição dos resíduos na Fig. 8.3 apresenta tendência de apresentar valores negativos na região central e positivos nas extremidades, assim, indiciando a não adoção da Eq. 8.2 como modelo do sistema.

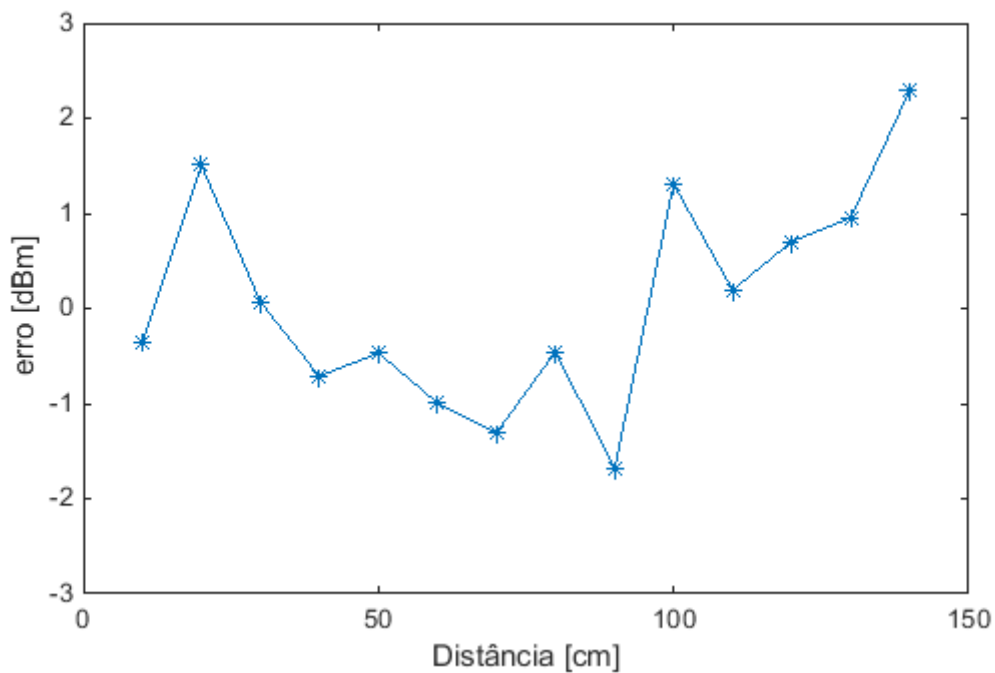


Figura 8.3: Gráfico da distribuição dos resíduos para o modelo da Eq. 8.2

O gráfico da curva ajustada está apresentado na Fig. 8.4.

Observando a Tab. 8.2, nota-se que a diferença entre a porcentagem da variação explicada e a máxima porcentagem de variação explicável é de 1,7%, valor um pouco maior do que os outros dois candidatos.

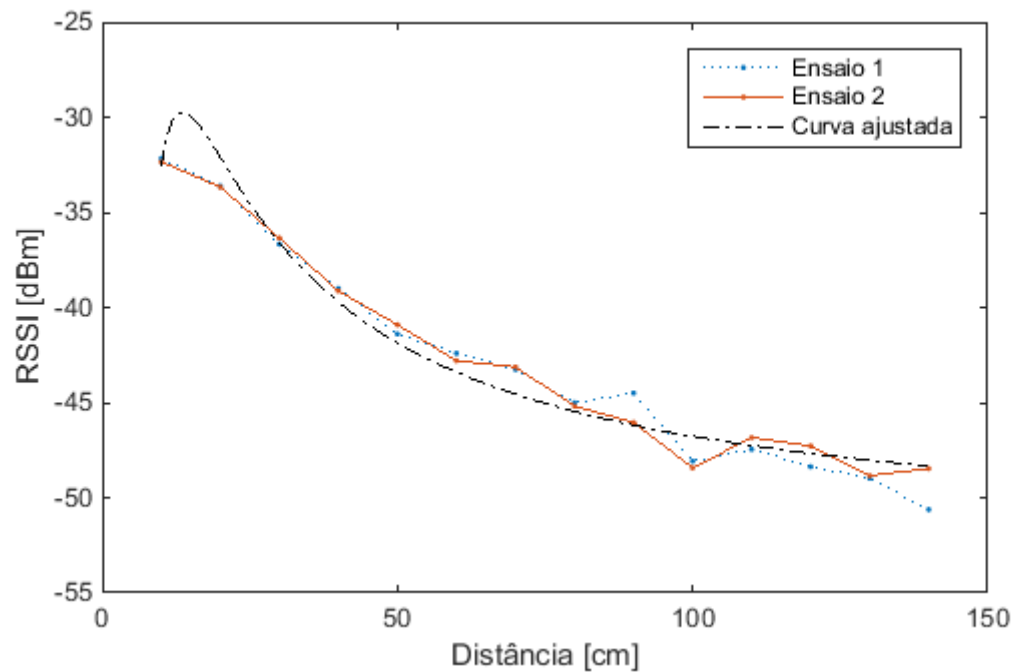


Figura 8.4: Gráfico do ajuste de curva e dos ensaios experimentais para o modelo da Eq. 8.2

Tabela 8.2: ANOVA - Ensaio em ambiente sem obstáculo para o modelo da Eq. 8.2

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Nº de graus de liberdade (gdl)	Média Quadrática
Regressão	815,9	2	407,9
Resíduos	27,3	25	1,1
Falta de Ajuste	22,7	11	2,1
Erro Puro	4,6	14	0,3
Total	843,2	27	

