

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS UFSCAR  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA CCET  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA PPGEE

**João Deluca Figueiredo Costa**

**Análise de desempenho de métodos de  
trilateração baseados em RSSI  
utilizando tecnologia LoRa**



**João Deluca Figueiredo Costa**

**Análise de desempenho de métodos de  
trilateração baseados em RSSI  
utilizando tecnologia LoRa**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sistemas Elétricos e Eletrônicos

Orientador: Prof. Dr. João Vitor de Carvalho Fontes

São Carlos - SP

2023





**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

---

**Folha de Aprovação**

---

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato João Deluca Figueiredo Costa, realizada em 29/08/2023.

**Comissão Julgadora:**

Prof. Dr. João Vitor de Carvalho Fontes (UFSCar)

Prof. Dr. Roberto Santos Inoue (UFSCar)

Profa. Dra. Natássya Barlate Floro da Silva (UTFPR)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.



---

# Agradecimentos

---

Agradeço primeiramente ao professor João Vitor Fontes, não somente pela orientação neste trabalho e competência como docente, mas também pela amizade e confiança ao longo de todos esses anos que nos conhecemos.

Agradeço à UFSCar e aos docentes do PPGE pela estrutura de aprendizado e pelos ensinamentos passados durante minha formação neste programa de mestrado.

Agradeço aos professores que fizeram parte da banca de qualificação e de avaliação deste trabalho, professor Roberto Santos Inoue e professora Natassya Silva.

Agradeço à minha companheira Hamana Paulita que me apoiou, incentivou e ajudou, não somente durante este trabalho, mas desde quando a conheci. Também agradeço à minha família que sempre me apoiou através da minha formação pessoal, acadêmica e profissional.

Agradeço à Hyundai Motor Brasil pela compreensão e auxílio na realização deste trabalho, especialmente ao Fabio Bonamin e ao Juliano Santolaia, pela disponibilização das dependências da fábrica para a realização deste trabalho.



---

# Resumo

---

Os avanços da tecnologia sem fio a fizeram um fator constante na maioria dos sistemas eletrônicos, hoje é relativamente fácil encontrar microcontroladores de prateleira que utilizam uma variedade de tecnologias sem fio, que por sua vez são cada vez mais usados em uma gama ampla de aplicações. É neste contexto que a Internet das Coisas (*Internet of Things* ou IoT) está presente e se expande exponencialmente, assim, uma maneira não tão óbvia de se tirar proveito dessa infraestrutura, é utilizar a própria comunicação como meio de posicionamento do sistema em questão, aplicando-se modelos de propagação da onda e métodos de trilateração. Dessa forma, buscando os modelos e métodos que forneçam maior acurácia e precisão, esse trabalho traz uma metodologia para a comparação de 4 diferentes algoritmos de estimativa de posição, baseados na intensidade do sinal de comunicação recebido (*Received Signal Strength Indicator* ou RSSI), relativamente comuns na literatura: *Weighted Centroid Localization* (WCL), *Modified Centroid Localization Algorithm* (MCLA), algoritmo *MinMax* e *Minimum Mean Squared Error* (MMSE). Um quinto algoritmo foi desenvolvido baseado no MMSE, levando em consideração as métricas de comparação, acurácia e precisão, e também foi comparado com os outros 4 métodos. Toda implementação usa uma nova tecnologia que vem sendo amplamente aplicada no ambiente de Internet das Coisas, *Long Range* ou LoRa, na qual foi modelada a equação de propagação da onda utilizando dados empíricos de RSSI. Após a etapa do modelo, os 5 algoritmos de trilateração foram simulados utilizando de uma série de cenários diferentes, variando a quantidade de nós-base conhecidos em cada passo. Por fim, todos os métodos foram testados empiricamente utilizando hardware LoRa de baixo custo em uma campanha experimental ao ar livre e sem obstáculos. Os resultados reais são comparados com os simulados e os desempenhos de cada algoritmo são analisados.

