

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO DE ENGENHARIA ELETRÔNICA

ERIC HIDEO YOSHITOME
JOÃO VITOR RODRIGUES DA CRUZ

**GEOLOCALIZAÇÃO DE DISPOSITIVO DE BAIXO CONSUMO EM
AMBIENTE RURAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2019

ERIC HIDEO YOSHITOME
JOÃO VITOR RODRIGUES DA CRUZ

**GEOLOCALIZAÇÃO DE DISPOSITIVO DE BAIXO CONSUMO EM
AMBIENTE RURAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. João Luiz Rebelatto
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CURITIBA
2019

ERIC HIDEO YOSHITOME
JOÃO VITOR RODRIGUES DA CRUZ

GEOLOCALIZAÇÃO DE DISPOSITIVO DE BAIXO CONSUMO EM AMBIENTE RURAL

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletrônico, do curso de Engenharia Eletrônica do Departamento Acadêmico de Eletrônica (DAELN) outorgado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Os alunos Eric Hideo Yoshitome e João Vitor Rodrigues da Cruz foram arguidos pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Curitiba, 20 de maio de 2019.

Prof. Dr. Robinson Vida Noronha
Coordenador de Curso
Engenharia Eletrônica

Prof^a. Dr^a. Carmen Caroline Rasera
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Eletrônica do DAELN

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. João Luiz Rebelatto
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

Prof. Dr. Guilherme de Santi Peron
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Dr. Marcos Eduardo Pivaro Monteiro
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Eletrônica.

Nós dedicamos este trabalho ao desenvolvimento da civilização humana.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a todas as pessoas que contribuíram direta e indiretamente para a realização deste trabalho.

Ao nosso orientador João Luiz Rebelatto por toda orientação e ajuda ao longo do desenvolvimento do trabalho.

A nossas famílias: Sayuri Matsumoto Yoshitome, Marcelo Massao Yoshitome e Gustavo Massao Yoshitome, familiares do aluno Eric Hideo Yoshitome; Cristina de Oliveira Rodrigues, Aristides Schier da Cruz, Ruy de Lara Ramos e Gabriel Francisco Alencar da Cruz, familiares do aluno João Vitor Rodrigues da Cruz, por todo apoio.

Aos grandes amigos: Klaus Both, Paulo Vitor Ludewig, Luciana Mello, Lilian Cava e Xie Jiayu por tornarem os últimos cinco anos e meio mais suportáveis.

A empresa Tecronics Sistemas Eletrônicos por disponibilizar os mais diversos instrumentos de medição e ao colega de trabalho Patresi Camargo Molari pela ajuda com as minuciosidades do hardware.

Ao amigo de longa data Gustavo Yang pelo empréstimo de um dos elementos fundamentais do projeto.

Aos colegas Davi Tokikawa e Erika Both pela ajuda na fase inicial do projeto.

É um enorme agradecimento aos consagrados Vinicius Debur Bernert e Luciana Mello por nos acompanharem durante horas sob um sol escaldante nos tortuosos caminhos do parque Barigui.

Bem quisera não me importar mais com coisa alguma. Não o permite, porém, o fogo que ainda existe n'alma. (Visconde de Mauá)

RESUMO

YOSHITOME, E. H.; CRUZ, J. V. R.. Geolocalização de Dispositivo de Baixo Consumo em Ambiente Rural. 2019. 75 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

Devido ao crescente interesse no desenvolvimento de sistemas de Internet das Coisas, há uma alta demanda nos últimos anos de dispositivos eletrônicos geolocalizados. Surge, então, a necessidade de realizar a geolocalização de dispositivos em grandes áreas, como no ambiente rural, tendo como fator limitante o consumo energético. O projeto desenvolvido apresenta uma solução onde o dispositivo geolocalizado, *tracker*, demanda baixo consumo ao utilizar um rádio LoRa, que emprega tecnologia *Low Power Wide Area Network* (LPWAN). É realizado o cálculo que leva à posição do dispositivo através de algoritmos de *Time Difference of Arrival* (TDOA) e de *Received Signal Strength Indicator* (RSSI). A arquitetura do sistema é composta por três bases que formam uma região triangular onde o *tracker* se encontra. Essas bases utilizam módulos GPS para atingir sincronia temporal com precisão de centenas de nanossegundos. Foram realizados testes que resultaram em estimativas com exatidão entre 66 m e 253 m e precisão entre 32 m e 210 m para o método do TDOA. A partir dos dados de tempos e posições encontrados, o sistema foi modelado em MATLAB obtendo resultados próximos aos observados na prática.

Palavras-chave: Geolocalização. TDOA. RSSI. LPWAN. LoRa.

ABSTRACT

YOSHITOME, E. H.; CRUZ, J. V. R.. Geolocation of Low Power Consumption Device in Rural Environment. 2019. 75 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

Due to the rising interest in the development of Internet of Things, there has been a high demand of geolocated electronic devices in the last few years. The necessity to carry out the geolocation of devices in large areas, such as the rural environment, has the energy consumption as a limiting factor. The developed project presents a solution where the geolocated device, tracker, demands low power consumption using a LoRa radio, which employs Low Power Wide Area Network (LPWAN) technology, performing calculations that lead to the position of the device through algorithms of Time Difference of Arrival (TDOA) and Received Signal Strength Indicator (RSSI). The system architecture consists of three bases that arrange a triangular region where the tracker is located. These bases use GPS modules to achieve temporal synchronization with the precision of hundreds of nanoseconds. Tests were performed, resulting in estimates of accuracy between 66 m to 253 m and precision between 32 m to 210 m for the TDOA method. Using the found data of timestamps and positions, the system was modeled in MATLAB obtaining results close to those observed in practice.

Keywords: Geolocation. TDOA. RSSI. LPWAN. LoRa.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Trilateração com RSSI	20
Figura 2 – Resultados do exemplo de RSSI	21
Figura 3 – Trilateração com TOA	22
Figura 4 – Parâmetros da hipérbole	23
Figura 5 – Representação da hipérbole com os dois braços	23
Figura 6 – Trilateração com TOA e TDOA	24
Figura 7 – TDOA com recepção ruidosa	25
Figura 8 – Resultados do exemplo de TDOA	26
Figura 9 – Resultados do exemplo de TDOA com erro	26
Figura 10 – Arquitetura LoRaWAN	29
Figura 11 – Diagrama Geral do Sistema	30
Figura 12 – Diagrama de Dispositivos	31
Figura 13 – Montagem do <i>tracker</i>	32
Figura 14 – Montagem do <i>tracker</i> dentro do gabinete	32
Figura 15 – Montagem da base	34
Figura 16 – Localização das bases e do <i>tracker</i>	43
Figura 17 – Localização da média dos resultados de cada rodada	43
Figura 18 – Localização do melhor resultado de cada rodada	44
Figura 19 – Resultados do cálculo de posição por TDOA da rodada 3	44
Figura 20 – Resultados do cálculo de posição por RSSI da rodada 3	45
Figura 21 – Histograma e ajuste com diferença de distância nula	49
Figura 22 – Histograma e ajuste com diferença de distância não nula	49
Figura 23 – Resultados da simulação da rodada 4 com 100 iterações	50
Figura 24 – Resultados da simulação da rodada 4 com quatro bases	51
Figura 25 – Diagrama de Tempo do Sistema	57
Figura 26 – Diagrama de Classes da Aplicação	58
Figura 26 – Diagrama de Classes da Aplicação	59
Figura 27 – Diagrama de Estados da Base 0	60
Figura 28 – Diagrama de Estados da Base 1	61
Figura 29 – Diagrama de Estados da Base 2	62
Figura 30 – Resultados do cálculo de posição por TDOA da rodada 1	63
Figura 31 – Resultados do cálculo de posição por RSSI da rodada 1	63
Figura 32 – Resultados do cálculo de posição por TDOA da rodada 2	64
Figura 33 – Resultados do cálculo de posição por RSSI da rodada 2	64
Figura 34 – Resultados do cálculo de posição por TDOA da rodada 3	65
Figura 35 – Resultados do cálculo de posição por RSSI da rodada 3	65

Figura 36 – Resultados do cálculo de posição por TDOA da rodada 4	66
Figura 37 – Resultados do cálculo de posição por RSSI da rodada 4	66
Figura 38 – Resultados do cálculo de posição por TDOA da rodada 5	67
Figura 39 – Resultados do cálculo de posição por RSSI da rodada 5	67
Figura 40 – Resultados do cálculo de posição por TDOA da rodada 6	68
Figura 41 – Resultados do cálculo de posição por RSSI da rodada 6	68
Figura 42 – Resultados do cálculo de posição por TDOA da rodada 7	69
Figura 43 – Resultados do cálculo de posição por RSSI da rodada 7	69
Figura 44 – Resultados do cálculo de posição por TDOA da rodada 8	70
Figura 45 – Resultados do cálculo de posição por RSSI da rodada 8	70
Figura 46 – Resultados da simulação da rodada 4 com 5 iterações	71
Figura 47 – Resultados da simulação da rodada 4 com 5 iterações	71
Figura 48 – Resultados da simulação com bases distribuídas formando um quadrado . .	72
Figura 49 – Resultados da simulação com bases distribuídas formando um quadrado . .	72

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Modelo da mensagem	38
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Componentes da base	33
Tabela 2 – Configurações de aplicação	40
Tabela 3 – Configurações de middleware	41
Tabela 4 – Distâncias aos pontos médios	46
Tabela 5 – Desvio padrão	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
DAELN	Departamento Acadêmico de Eletrônica
IoT	<i>Internet of Things</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GSM	<i>Global System for Mobile communications</i>
TTF	<i>Time to First Fix</i>
LoRa	<i>Long Range</i>
AOA	<i>Angle of Arrival</i>
TOA	<i>Time of Arrival</i>
TDOA	<i>Time Difference of Arrival</i>
FOA	<i>Frequency of Arrival</i>
RSSI	<i>Received Signal Strength Indication</i>
LNSM	<i>Log Normal Shadowing Model</i>
WSN	<i>Wireless Sensor Network</i>
RF	<i>Radio Frequency</i>
LPWAN	<i>Low Power Wide Area Network</i>
FSK	<i>Frequency Shifting Keying</i>
CSS	<i>Chirp Spread Spectrum</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
TP	<i>Transmission Power</i>
CF	<i>Carrier Frequency</i>
SF	<i>Spreading Factor</i>
BW	<i>Bandwidth</i>
CR	<i>Code Rate</i>

FEC *Forward Error Correction*

TI *Texas Instruments*

LISTA DE SÍMBOLOS

P_r	Potência recebida
P_t	Potência transmitida
G_t	Ganho do transmissor
G_r	Ganho do receptor
λ	Comprimento de onda
d	Distância
L	Fator de perda
c	Velocidade da luz
t	Tempo
x	Coordenada no eixo das abscissas
y	Coordenada no eixo das ordenadas

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	17
1.1 OBJETIVOS	18
1.1.1 OBJETIVOS GERAIS	18
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
2 – REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1 MÉTODOS PARA CÁLCULO DE POSIÇÃO	19
2.1.1 RECEIVED SIGNAL STRENGTH INDICATION (RSSI)	19
2.1.2 TIME OF ARRIVAL (TOA)	21
2.1.3 TIME DIFFERENCE OF ARRIVAL (TDOA)	22
2.2 RÁDIO LORA	27
2.2.1 PARÂMETROS DO RÁDIO LORA	27
2.2.2 LORAWAN	28
3 – METODOLOGIA	30
3.1 ESTRUTURA DO SISTEMA	30
3.1.1 ESTRUTURA INTERNA DO TRACKER	31
3.1.2 ESTRUTURA INTERNA DAS BASES	33
3.2 SINCRONIA TEMPORAL ENTRE AS BASES	34
3.3 COMPORTAMENTO DO SISTEMA	36
3.3.1 COMPORTAMENTO GERAL DO SISTEMA	36
3.3.2 COMPORTAMENTO INDIVIDUAL DOS DISPOSITIVOS	37
4 – MEDIÇÕES E TESTES	40
4.1 PARÂMETROS UTILIZADOS	40
4.2 TESTES PRELIMINARES	41
4.3 TESTE FINAL	42
5 – ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	46
5.1 TESTE FINAL	46
5.2 SIMULAÇÕES EM MATLAB	48
5.3 CONSUMO ENERGÉTICO	51
6 – CONCLUSÃO	52
6.1 TRABALHOS FUTUROS	52
Referências	54

Apêndices	56
APÊNDICE A–Diagrama de Tempo do Sistema	57
APÊNDICE B–Diagrama de Classes da Aplicação	58
APÊNDICE C–Diagrama de Estados da Base 0	60
APÊNDICE D–Diagrama de Estados da Base 1	61
APÊNDICE E–Diagrama de Estados da Base 2	62
APÊNDICE F–Resultados do Teste Final	63
APÊNDICE G–Simulações	71
Anexos	73
ANEXO A–Definição de Exatidão	74
ANEXO B–Definição de Precisão	75

1 INTRODUÇÃO

Dispositivos eletrônicos geolocalizados têm tido alta demanda nos últimos anos com o crescente interesse dos setores de desenvolvimento tecnológico em sistemas de Internet das Coisas (IoT, do inglês *Internet of Things*). O mercado apresenta opções bastante acessíveis de receptores GPS combinados a redes GSM (FARGAS B. C.; PETERSEN, 2017). Dessa forma, há diversas aplicações cuja escolha do dispositivo de geolocalização é o receptor GPS. Embora esses sistemas possibilitem grande precisão na localização e tenham tido considerável redução de custo nos últimos anos, ainda não são as opções mais baratas disponíveis no mercado (LORA ALLIANCE STRATEGY COMMITTEE, 2018).

Outra desvantagem atrelada a receptores de GPS é o alto consumo energético inerente à tecnologia, o que tem como consequência a necessidade de troca de baterias com frequência em dispositivos que os utilizam. Conforme aponta FARGAS B. C.; PETERSEN (2017), o consumo desses dispositivos é em torno de 30-50 mA. Em uma aplicação que utiliza as melhores baterias de 9 V disponíveis no mercado que apresentam uma carga de 1200 mAh, o GPS em uso contínuo sozinho consumiria toda a carga, na melhor das hipóteses, em 72 horas. Caso a aplicação não tenha como requisito a geolocalização do dispositivo de forma contínua, o GPS também não é a melhor alternativa. Ao religar um receptor GPS de um modo de baixo consumo, o tempo necessário para adquirir a primeira resolução de localização (TTFF, do inglês *Time to First Fix*) pode levar de 30 segundos a alguns minutos, dependendo das condições em que o dispositivo se encontra (LEHTINEN M.; HAPPONEN, 2008). Esse tempo é consideravelmente grande para a aquisição de uma medição, levando a um consumo ineficiente da fonte energética. Uma forma de acelerar o TTFF é através da assistência de redes GSM, porém ainda não compensaria o consumo energético que este adiciona.

Há aplicações onde o próprio dispositivo não necessita saber sua posição, como no caso de uma central que monitora a posição de múltiplos dispositivos. Nessa situação, esse dispositivo teria que enviar essa informação para a central, o que demandaria ainda mais consumo energético devido à comunicação sem fio. Aplicações como essa são muito comuns em ambientes rurais, onde pode haver a necessidade de monitorar a posição de animais em um pasto ou equipamentos em uma grande área.

Associado a sistemas de comunicação sem fio, outro campo em alta é o de redes de sensores sem fio (WSNs, do inglês *Wireless Sensor Networks*), possuindo diversas potenciais aplicações em áreas como indústria, transporte e segurança. Nesse tipo de rede, um dispositivo chamado nó possui funções de sensoreamento (realização de medidas), computação e comunicação. Tipicamente, junto aos nós estão baterias para fornecimento de energia e algum tipo de transceptor de rádio frequência (RF). Nesse contexto, aumenta-se o interesse em torno de tecnologias *Low Power Wide Area Network* (LPWAN), que propõe conectividade em grandes áreas na escala de quilômetros com baixo consumo energético ao custo de uma reduzida taxa

de dados. Entrando nesse mercado, a fabricante de semicondutores Semtech introduziu o protocolo LoRa como uma solução de LPWAN (BOUNCEUR A.; CLAVIER, 2017).

Nesse contexto, o projeto desenvolvido surge como uma solução de geolocalização de dispositivos em ambientes rurais para monitoramento remoto. Assim, a tecnologia LPWAN do LoRa, cujo custo e consumo dos módulos são reduzidos, torna-se uma opção viável que atende aos requisitos para a criação do sistema proprietário de geolocalização. Existem soluções prontas no mercado com dispositivos que realizam o mesmo sistema de geolocalização, como o apresentado em Banggood (2019), contudo atualmente possuem custo elevado se comparado ao sistema proposto.

1.1 OBJETIVOS

Esta seção tem como finalidade descrever os objetivos do projeto. A Subseção 1.1.1 descreve resumidamente a ideia central do projeto, delimitando o escopo do trabalho. A Subseção 1.1.2 descreve os objetivos de forma mais detalhada, evidenciando os objetos do trabalho com suas particularidades.

1.1.1 OBJETIVOS GERAIS

Este projeto tem como objetivo desenvolver um sistema de geolocalização baseado em LPWAN com consumo energético menor que o de sistemas baseados em GPS.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver uma rede de comunicação utilizando tecnologia LoRa, de forma que um dispositivo de posição desconhecida, *tracker*, seja capaz de se comunicar com múltiplas bases, as quais possuem localização conhecida.
- Implementar algoritmos para estimar a localização do *tracker* que utilizem como entrada informações sobre sinais transmitidos pelo *tracker* que foram adquiridos nas bases.
- Realizar medições em campo a fim de avaliar o desempenho do sistema desenvolvido.
- Realizar a modelagem do erro obtido nas medições para aplicá-los a um simulador em Matlab que permita avaliar o desempenho do sistema quando os mais diferentes parâmetros são alterados, tais como o número de bases e posição do *tracker*.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo são explicados os conceitos necessários para o entendimento dos componentes base do projeto. Para realizar geolocalização com rádio, é necessário utilizar algum parâmetro da recepção da onda eletromagnética para calcular a posição. A Seção 2.1 objetiva mostrar e explicar três formas comuns de realizar esses cálculos. A seção Seção 2.2 tem como fim explicar o funcionamento do protocolo LoRa, detalhando as características do rádio utilizado e explicar brevemente o protocolo LoRaWAN.

2.1 MÉTODOS PARA CÁLCULO DE POSIÇÃO

Para calcular a posição de um dispositivo emissor de ondas de rádio, há diferentes técnicas baseadas em medições do sinal recebido tais como o *Angle of Arrival* (AOA), *Time of Arrival* (TOA), *Time Difference of Arrival* (TDOA), *Frequency of Arrival* (FOA) ou *Received Signal Strength Indication* (RSSI). Sistemas de localização de dispositivos baseados nessas técnicas possuem uma topologia estrela, onde o dispositivo central, *tracker*, é o rastreado que emite sinais de rádio recebidos por dispositivos bases ou vice-versa. Todas essas técnicas utilizam alguma propriedade do sinal recebido para descobrir a posição do emissor. Por exemplo, a localização por TDOA utiliza o instante de tempo de recepção, enquanto a localização por RSSI utiliza a potência do sinal recebido (LORA ALLIANCE STRATEGY COMMITTEE, 2018).

Nas subseções, serão detalhadas as técnicas baseadas em RSSI, TOA e TDOA.

2.1.1 RECEIVED SIGNAL STRENGTH INDICATION (RSSI)

O cálculo de posição baseado em RSSI, utiliza a informação de potência das mensagens recebidas do dispositivo rastreado nas bases. Essa técnica é interessante por não necessitar de hardware extra além de um simples transmissor de rádio que fornece informação de RSSI nos nós do sistema (ADEWUMI O. G.; DJOUANI, 2013).

Conforme aponta ADEWUMI O. G.; DJOUANI (2013), há diferentes modelos de propagação de sinal para calcular o RSSI, tais como: o modelo de propagação no espaço livre; o *Two-ray Ground Model*; e *Log Normal Shadowing Model* (LNSM). O LNSM, diferentemente dos dois outros modelos, não requer condições especiais do ambiente para a aplicação.

ADEWUMI O. G.; DJOUANI (2013) define o RSSI como uma medida da tensão elétrica do sinal no receptor. Usualmente, essa medida se dá em termos de potência, a partir do quadrado do valor absoluto da tensão elétrica. Utilizando os modelos de propagação citados anteriormente, é possível estimar a distância entre o emissor e o receptor, sabendo-se as condições do ambiente onde o sinal se propaga, a potência de transmissão e a potência RSSI. Quando o ambiente onde se está realizando as medições é de campo aberto, o modelo de propagação no espaço livre é o suficiente. Contudo, em ambientes fechados ou até mesmo

que contenham obstáculos, é necessário utilizar modelos mais elaborados, como os outros dois citados anteriormente.

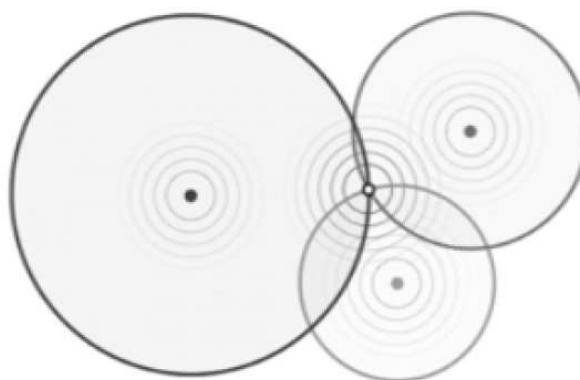
O modelo de propagação no espaço livre é utilizado quando o transmissor e o receptor possuem clara linha de visada sem obstáculos entre si. O modelo relaciona a distância e as potências de recepção e transmissão através da Equação (1), onde P_r é a potência recebida, P_t é a potência transmitida, G_t é o ganho da antena transmissora, G_r é o ganho da antena receptora, λ é o comprimento de onda do sinal, d é a distância entre as antenas e L é um fator de perda do sistema não relacionada à propagação (tendo valor maior ou igual a um).

$$P_r(d) = \frac{P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2}{(4\pi)^2 \cdot d^2 \cdot L}. \quad (1)$$

Em um sistema de localização baseado em RSSI, uma base ao receber um sinal do *tracker* anota o valor de RSSI. Utilizando a Equação (1) e tendo conhecimento dos parâmetros de ganhos, perdas, comprimento de onda e potência de transmissão, é possível determinar a distância entre o receptor e o transmissor.

