



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba
Campus de São João da Boa Vista

JOSÉ ANTONIO MICHELETTI

Localização e Rastreamento 3D usando Comunicação sem Fio LoRa

Sorocaba

2021

M623l Micheletti, José Antonio
Localização e rastreamento 3D usando comunicação sem fio LoRa /
José Antonio Micheletti. -- Sorocaba, 2021
91 p. : il., tabs., fotos

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba
Orientador: Eduardo Paciência Godoy

1. Internet das coisas. 2. Localização. 3. Altimetros. I. Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Localização e Rastreamento 3D usando Comunicação sem Fio LoRa

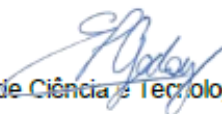
AUTOR: JOSÉ ANTONIO MICHELETTI

ORIENTADOR: EDUARDO PACIÊNCIA GODOY

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA ELÉTRICA, área: Automação pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. EDUARDO PACIÊNCIA GODOY (Participação Virtual)

Departamento de Engenharia de Controle e Automação / Instituto de Ciência e Tecnologia - UNESP - Campus de Sorocaba



Prof. Dr. EVERSON MARTINS (Participação Virtual)

Departamento de Engenharia de Controle e Automação / Instituto de Ciência e Tecnologia - UNESP - Campus de Sorocaba



Prof. Dr. WALDEMAR BONVENTI JÚNIOR (Participação Virtual)

Faculdade de Tecnologia de Sorocaba - FATEC



Sorocaba, 18 de maio de 2021

JOSÉ ANTONIO MICHELETTI

Localização e Rastreamento 3D usando Comunicação sem Fio LoRa

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Interunidades, entre o Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba e o Campus de São João da Boa Vista da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

Área de Concentração: Automação

Linha de Pesquisa: Sistemas Mecatrônicos

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Paciência Godoy

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Eduardo Paciência Godoy
UNESP – Câmpus de Sorocaba
Orientador

Prof. Dr. Everton Martins
UNESP – Câmpus Sorocaba

Prof. Dr. Waldemar Bonventi Jr
FATEC – Sorocaba

Sorocaba

2021

**“O meu olhar é nítido como um girassol.
Tenho o costume de andar pelas estradas
Olhando para a direita e para a esquerda,
E de vez em quando olhando para trás...
E o que vejo a cada momento
É aquilo que nunca antes eu tinha visto...”**

- **O guardador de rebanhos, Alberto Caieiro.**

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, pela estrutura e o apoio oferecidos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Eduardo Paciência Godoy, pela dedicação, confiança e parceria.

À ETEC Armando Pannunzio de Sorocaba, por permitir a utilização de suas instalações para realização de testes.

À minha parceira e amada Daniela, por todo carinho, compreensão e apoio.

Ao meu filho Giovanni, pelo grande exemplo de determinação, para quem dedico este trabalho.

RESUMO

A Internet das Coisas (*IoT*) tem necessitado cada vez mais soluções que atendam requisitos de conectividade, como adequada velocidade de comunicação de dados, longa distância de comunicação e baixo consumo de energia. Novas tecnologias vêm surgindo, como as redes de comunicação sem fio de longa distância e baixo consumo de energia (*LPWAN*), na tentativa de suprir essas necessidades, aliadas a custos baixos e maior escalabilidade. Uma delas é o LoRa (*Long Range*), que é uma tecnologia de comunicação sem fio de longa distância e que faz parte do protocolo LoRaWAN. Aplicações nas redes de sensores sem fio (*WSN*) envolvendo essa tecnologia têm sido amplamente empregadas, trazendo bons resultados. Dentre as novas aplicações de *IoT*, envolvendo também Cidades Inteligentes, a localização e o rastreamento em 3D de objetos usando comunicação sem fio têm se destacado como uma área em contínuo desenvolvimento. Apesar de diversos métodos para localização 3D usando comunicação sem fio poderem ser encontrados na literatura, poucos estão disponíveis com aplicações em longa distância. Com relação ao rastreamento, até o momento pouco foi desenvolvido, especialmente para aplicações não específicas dentro do contexto de *WSN*. Neste sentido, este trabalho utilizou a comunicação sem fio LoRa associada a sensores de altitude, para desenvolver e validar experimentalmente uma plataforma automatizada de localização 3D para aplicações focadas em ambientes internos, com possibilidade de aplicação também para rastreamento. O método aplicado para cálculo do posicionamento 3D do objeto utiliza a técnica de trilateração usando a potência do sinal recebido entre dispositivos (*RSSI*). Testes operacionais considerando as características do rádio de comunicação e os parâmetros do LoRa permitiram atingir a melhor calibração do sistema. Adicionalmente, um tratamento estatístico das medidas proporcionou melhor exatidão dos resultados. Os resultados de localização foram bons, apresentando satisfatória exatidão, com erro máximo na ordem de poucos metros. Os resultados demonstram também a possibilidade de aplicação para rastreamento, porém, demandando melhorias para diminuição da variabilidade de medição da rota rastreada.

Palavras-chave: Internet das Coisas, *LPWAN*, Altímetro, Trilateração.

ABSTRACT

Internet of Things (IoT) has needed more and more solutions to assist the connection requirements, as data rate, long distance and low consumption of energy. New technologies emerge, as the wireless long distance and low energy networks (LPWAN), attempting to supply those needs, allied to the low costs and larger scale. One of them is LoRa (Long Range), a wireless communication technology of long distance, which is part of LoRaWAN protocol. Applications in the wireless sensor networks (WSN) involving this technology, has been used widely, bringing good results. Among new applications in IoT, involving also smart cities, 3D location and tracking of objects using wireless communication, has the prominence as an area in continuous development. In spite of many methods for 3D location using wireless communication, be able to found in literature, a few of them are available with long-range applications. Related to the tracking, until now, a few of it was been developed, especially for non-specific applications in the WSN context. In this way, this work has used LoRa technology associated to the sensor of altitude, to build and validate experimentally an automated platform of 3D location for applications focus in indoor environments, with possibility to applicate it also to tracking. The method applied to calculate the 3D positioning of object uses trilateration technique with the power of signal between the devices (RSSI). Operational tests considering the characteristics of the communication radio and the parameters of LoRa, allowed reaching the best gauging of the system. In addition, a statistic treatment of the measures has provided better accuracy of the results. The results of location were good, presenting satisfactory accuracy, with maximum error in order of few meters. It also demonstrates the possibility of application for tracking, however demanding improvement to decrease the variability of measurement of the tracked rote.

Keywords: Internet of Things, LPWAN, Altimeter, Trilateration

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Internet das Coisas	14
Figura 2 – <i>Machine to Machine</i>	15
Figura 3 – LoRa e suas Camadas	19
Figura 4 – LoRa Banda de Frequência x Distância	20
Figura 5 – Exemplo de Trilateração	24
Figura 6 – Exemplo de Triangulação	24
Figura 7 - Plataforma de Localização 3D	29
Figura 8 – Plataforma de Rastreamento	30
Figura 9 – Mensagem do Concentrador ao Localizável	31
Figura 10 – Mensagem do Localizável ao Localizador.....	32
Figura 11 – Mensagem do Localizador ao Concentrador.....	32
Figura 12 – Pinagem do ESP-WIFI LoRa 32	34
Figura 13 – Pinagem do BME280	35
Figura 14 – Distância d entre Localizável e Localizador	36
Figura 15 – Triângulo Retângulo entre Localizador e Nó 4.....	37
Figura 16 – Plano X Y do Nó4.....	38
Figura 17 – Fluxograma da calibração do sistema	41
Figura 18 – Fluxograma do cálculo de posição	43
Figura 19 – Concentrador	44
Figura 20 – Localizável e Localizadores 1, 2 e 3 (4 nós iguais)	45
Figura 21 – Teste de posição de antenas	45
Figura 22 – Vista interna do ambiente de testes.....	47
Figura 23 – Foto 1 do Laboratório	48
Figura 24 – Foto 2 do Laboratório	48
Figura 25 – Foto 3 do Laboratório	49
Figura 26 – Foto 1 da Quadra.....	49
Figura 27 – Foto 2 da Quadra.....	50
Figura 28 – Foto 3 da Quadra.....	50
Figura 29 – Gráfico de F1 com A medido.....	55
Figura 30 – Gráfico de F1 com A melhorado.....	56
Figura 31 – Tela de entrada Serial.....	57
Figura 32 – Tela de variáveis de entrada	58

Figura 33 – Tela de resultados.....	58
Figura 34 – Tela de Gráficos e Histogramas de posições.....	59
Figura 35 – Tela de Histogramas de posições e erros	59
Figura 36 – Histogramas do Ponto 1-A Lab.....	62
Figura 37 – Histogramas do Ponto 1-B Lab	63
Figura 38 – Histograma do Ponto 1-C Lab	64
Figura 39 – Histogramas do Ponto 2-A Lab.....	65
Figura 40 – Histograma do Ponto 2-B Lab	66
Figura 41 – Histogramas do Ponto 2-C Lab	67
Figura 42 – Histograma do Ponto 3-A Lab	68
Figura 43 – Histograma do Ponto 3-B Lab	69
Figura 44 – Histograma do Ponto 3-C Lab	70
Figura 45 – Histogramas do Ponto 1-B Quadra	71
Figura 46 – Histograma do Ponto 1-C Quadra.....	72
Figura 47 – Histograma do Ponto 2-B Quadra.....	73
Figura 48 – Histograma do Ponto 2-C Quadra.....	74
Figura 49 – Histograma do Ponto 3-B Quadra.....	75
Figura 50 – Histograma do Ponto 3-C Quadra.....	76
Figura 51 – Gráfico da Rota 1 - Quadra	79
Figura 52 – Gráfico da Rota 2 - Quadra	80
Figura 53 – Gráfico da Rota 3 - Quadra	81
Figura 54 – Gráfico da Rota 2A - Lab.....	82
Figura 55 – Gráfico da Rota 2B - Lab.....	83
Figura 56 – Gráfico da Rota 2C - Lab.....	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre os sistemas WSN, redes celulares e <i>IoT</i>	23
Tabela 2 – Especificações do ESP-WIFI LoRa 32	33
Tabela 3 – Especificações do BME280	35
Tabela 4 – Teste de potência do sinal por metro	53
Tabela 5 – RSSI de F1 com A medido	54
Tabela 6 – RSSI de F1 com A melhorado	55
Tabela 7 - Resultados do Ponto 1-A Lab	61
Tabela 8 - Resultados do Ponto 1-B Lab	62
Tabela 9 - Resultados do Ponto 1-C Lab	63
Tabela 10 - Resultados do Ponto 2-A Lab	64
Tabela 11 - Resultados do Ponto 2-B Lab	65
Tabela 12- Resultados do Ponto 2-C Lab	66
Tabela 13- Resultados do Ponto 3-A Lab	67
Tabela 14 - Resultados do Ponto 3-B Lab	68
Tabela 15 - Resultados do Ponto 3-C Lab	69
Tabela 16 - Resultados do Ponto 1-B Quadra	71
Tabela 17 - Resultados do Ponto 1-C Quadra	72
Tabela 18- Resultados do Ponto 2-B Quadra	73
Tabela 19 - Resultados do Ponto 2-C Quadra	74
Tabela 20 - Resultados do Ponto 3-B Quadra	75
Tabela 21 - Resultados do Ponto 3-C Quadra	76

LISTA DE SIGLAS

2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
AoA	<i>Angle of Arrival</i>
Bluetooth	Protocolo de comunicação sem fio
BW	<i>Bandwidth</i>
COM	Porta de comunicação serial
CR	<i>Coding Rate</i>
CSS	<i>Chirp Spread Spectrum</i>
DoA	<i>Direction of Arrival</i>
EADI	Estação Aduaneira do Interior
FI	<i>Future Internet</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Services</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
ID	<i>Identity</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
LabVIEW	<i>Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench</i>
LoRa	<i>Long Range</i>
LoRaSim	<i>LoRa Simulator</i>
LoRaWAN	<i>LoRa Wide Area Network</i>
LPWAN	<i>Low Power Wide Area Network</i>
M2M	<i>Machine to Machine</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
NoteBook	Computador pessoal portátil
PHY	<i>Physical layer</i>
RAN	<i>Radio Access Network</i>
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i>
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i>
SF	<i>Spreading Factor</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
TCP/IP	<i>Transmission Control Protocol/Internet Protocol</i>
TDoA	<i>Time Difference of Arrival</i>
ToA	<i>Time of Arrival</i>
ToF	<i>Time of Flight</i>
Tx	Transmissor
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
WAN	<i>Wide Area Network</i>
Wi-Fi	Padrão de rede local sem fio
WSN	<i>Wireless Sensor Network</i>
ZigBee	Protocolo de comunicação sem fio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Justificativa	14
1.2	Objetivos	16
1.3	Estrutura do trabalho	17
2	LORA	18
3	LOCALIZAÇÃO E RASTREAMENTO USANDO REDES SEM FIO	22
3.1	Conceitos Básicos	22
3.2	Trabalhos Relacionados	25
4	MATERIAIS E MÉTODOS	29
4.1	Proposta do Trabalho	29
4.2	Hardware e Software	32
4.3	Equações da Localização 3D	36
4.3.1	Distância Localizável - Localizador	36
4.3.2	Projeções no Plano X Y	37
4.3.3	Ponto 2D no Plano X Y	38
4.3.4	Eixo Z	40
4.3.5	Erros	40
5	DESENVOLVIMENTO	41
5.1	Descrição da Operação	41
5.2	Protótipos e Ambiente de Testes	44
5.2.1	Protótipos de testes	44
5.2.2	Teste de posição das antenas	45
5.2.3	Ambientes de testes	46
5.2.4	Calibração de parâmetros	50
5.2.5	Aquisição e tratamento dos dados	57
6	RESULTADOS	61
6.1	Localização 3D	61
6.2	Discussão dos Resultados da Localização 3D	77
6.3	Rastreamento	78
6.4	Discussão dos Resultados do Rastreamento	85
7	CONCLUSÕES	86
7.1	Localização 3D	86
7.2	Rastreamento	87
8	REFERÊNCIAS	88

Figura 2 – *Machine to Machine*

Fonte: oficinadanet.com.br

As aplicações possíveis para serem utilizadas na *IoT* são inúmeras, e novas emergem a todo momento, como cidades inteligentes, monitoramento de mercadorias, controle da demanda energética, agricultura inteligente, monitoramentos na área da saúde entre muitas outras. Cada uma dessas aplicações constitui uma ou mais redes próprias de comunicação, interligadas por meio da *IoT*. E por sua vez, todas requerem igualmente uma compatibilidade da rede de sensores sem fio (*WSN*), em termos de cobertura, consumo de energia do nó final e escalabilidade. Observa-se que, as tecnologias utilizadas para oferecer conectividade para as redes *IoT*, como tecnologias celulares e redes sem fio, não conseguem atender simultaneamente esses três requisitos.

Surgiu então recentemente, uma nova solução chamada *LPWAN* (*Low Power Wide Area Network*), com o propósito de oferecer conectividade a baixo custo, baixo consumo de energia, atingindo a grandes áreas (IBORRA et al., 2018). Uma dessas tecnologias *LPWAN* é a arquitetura LoRaWAN (Rede de Longa Distância baseada no LoRa), desenvolvida pela LoRa Alliance. Essa arquitetura é baseada no protocolo LoRa, uma solução avançada e que permite ao usuário adaptar o sistema às suas necessidades.

No que diz respeito aos desafios encontrados no desenvolvimento da *IoT* e suas aplicações, esses também são muitos. Os conceitos de localização e rastreamento de objetos estão ligados diretamente a muitas aplicações importantes, como o monitoramento de mercadorias (na área da indústria e comércio), monitoramento de idosos (na área da saúde) e movimentação de bens (na área de segurança), e ainda trazem muitos desafios e questões para serem respondidas. A localização de objetos consiste na determinação da posição tridimensional (pontos x, y e z) de um dispositivo eletrônico, em uma região ou área específica, interna (*indoor*) ou externa (*outdoor*), por meio de algum método baseado em outros dispositivos eletrônicos de referência. Quanto ao rastreamento, o objetivo é encontrar e acompanhar o objeto em movimento.

Os métodos mais conhecidos para localização e rastreamento utilizam sistemas *GPS*³ ou uma rede *WSN* específica ou já existente. Os desafios encontrados se relacionam tanto a resultados como a operação dos sistemas na *IoT*. Como exemplos podemos citar: maior precisão nos resultados, soluções de fácil aplicação, baixo custo, baixo consumo de energia do nó final e utilização em áreas mais extensas (maior distância). Muitos trabalhos nessa área, têm se baseado em plataformas pouco amigáveis e com equações complexas, utilizando tecnologias de baixa conectividade e pouca abrangência numa rede *IoT*. Outra coisa que se pode notar, é que os trabalhos relacionados a rastreamento de objetos ainda são muito poucos, demandando uma área de forte pesquisa e crescimento.

Para tentar solucionar esses problemas, surgiu a *LPWAN*, como descrito anteriormente, tendo o *LoRaWAN* como uma das ferramentas mais estudadas e aplicadas. Uma questão importante no que diz respeito a novos estudos para o rastreamento 3D utilizando soluções *LPWAN*, mais especificamente o *LoRaWAN*, é que esta, por ser uma rede conectada à Internet, demanda maior tempo para atualização dos dados. Em contrapartida, uma rede *LoRa* ponto a ponto, permite uma atualização de dados com maior frequência.

Com base nos fundamentos apresentados, a proposta deste trabalho consiste em estudar as características da tecnologia de comunicação sem fio *LoRa* e aplicá-la no desenvolvimento e validação experimental de um sistema para localização e rastreamento 3D, que se utiliza de dispositivos *LoRa* associados a sensores de altitude. Uma infraestrutura de rede *LoRa* foi criada para o cálculo da posição do objeto através de equações matemáticas e determinação de distâncias por meio da técnica de Trilateração e informação da potência do sinal trocado entre os dispositivos da rede sem fio (*RSSI*⁴).

1.2 Objetivos

O objetivo deste projeto compreende o desenvolvimento de uma solução de baixo custo e fácil aplicação para localização e rastreamento 3D de objetos, por meio da trilateração de sinais numa rede *LoRa* associada a sensores de altitude, utilizando-se da potência dos sinais (*RSSI*) e de cálculos matemáticos. Este método provê, por meio de programações específicas, a correta parametrização do sistema e o cálculo do posicionamento 3D do objeto para fins de localização e rastreamento em tempo de execução.

³ *GPS*: *Global Positioning System* ou Sistema Global de Posicionamento. É um sistema de navegação por satélite que fornece a um aparelho receptor móvel a sua posição, assim como horário, sob quaisquer condições atmosféricas, a qualquer momento e em qualquer lugar na Terra.

⁴ *RSSI* é um indicador da potência do sinal enviado/recebido em uma transmissão de comunicação e dado, apresentada em dBm (decibéis, unidade de medida).

1.3 Estrutura do trabalho

A estrutura deste trabalho está dividida em 7 capítulos, incluindo esta introdução e desconsiderando as referências bibliográficas.

O capítulo 2 apresenta os conceitos a respeito do principal componente utilizado no projeto, o rádio LoRa e suas características.

O capítulo 3 traz uma revisão bibliográfica contextualizada às mais relevantes pesquisas já publicadas relacionadas aos principais tópicos acerca do tema em estudo.

O capítulo 4 trata da proposta de trabalho, relacionando os materiais utilizados, incluindo *Hardware* e *Software* do sistema proposto.

O capítulo 5 aborda o desenvolvimento do sistema proposto, descrevendo funcionamento, formulações matemáticas, protótipos, ambientes de teste e melhorias desenvolvidas.

O capítulo 6 discute os resultados obtidos nos testes realizados, para as aplicações de Localização e Rastreamento.

Por fim, o capítulo 7, apresenta as conclusões e considerações finais, alcançadas a partir da realização do trabalho.

2 LORA

LoRa (*Long Range*) é uma tecnologia de rádio baseada na modulação de espectro de frequências, derivada da tecnologia *chirp spread spectrum* (CSS), que permite atingir-se longas distâncias com baixo consumo de energia, em comunicações ponto a ponto ou em rede. A CSS⁵ é uma técnica de dispersão de espectro (*spread spectrum*), usada em comunicações digitais, que utiliza pulsos de *chirp* (sinal senoidal de aumento ou diminuição da frequência no tempo) modulados em frequência de banda larga para codificar informações. Essa técnica usa toda a largura de banda alocada para transmitir um sinal, tornando a comunicação robusta, mais imune a ruídos e resistente à propagação *multipath* (propagação do sinal por vários caminhos), mesmo em baixa potência (LAZARO et al, 2021). Além disso, também é resistente ao efeito Doppler⁶, que é típico em aplicativos de rádio móvel.

A tecnologia do rádio LoRa foi desenvolvida pela Cycleo SAS, uma empresa francesa, sediada em Grenoble, França, provedora de soluções inovadoras sem fio. Em março de 2012, a Cycleo, com todos os seus ativos, empresas e operações, foi adquirida⁷ pela Semtech Corporation (semtech.com). A Semtech, por sua vez, é uma empresa global, fornecedora líder de semicondutores analógicos e de sinal misto para equipamentos de consumo, computação, comunicações e industriais, de alta performance. Rapidamente, o LoRa se tornou um dos principais produtos da empresa, possibilitando aplicações nos três mercados atuais de maior crescimento na indústria: Internet das Coisas, Centros de Dados e Mobilidade. Conforme a definição da própria Semtech a respeito do LoRa: “A Tecnologia LoRa é o *DNA* da *IoT*, conectando sensores à nuvem e permitindo a comunicação em tempo real de dados e análises que podem ser utilizadas para aumentar a eficiência e a produtividade”. Para a Semtech, além do sentido metafórico na frase, o *DNA* é também uma sigla: *Devices, Networks and Applications*.

Em função das características da tecnologia LoRa, que permitem comunicação de longo alcance, baixo consumo de energia e fácil conexão às infraestruturas existentes, muitos estudos e desenvolvimentos para aplicações em Internet das Coisas e Cidades Inteligentes foram surgindo. Em março de 2015 foi fundada a LoRa Alliance (lora-alliance.org), tendo como principal cofundadora a Semtech. É uma associação aberta e sem fins lucrativos, atualmente com mais de 500 membros, dentre eles, empresas líderes de tecnologia como IBM, Cisco, HP,

⁵ A camada física (*PHY*) CSS está definida no Padrão IEEE 802.15.4a-2007.

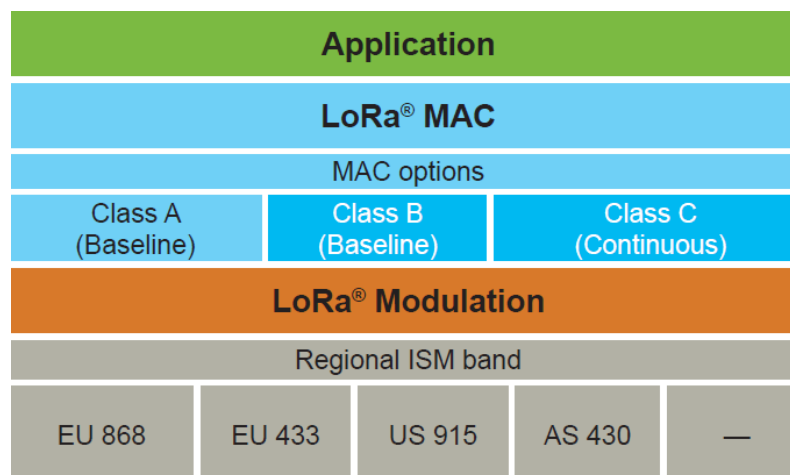
⁶ Efeito Doppler é a mudança na frequência de uma onda em relação a um observador que está se movendo em relação à fonte da onda.

⁷ Notícia do portal *Design&Reuse* (7 de março de 2012) sobre a aquisição da Cycleo pela Semtech <https://www.design-reuse.com/news/28706/semtech-cycleo-acquisition.html>

Foxconn, Semtech e Sagemcom, além de empresas líderes em produtos como Schneider, Bosch, Diehl e Mueller, e muitas *startups*. Sua finalidade é, através da colaboração e compartilhamento de experiências entre seus membros, impulsionar o sucesso do protocolo LoRa, como principal padrão global aberto para conectividade na *IoT*, de forma segura e de nível de operadora.

A estrutura do LoRa define duas camadas diferenciadas, a camada física (*PHY*), definida pela modulação LoRa (*LoRa Modulation*), e a camada de acesso médio da rede (*MAC*), definida pelo protocolo aberto LoRaWAN (*Long Range Wide Area Network*). Enquanto a modulação LoRa possibilita a estruturação de redes sem fio locais, o LoRaWAN (*LoRa MAC*) gerencia a comunicação entre gateways de redes regionais, nacionais ou globais (Figura 3).

Figura 3 – LoRa e suas Camadas



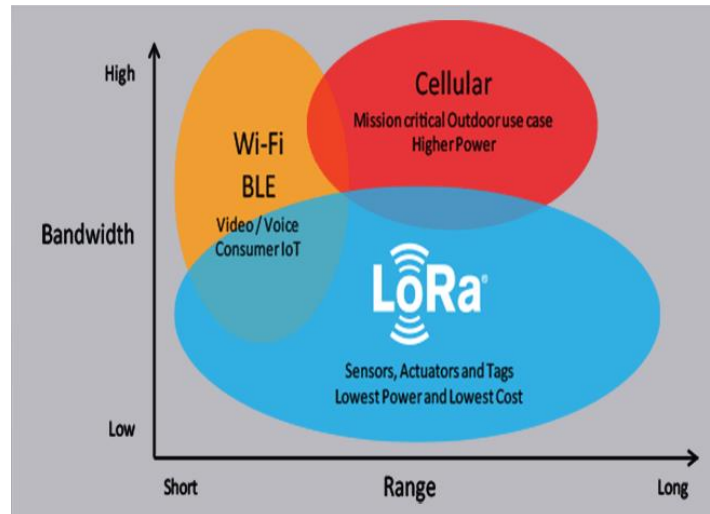
Fonte: LoRa Alliance

O LoRaWAN possibilita o uso de três tipos de dispositivos finais (*end-devices*), de acordo com suas limitações de consumo de energia e necessidades de *download*: Os da classe A podem receber transmissões após cada conexão de *uplink*, abrindo uma janela de escuta. Os da classe B podem aceitar transmissões de *downlink* durante janelas adicionais de *downlink* agendadas. Os da classe C ouvem continuamente o canal para receber conexão de *downlink* a qualquer momento. Os dispositivos mais utilizados são da classe A, com duração otimizada da bateria em cerca de 5 anos (LoRa-ALLIANCE, 2015). A classe A foi utilizada também neste trabalho.

A tecnologia LoRa utiliza espectros de radiofrequência não licenciados na faixa da Indústria, Ciência e Medicina, estando distribuídas atualmente em 433 MHz e 868 MHz na Europa, 915 MHz na Austrália e América do Norte e 430 MHz na Ásia. No Brasil, a Anatel regulamentou em 2017 por meio do Ato 14448, a tecnologia LoRa na frequência de 915MHz,

padrão Australiano. Como é possível verificar na Figura 4, o LoRa preenche uma lacuna tecnológica em relação às redes celulares e *Wi-Fi/Bluetooth*, que requerem alta largura de banda ou alta potência e têm alcances menores.

Figura 4 – LoRa Banda de Frequência x Distância



Fonte: Site SEMTECH semtech.com/lora

Uma outra característica importante do LoRa, são seus parâmetros configuráveis, a saber, *TX Power* (*txPower*) ou potência de transmissão, *Spreading Factor* (*SF*) ou fator de propagação do espectro, *Coding Rate* (*CR*) ou taxa de codificação e *Bandwidth* (*BW*) ou largura de banda. Por meio do ajuste desses fatores, é possível melhorar os recursos de comunicação ponto a ponto, como por exemplo, potência do sinal, taxa de dados, capacidade de correção de erros e alcance de transmissão, entre outros (LoRa-ALLIANCE, 2015).