**Palavras-chave:** LoRa, RSSI, Estimativa da Posição, Propagação de Onda, Trilateração.



---

# Abstract

---

Advances in wireless technology improved its accessibility by most electronics, today it is relatively easy to find top shelf microcontrollers that use one or more wireless technologies, and those are often used in a wide range of applications. It is in this context that the Internet of Things (IoT) is present and is expanding exponentially, so, one not-so-obvious way to take advantage of this infrastructure, is to utilize the communication itself for the system localization, applying wave propagation models and trilateration methods. Thus, by searching for models and methods that can generate good accuracy and precision, this project brings a methodology to compare 4 different position estimation algorithms, based on the Received Signal Strength Indicator (RSSI) that are commonly used in the literature: Weighted Centroid Localization (WCL), Modified Centroid Localization Algorithm (MCLA), MinMax algorithm and Minimum Mean Squared Error (MMSE). A fifth algorithm was developed based on the MMSE, considering the two metrics, accuracy and precision, and it was also compared to the other 4 methods. The implementation was done using a new technology that integrates well with Internet of Things, called Long Range (LoRa), so the wave propagation equation was modeled using empiric data of this communication RSSI. After the model step, the 5 trilateration algorithms were simulated through a series of different scenarios, varying the known anchor-node quantity in each step. Finally, all the methods were tested empirically using low cost LoRa hardware in an experimental campaign at an open field with no obstacles. The real results are compared with the simulation and the performance of each algorithm is analyzed.

**Keywords:** LoRa, RSSI, Position Estimation, Wave Propagation, Trilateration.



---

# Lista de ilustrações

---

Figura 1 – Trilateração por 3 bases . . . . .	19
Figura 2 – Exemplo de trilateração por 3 bases com erro . . . . .	20
Figura 3 – Exemplo do posicionamento estimado pelo <i>Weighted Centroid Localization</i> (WCL) . . . . .	25
Figura 4 – Área definida pelo algoritmo <i>MinMax</i> . . . . .	25
Figura 5 – Área definida pela trilateração de 3 pontos usando MMSE . . . . .	28
Figura 6 – Exemplo de Hardware utilizando Arduino e LoRa . . . . .	31
Figura 7 – Placa do microcontrolador ESP32 LoRa com antena 3 dBi (esquerda) e 5 dBi (direita) . . . . .	32
Figura 8 – Área da simulação para 3, 4, 5 e 6 bases. . . . .	34
Figura 9 – Diagrama de blocos do sistema embarcado para o teste da trilateração para $k$ bases fixas. . . . .	36
Figura 10 – Região utilizada na modelagem e nos testes empíricos. . . . .	38
Figura 11 – Gráfico da distância versus valor RSSI para antena de 3 dBi. . . . .	38
Figura 12 – Gráfico da distância versus valor RSSI para antena de 5 dBi. . . . .	39
Figura 13 – Erro e desvio padrão do modelo de 3 dBi com 3 bases. . . . .	41
Figura 14 – Erro e desvio padrão do modelo de 3 dBi com 3 bases para o MMSE. . . . .	42
Figura 15 – Erro e desvio padrão do modelo de 3 dBi com 6 bases. . . . .	42
Figura 16 – Erro e desvio padrão do modelo de 3 dBi com 6 bases para o MMSE. . . . .	43
Figura 17 – Erro e desvio padrão do modelo de 5 dBi com 3 bases. . . . .	44
Figura 18 – Erro e desvio padrão do modelo de 5 dBi com 3 bases para o MMSE. . . . .	45
Figura 19 – Erro e desvio padrão do modelo de 5 dBi com 4 bases. . . . .	46
Figura 20 – Erro e desvio padrão do modelo de 5 dBi com 4 bases para o MMSE. . . . .	46
Figura 21 – Erro e desvio padrão do modelo de 5 dBi com 5 bases. . . . .	47
Figura 22 – Erro e desvio padrão do modelo de 5 dBi com 5 bases para o MMSE. . . . .	47
Figura 23 – Erro e desvio padrão do modelo de 5 dBi com 6 bases. . . . .	48
Figura 24 – Erro e desvio padrão do modelo de 5 dBi com 6 bases para o MMSE. . . . .	49

