

ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO
MESTRADO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

DEIVID ANTUNES TESCH

LOCALIZAÇÃO INDOOR RFID BASEADA NO EFEITO DOPPLER

Porto Alegre
2015

PÓS-GRADUAÇÃO - *STRICTO SENSU*



Pontifícia Universidade Católica
do Rio Grande do Sul

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO**

**LOCALIZAÇÃO INDOOR RFID
BASEADA NO EFEITO
DOPPLER**

DEIVID ANTUNES TESCH

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação na Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

Orientador: Prof. Fabiano Passuelo Hessel

**Porto Alegre
2015**

Ficha Catalográfica

T337L Tesch, Deivid Antunes

Localização indoor RFID baseada no efeito Doppler / Deivid Antunes Tesch. – 2015.

83 p.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, PUCRS.

Orientador: Prof. Dr. Fabiano Passuelo Hessel.

1. RFID. 2. Localização indoor. 3. IoT. 4. Efeito Doppler. I. Hessel, Fabiano Passuelo. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da PUCRS
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Bibliotecária responsável: Clarissa Jesinska Selbach CRB-10/2051

Deivid Antunes Tesch

Localização Indoor RFID Baseada no Efeito Doppler

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, Escola Politécnica da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

Aprovado em 27 de março de 2015.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. César Augusto Missio Marcon (PPGCC/PUCRS)

Prof. Dr. Dario Francisco Guimarães de Azevedo (PPGEE/PUCRS)

Prof. Dr. Fabiano Passuelo Hessel (PPGCC/PUCRS - Orientador)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a meus pais.

“A única fonte de conhecimento é a experiência.”

(Albert Einstein)

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos que participaram de alguma forma deste trabalho.

Ao meu orientador, Professor Fabiano Hessel, pelo direcionamento e compreensão durante todo esse período.

Ao colega Everton Berz, por toda a colaboração para realização dos experimentos e pelo direcionamento.

Ao Professor Carlos Jung pela cooperação para o andamento do trabalho.

Ao meu irmão, Douglas Tesch e a minha cunhada, Nathalia Esper, pela assistência e apoio.

A minha mãe e minha irmã por toda compreensão e suporte.

Por fim, agradeço a minha namorada, Paula Martins, por não ter desistido de mim apesar das ausências e renúncias, pelo apoio incondicional e compreensão. Simplesmente te amo!

LOCALIZAÇÃO INDOOR RFID BASEADA NO EFEITO DOPPLER

RESUMO

A Internet das Coisas (*Internet of Things* — IoT) incorpora conceitos da computação pervasiva e habilita a interação entre pessoas e objetos. O serviço de localização é um dos serviços primários da IoT. A tecnologia de Identificação por Radiofrequência (*Radio Frequency Identification* — RFID) permite identificação de objetos à distância e pode ser utilizado para automatizar diversas etapas da cadeia de produção, sendo também uma das principais tecnologias que podem viabilizar o serviço localização. Entretanto, as técnicas de localização indoor existentes possuem baixa precisão ou são demasiadamente complexas, exigindo um alto investimento. Este trabalho apresenta uma técnica de localização indoor RFID baseada em um modelo analítico do efeito Doppler. A partir da frequência, Doppler devido ao movimento relativo entre a antena do leitor RFID e a etiqueta RFID, é possível determinar a posição espacial da antena ou da etiqueta com precisão na escala de centímetros e, em simultâneo, atender aos requisitos de baixa complexidade e custo.

Palavras-Chave: RFID, Localização Indoor, IoT, Efeito Doppler.

RFID INDOOR LOCALIZATION BASED ON DOPPLER EFFECT

ABSTRACT

Internet of Things (IoT) incorporates concepts from pervasive computing and enables interaction between people and objects. Location service is one of the primary services of IoT. RFID (Radio Frequency Identification) allows identification of objects in the distance and can be used to automate several steps of the production chain, being also one of the main technologies that can enable the location service. However, existing techniques for indoor localization either have low accuracy or are too complex, requiring a high investment. This work presents a technique of RFID indoor localization based on an analytical model of the Doppler Effect. From the Doppler frequency, due to the relative movement between the RFID reader antenna and the RFID tag, it is possible to determine the spatial position of the antenna or tag with precision in the scale of centimeters and at the same time meet the requirements of low complexity and cost.

Keywords: RFID, Indoor Localization, IoT, Doppler Effect.

LISTA DE FIGURAS

2.1	Etiqueta passiva <i>Alien</i> 900 MHz. Fonte: [Wan06].	29
2.2	Funcionamento da etiqueta baseada em campo próximo. Fonte: [Wan06].	31
2.3	Funcionamento da etiqueta baseada em campo distante. Fonte: [Wan06].	31
3.1	Ilustração da técnica de localização TD-PDoA. Fonte: [NMR+10].	34
3.2	Ilustração da técnica SD-PDoA. Fonte: [NMR+10].	34
3.3	Ilustração da técnica FD-PDoA. Fonte: [NMR+10].	35
5.1	Composição da tensão complexa demodulada recebida pelo leitor. Fonte: [NMR+10].	42
5.2	Fontes que contribuem para a tensão complexa demodulada. Fonte: [NMR+10].	42
5.3	Frequência Doppler medida a partir do deslocamento da fase. Fonte: o autor.	43
6.1	Leitor RFID e antena utilizados nos testes. Fonte: o autor.	47
6.2	Etiqueta RFID utilizada nos testes. Fonte: o autor.	48
6.3	Esteira por onde ocorreu o movimento da etiqueta e da antena. Fonte: o autor.	48
6.4	Carrinho de controle remoto com a etiqueta RFID fixada. Fonte: o autor.	50
6.5	Configuração do cenário 1 sobre uma perspectiva superior. Fonte: o autor.	50
6.6	Configuração do cenário 1 sobre uma perspectiva frontal. Fonte: o autor.	51
6.7	Configuração do cenário 2 sobre uma perspectiva superior. Fonte: o autor.	51
6.8	Configuração do cenário 2 sobre uma perspectiva frontal. Fonte: o autor.	52
7.1	Gráficos de dispersão de duas amostras do subcenário 1. Fonte: o autor.	54
7.2	Gráficos de dispersão obtidos a partir da decomposição da primeira amostra (Figura 7.1a) do subcenário 1 nas 4 diferentes frequências de origem (f_0) que a compõem. Fonte: o autor.	55
7.3	Histogramas com as distribuições para os eixos x, y e z dos resultados obtidos no subcenário 1. Fonte: o autor.	56
7.4	Gráficos de dispersão de duas amostras do subcenário 2. Fonte: o autor.	57
7.5	Gráficos de dispersão obtidos a partir da decomposição da primeira amostra (Figura 7.4a) do subcenário 2 nas 4 diferentes frequências de origem (f_0) que a compõem. Fonte: o autor.	58
7.6	Histogramas com as distribuições para os eixos x, y e z dos resultados obtidos no subcenário 2. Fonte: o autor.	59
7.7	Gráficos de dispersão de duas amostras do subcenário 3. Fonte: o autor.	60

7.8	Gráficos de dispersão obtidos a partir da decomposição da primeira amostra (Figura 7.7a) do subcenário 3 nas 4 diferentes frequências de origem (f_0) que a compõem. Fonte: o autor.	61
7.9	Histogramas com as distribuições para as coordenadas x, y e z dos resultados obtidos no subcenário 3. Fonte: o autor.	62
7.10	Variação do erro observado no cenário 1 em função da distância entre a antena do leitor e a etiqueta. Fonte: o autor.	64
7.11	Gráficos de dispersão de duas amostras do subcenário 1. Fonte: o autor. . .	65
7.12	Gráficos de dispersão obtidos a partir da decomposição da primeira amostra (Figura 7.11a) do subcenário 1 nas 4 diferentes frequências de origem (f_0) que a compõem. Fonte: o autor.	66
7.13	Histogramas com as distribuições para os eixos x, y e z dos resultados obtidos no subcenário 1. Fonte: o autor.	67
7.14	Gráficos de dispersão de duas amostras do subcenário 2. Fonte: o autor. . .	68
7.15	Gráficos de dispersão obtidos a partir da decomposição da primeira amostra (Figura 7.14a) do subcenário 2 nas 4 diferentes frequências de origem (f_0) que a compõem. Fonte: o autor.	69
7.16	Histogramas com as distribuições para os eixos x, y e z dos resultados obtidos no subcenário 2. Fonte: o autor.	70
7.17	Gráficos de dispersão de duas amostras do subcenário 3. Fonte: o autor. . .	71
7.18	Gráficos de dispersão obtidos a partir da decomposição da primeira amostra (Figura 7.17a) do subcenário 3 nas 4 diferentes frequências de origem (f_0) que a compõem. Fonte: o autor.	72
7.19	Histogramas com as distribuições para os eixos x, y e z dos resultados obtidos no subcenário 3. Fonte: o autor.	73
7.20	Variação do erro observado no cenário 2 em função da distância entre a antena do leitor e a etiqueta. Fonte: o autor.	75
A.1	Limites do leitor RFID utilizado com relação à fase [Imp13].	83
A.2	Limites do leitor RFID utilizado com relação à frequência Doppler [Imp13]. .	83

LISTA DE TABELAS

7.1	Resultados obtidos no subcenário 1.	54
7.2	Erro absoluto, por eixo, dos resultados obtidos no subcenário 1.	56
7.3	Resultados obtidos no subcenário 2.	59
7.4	Erro absoluto, por eixo, dos resultados obtidos no subcenário 2.	59
7.5	Resultados obtidos no subcenário 3.	62
7.6	Erro absoluto, por eixo, dos resultados obtidos no subcenário 3.	62
7.7	Sumarização dos resultados obtidos no cenário 1.	63
7.8	Sumarização do erro absoluto, por eixo, dos resultados obtidos no cenário 1.	63
7.9	Resultados obtidos no subcenário 1.	65
7.10	Erro absoluto, por eixo, dos resultados obtidos no subcenário 1.	67
7.11	Resultados obtidos no subcenário 2.	70
7.12	Erro absoluto, por eixo, dos resultados obtidos no subcenário 2.	70
7.13	Resultados obtidos no subcenário 3.	73
7.14	Erro absoluto, por eixo, dos resultados obtidos no subcenário 3.	73
7.15	Sumarização dos resultados obtidos no cenário 2.	74
7.16	Sumarização do erro absoluto, por eixo, dos resultados obtidos no cenário 2.	75

LISTA DE SIGLAS

AC – Alternating Current

DC – Direct Current

EKF – Extended Kalman Filter

FD-PDoA – Frequency Domain Phase Difference of Arrival

FPGA – Field Programmable Gate Array

GPS – Global Positioning System

I – In-phase

IoT – Internet of Things

LFM – Linear Frequency Modulation

PDoA – Phase Difference of Arrival

Q – Quadrature

RFID – Radio Frequency Identification

RSSI – Received Signal Strength Indicator

RTS – Rauch-Tung-Striebel

SD-PDoA – Spatial Domain Phase Difference of Arrival

TD-PDoA – Time Domain Phase Difference of Arrival

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	MOTIVAÇÃO	26
1.2	OBJETIVO	26
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	27
2	RFID	29
2.1	ETIQUETAS ATIVAS	29
2.2	ETIQUETAS PASSIVAS	29
2.2.1	CAMPO PRÓXIMO	30
2.2.2	CAMPO DISTANTE	31
3	TÉCNICAS DE LOCALIZAÇÃO INDOOR RFID	33
3.1	TÉCNICAS E LOCALIZAÇÃO INDOOR RFID BASEADAS NO RSSI	33
3.2	TÉCNICAS DE LOCALIZAÇÃO INDOOR RFID BASEADAS NA FASE	33
3.2.1	TD-PDOA	34
3.2.2	SD-PDOA	34
3.2.3	FD-PDOA	35
4	TRABALHOS RELACIONADOS	37
4.1	SARKKA	37
4.2	YU	37
4.3	ANGERER	38
4.4	POVALAC	38
4.5	KUSY	38
4.6	CONCLUSÃO SOBRE OS TRABALHOS	39
5	MODELO DOPPLER	41
5.1	DETERMINAÇÃO DA FREQUÊNCIA DOPPLER ESTIMADA	41
5.1.1	DETERMINAÇÃO DA FASE	41
5.1.2	DETERMINAÇÃO DA FREQUÊNCIA DOPPLER A PARTIR DO DESLOCA- MENTO DA FASE	43
5.2	INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE E DA POSIÇÃO ESPACIAL DO TRANSMIS- SOR E DO RECEPTOR NO EFEITO DOPPLER	44

5.3	DETERMINAÇÃO DA LOCALIZAÇÃO ESPACIAL A PARTIR DA FREQUÊNCIA DOPPLER	46
6	VALIDAÇÃO DO MODELO	47
6.1	AMBIENTE DE TESTES	47
6.1.1	CENÁRIO 1: LOCALIZAÇÃO DA ANTENA	50
6.1.2	CENÁRIO 2: LOCALIZAÇÃO DA ETIQUETA RFID	51
7	RESULTADOS	53
7.1	CENÁRIO 1	53
7.1.1	SUBCENÁRIO 1: Z=0,5 M	53
7.1.2	SUBCENÁRIO 2: Z=1 M	57
7.1.3	SUBCENÁRIO 3: Z=1,5 M	60
7.1.4	ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS NO CENÁRIO 1	63
7.2	CENÁRIO 2	64
7.2.1	SUBCENÁRIO 1: Z=0,5 M	64
7.2.2	SUBCENÁRIO 2: Z=1 M	68
7.2.3	SUBCENÁRIO 3: Z=1,5 M	71
7.2.4	ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS NO CENÁRIO 2	74
7.3	RESULTADO GERAL	76
8	CONCLUSÃO	77
8.1	TRABALHOS FUTUROS	78
8.2	PUBLICAÇÕES	78
	REFERÊNCIAS	81
	ANEXO A – Limites do leitor RFID utilizado nos testes	83

1. INTRODUÇÃO

A tecnologia de Identificação por Radiofrequência (*Radio Frequency Identification* — RFID), surgiu como uma evolução de outra já consolidada tecnologia de identificação: o código de barras. A principal vantagem do RFID em relação ao código de barras é que ele permite identificação de objetos à distância, desde que uma etiqueta RFID esteja presa ao objeto. A partir dessa tecnologia é possível automatizar diversas etapas da cadeia de produção, seja no controle de estoque, na automação de vendas ou no rastreamento de encomendas.

A Internet das Coisas (*Internet of Things* — IoT) incorpora conceitos da computação pervasiva e permite a interação entre pessoas e objetos. A IoT está crescendo rapidamente e cada vez mais diferentes categorias de objetos estão sendo integrados a essa rede. Novos serviços foram providos a partir de informações contidas ou obtidas através desses objetos inteligentes. Um dos serviços essenciais para a internet das coisas é o serviço de localização e a precisão na localização é uma peça-chave [CXH⁺13].

Um exemplo de cenário em que esse serviço de localização poderia ser aplicado são os centros de distribuição, onde é comum que, para retirada de um palete específico da estante, seja necessário realizar a manipulação de outros paletes que estão obstruindo o acesso ao mesmo. Os paletes manipulados tem as suas posições alteradas, porém dificilmente a informação da sua nova posição é atualizada. Isso acarreta prejuízos financeiros para os centros de distribuição em virtude do tempo gasto na localização ou, até mesmo, da perda do palete que não teve sua posição atualizada.

O serviço de localização também poderia auxiliar na navegação de robôs autônomos em ambientes internos onde as etiquetas RFID seriam utilizadas como referências para designar o trajeto ou estabelecer os limites no movimento do robô. Esses entre outros cenários demandam uma tecnologia de localização específica para o ambiente indoor, onde seja possível aliar a identificação e a localização, permitindo maior agilidade e precisão na localização.

A RFID é uma das principais tecnologias que podem viabilizar esse serviço, porém as técnicas de localização indoor existentes possuem baixa precisão ou são muito complexas, exigindo um alto investimento. Além disso, o RFID é fortemente afetado por problemas inerentes a propagação eletromagnética em ambiente indoor, como, por exemplo, a difração e o desvanecimento por multipercurso.

1.1 Motivação

A IoT já é realidade e estamos vivendo uma nova era onde objetos antes inanimados interagem com as pessoas fornecendo informações relevantes. A localização indoor é um serviço essencial da IoT. Seja para localização de materiais médicos em um hospital, na busca por instrumentais em consultório odontológico, na localização de um livro específico na estante de uma biblioteca, na localização de produtos em um supermercado, para encontrar um palete perdido em um centro de distribuição, para encontrar o carro no estacionamento e, até mesmo, para se localizar dentro de um shopping. Habilitar esse serviço nesses ambientes (entre outros não mencionados), traria a informação necessária no momento e local em que ela é necessária.

Entretanto, a localização indoor apresenta uma série de especificidades que inviabilizam ou dificultam a sua utilização em escala comercial, como, por exemplo, o alto custo dos equipamentos. Além disso, as técnicas de localização com alta precisão são complexas e possuem um escopo de aplicabilidade muito limitado.

Devido à importância da localização indoor para a evolução da IoT é crucial o desenvolvimento de técnicas de localização comercialmente viáveis e simples de serem implementadas, que consigam ser robustas o suficiente para conseguir enfrentar os problemas intrínsecos à localização indoor e, em simultâneo, consigam fornecer a localização de um objeto na escala de centímetros.

1.2 Objetivo

Embasado em um modelo analítico, este trabalho desenvolve uma nova técnica de localização indoor RFID baseada no efeito Doppler. O efeito Doppler se manifesta a partir do movimento relativo entre a antena do leitor e a etiqueta RFID, que causa um deslocamento na frequência — também conhecido como frequência Doppler — e faz com que a frequência recebida após ser refletida pela etiqueta difira da frequência transmitida.

O deslocamento na frequência, a velocidade e uma coordenada espacial de algum dos eixos y ou z , são utilizados como parâmetros para determinação da posição espacial do objeto que está em repouso em relação ao objeto que está em movimento. O objeto em repouso pode ser tanto a antena do leitor RFID quanto a etiqueta RFID, desde que o outro objeto esteja em movimento.

Este trabalho fornece uma técnica robusta o suficiente para enfrentar os diversos problemas intrínsecos à localização indoor e, em simultâneo, atender aos requisitos de precisão na escala de centímetros, baixa complexidade de implementação e custo.

1.3 Organização do texto

O trabalho está organizado da seguinte forma: o Capítulo 2 aborda a tecnologia RFID e seus princípios de funcionamento. No Capítulo 3 são apresentados os conceitos de algumas técnicas de localização indoor RFID existentes. No Capítulo 4 são apresentados os trabalhos relacionados. O Capítulo 5 apresenta detalhes de como a frequência Doppler é estimada pelo leitor RFID e o modelo Doppler utilizado para determinar a localização dos objetos. O Capítulo 6 traz o ambiente de testes e as especificidades da aplicação do modelo ao contexto da localização indoor RFID, além dos cenários elaborados para validação do modelo. Por fim, nos Capítulos 7 e 8 são apresentados os resultados da validação do modelo e a conclusão, respectivamente.

2. RFID

A tecnologia RFID permite a identificação à distância de etiquetas RFID sem necessitar que a antena do leitor e a etiqueta estejam em visada direta (sem obstáculos intermediários entre a antena do leitor e a etiqueta). Além disto, ele consegue distinguir entre diversas etiquetas diferentes situadas em um mesmo local [Wan06].

As etiquetas suportam um grande conjunto de identificadores únicos e podem incorporar diversas informações como fabricante, categoria de produto e até mesmo atuar como sensores medindo fatores ambientais, tais como umidade e temperatura. As etiquetas podem ser divididas em duas classes principais: ativas e passivas [Wan06]. Na Figura 2.1 é mostrado um exemplo de etiqueta passiva.

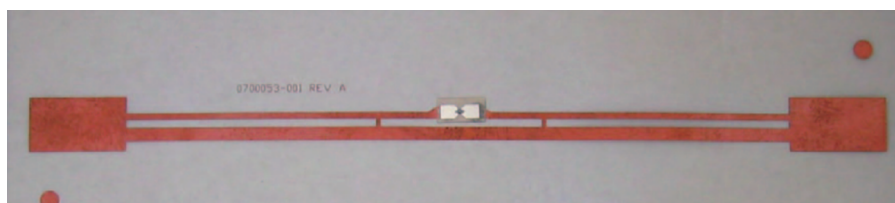


Figura 2.1: Etiqueta passiva *Alien* 900 MHz. Fonte: [Wan06].