A potência do sinal transmitido, se relaciona diretamente a transmissões em longas distâncias, podendo o *txPower* assumir valores numéricos entre 2 e 20. Os valores possíveis de *SF* variam de 7 a 12, sendo que, valores maiores aumentam a robustez do link de transmissão e a sensibilidade do dispositivo receptor, porém, diminuindo a taxa de transmissão de dados. O *CR* é uma codificação de erro cíclica, capaz de detectar e corrigir erros avançados. Essa codificação, porém, gera aumento significativo de dados a serem transmitidos. O *CR* pode ser definido com os valores 4/5, 4/6, 4/7, 4/8. Com relação ao *BW*, os valores usuais são 125kHz, 250kHz e 500kHz, sendo 125kHz o mais empregado na transmissão LoRa (IBORRA et al., 2018).

Muitas aplicações envolvendo LoRa e LoRaWAN apresentam uma conectividade de longo alcance, com resultados superando 10Km em área aberta (*outdoor*). Numa avaliação de desempenho do LoRa, considerando as condições do cenário (IBORRA et al., 2018), os

parâmetros *SF*, *CR* e *BW* foram ajustados em determinados cenários rurais e urbanos, produzindo resultados da ordem de 6 km na área urbana (cenário adverso) e 18 km na área rural (área aberta). O trabalho de Wan, Yang, Du e Sardar (2017) apresenta testes de propagação do LoRa no subsolo, tendo como conclusão uma alta sensibilidade e longa distância do sinal transmitido, com baixa interferência de efeito Doppler. Em se tratando de aplicações internas (*indoor*), o teste de propagação de sinal do LoRa em um prédio de 12 andares (TRINH et al, 2017), resultou na manutenção com baixa perda do sinal transmitido entre todos os andares do prédio, apesar das obstruções de móveis e da alvenaria.

Enquanto as redes de curta distância, como *Bluetooth*, *ZigBee* e *Wi-Fi*, embora com padrões bem estabelecidos e soluções conhecidas, têm dificuldades quanto ao tempo útil das baterias, abastecimento e custo da rede, as redes LoRa proporcionam longa distância com baixo consumo de energia e baixo custo. Assim também, as redes celulares tradicionais oferecem baixa autonomia e o desenvolvimento e custo total somente por conta do proprietário, o que não acontece com o LoRaWAN (LoRa-ALLIANCE, 2015). O protocolo de comunicação LoRaWAN e o link de longa distância (camada física) do LoRa, compõe uma plataforma especialmente adequada para atender às necessidades da LPWAN⁸.

⁸ LPWAN (*Low Power – Wide Area Network*): solução de rede para aplicação na IoT, que surgiu com a finalidade de fornecer conectividade de baixo custo, baixo consumo de energia e larga abrangência.

3 LOCALIZAÇÃO E RASTREAMENTO USANDO REDES SEM FIO

3.1 Conceitos Básicos

As redes de comunicação sem fio, desde o seu início, vêm incorporando uma imensa gama de aplicações. Com o surgimento do conceito de Internet das Coisas (*IoT*), veio a necessidade de se conectar essas e outras aplicações em uma rede única, provendo interação e cooperação entre elas (BARI et al, 2013).

No exemplo da *SmartSantander* (SANCHEZ et al, 2014), um estudo de caso de implantação de uma rede *IoT* na cidade de Santander na Espanha, os autores apontam a *IoT* como o início da Internet do Futuro (*IF*⁹). Nesse trabalho, que trouxe bons resultados, é possível constatar uma arquitetura de rede incorporando aplicações como monitoramento ambiental, gerenciamento de estacionamentos, irrigação automática de parques, realidade aumentada, mobilidade, entre outras.

Para tornar possível a disponibilização da *IoT* como uma plataforma global, diversos requisitos quanto à conectividade precisam ser atendidos, como cobertura, consumo de energia do nó final e escalabilidade. As tecnologias empregadas até o momento, por exemplo, redes de sensores sem fio (*WSN*) e tecnologias celulares, não conseguem lidar simultaneamente com esses três requisitos. Nesse contexto, surgiu o conceito de *LPWAN* (*Low Power-Wide Area Network*), uma solução inovadora, como alternativa para fornecer conectividade de baixo custo e baixo consumo de energia aos nós finais, espalhados em uma área ampla (IBORRA et al, 2018). Na *WSN*, o *Wi-Fi* e o *Bluetooth* possuem normas estabelecidas e atendem bem a aplicações relativas à comunicação de dispositivos pessoais. A tecnologia celular é um sistema que atende fortemente aplicações que necessitam de alta taxa de transmissão de dados. Já a *LPWAN* oferece vários anos de vida útil das baterias e foi desenhada para sensores e aplicações que necessitam enviar poucos dados por longas distâncias algumas vezes por hora e em ambientes variados (LoRa-ALLIANCE, 2015).

As diferenças conceituais entre os padrões de *WSN*, redes celulares e *IoT* podem ser observadas na Tabela 1. A maioria dos recursos necessários para a *IoT* é satisfeita pelas diferentes plataformas *LPWAN* de mercado (RAZA et al, 2017). Uma dessas plataformas é o *LoRaWAN*, provida pela *LoRa Alliance*, que, posicionada em conjunto com a *SigFox*¹⁰, estão no topo do ranking de plataformas que recebem maior atenção em aplicações para a *IoT*.

⁹ *IF*, Internet do Futuro ou FI, *Future Internet*. Termo criado por pesquisadores de todo o mundo, para designar as arquiteturas, alternativas, aplicações, necessárias para a internet, considerando as constantes evoluções.

¹⁰ *SigFox* é uma operadora de rede global francesa, fundada em 2010, que constrói redes sem fio para conectar objetos de baixa potência, como medidores de energia e relógios inteligentes (sigfox.com).

Em termos comparativos, embora as duas soluções ofereçam recursos semelhantes aos seus usuários, as abordagens tecnológicas são diferentes. O *SigFox* apresenta um esquema de transmissão altamente fechado e limitado, com pouca capacidade de adaptação, empregando uma tecnologia proprietária de banda ultra estreita com taxa de dados de *uplink* máxima de 100 bps e uma carga útil máxima de pacotes de 12 bytes. Por outro lado, o LoRaWAN apresenta uma solução mais avançada que permite ao usuário final adaptar o sistema às suas necessidades (VEJLGAARD et al, 2017). Como é possível notar, em termos de crescimento da Internet das Coisas, a LPWAN e consequentemente o LoRaWAN são elementos fundamentais.

Tabela 1 – Comparação entre os sistemas WSN, redes celulares e IoT

	WSN	Redes Celulares	IoT
Largura de banda	Limitada	Alta	Limitada
Tráfego	Esporádico ¹¹	Contínuo	Esporádico ¹¹
Dispositivos	Grande número	Número limitado	Grande número
Cobertura	Muito pequena	Células de pequena área	Ampla
Custos	Reduzidos	Alto	Reduzidos

Fonte: Autoria própria.

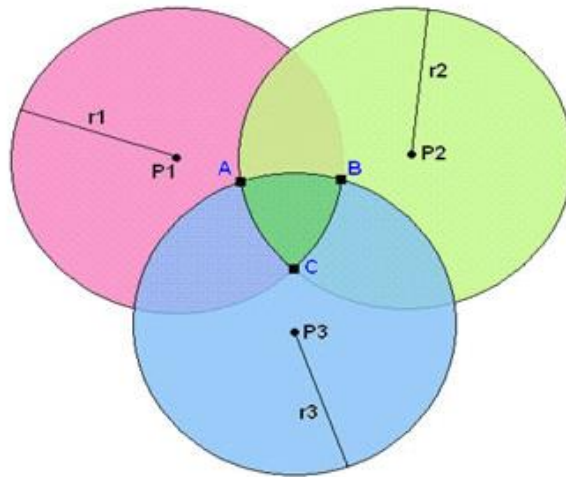
Novas verticais no paradigma da *IoT*, como cidades inteligentes, agricultura inteligente, monitoramento de mercadorias entre outras, vêm surgindo com um forte leque de aplicações. Uma dessas aplicações, de grande relevância e que demanda estudos contínuos é a localização de objetos (2D ou 3D) em uma rede. Em exemplos como, cuidados com idosos (FERNANDES et al, 2020), localização de animais no pasto (PANICKER et al, 2019), entre outros, é possível constatar a importância deste tópico.

A primeira etapa no desenvolvimento de um estudo de localização, é a escolha do método mais apropriado. Os métodos mais utilizados são a Triangulação, a Trilateração e a Multilateração (FARGAS et al, 2017). A Trilateração tem como premissa conhecer três posições fixas e a distância que cada uma está em relação ao ponto cuja posição é desconhecida, gerando três circunferências. Como resultado, surge uma região candidata à posição desconhecida, delimitada por três pontos (A, B e C, conforme Figura 5). A diferença na Multilateração é a inserção de mais pontos fixos, diminuindo a região de incerteza. Por outro lado, a Triangulação utiliza os ângulos de chegada dos sinais entre o emissor e os receptores, por meio da técnica *AoA* (*Angle of Arrival*), em cada uma das posições fixas pré-determinadas (BELLECIERI et al, 2015; ANJUN et al, 2020). A partir desses ângulos e a reta entre os

¹¹ Alguns tipos de aplicações específicas, podem requerer um tráfego contínuo, porém, o mais comum são aplicações na WSN ou IoT que utilizam o tráfego em momentos descontínuos (esporádicos).

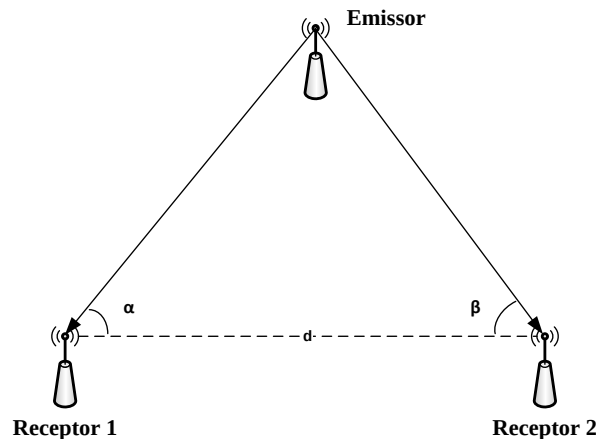
receptores, forma-se um triângulo possibilitando determinar a posição do emissor (conforme Figura 6). Como será possível verificar, este trabalho utiliza a Trilateração, calculando as distâncias entre cada posição fixa e o ponto desconhecido, por meio da técnica do *RSSI* (*Receive Signal Strength Indicator*). A partir dessas três distâncias, utilizando-se equações trigonométricas, é feito o cálculo da posição estimada do ponto desconhecido.

Figura 5 – Exemplo de Trilateração



Fonte: Autoria própria

Figura 6 – Exemplo de Triangulação



Fonte: Autoria própria

Dessa forma, na etapa seguinte, se faz necessário a escolha da técnica para cálculo da distância entre dois pontos, em uma rede de sensores sem fio (*WSN*). As técnicas utilizadas na *WSN*, normalmente se baseiam na troca de sinal entre os nós (BELLECIERI et al, 2015). Como alguns exemplos temos:

- *Time of Arrival (ToA)*: É uma técnica baseada no tempo que o sinal leva para chegar de um nó ao outro. Necessita que os dois lados tenham um relógio sincronizado,

para que, juntamente com a velocidade de propagação, o receptor possa calcular a distância.

- *Angle of Arrival (AoA)*: Neste método, utiliza-se o ângulo de chegada do sinal nas antenas receptoras. Para isso, são necessárias antenas especiais e ao menos dois nós receptores.
- *Receive Signal Strength Indicator (RSSI)*: Neste caso, a técnica baseia-se na intensidade do sinal sem fio trocado entre transmissor e receptor. Esse sinal é medido em decibéis (dBm) numa escala negativa. O sinal está sujeito a interferências de vários fatores, como, potência do transmissor, sensibilidade do receptor, atenuação do meio, perda de caminho (*path loss*) e outros sinais presentes.

Visto que, *ToA* e *AoA* são técnicas que necessitam de circunstâncias especiais como maior parametrização, antenas especiais e maior número de receptores, a *RSSI* é a técnica que vem sendo mais expressivamente utilizada para o cálculo de distâncias e localização em redes WSN, mesmo considerando as possíveis interferências. Existem outras técnicas que podem ser empregadas, algumas das quais serão comentadas na sequência deste trabalho.

Além das vantagens citadas, em relação ao *ToA* e *AoA*, o *RSSI* é mais difundido por sua simplicidade de medição e por não necessitar de *hardware* adicional para medida da intensidade do sinal. As equações para cálculo da distância por meio do valor do *RSSI*, incorporam fatores de correção das perdas do meio, como perda de caminho e atenuação do meio (SILVA, 2014). Outros fatores a serem considerados, são as novas tecnologias de rádios transmissores, que possibilitam leituras de sinais mais precisos, associados a técnicas que utilizam grande número de leituras e cálculos de desvio padrão médio e erro quadrático médio (FAHEEM et al, 2010).

Como é possível constatar, a grande maioria dos trabalhos relacionados a este projeto, utilizam o cálculo da distância a partir do *RSSI*, para localização 2D e 3D. Pode-se dizer que é a técnica mais utilizada, de melhor custo benefício e melhores resultados (BENKIC et al, 2008).

3.2 Trabalhos Relacionados

A localização de objetos numa rede sem fio, tem sido um desafio em diversas aplicações *indoor* e *outdoor*. A propagação de sinais nos ambientes, apesar de poderem atravessar objetos e obstáculos físicos, sofrem diversos tipos de interferências. Os principais fenômenos envolvidos são reflexão, refração, difração e dispersão, além da atenuação. O ambiente por si só, mesmo sendo *outdoor* (com linha de visada), já atenua o sinal pela própria distância entre os nós, fazendo com que sua potência seja menor na recepção (SILVA, 2014). A localização é normalmente classificada como de livre alcance ou baseada em uma rede.

O livre alcance, normalmente ligada à localização *outdoor*, não utiliza *hardware* especializado para medida de distância, sendo facilmente auxiliado pelo uso de sistemas *GPS*. Porém, essa prática considera uma localização menos precisa. Desse modo, o uso de redes de sensores é geralmente preferido (BONAFINI et al, 2019). Como pode-se observar, a localização *outdoor* apresenta grandes perdas por atenuação e dispersão do sinal em função das grandes distâncias entre os nós transmissor e receptor. Além disso, aplicações *outdoor* são mais facilmente satisfeitas com *GPSs*. Quanto a localização *indoor*, embora também se tenha que lidar com as perdas inerentes aos obstáculos físicos, os novos modelos de rádios transmissores com maior grau de sensibilidade e os métodos aplicáveis para correção do cálculo da distância, possibilitam se obter maiores ajustes e melhores resultados.

Como dito anteriormente, além das técnicas para dimensionamento de distâncias já citadas (*ToA*, *AoA*, *RSSI*), existem outras que serão abordadas na sequência. Uma técnica utilizada para triangulação das distâncias em 2D é a *TDofA* (*Time Difference of Arrival*), uma derivação da *ToA* em que apenas os transmissores são sincronizados, mas os receptores não, medindo-se a diferença de tempo de chegada do sinal de cada transmissor. Da mesma forma, se faz necessário o sincronismo entre os nós, aumentando a probabilidade de erros (FARGAS et al, 2017).

Outra técnica similar à *ToA* é a *ToF* (*Time of Flight*), que utiliza o tempo de propagação do sinal entre dois nós, como vemos em Falhi e Guennoum (2011), que obtiveram bons resultados, porém, com método de cálculo complexo. A *DoA* (*Direction of Arrival*) é uma técnica praticada na localização 2D, parecida com a *AoA*, que se utiliza da direção de chegada do sinal enviado pelo nó transmissor nos receptores. Essa técnica necessita de antenas diretivas especiais, cálculos complexos e sinalização bidirecional (PASSAFIUME et al, 2016). O *GPS* também é uma técnica bastante empregada, como vemos em Anthrayose e Payal (2017), onde dezenas de nós fixos associados a um *GPS*, realizam a triangulação 2D aproximada do objeto. Entretanto, em se tratando de técnicas para triangulação das distâncias, como já visto, a *RSSI* é a mais utilizada na localização 2D.

O trabalho de Zhao e Wang (2017), classifica a *RSSI* como a técnica de menor custo associada a melhor precisão no cálculo de distância, em relação às outras técnicas apresentadas. Todas estas técnicas podem ser utilizadas tanto para localização 2D como para 3D, tendo como variantes os métodos de cálculo empregados e as tecnologias de rede *WSN*. Na localização 3D, a *RSSI* também é a técnica mais utilizada para cálculo das distâncias 2D, associada a alguma outra técnica para definição da posição 3D, como a *TDofA* (HERNADEZ et al, 2017), *ToA* e *AoA* (LUO et al, 2017; ANJUM et al, 2020). Até o momento, nas pesquisas realizadas para este

trabalho, não foi encontrada nenhuma técnica que utilize somente os sinais de rede para localização 3D.

Em se tratando de métodos de cálculo (triangulação, trilateração etc.) e tecnologias de rede WSN (*ZigBee*, *GPS*, *Wi-Fi* entre outras), a variedade também é grande. Como exemplo, temos uma aplicação onde são propostos três nós de referência trabalhando com protocolo *ZigBee*, realizando uma triangulação geométrica a partir de áreas circulares. Os resultados obtidos apontam um erro médio de 22,27% em relação à posição 2D real, o que representa aproximadamente 4 metros, ou seja, um valor muito alto em relação ao que se observa em outros trabalhos (KRISTALINA et al, 2016).

Alguns métodos podem ser de difícil execução e baixa aplicação real. Em um modelo de localização 3D *indoor*, utiliza-se um robô, que sempre em movimento, faz um mapeamento de propagação de sinal *Wi-Fi* na área em estudo e, através de método Gaussiano identifica a posição do objeto (JIRKU et al, 2016). Além de um método de alto custo e aplicação limitada, os resultados apontam erros na faixa de 2 a 3 metros. Um exemplo, agora *outdoor* de localização 3D, utiliza um Veículo Aéreo Não Tripulado associado a *GPS*, baseado num sistema complexo envolvendo um grande número de nós de referência e algoritmo próprio de cálculo (VILLAS et al, 2013). Outro método bastante interessante e de aplicação em alguns trabalhos, utiliza um cubo como volume de teste, com nós de referência posicionados em determinados vértices. O cubo é ainda subdividido internamente em planos horizontais e verticais, o que colabora nos cálculos. Porém, ao associar a técnica *TDoA*, o erro resultante ocorreu em torno de 1,0 metro (HERNÁNDEZ et al, 2017).

É importante observar, que cada vez mais os trabalhos na área de localização de objetos têm utilizado o protocolo LoRa como tecnologia de rede sem fio. A utilização de nós LoRa associados à equação da distância, possibilita um vasto campo de melhorias no cálculo de posição 2D, em função da sua tecnologia (LAM et al, 2017). Com o surgimento da *LPWAN*, o protocolo LoRa tomou um lugar de destaque em muitos estudos e desenvolvimentos para Internet das Coisas e Cidades Inteligentes, por meio do módulo LoRa (redes ponto a ponto), bem como pelos *gateways* LoRaWAN.

Por exemplo, Tzortzakis, Papafotis e Sotiriadis (2017), apresentam um Sistema de Monitoramento Ambiental baseado em LoRa e LoRaWAN para Cidades Inteligentes, totalmente funcional, de baixo custo e sem perdas de pacotes nas transmissões de dados. Testes realizados em simulador LoRa (LoRaSim), utilizando diferentes modelos de perda de caminho (*path loss*), demonstram a grande capacidade do LoRa e LoRaWAN em se adequar a aplicações com medição de distâncias por meio de seus parâmetros principais (SPISANTE et al, 2019).

Assim também, testes de propagação *indoor* de módulos LoRa (ponto a ponto), entre os doze andares de um prédio, demonstram que a comunicação entre os dispositivos se mantém com boa qualidade, apesar dos obstáculos e de toda alvenaria (TRINH et al, 2017). Inclusive trabalhos recentes, utilizando o LoRa e *RSSI* para localização, em comparação com outras tecnologias, confirmam seu melhor resultado (Lazaro et al, 2021).

A conectividade das diversas tecnologias empregadas na *IoT*, dependem de taxa de dados, longa distância, consumo de energia e topologia. As tecnologias usualmente empregadas, como *GPS*, *ZigBee*, *WiFi* e Celular não atendem as necessidades para aplicações de localização e rastreamento. Em contrapartida, o protocolo LoRa vem se mostrando disponível em suprir essas necessidades (ANJUM et al, 2020).

No que se refere ao Rastreamento de objetos, a necessidade de desenvolvimentos para aplicações na *IoT* é seguramente um ponto de muita relevância, porém, que pouca informação se tem ainda a respeito. Muito se fala em Redes Multimídia de Sensores Sem Fio¹², para rastreamento de objetos, com aplicações nas áreas de segurança, saúde e controle de tráfego. Esse novo conceito, procura mesclar a *WSN* com equipamentos de multimídia, como câmeras e sensores de presença (KÜÇÜKKEÇECİ et al, 2019). Nota-se que este conceito não atende às necessidades de aplicações na *IoT*, sendo de alto custo, complexidade elevada e alta taxa de transmissão de dados. Por outro lado, entre os poucos trabalhos encontrados até o momento, em que se relacionam LoRa ao rastreamento, são utilizadas associações com outros sistemas de localização como *GPS*, sendo o LoRa para comunicação de dados entre *gateways* (PANICKER et al, 2019; NUGRAHA et al, 2018; KIM et al, 2017).

Diante dessas análises, percebe-se a importância no desenvolvimento de novas técnicas para a Localização e o Rastreamento 3D nas aplicações da *IoT*. Com isso, torna-se essencial o esforço necessário para implementação e validação da plataforma proposta neste trabalho, a qual tem entre seus objetivos, ser de baixo custo, fácil compreensão e simples aplicação. Para tanto, as ferramentas escolhidas, como Trilateração e *RSSI*, se apresentaram como as mais adequadas para atingir a esses objetivos.

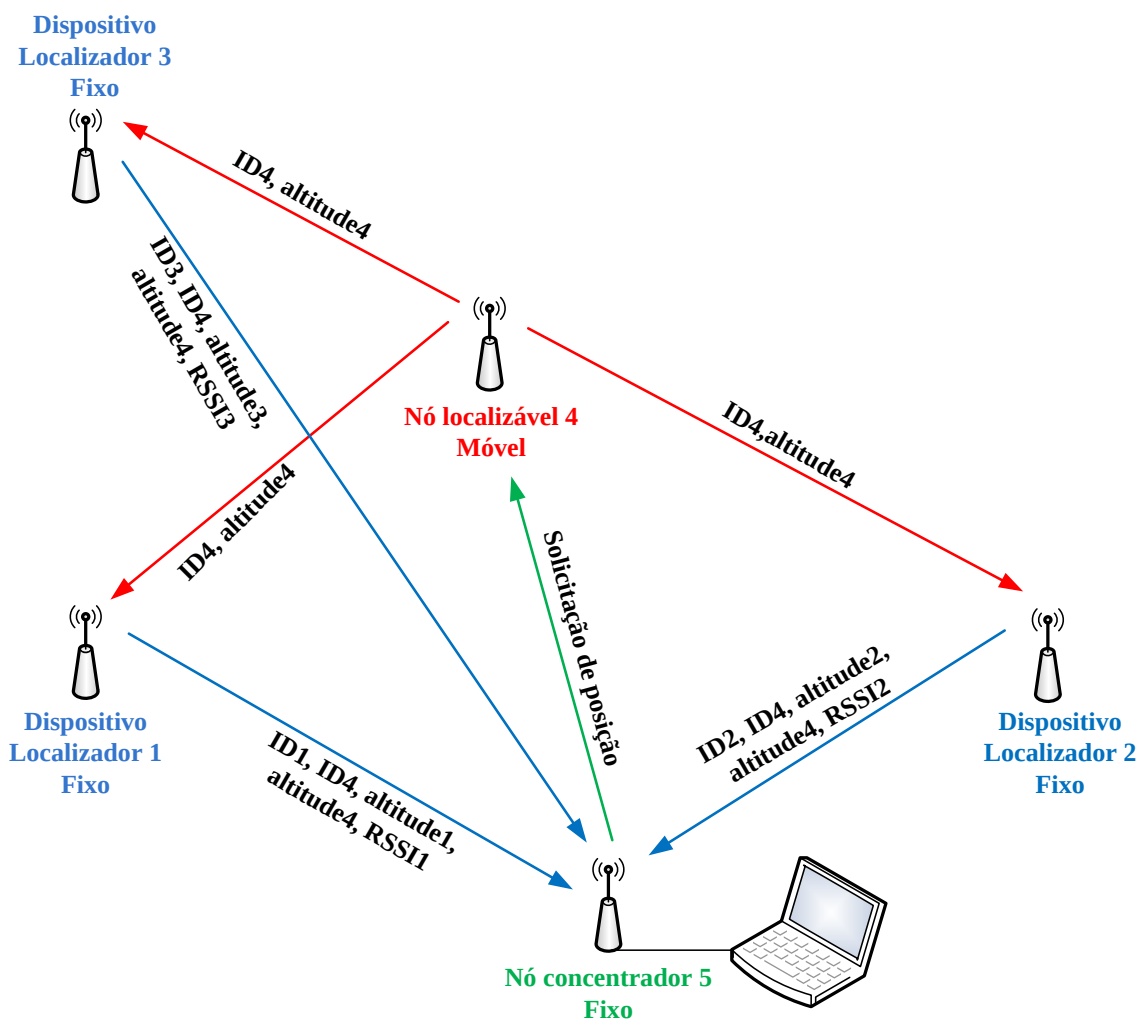
¹² Redes Multimídia de Sensores Sem Fio, ou do original, *Wireless Multimedia Sensor Networks (WMSN)*. São redes que utilizam dispositivos multimídia, como câmeras de vídeo por exemplo, integrados a outros dispositivos da rede, que registram e transmitem informações do ambiente, como movimento e posição. Tem sido aplicada em sistemas de vigilância, monitoramento ambiental, cuidados de saúde, entre outras.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Proposta do Trabalho

A proposta deste trabalho foi o desenvolvimento de um sistema para Localização 3D de objetos (representado por um nó), utilizando comunicação em uma rede sem fio LoRa e a utilização desse mesmo sistema para Rastreamento de objetos (objeto em movimento), dentro da mesma área de testes (área de cobertura do sistema). A figura 7 apresenta a plataforma proposta para Localização 3D:

Figura 7 - Plataforma de Localização 3D



Fonte: Autoria própria.