% de variação explicada: 99,4

% máxima de variação explicável: 96,7

APÊNDICE III

CÓDIGOS UTILIZADOS

ANOVA (MatLab)

```

clc; clear all; close all;

out = 1;
[d1, ICmedia1, ICstd1] = calc_media(out);
[d2, ICmedia2, ICstd2] = calc_media2(out);

rm = [d2';d1' ];
x = 1*[10:10:200 10:10:200]'; % distância em [mm]

% X = [ones(length(x),1) 1./x 1./x.^2];
X = [ones(length(x),1) x x.^2];
% X = [ones(length(x),1) x x.^2 x.^3];

a3 = inv(X'*X)*X'*rm
rt3 = X*a3;
e3 = rt3-rm

% erro médio quadrático
e23 = e3'*e3;

% *** Tabela 5.8, Barros
p = size(X,2) % n° de parâmetros do modelo
n = length(rm) % n° total de observações
m = length(d1) % n° de níveis distintos da variável
independente

SQT = (rm-mean(rm))'*(rm-mean(rm)) % Soma quadrática Total
SQR = (rt3-mean(rm))'*(rt3-mean(rm)) % Soma quadrática
Regressão
SQR = SQT - SQR % Soma quadrática Resíduos
% SQR2 = (rm-rt3)'*(rm-rt3) %conferido! -> certo

```

```

MQR = SQR/(p-1)          % Média Quadrática da Regressão
MQr = SQR/(n-p)          % Média Quadrática dos Resíduos

% %% calcula quando se tem réplica
% Soma quadrática Falta de Ajuste
SQfaj=0;
rep = n/m;
for i=1:m
    SQfaj = SQfaj + rep*((rt3(i) - mean([rm(i) rm(m+i)]
))^2);
end
SQfaj

% Soma quadrática Erro Puro
SQep = SQR - SQfaj
% SQR = SQep + SQfaj

% Média quadrática Erro Puro
MQep = SQep/(n-m)
% Média quadrática Falta de Ajuste
MQfaj = SQfaj/(m-p)

F = MQfaj/MQep
Fc = finv(.95,m-p,n-m)    %f crítico (olhar nos MQ)

if F > Fc
    if F > 10*Fc
        fprintf('\nO valor de F é muito alto: MUITA FALTA DE
AJUSTE \n',F,Fc)
    else
        fprintf('\nO valor de F é alto: INDÍCIO DE FALTA DE
AJUSTE',F,Fc)
    end
else if F<Fc
    fprintf('\nO valor de F é menor do que Fc:\nNÃO HÁ
FALTA DE AJUSTE\n\n')
end
end

% erros:
Ee = 100*(SQT-SQep)/SQT    % % máxima de variação explicável
Er = 100*SQR/SQT          % % da variação explicada pela
regressão

% deve comparar Er com Ee
% Coeficiente de correlação: R
% R é o coeficiente de correlação entre as respostas
observadas e os

```

```

% valores previstos pelo modelo ajustado
R2 = SQR/SQT*100

figure(1)

x1 = 10:1:200;
% y1 = a3(1) + a3(2)*(1./x1) + a3(3)*(1./x1.^2);
y1 = a3(1) + a3(2)*(x1) + a3(3)*(x1.^2);
% y1 = a3(1) + a3(2)*(x1) + a3(3)*(x1.^2) + a3(4)*(x1.^3);

amp1 = (ICmedia1(:,1)-ICmedia1(:,2))';
amp2 = (ICmedia2(:,1)-ICmedia2(:,2))';

figure(1)
errorbar(x(1:20),rm(1:20),amp1)
hold
errorbar(x(21:40),rm(21:40),amp2,'--')
xlim ([0 210])
xlabel('Distância [cm]'); ylabel('RSSI [dBm]')
legend('Ensaio 1','Ensaio 2')

figure(2)
plot(x(1:20),rm(1:20),x(21:40),rm(21:40),'--',x1,y1,'-.k')
xlim ([0 210])
xlabel('Distância [cm]'); ylabel('RSSI [dBm]')
legend('Dados de calibração','Dados de validação','Curva
ajustada')

```

Estudo fatorial completo (MatLab)

```

O = [-1 -1 -1 -1 1 1 1 1 -1 -1 -1 -1 1 1 1 1]';
H = [-1 -1 1 1 -1 -1 1 1 -1 -1 1 1 -1 -1 1 1]';
h = [-1 1 -1 1 -1 1 -1 1 -1 1 -1 1 -1 1 -1 1]';

r = calc_media4(0)';
X=[ones(length(O),1) O H h O.*H O.*h H.*h O.*H.*h]
% X = [X;X]
a = inv(X'*X)*X'*r
rt = X*a % r teorico
e = r-rt;
e2=e'*e

% Efeitos médio (pega os coef e multiplica por 2 fora a média
(a0)):
E = a;
E(2:4)=2*E(2:4)

```



```

Se2 = e2/8 % variância média
cova = inv(X'*X)*Se2; % matriz de covariância
Sf2=diag(cova)
Sf=sqrt(Sf2)

% p IC 90% bilateral
t = tinv(.95,4)

ICa = [a-t*Sf a+t*Sf]
% todos passam por zero => tds não tem efeito significativo

ICE = ICa;
ICE(2:4,:) = 2*ICE(2:4,:)