2.1 Etiquetas ativas

Etiquetas ativas necessitam de uma fonte de energia, como, por exemplo, uma bateria integrada à etiqueta. A bateria fornece à etiqueta maior independência, visto que não necessita capturar a energia, transmitida pelo leitor, para o seu funcionamento [Wan06]. Isso permite sua operação a distâncias muito superiores ao das etiquetas passivas [NLLP03]. Além disso, permite que sensores como os de umidade e temperatura sejam integrados a etiqueta [Wan06].

Por outro lado, a bateria incrementa o custo e o tamanho da etiqueta, além de reduzir seu tempo de vida, que varia conforme carga armazenada na bateria e com número de operações de leitura e escrita ao qual a etiqueta é submetida. Essas desvantagens inviabilizam seu uso pelo comércio varejista [Wan06].

2.2 Etiquetas passivas

Etiquetas passivas são interessantes porquê não necessitam de baterias ou qualquer manutenção. Elas também têm uma vida útil indeterminada e são pequenas o sufici-

ente para caber em uma prática etiqueta adesiva. Uma etiqueta passiva consiste em três partes: uma antena, um circuito integrado ligado à antena e alguma forma de encapsulamento. O leitor é responsável por fornecer energia e iniciar a comunicação com a etiqueta [Wan06].

A antena da etiqueta capta a energia e transfere o ID da mesma (o circuito integrado da etiqueta coordena esse processo). O encapsulamento mantém a integridade da etiqueta e protege a antena e o circuito integrado de condições ambientais ou de reagentes. O encapsulamento pode ser feito através de um pequeno frasco de vidro ou um substrato plástico laminar com adesivo de um lado para permitir a fácil fixação a objetos [Wan06].

Existem duas abordagens de projeto RFID fundamentalmente diferentes para a transferência de energia da antena do leitor para a etiqueta: indução magnética e captura da onda eletromagnética. Essas duas abordagens tiram proveito das propriedades eletromagnéticas associadas a antena — o campo próximo e o campo distante. Ambos podem transferir energia suficiente para a etiqueta sustentar sua operação. Através de várias técnicas de modulação, os sinais baseados no campo próximo e no campo distante podem também transmitir e receber dados [Wan06].

2.2.1 Campo Próximo

Nessa abordagem o leitor faz com que uma corrente alternada circule através de sua bobina de leitura o que, pelo princípio da indução magnética de Faraday, resulta em um campo magnético alternado no local. Ao aproximar uma etiqueta que possua uma pequena bobina desse campo magnético, aparecerá uma tensão alternada na bobina da etiqueta que é então retificada e armazenada em um capacitor para fornecer energia para o circuito integrado [Wan06]. A Figura 2.2 ilustra o funcionamento deste mecanismo para transferência de energia e de comunicação entre leitor e etiqueta.

As etiquetas baseadas no campo próximo enviam dados para o leitor usando a modulação da carga — variando a intensidade do campo magnético, onde o sinal pode ser codificado através de minúsculas variações do campo magnético. Uma variedade de codificações de modulação é possível dependendo do número de bits de ID necessários, da taxa de transferência de dados e dos bits de redundância adicionais colocados no código para remover os erros resultantes de ruído no canal de comunicação [Wan06].

O alcance onde a indução magnética pode ser utilizada é limitada e diminui com o aumento da frequência, o campo magnético cai na razão de $1/r^3$, onde r é a separação entre o leitor e a etiqueta ao longo de uma linha central perpendicular ao plano da bobina [Wan06].

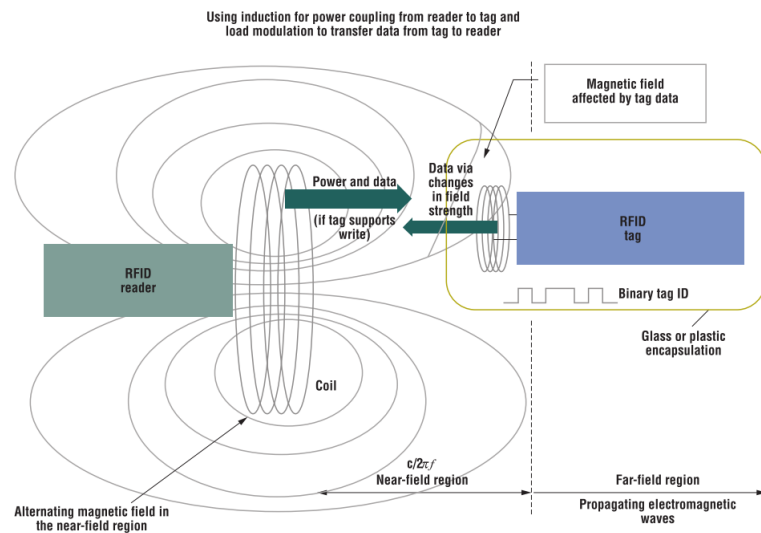


Figura 2.2: Funcionamento da etiqueta baseada em campo próximo. Fonte: [Wan06].

2.2.2 Campo Distante

As etiquetas RFID baseadas nas emissões do tipo campo distante capturam ondas eletromagnéticas propagadas a partir de uma antena dipolo ligada ao leitor. Uma antena dipolo menor na etiqueta recebe a energia a partir de uma diferença de potencial alternada entre os braços da antena dipolo. Um diodo retifica essa diferença de potencial que é então armazenada em um capacitor para fornecer energia para o circuito integrado [Wan06]. A Figura 2.3 ilustra o funcionamento de uma etiqueta baseada em campo distante.

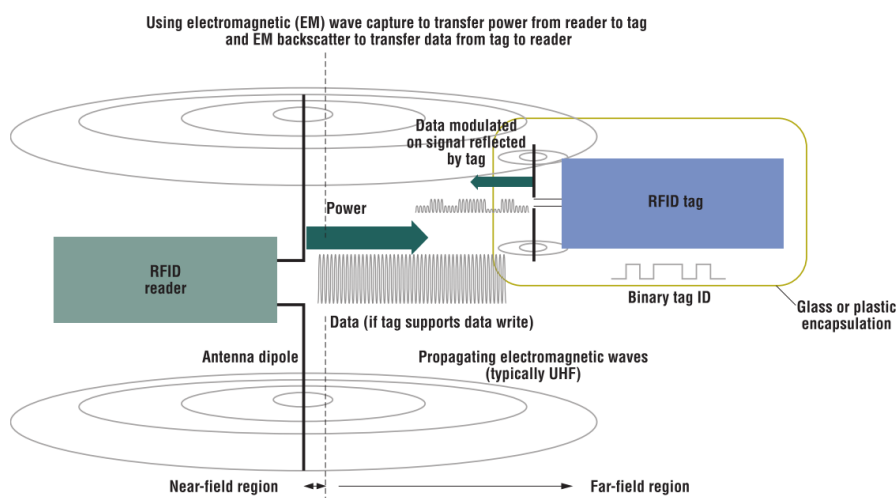


Figura 2.3: Funcionamento da etiqueta baseada em campo distante. Fonte: [Wan06].

A antena da etiqueta pode ser projetada com dimensões precisas para sintonizar uma frequência específica e absorver a maior parte da energia que chega nesta frequência. No entanto, se uma diferença de impedância ocorre nesta frequência, a antena da etiqueta irá refletir de volta um pouco da energia para a antena do leitor, que pode detectar a energia

através de um receptor sensível. Ao alterar a impedância da antena temporalmente, a etiqueta pode refletir de volta parte do sinal de entrada em um padrão que codifica a ID da etiqueta [Wan06].

3. TÉCNICAS DE LOCALIZAÇÃO INDOOR RFID

Técnicas de localização indoor RFID precisam enfrentar diversos problemas intrínsecos à localização indoor, como: a reflexão, a difração, a absorção e o multipercorso [BDS08]. Além disso, a tecnologia RFID possui uma pequena largura de banda e uma alta variação da latência, impossibilitando o uso de técnicas de localização baseadas no tempo, como a que é empregada no Sistema de Posicionamento Global (*Global Positioning System* — GPS) [NMR⁺10] [FWAM11].

A maior parte das técnicas de localização RFID são baseadas no Indicador de Intensidade do Sinal Recebido (*Received Signal Strength Indicator* — RSSI) [NZS11] ou na fase do sinal recebido [NMR⁺10]. Nas Seções 3.1 e 3.2 são detalhadas as técnicas de localização baseadas no RSSI e na fase do sinal recebido, respectivamente.

3.1 Técnicas e localização indoor RFID baseadas no RSSI

As técnicas baseadas em RSSI tiram proveito do valor da intensidade do sinal que diminui conforme a distância entre a antena do leitor e a etiqueta aumenta [NZS11]. Entretanto, o RSSI é gravemente afetado pelo ambiente de propagação e não pode ser aproximado por um modelo baseado no espaço livre ou similar. As perdas devido ao retro-espalhamento dependem da energia que incide na etiqueta (que varia com a localização da etiqueta) porquê a impedância de entrada do circuito integrado dela também depende de energia [NMR⁺10].

3.2 Técnicas de localização indoor RFID baseadas na fase

A fase do sinal depende tanto do meio de propagação quanto das características da modulação, entretanto esses fatores são aditivos [NMR⁺10]. As três principais técnicas de localização que utilizam a fase são baseadas na diferença na fase recebida (Phase Difference of Arrival — PDoA): diferença da fase recebida no domínio do tempo (Time Domain Phase Difference of Arrival — TD-PDoA), diferença da fase recebida no domínio do espacial (Spatial Domain Phase Difference of Arrival — SDPDoA) e diferença da fase recebida no domínio da frequência (Frequency Domain Phase Difference of Arrival — FD-PDoA) [NMR⁺10]. Essas três técnicas de localização são detalhadas nas Subseções 3.2.1, 3.2.2 e 3.2.3, respectivamente [NMR⁺10].

3.2.1 TD-PDoA

Essa técnica de localização é baseada na diferença na fase recebida no domínio do tempo e permite estimar a projeção do vetor velocidade da etiqueta ao medir a fase recebida em dois momentos distintos. Isso é uma forma de estimar a frequência Doppler. A técnica é ilustrada na Figura 3.1 onde a etiqueta se move com velocidade constante a uma certa distância da antena do leitor [NMR⁺10].

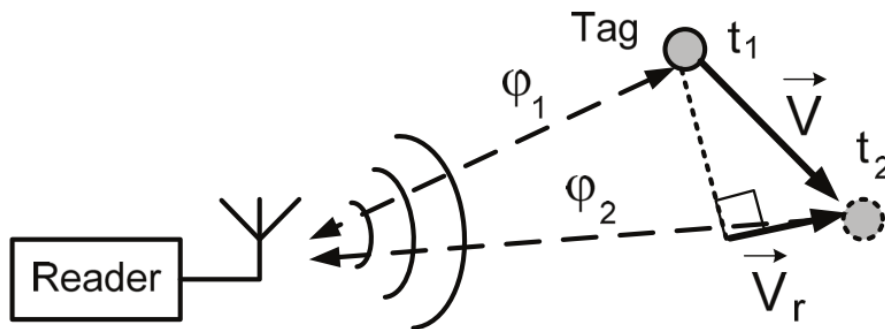


Figura 3.1: Ilustração da técnica de localização TD-PDoA. Fonte: [NMR⁺10].

3.2.2 SD-PDoA

Por outro lado, a técnica de localização SD-PDoA utiliza a diferença na fase recebida no domínio espacial para estimar a localização da etiqueta. A partir do sinal recebido através de várias antenas separadas por uma distância conhecida é possível estimar o ângulo de chegada, ao medir a fase do sinal recebido em cada antena e calcular a diferença entre as fases, e a partir dele determinar a posição da etiqueta. A técnica é ilustrada na Figura 3.2, para um leitor utilizando a configuração biestática (a transmissão e a recepção são realizadas em antenas distintas) [NMR⁺10].

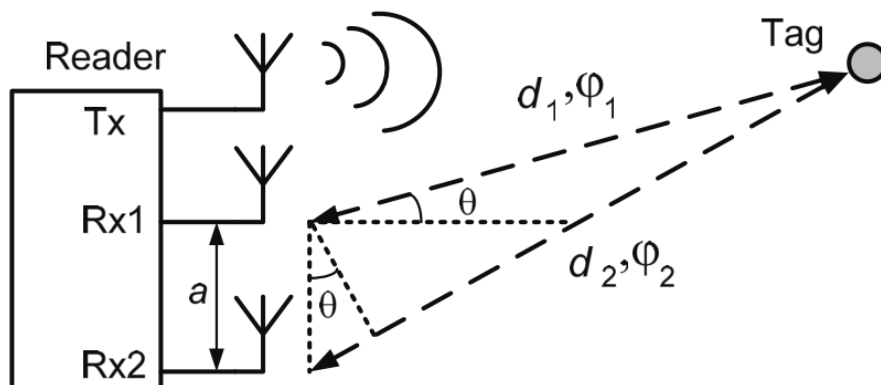


Figura 3.2: Ilustração da técnica SD-PDoA. Fonte: [NMR⁺10].

A medição de fase nas antenas 1 e 2 podem ser feitas simultaneamente (neste caso, o leitor RFID precisa de um receptor com dois canais) ou sequencialmente (a etiqueta pode ser interrogada diversas vezes, enquanto o leitor troca de uma antena de recepção para outra) [NMR⁺10].

Diversas variações da técnica SD-PDoA são possíveis, como, por exemplo, uma matriz com antenas de recepção pode ser usada para localizar a etiqueta em três dimensões [NMR⁺10].

3.2.3 FD-PDoA

Por fim, a técnica de localização FD-PDoA também é baseada na diferença de fase recebida, porém no domínio da frequência. Essa técnica permite estimar a distância da antena do leitor até a etiqueta, medindo a fase da etiqueta em diferentes frequências [NMR⁺10]. A técnica é ilustrada na Figura 3.3.

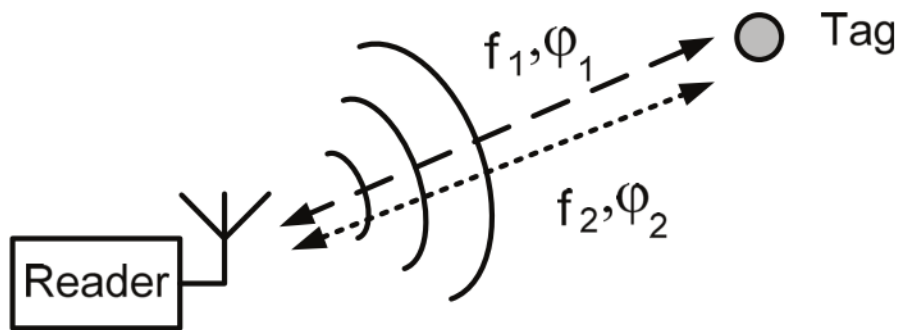


Figura 3.3: Ilustração da técnica FD-PDoA. Fonte: [NMR⁺10].

Ao utilizar o leitor com várias antenas diferentes e aplicando a técnica de FD-PDoA para cada uma delas, a etiqueta pode ser localizada em três dimensões [NMR⁺10]. Essa técnica funciona tanto com etiquetas em movimento quanto em repouso.

4. TRABALHOS RELACIONADOS

A localização indoor RFID é tema de pesquisas recentes: em [BDS08] e [SK08] é apresentada uma visão geral de localização RFID, apresentando as principais técnicas utilizadas para localização de etiquetas RFID. Em [NMR⁺10] e [FWAM11] são apresentados detalhes das técnicas de localização baseadas na fase. Nesse último, também é analisada a influência do efeito do multipercorso sobre essas técnicas de localização. Nas próximas seções são apresentados alguns trabalhos que foram relevantes para essa pesquisa.

4.1 Sarkka

Em [SVHJ11] é apresentada uma técnica de localização RFID baseada na medição da fase refletida pela etiqueta RFID, obtida através de leitores RFID disponíveis no mercado e de múltiplas antenas. Estas antenas são distribuídas espacialmente e operam na mesma frequência.

A ambiguidade de fase que ocorre devido à utilização de uma única frequência é resolvida usando um modelo no espaço de estados para posição, velocidade e deslocamento da fase. Os estados do modelo são estimados a partir dos algoritmos do filtro de Kalman Estendido (*Extended Kalman Filter* — EKF) e do RTS (*Rauch-Tung-Striebel*). Essa técnica obteve uma precisão entre 1 e 2 centímetros em uma zona de medição de 9 m² com uma antena situada em cada canto do quadrado.

4.2 Yu

Em [YLL11] é proposto um algoritmo de localização RFID a partir da análise das características do sinal recebido pelo leitor e da mudança na frequência do sinal recebido, consequência do efeito Doppler, causado pelo movimento relativo entre a antena do leitor e a etiqueta.

A frequência Doppler é estimada através do método de ajuste de linear seccionado e do método de estimativa de parâmetros em Modulação de Frequência Linear (*Linear Frequency Modulation* — LFM). A partir da frequência estimada, é então utilizado o algoritmo de Levenberg-Marquardt para obter a velocidade e a posição inicial do alvo e a partir dessas informações em conjunto com a informação do tempo de operação do algoritmo, a posição atual da etiqueta é obtida.

Nos testes apresentados, o leitor foi montado sobre um alvo móvel e as etiquetas fixadas ao lado do trajeto percorrido pelo leitor, onde cada etiqueta contém um identificador

único e armazena suas coordenadas espaciais. Esse algoritmo obteve um bom desempenho apresentando um erro na escala de centímetros.

4.3 Angerer

Um algoritmo baseado na PDoA (*Phase Difference of Arrival*) no domínio espacial é apresentado em [ALR10]. Esse algoritmo é utilizado para determinar a direção de chegada de uma etiqueta passiva RFID, utilizando uma matriz de antenas e um leitor RFID. Essa matriz é composta por três antenas, uma para transmissão e duas para recepção, sendo que estas estão separadas por uma distância conhecida e estão conectadas ao receptor implementado em FPGA (*Field Programmable Gate Array*). O sinal que chega a cada antena é demodulado e a partir dele o deslocamento da fase é determinado. Através da diferença das fases obtidas em cada antena do leitor é possível estimar a localização da etiqueta RFID. Essa técnica obteve um erro médio quadrático de $3,3^\circ$.

4.4 Povalac

Em [PS11] é realizado um resumo teórico das técnicas de localização baseadas na fase, assim como experimentos utilizando PDoA, porém no domínio da frequência. Essa técnica realiza o cálculo da distância a partir da diferença de fase em frequências consecuentes. Para os experimentos, realizados em uma câmara anecoica, foi utilizado um protótipo para obter os dados. Essa técnica possui a restrição de que a etiqueta não pode estar em movimento. Foi obtido um erro médio absoluto de 0,14 m e os resultados foram baseados em capturas em 105 frequências diferentes, variando a distância entre a antena e a etiqueta.

4.5 Kusy

Em [KLK07] é apresentado um algoritmo de rastreamento para redes de sensores sem fio. Nessa abordagem, cada nodo armazena a sua informação de localização e o serviço de rastreamento só é ativado quando algum dos nodos muda de posição. Para realizar o rastreamento do nodo que mudou de posição, os outros nodos, cooperativamente, medem a frequência Doppler e então realizam a fusão dos dados em um dos nodos.

A frequência Doppler é medida utilizando interferometria de rádio, onde dois nodos transmitem uma onda senoidal em simultâneo, em frequências diferentes, o que resulta em um sinal de interferência utilizado para o cálculo da frequência Doppler.

A partir dos dados obtidos, o problema de rastreamento é modelado como um problema de otimização não-linear e o filtro de Kalman estendido é utilizado para resolvê-lo. No entanto, esse algoritmo pode falhar caso o nodo que está sendo rastreado mude a direção do movimento ou a velocidade.

Em outra abordagem é proposta a atualização do filtro de Kalman realizando uma otimização dos mínimos quadrados quando uma manobra é detectada. Essa abordagem resulta em um aumento na precisão de quase 50% sobre o filtro de Kalman sozinho, quando o nodo rastreado muda de direção e velocidade frequentemente.

4.6 Conclusão Sobre os Trabalhos

A maioria das técnicas usa diversos leitores ou antenas como é apresentado em [SVHJ11] em que são utilizadas quatro antenas, ou em [ALR10] onde são utilizadas duas para recepção e uma para transmissão.