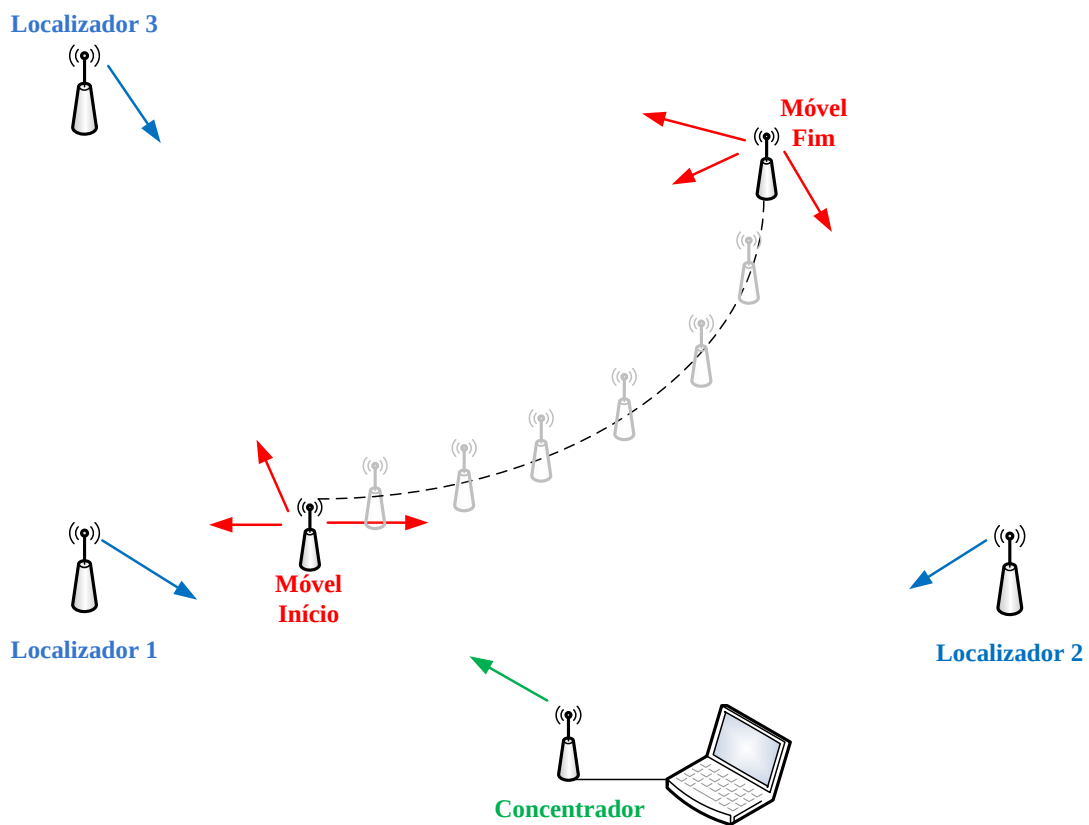
O sistema disposto acima, apresenta uma rede sem fio baseada no protocolo de comunicação LoRa, na faixa de 915 MHz. A rede é composta por ao menos quatro elementos fixos, sendo neste caso três Localizadores e um Concentrador, além de ao menos um elemento móvel, o Localizável. O Concentrador é o início do processo, enviando uma solicitação de posição ao Localizável. Ao receber a mensagem do Concentrador, o Localizável monta um

pacote de dados contendo sua identificação (*ID4*), mais a sua altitude (*altitude4*) e o envia ao mesmo tempo a todos os Localizadores.

A partir da mensagem recebida do Localizável, cada Localizador monta um novo pacote, contendo as informações do Localizável (*ID4* e *altitude4*), mais a identificação e altitude do Localizador (por exemplo *ID1* e *altitude1*), mais o valor da potência do sinal trocado entre Localizável e Localizador (por exemplo *RSSI1*), e o envia ao Concentrador. Com essas informações do Localizável e cada Localizador, o Concentrador executa o cálculo da posição (*x, y, z*) do Localizável.

Esse mesmo processo foi utilizado tanto para a localização como para o rastreamento, sendo que para este, o tempo de aquisição de dados e cálculo de cada posição foi variado, a fim de verificar o mais real possível, a trajetória do objeto em movimento (Figura 8).

Figura 8 – Plataforma de Rastreamento



Fonte: Autoria própria.

A descrição de cada um dos elementos na rede é a seguinte:

1- Nó Concentrador (Nó 5): O Concentrador possui duas responsabilidades. A primeira é enviar uma solicitação de localização ao Nó Localizável. Esse pedido, é emitido continuamente a uma taxa que pode ser variável. Na etapa de localização, a taxa

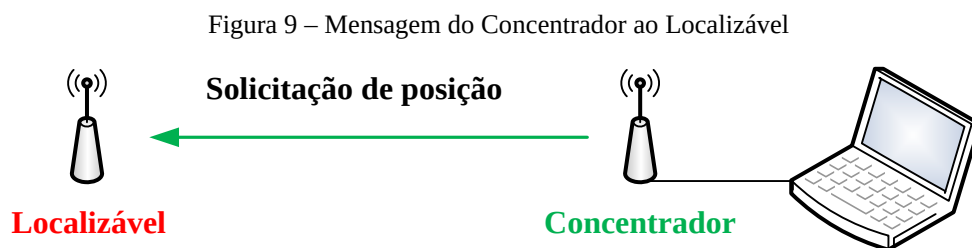
utilizada foi de 2,5s (dois segundos e meio) e no rastreamento a taxa foi de 0,5s (meio segundo). A segunda função é a de receber os dados enviados pelos Localizadores e disponibilizá-los na porta serial do Notebook, onde este Nó está conectado. No Notebook, os dados são recebidos pelo aplicativo que contém o programa de cálculo de posição (LabVIEW). A cada recebimento de dados, o programa executa os cálculos necessários e disponibiliza os resultados relativos à posição 3D do Localizável;

2- Nó Localizável (Nó 4): O Localizável representa o objeto móvel que poderá assumir qualquer posição dentro da área de teste e ter sua localização determinada. Ao receber a solicitação de localização do Concentrador, o Localizável prepara e envia aos Localizadores 1, 2 e 3 um pacote de dados contendo sua identificação (*ID4*) e sua altitude (altitude4);

3- Dispositivos Localizadores (Nós 1, 2 e 3): Os Localizadores (1, 2, 3) são nós fixos previamente instalados na área de teste, em posições específicas. Ao receberem as informações enviadas pelo Localizável, os Localizadores montam individualmente, um novo pacote de dados e os enviam para o Concentrador, com uma diferença de tempo entre eles (a partir do Dispositivo 1 em sequência o 2 e o 3), com a finalidade de garantir o recebimento dos dados no Concentrador, sem empacotamento. Na etapa de localização, os intervalos de tempo foram de 0,5s (meio segundo) e no rastreamento foram de 100ms (cem milissegundos).

O formato de cada pacote de dados trocados na sequência do processo acima, é conforme descrito:

a) Solicitação do Concentrador ao Localizável (Figura 9):



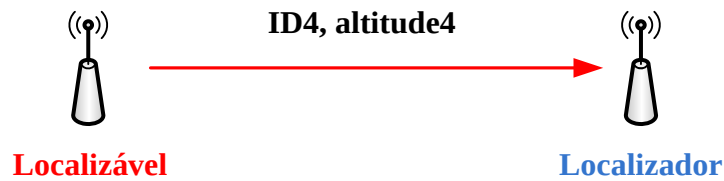
Fonte: Autoria própria.

Mensagem enviada: GETDATA

Sendo: GETDATA uma palavra que representa a informação “getdata”, código que o Localizável identifica como um pedido de localização.

b) Dados do Localizável enviados aos Localizadores (Figura 10):

Figura 10 – Mensagem do Localizável ao Localizador



Fonte: Autoria própria.

Mensagem enviada: N1 + FDATA + Alt

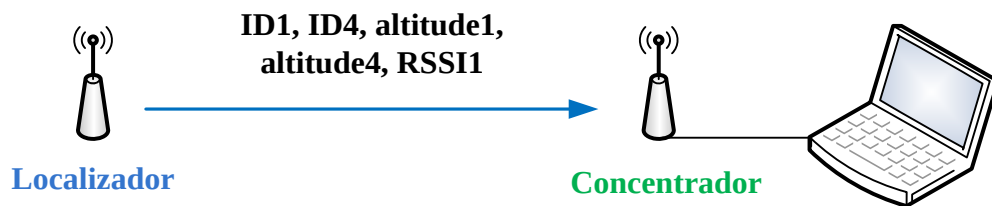
Sendo: N1 = 0xBA: número Hexadecimal que representa a identificação do Localizável.

FDATA = “Data=”: código que será reconhecido pelo Localizador, identificando o dado que vem a seguir.

Alt = valor da altitude do Localizável.

c) Dados enviados dos Localizadores ao Concentrador (Figura 11):

Figura 11 – Mensagem do Localizador ao Concentrador



Fonte: Autoria própria.

Mensagem enviada: F1DATA + values

Sendo: F1DATA = “F1”: código para identificação do Localizador.

Values = ID do Localizável + altitude do Localizador + altitude do Localizável + RSSI.

Formato da Mensagem recebida e tratada no Concentrador: ID do Localizador# ID do Localizável: Altitude do Localizador: Altitude do Localizável: RSSI entre Localizador e Localizável.

4.2 Hardware e Software

Os diversos dispositivos envolvidos nessa rede, têm sua constituição formada por componentes de mercado e programação aberta. As descrições do *Hardware* e *Software* utilizados nos Dispositivos são apresentadas a seguir:

Hardware

Na construção dos dispositivos que compõe a plataforma, foram utilizados microcontroladores, rádios transmissores de RF (Rádio Frequência) e sensores de altitude. O microcontrolador é um pequeno computador num único circuito integrado o qual contém um

núcleo de processador, memória e periféricos programáveis de entrada e saída. É utilizado em sistemas embarcados¹³, para, através de programação do usuário, realizar tarefas de acesso e controle de componentes externos como sensores, transmissores, chaves, entre outros, para aquisição, processamento e envio de dados. Neste trabalho foram utilizados microcontroladores ESP32 já com o rádio LoRa embutido.

- Controlador ESP WIFI LoRa 32: Microcontrolador programável, 36 pinos, com *WI-FI*, *Bluetooth* e LoRa embutidos e as seguintes especificações de *hardware* (Tabela 2) e pinagem (Figura 12):

Tabela 2 – Especificações do ESP-WIFI LoRa 32

Chip Base	ESP32-D0WDQ6
Processador	Xtensa 32-Bitt LX6 Dual Core
Interfaces	SD card, UART, SPI, SDIO, I2C, LED PWM, Motor PWM, I2S, IR, contador de pulso, GPIO, sensor capacitivo, ADC, DAC, LNA pré-amplificador
Sensor no chip	Temperatura e Hall
Clock	80 a 240 MHz
Memória ROM	448 KB
Memória SRAM	520 KB
RTC	8 KB
Memória Flash	4 MB
Tensão de operação	2,7 V ~ 3,6 V
Corrente de operação	Média: 80 mA; Máxima: 500 mA
Temperatura de operação	-40 °C ~ +85 °C
Chip LoRa	Chip Base: SX1276 Frequência: 915 MHz Sensibilidade: -139 dBm (máxima) Tensão: 1,8 a 3,7 V Corrente: 10,8 mA (recepção) e 120 mA (transmissão) Temperatura: -40 °C ~ +85 °C Modo de operação: LoRa, FSK, GFSK e OOK Taxa de transferência: 0,018 a 37,5 Kbps Interface: SPI
Display OLED	Tensão 3,0 a 5,0 V Potência máxima: 80 mW Interface: I2C
Dimensões ESP LoRa total	52,00 mm x 25,00 mm x 5,00 mm

Fonte: Heltec Automation

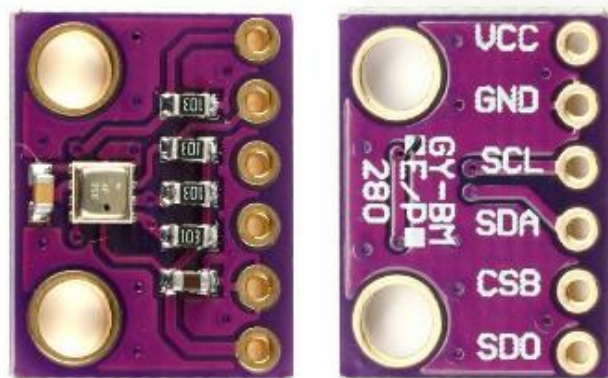
¹³ Sistemas embarcados são sistemas computacionais completos e independentes, mais simples que um computador de propósito geral, encarregados de executar apenas uma função determinada – tarefas pré-determinadas, com requisitos específicos – a qual executam geralmente repetidas vezes (pt.wikibooks.org).

Tabela 3 – Especificações do BME280

Tensão de operação	1,71 a 3,6 V
Corrente de operação	2,8 uA
Faixa de temperatura	0°C ~ +65°C; precisão de $\pm 1^\circ\text{C}$
Faixa de umidade	0 a 100%; precisão de $\pm 3\%$
Faixa de pressão	300 a 1100hPa; precisão de $\pm 0,2\text{ Pa}$
Faixa de altitude	-500 a +900 m; precisão de $\pm 1,7\text{ cm}$
Interface	I2C e SPI
Temperatura de operação	-40°C ~ +85°C
Dimensões (placa)	15,00 mm x 10,00 mm x 1,00 mm

Fonte: Datasheet Bosch BME280

Figura 13 – Pinagem do BME280



Fonte: Figura da internet

A partir destes componentes, foram montados os Dispositivos:

- 1- Nó Concentrador (Nó 5): Composto por um controlador ESP WIFI LoRa 32 e um Notebook;
- 2- Nó Localizável (Nó 4): Montado a partir de um controlador ESP WIFI LoRa 32 e um sensor BME 280;
- 3- Dispositivos Localizadores (Nós 1, 2 e 3): Montados, cada um deles, utilizando um controlador ESP WIFI LoRa 32 e um sensor BME 280.

Software

Como dito anteriormente, os componentes de Software têm suas programações abertas e estão descritas:

- 1- Rádio LoRa: Possui diversas bibliotecas de utilização para IDE de Arduíno. A biblioteca utilizada neste projeto foi <LoRa.h>;

2- Controlador ESP WIFI LoRa 32: As programações dos controladores ESP32 foram feitas a partir do IDE do Arduino – Ambiente de Programação Integrado. Em cada controlador foi incluído um *Watchdog*, para reinicialização automática dos módulos, caso o programa principal pare de rodar pelo tempo de 1 segundo;

3- Sensor de altitude BME 280: Possui diversas bibliotecas de utilização para IDE de Arduino, que podem ser encontradas no *GitHub*¹⁵. A biblioteca utilizada neste projeto foi <SparkFunBME280.h>;

4- Programas de calibração e teste: No Concentrador, os dados são recebidos e tratados nos programas de Calibração e de Teste, por meio da plataforma NI LabVIEW 2019 SP1. O LabVIEW é uma plataforma aberta de Software de engenharia de sistemas, com aplicações de teste, medição e controle, da National Instruments.

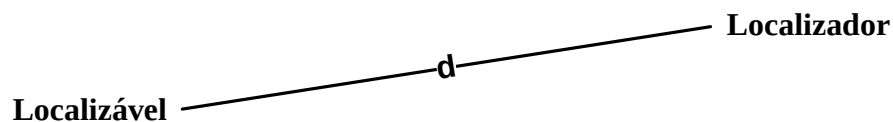
4.3 Equações da Localização 3D

O programa de teste se utiliza das formulações teóricas e equações matemáticas apresentadas a seguir, para realizar o cálculo da posição do Localizável dentro da área de testes.

4.3.1 Distância Localizável - Localizador

O primeiro cálculo necessário é o da distância entre o Localizável e cada um dos Localizadores (Figura 14):

Figura 14 – Distância d entre Localizável e Localizador



Fonte: Autoria própria.

O cálculo da distância entre dois Nós é realizado a partir da equação da distância (equação 1), que utiliza os parâmetros levantados na calibração do sistema e a potência RSSI do sinal entre esses Nós (FAHEEM et al., 2010; BELLECIERI et al., 2015).

Equação 1

$$RSSI = A - 10.n.\log(d)$$

Onde:

$RSSI$ = potência do sinal (dB) entre o Localizável e os Localizadores;

¹⁵ *GitHub*: É uma plataforma de hospedagem de código-fonte com controle de versão. Ele permite que programadores, utilitários ou qualquer usuário cadastrado na plataforma contribuam em projetos privados e/ou abertos, de qualquer lugar do mundo.

A = potência do sinal (dB) de referência de cada Localizador em relação ao Localizável, à distância de 1m;

n = expoente de propagação, específico para locais abertos ou fechados e com mais ou menos interferência do sinal;

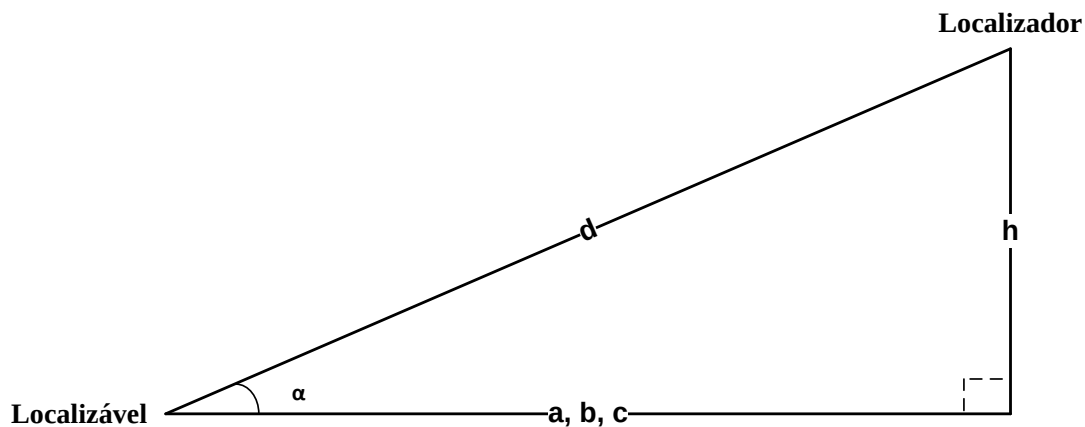
d = distância (m) entre o Localizável e os Localizadores.

Esse cálculo é realizado para o Localizável em relação a cada Localizador, resultando em d_1 , d_2 e d_3 .

4.3.2 Projeções no Plano X Y

A solução se baseia num plano X Y posicionado a uma altura Z . Em função das diferenças de altitude entre o Localizável e cada um dos Localizadores, se faz necessário levantar as projeções de d_1 , d_2 e d_3 no referido plano X Y. A partir dos pontos já conhecidos, formam-se triângulos retângulos entre o Localizável e os Localizadores, como mostra a Figura 15.

Figura 15 – Triângulo Retângulo entre Localizador e Nó 4



Fonte: Autoria própria.

As retas a , b e c calculadas (equação 2), são respectivamente as distâncias entre o Localizável e os Localizadores 1, 2 e 3, no plano X Y.

Equação 2

$$a(b \text{ ou } c) = \sqrt{d^2 + h^2}$$

Onde:

a , b ou c = distância no plano X Y do Localizador até o Nó 4;

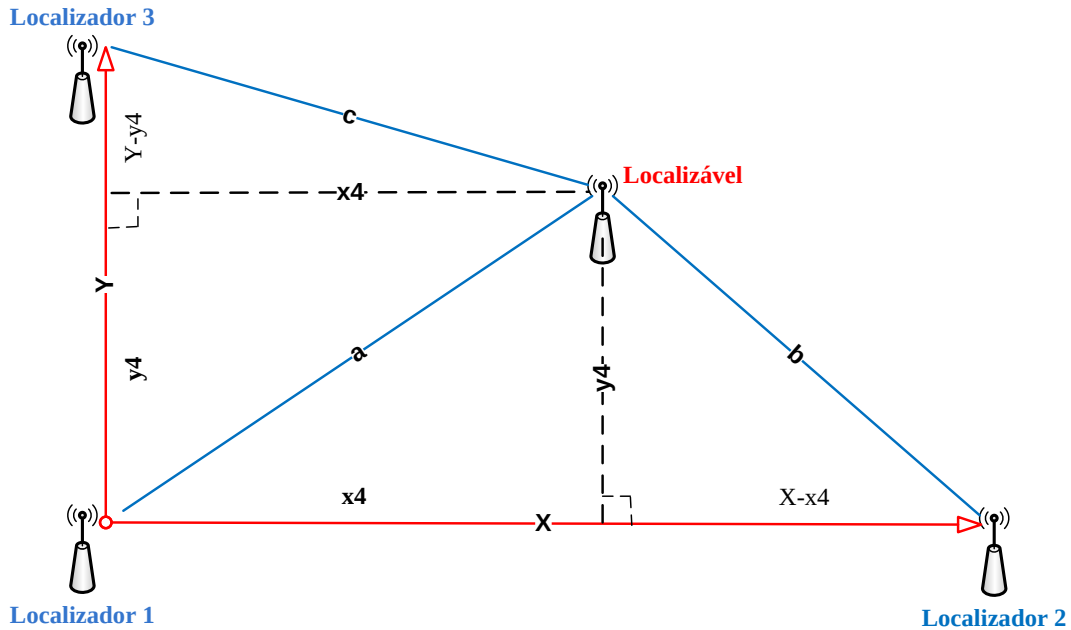
h = diferença de altitude entre o Localizador e o Nó 4;

d = distância entre o Nó 4 e os Dispositivos localizadores.

4.3.3 Ponto 2D no Plano X Y

O Plano X Y se estabelece formado pelo eixo X (distância do Localizador 1 ao Localizador 2), pelo eixo Y (distância do Localizador 1 ao Localizador 3) e pelas retas a, b e c calculadas anteriormente, tendo o Localizador 1 como o ponto O (ponto de partida de X e Y), como mostra a Figura 16.

Figura 16 – Plano X Y do Nó4



Fonte: Autoria própria

A partir dessas retas dispostas no plano X Y, é possível identificar dois triângulos escalenos que se formam, sendo um deles a, b, X e o outro a, c, Y. O Localizável é um ponto comum entre esses dois triângulos e tem sua posição 2D dada por x_4 e y_4 (respectivamente as projeções do Localizável no eixo X e no eixo Y). É possível verificar, portanto, na Figura 3, o surgimento de quatro triângulos retângulos após a introdução de x_4 e y_4 no desenho. Sejam eles: a, y_4 , x_4 ; b, y_4 , $X-x_4$; a, x_4 , y_4 ; c, x_4 , $Y-y_4$. Aplicando as teorias de cálculo trigonométrico para o triângulo escaleno e o triângulo retângulo, é possível calcular os valores de x_4 e y_4 de duas maneiras, como demonstrado nas equações 3, 4, 5 e 6.

Pelo triângulo a, b, X:

Equação 3

$$x_4 = \frac{a^2 - b^2 + X^2}{2X}$$

Onde:

a = distância entre Localizador 1 e Localizável;
 b = distância entre Localizador 2 e Localizável;
 X = distância do Localizador 1 ao Localizador 2;
 x_4 = projeção do Localizável no eixo X.

Pelo triângulo a, y_4, x_4 :

Equação 4

$$y_4 = \sqrt{a^2 - x_4^2}$$

Onde:

a – distância entre Localizador 1 e Localizável;
 x_4 – projeção do Localizável no eixo X;
 y_4 – projeção do Localizável no eixo Y.

Pelo triângulo a, c, Y :

Equação 5

$$y_4 = \frac{a^2 - c^2 + Y^2}{2Y}$$

Onde:

a = distância entre Localizador 1 e Localizável;
 c = distância entre Localizador 3 e Localizável;
 Y = distância entre Localizador 1 e Localizador 3;
 y_4 = projeção do Localizável no eixo Y.

Pelo triângulo a, x_4, y_4 :

Equação 6

$$x_4 = \sqrt{a^2 - y_4^2}$$

Onde:

a = distância entre Localizador 1 e Localizável;
 x_4 = projeção do Localizável no eixo X;
 y_4 = projeção do Localizável no eixo Y.

Tendo o valor de x_4 sido calculado duas vezes, o valor final adotado será a média entre esses dois valores ($x_4 = (x_4 \text{ da equação 3} + x_4 \text{ da equação 6}) / 2$). Da mesma forma, y_4 será a média entre os dois valores calculados ($y_4 = (y_4 \text{ da equação 4} + y_4 \text{ da equação 5}) / 2$).

4.3.4 Eixo Z

A posição 3D será finalizada com a obtenção do ponto z4 no eixo Z (z4 é altura em que se encontra o Localizável em relação ao solo ou ponto de referência). O ponto z4 é obtido por meio da leitura informada pelo sensor de altitude do Localizável. Esse valor faz parte do pacote de dados enviado pelo Localizável aos Localizadores, que por sua vez retransmitem ao Concentrador. Por esse motivo, os três dados de altitude recebidos devem ser iguais e são utilizados pelo programa de teste para a apresentação final da posição 3D calculada.

4.3.5 Erros

O programa de teste utiliza as posições x, y, z reais e calculadas para determinar os Erros de Posição ex, ey, ez e o Erro Quadrático eq da posição 3D, conforme equações 7 e 8.

Equação 7: Erro de posição

$$ex(m) = x_{real} - x_{calculado}$$

$$ex\% = \frac{ex}{x} * 100$$

$$ey(m) = y_{real} - y_{calculado}$$

$$ey\% = \frac{ey}{y} * 100$$

$$ez(m) = z_{real} - z_{calculado}$$

$$ez\% = \frac{ez}{z} * 100$$

Equação 8: Erro quadrático

$$eq = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (ex(i))^2 + (ey(i))^2 + (ez(i))^2}{n}}$$

Onde:

e_x, e_y, e_z = erros relativos a cada eixo;

e_q = erro quadrático;

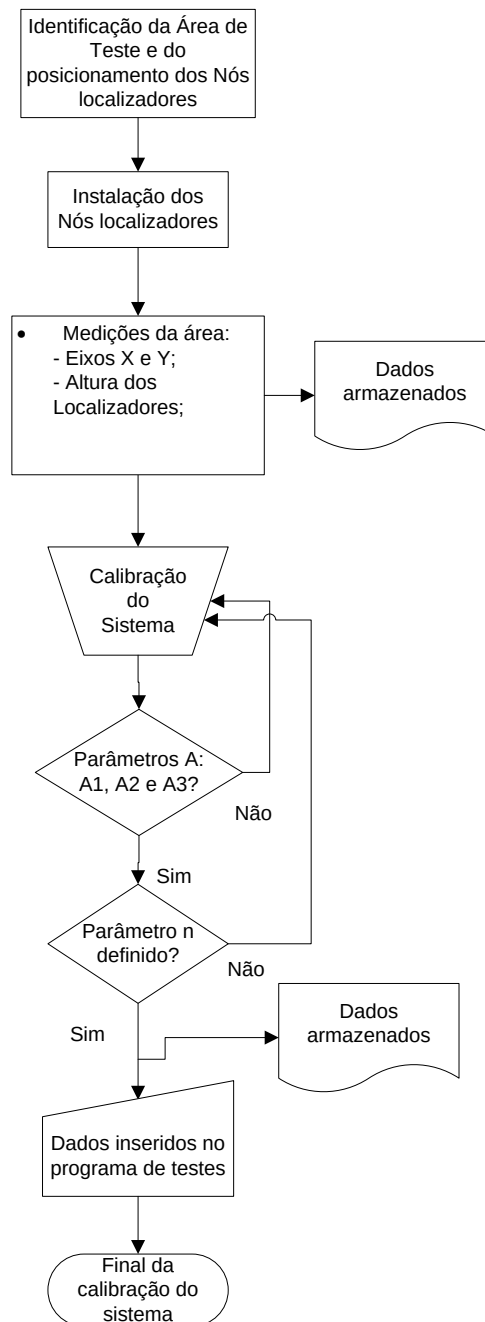
n = quantidade de medições realizadas.

5 DESENVOLVIMENTO

5.1 Descrição da Operação

A solução baseia-se num plano X, Y horizontal, posicionado em uma altura Z vertical. Alguns dados relativos à área onde será realizado o teste necessitam ser colhidos manualmente e introduzidos no programa de teste. Essa etapa é chamada de Calibração do Sistema e segue o fluxograma da Figura 17:

Figura 17 – Fluxograma da calibração do sistema



Fonte: Autoria própria.

A delimitação da área envolvendo o teste é feita por meio da determinação dos eixos X e Y do plano horizontal e do posicionamento dos Localizadores nessa área, o que indica também as alturas de cada Localizador (altura em relação ao nível zero, solo). Os Localizadores já são, portanto, instalados em suas posições. Os dados da área são registrados para posterior utilização.

Na sequência é feita a calibração do sistema. A calibração consiste na determinação dos parâmetros A e n da equação de cálculo de distância. O parâmetro A é determinado para cada Localizador em relação ao Localizável, conforme descrito:

- Ligar Concentrador, Localizadores 1, 2 e 3 e Localizável.
- Posicionar o Localizável a um metro de distância, na frente do Localizador 1.
- Aguardar o recebimento pelo Concentrador, das leituras do *RSSI* entre o Localizador 1 e o Localizável.
- Após a estabilização do sinal, registrar o valor do parâmetro A1. No caso de haver a ocorrência de dois valores de *RSSI* preponderantes no montante de dados recebidos, utilizar a média entre eles como parâmetro A1.
- Repetir o processo anterior para o Localizador 2 e anotar o resultado como parâmetro A2.
- Repetir o processo anterior para o Localizador 3 e anotar o resultado como parâmetro A3.