```

Teste de comparação de média (MatLAB)

```

clc; clear; close all

% Programa que verifica se dois conjuntos de dados tem média
iguais
% H0: u1 == u2
% H1: u1 != u2

[d1 , ~] = load_data('ensaio5_40.txt');
[d2 , ~] = load_data('ensaio5_46.txt');

out = 0;
rss1 = outlier(d1,out,0);
rss2 = outlier(d2,out,0);

dado = [rss1 rss2];

n = size(dado,1);
S2 = var(dado)
Xb = mean(dado)

Fa = finv(.025,n-1,n-1);
Fb = finv(.975,n-1,n-1);
IC = [S2(1)/S2(2)*1/Fb S2(1)/S2(2)*1/Fa]
% como o IC para a razão entre as variancias contém o 1, -
>homeocedástico

K = sqrt( ((n-1)*S2(1) + (n-1)*S2(2))/(n+n-2) ) * sqrt(1/n+1/n)
ICmedia = [ Xb(1)-Xb(2)-tinv(.975,n+n-2)*K Xb(1)-
Xb(2)+tinv(.975,n+n-2)*K]

```

% se o 0 (zero) está no intervalo, então o efeito não efeito significativo

Cálculo do intervalo de confiança (MatLab)

```
% Cálculo do intervalo de confiança para a média e desvio
padrão
function [ICmedia ICstd] = intervalo(dados,alfa)
% Dados
[CC NL] = load_data('norm100.txt');
n = length(CC);

% Média amostral (Xbt):
xbt = mean(CC);
% Desvio padrão amostral (S)
dp = std(CC);
% Variância amostral (S²)
V = var(CC);

% Intervalo de confiança para a Média

ICmedia = [xbt - tinv(alfa/2,n-1)*dp/sqrt(n) xbt +
tinv(alfa/2,n-1)*dp/sqrt(n)];

% Intervalo de confiança para Variância
xa = chi2inv(1-alfa/2,n-1);
xb = chi2inv(alfa/2,n-1);
ICvar = [(n-1)*V/xb (n-1)*V/xa];

% Intervalo de confiança para Desvio Padrão
ICstd = sqrt(ICvar);

end
```

Captura dos dados (Java)

```
/**
 * Sample program that reads tags for a fixed period of time (500ms) and
 * prints
 * the tags found.
 */
// Import the API
package samples;
```

```

import com.thingmagic.*;
import java.io.PrintWriter;

public class readRssi {

    static void usage() {
        System.out.printf("Usage: Please provide valid arguments, such as:\n"
            + "    (URI: 'tmr:///COM1 --ant 1,2' or 'tmr://astra-2100d3/ -"
-ant 1,2' "
            + "or 'tmr:///dev/ttyS0 --ant 1,2')\n\n");
        System.exit(1);
    }

    public static void setTrace(Reader r, String args[]) {
        if (args[0].toLowerCase().equals("on")) {
            r.addTransportListener(r.simpleTransportListener);
        }
    }

    public static void main(String argv[]) {
        // Program setup
        Reader r = null;
        int nextarg = 0;
        boolean trace = false;
        int[] antennaList = null;

        if (argv.length < 1) {
            usage();
        }

        if (argv[nextarg].equals("-v")) {
            trace = true;
            nextarg++;
        }

        // Create Reader object, connecting to physical device
        try {

            TagReadData[] tagReads;
            String readerURI = argv[nextarg];
            nextarg++;

            for (; nextarg < argv.length; nextarg++) {
                String arg = argv[nextarg];
                if (arg.equalsIgnoreCase("--ant")) {
                    if (antennaList != null) {
                        System.out.println("Duplicate    argument:    --ant
specified more than once");
                        usage();
                    }
                    antennaList = parseAntennaList(argv, nextarg);
                }
            }
        }
    }
}

```

```

        nextarg++;
    } else {
        System.out.println("Argument " + argv[nextarg] + " is not
recognised");
        usage();
    }
}

r = Reader.create(readerURI);
if (trace) {
    setTrace(r, new String[]{"on"});
}
r.connect();
if (Reader.Region.UNSPEC == (Reader.Region)
r.paramGet("/reader/region/id")) {
    Reader.Region[] supportedRegions = (Reader.Region[])
r.paramGet(TMConstants.TMR_PARAM_REGION_SUPPORTEDREGIONS);
    if (supportedRegions.length < 1) {
        throw new Exception("Reader doesn't support any
regions");
    } else {
        r.paramSet("/reader/region/id", supportedRegions[0]);
    }
}

String model = r.paramGet("/reader/version/model").toString();
if ((model.equalsIgnoreCase("M6e Micro") ||
model.equalsIgnoreCase("M6e Nano")) && antennaList == null) {
    System.out.println("Module doesn't has antenna detection
support, please provide antenna list");
    r.destroy();
    usage();
}

SimpleReadPlan plan = new SimpleReadPlan(antennaList,
TagProtocol.GEN2, null, null, 1000);
r.paramSet(TMConstants.TMR_PARAM_READ_PLAN, plan);

// Read tags
PrintWriter arquivo = new PrintWriter("C:\\Users\\Hiro\\Google
Drive\\Mestrado\\Dissertação\\Experimentos\\Testes
bancada\\ensaio8_13.txt");
int i = 0, cont = 0;

while (i < 100) // read 200 values
{
    tagReads = r.read(250);
    cont += 1; // increment number of reading tries
    // Print tag reads
    for (TagReadData tr : tagReads) {
        if (tr.getReadCount() > 2) {