Em [SVHJ11] e [ALR10] são apresentadas técnicas de localização baseadas na diferença da fase recebida, assim como, em [PS11] onde são realizados experimentos utilizando PDoA no domínio da frequência.

Em [YLL11] e [KLK07] são apresentados algoritmos de localização baseados na frequência Doppler. Cada um dos algoritmos faz a estimativa da frequência Doppler diferentemente. O primeiro utiliza o método de ajuste de linear seccionado e o método de estimativa de parâmetros em LFM, enquanto o segundo utiliza interferometria de rádio. O problema de localização é modelado, pelo primeiro trabalho, utilizando o algoritmo de Levenberg-Marquardt, já no segundo é utilizado o filtro de Kalman.

Por fim, este trabalho se embasa em alguns desses trabalhos relacionados em conjunto com um modelo baseado na descrição analítica do efeito Doppler, propõe uma nova técnica de localização indoor RFID. Diferente do algoritmo apresentado em [YLL11], que utiliza etiquetas com a informação de posição pré-determinada ou de [SVHJ11] e [ALR10], que usa diversas antenas, a técnica desenvolvida independe de um ambiente preparado, além disso, utiliza um leitor RFID comercial e apenas uma antena.

Embora a técnica de localização desenvolvida nesse trabalho seja baseada no efeito Doppler, ela diferente de outras técnicas de localização que utilizam o mesmo princípio — como em [YLL11] e [KLK07] — por não utilizar modelos estatísticos para modelar o problema de localização, mas sim um modelo analítico e, dessa forma, fornecer a localização com maior agilidade e com precisão igual ou superior às técnicas de localização baseadas na PDoA, ou no efeito Doppler.

5. MODELO DOPPLER

Neste capítulo é apresentado o modelo analítico utilizado neste trabalho. Inicialmente, são mostrados os detalhes de como a frequência Doppler é estimada pelo leitor. Em seguida, é apresentada a análise da influência da velocidade e da posição espacial do transmissor e do receptor no efeito Doppler. Por fim, é mostrado como são obtidas as coordenadas espaciais individuais da localização da antena do leitor ou da etiqueta a partir da análise do efeito Doppler.

5.1 Determinação da frequência Doppler estimada

Como o modelo se baseia no efeito Doppler, o leitor deve conseguir extrair a informação da frequência Doppler. Entretanto, a maioria dos leitores não consegue obter essa informação diretamente e estimam a frequência Doppler a partir do deslocamento da fase. Os detalhes de como a fase é determinada pelo leitor e de como a frequência Doppler é estimada a partir do deslocamento da fase são apresentados nas Subseções 5.1.1 e 5.1.2, respectivamente.

5.1.1 Determinação da fase

A maioria dos leitores RFID permitem medir tanto a potência quanto a fase do sinal recebido da etiqueta RFID. A tensão complexa demodulada (composta de parte real e parte imaginária), no receptor do leitor em um dado momento pode ser descrita como a soma de três componentes, como é ilustrado na representação fasorial da Figura 5.1 e mostrado na Equação 5.1 [NMR⁺10].

$$V = V_{leakage} + V_{clutter} + V_{tag} \quad (5.1)$$

onde $V_{leakage}$ é a tensão relativa às perdas nos circuitos de transmissão e recepção (incluindo a reflexão devido à impedância não combinada), $V_{clutter}$ é a tensão relativa à desordem estática do ambiente; e V_{tag} é a tensão relativa ao retroespalhamento da etiqueta RFID. A Figura 5.2 ilustra essas componentes e suas origens.

No leitor, os componentes em fase (*In-phase* — I) e em quadratura (*Quadrature* — Q) recebidos e demodulados são compostos de partes em corrente contínua (*Direct Current* — DC) e em corrente alternada (*Alternating Current* — AC), como é mostrado na Equação 5.2 [NMR⁺10].

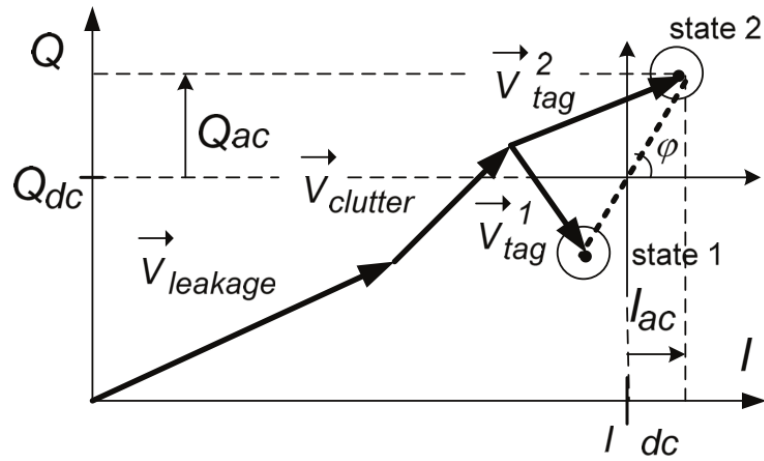


Figura 5.1: Composição da tensão complexa demodulada recebida pelo leitor. Fonte: [NMR⁺10].

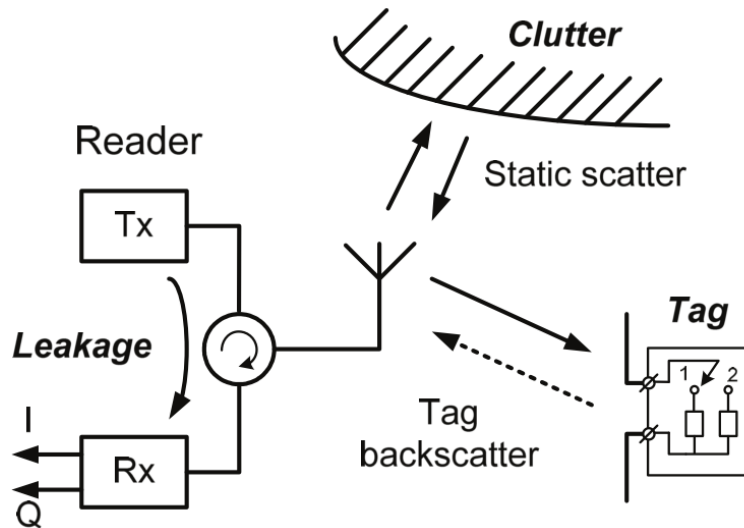


Figura 5.2: Fontes que contribuem para a tensão complexa demodulada. Fonte: [NMR⁺10].

$$\begin{cases} I = I_{dc} + I_{ac}, \\ Q = Q_{dc} + Q_{ac} \end{cases} \quad (5.2)$$

Como pode ser observado na Figura 5.1, a parte DC é composta principalmente pelos componentes $V_{leakage}$ e $V_{clutter}$ (componentes estáticos) e em menor proporção pelo componente V_{tag} (componente modulado). A parte DC precisa ser filtrada já que a informação relevante para cálculo do RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) e da fase está na parte AC [NMR⁺10].

Após a parte DC ser filtrada (a informação relevante para cálculo do RSSI e da fase estão na parte AC) e a partir dos valores de Q e I nos estados 1 e 2 mostrados na Figura 5.1, pode-se medir o RSSI e a fase (φ) do sinal recebido da etiqueta, a partir das

Equações 5.3 e 5.4, respectivamente [NMR+10].

$$RSSI = \frac{1}{2} \frac{|\vec{V}_{tag}^2 - \vec{V}_{tag}^1|^2}{Z_0} = \frac{I_{ac}^2 + Q_{ac}^2}{Z_0} \quad (5.3)$$

$$\varphi = (\vec{V}_{tag}^2 - \vec{V}_{tag}^1) = \arctan \frac{Q_{ac}}{I_{ac}} \quad (5.4)$$

onde Z_0 é a impedância de entrada no receptor do leitor.

Em qualquer meio de propagação, a fase do sinal recebido da etiqueta (Equação 5.4), pode ser decomposta e descrita conforme a Equação 5.5 [NMR+10].

$$\varphi = \varphi_{prop} + \varphi_o + \varphi_{BS} \quad (5.5)$$

onde φ_{prop} é a fase acumulada relativa à propagação da onda eletromagnética, φ_o é o deslocamento da fase que inclui a adicionada pelos cabos e outros componentes da antena e do leitor e φ_{BS} é a fase de retroespalhamento da modulação da etiqueta.

5.1.2 Determinação da frequência Doppler a partir do deslocamento da fase

A frequência Doppler pode ser estimada ao medir a fase obtida em dois momentos distintos, como é ilustrado na figura 5.3.

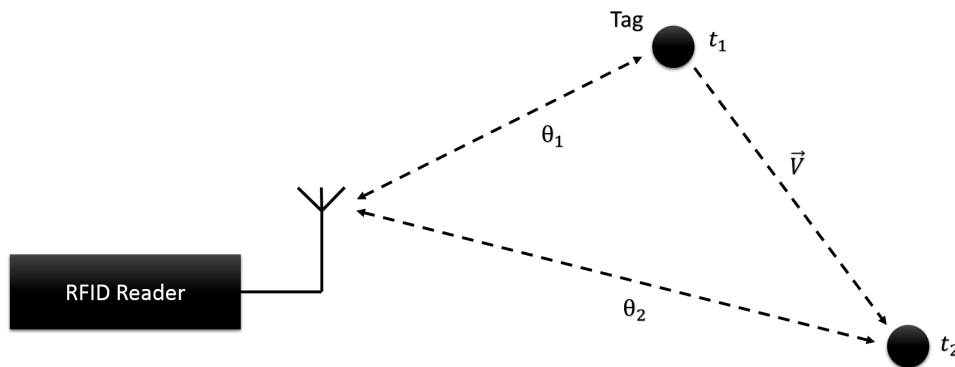


Figura 5.3: Frequência Doppler medida a partir do deslocamento da fase. Fonte: o autor.

Com a informação do deslocamento da fase, causado pelo movimento relativo entre a antena do leitor e a etiqueta, e do tempo decorrido entre esses dois instantes, a frequência Doppler pode ser obtida a partir da Equação 5.6 [Imp13].

$$f_D = \frac{\Delta\theta}{4\pi\Delta T} \quad (5.6)$$

onde $\Delta T = t_2 - t_1$ é o tempo decorrido e $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$ é o deslocamento de fase entre os momentos t_1 e t_2 .

5.2 Influência da velocidade e da posição espacial do transmissor e do receptor no efeito Doppler

Em [ZRK08] e [RZ08] foi analisada a influência da velocidade e da localização espacial do transmissor e do receptor no valor da frequência Doppler a partir da descrição analítica do efeito Doppler, que tem por base a solução das equações de Maxwell (considerando as condições espaciais estacionárias do transmissor e do receptor) [GKZ08]. Na aproximação clássica deste problema, a equação que descreve a intensidade do campo elétrico para uma região campo distante é aplicada para descrever o efeito do movimento da fonte do sinal [GKZ08]. A intensidade do campo elétrico no caso de um dipolo de meio comprimento de onda, como uma antena, é dada pela Equação 5.7 [RZ08].

$$E(t) = if_0\mu_0 \frac{I_0}{\beta r} \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos(\theta)\right)}{\sin(\theta)} e^{i(2\pi f_0 t - \beta r)}, \quad (5.7)$$

onde f_0 é a frequência do sinal, λ é o comprimento de onda, c é a velocidade da luz, μ_0 é a permeabilidade magnética no espaço livre, $\beta = 2\pi/\lambda = 2\pi f_0/c$ é o número da onda, I_0 é a amplitude da corrente na antena e r a distância entre o transmissor e o receptor.

Como consequência, o ângulo da fase $\Phi(t)$ é obtido através da Equação 5.8 [RZ08].

$$\Phi(t) = 2\pi f_0 t - \beta r \quad (5.8)$$

Quando o transmissor se move, ele está cobrindo uma distância Δr , então a fase está mudando devido à mudança no valor de r , conforme a Equação 5.9 [RZ08].

$$\Phi(t) = 2\pi f_0 t - \beta(r \pm \Delta r), \quad (5.9)$$

quando o transmissor do sinal está se afastando do receptor o sinal é positivo (+) e quando o transmissor está se aproximando do receptor o mesmo é negativo (-).

No caso onde a velocidade v é constante, o deslocamento da fonte do sinal equivale a $\Delta r = vt$. Assim o deslocamento da frequência do sinal é descrito pela Equação 5.10 [RZ08].

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \Phi(t) = \frac{d}{dt} \left(f_0 t - \frac{1}{2\pi} \beta r \pm \frac{v}{\lambda} t \right) = f_0 \pm \frac{v}{\lambda} \quad (5.10)$$

Se a fonte do sinal se move em direção ao receptor a um ângulo φ a frequência é dada pela Equação 5.11 [RZ08].

$$f(t) = f_0 \pm \frac{v}{\lambda} \cos(\varphi), \quad (5.11)$$

onde $f_D = v/\lambda \cos(\varphi)$ é chamada frequência Doppler [RZ08].

No caso de espaço livre, as equações de Faraday e de Ampère bem como a propriedade de dupla rotação do campo vetorial são a base para a Equação 5.12 que descreve o vetor de intensidade do campo elétrico [GKZ08].

$$\begin{aligned} E(X, t) &= [E_x(X, t), E_y(X, t), E_z(X, t)], \\ \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} E(X, t) - \Delta E(X, t) &= -\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} i_0(X, t), \end{aligned} \quad (5.12)$$

onde $X = (x, y, z)$ é a coordenada espacial, $i_0(X, t) = (i_x(X, t), i_y(X, t), i_z(X, t))$ é o vetor de densidade de corrente (fonte do campo eletromagnético) e $\Delta = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2 + \partial^2/\partial z^2$ é o Laplaciano.

Considerando que o vetor de densidade da corrente tem a forma mostrada na Equação 5.13 e que o movimento da fonte do sinal na direção da coordenada x , com velocidade v [GKZ08].

$$i_0(X, t) = (0, 0, i_z(X, t)) = i_0(t)l(z) \quad (5.13)$$

O problema é reduzido a resolver a equação diferencial de segunda ordem mostrada na Equação 5.14 [GKZ08].

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} E(X, t) - \Delta E(X, t) = -\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} [i_0(t)l(z)\delta(x - vt)\delta(y)] \quad (5.14)$$

A solução da análise do problema é a convolução da solução fundamental da Equação 5.14 com a função que descreve a distribuição da corrente no espaço [GKZ08].

A forma analítica da fase do campo elétrico gerado pelo movimento do transmissor é dada pela Equação 5.15 [GKZ08].

$$\Phi(X, t) = \omega_1 t - \beta_1 kx - \beta_1 R_0(X, t) - \frac{\pi}{2}, \quad (5.15)$$

onde $R_0(X, t) = \sqrt{(x - vt)^2 + (1 - k^2)(y^2 + z^2)}$, $k = v/c$, $\beta_1 = \omega_1/c = \beta/(1 - k^2)$ e $\omega_1 = \omega_0/(1 - k^2) = 2\pi f_0/(1 - k^2)$.

Portanto, a frequência instantânea é expressa pela Equação 5.16 [RZ08].

$$f(X, t) = \frac{1}{1 - k^2} f_0 + \frac{k}{1 - k^2} \frac{x - vt}{\sqrt{(x - vt)^2 + (1 - k^2)(y^2 + z^2)}} f_0 \quad (5.16)$$

Logo, a frequência Doppler é descrita pela Equação 5.17 [RZ08].

$$f_D(X, t) = f(X, t) - f_0 = \frac{k}{1 - k^2} \left(k + \frac{x - vt}{\sqrt{(x - vt)^2 + (1 - k^2)(y^2 + z^2)}} \right) f_0 \quad (5.17)$$

Como pode ser observado a partir da Equação 5.17, o valor da frequência Doppler ($f_D(X, t)$) não depende apenas da velocidade e da frequência do transmissor, mas também da localização no espaço mútuo do transmissor e do receptor do sinal [GKZ08].

5.3 Determinação da localização espacial a partir da frequência Doppler

Em [GKZ08] é apresentada uma técnica de localização outdoor, cujo objetivo é determinar a posição de torres de comunicação militares, baseada na Equação 5.17 e na percepção de que a frequência Doppler depende também da localização no espaço mútuo do transmissor e do receptor sinal.

Assumindo como constante uma das coordenadas y ou z do transmissor conhecida e que a velocidade de deslocamento deste é constante. Reescrevendo a Equação 5.17 em função das coordenadas individuais x , y e z para dois momentos t_1 e t_2 , as coordenadas individuais x , y e z da localização do receptor podem ser obtidas a partir da Equação 5.18 [GKZ08].

$$\begin{cases} x = v \frac{t_1 A(t_1) - t_2 A(t_2)}{A(t_1) - A(t_2)} \\ y = \pm \sqrt{\frac{\left[\frac{v(t_1 - t_2) A(t_1) A(t_2)}{A(t_1) - A(t_2)} \right]^2}{1 - k^2} - z^2} \\ z = \pm \sqrt{\frac{\left[\frac{v(t_1 - t_2) A(t_1) A(t_2)}{A(t_1) - A(t_2)} \right]^2}{1 - k^2} - y^2}, \end{cases} \quad (5.18)$$

onde $A(t) = \sqrt{1 - F^2(t)}/F(t)$ e $F(t) = (f_D(t)/f_0) ((1 - k^2)/k) - k$.

6. VALIDAÇÃO DO MODELO

Neste capítulo, o ambiente de testes e as especificidades da aplicação do modelo Doppler ao contexto da localização indoor RFID são apresentados. Além disso, são apresentados os cenários e suas respectivas configurações, elaborados para a validação do modelo.

6.1 Ambiente de testes

Nos testes, foram utilizados o Leitor RFID *Speedway Revolution R420* (Figura 6.1a) e a antena RFID *Threshold* (Figura 6.1b) ambos da *Impinj*. Para que o leitor conseguisse reportar a frequência Doppler, foi necessário atualizar o seu *firmware* para a versão (4.4.10). A antena é do tipo campo distante e opera na faixa de frequência entre 902 e 928 MHz, além disso, ela consegue entregar uma potência máxima de 30 dBm e fornecer um ganho máximo de 5 dBi. A conexão entre o leitor e a antena foi feita através de um cabo coaxial de 3,05 m com conectores BNC (*Bayonet Neil Concelman*) nos seus extremos.



(a) Leitor RFID.



(b) Antena.

Figura 6.1: Leitor RFID e antena utilizados nos testes. Fonte: o autor.

Também foi utilizada a etiqueta RFID, exibida na Figura 6.2, do tipo *Wet Inlay* (no formato de uma etiqueta impressa) da Rafsec, compatível com o padrão EPC C1G2 (*Electronic Product Code Class 1 Gen 2*) e opera na faixa de frequência entre 860 e 960 MHz. Ela possui uma memória de 96 bits e uma sensibilidade mínima de leitura de 1,75 V/m.

Para realização dos experimentos foram elaborados dois diferentes cenários. No cenário 1, a antena do leitor permaneceu em repouso enquanto o movimento foi realizado pela etiqueta. Já no cenário 2, ocorreu o inverso, a etiqueta permaneceu em repouso e o movimento foi realizado pela antena do leitor.



Figura 6.2: Etiqueta RFID utilizada nos testes. Fonte: o autor.

Para o cenário 1 a antena do leitor atuou como transmissor e a etiqueta como receptor, enquanto para o cenário 2 a antena do leitor atuou como receptor e a etiqueta como transmissor. Isso é possível devido à capacidade de transmissão e recepção existentes ambos.

Em ambos os cenários foi avaliada a relevância da distância entre a antena do leitor e a etiqueta, eixo z , no erro de localização de cada eixo.

O movimento da etiqueta ou da antena, conforme o cenário, foi realizado sobre uma esteira (Figura 6.3), que possui 3,90 m de comprimento e sua base está à 0,8 m em relação ao chão da sala. A esteira foi utilizada em duas configurações diferentes: ligada na velocidade máxima e desligada. A esteira desligada foi utilizada como pista para o deslocamento do carrinho de controle remoto com uma etiqueta fixada ao mesmo, enquanto a esteira ligada foi utilizada para o deslocamento da antena.



Figura 6.3: Esteira por onde ocorreu o movimento da etiqueta e da antena. Fonte: o autor.