Com relação ao parâmetro n, inicialmente é escolhido um valor entre $n=2$ e $n=3$, considerando a quantidade de interferências possíveis no local, por meio de uma inspeção visual (n menor significa menor interferência). Na maior parte dos trabalhos referenciados, o valor mais utilizado foi $n=3$ (FAHEEM et al., 2010; BELLECIERI et al., 2015; LAM et al., 2017), contudo, nos testes realizados neste trabalho, o melhor valor de aplicado foi $n=2$.

Os dados levantados da área e dos parâmetros A e n são introduzidos manualmente na entrada de dados do programa do LabVIEW. A partir da calibração concluída, os testes de localização podem ser realizados, conforme descrito no fluxograma da Figura 18.

O Localizável é posicionado num ponto qualquer da área total de teste e sua localização real (x_{real} , y_{real} , z_{real}) é anotada e introduzida no programa de testes, para comparação e cálculo dos erros. A altitude do Localizável ao nível do solo da área de testes também é coletada e introduzida no programa de testes.

Figura 18 – Fluxograma do cálculo de posição



Fonte: Autoria própria.

O programa calcula automaticamente a posição ($x_{\text{calculado}}$, $y_{\text{calculado}}$, $z_{\text{calculado}}$), numa frequência de leituras e cálculos que pode variar de acordo com a aplicação. Neste trabalho, foram utilizados valores de 0,5s, 1,0s, 1,5s e 2,5s (meio segundo, um segundo, um segundo e meio e dois e meio segundos), conforme serão descritos na sequência. Também são calculadas as diferenças entre o ponto real e calculado, por meio dos erros (e_x , e_y , e_z) e do erro quadrático (e_q).

Todos esses valores calculados são plotados em gráficos (dos pontos x , y , z calculados) e histogramas (dos pontos e dos erros calculados), e exibidos nas telas de resultados e gráficos do programa. Após uma série de medições (entre 50 e 100 medições), é feito um “stop” no programa e todos os valores calculados são salvos em arquivo .txt, para posterior consulta.

Para realizar novo teste em outro ponto qualquer da área total de teste, basta reposicionar o Localizável e repetir o procedimento anterior, após a calibração. Com base nos resultados armazenados de todos os testes realizados numa determinada área de teste, pode-se avaliar a validade da ferramenta.

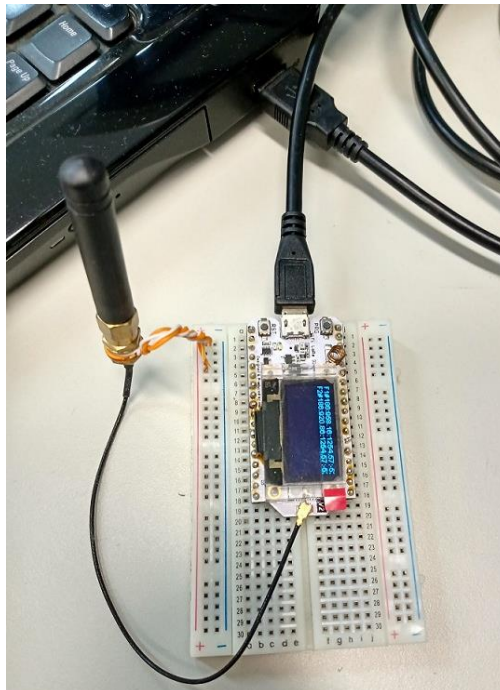
5.2 *Protótipos e Ambiente de Testes*

A montagem do sistema todo, requereu além da parte física, testes e estudos para montagem dos componentes e preparo do ambiente de testes.

5.2.1 Protótipos de testes

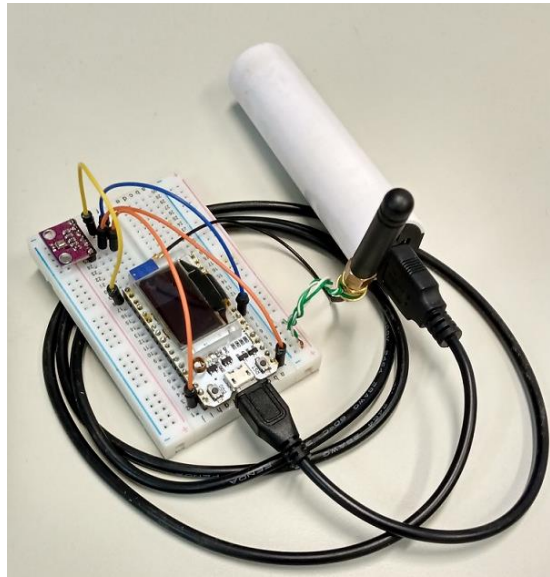
Os Dispositivos e Nós da plataforma, foram montados em *Protoboard* e alimentados por baterias recarregáveis de 3,3Vdc. Apenas o Nó 5 Concentrador foi alimentado através da conexão *USB* do Notebook. As Figuras 19 e 20 mostram as fotografias desses componentes:

Figura 19 – Concentrador



Fonte: Autoria própria.

Figura 20 – Localizável e Localizadores 1, 2 e 3 (4 nós iguais)

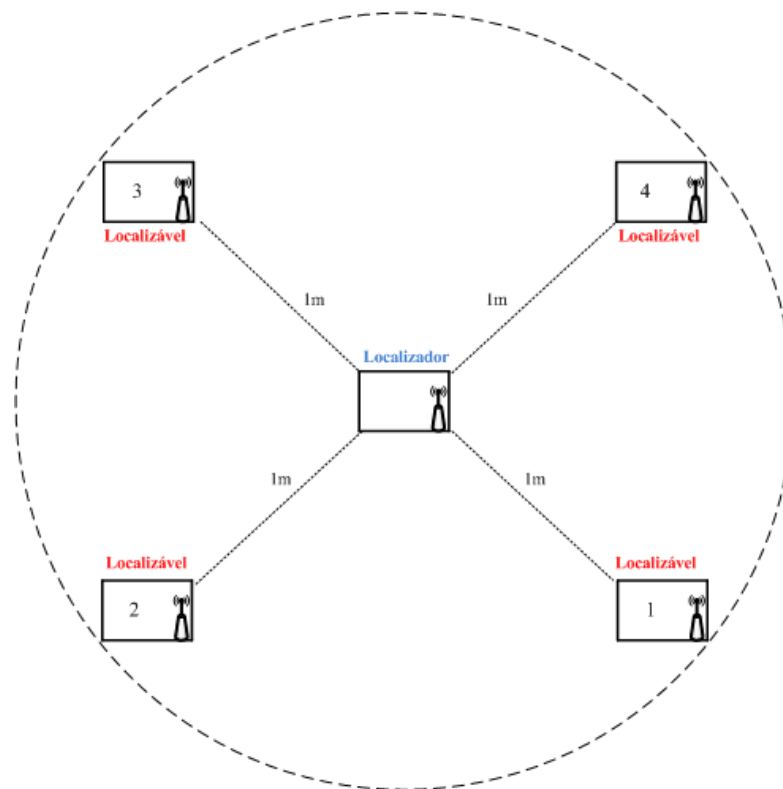


Fonte: Autoria própria.

5.2.2 Teste de posição das antenas

Foram realizados testes de recepção do sinal entre Localizador e Localizável, considerando as posições de visada das antenas, conforme Figura 21.

Figura 21 – Teste de posição de antenas



Fonte: Autoria própria

Com relação às antenas utilizadas, foram mantidas as originais, que acompanham os módulos ESP WIFI LoRa 32 (omnidirecional de 50mm).

O Localizador foi posicionado em uma região central e o Localizável assumiu quatro posições (uma por vez) equidistantes em um metro do Localizador. As antenas dos módulos foram posicionadas hora de frente, hora de costas e hora de lado uma da outra, e os valores de *RSSI* dos sinais trocados foram anotados e comparados. Os resultados demonstraram uma diferença de 1dBm a 3dBm na potência do sinal recebido, conforme a posição entre as antenas dos módulos.

O objetivo desse teste foi observar o comportamento da troca de sinais entre os módulos, em função do posicionamento de suas antenas, considerando que, embora os módulos Localizadores sejam fixos em suas posições, o Localizável assume posições diferentes dentro da área de testes.

Como conclusão, constatou-se a necessidade de se manter a posição relativa do módulo Localizável (posição da antena), em todas as etapas do processo de calibração e teste de posição, com a finalidade de diminuir possíveis perdas.

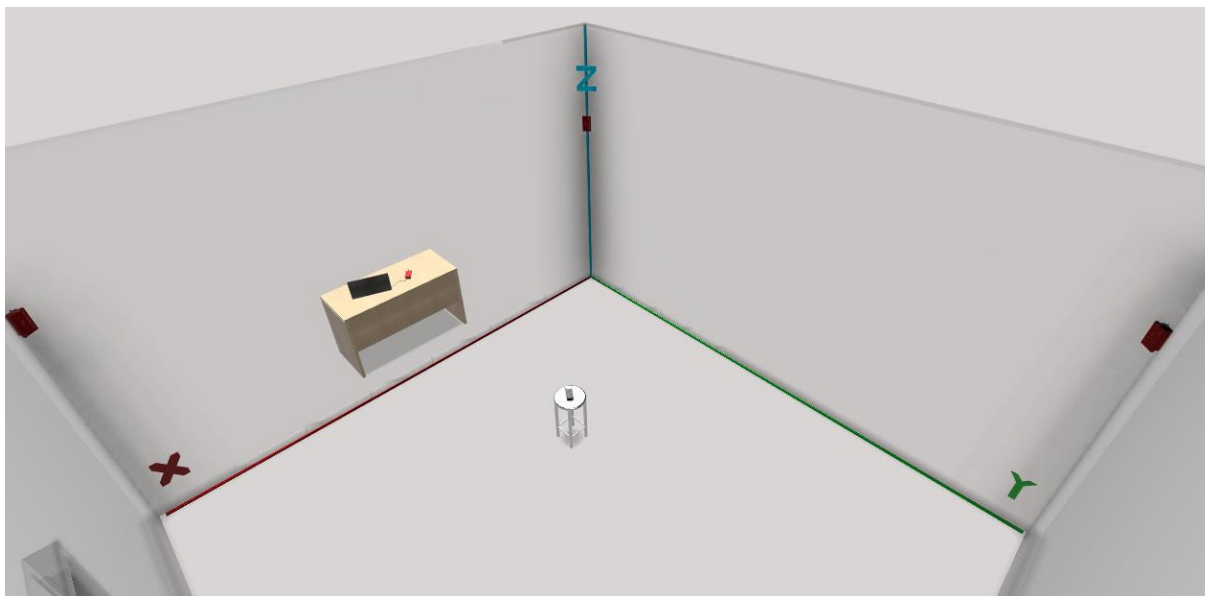
5.2.3 Ambientes de testes

Os testes foram realizados em dois tipos de ambientes, um ambiente de área fechada (*indoor*) e outro ambiente de área aberta (*outdoor*). Na área fechada, foi utilizado o Laboratório da UNESP e na área aberta foi utilizada uma Quadra poliesportiva.

Em todas as medições, os Dispositivos Localizadores foram posicionados seguindo o formato proposto para a plataforma, variando-se somente as alturas de cada um. O Localizável assumiu posições e alturas variadas em cada teste, dentro das respectivas áreas envolvidas.

A Figura 22 apresenta um modelo em 3D do ambiente padrão de testes. Os Localizadores, em vermelho na figura, são posicionados nas paredes ou apoiados em móveis, de forma a construírem os eixos imaginários X, Y e Z. O eixo X é a reta entre o Localizadores 1 e 2 e o eixo Y entre os Localizadores 1 e 3. O ponto O dos eixos cartesianos será o ponto do solo na reta vertical onde se posiciona o Localizador 1 e, portanto, essa mesma vertical que passa pelo Localizador 1 é o eixo Z.

Figura 22 – Vista interna do ambiente de testes



Fonte: Autoria própria

Com relação ao Localizável, temos o posicionamento para Localização 3D e para Rastreamento:

Localização 3D: Representado na Figura 25 sobre um banquinho, é posicionado na área dentro dos limites dos eixos X e Y (no retângulo formado por eles) e em alturas variadas. Após posicionado o Localizável, são coletados os valores reais do ponto 3D (x, y e z) a ser calculado. No caso da Localização, foi utilizado o parâmetro $SF=10$ em todos os LoRa, com um intervalo de tempo entre a recepção dos dados de 2,5s.

Rastreamento: O módulo foi fixado em um veículo com movimentação controlada manualmente (um robô controlado via *bluetooth*), em uma altura fixa, como pode ser visto na Figura 25. Foram estabelecidas algumas rotas para movimentação e testes, tendo sido colhidos os valores reais de diversos pontos de cada rota (inclusive pontos de início, meio e fim), para posterior comparação e análise. Para o Rastreamento, foram utilizados valores diferenciados tanto para o parâmetro SF como para o intervalo de tempo de recepção dos dados, como será visto posteriormente. O programa de cálculo permaneceu em funcionamento desde o ponto de início de uma rota, até o final dela.

O Concentrador, na figura junto ao Notebook sobre a mesa, posicionado para receber as informações do sistema.

Nesta vista por fora da área de teste, é possível verificar com mais detalhes cada componente do sistema e os eixos cartesianos. Os Localizadores não são todos necessariamente

posicionados nas mesmas alturas, podendo ser, dependendo do local, cada um alocado em uma altura diferente.

As Figuras 23, 24 e 25 apresentam fotografias de uma montagem real de teste de Localização e Rastreamento, no laboratório da UNESP, com indicação de todos os componentes, para uma melhor visualização do sistema:

Figura 23 – Foto 1 do Laboratório



Fonte: Autoria própria

Figura 24 – Foto 2 do Laboratório



Fonte: Autoria própria

Figura 25 – Foto 3 do Laboratório



Fonte: Autoria própria

Em seguida, as Figuras 26, 27 e 28 apresentam fotografias das montagens de testes na quadra de esportes, para Localização e Rastreamento, com a indicação dos componentes:

Figura 26 – Foto 1 da Quadra



Fonte: Autoria própria

Figura 27 – Foto 2 da Quadra



Fonte: Autoria própria

Figura 28 – Foto 3 da Quadra



Fonte: Autoria própria

5.2.4 Calibração de parâmetros

Em cada ambiente de teste foi feita a calibração do sistema, para adequação dos parâmetros das equações. Ao longo do desenvolvimento do trabalho, foi possível identificar

algumas particularidades do sistema proposto e dos parâmetros envolvidos. Essas particularidades foram estudadas e tratadas, com a finalidade de melhorar o processo e os resultados. Essas tratativas trouxeram ganhos ao projeto em relação à literatura estudada e estão relatadas nos itens a seguir:

Parâmetros do LoRa

Como visto em 2, o LoRa permite a configuração dos parâmetros de potência de transmissão (*txPower*), largura de banda (*BW*), fator de propagação (*SF*) e taxa de codificação (*CR*). O *txPower* foi configurado para o valor máximo (20dB), independente de se saber o valor original de cada módulo (o padrão costuma ser 17dB), tendo em vista a necessidade de aplicação em grandes áreas. Para *BW*, foi utilizado 125KHz, tendo como base esta ser a largura de banda de maior utilização entre as aplicações envolvendo LoRa (IBORRA et al., 2018).

Além disso, foram realizados testes ao longo deste trabalho alternando-se os valores de *BW*, sem que se tenha observado qualquer ganho nos resultados dos cálculos. Com relação ao *CR*, como esse parâmetro pode produzir um aumento significativo de dados transmitidos e para esta aplicação a necessidade de correção de algum erro de envio é menor do que a velocidade e robustez do sinal, foi adotado o valor mínimo de 4/5. Quanto ao parâmetro *SF*, como este implica na taxa de transmissão de dados, o valor máximo possível foi *SF*=10. Contudo, foi verificado que, o aumento do *SF* implica em um aumento no tempo de envio/recepção das mensagens (e cálculo da localização). Com *SF*=7, o tempo mínimo foi de 0,5s (meio segundo), enquanto que, com *SF*=10, esse tempo passou para 2,5s (dois e meio segundos). Com isso, foram utilizados os valores de *SF*=10 no cálculo de Localização e *SF*=7, *SF*=9 e *SF*=10 nos testes de Rastreamento.

Parâmetro A

Este parâmetro é um item da equação da distância (equação 1) e consiste na potência do sinal (*RSSI*) de referência, medido entre o Localizável e o Localizador, a uma distância de um metro entre eles. Assim, são obtidos A1, A2 e A3, respectivamente a cada um dos Localizadores. Foram verificados os dois métodos manuais relacionados, para levantamento do A:

- 1- O primeiro em bancada, posicionando o Localizável numa ponta e os Localizadores (um de cada vez) à distância de um metro, fazendo-se a leitura da potência do sinal. Somente depois, cada Localizador foi posicionado em seu ponto de teste na área em estudo. Este método foi chamado de **Amanual1**, para efeito deste trabalho;

2- O segundo diretamente no sistema montado, com cada Localizador já instalado, levando o Localizável a um metro de cada Localizador e medindo as potências dos sinais em sequência. Este método foi chamado de **Amanual2**, para efeito deste trabalho.

O método Amanual1 tem uma aplicação voltada a sistemas mais simples, onde se tem apenas dois nós envolvidos, um transmissor e um receptor, enquanto que, o método Amanual2 é mais apropriado para sistemas mais complexos, com mais nós envolvidos (uma rede). Em função disso e também considerando os resultados de testes realizados com os dois métodos, foi adotado para toda a realização deste trabalho, o método Amanual2.

Parâmetro n

É um parâmetro da equação da distância (Equação 1) e representa um expoente de propagação do sinal no ambiente. Como verificado nos trabalhos referenciados, os valores mais utilizados para esse parâmetro foram 2, 3 e 4, sendo que, quanto maior o valor, significa um ambiente mais poluído e com mais interferências ao sinal (FAHEEM et al., 2010; BELLECIERI et al., 2015; LAM et al., 2017).

O método mais comum para determinação de n é experimental, posicionando-se o Localizável em alguns pontos previamente conhecidos no ambiente de teste e comparando-se a posição real com a calculada. Neste trabalho foi adotado como padrão inicial $n=2$ para todos os testes, sendo confirmado posteriormente (ao longo dos testes) esse valor ou uma eventual correção.

Altitude do nó Localizável

A parametrização da altitude do Localizável é feita posicionando-se esse módulo ao nível do solo, na respectiva área de teste, e guardando esse valor na entrada de dados do programa de testes. Conforme descrito anteriormente (4.2), os sensores de altitude BME 280 possuem boa precisão de medição, porém, em medições contínuas apresentam picos irregulares pontuais, desviando a média dos valores medidos para um valor distante do real. Por essa razão e com a finalidade de melhorar a leitura da altitude e minimizar erros, foram introduzidos na programação dos dispositivos, dois subitens relativos aos sensores:

- 1- Parametrização máxima do filtro e da precisão de leituras de pressão e temperatura;
- 2- Restrição dos valores da altitude para que a diferença entre o valor instantâneo e o valor médio das 10 primeiras leituras não supere 30cm, para mais ou para menos. Essa diferença em alguns pontos da medição, demonstrou durante os testes, não interferir significativamente na média do total de leituras e consequentemente no cálculo da posição 3D.

Melhoria desenvolvida para o processo de calibração (Melhoria de A)

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho, foi identificada e elaborada uma técnica para melhoria da precisão no cálculo de localização, baseada na determinação de valores dos parâmetros A mais apropriados para as respectivas áreas de teste. Essa ideia surgiu a partir de um teste de propagação do LoRa realizado em laboratório. Foram coletados os valores de *RSSI*, por metro, de cada Localizador (F1, F2 e F3, coluna Medido), e comparados com os valores calculados a partir da equação da distância (F1, F2 e F3, coluna Calculado), conforme apresentado na Tabela 4. Os valores de *RSSI* medidos à distância de 1m, são os respectivos valores do parâmetro A de cada Localizador. Além desse valor de A, foi utilizado o valor do parâmetro $n=2$, na equação da distância, para obtenção do valor Calculado. Foram mantidas as antenas originais, que acompanham os módulos ESP WIFI LoRa 32, ao longo de todo o trabalho.

Tabela 4 – Teste de potência do sinal por metro

Distância (m)	<i>RSSI</i> (dBm)					
	F1		F2		F3	
	Medido	Calculado	Medido	Calculado	Medio	Calculado
1 (A)	-56	-56	-60	-60	-32	-32
2	-61	-62	-65	-66	-53	-38
3	-67	-66	-66	-70	-54	-42
4	-70	-68	-67	-72	-55	-44
5	-76	-70	-76	-74	-58	-46
6	-71	-72	-71	-76	-59	-48
7	-72	-73	-70	-77	-60	-49
8	-70	-74	-73	-78	-62	-50
9	-74	-75	-73	-79	-61	-51
10	-72	-76	-70	-80	-60	-52
11	-73	-77	-75	-81	-61	-53
12	-76	-78	-77	-82	-66	-54
13	-79	-78	-74	-82	-66	-54
14	-78	-79	-77	-83	-65	-55
15	-87	-80	-78	-84	-69	-56
16	-75	-80	-74	-84	-63	-56
17	-71	-81	-72	-85	-61	-57
18	-73	-81	-72	-85	-63	-57
19	-72	-82	-73	-86	-61	-58
20	-75	-82	-73	-86	-63	-58

Fonte: Autoria própria

A partir da comparação entre a curva esperada para os valores de *RSSI* (coluna Calculado) e uma curva de tendência baseada nos valores reais de *RSSI* recebidos (coluna Medido), notou-se que havia um distanciamento entre elas, capaz de causar erros consideráveis

no cálculo da localização 3D. Baseado nisso, foi então, desenvolvido o processo de estudo e melhoria do valor de A para cada Localizador, de maneira que as curvas Medido e Calculado se sobreponham o máximo possível, melhorando significativamente o cálculo de Localização.

Esse processo será descrito a seguir, usando um exemplo real do Localizador F1:

- 1- São levantados os valores de A (A1, A2 e A3) por meio do método Amanual2 de calibração;
- 2- Na sequência, são colhidos os valores de *RSSI* dos três Localizadores (F1, F2 e F3), em alguns pontos previamente conhecidos dentro da área de teste (no mínimo três pontos). Os pontos escolhidos devem ser espalhados dentro da área e não coincidentes com os pontos desconhecidos a serem determinados posteriormente;
- 3- Com os valores encontrados em 1 e 2, são montadas tabelas (uma para cada Localizador) relacionando os valores de *RSSI* calculados por meio da equação da distância (com o valor do A medido) e os valores reais de *RSSI* dos pontos conhecidos utilizados.

A Tabela 5 apresenta um exemplo para dados de F1.

Tabela 5 – *RSSI* de F1 com A medido

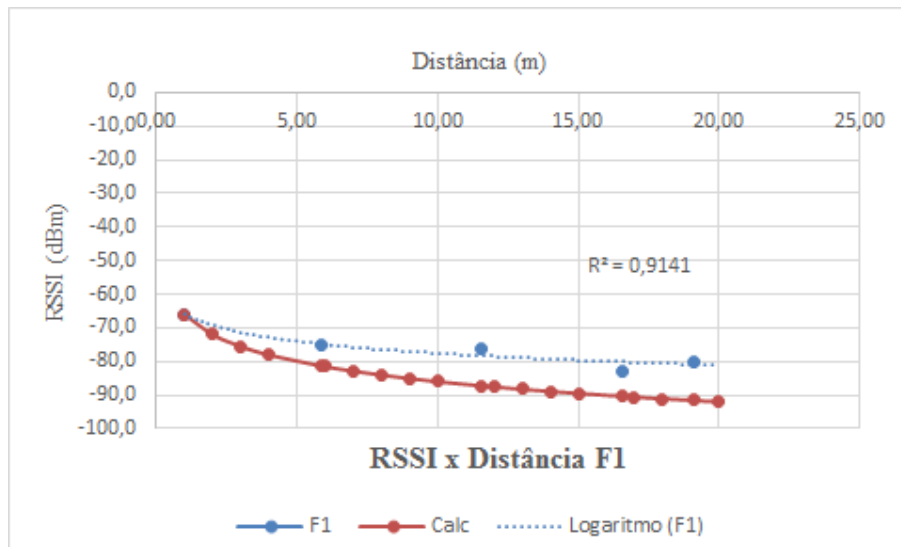
Distância (m)	<i>RSSI</i> (dBm)	
	F1	Calc
1,00	-66,0	-66,00
2,00		-72,02
3,00		-75,54
4,00		-81,27
5,85	-75,0	-81,34
6,00		-82,15
7,00		-82,90
8,00		-84,06
9,00		-85,08
10,00		-86,00
11,56	-76,0	-87,26
12,00		-87,58
13,00		-88,28
14,00		-88,92
15,00		-89,52
16,60	-83,0	-90,40
17,00		-90,61
18,00		-91,11
19,14	-80,0	-91,64
20,00		-92,02

Fonte: Autoria própria.

A primeira coluna da tabela traz as distâncias, em metros, entre o Localizador F1 o Localizável. A terceira coluna (Calc) apresenta os valores calculados pela equação da distância, considerando o valor de A informado na primeira linha (distância de 1m). Na segunda coluna (F1) são introduzidos os valores de *RSSI* medidos nos pontos conhecidos.

4- A partir da tabela do item 3, são gerados gráficos de *RSSI* x Distância de cada Localizador, com a curva Calculada e a curva de Tendência F1 (real). A Figura 29 apresenta um exemplo de gráfico para F1:

Figura 29 – Gráfico de F1 com A medido



Fonte: Autoria própria.

Observação: A curva da equação da distância é uma curva logarítmica.

5- Na sequência, o valor do A é tratado experimentalmente, até que as curvas Calculada e Tendência F1 se sobreponham o máximo possível (Tabela 6 e Figura 30).

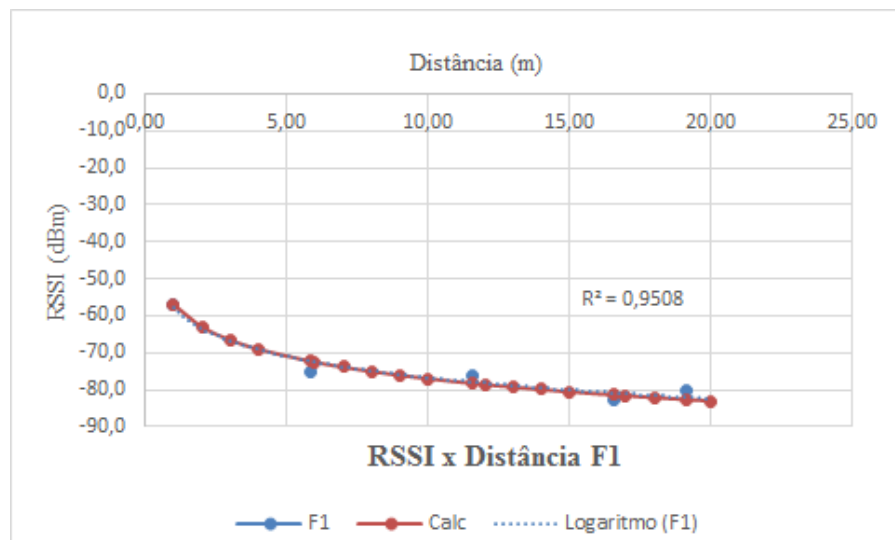
Tabela 6 – *RSSI* de F1 com A melhorado

Distância (m)	RSSI (dBm)	
	F1	Calc
1,00	-57,0	-57,00
2,00		-63,02
3,00		-66,54
4,00		-69,04
5,85	-75,0	-72,34
6,00		-72,56
7,00		-73,90
8,00		-75,06
9,00		-76,08
10,00		-77,00
11,56	-76,0	-78,26
12,00		-78,58

13,00		-79,28
14,00		-79,92
15,00		-80,52
16,60	-83,0	-81,4
17,00		-81,61
18,00		-82,11
19,14	-80,0	-82,62
20,00		-83,02

Fonte: Autoria própria.

Figura 30 – Gráfico de F1 com A melhorado



Fonte: Autoria própria.