Através da trilateração, que é a estimação das coordenadas de um ponto desconhecido a partir de distâncias medidas no plano de outros três ou mais pontos conhecidos, é possível determinar a localização do *tracker* com as distâncias calculadas entre este e as bases. Como as posições das bases são conhecidas, é possível definir no plano uma circunferência com as possíveis posições do *tracker*. Em um sistema com medições ideais, a representação gráfica da trilateração seria como na Figura 1, sendo o ponto de intersecção entre as circunferências a posição do *tracker*. Em um sistema real, as circunferências podem não ter um ponto em comum. Assim, são utilizados métodos numéricos como o método dos mínimos quadrados para estimar as coordenadas do *tracker* (CONRAD J. M., 2017).

Figura 1 – Trilateração com RSSI



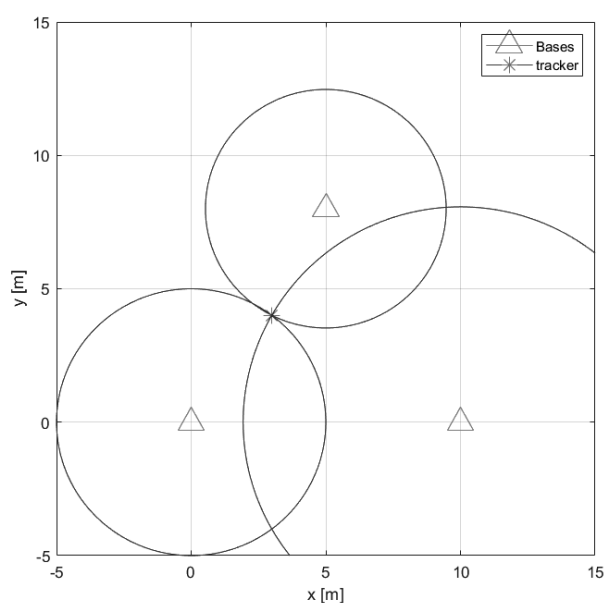
Fonte: CONRAD J. M. (2017)

Para ilustrar a estimação de posição com o método explicado, supõe-se um sistema onde o *tracker* esteja localizado na posição (3, 4) no plano cartesiano, cujos eixos têm unidade de medida em metros, e as bases nas posições (0, 0), (5, 8) e (10, 0). Supõe-se também que

os rádios tenham ganhos de 10 dB (ganho unitário), o meio tenha fator de perda unitário, a frequência utilizada do rádio seja 915 MHz (comprimento de onda de aproximadamente 32,8 cm no espaço livre) e a potência de transmissão seja de 20 dBm. Nesse sistema hipotético, o *tracker* envia às bases um sinal, obtendo em cada uma os valores de RSSI de -25,65 dB, -24,67 dB e -29,79 dB respectivamente.

Com a Equação (1), utilizando os parâmetros dados e os valores de RSSI medidos, é possível encontrar as distâncias entre *tracker* e bases de 5 m, 4,47 m e 8,06 m respectivamente. A partir dessas distâncias e das posições das bases, é possível traçar as circunferências e com a interseção encontrar a posição do *tracker*, conforme a Figura 2.

Figura 2 – Resultados do exemplo de RSSI



Fonte: Autorial Própria

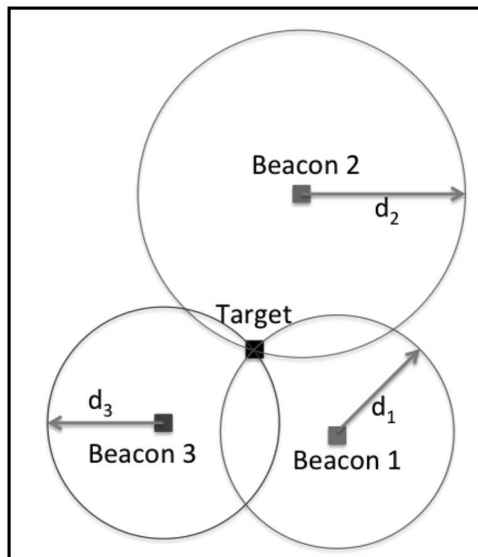
2.1.2 TIME OF ARRIVAL (TOA)

Conforme aponta Tufts University (2017), a localização através do TOA, tempo de chegada, é utilizada pelo GPS. Conforme mostrado em CAO F. (2014), para o funcionamento dessa técnica, necessita-se que as bases e o *tracker* estejam sincronizados em tempo, assim, sabendo-se o momento em que foi transmitida a mensagem e comparando com o TOA na recepção, é possível calcular o tempo de propagação. O tempo de propagação pode ser usado para calcular a distância entre a bases e o *tracker*, no caso dos dispositivos estarem em linha de visada, uma vez que o sinal se propaga na velocidade da luz no ar (299.702.547 m/s).

Da mesma forma que o cálculo de posição baseado em RSSI, a técnica através do TOA resulta em equações com as posições das bases e as distâncias entre estas e o *tracker*, formando assim a representação geométrica da Figura 3. Nessa figura, as bases, chamadas de *Beacon 1*, 2 e 3, são as emissoras dos sinais, assim o *tracker*, chamado de *Target* recebe

esses sinais e pela diferença de tempo calcula as distâncias d_1 , d_2 e d_3 , o que por fim resulta geometricamente nas circunferências apresentadas.

Figura 3 – Trilateração com TOA



Fonte: Tufts University (2017)

2.1.3 TIME DIFFERENCE OF ARRIVAL (TDOA)

O método de localização através do TDOA, assim como no TOA, requer o conhecimento do momento da chegada do sinal enviado pelo *tracker* e a velocidade que este se propaga no meio. A diferença em relação ao método de TOA é o não conhecimento do momento em que o sinal foi enviado pelo *tracker*. Uma vez que o sinal é recebido por duas bases em localizações distintas, é possível utilizar a diferença do tempo de chegada para calcular a diferença das distâncias entre o *tracker* e as bases (Δd), conforme a Equação (2), onde c é a velocidade da luz e Δt é a diferença de tempo de chegada (TUFTS UNIVERSITY, 2017).

$$\Delta d = c \cdot \Delta t. \quad (2)$$

Expandindo a Equação (2), chega-se na Equação (3) onde os pontos (x_1, y_1) e (x_2, y_2) são as posições das duas bases no plano cartesiano.

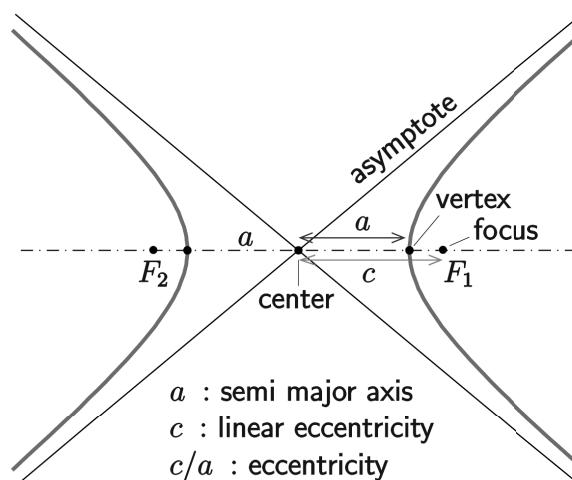
$$\Delta d = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} - \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2}. \quad (3)$$

Essa equação, tomando-se os pontos das bases sobre o eixo X, pode ser comparada à Equação (4), que define uma hipérbole. Os focos da hipérbole são então as bases e o parâmetro a é igual à metade de Δd . (GUNNARSSON F.; GUSTAFSSON, 2003).

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (4)$$

Na hipérbole, pode-se interpretar geometricamente os parâmetros da equação conforme a Figura 4. Na figura, F_1 e F_2 são os focos e o parâmetro c pode ser calculado como $\sqrt{b^2 + a^2}$. Nota-se também na hipérbole que $2c$ é igual a distância entre as bases.

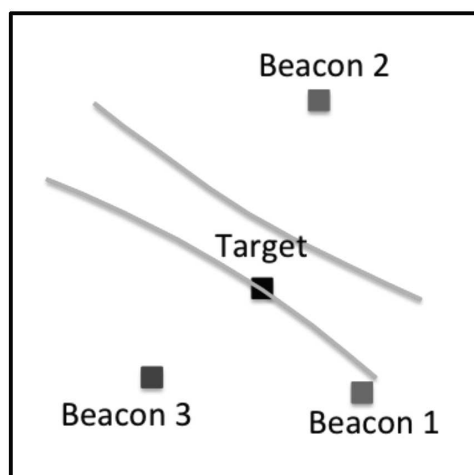
Figura 4 – Parâmetros da hipérbole



Fonte: (AG2GAEH, 2017)

Um exemplo de solução da Equação (3) está na Figura 5, onde estão traçados os dois braços da hipérbole gerada pelos tempos de recepção do sinal enviado pelo *Target*, que é o *tracker*, nas bases *Beacon 2* e *Beacon 3*. Como o *tracker* só pode estar sobre um dos braços da hipérbole, é necessário decidir qual deles será considerado para o cálculo de posição. Isso pode ser feito de diversas formas, como por exemplo: considerar apenas o braço mais próximo a base que recebeu o sinal com maior potência ou considerar o braço mais próximo de uma medição realizada previamente (TUFTS UNIVERSITY, 2017).

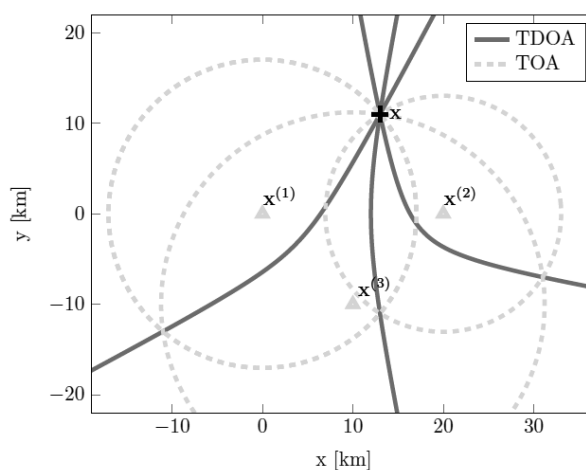
Figura 5 – Representação da hipérbole com os dois braços



Fonte: Tufts University (2017)

Com a aquisição de outras hipérboles, advindas de outros pares de bases, é possível calcular a posição do *tracker* na interseção das curvas (KAUNE, 2012), como mostra a Figura 6 que apresenta apenas os braços das hipérboles que são relevantes para encontrar a solução. Essa figura compara a geometria resultante das trilaterações por TDOA, em linha contínua vermelha, e TOA, em tracejado verde.

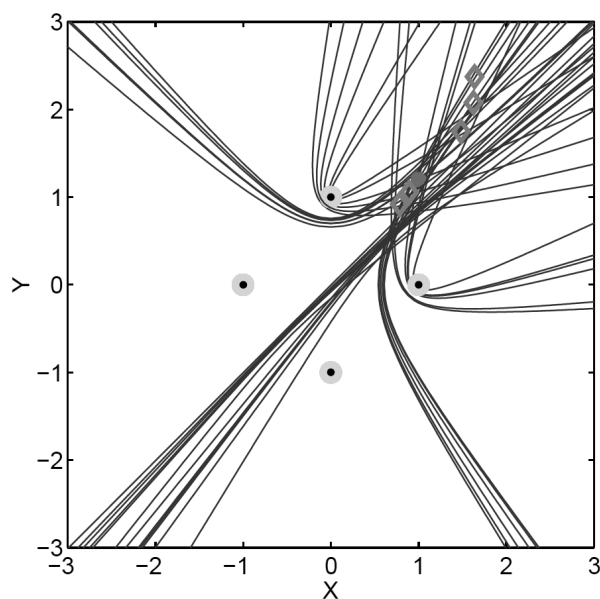
Figura 6 – Trilateração com TOA e TDOA



Fonte: KAUNE (2012)

Outra notável característica do TDOA é que pequenos erros na aquisição do tempo de chegada, sejam eles causados por ruído ou baixa resolução, têm como consequência grandes mudanças na possível localização do dispositivo, conforme este se afasta das bases. Na Figura 7, Gunnarsson F.; Gustafsson (2003) mostra como recepções ruidosas do tempo de chegada geram hipérboles consideravelmente distantes umas das outras conforme sua solução se afasta do eixo das bases que as geraram. Isso pode ser bem notado nas regiões em torno dos pontos (0,2) e (2,0), onde as hipérboles se encontram muito separadas em relação a como estão nas regiões próximas às suas bases geradoras.

Figura 7 – TDOA com recepção ruidosa

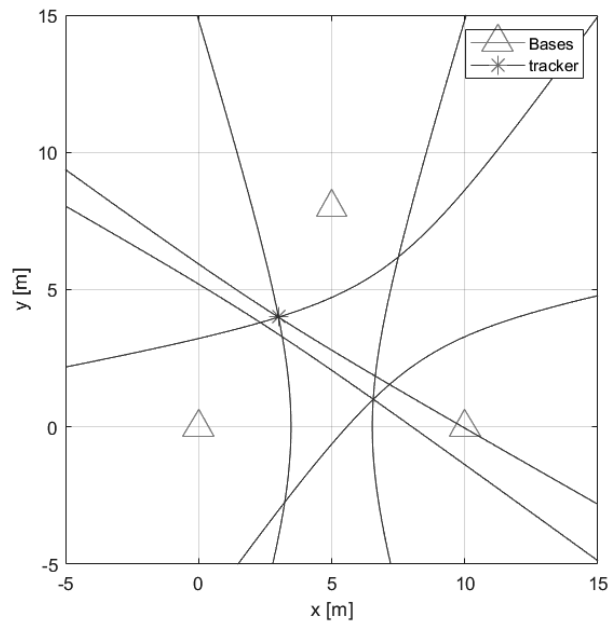


Fonte: Gunnarsson F.; Gustafsson (2003)

Como exemplo da estimação de posição com o método do TDOA, supõe-se um sistema com o mesmo posicionamento de *tracker* e bases e parâmetros de rádio do exemplo da Subseção 2.1.1. Nesse sistema hipotético, o *tracker* envia às bases um sinal, obtendo em cada base os momentos de chegada de 266,67 ns, 264,9 ns e 276,87 ns respectivamente.

A partir da velocidade da luz no espaço livre, é possível encontrar para cada diferença de tempo entre bases as distâncias de: 0,531 m entre base 0 e base 1; 3,06 m entre base 0 e base 2; e 3,591 m entre base 1 e base 2. Com a Equação (3), as distâncias calculadas e as posições das bases, é possível traçar as hipérbolas resultantes e encontrar a posição do *tracker* a partir da intersecção conforme ilustrado na Figura 8.

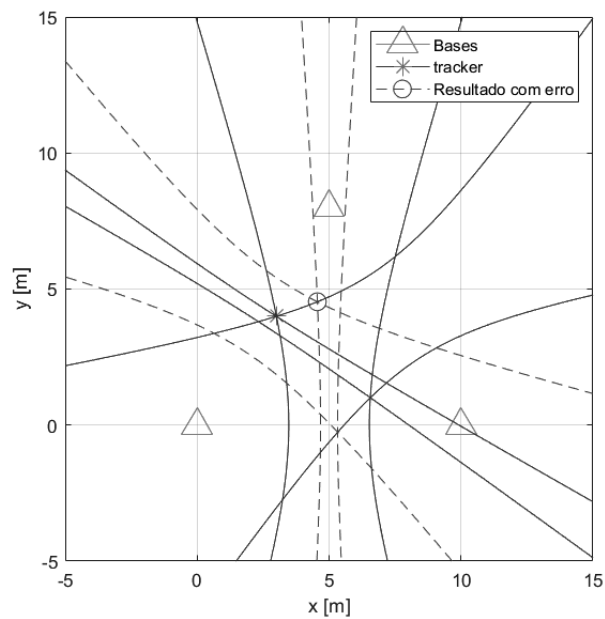
Figura 8 – Resultados do exemplo de TDOA



Fonte: Autoria Própria

Inserindo um erro de 8 ns na recepção da base 0, tem-se que as novas distâncias são de 2,93 m entre base 0 e base 1 e 0,66 m entre base 0 e base 2. Assim, as hipérbolas ficam conforme apresentado na Figura 9 com o ponto estimado pelo método dos mínimos quadrados.

Figura 9 – Resultados do exemplo de TDOA com erro



Fonte: Autoria Própria

2.2 RÁDIO LORA

LoRa é um protocolo que atua na camada física, criada para permitir enlaces de longas distâncias. Enquanto outros protocolos utilizam modulação *Frequency Shifting Keying* (FSK) para otimizar o consumo energético, o LoRa se baseia na técnica de modulação *Chirp Spread Spectrum* (CSS) para alcançar o desejado raio de alcance, porém ainda conseguindo manter o baixo consumo. Por espalhar o sinal através do CSS, o LoRa requer maior largura de banda. Para as definições das camadas de rede mais elevadas, foi elaborado o LoraWAN, que sobre o protocolo físico do LoRa, define o sistema e a arquitetura de comunicação. O *gateway* e o servidor de rede podem ser executados em um único dispositivo (LORA ALLIANCE, 2015).

Conforme indica AUGUSTIN A.; CLAUSEN (2016), o protocolo opera nas frequências de 433 MHz, 868 MHz ou 915 MHz, dependendo da região implantada. Um pacote de dados pode variar entre 2 a 255 bytes com uma taxa de transmissão de até 50 Kbps. Graças à técnica de modulação empregada pelo LoRa, que é propriedade tecnológica da Semtech, a sensibilidade de um receptor pode chegar à ordem de -130 dBm.

2.2.1 PARÂMETROS DO RÁDIO LORA

O rádio LoRa permite a customização de diversos parâmetros da camada física tais como largura de banda, fator de espalhamento e taxa de código. A mudança desses parâmetros reflete na taxa de bits, na resistência à interferência e ao ruído e na facilidade da decodificação (AUGUSTIN A.; CLAUSEN, 2016).

BOR M.; ROEDIG (2017) detalha os seguintes parâmetros:

- Potência de transmissão (TP, do inglês *Transmission Power*): no rádio LoRa pode se assumir um valor inteiro entre -4 dBm e 20 dBm. Normalmente devido a limitações de hardware, o valor mínimo da potência é de 2 dBm.
- Frequência da portadora (CF, do inglês *Carrier Frequency*): pode ser programado entre 137 MHz e 1020 MHz a passos de 61 Hz. O valor mínimo da faixa pode ser limitado, contudo, a 860 MHz por particularidades do chip.
- Fator de espalhamento (SF, do inglês *Spreading Factor*): é a razão entre a taxa de símbolos e a taxa de *chirps*, podendo variar entre os valores inteiros de 6 e 12. Seu aumento influencia positivamente na relação sinal-ruído (SNR, do inglês *Signal-to-Noise Ratio*) e, portanto, na sensibilidade e no alcance, porém a custo do aumento da latência de recebimento do pacote. O número de *chirps* por símbolo é determinado pela expressão 2^{SF} . Cada unidade incrementada no SF resulta na diminuição pela metade da taxa de transmissão e, conseqüentemente, no aumento de consumo energético.
- Largura de banda (BW, do inglês *Bandwidth*): é a faixa de frequências na banda de transmissão, podendo ser de 7,8 kHz a 500 kHz. Seu aumento resulta em aumento na taxa de transmissão, mas diminui a sensibilidade por agregar maior espectro de ruído. Os dados são transmitidos a uma taxa de *chirps* com valor igual à largura de banda. Apesar

da ampla faixa de seleção de valores, normalmente uma rede LoRa opera com BW de 500 kHz, 250 kHz ou 125 kHz.

- Razão de código (CR, do inglês *Coding Rate*): é a razão do *Forward Error Correction* (FEC), uma técnica de correção de erro de dados transmitidos em caso de sequências interferentes. Pode assumir os valores de 4/5, 4/6, 4/7 ou 4/8. A proteção à interferência aumenta junto ao valor do denominador da razão, porém custando latência de recebimento. Rádios com diferentes valores de CR conseguem ainda se comunicar, uma vez que o valor do CR está explicitamente no cabeçalho do pacote (que sempre está codificado com CR 4/8), porém os valores de CF, SF e BW devem ser os mesmos.

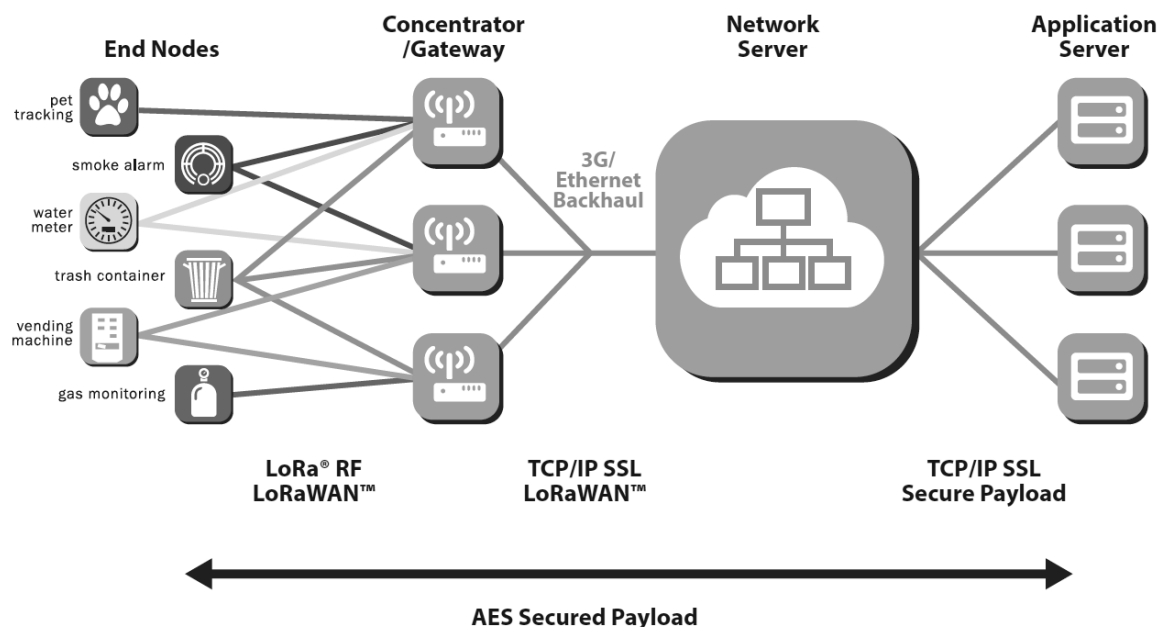
2.2.2 LORAWAN

O LoRaWAN é um protocolo MAC construído sobre o protocolo de camada física do LoRa. Em sua arquitetura de rede, são definidos os seguintes componentes obrigatórios: *end-device*, dispositivo de baixo consumo energético que se comunica com os *gateways* através de LoRa; *gateway*, dispositivo intermediário que recebe pacotes LoRa de *end-devices* e encaminha para um servidor através de uma conexão Ethernet ou 3G; e servidor de rede, que decodifica e trata os pacotes vindos dos dispositivos (AUGUSTIN A.; CLAUSEN, 2016).