```

```

        if (tr.getRssi() != 0) {
            i += 1;
        }
        System.out.print(tr.getTag() + "\t" + tr.getRssi() +
"\t" + tr.getReadCount() + "\t" + i);
        arquivo.println(tr.getTag() + "\t" + tr.getRssi() +
"\t" + tr.getReadCount());
    }
}
System.out.print("\n");

try {
    Thread.sleep(10); //200 milliseconds stoped
} catch (InterruptedException ex) {
    Thread.currentThread().interrupt();
}
}
arquivo.close();
System.out.print("contagem = " + cont + "\n");
// Shut down reader
r.destroy();
} catch (ReaderException re) {
    System.out.println("Reader Exception : " + re.getMessage());
} catch (Exception re) {
    System.out.println("Exception : " + re.getMessage());
}
}

static int[] parseAntennaList(String[] args, int argPosition) {
    int[] antennaList = null;
    try {
        String argument = args[argPosition + 1];
        String[] antennas = argument.split(",");
        int i = 0;
        antennaList = new int[antennas.length];
        for (String ant : antennas) {
            antennaList[i] = Integer.parseInt(ant);
            i++;
        }
    } catch (IndexOutOfBoundsException ex) {
        System.out.println("Missing argument after " +
args[argPosition]);
        usage();
    } catch (Exception ex) {
        System.out.println("Invalid argument at position " + (argPosition
+ 1) + ". " + ex.getMessage());
        usage();
    }
    return antennaList;
}
}

```

Classe Controle Porta (Java)

```

package comunicaserial;
import gnu.io.CommPortIdentifier;
import gnu.io.NoSuchPortException;
import gnu.io.SerialPort;
import java.io.IOException;
import java.io.OutputStream;
import java.nio.ByteBuffer;
import java.nio.ByteOrder;
import javax.swing.JOptionPane;

public class ControlePorta {
    private OutputStream serialOut;
    private final int taxa;
    private final String portaCOM;

    /**
     * Construtor da classe ControlePorta
     * @param portaCOM - Porta COM que será utilizada para enviar os dados para
     o arduino
     * @param taxa - Taxa de transferência da porta serial geralmente é 9600
     */
    public ControlePorta(String portaCOM, int taxa) {
        this.portaCOM = portaCOM;
        this.taxa = taxa;
        this.initialize();
    }

    /**
     * Método que verifica se a comunicação com a porta serial está ok
     */
    private void initialize() {
        try {
            //Define uma variável portId do tipo CommPortIdentifier para realizar
a comunicação serial
            CommPortIdentifier portId = null;
            try {
                //Tenta verificar se a porta COM informada existe
                portId = CommPortIdentifier.getPortIdentifier(this.portaCOM);
            } catch (NoSuchPortException npe) {
                //Caso a porta COM não exista será exibido um erro
                JOptionPane.showMessageDialog(null, "Porta COM não encontrada.",
                    "Porta COM", JOptionPane.PLAIN_MESSAGE);
            }
            //Abre a porta COM
            SerialPort port = (SerialPort) portId.open("Comunicação serial",
this.taxa);
            serialOut = port.getOutputStream();

```

```

        port.setSerialPortParams(this.taxa, //taxa de transferência da porta
serial
        SerialPort.DATABITS_8, //taxa de 10 bits 8 (envio)
        SerialPort.STOPBITS_1, //taxa de 10 bits 1 (recebimento)
        SerialPort.PARITY_NONE); //receber e enviar dados
    } catch (Exception e) {
        e.printStackTrace();
    }
}

/**
 * Método que fecha a comunicação com a porta serial
 */
public void close() {
    try {
        serialOut.close();
    } catch (IOException e) {
        JOptionPane.showMessageDialog(null, "Não foi possível fechar porta
COM.",
        "Fechar porta COM", JOptionPane.PLAIN_MESSAGE);
    }
}

/**
 * @param opcao - Valor a ser enviado pela porta serial
 */
public void enviaDados(int opcao){
    try {
        byte[] bytes =
ByteBuffer.allocate(4).order(ByteOrder.LITTLE_ENDIAN).putInt(opcao).array()
;
        /*System.out.println(bytes[0]);
        System.out.println(bytes[1]);
        System.out.println(bytes[2]);
        System.out.println(bytes[3]);*/
        serialOut.write(bytes); //escreve o valor na porta serial para ser
enviado

    } catch (IOException ex) {
        JOptionPane.showMessageDialog(null, "Não foi possível enviar o dado.
",
        "Enviar dados", JOptionPane.PLAIN_MESSAGE);
    }
}
}

```

Classe Arduino (Java)

```
package comunicaserial;
```

```

public class Arduino {
    private ControlePorta arduino;

    /**
     * Construtor da classe Arduino
     */
    public Arduino(){
        arduino = new ControlePorta("COM5",9600);//Windows - porta e taxa de
transmissão
        //arduino = new ControlePorta("/dev/ttyUSB0",9600);//Linux - porta e
taxa de transmissão
    }

    /**
     * Envia o comando para a porta serial
     */

    public void comunicacaoArduino(int dado){
        arduino.enviaDados(dado);
        try { Thread.sleep(10); } catch (Exception e) {
e.printStackTrace(); }
        arduino.close();
    }
}

```

Classe EnviaRssi (Java)

```

package comunicaserial;

import com.thingmagic.Reader;
import com.thingmagic.ReaderException;
import com.thingmagic.SimpleReadPlan;
import com.thingmagic.TMConstants;
import com.thingmagic.TagProtocol;
import com.thingmagic.TagReadData;
import static java.lang.Math.*;

/**
 * @author Hiroshi
 */

/**
 * Sample program that reads tags RSSI for a period of time (~500ms)
 * and send the value through the serial port COM*.
 */

public class EnviaRssi {
    static void usage()