6- Os novos valores de A1, A2 e A3 obtidos, são adotados como padrão para os testes de localização ou rastreamento, a serem realizados na sequência.

Comentário: É possível notar visualmente no exemplo acima, que as curvas Calculada e Tendência de F1 estão inicialmente afastadas, quando o valor de $A = -66\text{dBm}$. Após a melhoria de A, para o valor $A = -57\text{dBm}$, as curvas foram sobrepostas. Isso também fica claro, considerando-se os valores de R^2 dos gráficos, onde no primeiro o valor era 0,9141 e depois de melhorado foi para 0,9508 (onde R^2 significa a porcentagem de pontos que se aproximam da curva de tendência).

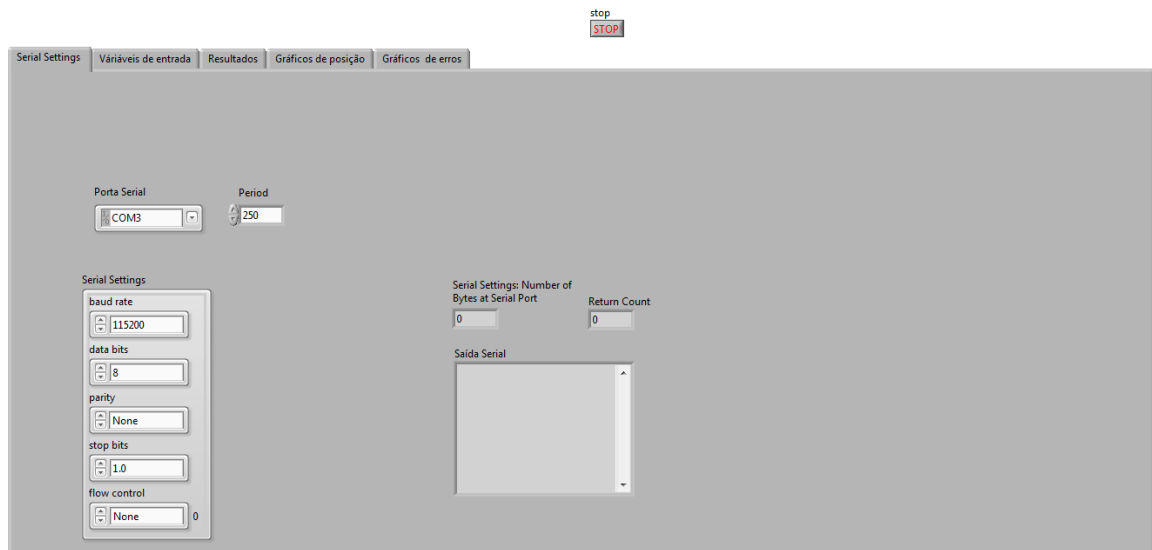
Esse processo de tratamento dos valores de A, trouxe uma importante melhoria nos resultados dos cálculos de localização, que será demonstrada mais à frente neste trabalho.

Todo o processo de calibração descrito foi o mesmo utilizado para os testes de Localização 3D e Rastreamento.

5.2.5 Aquisição e tratamento dos dados

Os dados distribuídos pelos Dispositivos Localizadores são recebidos pelo Concentrador, conectado ao Notebook, que contém a programação do LabVIEW para o cálculo de posição. A conexão do Concentrador ao Notebook é via USB através de uma porta COM serial (Figura 31).

Figura 31 – Tela de entrada Serial



Fonte: Autoria própria.

O programa faz a leitura dos dados, na seguinte ordem: *ID* do Localizador# *ID* do Localizável: Altitude do Localizador: Altitude do Localizável: *RSSI* entre Localizador e Localizável. Esses dados são continuamente atualizados na Tela de variáveis de entrada do programa (Figura 32).

A partir das variáveis de calibração pré-fixadas e dos dados dos Localizadores, o programa de teste realiza os cálculos e apresenta os resultados da posição 3D (x, y e z calculados) na Tela de resultados (Figura 33). As posições e os erros calculados são armazenados temporariamente em Vetores e posteriormente gravados em arquivos .txt.

Figura 32 – Tela de variáveis de entrada

Serial Settings | Variáveis de entrada | Resultados | Gráficos de posição | Gráficos de erros

Variáveis de Calibração

X (m)	13
Y (m)	26
n	2
h 0	1050.25
A 1	-61
A 2	-64
A 3	-50
h1	1.4
h2	1.4
h3	1.4

Posição Real

x real	6.5
y real	6.5
z real	1.4

percent (trim) 1: 25 **percent (trim) 2**: 25 **percent (trim) 3**: 25 **percent (trim) 4**: 25

Media RSSI 1: -77 **Media RSSI 2**: -81.4615 **Media RSSI 3**: -72.8846 **Media Altitude**: 1051.68

Fonte: Autoria própria.

Figura 33 – Tela de resultados

Serial Settings | Variáveis de entrada | Resultados | Gráficos de posição | Gráficos de erros

Posição Calculada

x	6.8
y	6.1
z	1.43
meanX	7.06
meanY	6.26
meanZ	1.43
stdX	0.10
stdY	0.28
stdZ	0.00

Erros

sizeErroX	50
VetorErroX	0.34
ErroX	0.34
meanErroX	0.56
stdErroX	0.10
sizeErroY	50
VetorErroY	0.35
ErroY	0.35
meanErroY	0.34
stdErroY	0.14
sizeErroZ	50
VetorErroZ	0.03
ErroZ	0.03
meanErroZ	0.03
stdErroZ	0.00

Erro Quadrático e Norma

VetorErroQuad	0.49
ErroQuad	0.49
meanErroQuad	0.68
stdErroQuad	0.09
VetorNormaErro	0.72251
NormaErro	0.72
meanNormaErro	0.93
stdNormaErro	0.15

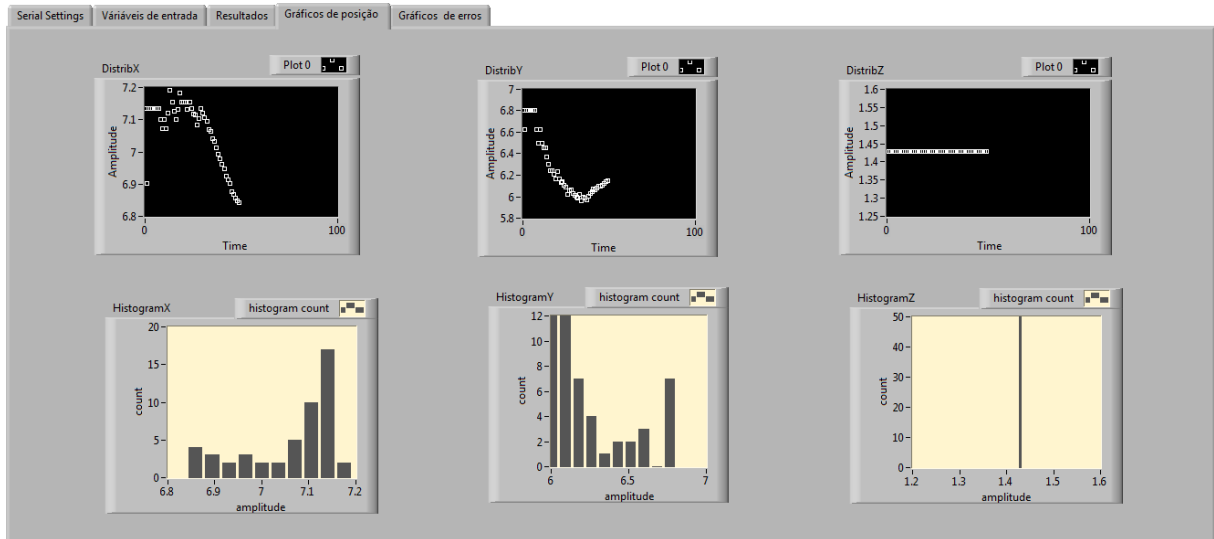
Fonte: Autoria própria.

Localização 3D: Antes da gravação e armazenamento dos resultados, são aguardadas no mínimo 50 medições (de 50 a 100 medições) de cada posição testada, garantindo a estabilização do sistema e uma média mais precisa dos resultados.

Rastreamento: Após o posicionamento do veículo com o Localizável no ponto de início da rota de teste, o programa de teste é iniciado e permanece em funcionamento durante todo o traçado da rota. Na posição final, os dados de todos os pontos colhidos são armazenados e é gerado (manualmente) um gráfico comparativo entre a rota real e a calculada.

São gerados também, gráficos de distribuição e histogramas de posição (x, y e z), como mostra a Figura 34.

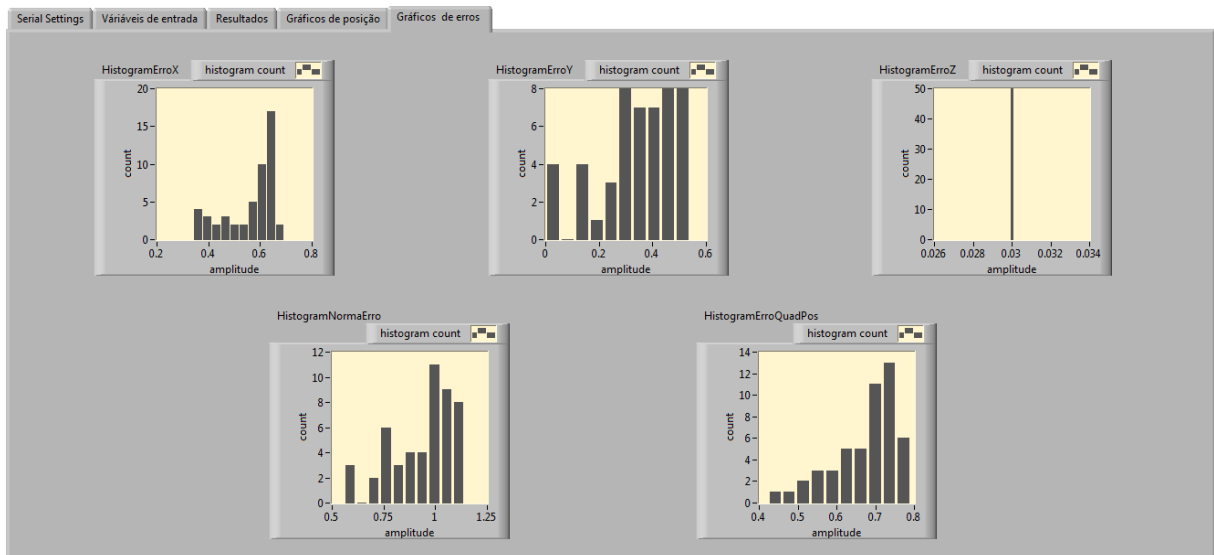
Figura 34 – Tela de Gráficos e Histogramas de posições



Fonte: Autoria própria.

Os erros de posição e quadrático são representados em histogramas conforme Figura 35.

Figura 35 – Tela de Histogramas de posições e erros



Fonte: Autoria própria.

Melhoria desenvolvida para o processo de aquisição e tratamento dos dados (Filtro de outliers)

Ao analisarmos os testes iniciais de localização, foi possível notar que, os dados de RSSI e Altitude recebidos no Concentrador continham alguns valores de pico, distantes do valor

médio esperado para aquela posição (*outliers*¹⁶). Esses valores distintos, quando calculados inseridos na média, se tornavam erros pontuais muito grandes, distorcendo assim o resultado médio final do cálculo de posição e elevando em muito o valor do erro quadrático. Foi então desenvolvida uma melhoria no programa de cálculo, introduzindo-se filtros de *outliers* para os valores de *RSSI* e *Altitude* recebidos. Cada valor recebido é vetorizado e, antes de ser introduzido nas equações de cálculo, passa por um filtro *trimmer*¹⁷, fazendo a “limpeza” dos dados. Os resultados positivos obtidos com essa melhoria foram expressivos e serão demonstrados mais à frente neste trabalho.

¹⁶ *Outliers*: São dados que se diferenciam drasticamente de todos os outros, são pontos que fogem da normalidade e que podem causar anomalias nos resultados.

¹⁷ *Trimmer*: Na tradução literal significa Aparador e, neste caso, é um comando que retira os *outliers*.

6 RESULTADOS

Desde o início do projeto, foram realizados dezenas de testes com foco na Localização 3D, visando ao final, a possível aplicação em Rastreamento de objetos. A evolução desses testes considerou, em cada fase, o aprendizado adquirido e as modificações introduzidas no método, na busca de melhores resultados.

Os resultados, que serão apresentados neste capítulo, contemplam essa evolução, de forma detalhada. Os testes finais, para confirmação dos resultados, foram feitos em ambiente fechado (*indoor*) e ambiente aberto (*outdoor*). O ambiente fechado consiste no laboratório da UNESP, conforme apresentado em 5.2.3, de área útil/utilizada de 154m². Quanto ao ambiente aberto, foi utilizada uma quadra poliesportiva, também apresentada em 5.2.3, com área útil de 544m², sendo que a área efetivamente utilizada foi de 338m².

Na Localização 3D foram calculados três pontos diferentes em cada ambiente, em posições ao longo de toda área e de diferentes altitudes. Já no Rastreamento, foi estabelecida uma única rota no ambiente do laboratório, em função da quantidade de móveis e equipamentos existentes, enquanto que na quadra, foram traçadas três rotas diferentes para o teste.

6.1 Localização 3D

Os resultados dos testes de Localização são apresentados por ambiente, por pontos e por etapas de evolução, sendo: Item 1 refere-se ao laboratório e item 2 à quadra, ponto “n” especifica as posições de teste e os subitens A, B e C classificam as etapas de evolução.

1- Laboratório: A área útil/utilizada foi de X=7m e Y=22m, com altitude de 2,6m para os três módulos Localizadores. Os testes foram realizados sem a movimentação de pessoas e sem outros equipamentos em operação, no momento.

Ponto 1: Localização do ponto 1 na área de teste em: x=5,0m, y=4,0m e z=2,08m.

A- Cálculo considerando a etapa sem melhorias: sem filtro de outliers e sem melhoria de A. Resultados conforme Tabela 7:

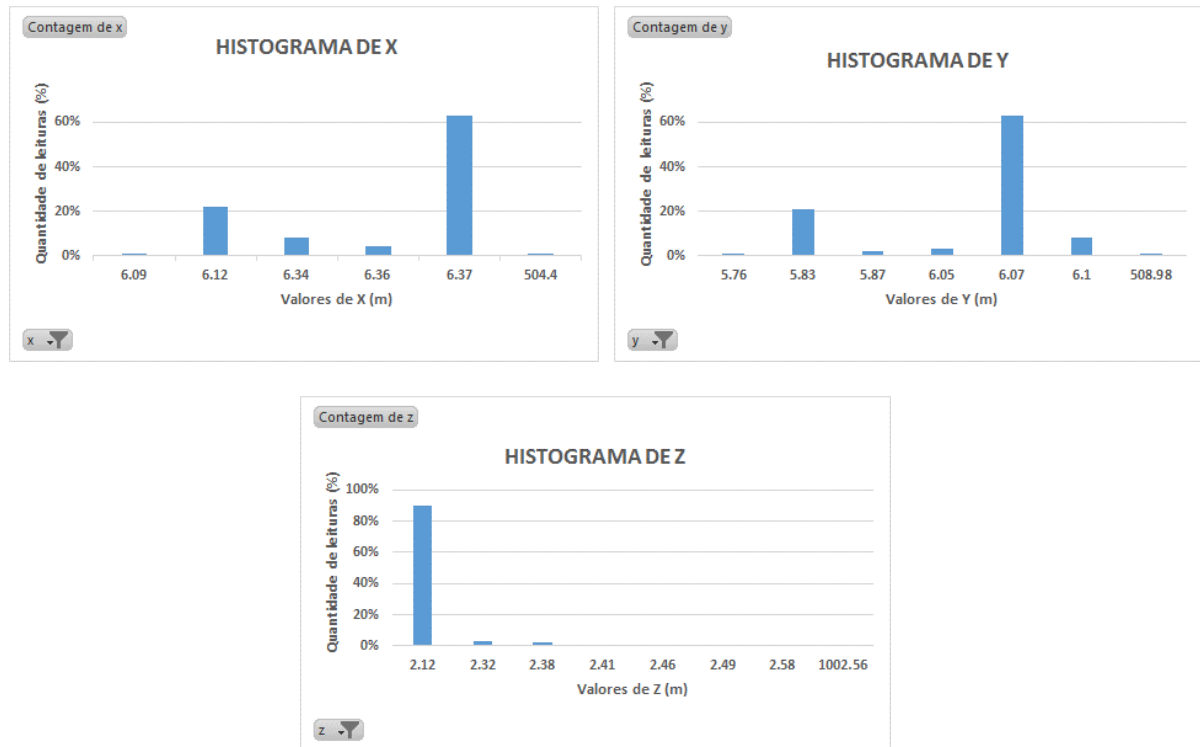
Tabela 7 - Resultados do Ponto 1-A Lab

Coordenada	Média	Desv. Padrão	Erro (m)	Erro (%)	Erro Quadrático
x	11,28	49,81	6,28	125	14,67
y	11,04	50,30	7,04	176	
z	7,9	100,47	10,11	486	

Fonte: Autoria própria.

A seguir são apresentados os histogramas de x, y e z calculados (Figura 36):

Figura 36 – Histogramas do Ponto 1-A Lab



Fonte: Autoria própria.

Comentário: Observa-se erros grandes nas três coordenadas, tanto em unidades quanto em porcentagens. Os altos valores de desvio padrão são confirmados por meio de valores de pico de amplitude representados nos histogramas, prejudicando o resultado final.

B- Cálculo considerando a primeira etapa de melhorias: com filtro de outliers e sem melhoria de A. Resultados a seguir, na Tabela 8:

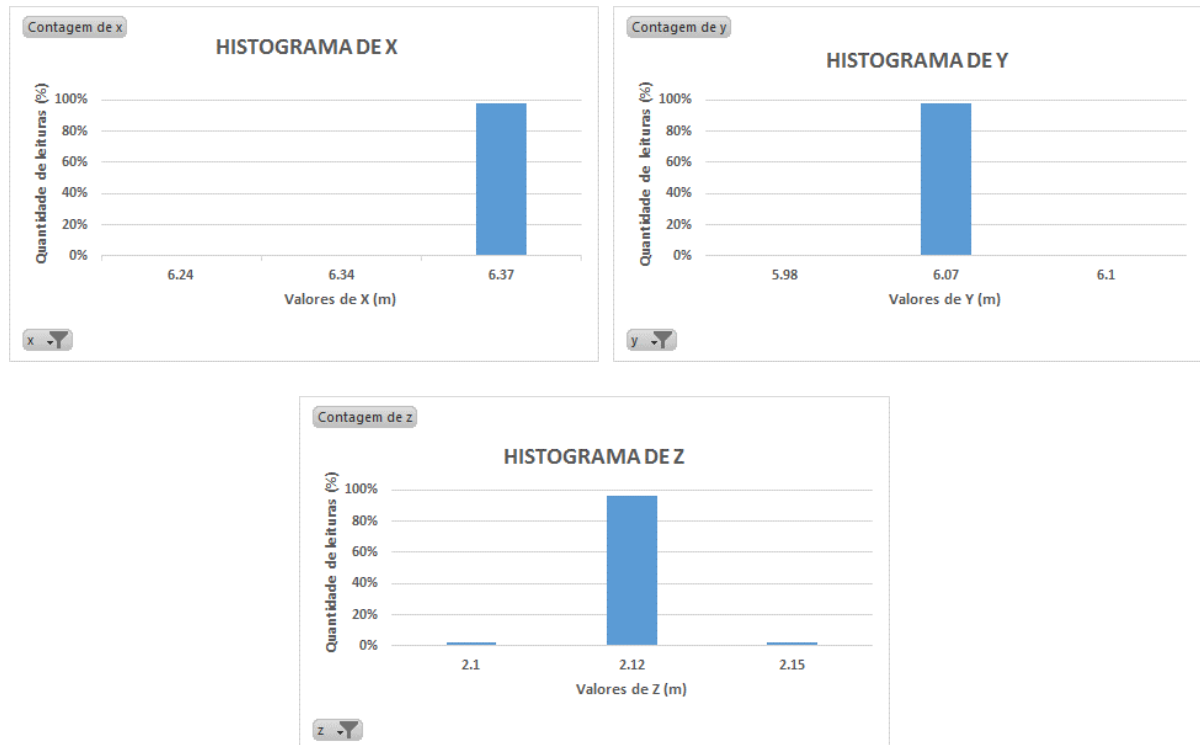
Tabela 8 - Resultados do Ponto 1-B Lab

Coordenada	Média	Desv. Padrão	Erro (m)	Erro (%)	Erro Quadrático
x	6,40	0,01	1,36	27	2,47
y	6,10	0,01	2,06	50,5	
z	2,12	0,00	0,04	1,9	

Fonte: Autoria própria.

A seguir são apresentados os histogramas de x, y e z calculados (Figura 37):

Figura 37 – Histogramas do Ponto 1-B Lab



Fonte: Autoria própria.

Comentário: Aqui é possível observar uma diminuição nos erros nas três coordenadas, tanto em unidades quanto em porcentagens, além de uma grande redução nos valores de desvio padrão. Essa redução foi claramente obtida por meio da retirada de picos de leituras (filtro de *outliers*).

C- Cálculo considerando a segunda etapa de melhorias: com filtro de outliers e com melhoria de A. Resultados apresentados na Tabela 9:

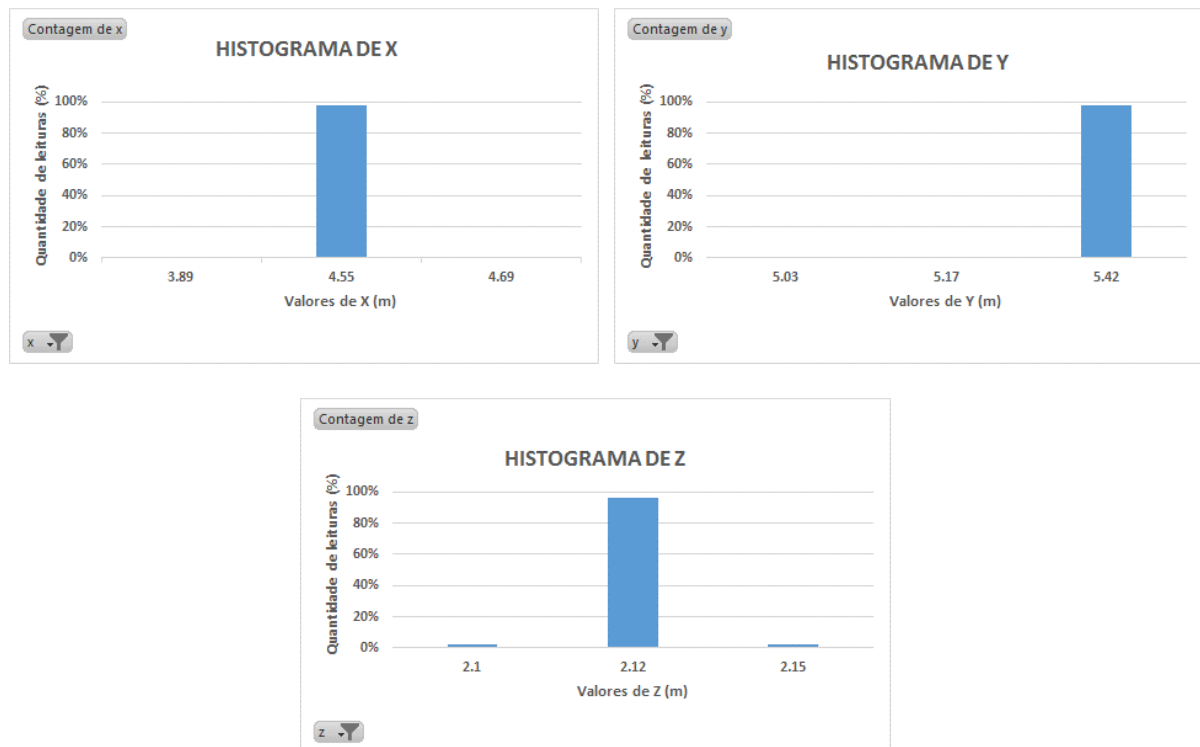
Tabela 9 - Resultados do Ponto 1-C Lab

Coordenada	Média	Desv. Padrão	Erro (m)	Erro (%)	Erro Quadrático
x	4,54	0,07	0,46	9,2	1,49
y	5,41	0,05	1,41	35	
z	2,12	0,00	0,04	1,9	

Fonte: Autoria própria.

A seguir são apresentados os histogramas de x, y e z calculados (Figura 38):

Figura 38 – Histograma do Ponto 1-C Lab



Fonte: Autoria própria.

Comentário: Nesta etapa, os valores de desvio padrão continuam baixos (embora tenham aumentado em relação à etapa anterior), e os erros foram reduzidos. Em x e z, os erros abaixo de 10% são valores conhecidos e usuais dentre os trabalhos estudados e aqui referenciados. Apenas a coordenada y produziu um erro acima, na faixa de 35%. Observa-se também, que o erro quadrático sofreu significativas reduções entre cada etapa, chegando aqui a um valor próximo de 1.

Ponto 2: Localização do ponto 2 na área de teste em: x=5,5m, y=14,0m e z=0,42m.

A- Cálculo considerando a etapa sem melhorias: sem filtro de outliers e sem melhoria de A. Resultados conforme Tabela 10:

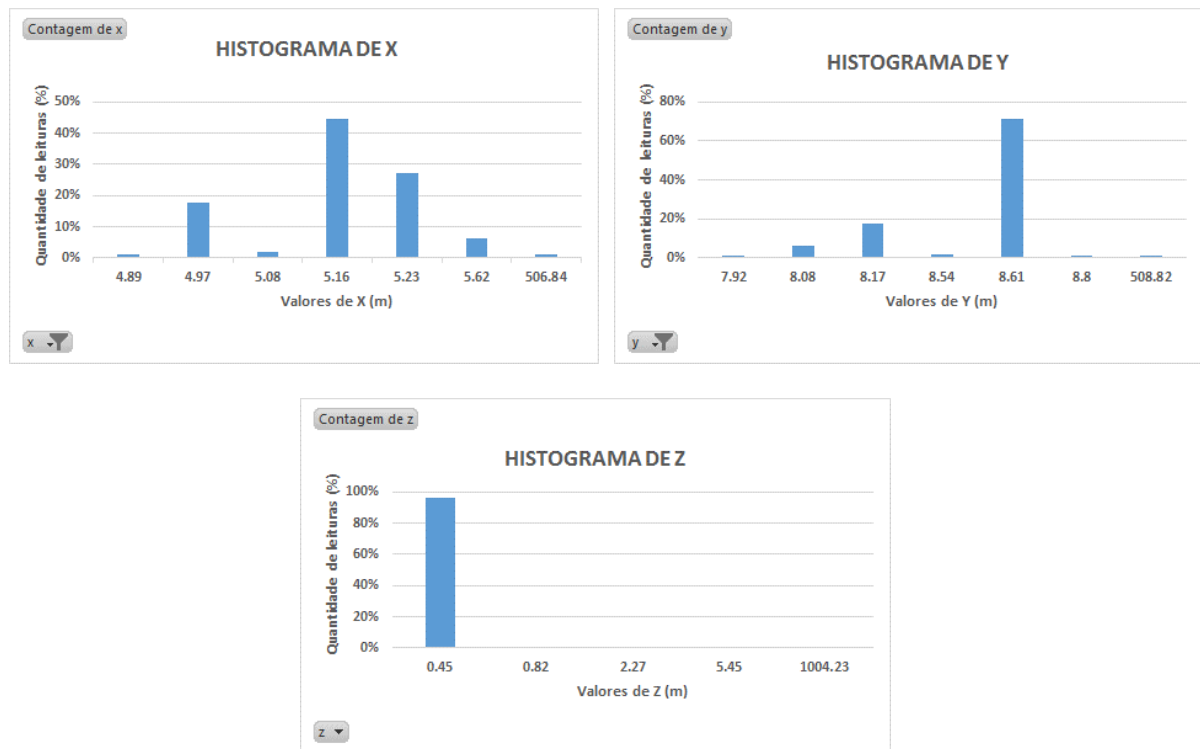
Tabela 10 - Resultados do Ponto 2-A Lab

Coordenada	Média	Desv. Padrão	Erro (m)	Erro (%)	Erro Quadrático
x	10,14	49,92	5,30	96	17,64
y	13,44	49,79	10,36	74	
z	9,43	99,98	10,05	2392	

Fonte: Autoria própria.