Diversas redes de comunicação sem fio utilizam arquitetura *mesh*, cujos nós (análogo aos *end-devices* do LoRaWAN) retransmitem informações recebidas para aumentar o alcance da rede. Apesar desse ganho, esse tipo de arquitetura possui alta complexidade, tem capacidade de rede reduzida e possui maior gasto energético devido ao repasse de pacotes desnecessários aos nós. Por essas desvantagens, o LoRaWAN adota uma topologia mais próxima da estrela, preservando ainda mais a bateria dos nós. Nessa arquitetura, contudo, os *end-devices* não são associados a um *gateway* específico, assim os pacotes enviados podem ser recebidos por qualquer *gateway* e repassados ao servidor nuvem (LORA ALLIANCE, 2015).

Na Figura 10, é possível observar a arquitetura descrita, típica de uma rede IoT. Os *end-devices* enviam os dados por LoRa para os *gateways*, que repassam as informações ao servidor de rede, que por sua vez é consultado por aplicações.

Figura 10 – Arquitetura LoRaWAN



Fonte: LoRa Alliance (2015)

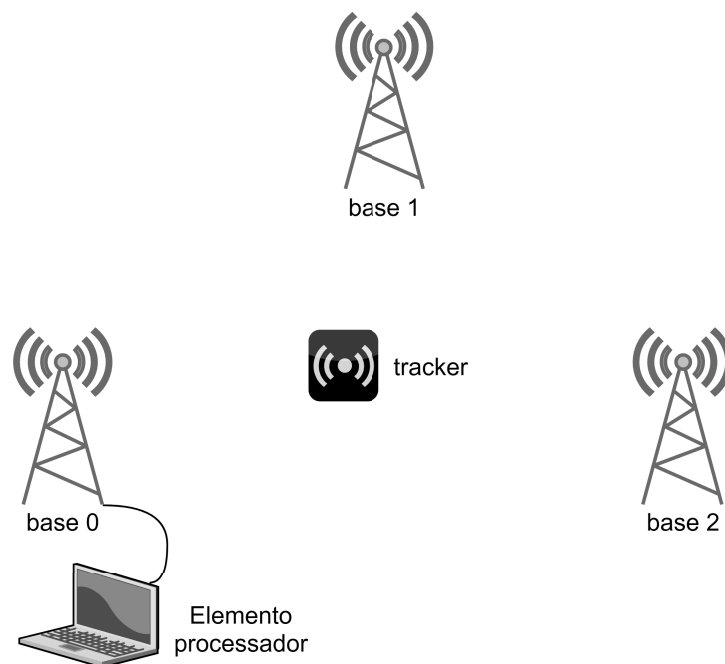
3 METODOLOGIA

Este capítulo aborda o desenvolvimento do sistema concebido. A Seção 3.1 apresenta a arquitetura do sistema, mostrando os diferentes dispositivos, suas disposições e seus componentes internos, explicando a função de cada um. A Seção 3.2 mostra como foi realizada a sincronia temporal entre as bases, necessária para o cálculo do TDOA. E, por fim, a Seção 3.3 detalha o comportamento do sistema, ou seja, como os diferentes dispositivos se comunicam entre si, exibindo diagramas de tempo para o comportamento geral e de máquina de estados para o funcionamento de cada dispositivo.

3.1 ESTRUTURA DO SISTEMA

Conforme explicado na Seção 1.1, o objetivo do sistema desenvolvido é realizar a geolocalização de um dispositivo de baixo consumo em ambiente rural. Para isso, foi definida uma arquitetura com topologia estrela onde o *tracker*, dispositivo central, envia um sinal no protocolo LoRa a três bases afastadas a distâncias na ordem de centenas de metros a quilômetros, que, ao receberem esse sinal, registram o *timestamp*, o momento de registro. Essa disposição é representada na Figura 11, com as quatro placas e o elemento processador, que através dos dados coletados na base 0, realiza os cálculos dos algoritmos de triangulação para estimar a posição do *tracker*.

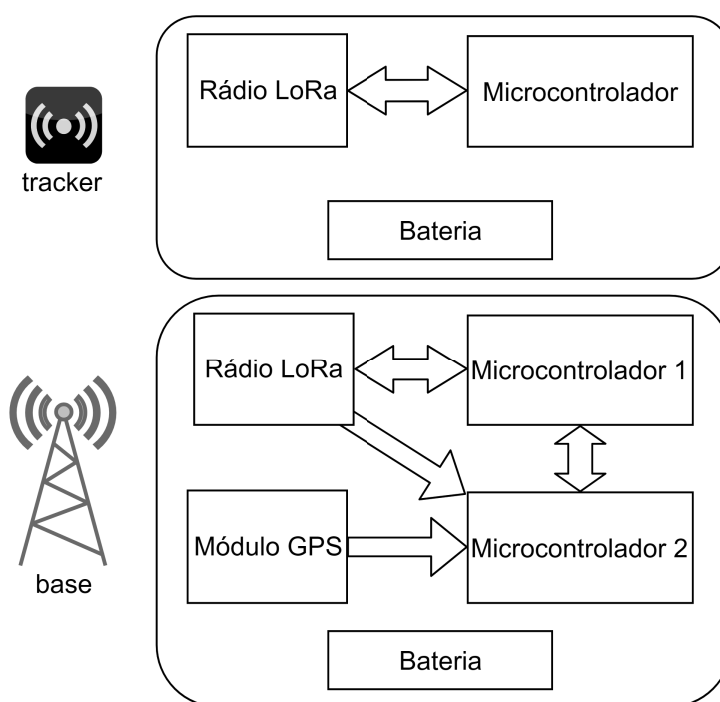
Figura 11 – Diagrama Geral do Sistema



Fonte: Autoria Própria

O *tracker* é composto por um rádio LoRa e um microcontrolador ligado a uma bateria. As bases são constituídas pelos mesmos componentes do *tracker* com o adicional de outro microcontrolador ligado a um módulo GPS. A Figura 12 mostra a montagem dos dispositivos descritos e as comunicações internas. Na subseção seguinte, é detalhada a estrutura interna desses dispositivos.

Figura 12 – Diagrama de Dispositivos



Fonte: Autoria Própria

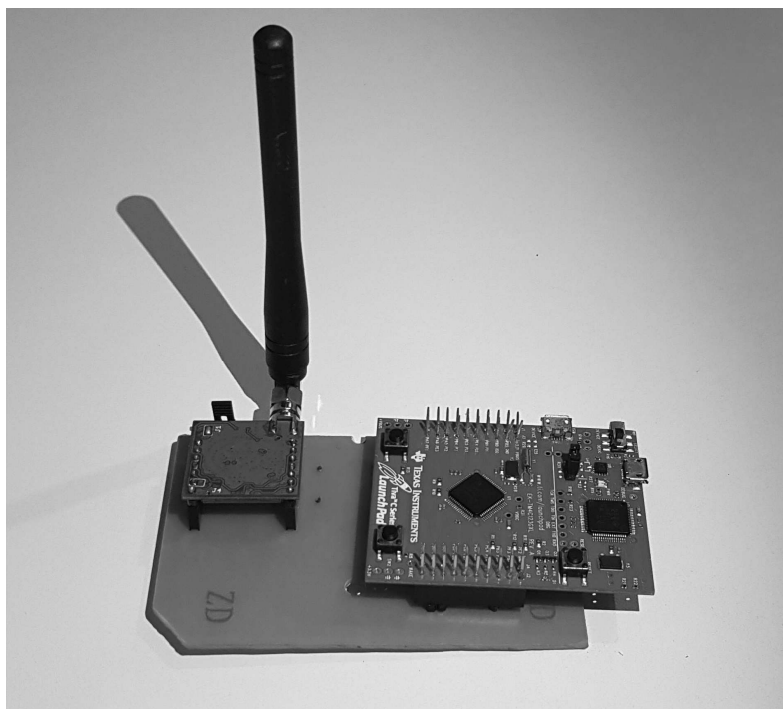
3.1.1 ESTRUTURA INTERNA DO TRACKER

O *tracker* é um dispositivo cujo objetivo é enviar sinais LoRa periodicamente, assim, possui como componentes internos um microcontrolador e um rádio LoRa. Para o núcleo de processamento do dispositivo, é utilizada a placa de desenvolvimento Tiva™ C Series LaunchPad da Texas Instruments (TI), EK-TM4C123GXL. O microcontrolador presente na placa é o TM4C123G, cuja arquitetura é ARM Cortex-M4F. Como transceiver LoRa, é utilizado o módulo da Semtech inAIR9B.

A Figura 12 mostra essa estrutura descrita do *tracker*, onde a seta indica a comunicação de duas vias entre as placas, sendo esta comunicação através do protocolo SPI e quatro pinos de interrupção. A bateria presente no diagrama não é um componente interno à placa, pois para a alimentação, durante as etapas de desenvolvimento, foi utilizado diretamente o cabo de *debug* conectado ao computador e, durante as etapas de testes, foi utilizado um *power bank* através da mesma entrada na placa.

A Figura 13 mostra a montagem final da placa, enquanto a Figura 14 mostra a mesma montagem dentro do gabinete.

Figura 13 – Montagem do *tracker*



Fonte: Autoria Própria

Figura 14 – Montagem do *tracker* dentro do gabinete



Fonte: Autoria Própria

3.1.2 ESTRUTURA INTERNA DAS BASES

As bases são dispositivos que possuem como finalidade receber o sinal LoRa enviado pelo *tracker* e anotar o *timestamp* com precisão. Para isso, nas bases há um núcleo central de processamento, assim como o *tracker*, que se comunica com um módulo LoRa. Para registrar o *timestamp*, um pino de interrupção de recepção de mensagem do módulo LoRa é conectado à outra placa de desenvolvimento microcontrolada que possui um sistema de contagem de tempo interno sincronizado por um módulo GPS. Essa informação de tempo registrado é repassada ao núcleo central de processamento por comunicação SPI. É possível visualizar a estrutura interna das bases na Figura 12, onde o microcontrolador 1 é o núcleo central de processamento e o microcontrolador 2 é o responsável pela contagem de tempo.

A Tabela 1 apresenta os modelos dos componentes descritos acima que integram cada base. A primeira coluna se refere ao componente com a funcionalidade já descrita no parágrafo anterior, a segunda coluna.

Tabela 1 – Componentes da base.

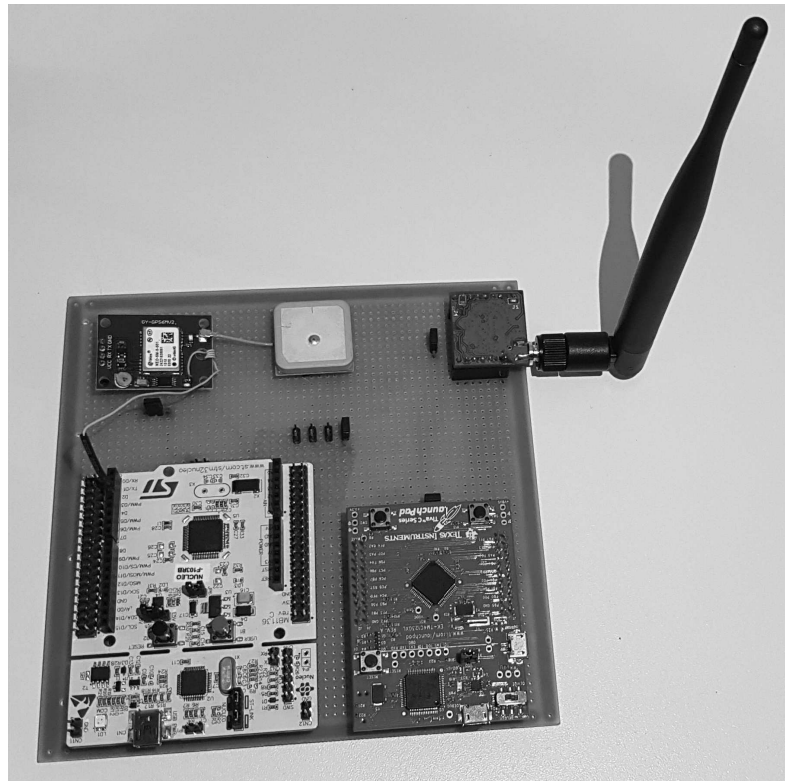
Componente	Modelo
Núcleo central de processamento	Tiva™ C Series LaunchPad
Módulo LoRa	Semtech inAIR9/inAIR9B
Placa para sincronização temporal	STMicroelectronics NUCLEO-F103RB
Placa de GPS	GY-GPS6MV2

Fonte: Autoria Própria

A placa de desenvolvimento Tiva™ C Series LaunchPad é a mesma utilizada no *tracker*, a placa de desenvolvimento da STMicroelectronics NUCLEO-F103RB possui o microcontrolador STM32F103RB, cuja arquitetura é ARM Cortex-M3, e a placa GY-GPS6MV2 possui o módulo GPS NEO-6M-0-001 da u-blox.

A Figura 15 mostra a montagem final da placa de uma das bases.

Figura 15 – Montagem da base



Fonte: Autoria Própria

3.2 SINCRONIA TEMPORAL ENTRE AS BASES

Como foi explicado na Subseção 2.1.3, o método de localização por TDOA requer somente duas informações: o momento de chegada do sinal enviado pelo *tracker* em cada base e a velocidade que esse sinal se propaga no meio. Tendo em vista que os sinais enviados pelo *tracker* são ondas de rádio, a velocidade de propagação do sinal será considerada como a velocidade da luz no ar ($299.702.547 \text{ m/s}$). Se tratando de uma velocidade muito alta, diferenças de distâncias entre o *tracker* e as bases na ordem de dezenas de metros geram diferenças no *timestamp* do sinal na ordem de centenas de nano segundos.

Para alcançar tamanha resolução na contagem de tempo, em cada base foi utilizado outro microcontrolador em relação ao núcleo central de processamento, este se dedicando exclusivamente à contagem de tempo, como explicado na Subseção 3.1.2. Inicialmente foi cogitado utilizar o *clock* do microcontrolador para realizar a contagem. A placa de desenvolvimento NUCLEO-F103RB apresenta um cristal cerâmico com frequência de oscilação de 8 MHz (ST-MICROELECTRONICS, 2019) que com os divisores corretos pode chegar a um *clock* interno de 72 MHz. Embora essa frequência ofereça um período de 13,89 ns, teoricamente suficiente para obter boas medições para o TDOA, dois microcontroladores iguais realizando marcações de tempo simultâneas apresentam divergências nos registros de tempo. Em questão de dezenas de milissegundos, a divergência na contagem de tempo se dá na ordem de microssegundos

conforme testes realizados. Erros como esse impossibilitam a aplicação do TDOA, uma vez que um erro de um microssegundo gera um erro na diferença de distâncias de quase 300 metros. Mesmo num cenário em que o *clock* interno dos microcontroladores é suficiente para marcar o tempo, ainda haveria o problema de sincronismo entre as bases. Nessa aplicação de TDOA, as marcações de tempo devem não apenas ser precisas como também apresentar um referencial comum, caso contrário, não há como constatar que o *timestamp* de um sinal ocorreu antes ou depois da chegada desse mesmo sinal em outra base.

A necessidade de sincronismo entre as bases foi solucionada com a utilização de pulsos de tempo presentes em módulos GPS. O u-blox NEO-6M-0-001 é um módulo GPS comercial de baixo custo que apresenta a funcionalidade de, pelas configurações de fábrica, piscar um LED com uma frequência de 1 Hz quando o módulo adquire sincronia com quatro ou mais satélites. O pulso que acende o LED é sincronizado com um sinal de referência emitido pelos satélites. Este sinal por sua vez apresenta sincronia com o relógio atômico interno ao satélite. Portanto, esse pulso de 1 Hz ocorre simultaneamente aos módulos GPS sincronizados a rede de satélites.

O módulo u-blox NEO-6M-0-001 permite que a frequência do pulso de tempo seja configurada na faixa de 0,25 Hz a 1 kHz. Dentro dessa faixa, o erro RMS é de 30 ns com 99% das amostras com erro menor que 60 ns (U-BLOX, 2011). Utilizando o software para programação dos módulos da u-blox, o u-center, o pulso de tempo foi configurado para 1 kHz com largura de pulso de 100 us. Como o pulso de tempo não apresenta um pino de saída no módulo, um pequeno fio de cobre foi soldado a um contato com a trilha do sinal. Esse fio foi conectado a um pino de interrupção externa do microcontrolador STM32F103RB. Então, o microcontrolador foi programado para executar suas instruções com um *clock* interno de 72 MHz e incrementar um contador a cada 125 ns. Toda vez que ocorre uma borda de subida no pino ligado ao pulso de tempo, uma interrupção de software com a prioridade mais alta é gerada, onde é reiniciado o contador de tempo. Como o software que trata essa interrupção é o mesmo em todas as bases, apesar de haver instruções a mais durante o tratamento que insere um defasagem de tempo em relação ao sinal do GPS, essa defasagem é a mesma em todas as bases, não prejudicando o algoritmo do TDOA.

Todas as bases, portanto, realizam uma resincronização a cada 1 ms, sendo que dentro desses intervalos, o tempo é contado num passo de 125 ns pelo *clock* interno. Testes foram realizados para avaliar a divergência de contagem entre bases e foi constatado que um milissegundo não é tempo suficiente para gerar uma de-sincronia que comprometa as medições de tempo para o TDOA.

Para registrar o momento da chegada do sinal enviado pelo *tracker*, foi utilizado um pino de interrupção do módulo LoRa que gera uma borda de subida toda vez que um pacote é corretamente recebido. Esse sinal foi ligado a outro pino de interrupção do microcontrolador STM32F103RB. O tratamento da interrupção gerada por esse pino registra o valor do contador de tempo. Esse valor é enviado por comunicação SPI ao núcleo central de processamento uma

vez que a recepção do pacote do módulo LoRa é finalizada.

O microcontrolador STM32F103RB foi o escolhido para ser utilizado na contagem de tempo por possuir uma biblioteca estática de *device drivers* de código aberto que auxilia no desenvolvimento e por permitir um *clock* de frequência elevada.

3.3 COMPORTAMENTO DO SISTEMA

Esta seção objetiva explicar como se comporta o sistema em uma visão macro, apresentando a sequência de comunicação entre *tracker* e bases, e de forma mais específica, apresentando os diferentes estados de espera de recepção e envio de mensagem em que cada dispositivo fica. A Subseção 3.3.1 detalha essa visão mais macro do sistema e a Subseção 3.3.2, o comportamento mais específico por dispositivo.

3.3.1 COMPORTAMENTO GERAL DO SISTEMA

O sistema, para alcançar o objetivo de geolocalização com TDOA, utiliza a arquitetura descrita na Seção 3.1, com uma topologia estrela onde o *tracker* se comunica com as três bases, que possuem identificadores próprios de 0 a 2 cada. Para realizar o algoritmo do TDOA, o *tracker* envia uma sequência de mensagens às bases, assim são calculadas as diferenças entre os tempos registrados em cada base e feita a média aritmética dessas diferenças, uma vez que a diferença idealmente seria sempre a mesma desde que o *tracker* e as bases permaneçam na mesma posição.

Em situações ideais, quando não há falha de comunicação entre os dispositivos, o comportamento do sistema é periódico: o *tracker* envia sua sequência de mensagens enquanto cada base insere o *timestamp* e o RSSI associados à recepção em um *buffer*, cujo número de elementos é o mesmo de mensagens por sequência; em seguida, a base 1 envia seu *buffer* à base 0; posteriormente, a base 2 envia também seu *buffer* à base 0, a qual fica com os três *buffers* de *timestamps* e RSSIs; e, por fim, o sistema reinicia com todas as bases voltando a esperar pelo *tracker* e limpando seus *buffers* e o *tracker* reiniciando o envio da sequência. Durante todo o processo, os dispositivos imprimem as mensagens recebidas com as informações associadas (RSSI, *timestamp*, ...) na saída serial caso esteja conectada.

Para que os dispositivos executem o funcionamento descrito, foi elaborado um único software modularizado separando a camada de aplicação das bibliotecas de *middleware* para comunicação com o módulo LoRa e de *device drivers* para as funções de baixo nível relacionadas ao microcontrolador. A aplicação e a biblioteca do LoRa são codificadas na linguagem de programação C++, encapsulando as funções vindas dos *device drivers* que são em C. O *middleware* do LoRa foi elaborado pela Semtech, fabricante do módulo LoRa utilizado, e as bibliotecas de *drivers*, pela Texas Instruments, fabricante da placa de desenvolvimento. A aplicação, escrita por autoria própria, pode ter sua estrutura visualizada no diagrama de classes presente no Apêndice B. Para melhorar a visualização do diagrama, este foi dividido em duas

partes. Nas figuras, as classes com o fundo cinza possuem suas estruturas completas na figura complementar.

O projeto de software foi desenvolvido de forma que todos parâmetros alteráveis do funcionamento do sistema estejam em um único arquivo de configuração. Nesse arquivo, há duas seções de parâmetros, os de aplicação e os de *middleware*.