Figura 25 – Pontos escolhidos para os testes empíricos. . . . .	50
Figura 26 – Resultados empíricos da acurácia dos 5 métodos de trilateração para o ponto I. . . . .	51
Figura 27 – Resultados empíricos da acurácia dos 5 métodos de trilateração para o ponto II. . . . .	52
Figura 28 – Resultados empíricos da acurácia dos 5 métodos de trilateração para o ponto III. . . . .	53
Figura 29 – Resultados empíricos da acurácia dos 5 métodos de trilateração para o ponto IV. . . . .	53
Figura 30 – Resultados empíricos da acurácia dos 5 métodos de trilateração para o ponto V. . . . .	54
Figura 31 – Erro e desvio padrão do modelo de 3 dBi com 4 bases. . . . .	65
Figura 32 – Erro e desvio padrão do modelo de 3 dBi com 4 bases para o MMSE. . . . .	66
Figura 33 – Erro e desvio padrão do modelo de 3 dBi com 5 bases. . . . .	66
Figura 34 – Erro e desvio padrão do modelo de 3 dBi com 5 bases para o MMSE. . . . .	67
Figura 35 – Teste empírico para 3 bases com antena 5 dBi. . . . .	67
Figura 36 – Teste empírico para 4 bases com antena 5 dBi. . . . .	68

---

# Lista de tabelas

---

Tabela 1 – Parâmetros empíricos da propagação da onda para antena de 3 dBi . . .	38
Tabela 2 – Parâmetros empíricos da propagação da onda para antena de 5 dBi . . .	39
Tabela 3 – Média geral do erro, em metros, dos métodos de trilateração, utilizando o modelo de 3 dBi. . . . .	40
Tabela 4 – Desvio padrão geral, em metros, dos métodos de trilateração, utilizando o modelo de 3 dBi. . . . .	40
Tabela 5 – Média geral do erro [m] dos métodos de trilateração, utilizando o modelo de 5 dBi. . . . .	43
Tabela 6 – Desvio padrão geral [m] dos métodos de trilateração, utilizando o modelo de 5 dBi. . . . .	43
Tabela 7 – Coordenadas dos pontos escolhidos para os testes empíricos. . . . .	49
Tabela 8 – Média dos erros e desvio padrão para os métodos de trilateração para os 5 pontos empiricamente testados, utilizando o modelo de 5 dBi. . .	50



---

# Sumário

---

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>17</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos . . . . .</b>	<b>21</b>
<b>1.2</b>	<b>Estrutura do Texto . . . . .</b>	<b>22</b>
<b>2</b>	<b>CONCEITOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA . . . . .</b>	<b>23</b>
<b>2.1</b>	<b>Posicionamento por RSSI . . . . .</b>	<b>23</b>
<b>2.2</b>	<b>Métodos de Trilateração . . . . .</b>	<b>24</b>
2.2.1	<i>Weighted Centroid Localization Algorithm (WCL)</i> . . . . .	26
2.2.2	<i>Modified Centroid Localization Algorithm (MCLA)</i> . . . . .	26
2.2.3	<i>Algoritmo MinMax</i> . . . . .	27
2.2.4	<i>Minimum Mean Squared Error (MMSE)</i> . . . . .	27
2.2.5	<i>MMSE Modificado</i> . . . . .	29
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA . . . . .</b>	<b>31</b>
<b>3.1</b>	<b>Campanha experimental e modelagem . . . . .</b>	<b>32</b>
<b>3.2</b>	<b>Comparação em ambiente simulado . . . . .</b>	<b>33</b>
<b>3.3</b>	<b>Aquisição e comparação dos dados empíricos . . . . .</b>	<b>35</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS . . . . .</b>	<b>37</b>
<b>4.1</b>	<b>Modelo Empírico da Propagação da Onda . . . . .</b>	<b>37</b>
<b>4.2</b>	<b>Simulação da Trilateração . . . . .</b>	<b>40</b>
<b>4.3</b>	<b>Campanha Experimental da Trilateração . . . . .</b>	<b>49</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES . . . . .</b>	<b>55</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>59</b>

**ANEXOS**

**63**

**ANEXO A – FIGURAS COMPLEMENTARES DAS SIMULAÇÕES  
E DOS TESTES EMPÍRICOS. . . . . 65**

---

# Capítulo 1

## Introdução

---

A localização espacial é um tópico muito discutido atualmente e amplamente implementado para as mais diversas aplicações, principalmente na navegação e no rastreamento, tanto de pessoas como de objetos (Zhang et al., 2010; LAM; CHEUNG; LEE, 2019). Uma tecnologia já muito difundida é o GPS, porém este mostra algumas limitações, principalmente em ambientes fechados (CHAN; SOHN, 2012). Assim, outras tecnologias sem fio podem ser utilizadas para realizar a estimativa de posição dos sistemas, como WiFi, Bluetooth, UWB (*Ultra-Wide Band*) e ZigBee (LIU et al., 2007). Dentre as tecnologias mais atuais, uma tecnologia promissora é a *Long Range*, ou LoRa, que possui custo acessível, grande área de cobertura e eficiência energética (HERRERA-TAPIA et al., 2017).