A seguir são apresentados os histogramas de x, y e z calculados (Figura 39):

Figura 39 – Histogramas do Ponto 2-A Lab



Fonte: Autoria própria.

Comentário: Assim como na mesma etapa do Ponto 1, os picos inseridos na média causaram erros muito altos e grande dispersão dos resultados.

B- Cálculo considerando a primeira etapa de melhorias: com filtro de outliers e sem melhoria de A. Resultados a seguir, na Tabela 11:

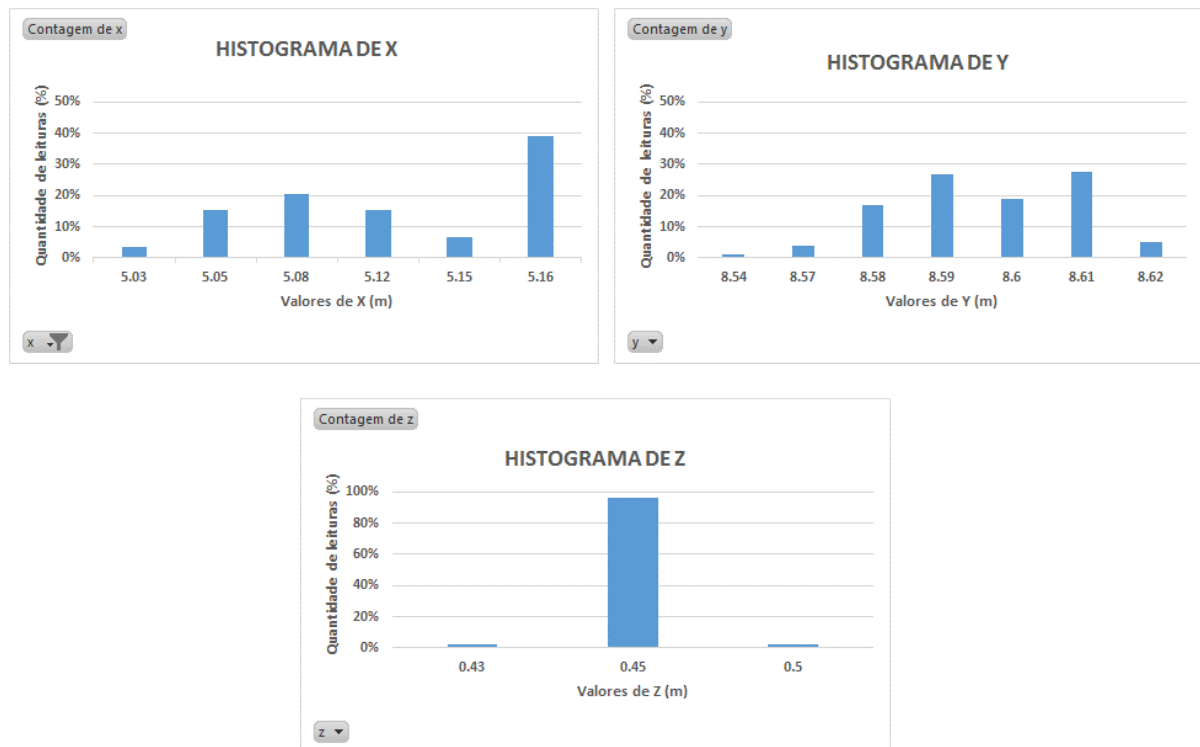
Tabela 11 - Resultados do Ponto 2-B Lab

Coordenada	Média	Desv. Padrão	Erro (m)	Erro (%)	Erro Quadrático
x	5,10	0,04	0,40	0,7	5,42
y	8,60	0,02	5,40	38,5	
z	0,45	0,00	0,03	7,0	

Fonte: Autoria própria.

A seguir são apresentados os histogramas de x, y e z calculados (Figura 40):

Figura 40 – Histograma do Ponto 2-B Lab



Fonte: Autoria própria.

Comentário: Aqui novamente, foi visível a melhora dos valores de desvio padrão e erro quadrático, obtidos por meio da retirada de picos de leituras (filtro de *outliers*).

C- Cálculo considerando a segunda etapa de melhorias: com filtro de outliers e com melhoria de A. Resultados apresentados na Tabela 12:

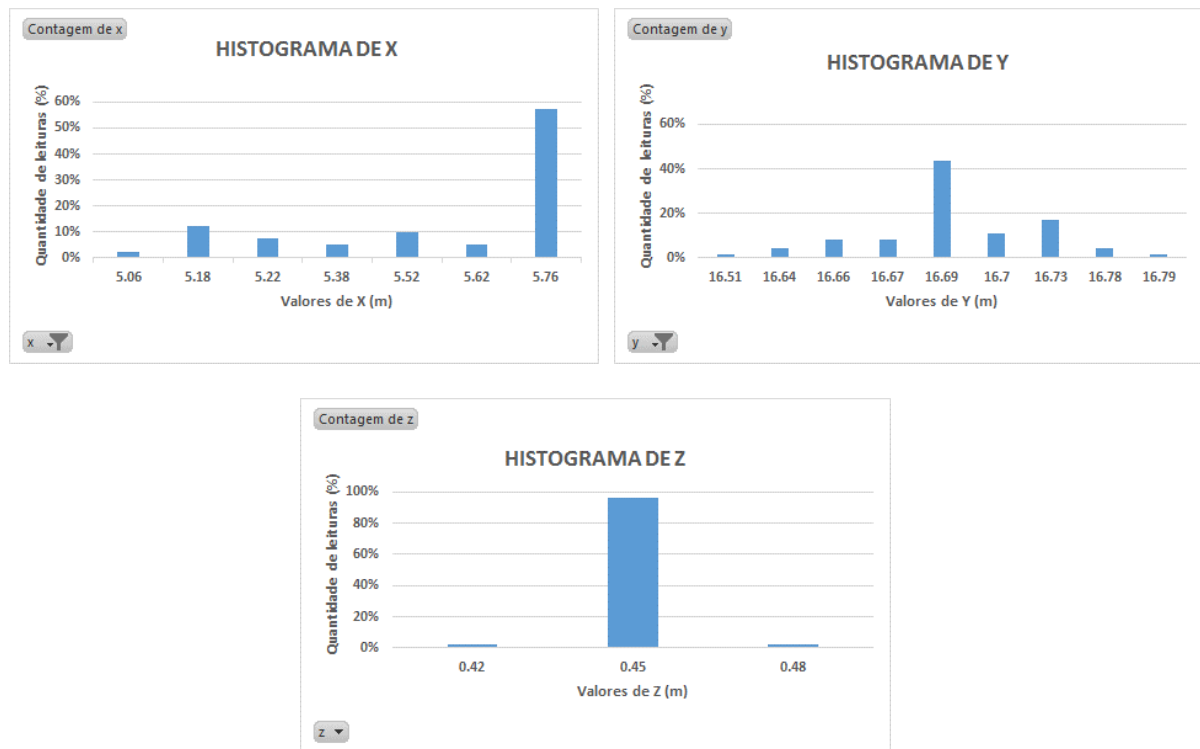
Tabela 12- Resultados do Ponto 2-C Lab

Coordenada	Média	Desv. Padrão	Erro (m)	Erro (%)	Erro Quadrático
x	5,41	0,22	0,21	3,8	2,71
y	16,70	0,04	2,70	19,0	
z	0,45	0,00	0,03	7,0	

Fonte: Autoria própria.

A seguir são apresentados os histogramas de x, y e z calculados (Figura 41):

Figura 41 – Histogramas do Ponto 2-C Lab



Fonte: Autoria própria.

Comentário: No Ponto 2, com as melhorias aplicadas, os erros de x e z ficaram abaixo de 10% e novamente, apenas a coordenada y produziu um erro acima, na faixa de 19% (mesmo assim, menor que os 35% obtidos no Ponto 1). O erro quadrático também sofreu significativas reduções entre cada etapa, porém neste caso, ficando acima de 1.

Ponto 3: Localização do ponto 3 na área de teste em: x=1,46m, y=18,5m, z=1,41m.

A- Cálculo considerando a etapa sem melhorias: sem filtro de outliers e sem melhoria de A. Resultados conforme Tabela 13:

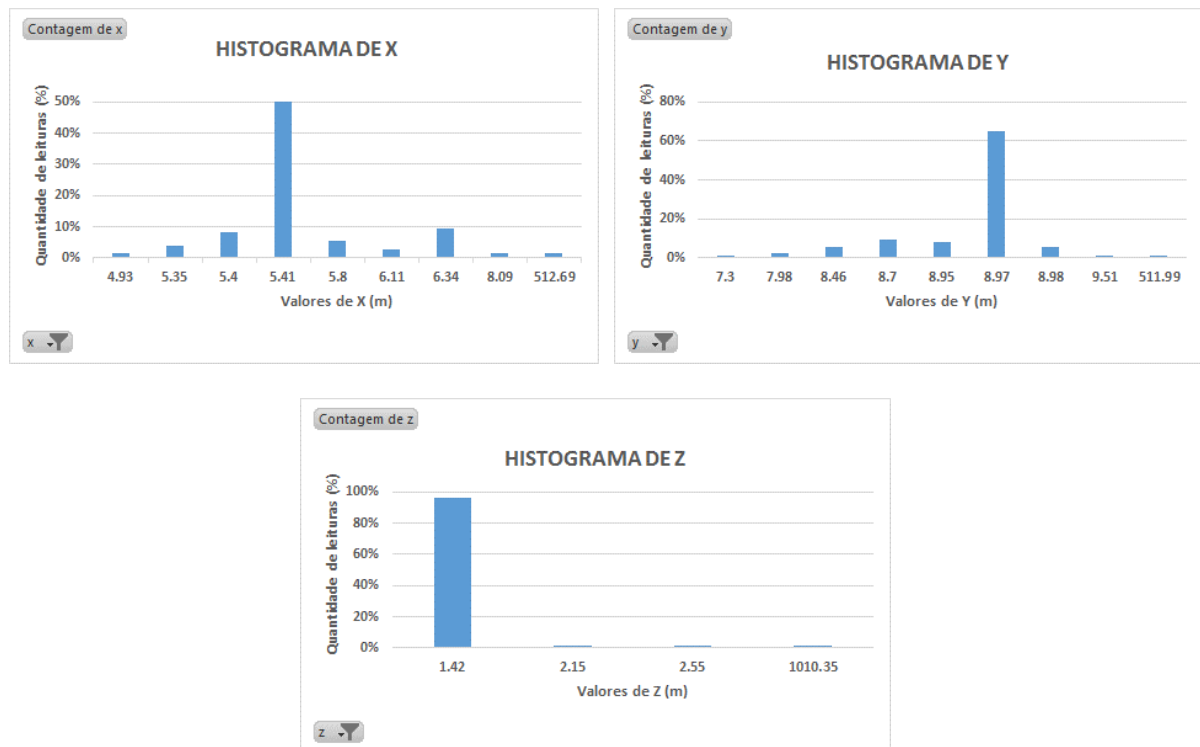
Tabela 13- Resultados do Ponto 3-A Lab

Coordenada	Média	Desv. Padrão	Erro (m)	Erro (%)	Erro Quadrático
x	12,01	57,06	10,55	722	26,02
y	15,22	54,44	15,77	85,2	
z	11,39	113,83	12,85	911	

Fonte: Autoria própria.

A seguir são apresentados os histogramas de x, y e z calculados (Figura 42):

Figura 42 – Histograma do Ponto 3-A Lab



Fonte: Autoria própria.

Comentário: Aqui, novamente, é possível verificar pontos de pico nos cálculos, prejudicando a média e provocando o maior valor de erro quadrático entre os três pontos testados.

B- Cálculo considerando a primeira etapa de melhorias: com filtro de outliers e sem melhoria de A. Resultados a seguir, na Tabela 14:

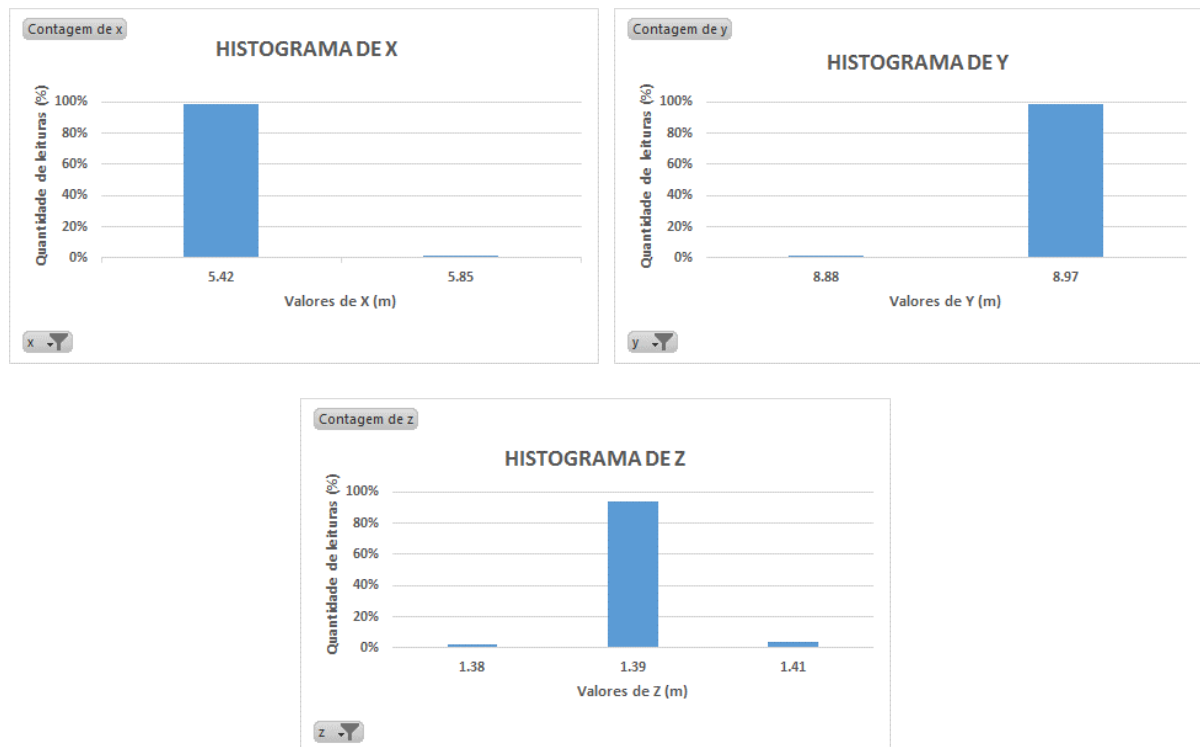
Tabela 14 - Resultados do Ponto 3-B Lab

Coordenada	Média	Desv. Padrão	Erro (m)	Erro (%)	Erro Quadrático
x	5,42	0,05	3,96	271	10,33
y	8,96	0,01	9,54	51,5	
z	1,39	0,00	0,02	1,4	

Fonte: Autoria própria.

A seguir são apresentados os histogramas de x, y e z calculados (Figura 43):

Figura 43 – Histograma do Ponto 3-B Lab



Fonte: Autoria própria.

Comentário: Nesta etapa, o filtro de *outliers* melhorou em muito os valores de desvio padrão e erro quadrático, porém, os erros percentuais de x e y continuam muito acima do esperado (abaixo de 10%).

C- Cálculo considerando a segunda etapa de melhorias: com filtro de outliers e com melhoria de A. Resultados apresentados na Tabela 15:

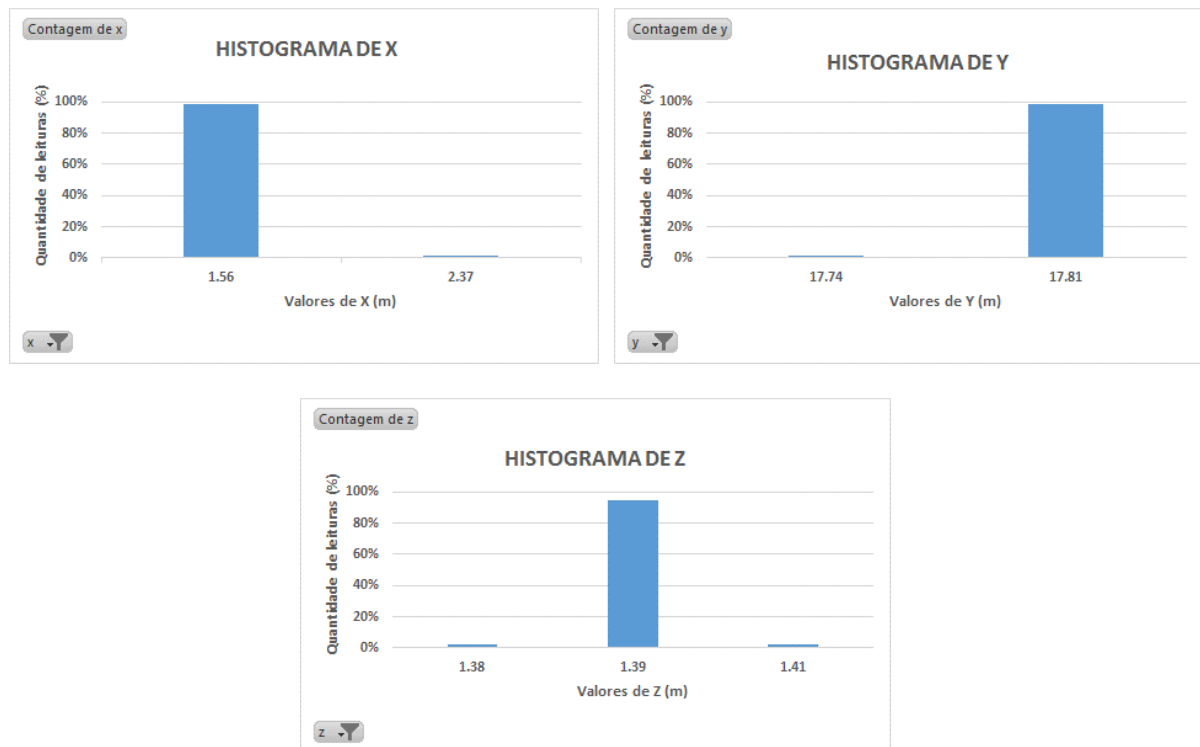
Tabela 15 - Resultados do Ponto 3-C Lab

Coordenada	Média	Desv. Padrão	Erro (m)	Erro (%)	Erro Quadrático
x	1,57	0,09	0,11	7,5	0,70
y	17,81	0,01	0,69	3,7	
z	1,39	0,00	0,02	1,4	

Fonte: Autoria própria.

A seguir são apresentados os histogramas de x, y e z calculados (Figura 44):

Figura 44 – Histograma do Ponto 3-C Lab



Fonte: Autoria própria.

Comentário: Como é possível observar, o resultado final do Ponto 3, com todas as melhorias aplicadas, foi o melhor resultado entre os três pontos de teste, com todos os erros abaixo de 10% e o menor resultado de erro quadrático, abaixo de 1.

Para os testes de Localização 3D realizados no ambiente fechado, as melhorias aplicadas efetivaram uma maior precisão dos resultados, por meio de uma menor dispersão dos valores de entrada (*RSSI*) e da adequação dos parâmetros de cálculo (*A*). Os valores dos erros quadráticos finais de cada posição confirmam a melhoria dos resultados, uma vez que, quanto menor o seu valor (aproximando-se de zero), mais próximo da posição real está o resultado (maior precisão).

2- Quadra: A área utilizada foi de $X=13\text{m}$ e $Y=26\text{m}$, com altitude de $1,4\text{m}$ para os três módulos Localizadores. Os testes foram realizados sem a movimentação de pessoas no local, naquele momento. Para este ambiente, não foram calculados os testes relativos ao subitem A- etapa sem melhorias, por se considerar suficiente os testes feitos no ambiente do laboratório, para avaliação da evolução após essa etapa. São apresentados então, os subitens B e C.

Ponto 1: Localização do ponto 1 na área de teste em: $x=6,5\text{m}$, $y=6,5\text{m}$ e $z=1,4\text{m}$.

B- Cálculo considerando a primeira etapa de melhorias: com filtro de outliers e sem melhoria de A. Resultados a seguir, na Tabela 16:

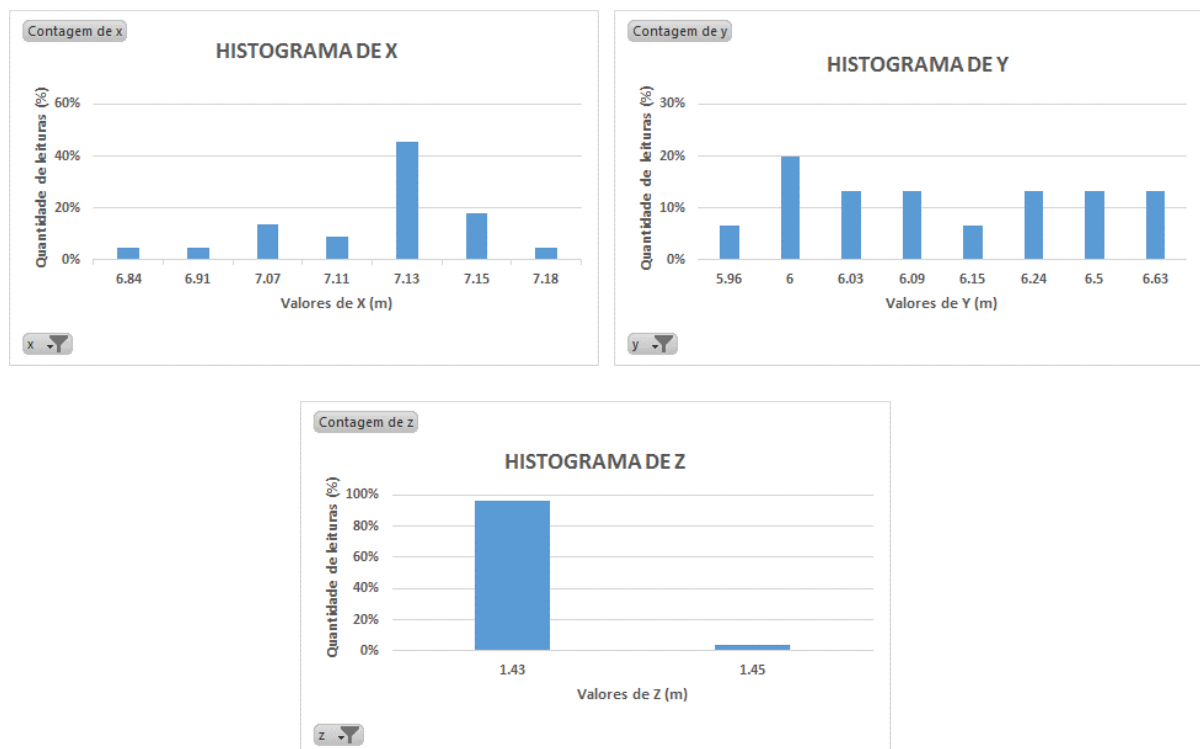
Tabela 16 - Resultados do Ponto 1-B Quadra

Coordenada	Média	Desv. Padrão	Erro (m)	Erro (%)	Erro Quadrático
x	7,06	0,10	0,56	8,6	0,49
y	6,26	0,28	0,34	5,2	
z	1,43	0,00	0,03	2,1	

Fonte: Autoria própria.

A seguir são apresentados os histogramas de x, y e z calculados (Figura 45):

Figura 45 – Histogramas do Ponto 1-B Quadra



Fonte: Autoria própria.

Comentário: No Ponto 1, o cálculo considerando apenas o filtro de *outliers*, trouxe um resultado excelente em todos os aspectos. Foram erros abaixo de 10% nas três coordenadas, valores de desvio padrão com baixa dispersão e um erro quadrático menor que 0,5.

C- Cálculo considerando a segunda etapa de melhorias: com filtro de outliers e com melhoria de A. Resultados apresentados na Tabela 17:

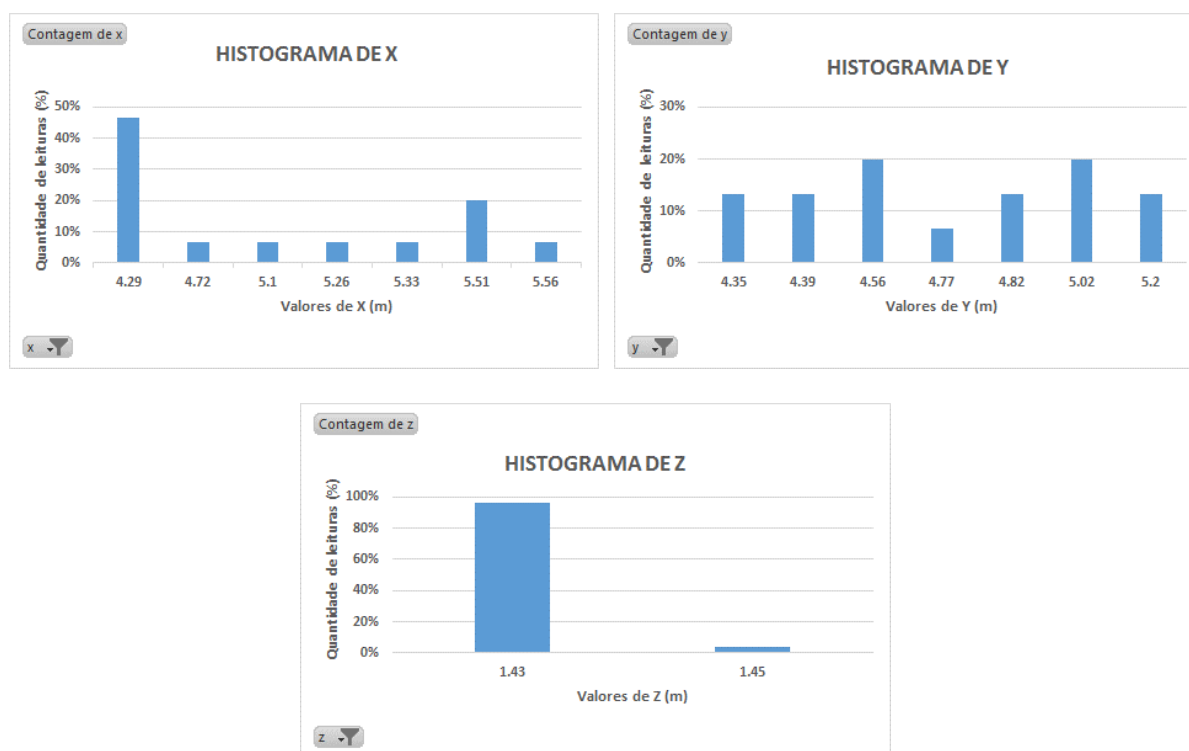
Tabela 17 - Resultados do Ponto 1-C Quadra

Coordenada	Média	Desv. Padrão	Erro (m)	Erro (%)	Erro Quadrático
x	5,13	0,42	1,37	21	2,29
y	4,75	0,37	1,75	26,9	
z	1,43	0,00	0,03	2,1	

Fonte: Autoria própria.

A seguir são apresentados os histogramas de x, y e z calculados (Figura 46):

Figura 46 – Histograma do Ponto 1-C Quadra



Fonte: Autoria própria.

Comentário: O resultado com as duas melhorias foi inferior ao anterior, apenas com filtro de *outliers*. Os erros de x e y foram acima de 10% e o erro quadrático acima de 2.

Ponto 2: Localização do ponto 2 na área de teste em: x=10,0m, y=13,0m e z=1,4m.