Para determinação da posição da antena ou da etiqueta, conforme o cenário, foi utilizada a Equação 5.18, utilizando como parâmetros as informações de frequência de origem (f_0) e frequência Doppler (f_D), coletadas pelo leitor RFID em dois momentos distintos. Também são utilizados como parâmetros a velocidade do receptor e uma coordenada espacial conhecida (y ou z) do transmissor.

Como um dos requisitos do modelo utilizado é que a velocidade relativa entre a antena e a etiqueta seja constante, desta forma, a equação da velocidade média não poderia ser utilizada devido aos momentos de aceleração e desaceleração da etiqueta ou da antena, conforme o caso, que distorceriam o valor medido. Para tentar solucionar esse problema e determinar a velocidade precisamente, foi utilizada a mesma técnica utilizada nos radares de trânsito, que determinam a velocidade a partir da frequência Doppler, como é mostrado na Equação 6.1 [Saw13].

$$v = c \left(\frac{f_s}{f_o} + 1 \right) \quad (6.1)$$

onde c é a velocidade da luz, f_s é a frequência de origem e f_o é a frequência observada ($f_o = f_s + f_D$, onde f_D é a frequência Doppler).

Entretanto, essa técnica está sujeita ao efeito do cosseno, onde a velocidade medida está diretamente relacionada com o ângulo entre o transmissor e o vetor velocidade do deslocamento do receptor. Por exemplo, um ângulo de 60° entre o transmissor e o vetor velocidade do receptor, resulta em um erro de 50% no valor da velocidade medida [Saw13].

O modelo também expõe a necessidade de que uma das coordenadas espaciais do objeto alvo (etiqueta ou antena, conforme o cenário) seja conhecida. Em função disso, para obter a coordenada y a coordenada z foi utilizada como constante. Em outra rodada de testes, para obter a coordenada z a coordenada y foi utilizada como constante.

Conforme a regulamentação da Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), os equipamentos RFID UHF não podem permanecer em uma mesma frequência por mais de 0,4 segundos em um intervalo de 10 segundos. De modo a atender a essa restrição, os leitores RFID ficam saltando entre os canais de 250 KHz. Isso impossibilita o teste a uma frequência fixa e limita o número de leituras em uma mesma frequência [DHFC13].

Para tentar atenuar os efeitos desse problema, reduzindo a variabilidade de canais, a região de operação do leitor foi alterada para a faixa de frequência de 923 a 925 MHz (que fica na faixa de frequência homologada no Brasil).

O leitor RFID utilizado estima a frequência Doppler da forma mostrada na Subseção 5.1.2, porém ele calcula a frequência Doppler ao longo da duração de um único pacote e não a partir de dois pacotes distintos. Essa característica evita diversos problemas que seriam intrínsecos à utilização de dois pacotes distintos, como o protocolo estocástico de inventário e o salto de canal. O tempo de duração de um único pacote limita o intervalo da frequência Doppler que pode ser estimada [Imp13]. As limitações do leitor RFID relativas à capacidade de estimar a fase e a frequência Doppler são mostradas nas Figuras A.1 e A.2 do anexo A, respectivamente.

Em cada cenário foram realizadas 15 capturas no ambiente de testes. Os detalhes do cenário 1 e 2, bem como as suas respectivas configurações são mostradas nas Subseções 6.1.1 e 6.1.2, respectivamente.

6.1.1 Cenário 1: localização da antena

Nesse cenário a etiqueta RFID foi presa a um carrinho de controle remoto, Figura 6.4, e esse posicionado sobre a esteira desligada.



Figura 6.4: Carrinho de controle remoto com a etiqueta RFID fixada. Fonte: o autor.

A etiqueta estava situada a uma altura de 0,95 m ($y=0,95$) em relação ao piso ($y=0$). Nos testes, o carrinho se movimenta sobre a esteira desligada em um percurso de 3,48 m (intervalo entre $x=0$ e $x=3,48$) e ao fim do percurso foi adicionado um obstáculo com a finalidade de parar o carrinho. Nas Figuras 6.5 e 6.6 é ilustrada a configuração do ambiente sobre uma perspectiva superior e frontal, respectivamente.

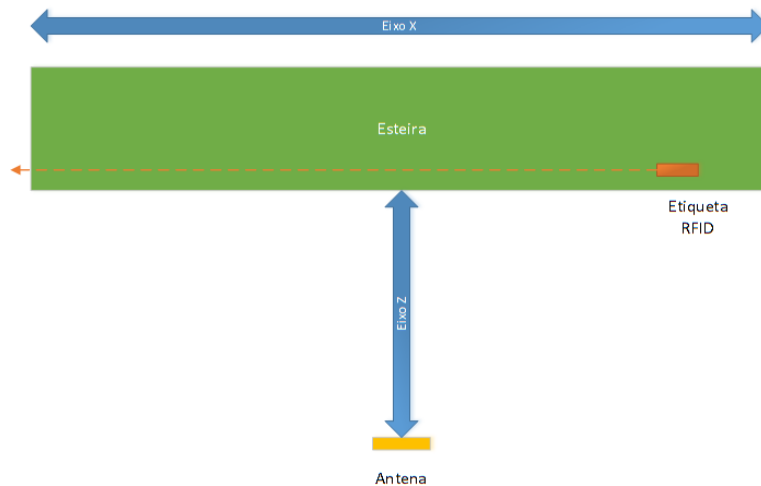


Figura 6.5: Configuração do cenário 1 sobre uma perspectiva superior. Fonte: o autor.

Para avaliar a influência da distância entre a antena do leitor e a etiqueta no erro de localização de cada eixo, foram elaborados três subcenários com diferentes distâncias entre a antena do leitor e a etiqueta. Nos subcenários, a distância entre a antena e a etiqueta foi definida em 0,5 m, 1 m e 1,5 m para os subcenários 1, 2 e 3, respectivamente. A posição real da antena do leitor para os subcenários em que $z=0,5$ m, $z=1$ m e $z=1,5$ m são respectivamente $(x_0, y_0, z_0)=(1,74 \text{ m}, -0,03 \text{ m}, 0,5 \text{ m})$, $(x_0, y_0, z_0)=(1,74 \text{ m}, -0,03 \text{ m}, 1 \text{ m})$ e $(x_0, y_0, z_0)=(1,74 \text{ m}, 0,03 \text{ m}, 1,5 \text{ m})$.



Figura 6.6: Configuração do cenário 1 sobre uma perspectiva frontal. Fonte: o autor.

6.1.2 Cenário 2: Localização da Etiqueta RFID

No cenário 2, a etiqueta foi presa a uma caixa e essa colocada sobre uma mesa. A antena também foi presa a uma caixa, porém posicionada sobre a esteira em movimento. A altura entre o piso ($y=0$) e a etiqueta é 0,97 m (eixo y), enquanto entre o piso e o centro da antena é 1,03 m. Nas Figuras 6.7 e 6.8 são ilustradas a configuração do ambiente sobre uma perspectiva superior e frontal, respectivamente.

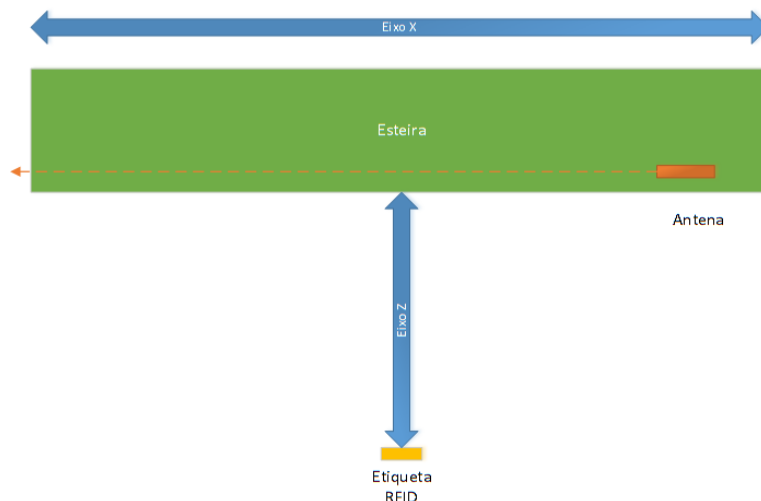


Figura 6.7: Configuração do cenário 2 sobre uma perspectiva superior. Fonte: o autor.

Diferente do cenário 1, nesse cenário o movimento foi realizado pela antena do leitor ao invés da etiqueta. Para realização dos testes foi necessário reduzir o percurso percorrido sobre a esteira pela antena do leitor, devido à limitação do tamanho do cabo. Desta forma, o percurso de 3,48 m foi reduzido em 0,3 m no início e no fim dele, tendo no total 2,88 m. A etiqueta foi posicionada ao centro do percurso, na posição 1,44 m.

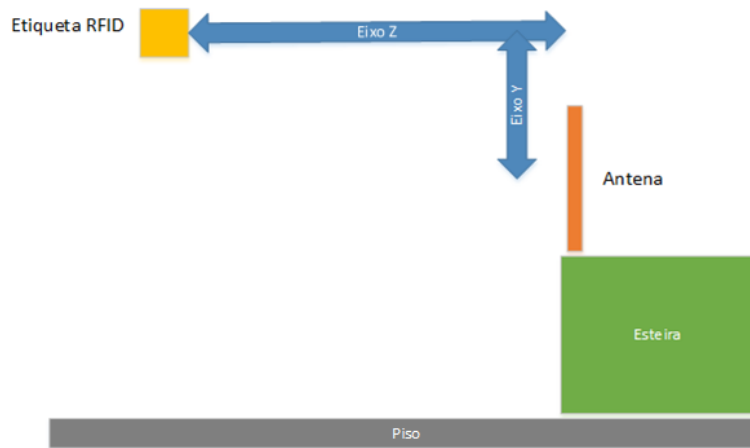


Figura 6.8: Configuração do cenário 2 sobre uma perspectiva frontal. Fonte: o autor.

Assim como no cenário 1, para avaliar a influência da distância entre a antena e a etiqueta no erro de localização de cada eixo, foram elaborados três subcenários com diferentes distâncias entre a antena do leitor e a etiqueta. Nos subcenários, a distância entre a antena e a etiqueta foi definida em 0,5 m, 1 m e 1,5 m para os subcenários 1, 2 e 3, respectivamente. A posição real da etiqueta para os subcenários em que $z=0,5$ m, $z=1$ m e $z=1,5$ m são respectivamente $(x_0, y_0, z_0)=(1,44$ m, 0,06 m, 0,5 m), $(x_0, y_0, z_0)=(1,44$ m, 0,06 m, 1 m) e $(x_0, y_0, z_0)=(1,44$ m, 0,06 m, 1,5 m).

7. RESULTADOS

Nesse capítulo são apresentados os resultados da aplicação do modelo Doppler para determinação da localização espacial do objeto que está em repouso. Para o cenário 1, como foi observado na Subseção 6.1.1, o objeto em repouso é a antena do leitor. Por outro lado, para o cenário 2, como foi mostrado na Subseção 6.1.2, o objeto em repouso é a etiqueta. Os resultados obtidos no cenário 1 e 2 são apresentados na Subseção 7.1 e 7.2, respectivamente. Ao fim do capítulo, na Subseção 7.3, é realizada a discussão dos resultados obtidos em ambos os cenários.

7.1 Cenário 1

Nessa seção são apresentados os resultados dos testes realizados no cenário 1 e seus respectivos subcenários, variando a distância entre a antena do leitor e a etiqueta (eixo z): subcenário 1, onde $z=0,5$ m; subcenário 2, onde $z=1$ m e subcenário 3, onde $z=1,5$ m. Os resultados de cada subcenário são apresentados individualmente na Subseção 7.1.1, 7.1.2 e 7.1.3, respectivamente. Por fim, na Subseção 7.1.4 é realizada a discussão dos resultados obtidos em todos os subcenários do cenário 1.

7.1.1 Subcenário 1: $z=0,5$ m

Na Figura 7.1 são mostrados os gráficos de dispersão da frequência Doppler em relação ao tempo de duas das cinco amostras capturadas durante os testes utilizando $z=0,5$ m. As amostras são muito semelhantes e ambos os gráficos apresentam uma variação significativa da frequência Doppler, que variou de -10 até 7 Hz.

Os instantes de aceleração e desaceleração, assim como o instante onde a velocidade é constante podem ser facilmente identificados. Para a primeira amostra (Figura 7.1a), a etiqueta está em repouso entre os instantes 0 s e 3,789 s, assim como, entre 5,857 s e 12 s. A aceleração ocorre entre os instantes 3,789 s e 4,42 s, enquanto a desaceleração ocorre entre os instantes 5,65 s e 5,857 s. O movimento com velocidade constante ocorre entre os instantes 4,42 s e 5,65 s. A desaceleração ocorre mais rapidamente devido à colisão do carrinho contra um obstáculo colocado no fim do percurso.

Já para a segunda amostra (Figura 7.1b), a etiqueta está em repouso entre os instantes 0 s e 2,246 s, bem como, entre 4,504 s e 12 s. A aceleração ocorre entre os instantes 2,246 s e 3,052 s, enquanto a desaceleração ocorre entre os instantes 4,1 s e 4,504 s. O movimento com velocidade constante ocorre entre os instantes 3,052 s e 4,1 s.

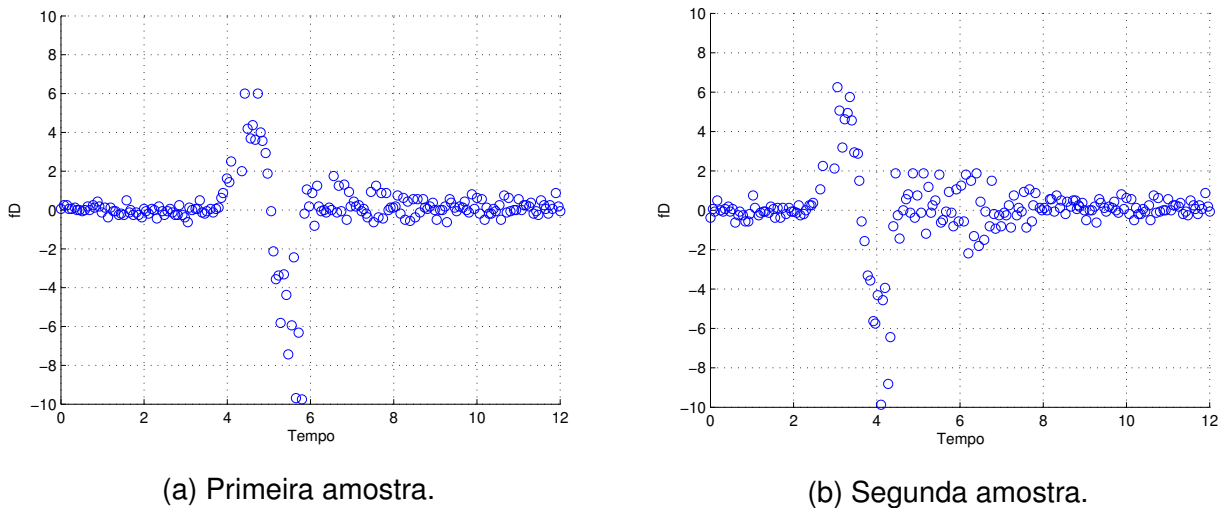


Figura 7.1: Gráficos de dispersão de duas amostras do subcenário 1. Fonte: o autor.

A Figura 7.2 mostra os gráficos de dispersão obtidos a partir da decomposição da primeira amostra em 4 diferentes frequências de origem (f_0): 923,25 MHz (Figura 7.2a), 923,75 MHz (Figura 7.2b), 924,25 MHz (Figura 7.2c) e 924,75 MHz (Figura 7.2d) que a compõem. Como foi explicado na Subseção 6.1, esses saltos ocorrem conforme o previsto na regulamentação da Anatel.

Como pode ser observado, a distribuição das leituras ocorre uniformemente em relação ao tempo. É possível observar também uma disparidade na simetria entre valores positivos e negativos da frequência Doppler, mais evidentes nas frequências de 924,25 MHz e 924,75 MHz.

A Tabela 7.1 apresenta os resultados obtidos a partir da aplicação do modelo Doppler para obter localização estimada, sendo que essa é calculada a partir da média absoluta dos resultados de cada eixo, assim como, a velocidade estimada, obtida com base da equação 6.1.

Tabela 7.1: Resultados obtidos no subcenário 1.

Velocidade estimada (m/s)	Localização real (m)			Localização estimada (m)		
	x	y	z	x	y	z
1,948	1,74	0,03	0,5	1,725	0,054	0,433

O erro absoluto de localização de cada eixo é mostrado na Tabela 7.2. O eixo x obteve o menor erro 0,015 m; seguido do eixo y, que obteve um erro de 0,024 m e por fim, o eixo z que teve o pior erro (0,067 m), mas que mesmo assim ainda ficou na escala centímetros.

O histograma dos eixos x (Figura 7.3a), y (Figura 7.3b) e z (Figura 7.3c) mostram uma tendência de os valores de cada coordenada convergirem para o resultado correto.

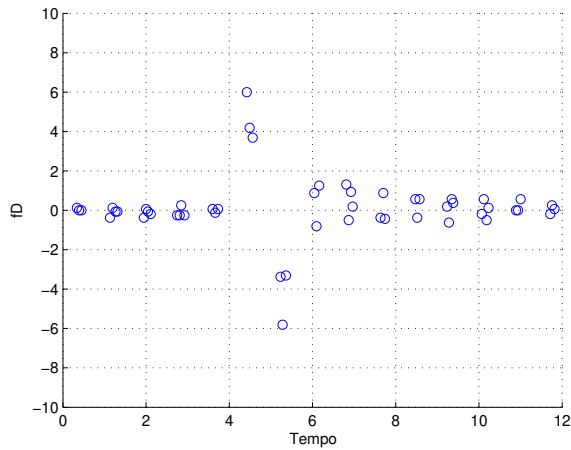
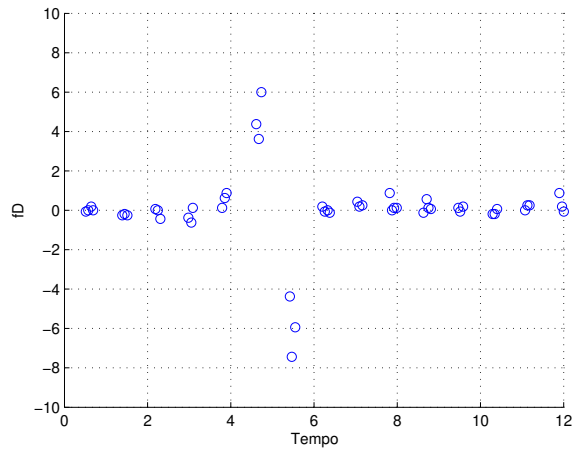
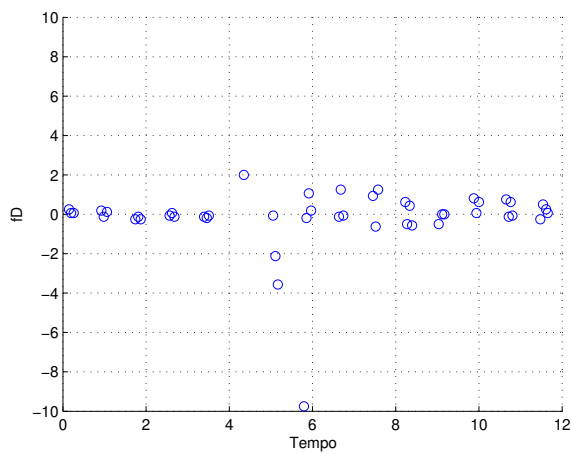
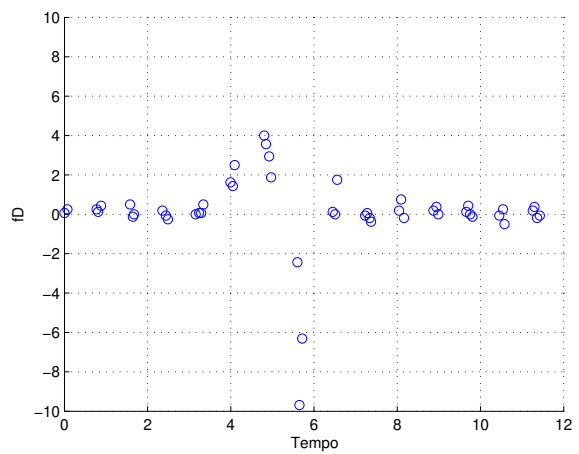
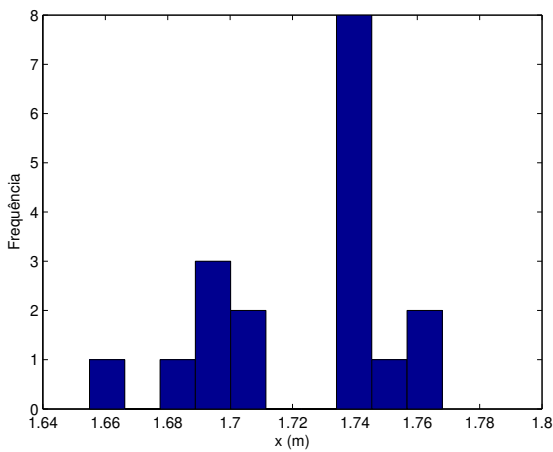
(a) $f_0=923,25$ MHz.(b) $f_0=923,75$ MHz.(c) $f_0=924,25$ MHz.(d) $f_0=924,75$ MHz.