Algumas das configurações de aplicação são:

- ID de dispositivo, assumindo os valores de 0, 1 e 2 para as bases ou igual ou maior que 3 para o *tracker*;
- Número de mensagens por sequência;
- Período de envio de mensagem, usado para alterar a frequência em que são enviadas as mensagens, multiplicando pelo número de mensagens por sequência obtém-se o tempo de transmissão de uma sequência;
- Tempo de silêncio do *tracker*, o tempo que o *tracker* fica sem enviar mensagem até recomeçar o ciclo, somando este ao tempo de transmissão de uma sequência tem-se o período do ciclo de localização.

E algumas das configurações de *middleware* são:

- Tipo de modulação do rádio, sendo possível utilizar FSK ou LoRa;
- Frequência do sinal do rádio;
- Potência de transmissão;
- Largura de banda do sinal do rádio;
- Fator de espalhamento do sinal do rádio;
- Razão de código do sinal do rádio;
- Uso do CRC.

O comportamento descrito de comunicação entre os dispositivos pode ser visualizado no exemplo de aplicação presente no diagrama de tempo que se encontra no Apêndice A. O diagrama inicia no tempo 0, cujo eixo tem como unidade de medida o segundo, com as bases começando a recepção das mensagens do *tracker*. É possível notar que a duração de envio da sequência de mensagens é de 8 s e o tempo de espera entre a transmissão de um dispositivo e outro é de 4 s. Nesse exemplo, o tempo de silêncio do *tracker* é de 30 s, totalizando assim um período de 38 s para o funcionamento do sistema de geolocalização, dessa forma, o intervalo entre 38 s e 42 s o sistema está reiniciando o ciclo. As linhas contínuas indicam momentos em que o dispositivo está ocioso antes do seu envio para garantir não conflito de mensagens.

3.3.2 COMPORTAMENTO INDIVIDUAL DOS DISPOSITIVOS

Cada dispositivo presente na arquitetura possui uma sequência de execuções própria para gerar o comportamento geral descrito na subseção anterior. Para moldar essas sequências, foram diagramadas máquinas de estado para cada um dos dispositivos: *tracker*, base 0, base 1 e base 2.

No sistema elaborado, o *tracker* é o dispositivo com funcionalidade mais simples.

Este, uma vez energizado, envia uma sequência de mensagens a cada determinado tempo, tendo assim sua posição encontrada periodicamente. A mensagem enviada pelo *tracker* contém como informação útil seu ID de dispositivo e o ID de mensagem. O ID dispositivo é único e o diferencia dos demais dispositivos no sistema, tendo um valor maior ou igual a três para o *tracker*. O ID de mensagem é utilizado para identificar qual mensagem está sendo enviada em relação a sequência atual, tendo valores possíveis de zero até o número de mensagens por sequência menos um.

Ao receber uma mensagem, o módulo LoRa envia ao microcontrolador com que se comunica as informações de SNR e RSSI relativas à recepção dessa mensagem. Assim, as bases guardam em um *buffer* esses dois dados e o *timestamp* advindo da placa da ST conforme explicado na Subseção 3.1.2. Todas mensagens que trafegam entre *tracker* e base ou entre bases seguem o modelo presente no Quadro 1. O ID de dispositivo e o ID de mensagem funcionam da forma explicada no parágrafo anterior, sendo que para as bases o ID de dispositivo assume os valores de 0, 1 e 2. O *tracker* envia suas mensagens com os campos de *timestamp*, RSSI e SNR com valor -1, indicando estar inválido. Como as mensagens enviadas pelas bases 1 e 2 à base 0 contém informação das mensagens recebidas do *tracker*, os campos de *timestamp*, RSSI e SNR são preenchidos com os valores guardados no elemento do *buffer* relativo da mensagem a ser enviada, ou seja, a mensagem de ID 12 que a base envia é relativa a mensagem de ID 12 recebida do *tracker*.

Quadro 1 – Modelo da mensagem

Mensagem
ID de dispositivo
ID de mensagem
Timestamp
RSSI
SNR

Fonte: Autoria Própria

Para executarem o comportamento descrito na Subseção 3.3.1, as bases 0, 1 e 2 têm seu funcionamento moldado de acordo com os diagramas de estados presentes nos Apêndice C, Apêndice D e Apêndice E respectivamente à cada base. Os diagramas foram elaborados com estados de espera, de recebimento e de envio (pertinente às bases 1 e 2), de forma que a transição entre eles depende de eventos externos, como a recepção de mensagem correta ou não, ou internos, como o *timeout* de recepção ou o término de envio de mensagem. A checagem de recebimento de mensagem correta ou incorreta é feita através do ID de dispositivo que esta possui.

A transição de estado de espera de base para espera de *tracker* devido à recepção de muitas mensagens erradas é feita como forma de proteção do comportamento do sistema, reiniciando em caso de anomalia. O *timeout* de recepção no caso de espera de base serve para

reiniciar o sistema caso a base em questão tenha perdido comunicação, enquanto o *timeout* de recepção durante a transmissão é acionado se a última mensagem não foi recebida por alguma motivo de perda de sinal, assim somente levando ao próximo estado do comportamento geral e não ao reinício de todo sistema.

Enquanto o não recebimento de mensagens de outras bases nas bases 0 e 1 leva ao reinício do sistema, observa-se no diagrama de estados da base 2 que o mesmo não acontece caso este não receba mensagens da base 1. A base 2 é diferente neste ponto, pois para ela não é necessário ter comunicação com a base 1 para que o sistema funcione, uma vez que só é necessário que todas as bases ouçam do *tracker* e que a base 0 ouça das outras duas.

4 MEDIÇÕES E TESTES

Este capítulo aborda os testes realizados em campo com o sistema já funcional, explicitando seus objetivos e os resultados esperados. A Seção 4.1 descreve os parâmetros utilizados na aplicação para os testes. A Seção 4.2 e a Seção 4.3 descrevem as duas etapas de testes em campo que foram necessárias para a validação do projeto.

4.1 PARÂMETROS UTILIZADOS

Esta seção apresenta os parâmetros de configuração, explicados na Subseção 3.3.1, utilizados para realizar os testes em campo. Os parâmetros de *middleware*, conforme detalhados na Subseção 2.2.1, foram escolhidos pensando na otimização do sinal para a aplicação desenvolvida, como na diminuição da latência do processamento do sinal e aumento de alcance do sinal transmitido. Por outro lado, os parâmetros de aplicação foram em geral determinados com motivações mais específicas a condições dos testes, podendo em outras situações reais de geolocalização terem outros valores.

As configurações de aplicação utilizadas são as presentes na Tabela 2. O número de mensagens por sequência teve seu valor definido de acordo com testes realizados *indoor*, sendo uma quantidade suficiente de amostras para a média estabilizar a variação temporal. Conforme apontado na Subseção 3.3.1, o tempo de envio da sequência de mensagens é de 10 s, multiplicando o número de mensagens por sequência pelo período de envio de mensagem, e, somando ao tempo de silêncio do *tracker*, tem-se que o período do ciclo de aquisição de posição é de 70 s.

Tabela 2 – Configurações de aplicação.

Parâmetro	Valor
Número de mensagens por sequência	50
Período de envio de mensagem	200 ms
Tempo de silêncio do tracker	60 s

Fonte: Autoria Própria

As configurações de *middleware* utilizadas são as presentes na Tabela 3. A potência de transmissão e a largura de banda do sinal do rádio foram escolhidas com valores maiores para atender melhor a exigência de localização em grandes distâncias, motivo também do uso do CRC. Por outro lado, a razão de código do sinal do rádio possui um valor menor para diminuir a latência de recepção, o que poderia influenciar no tempo de decodificação e então aquisição do sinal. O fator de espelhamento foi determinado empiricamente para obter a melhor taxa de recepção.

Tabela 3 – Configurações de middleware.

Parâmetro	Valor
Tipo de modulação do rádio	LoRa
Frequência do sinal do rádio	915 MHz
Potência de transmissão	14 dBm
Largura de banda do sinal do rádio	500 kHz
Fator de espalhamento do sinal do rádio	9
Razão de código do sinal do rádio	4/6
Uso do CRC	Habilitado

Fonte: Autoria Própria

4.2 TESTES PRELIMINARES

Todos os testes em campo foram realizados no parque Barigui da cidade de Curitiba - PR. A fim de simular um ambiente rural, esse parque foi escolhido por apresentar o maior espaço público aberto com grandes distâncias em visada na cidade de Curitiba. Uma vez que os testes requerem que as bases estejam separadas a distâncias de centenas de metros, esse parque foi a escolha mais acessível.

Os testes preliminares tinham como objetivo constatar se seria possível realizar o teste final naquele local. Para tal, três requisitos deveriam ser atendidos: o enlace entre os módulos LoRa deveria ser bom suficiente para ocorrer as trocas de mensagens sem grandes perdas; o algoritmo do sistema deveria funcionar como previsto, demonstrando sincronia na ordem de envio de mensagens entre o *tracker* e as bases e entre as bases de acordo com o descrito na Subseção 3.3.1; e a captura dos *timestamps* deveria se mostrar coerente com a teoria estudada.

Os testes consistiram em executar o sistema com o *tracker* e a base 0 juntas numa mesma localização, distantes a centenas de metros da base 1 e base 2, também juntas. Somente a base 0 estava conectada a um monitor serial, pelo qual era possível avaliar a qualidade do enlace, o funcionamento do algoritmo e a coerência dos *timestamps*, uma vez que todas essas informações deveriam ser enviadas a ela pelas outras bases.

Foram feitos testes com e sem visada para avaliar a perda de qualidade do sinal, separando os pares de dispositivos em distâncias diferentes para ambos os casos. Todas as medições sem visada mostraram grande variação na RSSI de forma que, com separações de centenas de metros, a perda de mensagens foi fora do tolerável.

Nas diversas distâncias com visada experimentadas, aproveitou-se para definir a localização das três bases. Foi importante se certificar que, nas localizações da base 1 e 2, o enlace destas com a base 0 era satisfatório. Os locais escolhidos serão mostrados na Seção 4.3.

O algoritmo do sistema foi colocado a prova utilizando os parâmetros explicitados na Seção 4.1. Pelo monitor serial na base 0, foi possível atestar que o algoritmo funcionava conforme o esperado. Diversos cenários em que há perda de comunicação foram simulados e o

sistema mostrou excelente capacidade de voltar a sincronia.

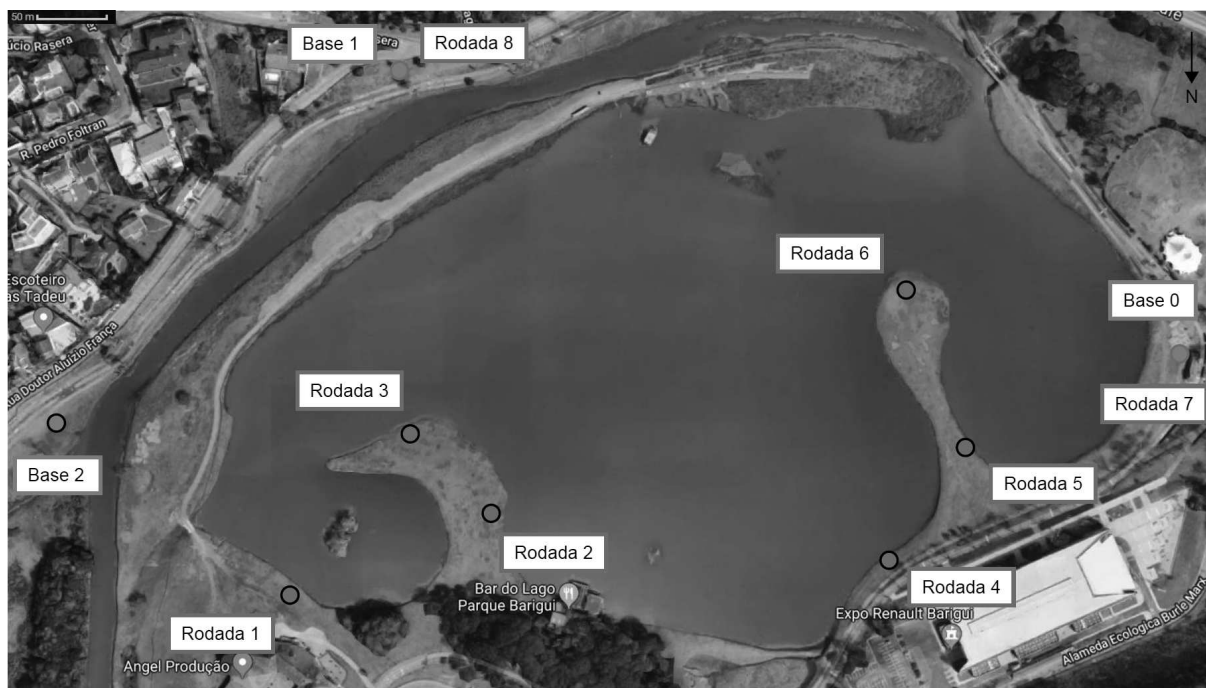
Da maneira que as bases e o *tracker* ficaram distribuídos, *timestamps* registrados na base 0 deveriam ser muito próximos ao momento de transmissão dos sinais do *tracker* devido a proximidade dos dois. Portanto, esperava-se que os *timestamps* registrados nas bases 1 e 2 ocorressem simultaneamente e com um atraso correspondente ao tempo que a luz levaria para se propagar no meio até chegar às bases. A média de diferenças de tempo de chegada entre as bases 1 e 2 foi praticamente zero e a média de diferenças de tempo de chegada entre as bases 0 e 1 e entre as bases 0 e 2 foi de pouco mais que uma unidade de resolução de tempo (125 ns) maior que o esperado. Como a distância entre os conjuntos era de 885 metros, esperava-se uma diferença de tempo de 2,956 us, porém a média foi de 3,095 us. Os dados adquiridos nesse teste foram utilizados para realizar as simulações em Matlab do cálculo de posição por TDOA, apresentadas no Capítulo 5.

4.3 TESTE FINAL

O teste final consistiu na aplicação completa do sistema com o intuito de extrair a localização do *tracker* pelos métodos de RSSI e TDOA utilizando as informações fornecidas pelas bases. Como o monitor serial na base 0 dispunha apenas os *timestamps* e o RSSI, os cálculos de localização foram realizados mais tarde após o tratamento dos dados em Matlab. Os parâmetros utilizados foram explicitados na Seção 4.1.

Foram feitas oito rodadas de testes em localizações distintas, sendo que em cada uma delas foram realizados cinco ciclos completos de envios do *tracker*. A Figura 16 mostra a localização das bases em rosa e das oito rodadas de testes em vermelho. As rodadas 7 e 8 não estão aparentes pois foram realizadas muito próximas às bases 0 e 1, respectivamente.

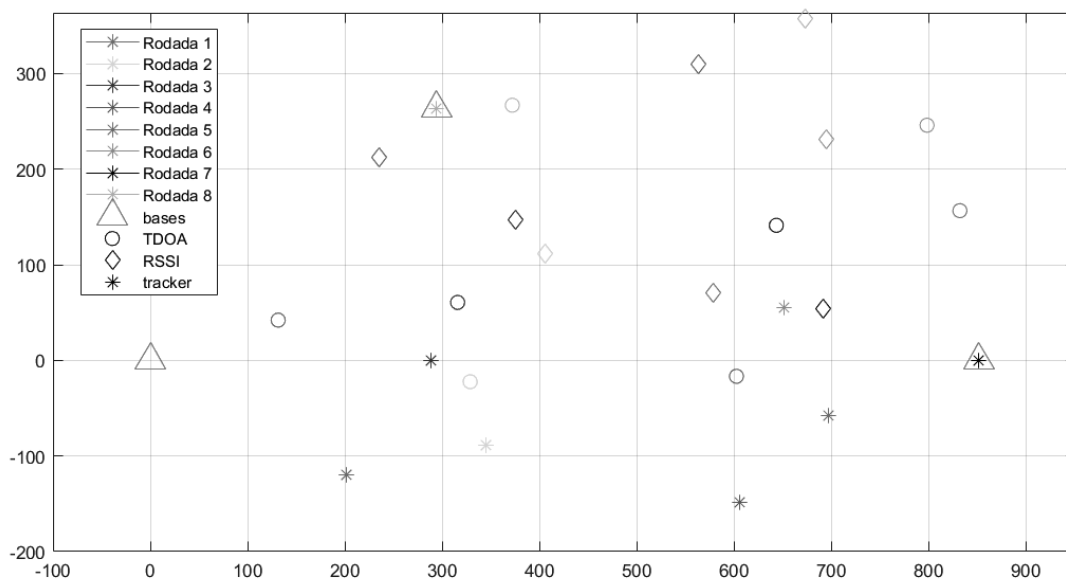
Figura 16 – Localização das bases e do tracker



Fonte: Autoria Própria

A Figura 17 mostra a média dos resultados de cada rodada tanto para o cálculo por TDOA quanto por RSSI. As bases são representadas como triângulos rosas, a posição original do tracker em cada rodada é um asterisco, o cálculo de posição por TDOA é um círculo e o cálculo de posição por RSSI é um losango, sendo que cada rodada é representada por uma cor diferente.

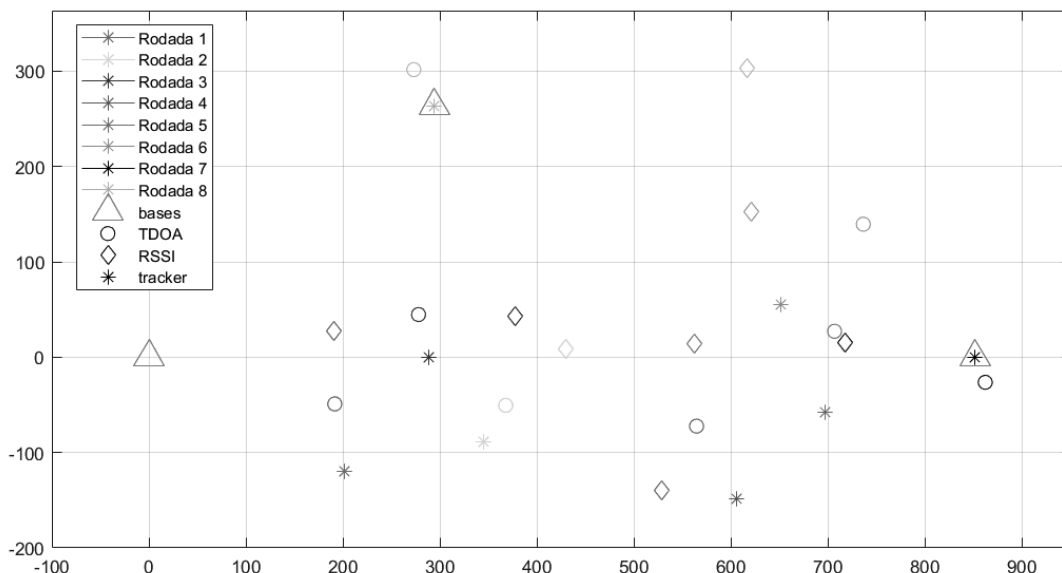
Figura 17 – Localização da média dos resultados de cada rodada



Fonte: Autoria Própria

A Figura 18 mostra os melhores resultados de cada rodada tanto para o cálculo por TDOA quanto por RSSI.

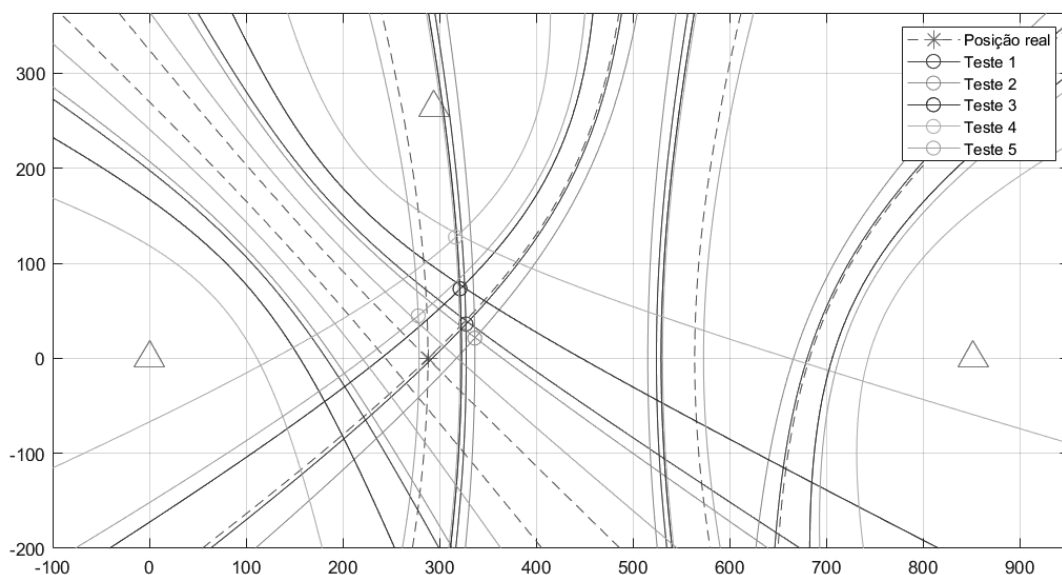
Figura 18 – Localização do melhor resultado de cada rodada



Fonte: Autoria Própria

A Figura 19 mostra os resultados e as hipérboles do cálculo de posição por TDOA de todos os cinco testes da rodada 3. Cada teste é representado por uma cor, onde o resultado final é marcado por um círculo. O asterisco vermelho representa a posição real do *tracker* durante o teste, de forma que as hipérboles pontilhadas seriam os resultados ideais para o cálculo de posição por TDOA.