B- Cálculo considerando a primeira etapa de melhorias: com filtro de outliers e sem melhoria de A. Resultados a seguir, na Tabela 18:

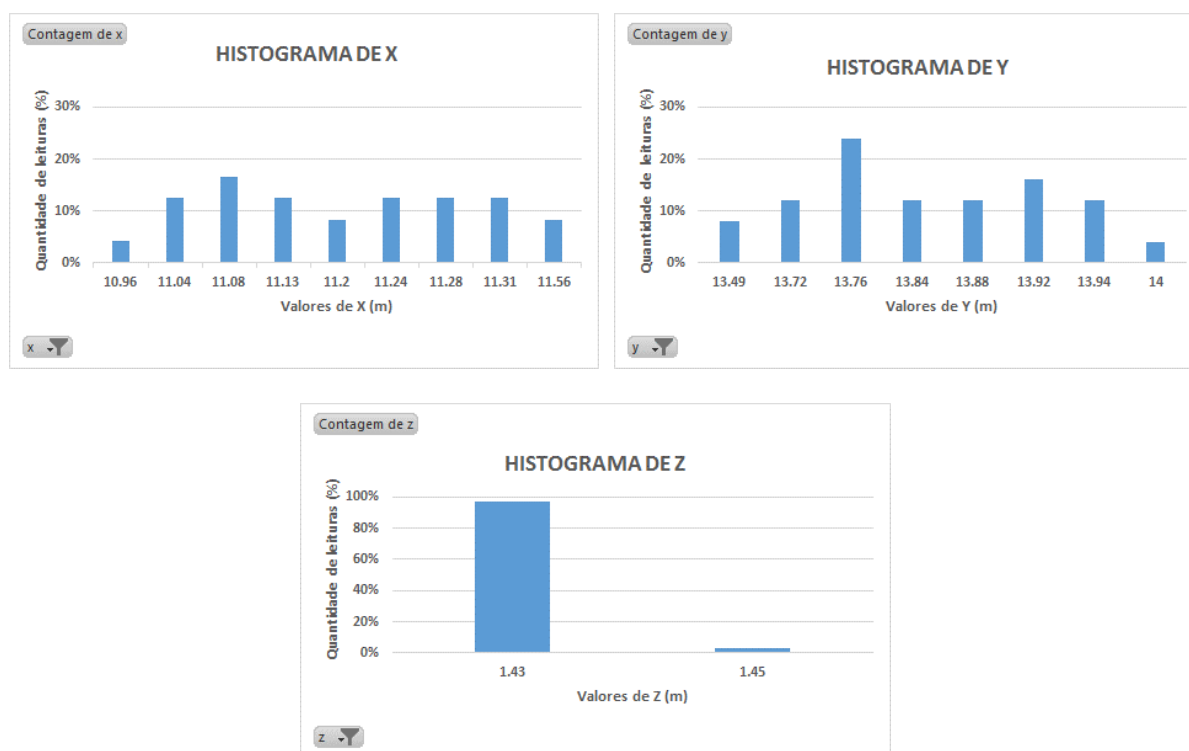
Tabela 18- Resultados do Ponto 2-B Quadra

Coordenada	Média	Desv. Padrão	Erro (m)	Erro (%)	Erro Quadrático
x	11,21	0,21	1,21	12,1	1,5
y	13,82	0,10	0,82	6,3	
z	1,43	0,00	0,03	2,1	

Fonte: Autoria própria.

A seguir são apresentados os histogramas de x, y e z calculados (Figura 47):

Figura 47 – Histograma do Ponto 2-B Quadra



Fonte: Autoria própria.

Comentário: O resultado inicial no Ponto 2, com apenas o filtro de *outliers*, foi também muito bom, com erros abaixo de 10% em y e z e pouco acima em x, valores de desvio padrão com baixa dispersão e erro quadrático de 1,5.

C- Cálculo considerando a segunda etapa de melhorias: com filtro de outliers e com melhoria de A. Resultados apresentados na Tabela 19:

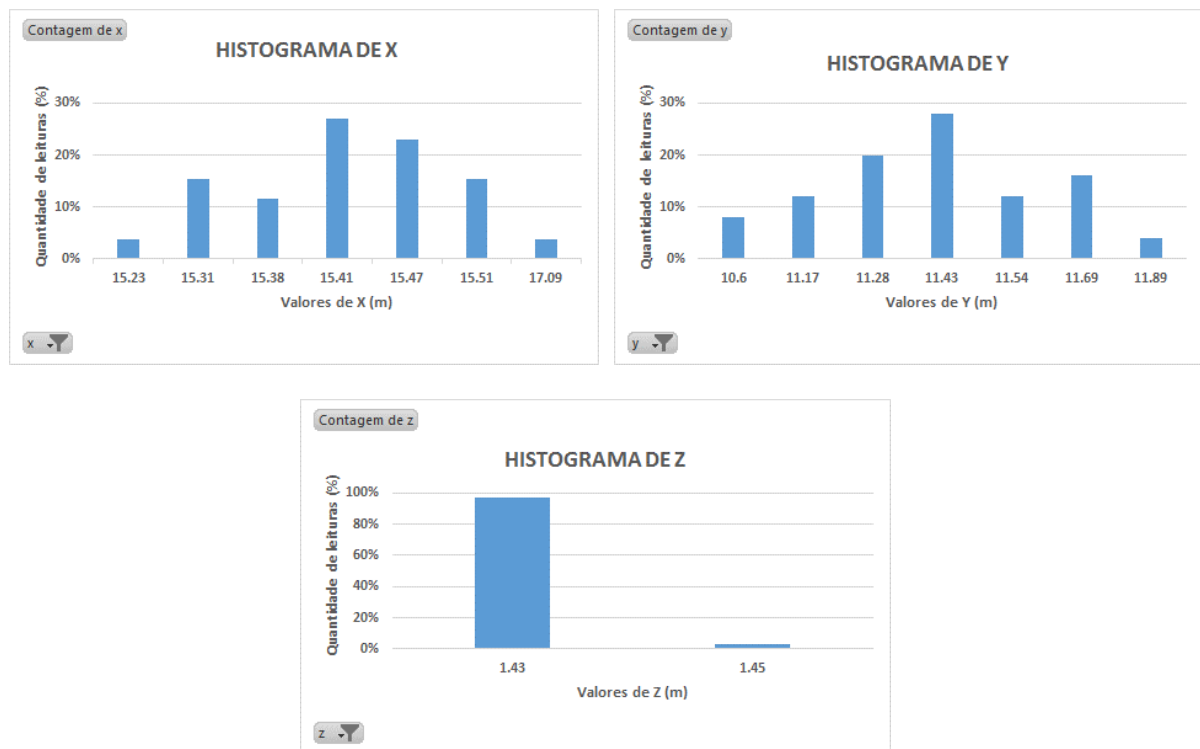
Tabela 19 - Resultados do Ponto 2-C Quadra

Coordenada	Média	Desv. Padrão	Erro (m)	Erro (%)	Erro Quadrático
x	15,43	0,22	5,43	54	5,66
y	11,42	0,25	1,58	12	
z	1,43	0,00	0,03	2,1	

Fonte: Autoria própria.

A seguir são apresentados os histogramas de x, y e z calculados (Figura 48):

Figura 48 – Histograma do Ponto 2-C Quadra



Fonte: Autoria própria.

Comentário: Novamente aqui, é possível observar resultados inferiores aos conseguidos na etapa apenas com filtro de *outliers*, com erros em x e y acima de 10% e erro quadrático acima próximo de 6.

Ponto 3: Localização do ponto 3 na área de teste em: x=5,0m, y=20,0m e z=1,4m.

B- Cálculo considerando a primeira etapa de melhorias: com filtro de outliers e sem melhoria de A. Resultados a seguir, na Tabela 20:

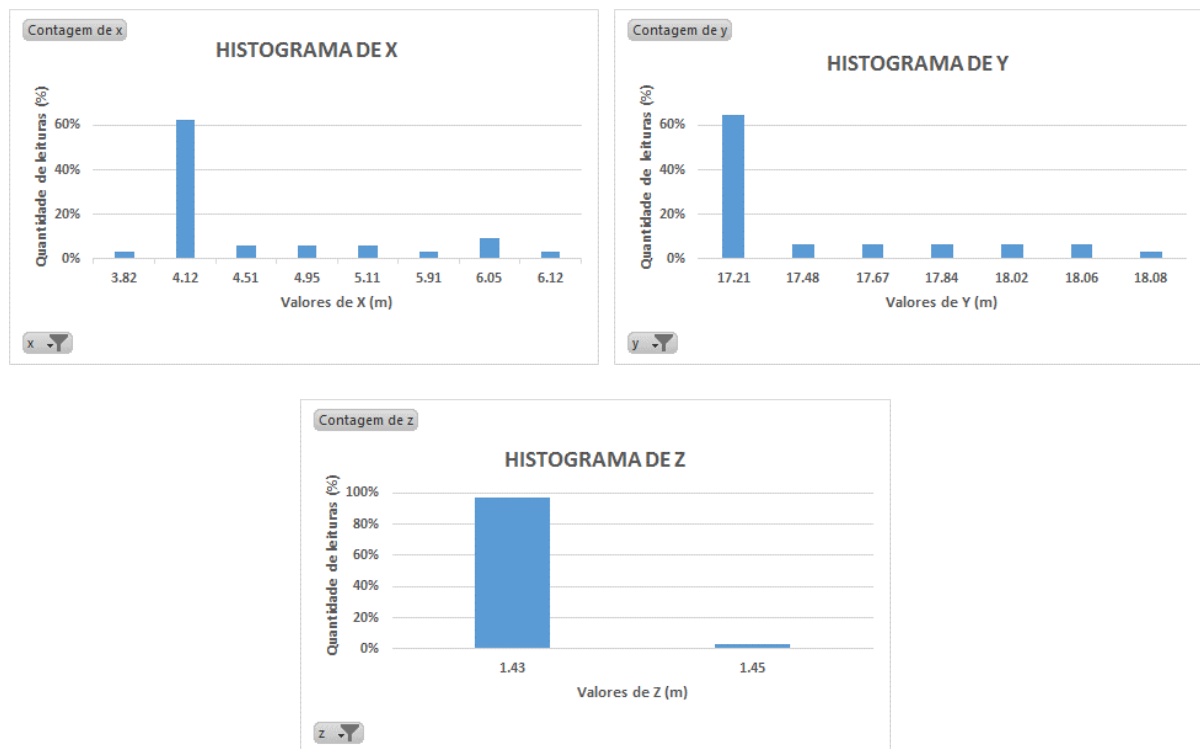
Tabela 20 - Resultados do Ponto 3-B Quadra

Coordenada	Média	Desv. Padrão	Erro (m)	Erro (%)	Erro Quadrático
x	4,96	0,81	0,72	14,4	2,2
y	17,63	0,34	2,37	11,8	
z	1,43	0,00	0,03	2,1	

Fonte: Autoria própria.

A seguir são apresentados os histogramas de x, y e z calculados (Figura 49):

Figura 49 – Histograma do Ponto 3-B Quadra



Fonte: Autoria própria.

Comentário: Este resultado, apenas com o filtro de *outliers*, foi inferior aos pontos anteriores. Foram obtidos erros acima de 10% em x e y, com erro quadrático de 2,2.

C- Cálculo considerando a segunda etapa de melhorias: com filtro de outliers e com melhoria de A. Resultados apresentados na Tabela 21:

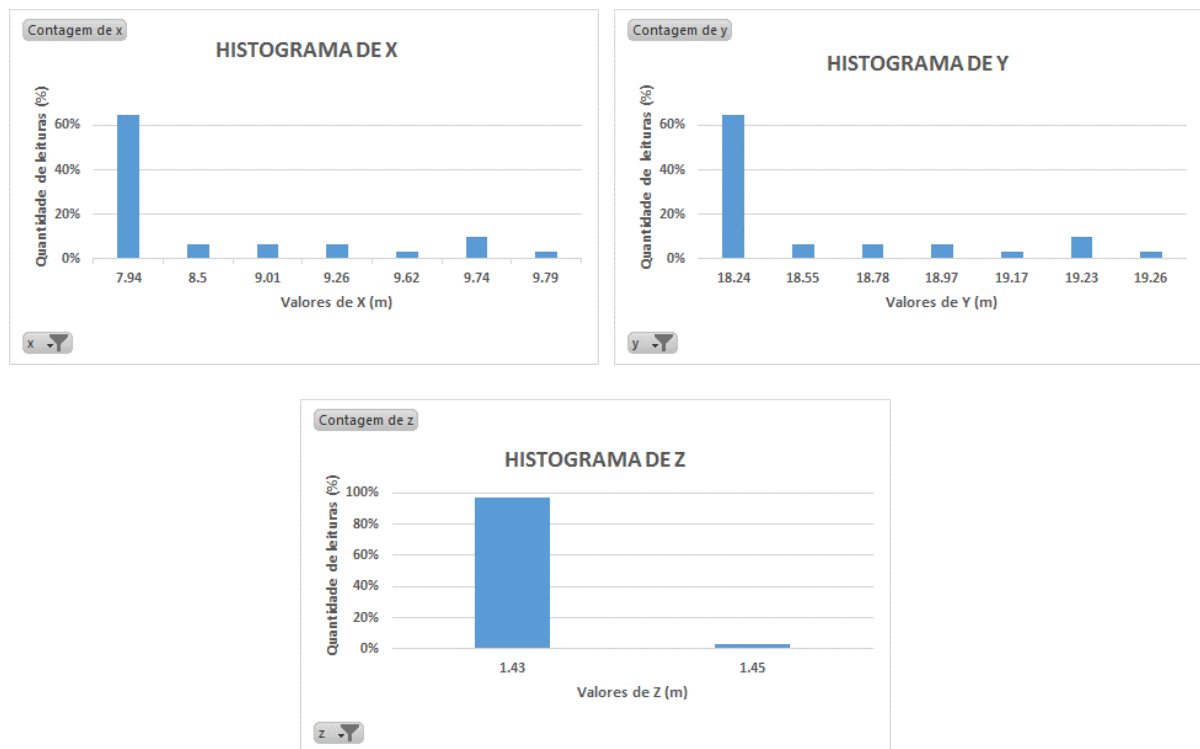
Tabela 21 - Resultados do Ponto 3-C Quadra

Coordenada	Média	Desv. Padrão	Erro (m)	Erro (%)	Erro Quadrático
x	8,83	0,72	3,83	76,6	4,08
y	18,73	0,40	1,27	6,3	
z	1,43	0,00	0,03	2,1	

Fonte: Autoria própria.

A seguir são apresentados os histogramas de x, y e z calculados (Figura 50):

Figura 50 – Histograma do Ponto 3-C Quadra



Fonte: Autoria própria.

Comentário: Apesar do comentário do Ponto 3-B, aqui mais uma vez, os resultados foram inferiores aos conseguidos na etapa anterior, apresentando erro muito acima dos 10% em x e o erro quadrático de valor dobrado em relação ao anterior.

Com relação a Localização 3D em ambiente aberto, as melhorias aplicadas não se comportaram da mesma maneira que em ambiente fechado. Aqui, a maior precisão dos resultados, demonstrada por meio dos valores dos erros quadráticos finais de cada posição, foi alcançada apenas com a redução da dispersão dos valores de entrada (*RSSI*), sem a necessidade da adequação do parâmetro A de cálculo.

6.2 Discussão dos Resultados da Localização 3D

Inicialmente, faz-se necessário observar que, os parâmetros utilizados no LoRa, em especial o SF com valor igual a 10, foram de grande relevância na qualidade do sinal trocado. Com o uso de $SF=10$, o sinal se tornou mais robusto e com menor flutuação de valores dos dados de $RSSI$.

Em se tratando das melhorias aplicadas ao processo de Localização, as duas apresentaram ganho significativo aos resultados, muito embora tenha ocorrido uma diferença nas aplicações de área fechada e aberta. No que se refere à melhoria de Filtro de *outliers*, esta se mostrou aplicável e necessária nas duas áreas. Com a filtragem dos dados de entrada dispersos (fora da curva), a faixa entre os pontos máximo e mínimo calculados ficou mais estreita, e, portanto, o resultado se aproximou do valor buscado. Já a melhoria do parâmetro A , a princípio, se mostrou aplicável e com bom resultado na área fechada, não sendo uma melhoria efetiva na área aberta. Isso se deve, provavelmente, a que em área fechada as reflexões dos sinais são maiores do que em área aberta, fazendo com que lá, seja necessária a adequação do parâmetro A específico para aquele ambiente.

Na área aberta, a alteração de A em busca de um valor ideal, na verdade, interferiu na configuração original e mais adequada a locais com propagação direta dos sinais (com poucas reflexões). Dessa forma, os resultados considerados finais em termos de análise, são os do subitem C no Laboratório e os do subitem B na Quadra.

Em uma comparação direta entre os resultados dos testes nas áreas, levando-se em conta os valores de erro quadrático, que demonstram a precisão do cálculo, os melhores resultados de uma forma geral ocorreram na área aberta.

Com relação aos erros obtidos por área e por coordenada, entre todos os pontos, foram encontrados os seguintes resultados:

- Laboratório (área fechada): x teve uma variação de 3,8% a 9,2%, em y a variação foi de 3,7% a 35% e em z a variação foi de 1,4% a 7,0%.
- Quadra (área aberta): x teve uma variação de 8,6% a 14,4%, em y a variação foi de 5,2% a 11,8% e em z o valor foi fixo de 2,1%.

A partir desses dados, verifica-se que a maioria dos valores está abaixo de 10%, o que representa um resultado de grande relevância quando comparado a muitos outros trabalhos aqui referenciados, utilizando LoRa ou outras tecnologias como *ZigBee*, onde o erro médio está em torno de 20% (BONAFINI et al., 2019; FALHI et al., 2011; HERNÁNDEZ et al., 2017; KRISTALINA et al., 2016).

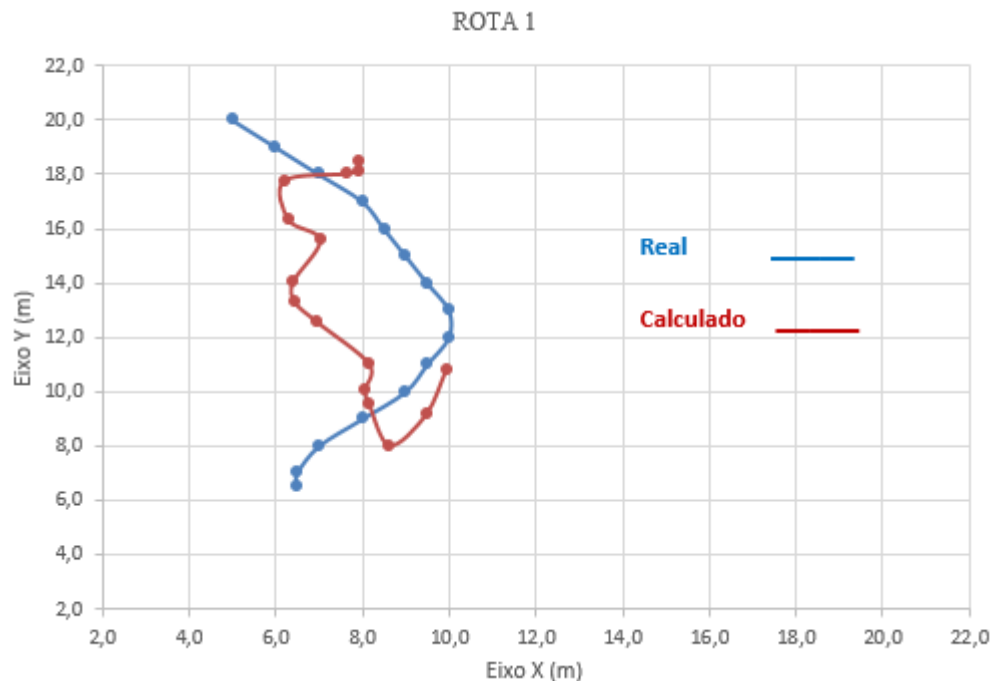
6.3 Rastreamento

Os testes de rastreamento, foram feitos com um robô controlado por *Bluetooth*, tendo o módulo Localizável fixo a uma determinada altitude, como pode ser verificado em 5.2.3. Foram predeterminadas rotas a serem seguidas nos dois ambientes de teste. O robô foi posicionado no início da rota, o programa de testes inicializado e o robô movimentado até o ponto final da rota e os dados coletados foram armazenados. O robô se move a uma velocidade aproximada de 0,5m/s (meio metro por segundo). Foram aplicadas em cada ambiente de testes, as melhorias respectivas a cada um, conforme aprendizado obtido na Localização 3D (em 6.2). A altitude do Localizável no robô foi fixada em 1 metro, para todas as rotas (igual para todas as rotas). Os resultados dos testes de Rastreamento foram plotados em gráficos, apresentando a rota real e a calculada. Item 1 refere-se à quadra e item 2 refere-se ao laboratório, que refletem a ordem em que foram realizados esses testes.

1- Quadra: A área utilizada foi de $X=13\text{m}$ e $Y=26\text{m}$, com altitude de 1,4m para os três módulos Localizadores. Os testes foram realizados sem a movimentação de pessoas, no momento. Neste ambiente, foram estabelecidas três rotas diferenciadas, sendo que em uma delas, foram coletados dados para dois tempos diferentes de recepção.

Rota 1: É uma rota curvada, com ponto de início em $x=6,5\text{m}$, $y=6,5\text{m}$ e $z=1,0\text{m}$ e ponto final em $x=5,0\text{m}$, $y=20,0\text{m}$ e $z=1,0\text{m}$. Para esta rota, foi utilizado $SF=7$ e Tempo de 0,5s para recepção dos sinais. O valor médio da altitude foi o mesmo em todo o trajeto, sendo $z=1,10\text{m}$, por esse motivo, o gráfico do resultado (Figura 51) apresenta apenas as variações das coordenadas x e y .

Figura 51 – Gráfico da Rota 1 - Quadra

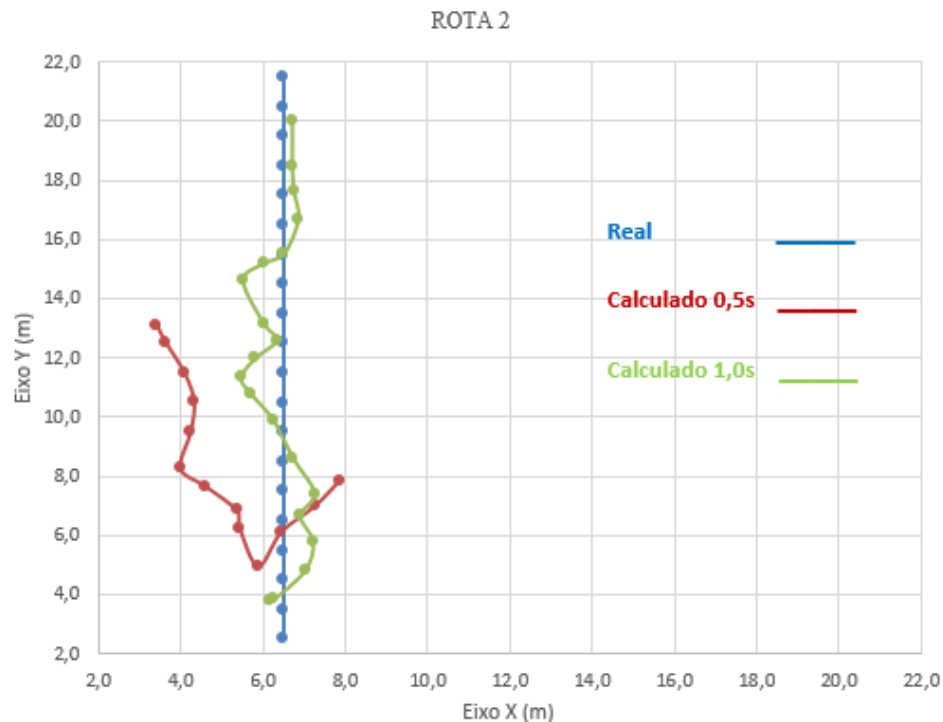


Fonte: Autoria própria.

Comentário: A faixa de erros resultantes desta rota está entre 2% e 53% para x e 0,056% a 67% em y. Apesar disso, é notável a grande distorção dos valores, provocando uma inversão no traçado da rota resultante em relação à original. Uma provável causa é a associação de três fatores: Fator de espectro baixo ($SF=7$), tempo de recepção dos sinais muito baixo ($T=0,5s$) e a movimentação nas duas coordenadas (x e y), provocando múltiplos sinais e distorção da leitura.

Rota 2: É uma rota em linha reta, com ponto de início em $x=6,5m$, $y=2,5m$ e $z=1,0m$ e ponto final em $x=6,5m$, $y=22,5m$ e $z=1,0m$. Para esta rota, foram feitos dois testes, o primeiro com $SF=7$ e Tempo de 0,5s para recepção dos sinais e o segundo com $SF=7$ e Tempo de 1,0s para recepção dos sinais. O valor médio da altitude foi o mesmo em todo o trajeto, sendo $z=1,10m$, por esse motivo, o gráfico do resultado (Figura 52) apresenta apenas as variações das coordenadas x e y.

Figura 52 – Gráfico da Rota 2 - Quadra

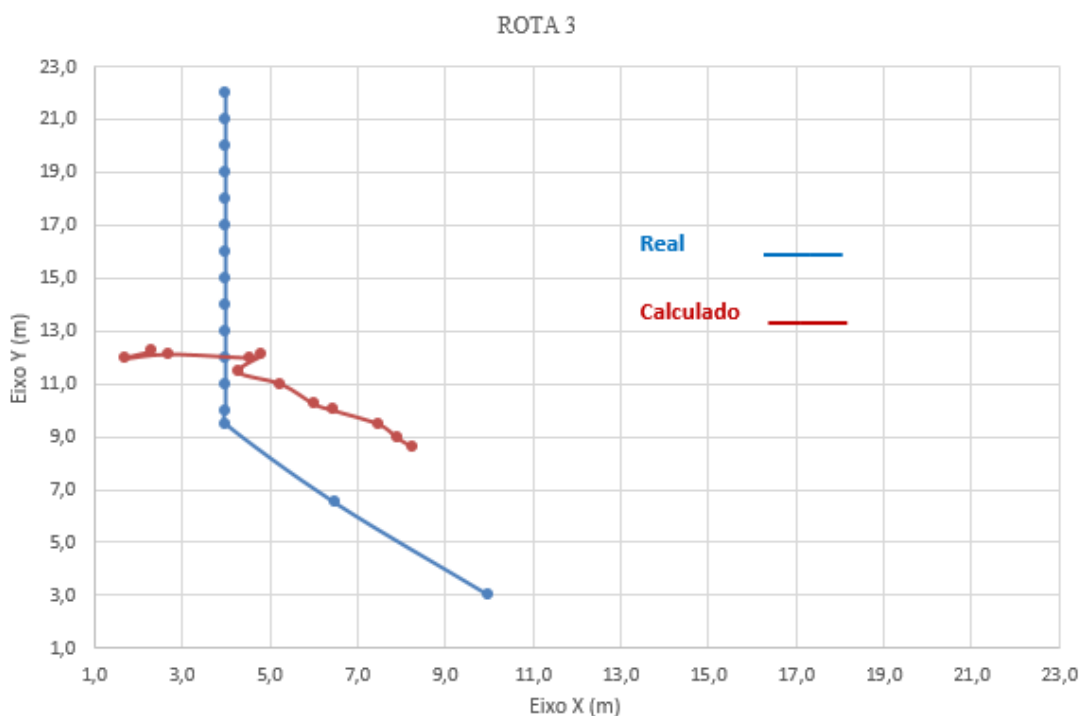


Fonte: Autoria própria.

Comentário: Rota com $T=0,5s$: Erros entre 1% e 48% em x e 0,2% a 214% em y. Embora o traçado resultante apresente a maioria dos pontos na direção do real (no crescente de y), alguns pontos iniciais estão no sentido inverso e o ponto final da rota está muito abaixo do real. Rota com $T=1,0s$: Erros entre 0% e 20% em x e 0,2% a 59% em y. Este foi o melhor resultado obtido nos testes de rastreamento, onde a curva resultante se aproxima do real, com pontos de início e término próximos dos pontos reais e a curva toda calculada no sentido correto de movimento.