Figura 7.2: Gráficos de dispersão obtidos a partir da decomposição da primeira amostra (Figura 7.1a) do subcenário 1 nas 4 diferentes frequências de origem (f_0) que a compõem. Fonte: o autor.

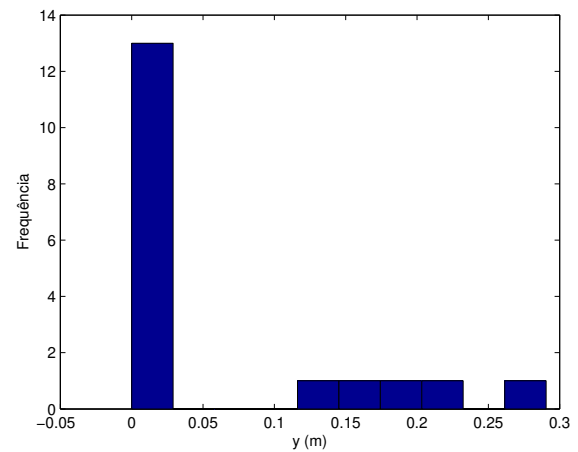
O histograma deixa claro também as distribuições que impactaram no aumento do erro médio absoluto, principalmente para a coordenada z, onde as frequências ficaram mais distribuídas e não apresentou uma convergência absoluta para o resultado.

Tabela 7.2: Erro absoluto, por eixo, dos resultados obtidos no subcenário 1.

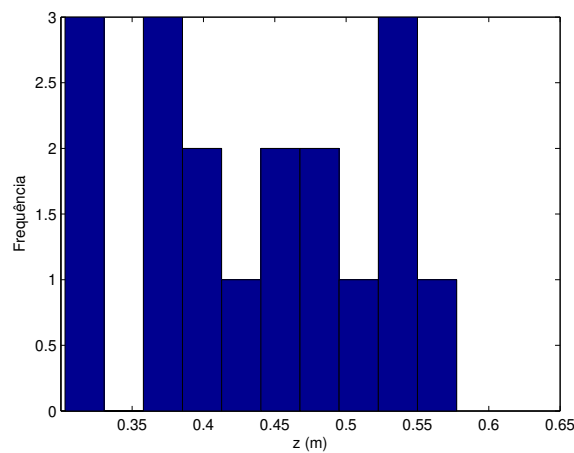
Erro absoluto (m)		
x	y	z
0,015	0.024	0.067



(a) Histograma da coordenada x



(b) Histograma da coordenada y



(c) Histograma da coordenada z

Figura 7.3: Histogramas com as distribuições para os eixos x, y e z dos resultados obtidos no subcenário 1. Fonte: o autor.

7.1.2 Subcenário 2: $z=1$ m

Assim como no subcenário 1, a Figura 7.4 apresenta os gráficos de dispersão da frequência Doppler em relação ao tempo de duas das cinco amostras capturadas durante os testes, onde $z=1$ m. Semelhante ao que ocorreu no subcenário 1, o comportamento do gráfico de ambas as amostras é muito parecido, entretanto a variação da frequência Doppler foi menos significativa nesse cenário, variando de -7 até 6 Hz.

Na primeira amostra (Figura 7.4a), a etiqueta está em repouso entre os instantes 0 s e 5,270 s, assim como, entre 7,671 s e 12 s. A aceleração ocorre entre os instantes 5,270 s e 6,205 s, enquanto a desaceleração ocorre entre os instantes 7,475 s e 7,671 s. O movimento com velocidade constante ocorre entre os instantes 6,205 s e 7,475 s.

Enquanto para a segunda amostra (Figura 7.4b), a etiqueta está em repouso entre os instantes 0 s e 3,077 s, bem como, entre 5,233 s e 12 s. A aceleração ocorre entre os instantes 3,077 s e 3,703 s, enquanto a desaceleração ocorre entre os instantes 5,002 s e 5,233 s. O movimento com velocidade constante ocorre entre os instantes 3,703 s e 5,002 s.

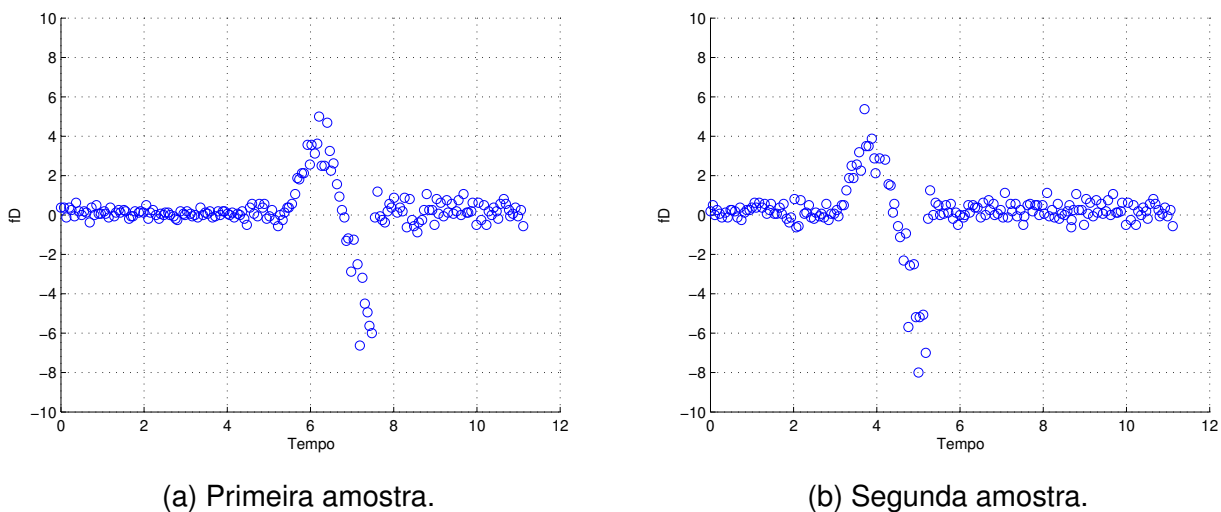


Figura 7.4: Gráficos de dispersão de duas amostras do subcenário 2. Fonte: o autor.

A primeira amostra do subcenário 2 (Figura 7.4a) também foi decomposta nas 4 diferentes frequências de origem (f_0) que a compõem: 923,25 MHz (Figura 7.5a), 923,75 MHz (Figura 7.5b), 924,25 MHz (Figura 7.5c) e 924,75 MHz (Figura 7.5d).

A uniformidade na distribuição das leituras com relação ao tempo e a disparidade na simetria entre valores positivos e negativos da frequência Doppler também são observados nesse subcenário. No caso da disparidade na simetria, ela ficou evidente em três das quatro frequências observadas: 923,75 MHz, 924,25 MHz e 924,75 MHz.

A Tabela 7.3 apresenta os resultados obtidos da localização e velocidade estimadas.

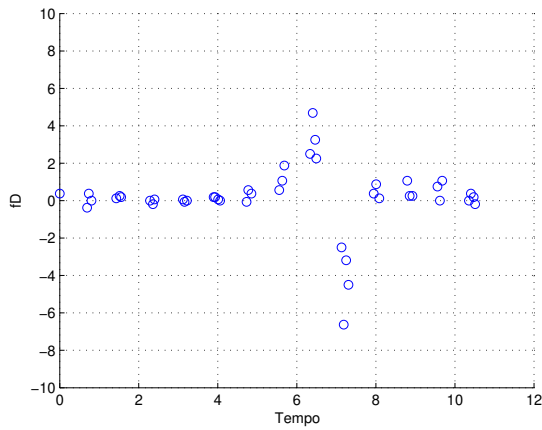
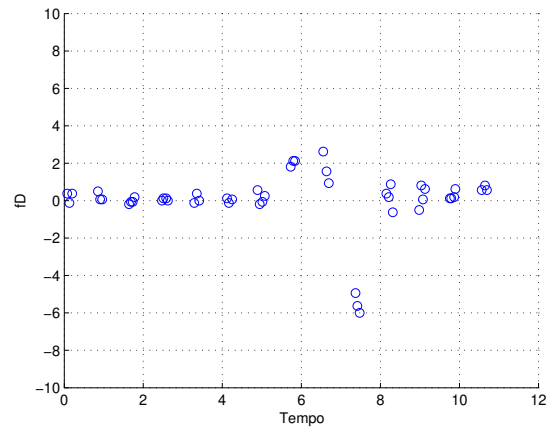
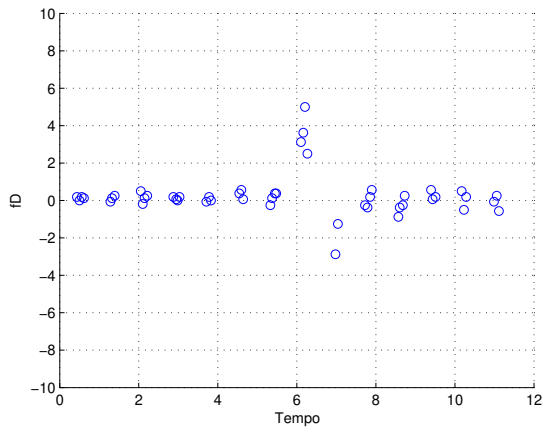
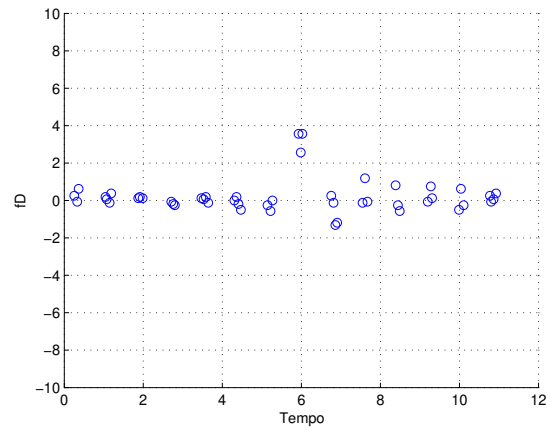
(a) $f_0=923,25$ MHz(b) $f_0=923,75$ MHz(c) $f_0=924,25$ MHz(d) $f_0=924,75$ MHz

Figura 7.5: Gráficos de dispersão obtidos a partir da decomposição da primeira amostra (Figura 7.4a) do subcenário 2 nas 4 diferentes frequências de origem (f_0) que a compõem. Fonte: o autor.

O erro absoluto de localização de cada eixo é mostrado na Tabela 7.4. Novamente, o eixo x obteve o menor erro 0,004 m; seguido do eixo y, que obteve um erro de 0,086 m e por fim, o eixo z teve o pior erro (0,316 m).

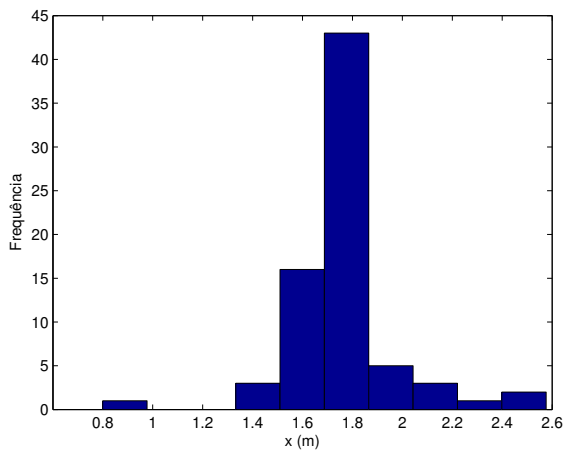
Diferente do subcenário 1, o histograma dos eixos x (Figura 7.6a), y (Figura 7.6b) e z (Figura 7.6c) mostram uma tendência dos valores de cada coordenada a convergirem para o resultado correto. Embora as distribuições do eixo z tenham convergido para a classe que continha o resultado correto, a alta frequência nas classes adjacentes da distribuição impactaram no valor do erro médio absoluto.

Tabela 7.3: Resultados obtidos no subcenário 2.

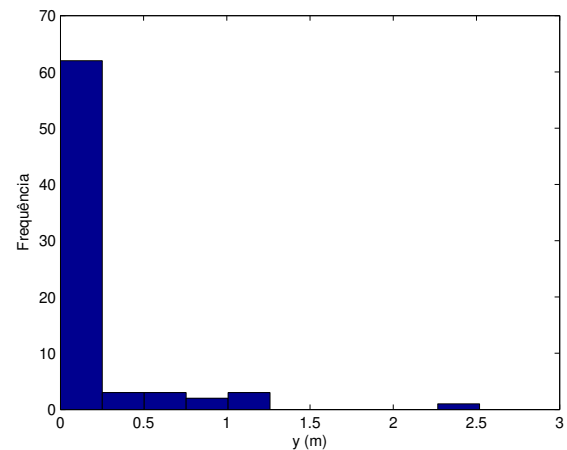
Velocidade estimada (m/s)	Localização real (m)			Localização estimada (m)		
	x	y	z	x	y	z
1,621	1,74	0,03	1	1,744	0,116	0,684

Tabela 7.4: Erro absoluto, por eixo, dos resultados obtidos no subcenário 2.

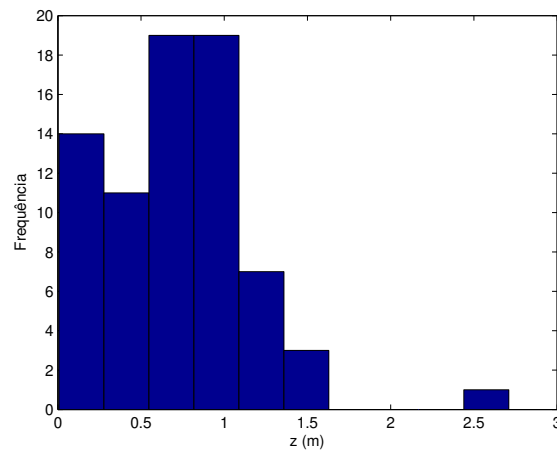
Erro absoluto (m)		
x	y	z
0,004	0,086	0,316



(a) Histograma da coordenada x.



(b) Histograma da coordenada y.



(c) Histograma da coordenada z.

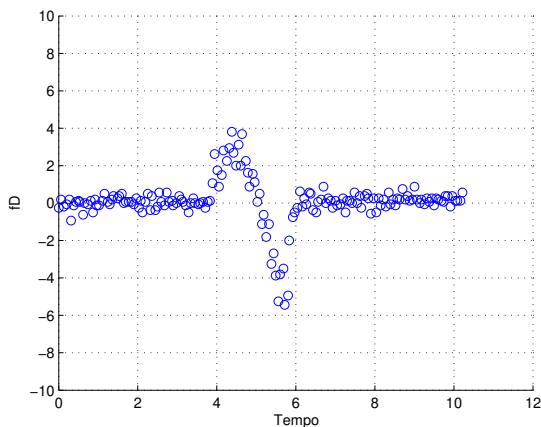
Figura 7.6: Histogramas com as distribuições para os eixos x, y e z dos resultados obtidos no subcenário 2. Fonte: o autor.

7.1.3 Subcenário 3: $z=1,5$ m

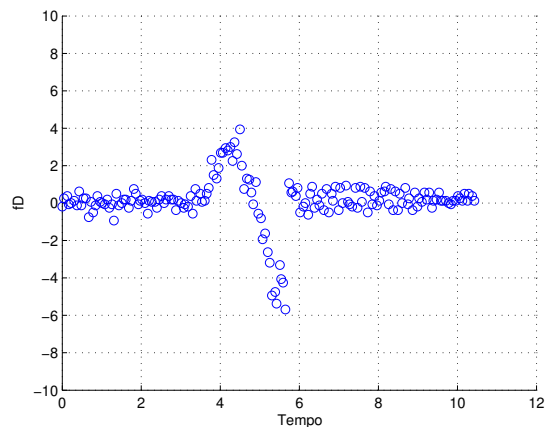
Os gráficos de dispersão da frequência Doppler em relação ao tempo de duas das cinco amostras capturadas durante os testes onde $z=1,5$ m são mostrados na Figura 7.7. Assim como nos subcenários 1 e 2, o comportamento do gráfico de ambas as amostras são muito semelhantes, entretanto a variação da frequência Doppler foi a menor em relação aos outros subcenários, variando de -6 até 4 Hz.

Na primeira amostra (Figura 7.7a), a etiqueta está em repouso entre os instantes 0 s e 3,773 s, assim como, entre 6,038 s e 12 s. A aceleração ocorre entre os instantes 3,773 s e 4,38 s, enquanto a desaceleração ocorre entre os instantes 5,517 s e 6,038 s. O movimento com velocidade constante ocorre entre os instantes 4,38 s e 5,517 s.

Para a segunda amostra (Figura 7.7b), a etiqueta está em repouso entre os instantes 0 s e 3,607 s, bem como, entre 5,646 s e 12 s. A aceleração ocorre entre os instantes 3,607 s e 4,359 s, enquanto a desaceleração ocorre entre os instantes 5,646 s e 5,798 s. O movimento com velocidade constante ocorre entre os instantes 4,359 s e 5,646 s.



(a) Primeira amostra.



(b) Segunda amostra.

Figura 7.7: Gráficos de dispersão de duas amostras do subcenário 3. Fonte: o autor.

Assim como nos outros subcenários, a primeira amostra também foi decomposta nas 4 diferentes frequências de origem (f_0) que a compõem: 923,25 MHz (Figura 7.8a), 923,75 MHz (Figura 7.8b), 924,25 MHz (Figura 7.8c) e 924,75 MHz (Figura 7.8d).

Nas frequências de 923,25 MHz, 923,75 MHz e 924,75 MHz fica evidente a disparidade na simetria entre valores positivos e negativos da frequência Doppler. Assim como nos outros subcenários, é possível observar uma uniformidade na distribuição das leituras com relação ao tempo.

A Tabela 7.5 apresenta os resultados obtidos da localização e velocidade estimadas.