```



```

    {
        System.out.printf("Usage: Please provide valid arguments, such as:\n"
            + "    (URI: 'tmr:///COM1 --ant 1,2' or 'tmr://astra-
2100d3/ --ant 1,2' "
            + "or 'tmr:///dev/ttyS0 --ant 1,2')\n\n");
        System.exit(1);
    }

    public static void setTrace(Reader r, String args[])
    {
        if (args[0].toLowerCase().equals("on"))
        {
            r.addTransportListener(r.simpleTransportListener);
        }
    }

    public static double calculateDistance(double rssi){
        double dist;
        double a1 = -13.1039, a2 = -1.1501, a3 = 0.0108;
        // distance estimation
        dist = abs((-a2-sqrt(a2*a2-4*a3*(a1-rssi)))/(2*a3));
        return dist;
    }

    public static int setActuator(double dist,int desejado){
        if (dist>24 && dist<32 && desejado==1)
            return 1;

        else if (dist>34 && dist<42 && desejado==2)
            return 2;

        else
            return 0;
    }

    public static void main(String argv[])
    {
        // Program setup
        Reader r = null;
        int nextarg = 0;
        boolean trace = false;
        int[] antennaList = null;

        Arduino conn = new Arduino(); //new object ->Arduino to establish
connection

        if (argv.length < 1)
            usage();

        if (argv[nextarg].equals("-v"))
        {

```

```

        trace = true;
        nextarg++;
    }

    // Create Reader object, connecting to physical device
    try
    {
        TagReadData[] tagReads;
        String readerURI = argv[nextarg];
        nextarg++;

        for (; nextarg < argv.length; nextarg++)
        {
            String arg = argv[nextarg];
            if (arg.equalsIgnoreCase("--ant"))
            {
                if (antennaList != null)
                {
                    System.out.println("Duplicate argument: --ant specified
more than once");
                    usage();
                }
                antennaList = parseAntennaList(argv, nextarg);
                nextarg++;
            }
            else
            {
                System.out.println("Argument " + argv[nextarg] + " is not
recognised");
                usage();
            }
        }

        r = Reader.create(readerURI);
        if (trace)
        {
            setTrace(r, new String[] {"on"});
        }
        r.connect();
        if (Reader.Region.UNSPEC == Reader.Region)
        r.paramGet("/reader/region/id")
        {
            Reader.Region[] supportedRegions = Reader.Region[]
r.paramGet(TMConstants.TMR_PARAM_REGION_SUPPORTEDREGIONS);
            if (supportedRegions.length < 1)
            {
                throw new Exception("Reader doesn't support any regions");
            }
            else
            {
                r.paramSet("/reader/region/id", supportedRegions[0]);
            }
        }
    }

```

```

    }
}

String model = r.paramGet("/reader/version/model").toString();
if ((model.equalsIgnoreCase("M6e Micro") ||
model.equalsIgnoreCase("M6e Nano")) && antennaList == null)
{
    System.out.println("Module doesn't has antenna detection
support, please provide antenna list");
    r.destroy();
    usage();
}

SimpleReadPlan plan = new SimpleReadPlan(antennaList,
TagProtocol.GEN2, null, null, 1000);
r.paramSet(TMConstants.TMR_PARAM_READ_PLAN, plan);

// -----//

// variables declaration/initialization
int i = 0, cont=0, samples = 3, desej = 2; // desejado = 1(inicio),
2(meio)
int aux = 0, aux2 = 0;
int rssi[] = new int[samples];
double d, sum = 0, med;
conn.comunicacaoArduino(0); // default value
// Read tags
while(i<200){ // read 200 values
    for (int j=0; j<(samples) ;j++)
    {
        tagReads = r.read(90); // read tag for x ms

        for (TagReadData tr : tagReads)
        {
            if (tr.getReadCount()>1 && tr.getRssi()!=0)
            {
                rssi[j] = tr.getRssi();
                sum += rssi[j];
            }
        }
    }

    i+=1;
    // calcula a média:
    med = sum/samples; // calculate mean
    d = calculateDistance(med);
    System.out.println("média = "+(int)med+"\n"+"tdist = "+d);
    conn.comunicacaoArduino(setActuator(dist,desej));
}

```

```

        try { Thread.sleep(5); } catch (Exception e) {
e.printStackTrace(); }

        cont += 1; // increment number of reading tries
        sum = 0;
    }
    System.out.print("contagem = "+cont+"\n");

    // Shut down reader
    r.destroy();
}

catch (ReaderException re)
{
    System.out.println("Reader Exception : " + re.getMessage());
}
catch (Exception re2)
{
    System.out.println("Exception : " + re2.getMessage());
}
    System.out.println("\n200 leituras completas");
    System.exit(0);
}

// -----//

static int[] parseAntennaList(String[] args,int argPosition)
{
    int[] antennaList = null;
    try
    {
        String argument = args[argPosition + 1];
        String[] antennas = argument.split(",");
        int i = 0;
        antennaList = new int[antennas.length];
        for (String ant : antennas)
        {
            antennaList[i] = Integer.parseInt(ant);
            i++;
        }
    }
    catch (IndexOutOfBoundsException ex)
    {
        System.out.println("Missing argument after " +
args[argPosition]);
        usage();
    }
    catch (Exception ex)
    {
        System.out.println("Invalid argument at position " + (argPosition
+ 1) + ". " + ex.getMessage());
    }
}

```

```

        usage();
    }
    return antennaList;
}
}

```

Código do Arduino para controle da bancada ()

```

const int avancaA = 2;    // cria uma cte para avançar o atuador A
const int avancaB = 3;    // cria uma cte para avançar o atuador B

void setup() {
    // put your setup code here, to run once:
    Serial.begin(9600);
    Serial.println("Serial");

    // set the data rate for the SoftwareSerial port
    Serial1.begin(9600);
    //Serial1.println("Serial 1");

    pinMode(avancaA, OUTPUT);
    pinMode(avancaB, OUTPUT);

}
int32_t a = 0;
byte buf[4];

void loop() {
    // put your main code here, to run repeatedly:
    if (Serial1.available() > 3) {
        delay(5); //garantir que o sinal transmitido seja lido
        Serial1.readBytes((char*)&a, 4);
        //Serial1.readBytes(buf, 4);

        if (a == 0){ // nenhuma peça deve ser separada
            digitalWrite(avancaA, LOW);
            digitalWrite(avancaB, LOW);
            digitalWrite(avancaC, LOW);
            digitalWrite(retornaC, HIGH);
        }
        else if (a == 1) { //separa peça repositório A
            digitalWrite(avancaA, HIGH);
            digitalWrite(avancaB, LOW);
            digitalWrite(avancaC, LOW);
            digitalWrite(retornaC, HIGH);
        }
        else if (a == 2){ //separa peça repositório B
            digitalWrite(avancaA, LOW);
            digitalWrite(avancaB, HIGH);