A tecnologia LoRa está entre as mais promissoras atualmente por atingir 10 km de distância e possuir grande eficiência energética (SANCHEZ-IBORRA et al., 2018). A comunicação LoRa apresenta taxa de entrega de mensagens significativamente alta quando comparada ao WiFi, no intervalo de cerca de 40% a 50% quando aplicada em comunicações entre veículos em ambiente urbano (HERRERA-TAPIA et al., 2017). Isso ocorre porque uma faixa de comunicação mais ampla permite não apenas mais contatos, mas também esses contatos terão durações maiores.

Outra característica pertinente desta tecnologia é a facilidade da obtenção da intensidade do sinal, assim modelos em RSSI podem ser desenvolvidos de maneira direta e simples, sem a necessidades de hardware complexo (GEZICI, 2008).

Existem inúmeras aplicações para LoRa que demonstram seu fácil acesso, como exemplo se pode citar Sanchez-Iborra et al. (2018) que utilizou a placa *SmartEverything* da marca *Arrow* com microcontrolador compatível com o software do Arduino e, a partir dela, cria uma rede de comunicação de baixo custo e baixo consumo energético. Já o trabalho de Lam, Cheung e Lee (2019) utiliza uma placa Arduino conectada a um módulo

LoRa para obter os valores de RSSI e fazer a estimativa de posição.

Após a definição do tipo de comunicação a ser utilizado, é necessário transformar o próprio sinal de comunicação em um dado de posição entre emissor e receptor. Diversos estudos já definiram métodos de estimativa de posição se baseando nas quatro técnicas mais comuns, a *Time Difference of Arrival* (TDOA), *Angle of Arrival* (AOA), *Time of Arrival* (TOA) e a *Received Signal Strength Indicator* (RSSI) (SHI, 2012; MAZUELAS et al., 2009; Zhang et al., 2010; GEZICI, 2008). Os métodos baseados em RSSI são muito utilizados já que essa é uma informação obtida diretamente no recebimento do pacote sem a necessidade de sincronização de tempo (BARSOCCHI et al., 2009).

Utilizando RSSI também se torna possível realizar a localização em cenários onde outros meios de posicionamento falham, como ocorre dentro de ambientes fechados, já que a maioria dos sistemas eletrônicos já possuem essa infraestrutura sem fio. Ao dirigir um carro conectado à rede de telefonia, é possível realizar o posicionamento e navegação utilizando o mapeamento do sinal no percurso de um túnel, situação na qual o GPS não está disponível (SHIN et al., 2023).

A localização e navegação em cidades altamente urbanizadas também podem se beneficiar com métodos que integrem o posicionamento por comunicação. Estudos mostram que, em cidades com densa infraestrutura sem fio, um dispositivo ou veículo conectado a rede pode fazer seu próprio posicionamento utilizando a intensidade dos sinais recebidos, e LoRa especificamente mostra bons resultados nesses tipos de aplicação (ANUGRAH; RAKHMATSYAH; WARDANA, 2020; LAM; CHEUNG; LEE, 2019; SANCHEZ-IBORRA et al., 2018).

Outro método alternativo é o mapeamento extenso da área na qual se deseja localizar um dispositivo, feito anteriormente à etapa de posicionamento, correlacionando as coordenadas de vários pontos com um valor de intensidade do sinal, formando assim uma malha de posições e respectivos valores de RSSI medidos empiricamente. Esse tipo de aplicação é chamada de *fingerprinting*, onde o mapa de RSSI é utilizado para posicionar um ponto desconhecido de maneira estatística (BARSOCCHI et al., 2009; CHAN; SOHN, 2012; SUBHAN; HASBULLAH; ASHRAF, 2013). Como esse tipo de método requer um mapeamento prévio, a fase inicial é custosa e demorada, assim alguns métodos híbridos que utilizam menos pontos conhecidos também foram desenvolvidos e testados (RUSLI et al., 2016). Os algoritmos de trilateração, no entanto, podem ser aplicados diretamente, utilizando-se de apenas poucos pontos conhecidos e de um modelo de propagação da onda, assim este trabalho apresenta a aplicação de tais algoritmos.