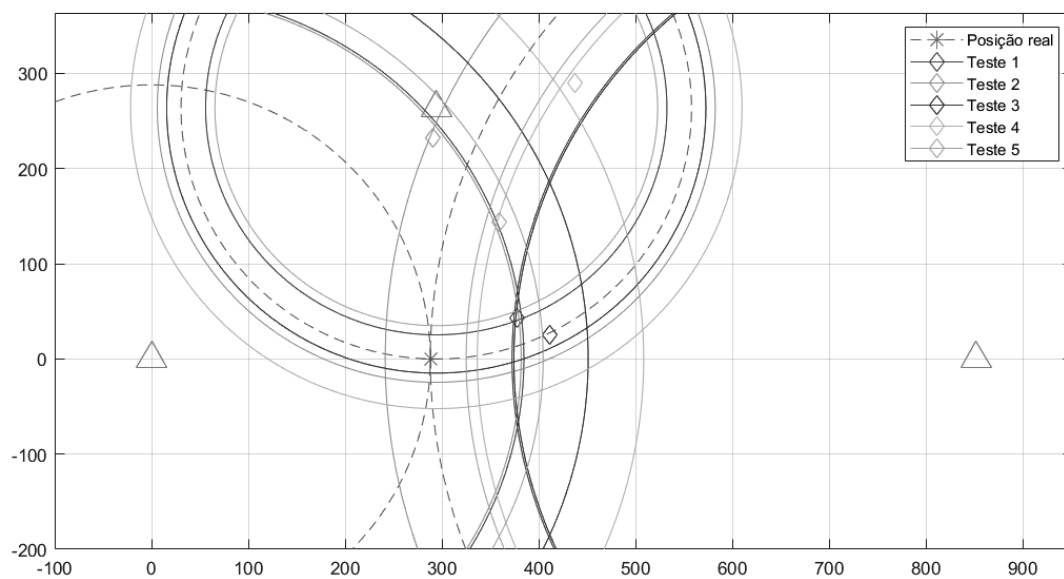
Figura 19 – Resultados do cálculo de posição por TDOA da rodada 3



Fonte: Autoria Própria

A Figura 20 mostra os resultados e as circunferências do cálculo de posição por RSSI de todos os cinco testes da rodada 3. Cada teste é representado por uma cor, onde o resultado final é marcado por um losango. O asterisco vermelho representa a posição real do *tracker* durante o teste, de forma que as circunferências pontilhadas seriam os resultados ideais para o cálculo de posição por RSSI.

Figura 20 – Resultados do cálculo de posição por RSSI da rodada 3



Fonte: Autoria Própria

O Apêndice F apresenta os resultados do cálculo de posição por TDOA e RSSI de todas as rodadas.

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta a análise dos resultados mostrados no Capítulo 4. Para indicar a qualidade do desempenho do sistema, os termos “exatidão” e “precisão” são recorrentemente utilizados e seus significados são os descritos respectivamente no Apêndice A e no Apêndice B conforme BERNARDES A.; BRANDI (2012). A Seção 5.1 faz a análise dos resultados obtidos no teste final. A Seção 5.2 explicita as simulações que modelam o sistema de cálculo de posição por TDOA utilizando os dados coletados nos testes preliminares.

5.1 TESTE FINAL

As amostras coletadas no teste final foram suficientes para demonstrar na prática a teoria apresentada na revisão literária dos métodos de cálculo de localização por TDOA e RSSI. Embora os resultados tenham divergido do ideal, é possível entender como cada método funciona fazendo a análise das curvas geradas por cada interação do *tracker* com as bases.

A partir dos dados coletados nos testes finais, é possível encontrar o ponto médio das cinco posições estimadas do *tracker* através dos métodos de RSSI e TDOA para cada rodada de teste. Com os pontos médios encontrados, pode-se determinar as distâncias entre estes e as posições reais de cada rodada para quantificar o erro médio associado aos métodos. A Tabela 4 apresenta as distâncias entre os pontos reais e médios dos resultados de cada rodada calculados a partir tanto do método de RSSI quanto TDOA.

Tabela 4 – Distâncias aos pontos médios.

Rodada	RSSI [m]	TDOA [m]
1	334	176
2	209	68
3	170	66
4	459	131
5	175	253
6	180	240
7	168	251
8	390	78

Fonte: Autoria Própria

Comparando as distâncias aos pontos médios na Tabela 4, nota-se que os valores apresentados para o TDOA em geral são menores, o que significa que na maioria dos casos os resultados de estimativa de posição para esse método possuem exatidão melhor que o apresentado para o método do RSSI. Verifica-se que alguns valores da tabela possuem valores

muito grandes, o que é consequência de alguns dos testes realizados terem tido resultados muito fora do esperado e assim, afetarem a média.

Para analisar a dispersão das posições encontradas, foram determinados para cada rodada os desvios padrões relativos às coordenadas X e Y dessas posições e tomadas as médias do desvio padrão do eixo X com o do eixo Y. Os resultados são os presentes na Tabela 5.

Tabela 5 – Desvio padrão

Rodada	RSSI [m]	TDOA [m]
1	94	89
2	62	29
3	85	32
4	174	67
5	50	210
6	102	101
7	40	154
8	39	54

Fonte: Autoria Própria

Comparando os dados da Tabela 5, novamente o TDOA se mostra mais vantajoso na maioria das rodadas ao possuir uma dispersão menor, ou seja, apresentando melhor precisão em suas estimativas de posição. É importante também apontar que os valores muito altos de desvio padrão são decorrente de testes que deram errados, estimando uma posição muito distante do real.

Uma característica a ser observada nas posições calculadas pelo método por TDOA é o deslocamento destas sempre direcionado à região interna do triângulo formado pelas bases, ocasionando a redução da exatidão dos resultados. Esse efeito pode ser observado por exemplo na rodada 4, Figura 36, onde os braços usados para o cálculo das hipérboles geradas pelas bases 1 e 2 estão sempre deslocadas para cima em relação à posição real do *tracker*. Esse comportamento se revelou em todos os pares de bases mais distantes do *tracker*. Essa análise mostra-se de acordo com a teoria explicada na Subseção 2.1.3.

As rodadas 7 e 8, realizadas com o *tracker* posicionado sobre as bases 0 e 1 respectivamente, apresentaram resultados fora das expectativas para o cálculo do TDOA. Em algumas interações entre bases, a solução para a Equação (3) não foi uma hipérbole, mas uma elipse.

Conforme explicado na Subseção 2.1.3, a Equação (3) pode ser comparada à de uma hipérbole, porém caso a distância calculada a partir da diferença do tempo recebido entre as bases seja maior que a distância entre as bases, a região no espaço definida por essa equação torna-se uma elipse. Esse efeito torna-se mais recorrente nas posições próximas às bases pois a distância calculada a partir da diferença de tempo real entre as bases deveria ser as distâncias entre as bases, dessa forma, um pequeno erro de tempo acrescentado gera elipses.

5.2 SIMULAÇÕES EM MATLAB

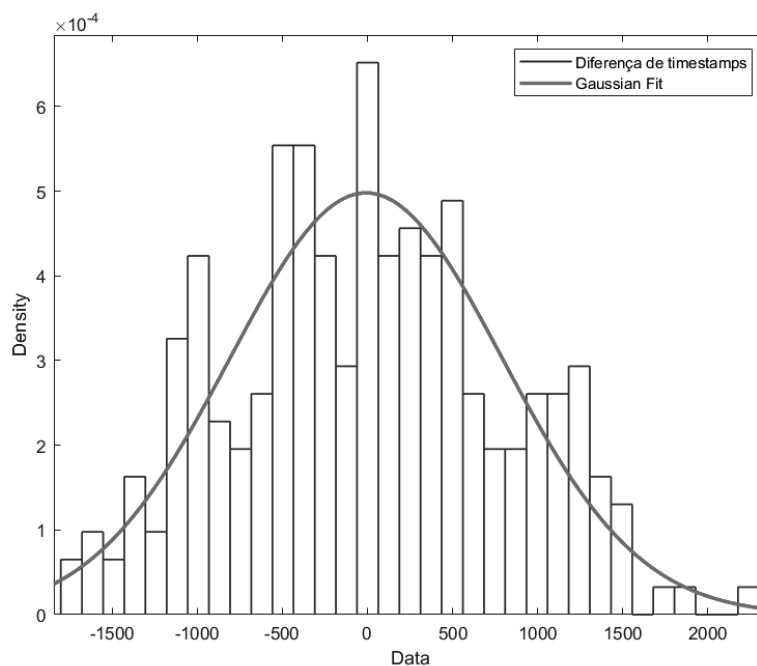
As simulações em MATLAB objetivam modelar os resultados obtidos na prática com o método do TDOA. Para isso, a simulação possui parâmetros de sistema como: número de amostras de tempo por teste; posições das bases; e posição do *tracker*. Para comparar com os testes realizados, as simulações foram feitas com os mesmos parâmetros. Para encontrar as hipérboles utilizadas para calcular a posição do *tracker*, é realizada uma média da diferença de tempo base a base das cinquenta amostras do teste.

Para simular a inserção de erro, em cada diferença de tempo entre as amostras é acrescida uma variável aleatória. Essa variável segue uma distribuição gaussiana, cujos parâmetros foram encontrados a partir da análise dos dados coletados nos testes preliminares.

Nos testes preliminares, conforme explicado na Seção 4.2, as bases 1 e 2 se encontravam na mesma posição distantes do *tracker* e da base 0, que também estavam juntos. Analisando as amostras de diferença de tempo desses testes, é possível notar que o histograma destas seguem o padrão de uma curva gaussiana. Essa curva possui associado a ela um valor de desvio padrão e um deslocamento em relação à origem. Em um mesmo teste, foram traçados os histogramas para as amostras de diferença de tempo entre as base 1 e 2, cuja diferença de distância em relação ao *tracker* é nula, e para as amostras entre a base 0 e as outras bases, cuja diferença de distância em relação ao *tracker* não é nula. Nota-se que o deslocamento em relação à origem da gaussiana é quase nula para o primeiro histograma, enquanto para o segundo histograma possui um valor significativo.

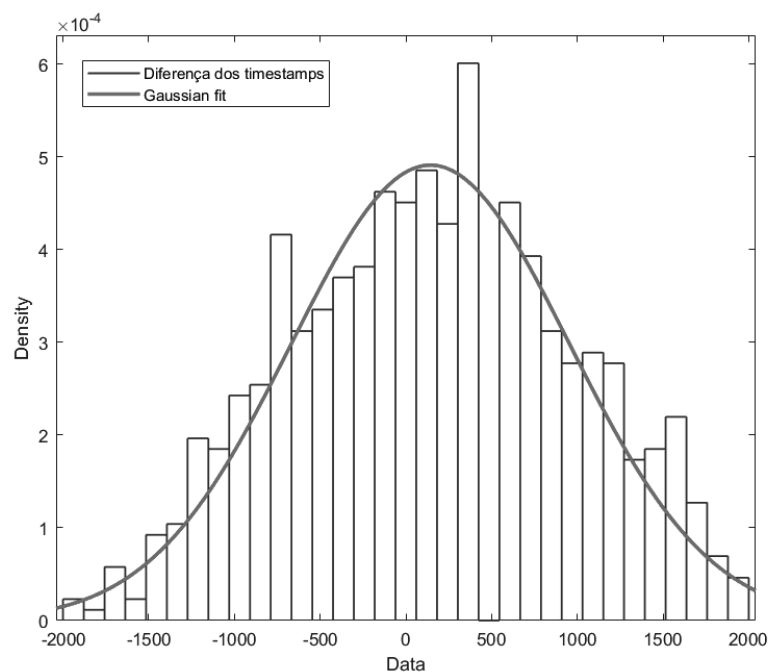
A Figura 21 mostra a análise para as bases juntas enquanto a Figura 22, a análise para as bases afastadas. Nas figuras, encontram-se os histogramas e as gaussianas ajustadas para cada. Para o primeiro ajuste de gaussiana, o desvio padrão é 800,95 ns e o deslocamento é -7,59 ns. Para o segundo ajuste de gaussiana, onde as bases possuíam uma diferença de distância de 885 m em relação ao *tracker*, o desvio padrão 812,56 ns e o deslocamento é 142,84 ns.

Figura 21 – Histograma e ajuste com diferença de distância nula



Fonte: Autoria Própria

Figura 22 – Histograma e ajuste com diferença de distância não nula



Fonte: Autoria Própria

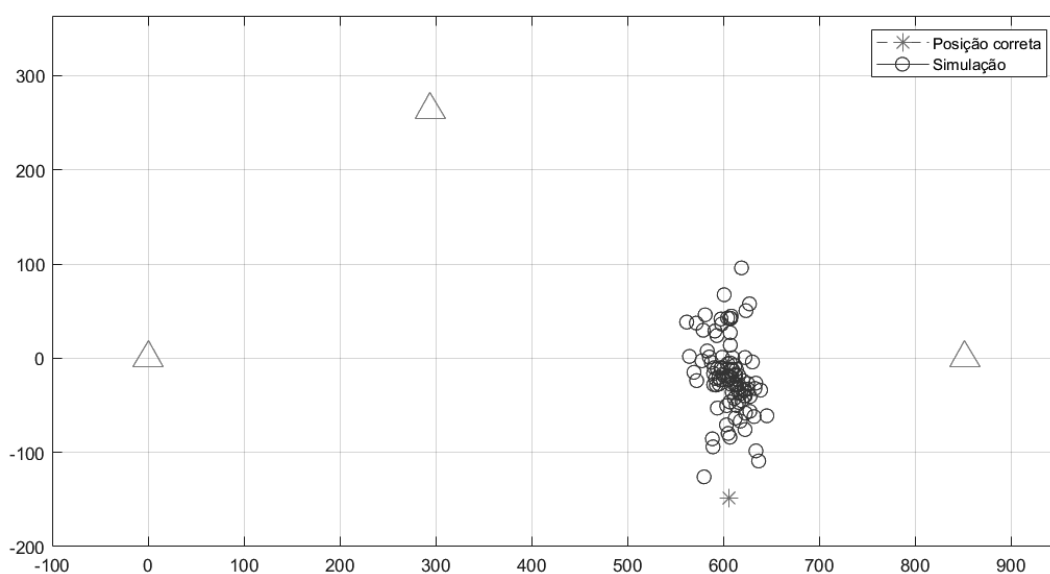
A partir dessas análises, o erro inserido nas simulações segue uma distribuição gaussiana com o desvio padrão de 812,56 ns, maior valor, e o deslocamento em relação à origem proporcional à diferença de distância entre as bases em relação ao *tracker*. Dessa forma, o

deslocamento varia linearmente entre 0 ns e 142,84 ns quando a distância varia de 0 m a 885 m.

Foram realizadas simulações nas mesmas posições de bases e *tracker* da rodada 4. A Figura 46 e a Figura 47, presentes no Apêndice G, apresentam as simulações com os parâmetros exatamente iguais aos da rodada 4, enquanto a Figura 23 mostra a simulação com cem testes.

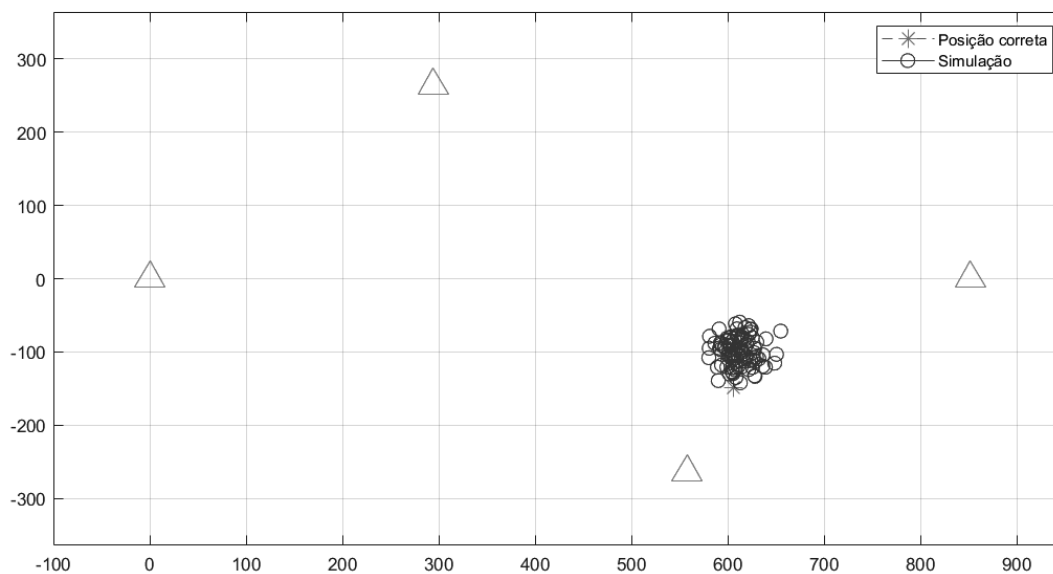
Utilizando os mesmos indicadores de qualidade do Capítulo 4, a simulação da Figura 23 tem exatidão de 132,57 m e precisão de 27,90 m, sendo valores próximos aos obtidos na prática. A simulação presente na Figura 24 adiciona uma quarta base e, conforme o esperado, é possível ver que o deslocamento das amostras possui uma acentuação bem menor. A exatidão obtida foi de 45,62 m e a precisão de 17,43 m.

Figura 23 – Resultados da simulação da rodada 4 com 100 iterações



Fonte: Autoria Própria

Figura 24 – Resultados da simulação da rodada 4 com quatro bases



Fonte: Autoria Própria

No Apêndice G, a Figura 48 e a Figura 49 apresentam simulações com as bases distribuídas em um quadrado. Observa-se que dessa forma as posições estimadas não apresentam o deslocamento ao centro como nos outros casos.

5.3 CONSUMO ENERGÉTICO

O sistema proposto tem como um dos objetivos obter consumo energético inferior em relação aos sistemas que utilizam GPS no dispositivo geolocalizado. O *tracker* é composto por uma placa TIVA e um módulo LoRa e tem seu consumo em pico durante a transmissão dos sinais para as bases. Como o cálculo de posição é realizado periodicamente, o *tracker* tem a possibilidade de entrar em modo de baixo consumo, disponibilizado tanto pela TIVA quanto pelo módulo LoRa.

Durante a transmissão, foi medido experimentalmente o consumo do *tracker* obtendo o valor de 70 mA. O consumo da placa TIVA em modo de *sleepmode* é 5,41 mA de acordo com Texas Instruments (2007), enquanto o consumo do módulo LoRa em modo *IDLE* é 1,5 uA de acordo com Semtech (2016).

Em uma situação prática o sistema poderia realizar a localização a cada 10 minutos com duração de transmissão de 10 segundos. Utilizando a mesma bateria de 9V com carga de 1200 mAh do exemplo presente na Capítulo 1, a bateria do dispositivo nessa situação teria vida útil de 21 dias. Essa duração é expressivamente maior que a do GPS que seria de 72 horas ligado continuamente. Na aplicação prática, é recomendável a utilização de baterias com cargas maiores ou mais de uma bateria.

6 CONCLUSÃO

O projeto desenvolvido foi proposto desde sua concepção inicial como um sistema de geolocalização utilizando tecnologia LPWAN, uma vez que há aplicações onde o consumo do dispositivo a ser geolocalizado é um fator limitante do produto. Ao longo do trabalho, foram estudadas diferentes formas de alcançar esse objetivo, pesquisando por tecnologias existentes e aprimorando a ideia e a arquitetura dos sistemas que seriam desenvolvidos.

O LoRa, por possuir rádios de baixo custo e ter consumo energético baixíssimo, foi o escolhido para ser o protocolo de LPWAN. Os estudos também mostraram que, para os cálculos de posição, os métodos baseados em RSSI e TDOA serviriam bem ao projeto uma vez que ainda atendem ao requisito do baixo consumo do dispositivo geolocalizado. Contudo, desde o princípio o foco era no método por TDOA, sendo sempre este descrito na literatura como o que possui melhores resultados em sistemas LPWAN.

Em relação ao consumo energético, o sistema mostra um aproveitamento de bateria superior a sistemas que utilizam módulo GPS.

O desempenho do projeto elaborado mostrou-se satisfatório para a aplicação desejada. Conforme as análises do Capítulo 5, o algoritmo de geolocalização baseado em TDOA possui resultados melhores do que o baseado em RSSI, utilizando indicadores quantitativos de precisão e exatidão.

No método por TDOA, o indicador de exatidão teve valores entre 66 m e 253 m, enquanto o indicador de precisão teve valores entre 32 m e 210 m, sendo que, em ambos, os piores resultados tiveram tais valores por incluir na média as estimativas de posição que foram bem fora do esperado. Tanto a precisão quanto a exatidão alcançada de até poucas centenas de metros tiveram valores suficientemente bons para as aplicações às quais o sistema é voltado, de geolocalização em ambientes rurais em distâncias de diversos quilômetros entre bases.

As simulações realizadas mostraram-se próximas aos resultados encontrados na realidade, com o mesmo deslocamento para a região central do triângulo formado pelas bases e com valores próximos de precisão e exatidão. Isso mostra que o modelo encontrado a partir da análise dos dados representa com boa fidelidade o sistema real.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Para melhorias do projeto, há algumas possibilidades de trabalhos futuros a serem implementados. O software poderia ser alterado para tratar múltiplos *trackers* e bases, assim aumentando o número de dispositivos rastreáveis e melhorando a precisão da geolocalização com mais de uma triangulação.

Outra possibilidade de melhoria seria a criação de uma rede IoT para os dados adquiridos, onde cada base se conectaria a internet e enviaria a um servidor as informações

das mensagens do *tracker*. Assim as posições seriam calculadas pelos algoritmos de TDOA no servidor remoto e ainda haveria a possibilidade de acessar as posições dos dispositivos geolocalizados através de alguma aplicação web ou mobile.

Seria também possível melhorar a precisão do cálculo do TDOA através do uso dos pulsos de tempo gerados por um GPS *disciplined oscillator* (GPSDO), que possui pulsos cuja frequência chega na ordem de MHz. Assim, se cada base se comunicasse com um GPSDO, a melhora de resolução da resincronização passaria de milissegundos para nanossegundos (FURUNO, 2014).

Por fim há a possibilidade de melhora do modelo de simulação através do estudo da comunicação sem fio do LoRa e propagação de sinal no espaço para corresponder aos dados reais adquiridos com maior fidelidade. A realização de testes em mais locais seria também interessante para adquirir maior entendimento do sistema e aperfeiçoar seu modelo.