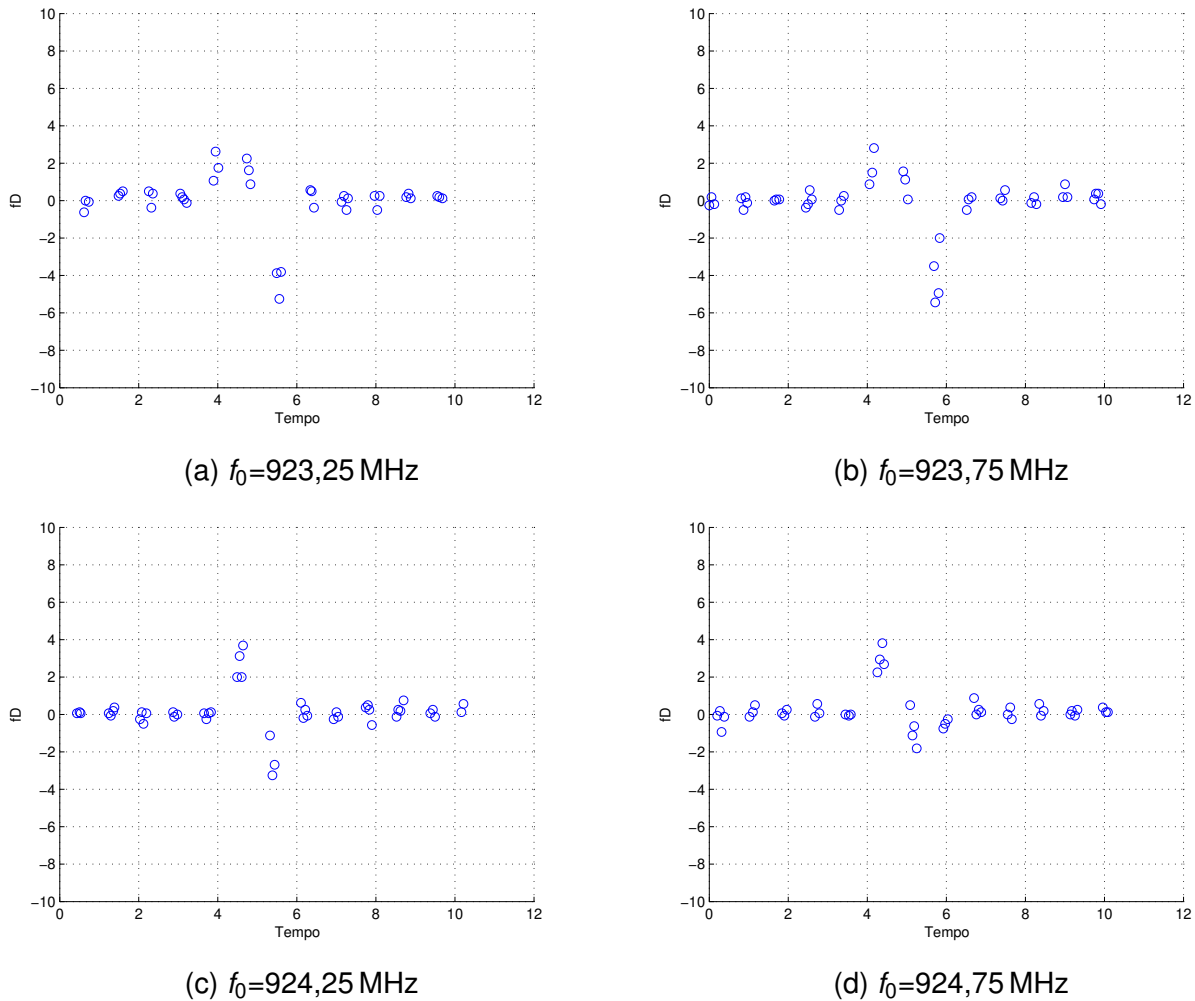


Figura 7.8: Gráficos de dispersão obtidos a partir da decomposição da primeira amostra (Figura 7.7a) do subcenário 3 nas 4 diferentes frequências de origem (f_0) que a compõem. Fonte: o autor.

O erro absoluto de localização é mostrado na Tabela 7.6. Nesse subcenário, o erro nos eixos x e y aumentou expressivamente em relação ao erro obtido nos outros subcenários, onde o eixo x obteve um erro de 0,054 m e o eixo y um erro de 0,261 m. Por outro lado, o eixo z apresentou um menor aumento no erro em relação ao subcenário 2.

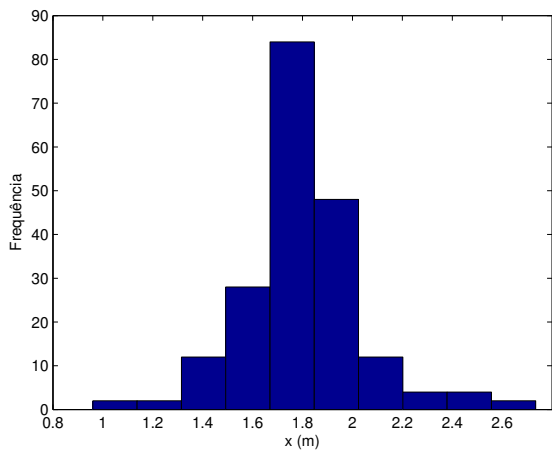
Os histogramas dos eixos x (Figura 7.9a) e y (figura 7.9b) mostram uma tendência de os valores de cada coordenada a convergirem para o resultado correto, entretanto no eixo y, a alta frequência nas classes adjacentes da distribuição impactaram no valor do erro médio absoluto. No eixo z (figura 7.9c) não ocorreu uma convergência para o resultado correto, mas sim para um valor próximo.

Tabela 7.5: Resultados obtidos no subcenário 3.

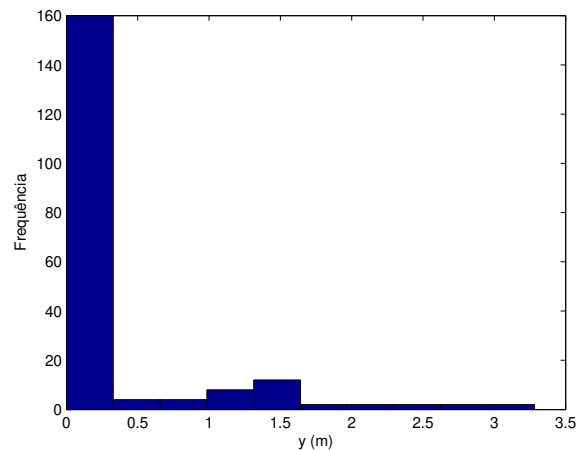
Velocidade estimada (m/s)	Localização real (m)			Localização estimada (m)		
	x	y	z	x	y	z
1.704	1,74	0,03	1,5	1,794	0,291	1,155

Tabela 7.6: Erro absoluto, por eixo, dos resultados obtidos no subcenário 3.

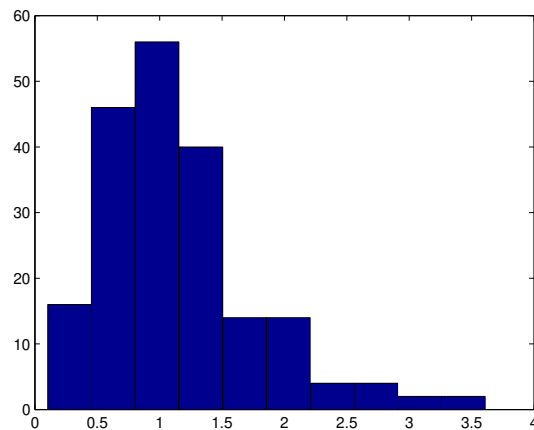
Erro absoluto (m)		
x	y	z
0,054	0,261	0,345



(a) Histograma da coordenada x.



(b) Histograma da coordenada y.



(c) Histograma da coordenada z.

Figura 7.9: Histogramas com as distribuições para as coordenadas x, y e z dos resultados obtidos no subcenário 3. Fonte: o autor.

7.1.4 Análise dos Resultados Obtidos no Cenário 1

A Tabela 7.7 apresenta a sumarização dos resultados obtidos nos subcenários 1, 2 e 3. Embora, tenha sido utilizado o mesmo carrinho de controle remoto, a velocidade estimada sofreu variações de subcenário para subcenário.

Além disso, em todos os subcenários, as amostras analisadas não apresentaram uma simetria entre os valores positivos e negativos da frequência Doppler obtida. Isso indica que ocorreram alterações na velocidade durante o trecho onde a ela deveria ser constante ou pode ter sido reflexo do efeito do cosseno, que afeta o erro no valor da velocidade estimada conforme o ângulo entre a antena e a etiqueta no momento da leitura. Todos esses fatores influenciaram os valores obtidos nos resultados e conseqüentemente a precisão na localização.

Tabela 7.7: Sumarização dos resultados obtidos no cenário 1.

	Velocidade estimada (m/s)	Localização real (m)			Localização estimada (m)		
		x	y	z	x	y	z
Subcenário 1 (z=0,5 m)	1,948	1,74	0,03	0,5	1,725	0,054	0,433
Subcenário 2 (z=1 m)	1,621	1,74	0,03	1	1,744	0,116	0,684
Subcenário 3 (z=1,5 m)	1.704	1,74	0,03	1,5	1,794	0,291	1,155

Mesmo com esses fatores, que reduzem a precisão da localização, a técnica obteve um erro médio de 0,036 m no eixo x, 0,123 m no eixo y e 0,242 m no eixo z, conforme a tabela 7.8, que apresenta os erros sumarizados de todos os eixos nos subcenários 1, 2 e 3, bem como, a média de erro, por eixo, no cenário 1.

Tabela 7.8: Sumarização do erro absoluto, por eixo, dos resultados obtidos no cenário 1.

	Erro absoluto (m)		
	x	y	z
Subcenário 1 (z=0,5 m)	0,015	0,024	0,067
Subcenário 2 (z=1 m)	0,004	0,086	0,316
Subcenário 3 (z=1,5 m)	0,054	0,261	0,345
Média	0,036	0,123	0,242

O gráfico da Figura 7.10 apresenta a variação do erro com a distância para as coordenadas x, y e z. A partir da Figura 7.10 é possível observar que os erros dos eixos y e

z foram os mais impactados com o aumento da distância. O eixo x não foi tão afetado pelo aumento da distância, chegando inclusive a diminuir o erro (no caso do subcenário 2) com o aumento da distância entre a antena e a etiqueta.

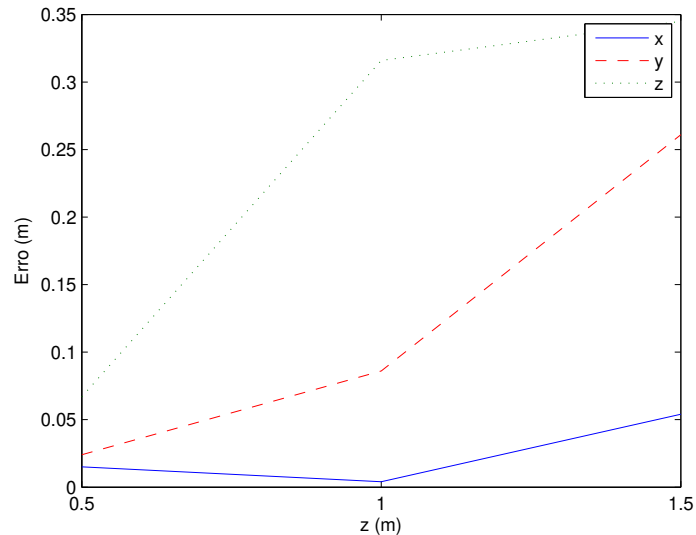


Figura 7.10: Variação do erro observado no cenário 1 em função da distância entre a antena do leitor e a etiqueta. Fonte: o autor.

7.2 Cenário 2

Nessa seção são apresentados os resultados dos testes realizados no cenário 2 e seus respectivos subcenários, variando a distância entre a antena do leitor e a etiqueta (eixo z): subcenário 1, onde $z=0,5$ m; subcenário 2, onde $z=1$ m e subcenário 3, onde $z=1,5$ m. Os resultados de cada subcenário são apresentados individualmente nas Subseções 7.2.1, 7.2.2 e 7.2.3, respectivamente. Por fim, na Subseção 7.2.4 são analisados os resultados de todos os subcenários do cenário 2.

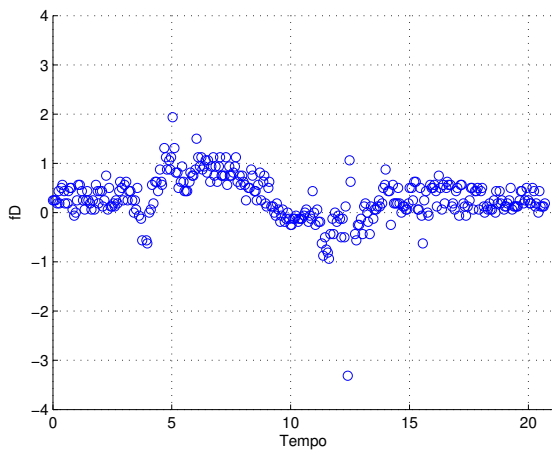
7.2.1 Subcenário 1: $z=0,5$ m

Na Figura 7.11 são mostrados os gráficos de dispersão da frequência Doppler em relação ao tempo de duas das cinco amostras capturadas durante os testes utilizando $z=0,5$ m. As amostras são muito semelhantes e ambos os gráficos apresentam uma variação pequena da frequência Doppler, que variou de -3,5 até 2,25 Hz.

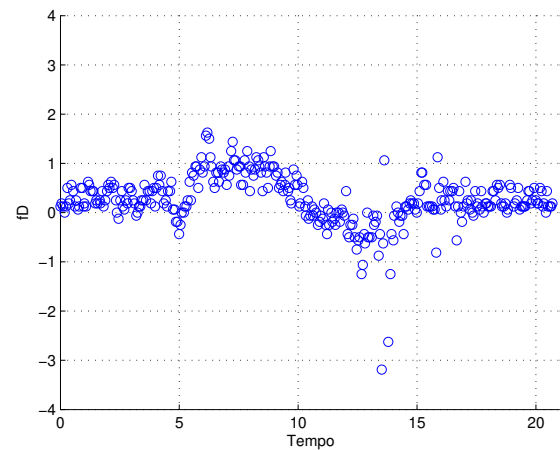
Os instantes de aceleração de desaceleração, assim como o instante onde a velocidade é constante podem ser facilmente identificados. Para a primeira amostra (Figura

7.11a), a etiqueta está em repouso entre os instantes 0 s e 4,052 s, assim como, entre 13,89 s e 20 s. A aceleração ocorre entre os instantes 4,052 s e 4,971 s, enquanto a desaceleração ocorre entre os instantes 12,76 s e 13,89 s. O movimento com velocidade constante ocorre entre os instantes 4,971 s e 12,76 s.

Já para segunda amostra (Figura 7.11b), a etiqueta está em repouso entre os instantes 0 s e 5,194 s, bem como, entre 14,04 s e 20 s. A aceleração ocorre entre os instantes 5,194 s e 5,727 s, enquanto a desaceleração ocorre entre os instantes 13,88 s e 14,04 s. O movimento com velocidade constante ocorre entre os instantes 5,727 s e 13,88 s.



(a) Primeira amostra.



(b) Segunda amostra.

Figura 7.11: Gráficos de dispersão de duas amostras do subcenário 1. Fonte: o autor.

A Figura 7.12 mostra os gráficos de dispersão obtidos a partir da decomposição da primeira amostra nas 4 diferentes frequências de origem (f_0) que a compõem: 923,25 MHz (Figura 7.12a), 923,75 MHz (Figura 7.12b), 924,25 MHz (Figura 7.12c) e 924,75 MHz (Figura 7.12d). Como pode ser observado, a distribuição das leituras com relação ao tempo ocorre uniformemente e com pouca disparidade na simetria entre valores positivos e negativos da frequência Doppler.

A Tabela 7.9 apresenta os resultados obtidos da localização e velocidade estimadas.

Tabela 7.9: Resultados obtidos no subcenário 1.

Velocidade estimada (m/s)	Localização real (m)			Localização estimada (m)		
	x	y	z	x	y	z
0,304	1,44	0,06	0,5	1,407	0,258	0,396

O erro absoluto de localização de cada eixo é mostrado na Tabela 7.10. O eixo x obteve o menor erro 0,033 m; seguido do eixo z, que obteve um erro de 0,104 m e por fim, o eixo y que teve o maior erro (0,198 m).

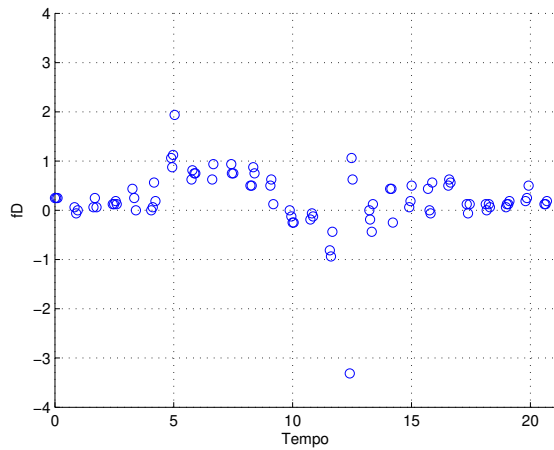
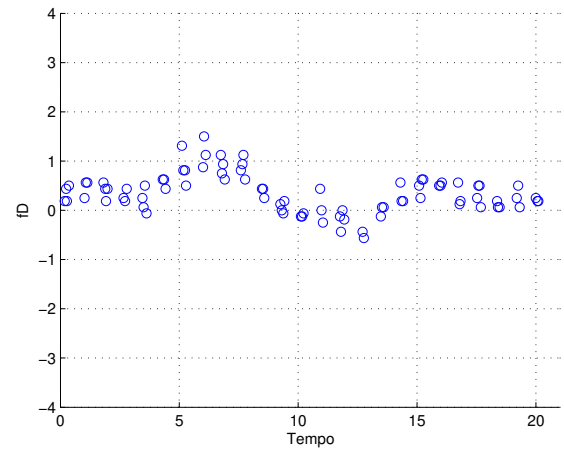
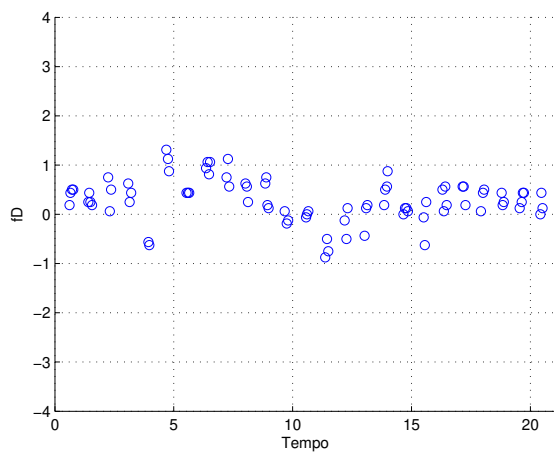
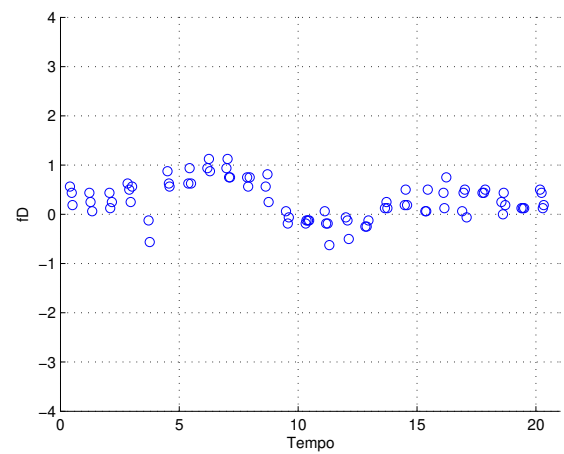
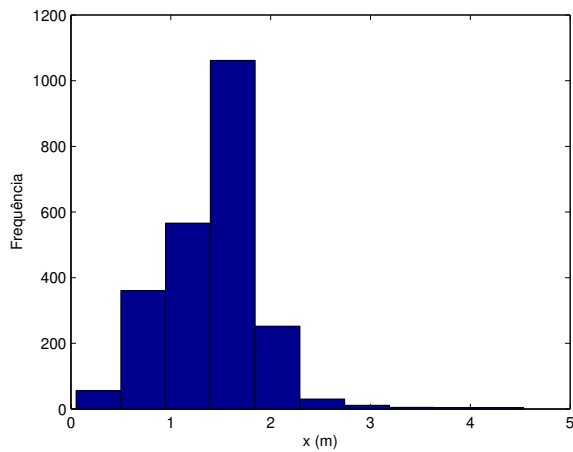
(a) $f_0 = 923,25$ MHz.(b) $f_0 = 923,75$ MHz.(c) $f_0 = 924,25$ MHz.(d) $f_0 = 924,75$ MHz.

Figura 7.12: Gráficos de dispersão obtidos a partir da decomposição da primeira amostra (Figura 7.11a) do subcenário 1 nas 4 diferentes frequências de origem (f_0) que a compõem. Fonte: o autor.