Rota 3: É uma rota com duas retas em ângulo, com ponto de início em $x=10,0m$, $y=3,0m$ e $z=1,0m$ e ponto final em $x=4,0m$, $y=23,0m$ e $z=1,0m$. Para esta rota, foi utilizado $SF=7$ e Tempo de 0,5s para recepção dos sinais. O valor médio da altitude foi o mesmo em todo o trajeto, sendo $z=1,10m$, por esse motivo, o gráfico do resultado (Figura 53) apresenta apenas as variações das coordenadas x e y.

Figura 53 – Gráfico da Rota 3 - Quadra



Fonte: Autoria própria.

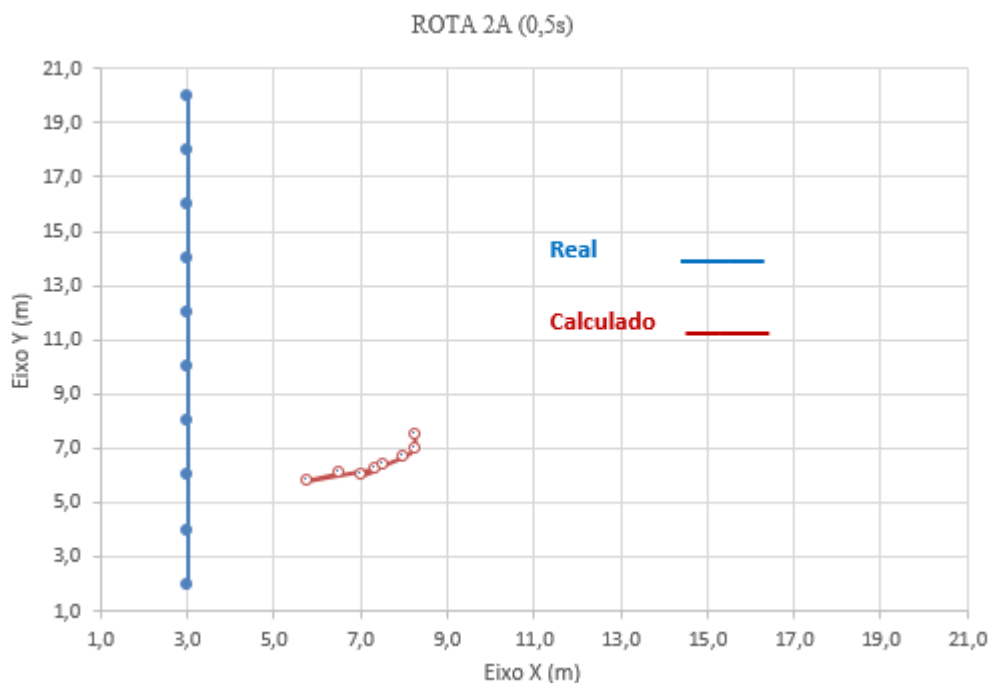
Comentário: A faixa de erros resultantes desta rota está entre 7% e 87% para x e 0,1% a 187% em y. Na parte inicial do trajeto resultante (primeira reta), o sentido está próximo do real, porém, ao iniciar a segunda reta (paralela ao eixo Y), nota-se uma grande distorção dos valores, provocando uma paralização da resultante de y. Novamente, a causa provável se deve ao *SF*, ao tempo de recepção dos sinais e à mudança repentina do movimento nas duas coordenadas (x e y), provocando múltiplos sinais e distorção da leitura.

Os resultados dos testes em área aberta, apesar dos problemas encontrados, apresentam a possibilidade de utilização da plataforma de Localização 3D também para essa aplicação, sobretudo quando observado o resultado da Rota 2 com tempo de 1,0s. Baseado na premissa das distorções ocorridas quando da mudança de movimento do objeto nas coordenadas x e y, serem decorrentes dos valores de *SF* e tempo de recepção adotados, optou-se por avaliar novos valores desse parâmetros, nos testes realizados em área fechada.

2- Laboratório: A área útil/utilizada foi de X=7m e Y=22m, com altitude de 2,6m para os três módulos Localizadores. Os testes foram realizados sem a movimentação de pessoas e sem outros equipamentos em operação, no momento. Neste ambiente, foi estabelecida apenas uma rota, em função do mobiliário e dos equipamentos no local. Foram coletados dados dessa mesma rota, para três tempos diferentes de recepção.

Rota 2A: É uma rota em linha reta, com ponto de início em $x=3,0\text{m}$, $y=2,0\text{m}$ e $z=1,0\text{m}$ e ponto final em $x=3,0\text{m}$, $y=20,0\text{m}$ e $z=1,0\text{m}$. Para esta rota, foi utilizado $SF=7$ e Tempo de $0,5\text{s}$ para recepção dos sinais. O valor médio da altitude foi o mesmo em todo o trajeto, sendo $z=1,08\text{m}$, por esse motivo, o gráfico do resultado (Figura 54) apresenta apenas as variações das coordenadas x e y .

Figura 54 – Gráfico da Rota 2A - Lab

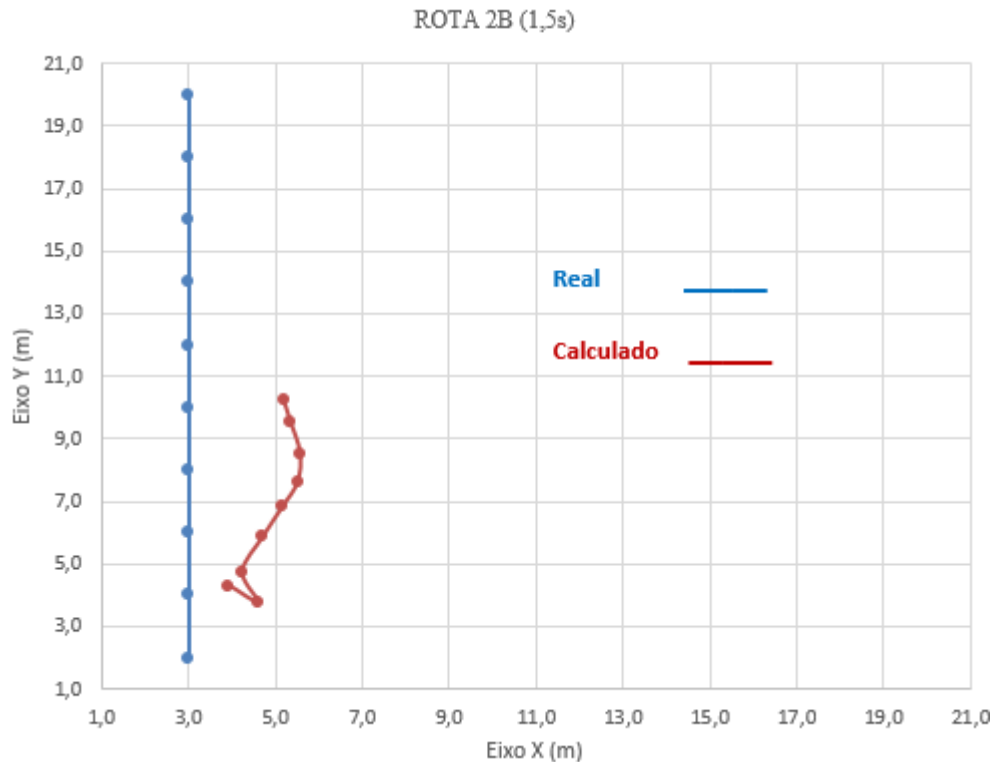


Fonte: Autoria própria.

Comentário: O resultado apresenta erros em x entre 115% e 175% e em y entre 63% e 200%. O ponto final calculado com $y=7,5\text{m}$ tem significado de que todos os pontos acima desse são dispersos (fora da curva) e foram filtrados.

Rota 2B: É uma rota em linha reta, com ponto de início em $x=3,0\text{m}$, $y=2,0\text{m}$ e $z=1,0\text{m}$ e ponto final em $x=3,0\text{m}$, $y=20,0\text{m}$ e $z=1,0\text{m}$. Para esta rota, foi utilizado $SF=9$ e Tempo de $1,5\text{s}$ para recepção dos sinais. O valor médio da altitude foi o mesmo em todo o trajeto, sendo $z=1,08\text{m}$, por esse motivo, o gráfico do resultado (Figura 55) apresenta apenas as variações das coordenadas x e y .

Figura 55 – Gráfico da Rota 2B - Lab

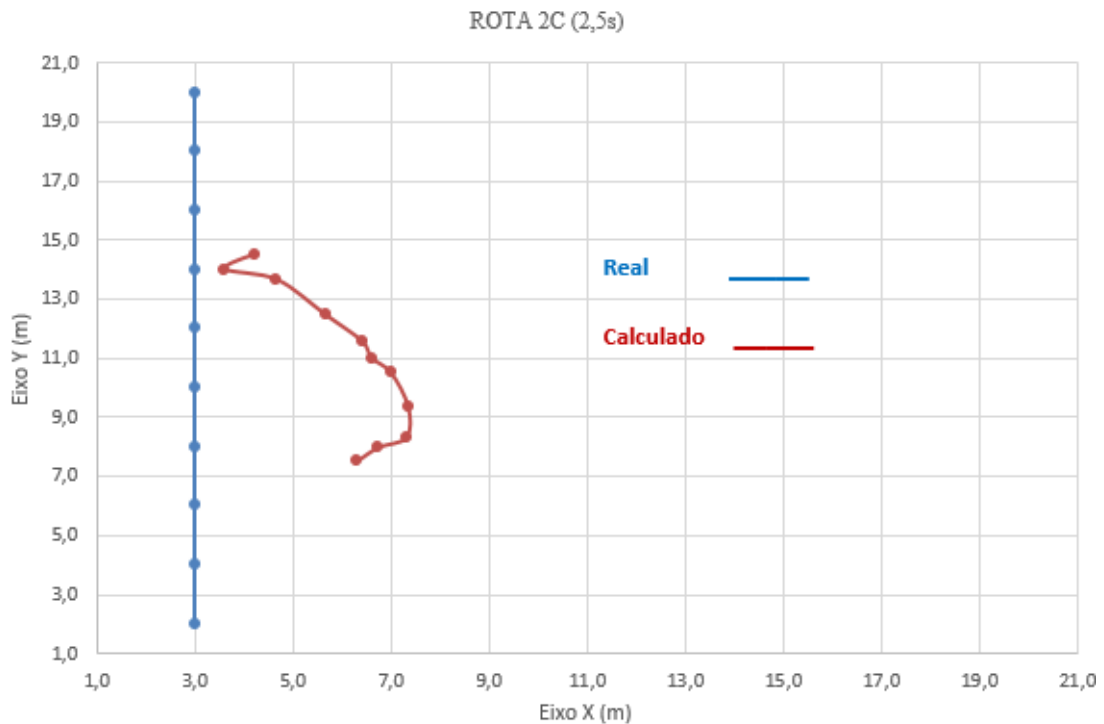


Fonte: Autoria própria.

Comentário: Este resultado apresenta erros em x entre 31% e 73% e em y entre 49% e 115%. O ponto final calculado em $y=10,2$ m tem uma melhoria de 36% em relação à Rota 2A, porém, ainda produziu muitos pontos dispersos.

Rota 2C: É uma rota em linha reta, com ponto de início em $x=3,0$ m, $y=2,0$ m e $z=1,0$ m e ponto final em $x=3,0$ m, $y=20,0$ m e $z=1,0$ m. Para esta rota, foi utilizado $SF=10$ e Tempo de 2,5s para recepção dos sinais. O valor médio da altitude foi o mesmo em todo o trajeto, sendo $z=1,08$ m, por esse motivo, o gráfico do resultado (Figura 56) apresenta apenas as variações das coordenadas x e y.

Figura 56 – Gráfico da Rota 2C - Lab



Fonte: Autoria própria.

Comentário: Nesta rota, os erros encontrados são em x entre 41% e 110% e em y entre 28% e 275%. O ponto final calculado em y=14,5m apresenta uma melhora de 93% em relação à Rota 2A.

Os resultados encontrados nos testes de rastreamento em área fechada, indicam uma melhora quanto à recepção dos sinais e diminuição de erros relacionada ao aumento de SF , assim como a aproximação do traçado calculado ao traçado real, relacionado ao tempo de recepção dos dados. Em uma análise geral, observa-se:

- A Rota 2A, com tempo e SF mais baixos, produziu o pior resultado entre todos, com dados muito dispersos.
- A Rota 2C, com os maiores valores de tempo e SF , produziu um resultado com o melhor traçado em relação a y (aumento contínuo de y e ponto de término da rota mais próximo do real), contudo, gerou erros muito grandes em x.
- A Rota 2B, produziu os menores erros em x e um traçado de y com apenas um ponto no sentido inverso, porém, com o ponto final da rota muito distante do real, o que indica pontos dispersos (fora da curva) dali em diante.

6.4 Discussão dos Resultados do Rastreamento

Mais uma vez, é importante observar a relevância do parâmetro SF utilizado no LoRa, quanto à qualidade do sinal trocado e, neste caso, sua influência no tempo de recepção desses sinais.

Assim como nos testes de Localização 3D, no Rastreamento também se observa uma melhor qualidade dos resultados obtidos na área aberta, em relação à área fechada. Na área aberta, a Rota 2 com tempo de 1,0s apresenta o melhor resultado entre todos os testes de rastreamento realizados, por meio da tendência observada na curva resultante, comparada à curva real. Em princípio, não foi levada em conta, a quantidade de pontos coincidentes entre essas curvas, mas sim, o ponto de início da rota, a sequência dos pontos seguintes (traçado da rota) e o ponto de término. Comparado ao resultado da área aberta, na área fechada, a Rota 2C é a que mais se aproxima dos critérios estabelecidos, contudo, com resultado muito inferior ao outro. O principal fator a ser considerado, para o resultado em área aberta ser melhor que na área fechada, são as múltiplas reflexões dos sinais presentes nesta última.

Com relação aos erros obtidos por coordenada, entre as melhores rotas calculadas (Rota 2 com 1,0s e Rota 2C), os valores confirmam a área aberta como melhor resultado:

- Quadra (área aberta): x teve uma variação de 0% a 20%, y de 0,2% a 59% e em z o valor foi fixo de 10%.
- Laboratório (área fechada): x teve uma variação de 41% a 110%, em y a variação foi de 28% a 275% e em z a variação foi de 8%.

A maior variação encontrada na coordenada z (sensor de altitude), em relação aos valores obtidos na Localização, é devida ao balanço do módulo Localizador, provocado pelo movimento do robô que o transporta. As interferências produzidas foram amenizadas onde os valores de SF e/ou do tempo de aquisição dos dados foram maiores, estabilizando melhor o sinal.

7 CONCLUSÕES

Este trabalho desenvolveu uma plataforma para Localização 3D de um objeto, a partir de uma rede sem fio, aplicável a ambientes *indoor* e *outdoor*, compatível e integrável a redes *IoT*. Essa mesma plataforma foi testada em aplicações de Rastreamento de objetos, nesses mesmos ambientes.

O aprendizado adquirido ao longo de seu desenvolvimento foi extenso, tanto no que se refere ao estudo de melhorias para as aplicações propriamente ditas, quanto ao conhecimento da tecnologia LoRa. As particularidades identificadas e discutidas com base nos resultados obtidos, nos permitem afirmar importantes conclusões sobre este estudo.

7.1 Localização 3D

O primeiro ponto importante a se destacar, é o fato de que a correta parametrização do LoRa é determinante para obtenção de resultados melhores e mais precisos, em especial, os parâmetros de potência (*txPower*) e fator de propagação (*SF*) do sinal. A associação desses parâmetros tornou a comunicação mais robusta, com maior estabilidade e melhor eficiência em longa distância.

As melhorias desenvolvidas para os processos de Calibração (melhoria de A) e Aquisição e Tratamento do Dados (filtro de *outliers*), foram responsáveis pelo ganho obtido em todo o processo de cálculo, possibilitando erros de coordenadas abaixo de 10% e uma precisão média de raio próxima a um metro do ponto calculado para o real.

As medidas de distâncias entre os Localizadores (formação dos eixos) e também da posição real de cada ponto testado, contém imprecisões da ordem de milímetros em cada coordenada, devidas às próprias imprecisões dos instrumentos de medidas (trenas) utilizados e, muitas vezes, pela própria dificuldade de medição no ambiente. Esse fato contribui para que o resultado da localização seja menos preciso. Contudo, uma correção para esse fator de cálculo não foi considerada neste estudo, pela sua irrelevância (já que se tratam de alguns milímetros) e pela dificuldade de sua implementação.

A aplicação da plataforma em área *indoor* trouxe como principal ponto de problema as muitas reflexões dos sinais, produzidas por paredes, mobília e equipamentos, causando distorções nos dados e consequentes erros de cálculo. Mesmo assim, as melhorias aplicadas ao processo, introduziram considerável ganho aos resultados.

Quanto a aplicação em área *outdoor*, pôde ser constatado a não interferência de múltiplas reflexões, produzindo melhor precisão de resultados. Além disso, uma das principais

funcionalidades do LoRa, que é transmissão em longa distância, pode ser comprovada, sem prejuízo dos resultados obtidos.

Com base nestas conclusões, é possível afirmar que o objetivo da plataforma de Localização 3D foi alcançado, sendo viável sua aplicação em diversas áreas e sua integração em redes *IoT*. Algumas das aplicações possíveis para a plataforma desenvolvida, estão relacionadas a variadas áreas da indústria e comércio, dentro do chamado monitoramento de mercadorias, como por exemplo, *Warehouses*, armazéns de supermercados e autopeças, locadoras, marinas, EADI (porto seco).

7.2 Rastreamento

O bom desempenho alcançado no projeto de Localização 3D foi muito importante para a obtenção dos resultados relativos ao Rastreamento.

Devido às múltiplas reflexões dos sinais *indoor*, a aplicação de rastreamento *outdoor* se mostrou também mais promissora que a *indoor*. Alguns problemas encontrados como, a geração de pontos dispersos (fora da curva) em função da movimentação do Localizável durante o trajeto, não puderam ser tratados e melhorados neste momento. Contudo, alguns aspectos importantes puderam ser identificados e aproveitados, como:

- Os trajetos em linha reta, produziram melhor resultado (conforme Rota 2 com 1,0s e Rota 3 de forma parcial, da Quadra).
- Tempos muito baixos de envio/aquisição dos dados (troca de sinalização entre os módulos), produziram interferências e cálculos errados (Rota 2 da Quadra).

Baseado nos testes realizados, nos resultados obtidos e nas particularidades identificadas, conclui-se ser viável, neste momento em alguns casos, a aplicação da plataforma desenvolvida neste trabalho, também com a função de rastreamento de objetos. Porém, há a necessidade de aprimorar os estudos dessa aplicação, a fim de entender melhor e procurar soluções para os problemas encontrados.

8 REFERÊNCIAS

- ABID, A.; KHAN, F.; HAYAT, M.; KHAN, W. Real-Time Object Tracking in Wireless Sensor Network. 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), 2017.
- ANJUM, M.; KHAN, M. A.; HASSAN, S. A.; MAHMOOD A.; QURESHI H. K.; GIDLUND M. RSSI Fingerprinting-based Localization Using Machine Learning in LoRa Networks. arXiv:2006.01278v1 [eess.SP] 1 Jun 2020.
- ANTHRAYOSE, S.; PAYAL, A. DR. Comparative Analysis of Approximate point in Triangulation (APIT) and DV-HOP algorithms for solving localization problem in Wireless Sensor Networks. 2017 IEEE 7th International Advance Computing Conference.
- BARI, N.; MANI, G.; BERKOVICH, S. Internet of things as a Methodological Concept. IEEE 2013 Fourth International Conference on Computing for Geospatial Research and Application.
- BELLECIERI, Y.; JABOUR, F.C.; JABOUR, E.G. Localização *Indoor* Baseada na Leitura Bidirecional do RSSI. Seminários de trabalho de conclusão de curso do Bacharelado em Sistemas de Informação, Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais, 2015.
- BENKIC, K.; MALAJNER, M.; PLANINSIC, P.; CUCEJ, Z. Using RSSI value for distance estimation in Wireless sensor networks based on ZigBee. 2008 15th International Conference on Systems, Signals and Image Processing.
- BONAFINI, F.; FERNANDES, C. D.; DEPARI, A.; FERRARI, P.; FLAMMINI, A.; PASETTI, M.; RINALDI, S.; SISINN, E. Evaluating indoor and outdoor localization services for LoRaWAN in Smart City applications. 2019 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 and Internet of Things.
- CHIANI, M.; GIOGETTI, A.; PAOLINI, E. Sensor Radar for Object tracking. Proceedings of the IEEE (Volume: 106, Issue: 6, June 2018).
- CONVINGTON, M. J.; CARSKADDEN, R. Threat Implications of the Internet of Things. IEEE 2013 15th International Conference on Cyber Conflict.
- FAHEEM, A.; VIRRANKOSKI, R.; ELMUSRATI, M. Improving RSSI based distance estimation for 802.15.4 wireless sensor networks. 2010 IEEE International Conference on Wireless Information Technology and Systems.
- FALHI, A.; GUENNOUN, Z. Localization Estimation in Wireless Sensor Networks Based on IEEE 802.15.4 standard. 2011 International Conference on Multimedia Computing and Systems.
- FARGAS, B.C.; PETERSE, M.N. GPS-free Geolocation using LoRa in Low-Power WANs. In Proceedings of 2017 Global Internet of Things Summit (Glo TS) IEEE.
- FERNANDES, A.S.L. Comunicação Ad Hoc em Equipas de Robôs Móveis Utilizando a Tecnologia ZigBee. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrónica e de Computadores, Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade de Coimbra, Portugal, setembro de 2012.

FERNANDES, C.D.; DEPARI, A.; SISINNI, E.; FERRARI, P.; FLAMMINI, A.; RINALDI, S.; PASETTI, M. Hybrid indoor and outdoor localization for elderly care applications with LoRaWAN. IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA), 2020.

GRACIOLI, G.; FRÖHLICH, A.A.; PIRES, R.P.; WANNER, L. Evaluation of an RSSI-based Location Algorithm for Wireless Sensor Networks. IEEE Latin America Transactions, v10.9, No. 1, March 2011.

HERNÁNDEZ, R. V.; RODRÍGUEZ, D. M.; ROSALES, C. V.; DOMINGUEZ, L. R. 3-D Position Location in Ad Hoc Networks: A Manhattanized Space. IEEE Communications Letters (Volume: 21, Issue: 1, Jan. 2017).

IBORRA, R. S.; GOMEZ, J. S.; VIÑAS, J. B.; CANO, M. D.; SKARMETA, A. F. Performance Evaluation of LoRa Considering Scenario Conditions. Sensors (Basel) 2018 Mar; 18(3): 772. Published online.

JIRKU M.; KUBELKA V.; REINSTEIN M. WiFi localization in 3D. 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), October 9-14, 2016, Daejeon, Korea.

KIM, D. H.; PARK, J. B.; SHIN, J. H.; KIM, J. D. Design and Implementation of object tracking system based on LoRa. ICOIN 2017 IEEE.

KRISTALINA, P.; PRATIARSO, A.; BADRIYAH, T.; PUTRO, E. D. A Wireless Sensor Networks Localization Using Geometric Triangulation Scheme for Object tracking in Urban Search and Rescue Application. 2016 2nd International Conference on Science in Information Technology (ICSITech).

KÜÇÜKKEÇECİ, C.; YAZICI, A. Multilevel Object Tracking in Wireless Multimedia Sensor Networks for Surveillance Applications Using Graph-Based Big Data. IEEE Access, 2019.

LAM, K.; CHENUNG, C.; LEE, W. LoRa-based Localization System for Noisy Outdoor Environment. 2017 IEEE 13th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob).

LAZARO, A.; LAZARO, M.; VILLARINO, R. Room-Level Localization System Based on LoRa Backscatters. IEEE Access, January 20, 2021.

LoRa-ALLIANCE. A technical overview of LoRa and LoRaWAN. San Ramon, CA, USA, 2015.

LUO, J.; WANG, Z. A Novel Closed-Form Estimator for 3D Source Localization Using Angle of Arrivals and Gain Ratio of Arrivals. Proceedings of the 36th Chinese Control Conference July 26-28, 2017, Dalian, China.

MAHMOUDZADEH, B.; FAEZ, K. HCTT&R: A complete Scheme for Object Tracking and Recovery of Lost Objects in Cluster-Based Wireless Sensor Networks. 6th International Symposium on Telecommunications (IST), 2012.

NUGRAHA, A. T.; HAYATI, N.; SURYANEGARA, M. The Experimental Trial of LoRa System for Tracking and Monitoring Patient with Mental Disorder. International Conference on Signals and Systems, 2018.

PANICKER, J.G.; AZMAN, M.; KASHYAP, R. A LoRa Wireless Mesh Network for Wide-Area Animal Tracking. IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT), 2019.

PASSAFIUME, M.; MADDIO, S.; LUCARELLI, M.; CIDRONALI, A. An Enhanced Triangulation Algorithm for a Distributed RSSI-DoA Positioning System. 2016 Proceedings of the 13th European Radar Conference.

RAZA, U.; KULKARNI, P.; SOORIYABANDARA, M. Low Power Wide Area Networks: An Overview. IEEE Communications Surveys & Tutorials (Volume: 19, Issue: 2, Second quarter 2017).

REGA, A.; VITOLO, F.; PATALANO, S.; GERBINO, S. Sensor Data Fusion-Based Locating Method for Reverse Engineering Scanning Systems. 2019 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 and Internet of Things.

SALAMAH, M.; ZAWAIDEH, F.; ZAWAIDEH, F. Optimal Object Tracking via Wireless Sensor Networks. International Conference on Electronics, Computer and Computation (ICECCO), 2013.

SANCHEZ, L.; MUÑOZ, L.; GALACHE, J. A.; SOTRES, P.; SANTANA, R. J.; GUTIERREZ, V.; RAMDHANY, R.; GLUHAK, A.; KRICO, S.; THEODORIDIS, E.; PFISTERER, D. SmartSantander: *IoT* experimentation over smart city testbed. IEEE, Article in Press, Computer Networks 2014.

SILVA, L.R.B. Método para Aferição de Distâncias entre Nós Sensores Baseado em RSSI. Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, 2014.

SPINSANTE, S.; GIOACCHINI, L.; SCALISE, L. A novel experimental-based tool for the design of LoRa networks. 2019 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 and Internet of Things.

TREVISAN, L.M. Um Algoritmo de Localização de Nós em Redes Sem Fio Usando Nível de Potência do Sinal. Dissertação para obtenção de título de Mestre em Informática, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, fevereiro de 2009.

TRINH, L.H.; BUI, V.X.; FERRERO, F.; NGUYEN, T.Q.K; LE, M.H. Signal Propagating of LoRa Technology Using for Smart Building Applications. Proceedings of 2017 IEEE CAMA, Tsukuba, Japan.

TZORTZAKIS, K.; PAPAFOTIS, K.; SOTIRIADIS, P. Wireless Self Powered Environmental Monitoring System for Smart Cities Based on LoRa. 2017 Panhellenic Conference on Electronics and Telecommunications (PACET).

VEJLGAARD, B.; LAURIDSEN, M.; NGUYEN H.; KVÁCS, I.Z.; MOGENSEN, P.; SORENSEN, M. Coverage and Capacity Analysis of Sigfox, LoRa, GPRS, and NB-*IoT*. IEEE 85th Vehicular Technology Conference, 2017.

VILLAS, L.A.; GUIDONI, D.L.; BOUKERCHE, A.; LOUREIRO, A.A.F; UEYAMA, J. Localização 3D em Redes de Sensores Sem Fio Utilizando Veículo Aéreo não Tripulado. 31º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos – SBRC 2013.

ZHAO, C.; WANG, B. A MLE-PSO Indoor Localization Algorithm Based On *RSSI*. Proceedings of the 36th Chinese Control Conference July 26-28, 2017, Dalian, China.

WAN, X.; YANG, Y.; DU, X.; SARDAR, M.S. Design of Propagation Testnode for LoRa Based Wireless Underground Sensor Networks. Progress in Electromagnetics Research Symposium – Fall, Singapore, 19-22 November 2017.