Referências

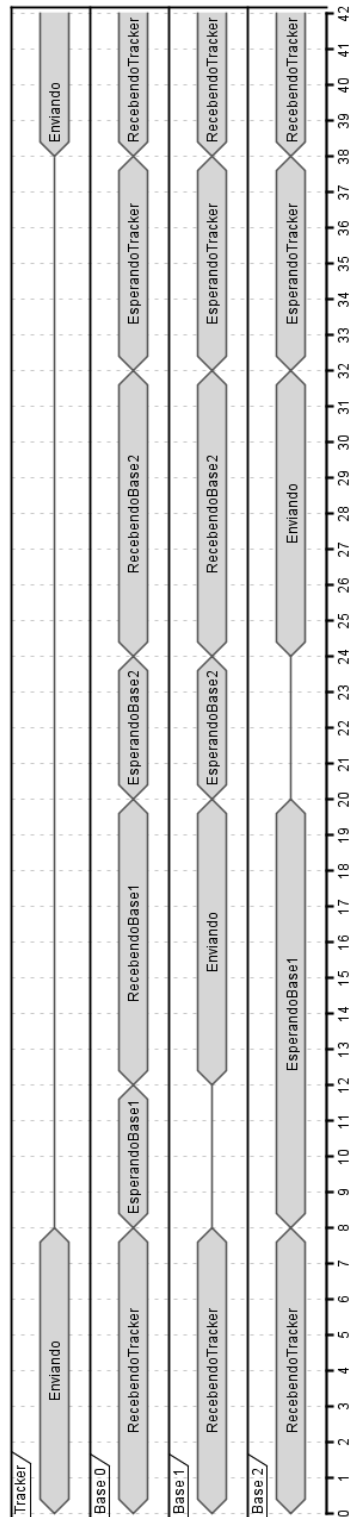
- ADEWUMI O. G.; DJOUANI, K. K. A. M. Rssi based indoor and outdoor distance estimation for localization in wsn. **2013 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)**, p. 6, 2013. Citado na página 19.
- AG2GAEH. **Hyperbola: features**. 2017. Disponível em: <<https://en.wikipedia.org/wiki/File:Hyperbel-def-ass-e.svg>>. Acesso em: 29 de abril de 2019. Citado na página 23.
- AUGUSTIN A.; CLAUSEN, T. T. W. M. Y. J. A study of lora: Long range & low power networks for the internet of things. **MDPI**, p. 18, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.
- BANGGOOD. **RAK831 LoRa/LoRaWAN Gateway Module 433/470/868/915MHz Base on SX1301 15KM Wireless Spread Spectrum Transmission - 915MHZ**. 2019. Disponível em: <https://www.banggood.com/RAK831-LoRaLoRaWAN-Gateway-Module-433470868915MHz-Base-on-SX1301-p-1339993.html?akmClientCountry=BR&gmcCountry=BR¤cy=BRL&createTmp=1&utm_source=googleshopping&utm_medium=cpc_bgcs&utm_content=garman&utm_campaign=pla-brg-all-pc&gclid=Cj0KCCQjwuLPnBRDjARIsACDzGL3ewjCNtMT4O149fR_MmpXtANpoLe7n5jauRQ4altl3fmEi-iS5MkaAnzTEALw_wcB&ID=510803&cur_warehouse=CN>. Acesso em: 28 de maio de 2019. Citado na página 18.
- BERNARDES A.; BRANDI, H. S. J. J. A. H. O. J. C. V. **Vocabulário Internacional de Metrologia**. [S.l.], 2012. 95 p. Citado na página 46.
- BOR M.; ROEDIG, U. Lora transmission parameter selection. **2017 13th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems**, p. 8, 2017. Citado na página 27.
- BOUNCEUR A.; CLAVIER, L. N. U. A study of lora low power and wide area network technology. **2017 International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP)**, p. 6, 2017. Citado na página 18.
- CAO F., L. X. Location based toa algorithm for uwb wireless body area networks. **2014 IEEE 12th International Conference on Dependable, Autonomic and Secure Computing**, p. 5, 2014. Citado na página 21.
- CONRAD J. M., J. L. E. S. S. Utilization of xbee zigbee modules and matlab for rssi localization applications. **SoutheastCon 2017**, p. 6, 2017. Citado na página 20.
- FARGAS B. C.; PETERSEN, M. N. Gps-free geolocation using lora in low-power wans. **Proceedings of 2017 Global Internet of Things Summit (GloTS)**, p. 6, 2017. Citado na página 17.
- FURUNO. **Technology FURUNO GPS/Multi-GNSS Disciplined Oscillator (GPSDO/GNSSDO)**. 2014. Disponível em: <https://www.furuno.com/en/gnss/technical/gnssdo?fbclid=IwAR1IC7GXDty7vTth0EqsTMZtP9INVqSZ_I3R3dXR2YThlxouQgP6RnTC7Ok>. Acesso em: 27 de abril de 2019. Citado na página 53.

- GUNNARSSON F.; GUSTAFSSON, F. Positioning using time-difference of arrival measurements. **2003 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2003.**, p. 4, 2003. Citado 3 vezes nas páginas 22, 24 e 25.
- KAUNE, R. Accuracy studies for tdoa and toa localization. **2012 15th International Conference on Information Fusion**, p. 8, 2012. Citado na página 24.
- LEHTINEN M.; HAPPONEN, A. I. J. Accuracy and time to first fix using consumer-grade gps receivers. **2008 16th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks**, p. 7, 2008. Citado na página 17.
- LORA ALLIANCE. **A technical overview of LoRa and LoRaWAN**. [S.l.], 2015. 20 p. Citado 3 vezes nas páginas 27, 28 e 29.
- LORA ALLIANCE STRATEGY COMMITTEE. **Geolocation Whitepaper**. [S.l.], 2018. 15 p. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 19.
- SEMTECH. **SX1276-7-8-9 Datasheet**. [S.l.], 2016. 133 p. Citado na página 51.
- STMICROELECTRONICS. **UM1724 User Manual STM32 Nucleo-64 boards (MB1136)**. [S.l.], 2019. 69 p. Citado na página 34.
- TEXAS INSTRUMENTS. **Tiva TM4C123GH6PM Microcontroller**. [S.l.], 2007. 1409 p. Citado na página 51.
- TUFTS UNIVERSITY. **Finding Location with Time of Arrival and Time Difference of Arrival Techniques**. [S.l.], 2017. 3 p. Citado 3 vezes nas páginas 21, 22 e 23.
- U-BLOX. **NEO-6 u-blox 6 GPS Modules Data Sheet**. [S.l.], 2011. 25 p. Citado na página 35.

Apêndices

APÊNDICE A – Diagrama de Tempo do Sistema

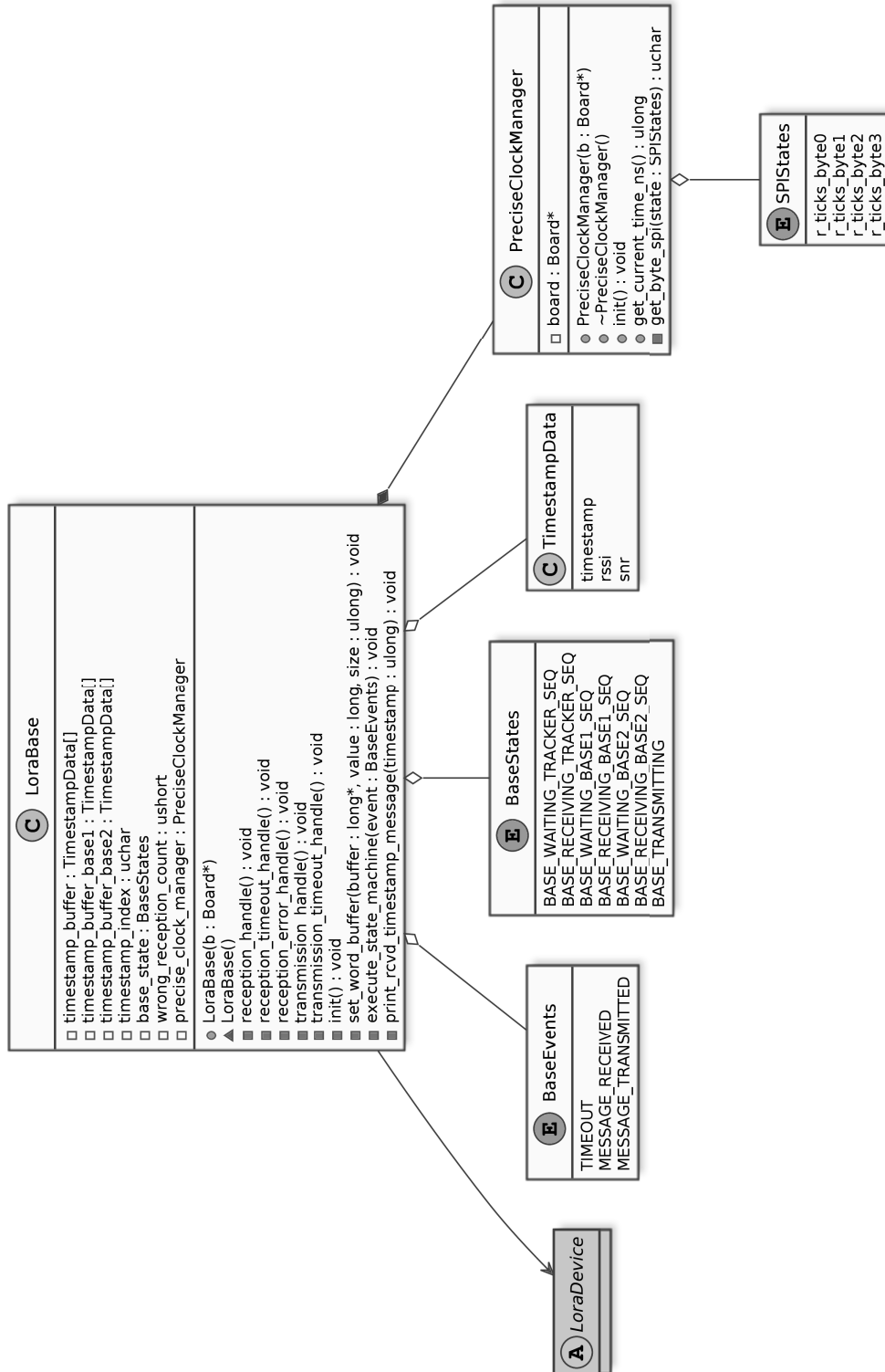
Figura 25 – Diagrama de Tempo do Sistema



Fonte: Autoria Própria

APÊNDICE B – Diagrama de Classes da Aplicação

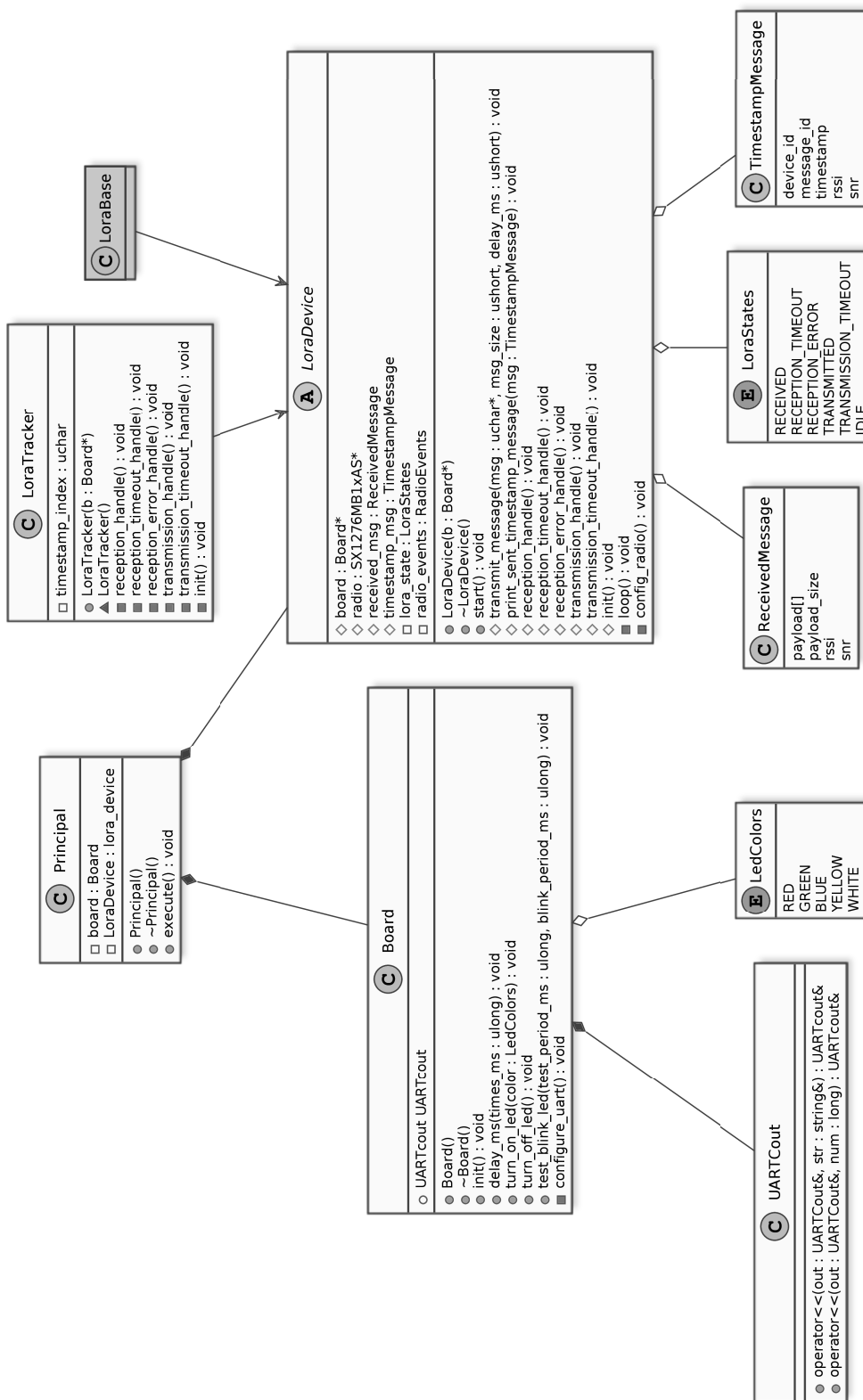
Diagrama de Classes da Aplicação - Parte A



(a)

Figura 26 – Diagrama de Classes da Aplicação

Diagrama de Classes da Aplicação - Parte B

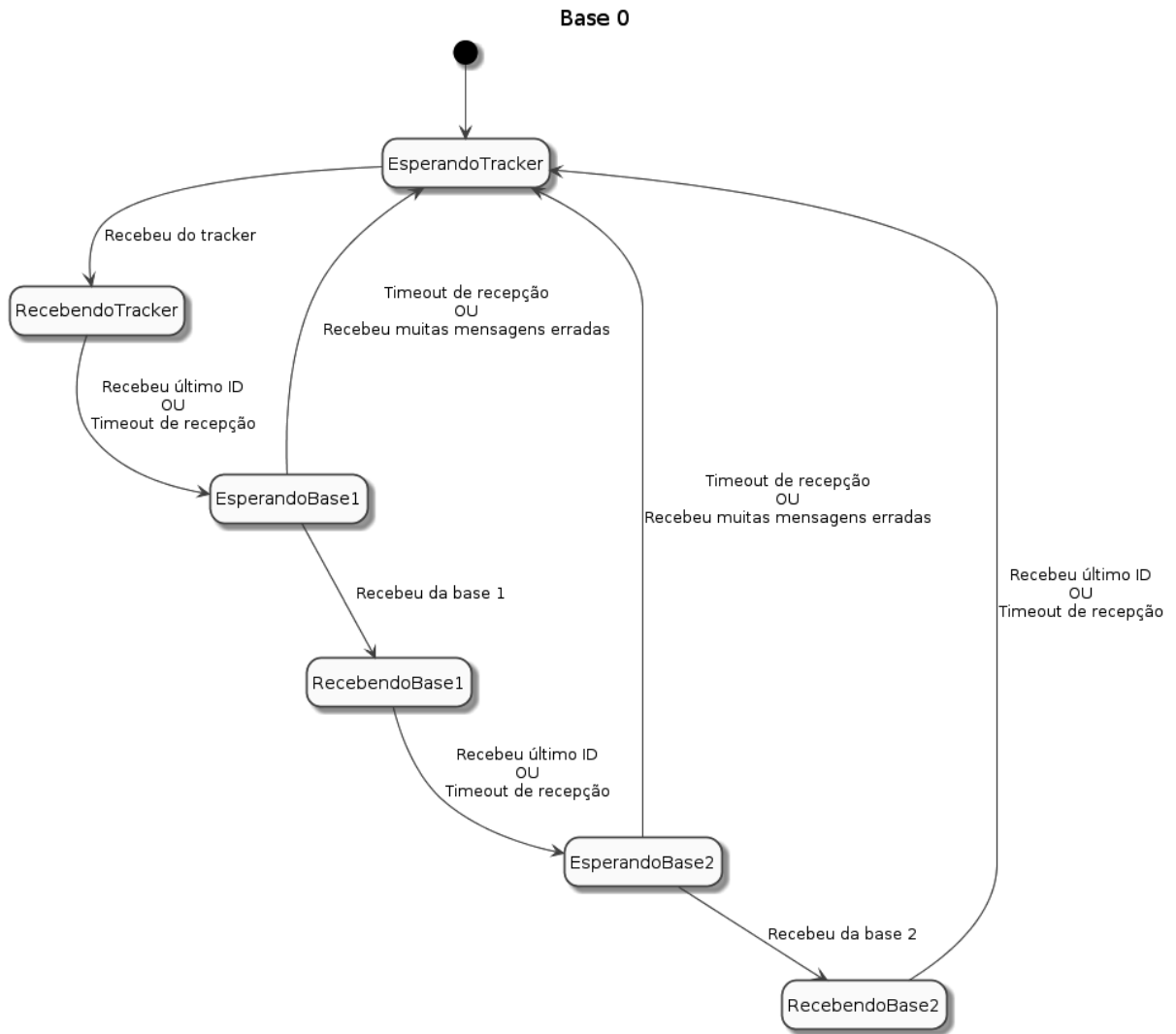


(b)

Figura 26 – Diagrama de Classes da Aplicação

APÊNDICE C – Diagrama de Estados da Base 0

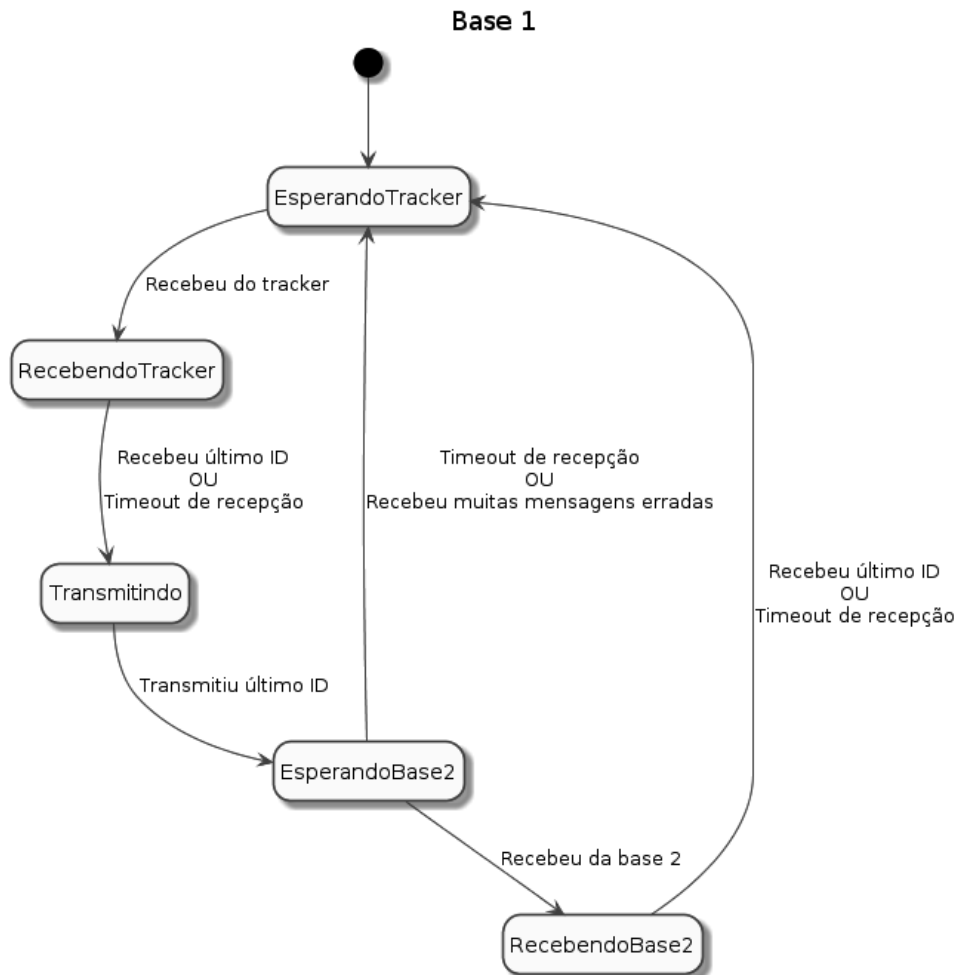
Figura 27 – Diagrama de Estados da Base 0



Fonte: Autoria Própria

APÊNDICE D – Diagrama de Estados da Base 1

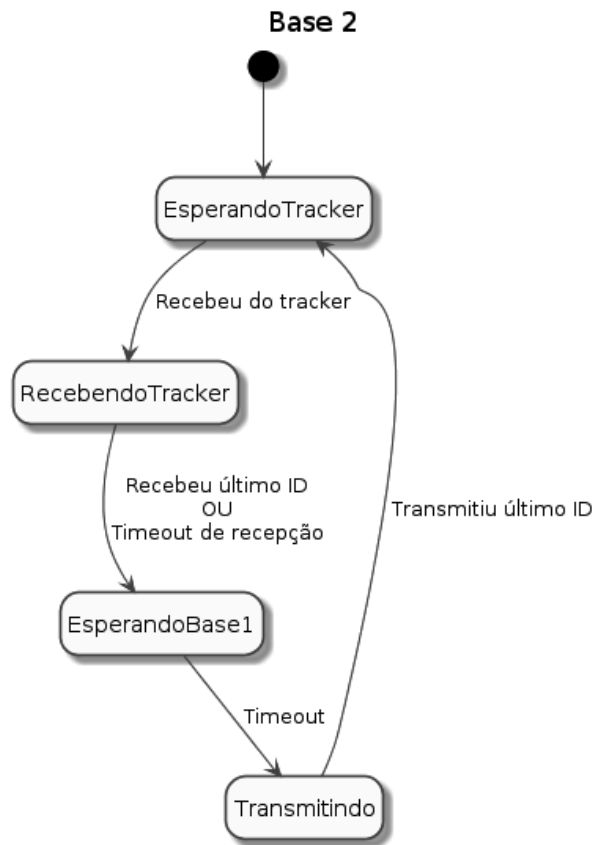
Figura 28 – Diagrama de Estados da Base 1