```

```
        digitalWrite(avancaC, LOW);  
        digitalWrite(retornaC, HIGH);  
    }  
    Serial.println(a , DEC);  
}  
}
```

ANEXO I

ANÁLISE ESTATÍSTICA

Este anexo apresenta como foram calculadas as médias aritméticas, desvio padrões, teste F, cálculo do intervalo de confiança para a média e a ANOVA.

Média aritmética

A média aritmética é uma medida de tendência central e é calculada pela Eq. 10.1:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i \quad (10.1)$$

Onde A é o vetor de dados, que se deseja calcular a média e N é o número de dados.

Desvio-padrão amostral

O desvio-padrão amostral é uma medida de dispersão relativa à média, e se obtém fazendo a raiz quadrada da variância conforme mostra a Eq. 10.2. O desvio padrão é uma medida que só pode assumir valores positivos e quanto maior o seu valor, maior é a dispersão dos dados.

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (A_i - \mu)^2} \quad (10.2)$$

Onde A é o vetor de dados, μ é a média aritmética desses dados e N a quantidade de dados.

Teste F

O teste F verifica se as variâncias de duas amostras são iguais. Estatisticamente o teste é realizado pela Eq. 10.3:

$$F = \frac{s_1^2}{s_2^2} \quad (10.3)$$

Onde s_1^2 e s_2^2 são as variâncias de duas amostras. O teste F tem uma distribuição do tipo F com $n_a - 1$ graus de liberdade no numerador e $n_b - 1$ graus de liberdade no denominador, sendo n_a e n_b o número de amostras dos dois conjuntos de dados.

Para um determinado coeficiente de confiança (α), tem-se o seguinte intervalo de confiança para a razão entre duas variâncias

$$IC(\sigma_2^2/\sigma_1^2; \alpha) = f_1 \frac{s_2^2}{s_1^2} < \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2} < f_2 \frac{s_2^2}{s_1^2} \quad (10.4)$$

onde $f_1 = F_{N_1-1, N_2-1, 1-\alpha/2}$, $f_2 = F_{N_1-1, N_2-1, \alpha/2}$

Intervalo de confiança para a diferença entre duas médias ($\mu_a - \mu_b$) usando a distribuição t-Student

Quando as variâncias populacionais são desconhecidas pode-se calcular este intervalo de confiança para dois casos: homocedástico e heterocedástico. Para o primeiro caso, o intervalo de confiança é dado pela Eq. (10.5) sendo $t_{\frac{\alpha}{2}}$ com $n_a + n_b - 2$ graus de liberdade e s_p calculado conforme a Eq. (10.6).

$$IC(\mu_a - \mu_b)_{1-\alpha} = \bar{x}_a - \bar{x}_b \pm t_{\frac{\alpha}{2}} s_p \sqrt{\frac{1}{n_a} + \frac{1}{n_b}} \quad (10.5)$$

$$s_p = \sqrt{\frac{(n_a - 1)s_a^2 + (n_b - 1)s_b^2}{n_a + n_b - 2}} \quad (10.6)$$

Quando as populações são heterocedásticas o intervalo de confiança é dado pela Eq. (10.7) sendo $t_{\frac{\alpha}{2}}$ com ϑ graus de liberdade, calculado pela Eq. (10.8).

$$IC(\mu_a - \mu_b)_{1-\alpha} = \bar{x}_a - \bar{x}_b \pm t_{\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{s_a^2}{n_a} + \frac{s_b^2}{n_b}} \quad (10.7)$$

$$\vartheta = \frac{\left(\frac{s_a^2}{n_a} + \frac{s_b^2}{n_b}\right)}{\frac{\left(\frac{s_a^2}{n_a}\right)^2}{n_a - 1} + \frac{\left(\frac{s_b^2}{n_b}\right)^2}{n_b - 1}} \quad (10.8)$$

Quando o intervalo de confiança para a diferença entre as médias contém o valor 0, pode-se afirmar com o nível de significância considerado que os valores médios em questão são iguais. E, se o intervalo não contém o valor 0, essa afirmação deve ser negada.

ANOVA

O ajuste é feito utilizando um conjunto de equações dada pela Eq. 10.9 na forma matricial.

$$\mathbf{y}(x) = \mathbf{X}\beta + \varepsilon \quad (10.9)$$

Onde \mathbf{X} é a matriz de variáveis independentes, \mathbf{y} é matriz da variável observada, β são os coeficientes da equação e ε é o erro aleatório associado à determinação experimental.

O exame dos resíduos é fundamental, para que seja possível avaliar a qualidade do ajuste de qualquer modelo. Em primeiro lugar, os resíduos devem ser pequenos. Se um determinado modelo deixa resíduos consideráveis, ele é um modelo ruim. No modelo ideal, todas as previsões coincidiriam exatamente com as respostas observadas, e não haveria resíduo nenhum.