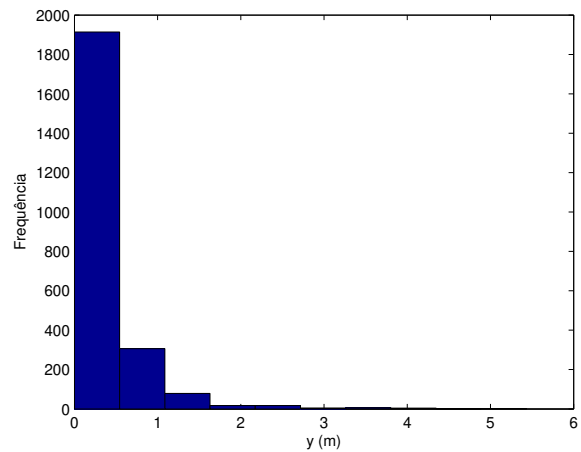
O histograma dos eixos x (Figura 7.13a), y (Figura 7.13b) e z (Figura 7.13c) mostram uma tendência de os valores de cada coordenada convergirem para o resultado correto. O histograma deixa claro também as distribuições que impactaram no aumento do erro médio absoluto.

Tabela 7.10: Erro absoluto, por eixo, dos resultados obtidos no subcenário 1.

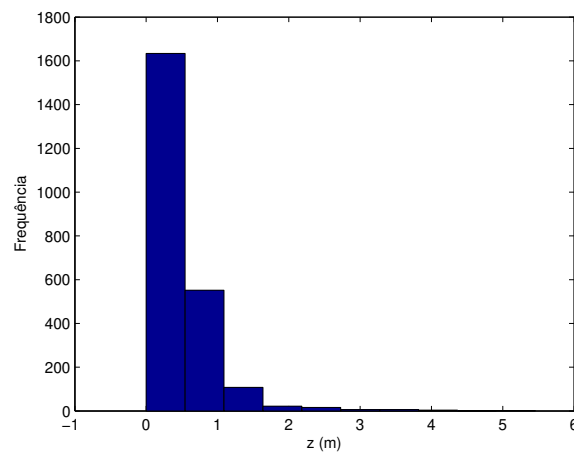
Erro absoluto (m)		
x	y	z
0,033	0,198	0,104



(a) Histograma da coordenada x



(b) Histograma da coordenada y



(c) Histograma da coordenada z

Figura 7.13: Histogramas com as distribuições para os eixos x, y e z dos resultados obtidos no subcenário 1. Fonte: o autor.

7.2.2 Subcenário 2: $z=1$ m

Assim como no subcenário 1, a Figura 7.14 apresenta os gráficos de dispersão da frequência Doppler em relação ao tempo de duas das cinco amostras capturadas durante os testes, onde $z=1$ m. Semelhante ao que ocorreu no subcenário 1, o comportamento do gráfico de ambas as amostras são similares, entretanto a variação da frequência Doppler foi menor nesse cenário, variando de -1,5 até 1,5 Hz.

Na primeira amostra (Figura 7.14a), a etiqueta está em repouso entre os instantes 0 s e 5,270 s, assim como, entre 7,671 s e 12 s. A aceleração ocorre entre os instantes 2,846 s e 4,193 s, enquanto a desaceleração ocorre entre os instantes 14,06 s e 14,62 s. O movimento com velocidade constante ocorre entre os instantes 4,193 s e 14,06 s.

Para a segunda amostra (Figura 7.14b), a etiqueta está em repouso entre os instantes 0 s e 1,820 s, bem como, entre 13,97 s e 20 s. A aceleração ocorre entre os instantes 1,820 s e 2,317 s, enquanto a desaceleração ocorre entre os instantes 13,1 s e 13,97 s. O movimento com velocidade constante ocorre entre os instantes 2,317 s e 13,1 s.

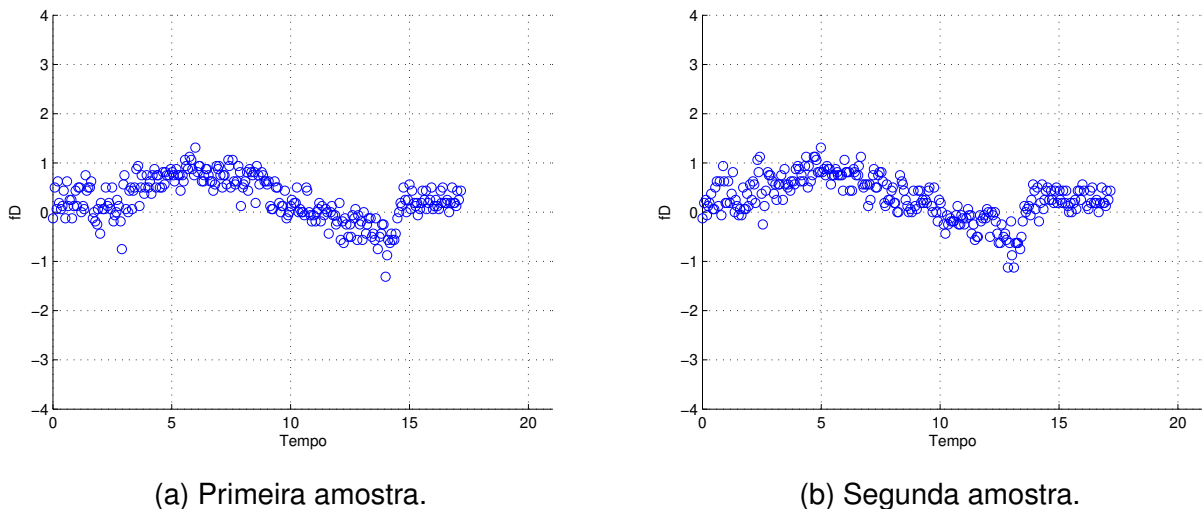


Figura 7.14: Gráficos de dispersão de duas amostras do subcenário 2. Fonte: o autor.

Nesse subcenário, a primeira amostra do subcenário 2 também foi decomposta nas 4 diferentes frequências de origem (f_0) que a compõem: 923,25 MHz (Figura 7.15a), 923,75 MHz (Figura 7.15b), 924,25 MHz (Figura 7.15c) e 924,75 MHz (Figura 7.15d).

A distribuição das leituras em relação ao tempo ocorre uniformemente e a simetria entre valores positivos e negativos da frequência Doppler também é observada nesse subcenário.

A Tabela 7.11 apresenta os resultados obtidos da localização e velocidade estimadas.

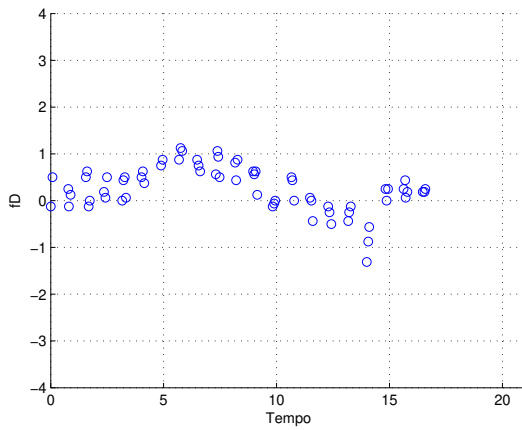
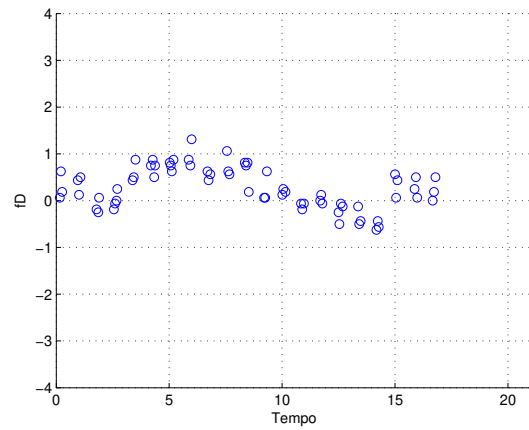
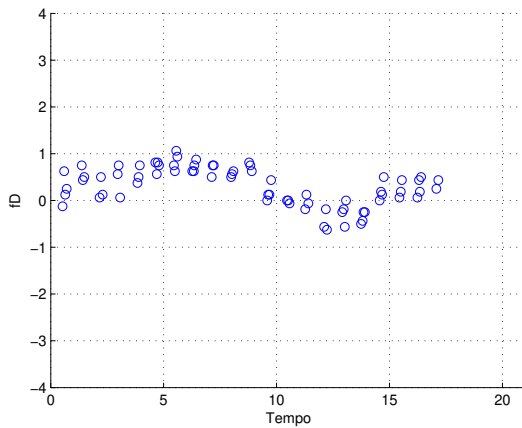
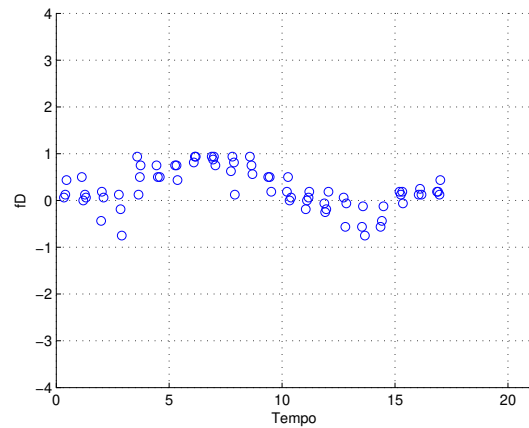
(a) $f_0=923,25$ MHz(b) $f_0=923,75$ MHz(c) $f_0=924,25$ MHz(d) $f_0=924,75$ MHz

Figura 7.15: Gráficos de dispersão obtidos a partir da decomposição da primeira amostra (Figura 7.14a) do subcenário 2 nas 4 diferentes frequências de origem (f_0) que a compõem. Fonte: o autor.

O erro absoluto de localização de cada eixo é mostrado na Tabela 7.12. O eixo z obteve o menor erro 0,132 m; seguido do eixo x, que obteve um erro de 0,161 m e por fim, o eixo y teve o maior erro (0,489 m).

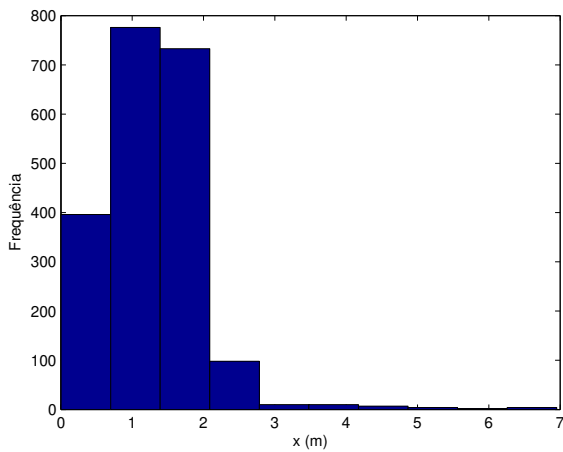
O histograma dos eixos x (Figura 7.16a), y (Figura 7.16b) e z (Figura 7.16c) mostram uma tendência de os valores de cada coordenada convergirem para o resultado correto. Embora as distribuições do eixo y tenham convergido para a classe que continha o resultado correto, a alta frequência nas classes adjacentes da distribuição impactaram no valor do erro médio absoluto.

Tabela 7.11: Resultados obtidos no subcenário 2.

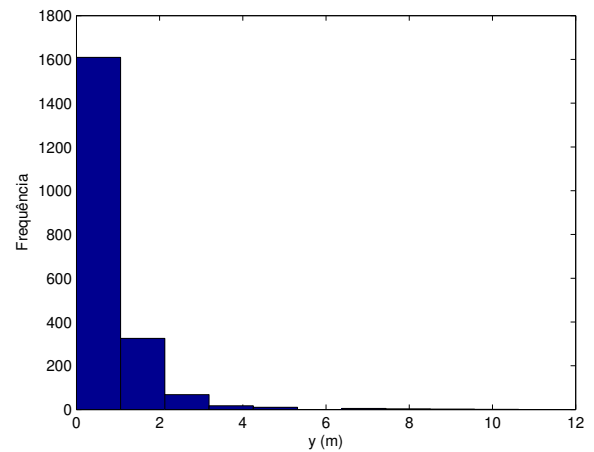
Velocidade estimada (m/s)	Localização real (m)			Localização estimada (m)		
	x	y	z	x	y	z
0,304	1,44	0,06	1	1,279	0,549	0,868

Tabela 7.12: Erro absoluto, por eixo, dos resultados obtidos no subcenário 2.

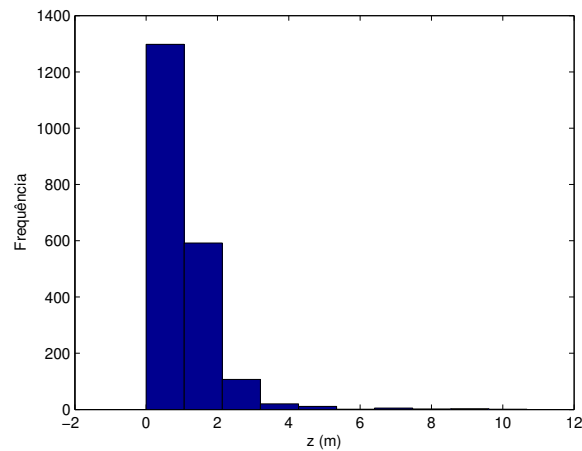
Erro absoluto (m)		
x	y	z
0,161	0,489	0,132



(a) Histograma da coordenada x.



(b) Histograma da coordenada y.



(c) Histograma da coordenada z.

Figura 7.16: Histogramas com as distribuições para os eixos x, y e z dos resultados obtidos no subcenário 2. Fonte: o autor.

7.2.3 Subcenário 3: $z=1,5$ m

Os gráficos de dispersão da frequência Doppler em relação ao tempo, de duas das cinco amostras capturadas durante os testes onde $z=1,5$ m são mostrados na Figura 7.17. Assim como nos subcenários 1 e 2, o comportamento do gráfico de ambas as amostras são muito semelhantes, entretanto a variação da frequência Doppler foi a menos significativa de todos os subcenários, variando de -1 até 1,5 Hz.

Na primeira amostra (Figura 7.17a), a etiqueta está em repouso entre os instantes 0 s e 2,235 s, assim como, entre 14,1 s e 15 s. A aceleração ocorre entre os instantes 2,235 s e 3,384 s, enquanto a desaceleração ocorre entre os instantes 12,88 s e 14,1 s. O movimento com velocidade constante ocorre entre os instantes 3,384 s e 12,88 s.

Para a segunda amostra (Figura 7.17b), a etiqueta está em repouso entre os instantes 0 s e 2,609 s, bem como, entre 12,94 s e 20 s. A aceleração ocorre entre os instantes 2,609 s e 3,818 s, enquanto a desaceleração ocorre entre os instantes 12,2 s e 12,94 s. O movimento com velocidade constante ocorre entre os instantes 3,818 s e 12,2 s.

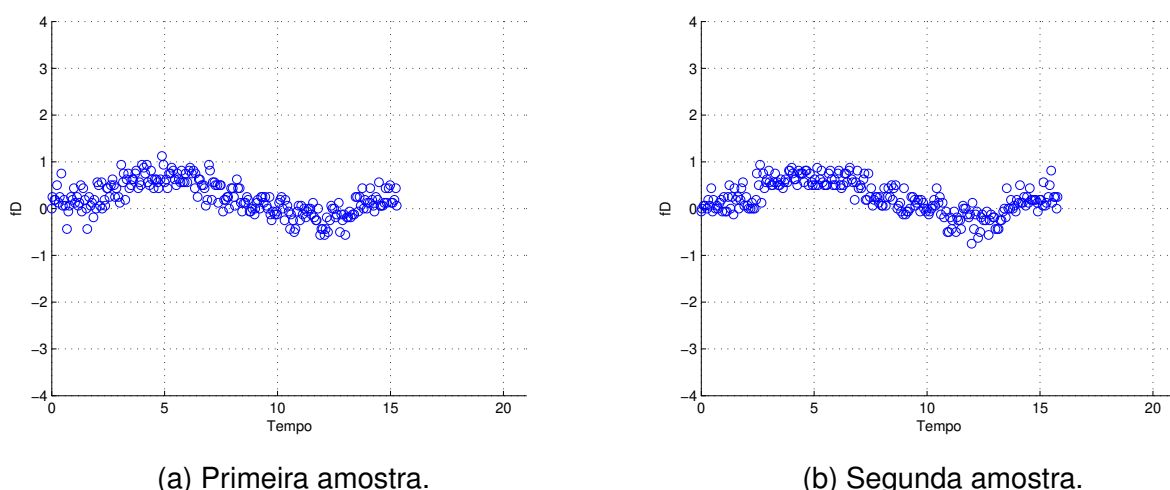


Figura 7.17: Gráficos de dispersão de duas amostras do subcenário 3. Fonte: o autor.

Nesse subcenário, a primeira amostra também foi decomposta nas 4 diferentes frequências de origem (f_0) que a compõem: 923,25 MHz (Figura 7.18a), 923,75 MHz (Figura 7.18b), 924,25 MHz (Figura 7.18c) e 924,75 MHz (Figura 7.18d).

Assim como nos outros subcenários, a distribuição das leituras em relação ao tempo ocorre de maneira uniforme e a simetria entre valores positivos e negativos da frequência Doppler também é observada nesse subcenário.

A Tabela 7.13 apresenta os resultados obtidos da localização e velocidade estimadas.

O erro absoluto de localização é mostrado na Tabela 7.14. Nesse subcenário o erro no eixo z aumentou em relação ao subcenário 2. Ele obteve um erro de 0,28 m. O eixo

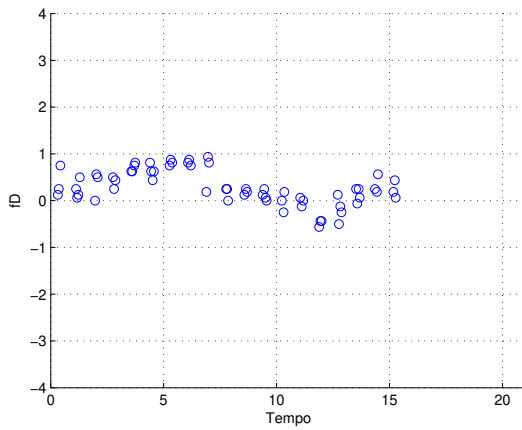
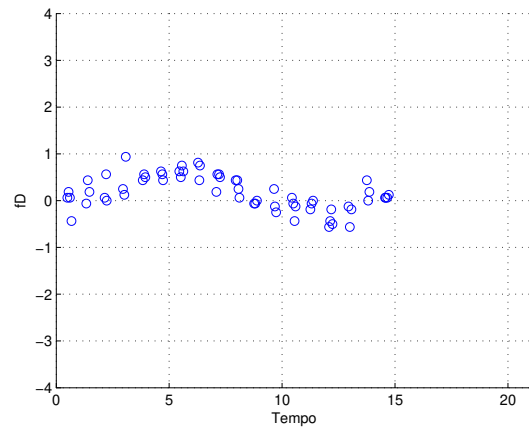
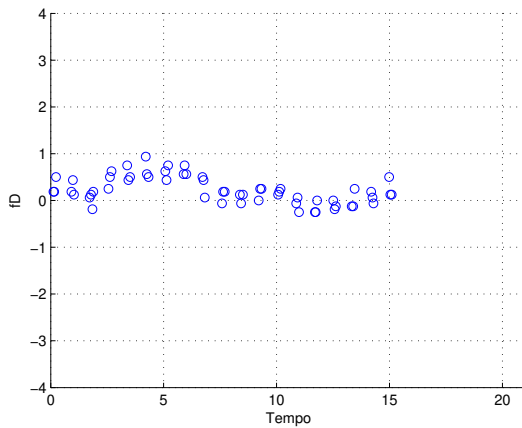
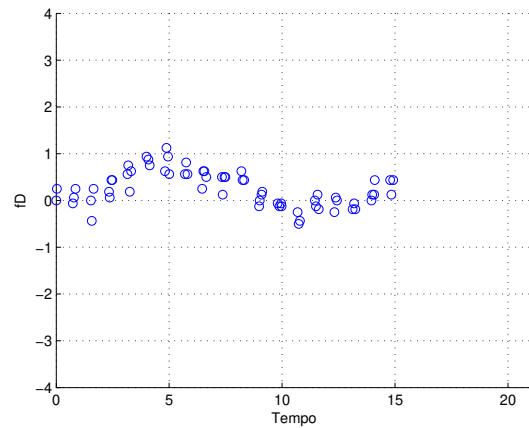
(a) $f_0=923,25$ MHz(b) $f_0=923,75$ MHz(c) $f_0=924,25$ MHz(d) $f_0=924,75$ MHz

Figura 7.18: Gráficos de dispersão obtidos a partir da decomposição da primeira amostra (Figura 7.17a) do subcenário 3 nas 4 diferentes frequências de origem (f_0) que a compõem. Fonte: o autor.

x obteve erro de 0 m, acertando a localização exata da etiqueta nesse eixo. O eixo y obteve um erro de 0,52 m.