Fonte: Autoria Própria

APÊNDICE E – Diagrama de Estados da Base 2

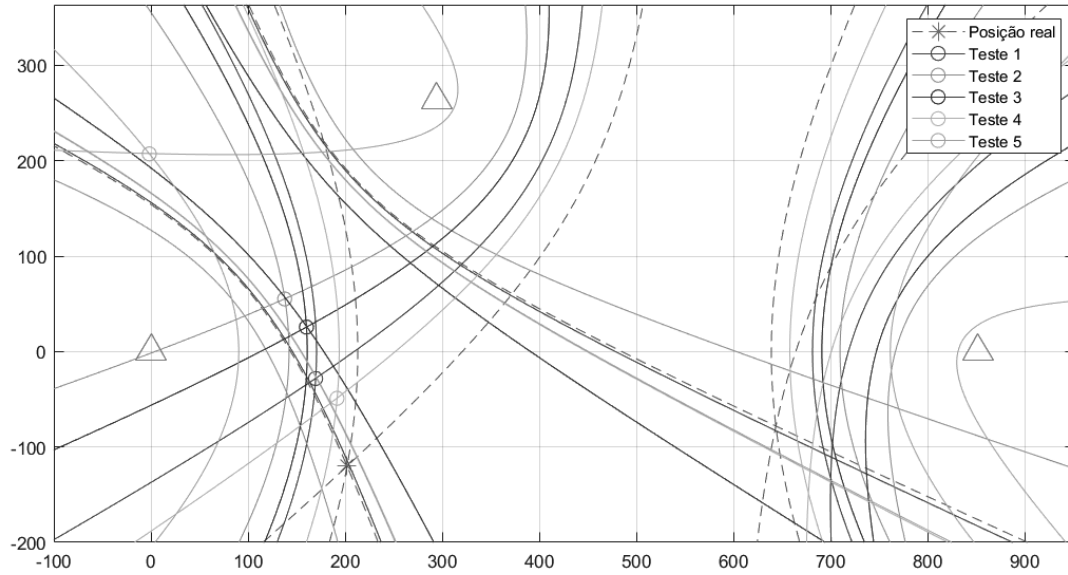
Figura 29 – Diagrama de Estados da Base 2