O método mais usado para se avaliar numericamente a qualidade do ajuste de um modelo é a Análise da Variância (ou simplesmente ANOVA, um acrônimo de *Analysis of Variance*). Para fazer a análise da variância de um modelo, começamos com uma decomposição algébrica dos desvios das respostas observadas em relação à resposta média

global. Como mostra a Fig. 10.1, o desvio de uma resposta individual em relação à média de todas as respostas observadas, $(y_i - \bar{y})$, pode ser decomposto em duas parcelas:

$$(y_i - \bar{y}) = (\hat{y}_i - \bar{y}) + (y_i - \hat{y}_i) \quad (10.10)$$

A primeira parcela, $(\hat{y}_i - \bar{y})$, representa o desvio da previsão feita pelo modelo para o ponto em questão, y_i , em relação à média global, \bar{y} . A segunda parcela é a diferença entre o valor observado e o valor previsto. Num modelo bem ajustado, essa segunda diferença deve ser pequena. Isto equivale a dizer, em termos da Eq. 10.10, que o desvio $(y_i - \bar{y})$ deve ser aproximadamente igual ao desvio $(\hat{y}_i - \bar{y})$. Dizer que os desvios dos valores previstos pelo modelo são semelhantes aos desvios dos valores observados (ambos em relação à média \bar{y}) é outra maneira de dizer que as previsões estão em boa concordância com as observações.

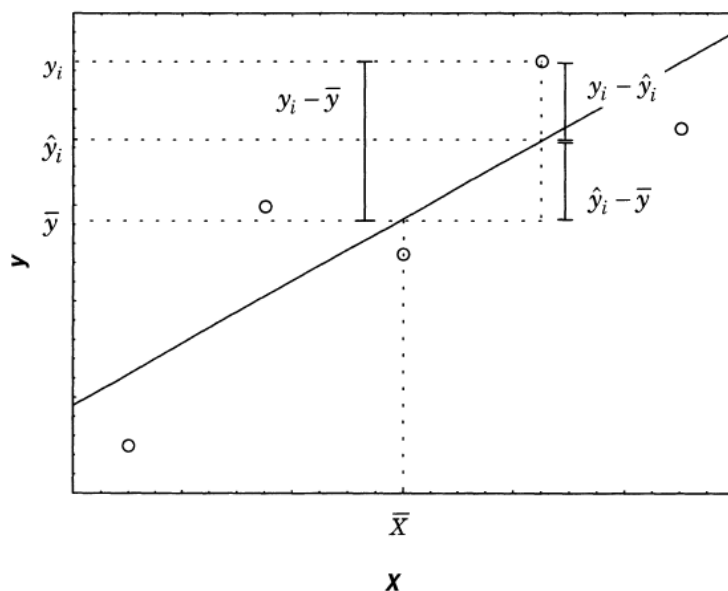


Figura 10.1: Decomposição do desvio de uma observação em relação à média global, $(y_i - \bar{y})$, na soma das parcelas $(\hat{y}_i - \bar{y})$ e $(y_i - \hat{y}_i)$

O próximo passo é expressar esta comparação de desvios em termos quantitativos. Para isto, elevamos a Eq. 10.10 ao quadrado e em seguida é feito o somatório sobre todos os pontos:

$$\begin{aligned} \sum (y_i - \bar{y})^2 &= \sum [(\hat{y}_i - \bar{y}) + (y_i - \hat{y}_i)]^2 \\ &= \sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2 + 2 \sum (\hat{y}_i - \bar{y})(y_i - \hat{y}_i) + \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 \end{aligned} \quad (10.11)$$

Não será demonstrado, mas a expressão $(\hat{y}_i - \bar{y})(y_i - \hat{y}_i)$ é zero, então:

$$\sum (y_i - \bar{y}) = \sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2 + \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (10.12)$$

Estas somas de quadrados de desvios costumam ser denominadas de somas quadráticas, ou, abreviadamente, SQ. Assim, pode-se ler a Eq. 10.12 como:

$$[SQ \text{ em torno da média}] = [SQ \text{ devida à regressão}] + [SQ \text{ residual}] \quad (10.13)$$

Numa notação mais compacta, pode-se escrever:

$$SQ_T = SQ_R + SQ_r \quad (10.14)$$

Quer dizer: uma parte da variação total das observações y_i em torno da média \bar{y} é descrita pela equação de regressão, e o restante fica por conta dos resíduos. Evidentemente, quanto maior for a fração descrita pela regressão, melhor será o ajuste do modelo, o que pode quantificá-la por meio da razão

$$R^2 = \frac{SQ_R}{SQ_T} = \frac{\sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (10.15)$$

R^2 é chamado de coeficiente de determinação do modelo. O valor máximo de R^2 é 1, e só ocorrerá se não houver resíduo nenhum e portanto toda a variação em torno da média for explicada pela regressão. Quanto mais perto de 1 estiver o valor de R^2 , melhor terá sido o ajuste do modelo às respostas observadas.

Dividindo as somas quadráticas pelos seus respectivos números de graus de liberdade, obtêm-se as médias quadráticas (MQs), que são mostradas na última coluna da Tab. 10.1

Agora, admitindo que os erros seguem uma distribuição normal, pode-se voltar à análise da variância e usar as médias quadráticas para testar se a equação de regressão é estatisticamente significativa. Quando não há relação entre X (variável independente) e y (variável dependente), pode-se demonstrar que a razão entre as médias quadráticas MQ_R e MQ_r segue uma distribuição F

$$\frac{MQ_R}{MQ_r} = F_{p-1, n-p} \quad (10.16)$$

onde $p - 1$ e $n - p$ são os números de graus de liberdade da média quadrática devida à regressão e da média quadrática residual, respectivamente, n é o número total de observações e p o número de parâmetros do modelo.