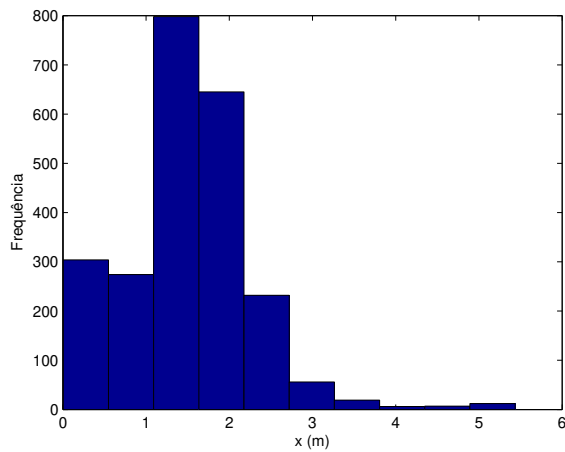
Os histogramas dos eixos x (Figura 7.19a) e y (Figura 7.19b) mostram uma tendência de os valores de cada coordenada convergirem para o resultado correto, entretanto no eixo y, a alta frequência nas classes adjacentes da distribuição impactaram no valor do erro médio absoluto. Semelhante ao que ocorreu no subcenário 3 do cenário 1, no eixo z (Figura 7.19c) não ocorreu uma convergência para o resultado correto, mas sim para um valor próximo.

Tabela 7.13: Resultados obtidos no subcenário 3.

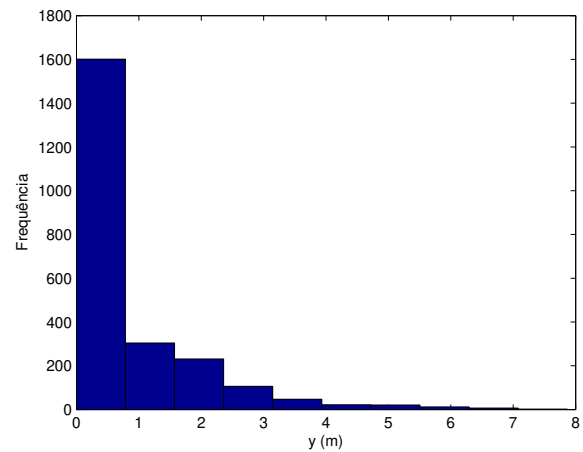
Velocidade estimada (m/s)	Localização real (m)			Localização estimada (m)		
	x	y	z	x	y	z
0,303	1,44	0,06	1,5	1,44	0,58	1,22

Tabela 7.14: Erro absoluto, por eixo, dos resultados obtidos no subcenário 3.

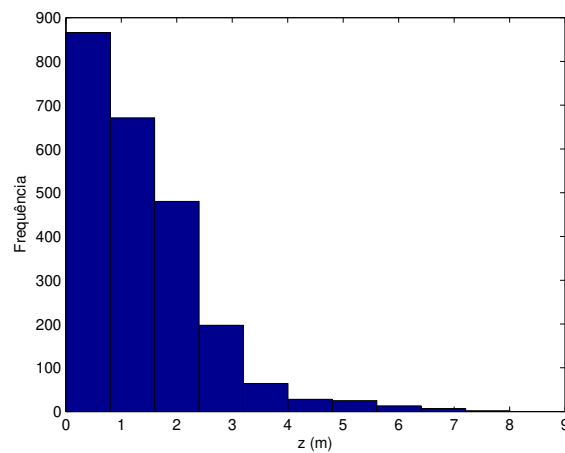
Erro absoluto (m)		
x	y	z
0	0,52	0,28



(a) Histograma da coordenada x.



(b) Histograma da coordenada y.



(c) Histograma da coordenada z.

Figura 7.19: Histogramas com as distribuições para os eixos x, y e z dos resultados obtidos no subcenário 3. Fonte: o autor.

7.2.4 Análise dos Resultados Obtidos no Cenário 2

A Tabela 7.15 apresenta a sumarização dos resultados obtidos nos subcenários 1, 2 e 3. Nesse cenário, a variação da velocidade estimada foi menor que a observada no cenário 1. Além disso, em todos os subcenários, as amostras analisadas apresentaram uma simetria entre os valores positivos e negativos da frequência Doppler obtida. Isso indica que a velocidade permaneceu constante durante o trecho em que isso era necessário.

Entretanto, a baixa velocidade no deslocamento da antena implicou em uma menor variação da frequência Doppler em todos os subcenários observados. O que pode fazer com que o leitor não consiga estimar a frequência Doppler caso a velocidade fique abaixo do mínimo necessário para causar uma variação da frequência Doppler que fique na faixa de sensibilidade do leitor (conforme é especificado na Figura A.2 do Anexo A). Todos esses fatores influenciaram os valores obtidos nos resultados e conseqüentemente a precisão na localização.

Tabela 7.15: Sumarização dos resultados obtidos no cenário 2.

	Velocidade estimada (m/s)	Localização real (m)			Localização estimada (m)		
		x	y	z	x	y	z
Subcenário 1 (z=0,5 m)	0,304	1,44	0,06	0,5	1,407	0,258	0,396
Subcenário 2 (z=1 m)	0,304	1,44	0,06	1	1,279	0,549	0,868
Subcenário 3 (z=1,5 m)	0,303	1,44	0,06	1,5	1,44	0,58	1,22

A técnica obteve um erro médio de 0,064 m no eixo x, 0,402 m no eixo y e 0,172 m no eixo z, conforme a Tabela 7.16, que apresenta os erros sumarizados de todos os eixos nos subcenários 1, 2 e 3, bem como, a média de erro, por eixo, do cenário 2.

Tabela 7.16: Sumarização do erro absoluto, por eixo, dos resultados obtidos no cenário 2.

	Erro absoluto (m)		
	x	y	z
Subcenário 1 (z=0,5 m)	0,033	0,198	0,104
Subcenário 2 (z=1 m)	0,161	0,489	0,132
Subcenário 3 (z=1,5 m)	0	0,52	0,28
Média	0,064	0,402	0,172

O gráfico da Figura 7.20 apresenta a variação do erro com a distância para as coordenadas x, y e z. A partir da Figura 7.20 é possível observar que os erros dos eixos y e z foram os mais impactados com o aumento da distância entre a antena do leitor e a etiqueta, semelhante ao que ocorreu no cenário 1. Entretanto, o eixo x, não foi tão afetado pelo aumento da distância entre a antena do leitor e a etiqueta, chegando inclusive a diminuir o erro (no caso do subcenário 3).

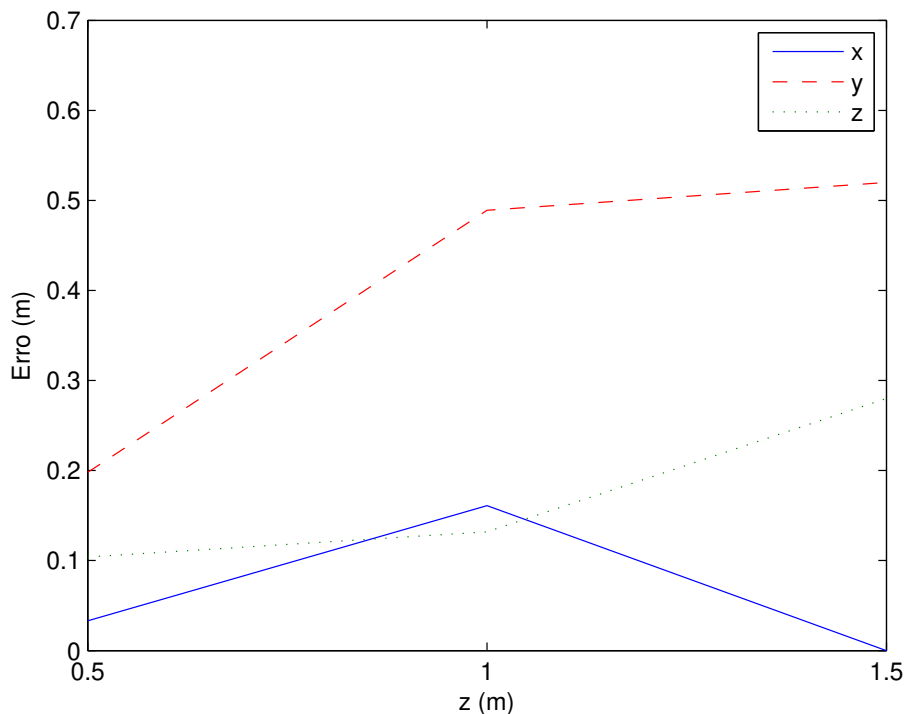


Figura 7.20: Variação do erro observado no cenário 2 em função da distância entre a antena do leitor e a etiqueta. Fonte: o autor.

7.3 Resultado geral

Ambos os cenários apresentaram resultados satisfatórios esperados para uma técnica de localização indoor RFID com precisão na escala de centímetros. A técnica desenvolvida se mostrou eficiente tanto para localização da antena quanto para localização da etiqueta, o que aumenta sua aplicabilidade a um cenário real.

A partir dos resultados obtidos nos dois cenários é possível afirmar que a distância entre a antena do leitor e a etiqueta exerce influência sobre o erro obtido, principalmente para os eixos y e z .

8. CONCLUSÃO

O trabalho apresentou uma nova técnica de localização indoor RFID baseada no efeito Doppler e embasada em um modelo analítico. O efeito Doppler se manifestou a partir do movimento relativo entre antena do leitor e etiqueta, que causa um deslocamento na frequência, fazendo com que a frequência recebida, após ser refletida pela etiqueta difira da transmitida.

A frequência Doppler foi estimada pelo leitor a partir do deslocamento de fase, sendo uma característica presente na maioria dos leitores comerciais.

O modelo analítico utilizado possui dois requisitos: a velocidade de deslocamento do receptor precisa ser constante e uma das coordenadas y ou z precisa ser conhecida.

A velocidade foi estimada utilizando a mesma técnica utilizada nos radares de trânsito, baseada na frequência Doppler. Entretanto, essa técnica está sujeita ao efeito do cosseno da frequência Doppler, que faz com que o erro ao estimar a velocidade aumente com a diminuição do ângulo entre antena do leitor e etiqueta.

Utilizando como parâmetro as informações fornecidas pelo leitor da frequência de origem, e da frequência Doppler, assim como, as informações da velocidade do receptor (estimada a partir da frequência Doppler) e de uma coordenada conhecida (y ou z), o modelo analítico foi aplicado para determinar a localização espacial do transmissor (antena ou etiqueta, conforme o caso).

Para validação da técnica, assim como, para a análise da influência da distância entre a antena e etiqueta no erro obtido em cada eixo, foram elaborados dois cenários, cada um contendo 3 subcenários, onde cada subcenário apresentava uma distância diferente entre a antena do leitor e a etiqueta.

No cenário 1, o objetivo era determinar a posição da antena do leitor (que estava em repouso), enquanto um carrinho de controle remoto com uma etiqueta RFID fixada nele se deslocava sobre uma esteira.

Já no cenário 2, o objetivo era determinar a posição da etiqueta, dessa vez a antena do leitor se movimentou sobre a esteira enquanto a etiqueta permanecia em repouso.

Os resultados de cada cenário foram analisados e a influência da distância entre a antena e a etiqueta no erro obtido de cada eixo foi confirmado.

Os resultados apresentados em ambos os cenários ficaram dentro do esperado para uma técnica de localização indoor RFID com uma precisão na escala de centímetros.

A técnica desenvolvida possui ampla aplicabilidade à diversos cenários reais (com exceção daqueles onde é impossível obter algum movimento relativo entre antena do leitor e a etiqueta) e baixo custo de implantação, visto que, são utilizados apenas um leitor e uma

única antena. Além disso, ainda permite tanto a localização da antena do leitor quanto da etiqueta.

8.1 Trabalhos Futuros

Uma das possibilidades de teste que não foi elencada nesse trabalho seria avaliar a influência do aumento do percurso percorrido pela antena ou pela etiqueta no erro de localização. Esse teste seria interessante, pois com o aumento do percurso o ângulo entre o vetor velocidade do deslocamento da antena do leitor ou da etiqueta, conforme o caso, reduziria e implicaria em um menor erro ao estimar a velocidade.

Outra possibilidade que também não foi explorada seria a utilização de um acelerômetro para estimar a velocidade, visando reduzir o erro ao determinar esse parâmetro.

Também poderia ser desenvolvido um algoritmo para remover os dados espúrios. Dado que eles podem ser facilmente identificados, como foi mostrado nos histogramas dos cenários. Ao eliminar os dados espúrios o erro médio absoluto seria reduzido.

Por fim, ainda seria interessante a aplicação desta técnica de localização em um estudo de caso real para comprovar sua eficácia.

8.2 Publicações

No decorrer do curso foi publicado o artigo “RFID Indoor Localization Based on Doppler Effect” como autor, onde os detalhes são mostrados abaixo:

- Título: RFID Indoor Localization Based on Doppler Effect; Conferência: 16th International Symposium on Quality Electronic Design; Data: 2-4 de março de 2015; Local: Santa Clara, Califórnia, Estados Unidos

Também foi submetido o artigo “RFID indoor localization based on support vector regression and k-means” como coautor, onde os detalhes são mostrados abaixo:

- Título: RFID Indoor Localization Based on Support Vector Regression and K-means; Conferência: The 24th IEEE International Symposium on Industrial Electronics; Data: 3-5 de junho de 2015; Local: Búzios, Rio de Janeiro, Brasil

Ainda será submetido o artigo “A Hybrid RFID and CV System for Item-Level Localization of Stationary Objects” como coautor, onde os detalhes são mostrados abaixo:

- Título: A Hybrid RFID and CV System for Item-Level Localization of Stationary Objects; Periódico: Mobile Networks and Applications; Data limite para submissão: 31 de março de 2015

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [ALR10] Angerer, C.; Langwieser, R.; Rupp, M. “Direction of arrival estimation by phased arrays in RFID”. In: Proceedings of the 3rd International Workshop on RFID Technology, 2010, pp. 1–5.
- [BDS08] Bouet, M.; Dos Santos, A. L. “RFID tags: positioning principles and localization techniques”. In: Proceedings of the 1st Wireless Days, 2008, pp. 1–5.
- [CXH+13] Chen, Z.; Xia, F.; Huang, T.; Bu, F.; Wang, H. “A localization method for the internet of things”, *The Journal of Supercomputing*, vol. 63–3, Mar 2013, pp. 657–674.
- [DHFC13] Dias, R. R. d. F.; Hernandez-Figueroa, H. E.; Costa, L. R. “Analysis of impacts on the change of frequency band for RFID system in Brazil”. In: Proceedings of the International Conference on RFID-Technologies and Applications, 2013, pp. 1–5.
- [FWAM11] Faseth, T.; Winkler, M.; Arthaber, H.; Magerl, G. “The influence of multipath propagation on phase-based narrowband positioning principles in UHF RFID”. In: Proceedings of the Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications, 2011, pp. 1144–1147.
- [GKZ08] Gajewski, P.; Kelner, J. M.; Ziółkowski, C. “Subscriber location in radio communication nets”, *Journal of Telecommunications and Information Technology*, vol. 2, Jun 2008, pp. 88–92.
- [Imp13] Impinj Inc. “Speedway Revolution Reader Application Note - Low Level User Data Support”. Recuperado de: https://support.impinj.com/hc/en-us/article_attachments/200774268/SR_AN_IPJ_Speedway_Rev_Low_Level_Data_Support_20130911.pdf, Novembro 2013.
- [KLK07] Kusy, B.; Ledeczi, A.; Koutsoukos, X. “Tracking mobile nodes using RF Doppler shifts”. In: Proceedings of the 5th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, 2007, pp. 29–42.
- [NLLP03] Ni, L. M.; Liu, Y.; Lau, Y. C.; Patil, A. P. “LANDMARC: indoor location sensing using active RFID”. In: Proceedings of the 1st International Conference on Pervasive Computing and Communications, 2003, pp. 407–415.
- [NMR+10] Nikitin, P. V.; Martinez, R.; Ramamurthy, S.; Leland, H.; Spiess, G.; Rao, K. “Phase based spatial identification of UHF RFID tags”. In: Proceedings of the International Conference on RFID, 2010, pp. 102–109.

- [NZZS11] Ni, L. M.; Zhang, D.; Souryal, M. R. "RFID-based localization and tracking technologies", *IEEE Wireless Communications*, vol. 18–2, Abr 2011, pp. 45–51.
- [PS11] Povalac, A.; Sebesta, J. "Phase difference of arrival distance estimation for RFID tags in frequency domain". In: Proceedings of the International Conference on RFID-Technologies and Applications, 2011, pp. 188–193.
- [RZ08] Rafa, J.; Ziółkowski, C. "Influence of transmitter motion on received signal parameters—analysis of the Doppler effect", *Wave Motion*, vol. 45–3, Jan 2008, pp. 178–190.
- [Saw13] Sawicki, D. S. "Police radar handbook: a comprehensive guide to speed measuring systems". CreateSpace Independent Publishing Platform, 2013, 192p.
- [SK08] Sanpechuda, T.; Kovavisaruch, L. "A review of RFID localization: applications and techniques". In: Proceedings of the 5th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, 2008, pp. 769–772.
- [SVHJ11] Sarkka, S.; Viikari, V. V.; Huusko, M.; Jaakkola, K. "Phase-based UHF RFID tracking with nonlinear Kalman filtering and smoothing", *IEEE Sensors Journal*, vol. 12–5, Ago 2011, pp. 904–910.
- [Wan06] Want, R. "An introduction to RFID technology", *IEEE Pervasive Computing*, vol. 5–1, Fev 2006, pp. 25–33.
- [YLL11] Yu, J.; Liu, K. H.; Luo, P. "A mobile RFID localization algorithm based on instantaneous frequency estimation". In: Proceedings of the 6th International Conference on Computer Science & Education, 2011, pp. 525–530.
- [ZRK08] Ziolkowski, C.; Rafa, J.; Kelner, J. M. "Practical aspects of the Doppler effect in mobile communication systems". In: Proceedings of the 17th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications, 2008, pp. 1–4.

ANEXO A – Limites do leitor RFID utilizado nos testes

As Figuras A.1 e A.2 apresentam os limites de operação do leitor RFID utilizado nos testes, ao estimar a fase e a frequência Doppler, respectivamente.

Description	Min	Typ	Max	Units	Comments/Conditions
Phase Word Size		12		Bits	Reported value between 0 and 4095
Phase Word Range	0		+2 π	Rad	See Figure 3-2 for phase mapping
	0		+360	Deg	
Phase Standard Deviation	-0.1		0.1	Rad	Standard deviation from mean value over 1000 EPC packets in an anechoic chamber or a cabled test. Over 0 to +40 °C. Over frequency band. Over RSSI from -70 to -30 dBm. Absolute accuracy of mean value is not specified.
	-5.7		5.7	Deg	
Phase Resolution	0.0015			Rad	
	0.088			Deg	

Figura A.1: Limites do leitor RFID utilizado com relação à fase [Imp13].

Description	Min	Typ	Max	Units	Comments/Conditions
Representation	-2 ¹²		2 ¹² -1	Hz	16-bit (four fractional) Twos complement
Phase Accumulation ($\Delta\theta$)	-720		+720	Deg	Maximum allowed phase accumulation over the duration of any single packet
	-4 π		+4 π	Rad	
Frequency Range (f_m)		$\frac{1}{180 \cdot \Delta T} < f_m < \frac{1}{\Delta T}$		Hz	ΔT = packet duration (sec) Lower limit assumes a (arbitrary) minimum of \approx 4° phase rotation.

Figura A.2: Limites do leitor RFID utilizado com relação à frequência Doppler [Imp13].



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
Pró-Reitoria de Graduação
Av. Ipiranga, 6681 - Prédio 1 - 3º. andar
Porto Alegre - RS - Brasil
Fone: (51) 3320-3500 - Fax: (51) 3339-1564
E-mail: prograd@pucrs.br
Site: www.pucrs.br