Fonte: Autoria Própria

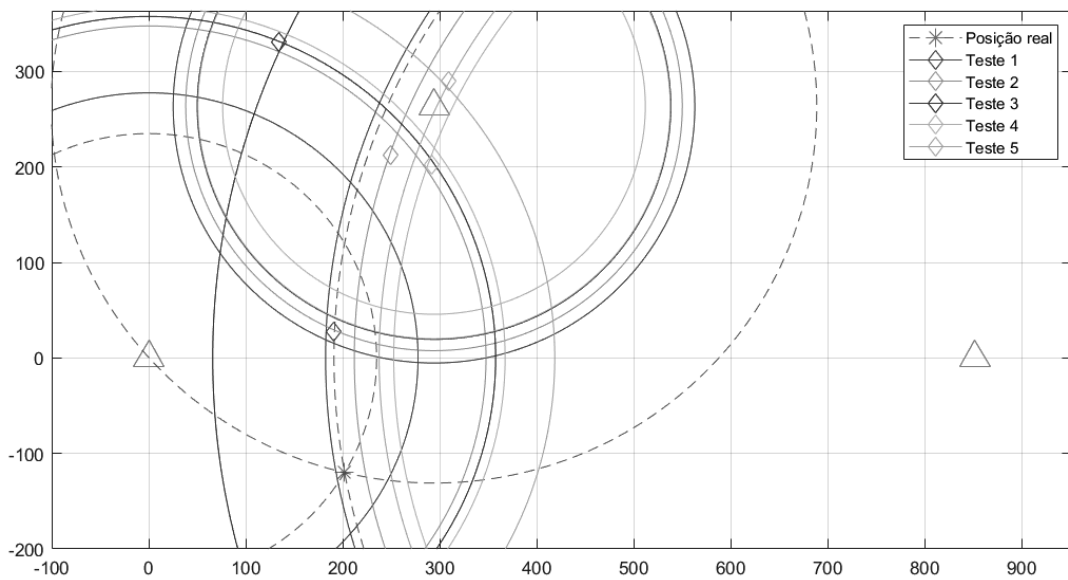
APÊNDICE F – Resultados do Teste Final

Figura 30 – Resultados do cálculo de posição por TDOA da rodada 1



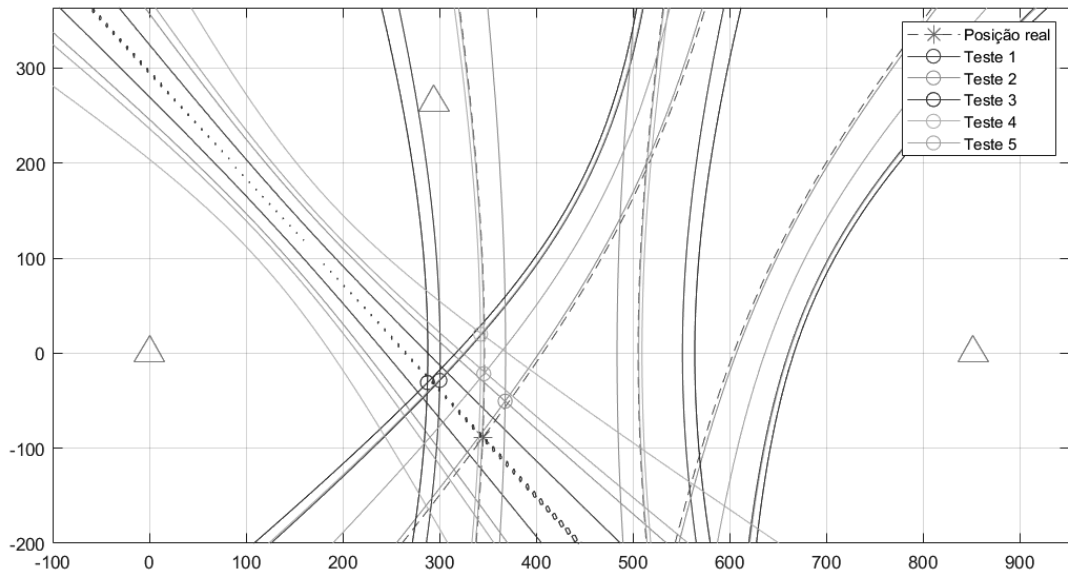
Fonte: Autoria Própria

Figura 31 – Resultados do cálculo de posição por RSSI da rodada 1



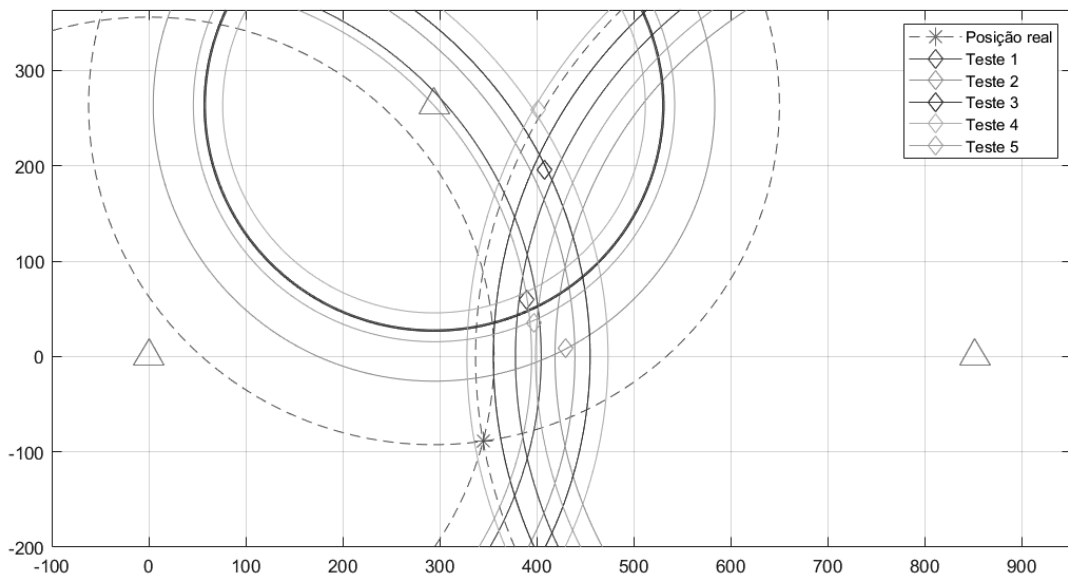
Fonte: Autoria Própria

Figura 32 – Resultados do cálculo de posição por TDOA da rodada 2



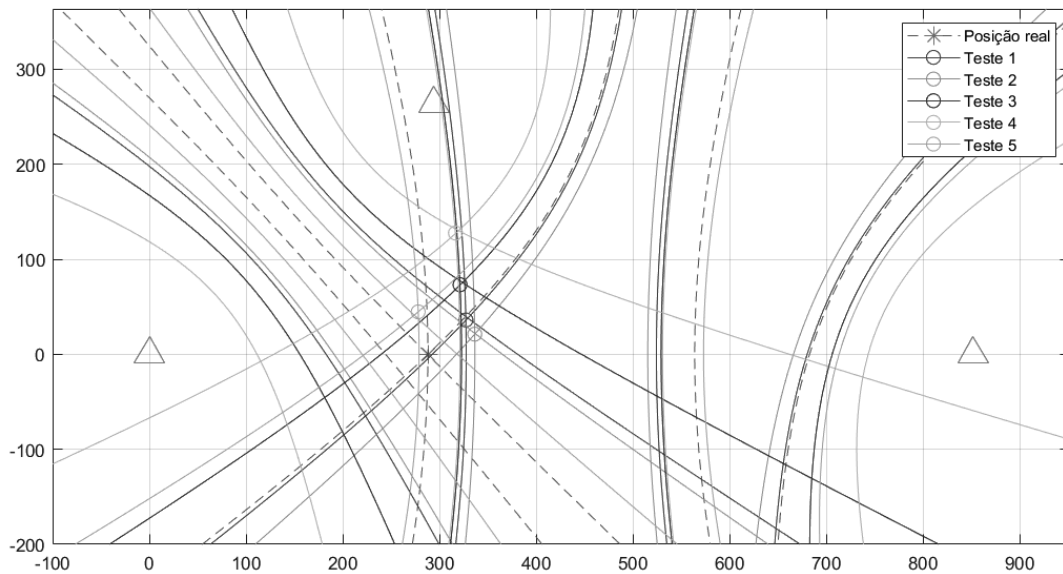
Fonte: Autoria Própria

Figura 33 – Resultados do cálculo de posição por RSSI da rodada 2



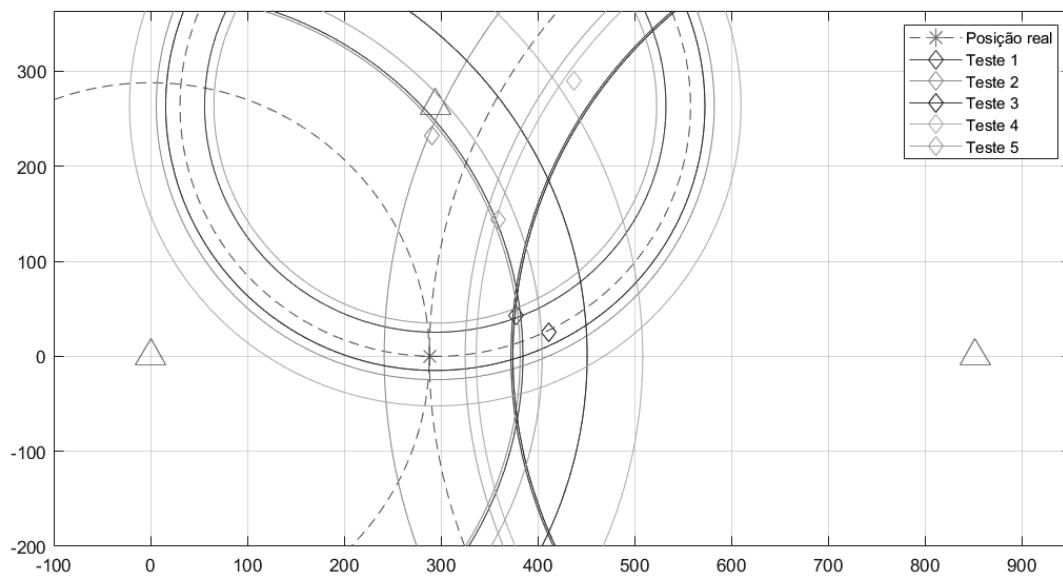
Fonte: Autoria Própria

Figura 34 – Resultados do cálculo de posição por TDOA da rodada 3



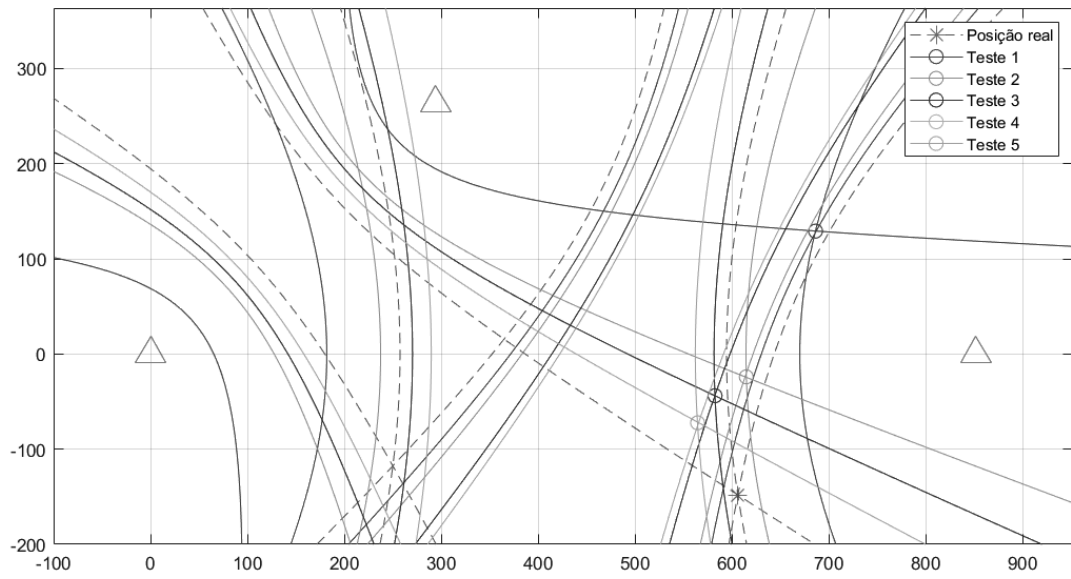
Fonte: Autoria Própria

Figura 35 – Resultados do cálculo de posição por RSSI da rodada 3



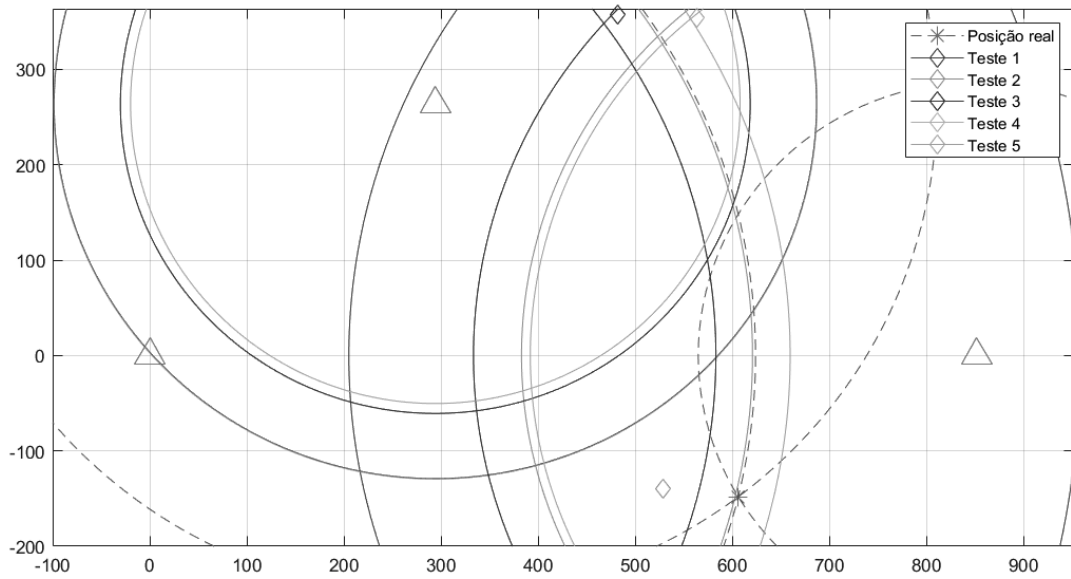
Fonte: Autoria Própria

Figura 36 – Resultados do cálculo de posição por TDOA da rodada 4



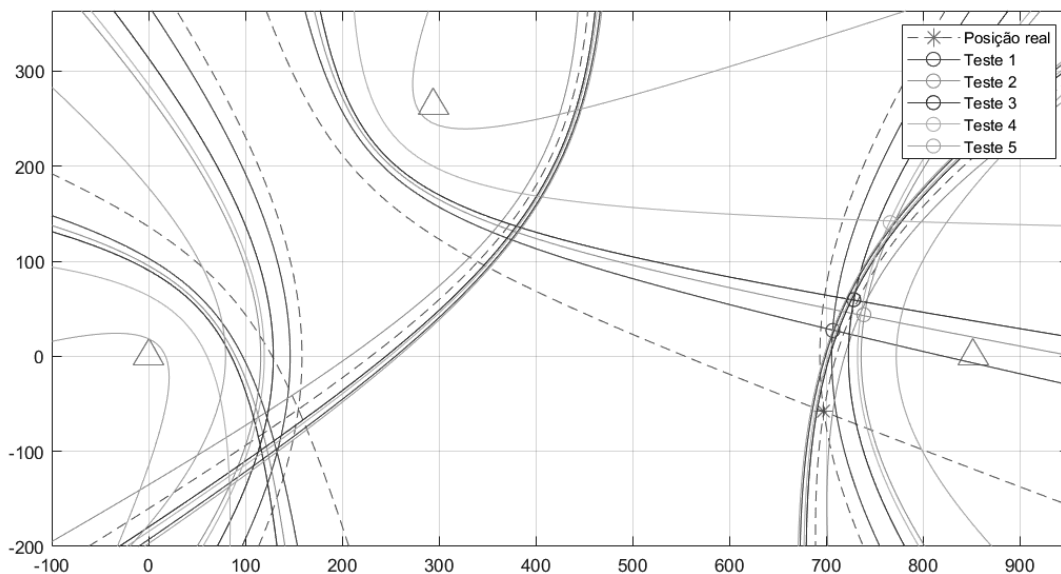
Fonte: Autoria Própria

Figura 37 – Resultados do cálculo de posição por RSSI da rodada 4



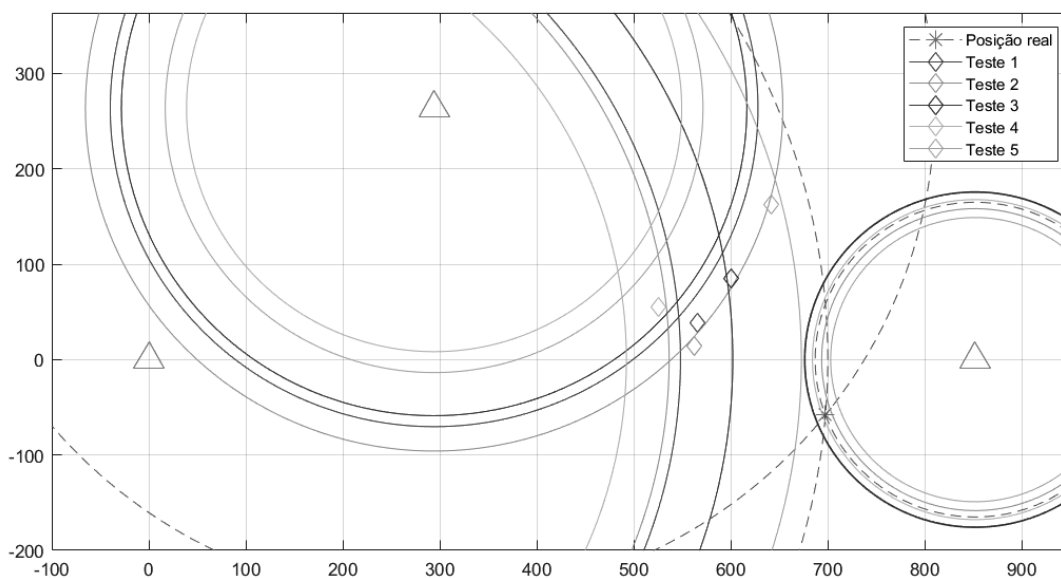
Fonte: Autoria Própria

Figura 38 – Resultados do cálculo de posição por TDOA da rodada 5



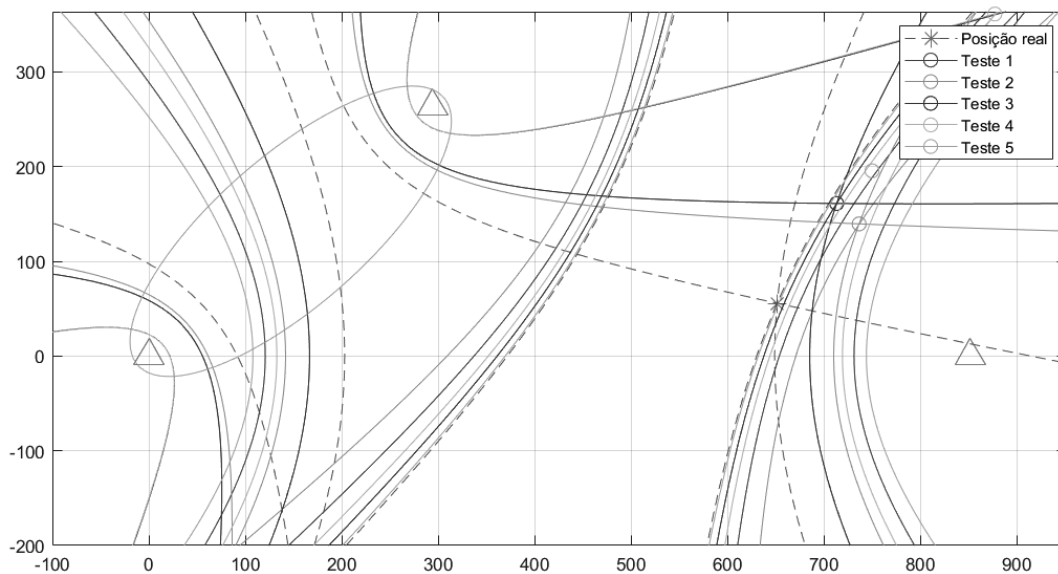
Fonte: Autoria Própria

Figura 39 – Resultados do cálculo de posição por RSSI da rodada 5



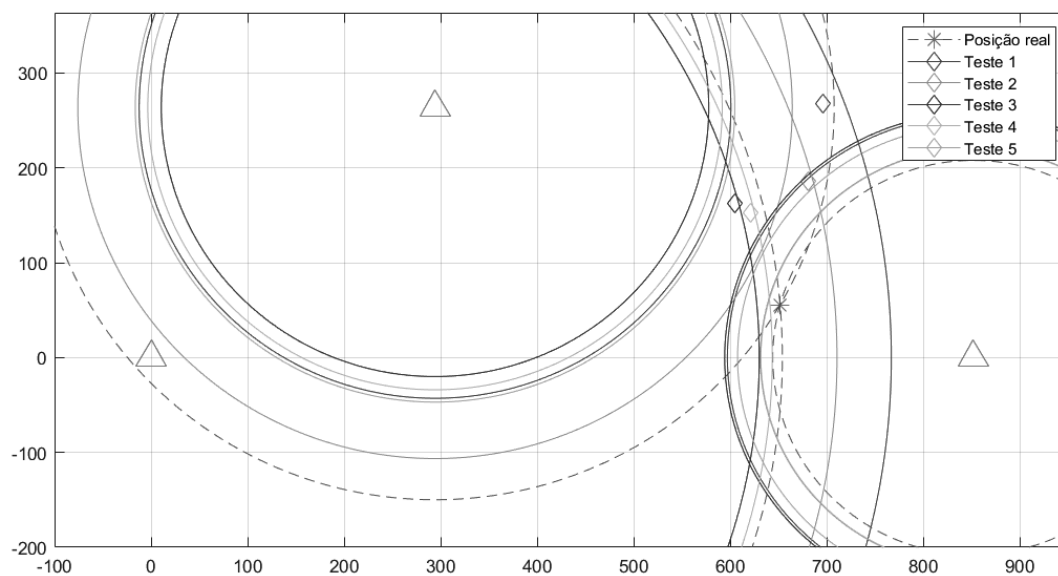
Fonte: Autoria Própria

Figura 40 – Resultados do cálculo de posição por TDOA da rodada 6



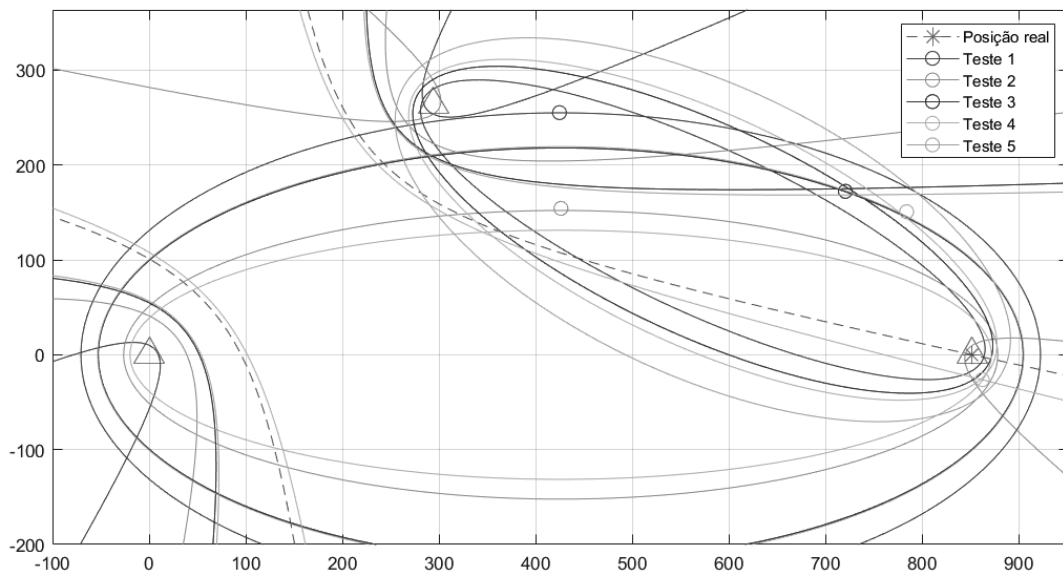
Fonte: Autoria Própria

Figura 41 – Resultados do cálculo de posição por RSSI da rodada 6



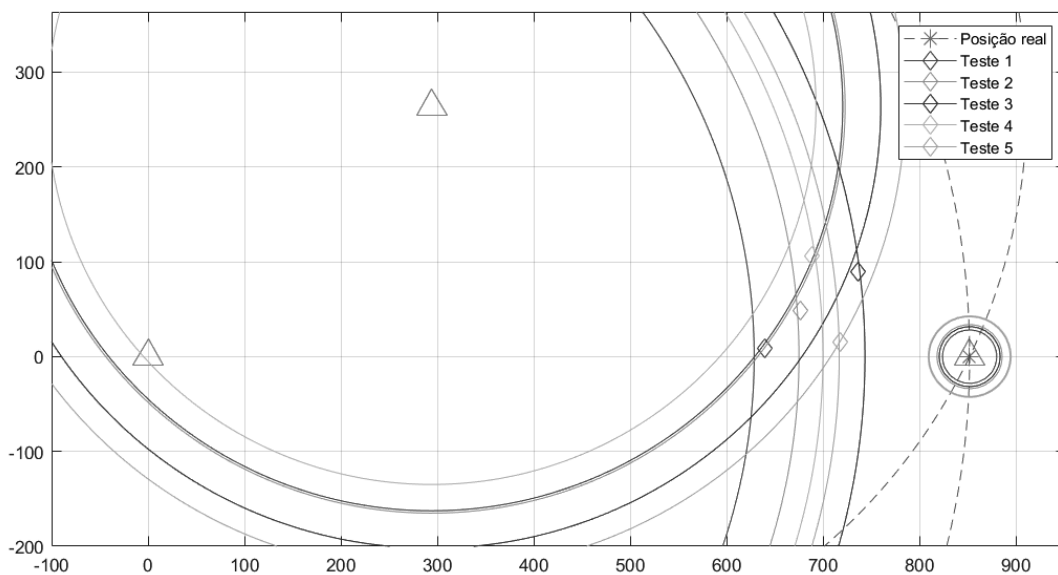
Fonte: Autoria Própria

Figura 42 – Resultados do cálculo de posição por TDOA da rodada 7



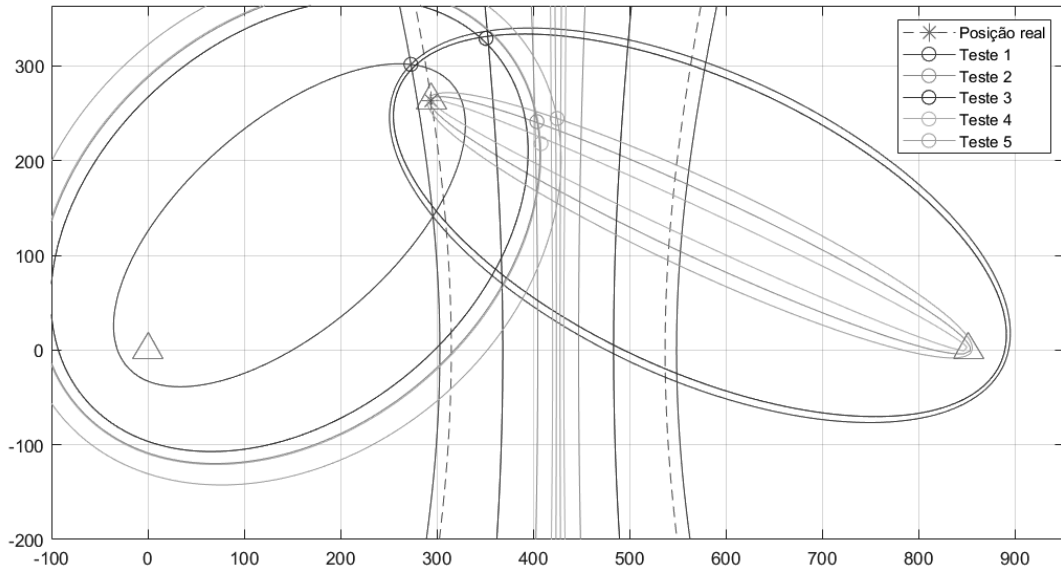
Fonte: Autoria Própria

Figura 43 – Resultados do cálculo de posição por RSSI da rodada 7



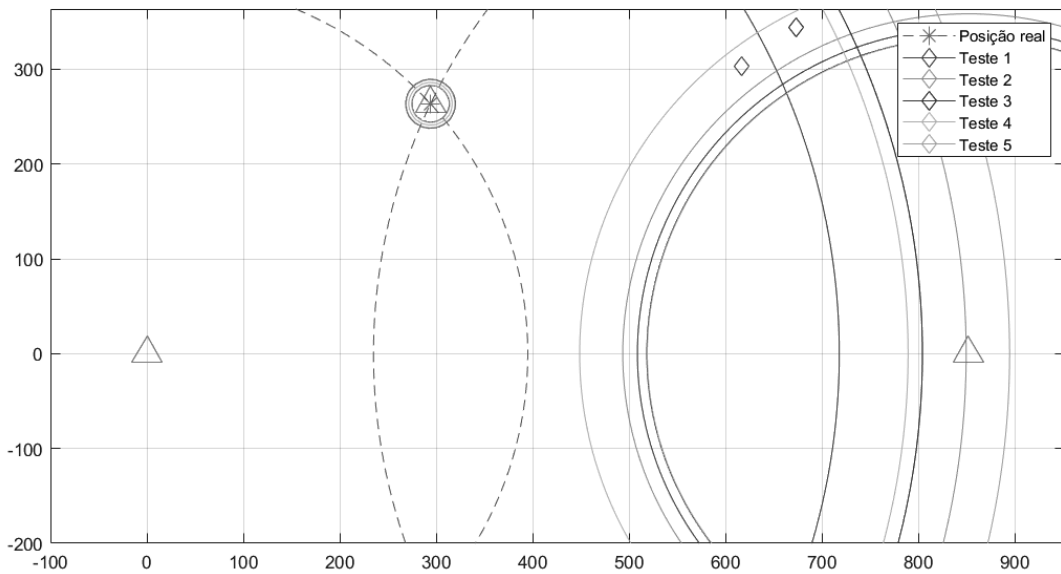
Fonte: Autoria Própria

Figura 44 – Resultados do cálculo de posição por TDOA da rodada 8



Fonte: Autoria Própria

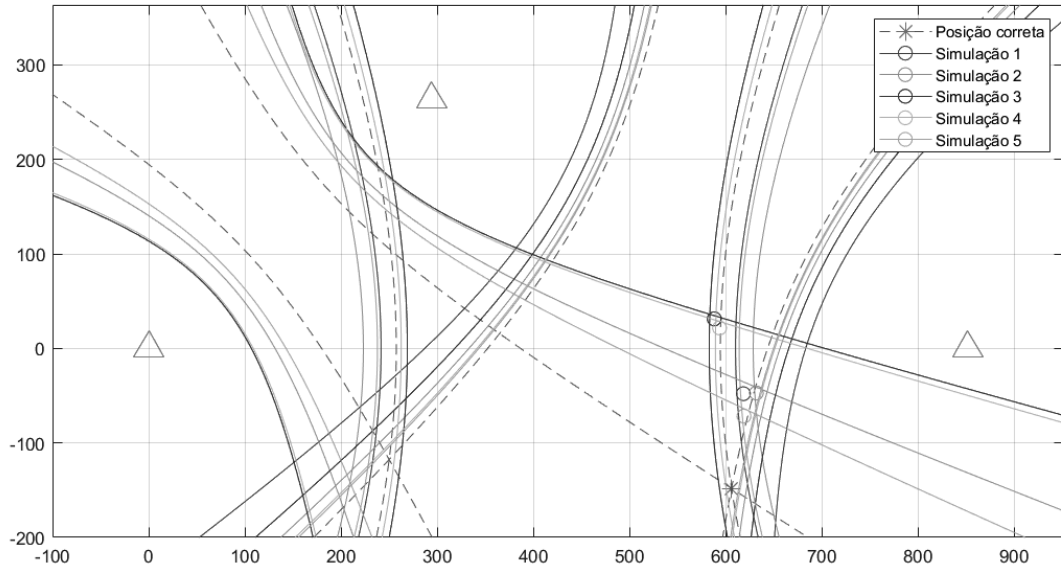
Figura 45 – Resultados do cálculo de posição por RSSI da rodada 8



Fonte: Autoria Própria

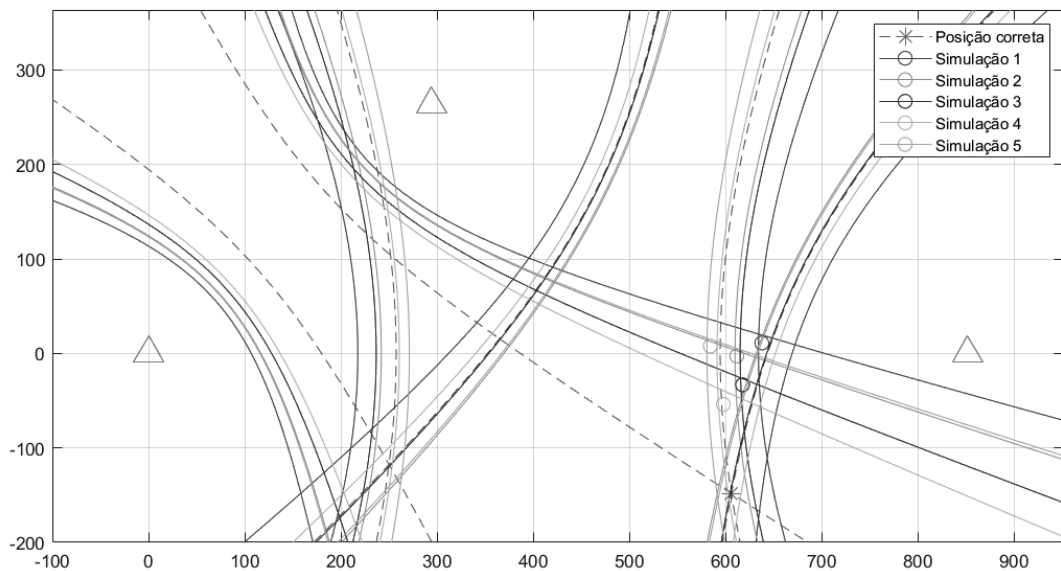
APÊNDICE G – Simulações

Figura 46 – Resultados da simulação da rodada 4 com 5 iterações



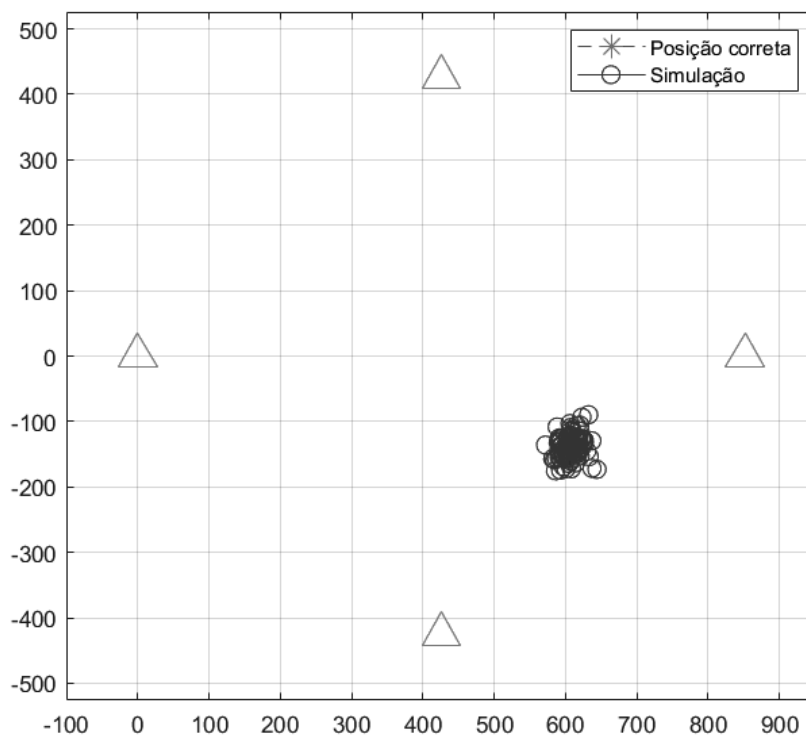
Fonte: Autoria Própria

Figura 47 – Resultados da simulação da rodada 4 com 5 iterações



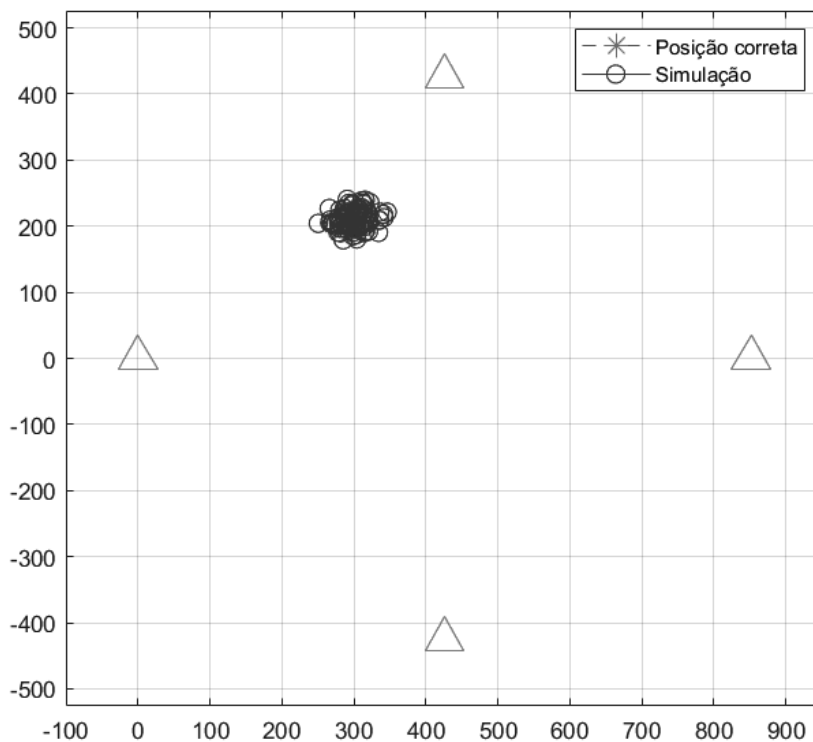
Fonte: Autoria Própria

Figura 48 – Resultados da simulação com bases distribuídas formando um quadrado



Fonte: Autoria Própria

Figura 49 – Resultados da simulação com bases distribuídas formando um quadrado



Fonte: Autoria Própria

Anexos

ANEXO A – Definição de Exatidão

2.13 (3.5)

exatidão de medição

exatidão

measurement accuracy ; *accuracy of measurement* ; *accuracy*

exactitude de mesure ; *exactitude*

exactitud de medida ; *exactitud*

Grau de concordância entre um valor medido e um valor verdadeiro dum mensurando.

NOTA 1 A “exatidão de medição” não é uma **grandeza** e não lhe é atribuído um **valor numérico**. Uma **medição** é dita mais exata quando fornece um **erro de medição** menor.

NOTA 2 O termo “exatidão de medição” não deve ser utilizado no lugar de **veracidade de medição**, assim como o termo “precisão de medição” não deve ser utilizado para expressar exatidão de medição, o qual, contudo, está relacionado a ambos os conceitos.

NOTA 3 A “exatidão de medição” é algumas vezes entendida como o grau de concordância entre valores medidos que são atribuídos ao mensurando.

ANEXO B – Definição de Precisão

2.15

precisão de medição ; fidelidade ou precisão de medição¹⁶

precisão ; fidelidade ou precisão

measurement precision ; precision

fidélité de mesure ; fidélité

precisión de medida ; precisión

Grau de concordância entre indicações ou valores medidos, obtidos por medições repetidas, no mesmo objeto ou em objetos similares, sob condições especificadas.

NOTA 1 A precisão de medição é geralmente expressa numericamente por características como o desvio-padrão, a variância ou o coeficiente de variação, sob condições especificadas de medição.

NOTA 2 As “condições especificadas” podem ser, por exemplo, **condições de repetibilidade**, **condições de precisão intermediária** ou **condições de reprodutibilidade** (ver ISO 5725–1:1994).

NOTA 3 A precisão de medição é utilizada para definir a **repetibilidade de medição**, a **precisão intermediária de medição** e a **reprodutibilidade de medição**.

NOTA 4 O termo “precisão de medição” é algumas vezes utilizado, erroneamente, para designar a **exatidão de medição**.

¹⁶Nota dos tradutores: uso em Portugal “fidelidade ou precisão de medição”, no Brasil “precisão de medição”.