Para testar a hipótese nula (não há relação entre X e y), é utilizado o valor efetivamente calculado para MQ_R/MQ_r e compará-lo com o valor tabelado de $F_{p-1, n-p}$ no nível de confiança desejado. Se verificar que $MQ_R/MQ_r > F_{p-1, n-p}$, deve-se descartar a

hipótese nula e tem-se evidência estatística suficiente para acreditar na existência de uma relação matemática entre as variáveis y e X , e quanto maior o valor de MQ_R/MQ_r melhor.

Uma regra prática que pode-se empregar é considerar a regressão como útil para fins de previsão se o valor de MQ_R/MQ_r for, pelo menos, cerca de dez vezes o valor do ponto da distribuição F com o número apropriado de graus de liberdade, no nível de confiança escolhido.

Se o experimento fornecer respostas em duplicata, pode-se usá-las para obter uma estimativa do erro aleatório. Com essa estimativa, tem-se um critério quantitativo para julgar se o modelo escolhido é uma boa representação das observações, ou se é necessário modificá-lo.

A soma quadrática residual deixada pelo modelo pode ser decomposta em duas partes: uma causada pelos erros aleatórios, e a outra devida à falta de ajuste do modelo. Esta segunda parcela pode ser reduzida aperfeiçoando-se o modelo. A outra parte, não.

No caso geral, para cada valor X_i foram determinadas n_i respostas, obtidas em repetições autênticas. Para identificar as repetições é utilizado um segundo índice, j , de modo que uma resposta passará a ser representada genericamente por y_{ij} significando a j -ésima resposta obtida para o i -ésimo ensaio. O número total de respostas em todo o experimento será igual à soma de todas as repetições $n = \sum n_i$.

Em cada nível i o modelo deixará n_i resíduos, um para cada resposta repetida. Somando os quadrados de todos eles, em todas as repetições e em todos os níveis, obteremos a soma quadrática residual nesse nível.

Cada resíduo individual pode ser decomposto algebricamente na diferença de dois termos:

$$(y_{ij} - \hat{y}_i) = (y_{ij} - \bar{y}_i) + (\hat{y}_i - \bar{y}_i) \quad (10.17)$$

onde \bar{y}_i é a média das respostas observadas no nível i . Elevando ao quadrado esta equação e somando sobre todas as observações, tem-se do lado esquerdo a soma quadrática residual, SQ_r . Do lado direito as somas quadráticas das duas parcelas, pois o somatório dos termos cruzados se anula, a exemplo do que aconteceu na decomposição da soma quadrática total.

$$\sum_i^m \sum_j^{n_i} (y_{ij} - \hat{y}_i)^2 = \sum_i^m \sum_j^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 + \sum_i^m \sum_j^{n_i} (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2 \quad (10.18)$$

O primeiro somatório do lado direito não tem nada a ver com o modelo, e portanto não depende das estimativas \hat{y}_i , refletindo apenas a dispersão, em cada nível i , das respostas repetidas y_{ij} em torno de suas próprias médias \bar{y}_i . Esse termo dará uma medida do erro

aleatório e é denominado de soma quadrática devida ao erro puro (SQ_{ep}). O segundo somatório, ao contrário, depende do modelo, e será tanto maior quanto mais as estimativas para um dado nível, \hat{y}_i , se desviarem da resposta média correspondente, \bar{y}_i . Esse termo fornece uma medida da falta de ajuste do modelo às respostas observadas, sendo denominado por isso de soma quadrática devida à falta de ajuste, SQ_{faj} . Com esta terminologia, a Eq. 10.18 pode ser lida assim:

$$[SQ_{residual}] = [SQ_{devido\ ao\ erro\ puro}] + [SQ_{devida\ à\ falta\ de\ ajuste}] \quad (10.19)$$

Ou

$$SQ_r = SQ_{ep} + SQ_{faj} \quad (10.20)$$

Quando se divide essas somas quadráticas pelos seus respectivos números de graus de liberdade tem-se médias quadráticas, cujos valores são utilizados para comparar para avaliar a falta de ajuste do modelo.

As equações para o cálculo das somas e médias quadráticas e cálculo dos gdl's estão todas apresentadas na Tab. 10.1.

Tabela 10.1: Equações da ANOVA

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Nº de gdl	Média Quadrática
Regressão	$SQ_R = \sum_i^m \sum_j^{n_i} (\hat{y}_i - \bar{y})^2$	$p - 1$	$MQ_R = \frac{SQ_R}{p - 1}$
Resíduos	$SQ_r = \sum_i^m \sum_j^{n_i} (y_{ij} - \hat{y}_i)^2$	$n - p$	$MQ_r = \frac{SQ_r}{n - p}$
Falta de Ajuste	$SQ_{faj} = \sum_i^m \sum_j^{n_i} (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2$	$m - p$	$MQ_{faj} = \frac{SQ_{faj}}{m - p}$
Erro Puro	$SQ_{ep} = \sum_i^m \sum_j^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2$	$n - m$	$MQ_{ep} = \frac{SQ_{ep}}{n - m}$
Total	$SQ_T = \sum_i^m \sum_j^{n_i} (y_{ij} - \bar{y})^2$	$n - 1$	
% de variação explicada: $\frac{SQ_R}{SQ_T}$ % máxima de variação explicada: $\frac{SQ_T - SQ_{ep}}{SQ_T}$			

A percentagem de variação explicada pela regressão, isto é, a razão entre a soma quadrática devida à regressão e a soma quadrática total, não deve ser comparado com 100% por causa da contribuição devida ao erro puro. Como nenhum modelo pode reproduzir a soma quadrática do erro puro, o valor máximo explicável é a diferença entre a soma quadrática total e SQ_{ep} . É com este novo valor que se deve comparar a variação explicada pela regressão.