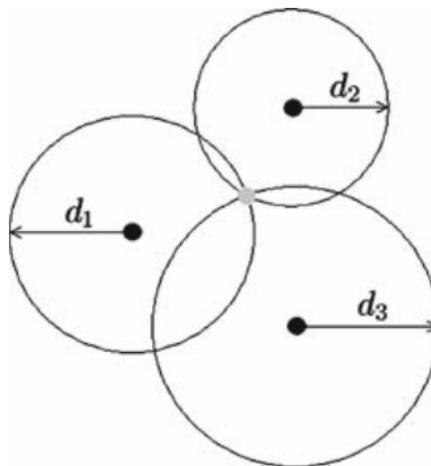
Os métodos baseados em comunicação e RSSI também podem ser integrados a sistemas de posicionamento com certa facilidade. Aplicações de filtros para fusão sensorial, tais como Filtro de Kalman (KF) melhoram a acurácia de tais sistemas em certas situações (ANUGRAH; RAKHMATSYAH; WARDANA, 2020), mas como os dados de posição por comunicação apresentam não-linearidades, a utilização do Filtro de Kalman Exten-

dido (EKF) é mais comum (SUBHAN; HASBULLAH; ASHRAF, 2013; GEZICI, 2008; GERWEN et al., 2022). Existem aplicações bem sucedidas de posicionamento por RSSI unindo não somente a sensores como IMU e Enconders (ZHOU et al., 2023), mas também a sensores mais sofisticados como sonares, câmera e lasers (GERWEN et al., 2022), com resultados positivos, o que demonstra a alta facilidade e alto custo-benefício do desenvolvimento da localização por comunicação.

A partir do RSSI, é possível estimar a distância com base em modelos de atenuação. Esta técnica é comumente aplicada devido ao seu baixo custo operacional, entretanto as medidas de RSSI podem sofrer interferências do ambiente (BARSOCCHI et al., 2009). Devido às interferências na intensidade do sinal, se faz necessário a modelagem matemática dos sinais em função da distância, por meio de características do ambiente físico (ZHU; FENG, 2013).

A partir de um modelo de dispersão da onda, é possível determinar as distâncias entre um nó com posição desconhecida e cada base fixa, e, com uma quantidade de 3 ou mais bases, se torna possível a aplicação de algoritmos e métodos de trilateração para calcular a posição do nó no plano (NAVIDI; MURPHY; HEREMAN, 1998). A Figura 1 ilustra as características geométricas para a trilateração de um nó desconhecido no plano, através das distâncias entre três bases fixas.

Figura 1 – Trilateração por 3 bases



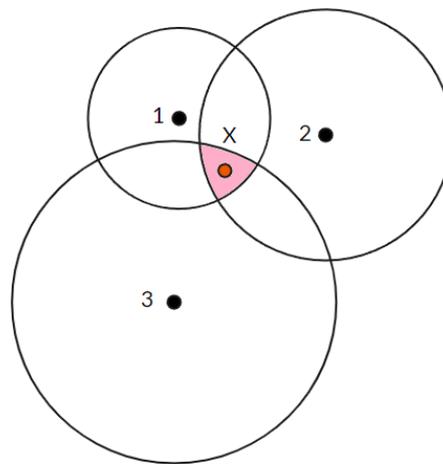
Fonte: (GEZICI, 2008)

Como a estimativa da distância entre base e nó se baseia no uso do modelo de propagação da onda, variações no meio de propagação causam interferências, que, por sua vez, geram erros no cálculo da distância. Para mitigar esse problema, métodos como o *Weighted Centroid Localization* (WCL) (ILERI; AKAR, 2014) e o *Modified Centroid Localization Algorithm* (MCLA) (ZHILIANG; JINGMIN; JIUHE, 2011) utilizam a intensidade do sinal e a distância calculada, respectivamente, para aplicar pesos às distâncias calculadas para cada base, mitigando erros no posicionamento final. Ambos os métodos

são baseados no método *Centroid Localization Algorithm* (CLA) e ambos demonstram melhoras significativas na precisão do posicionamento (SHI et al., 2020; WANG; ZHENG, 2014).

Outro método similar é o *Minimum Mean Square Error* (MMSE), que inclui a média dos erros na distância para cada base (Zhang et al., 2010), em contrapartida, o algoritmo *MinMax* visa a simplificação das operações matemáticas no cálculo da posição (SUBHAN; HASBULLAH; ASHRAF, 2013), o que pode gerar erros maiores. O cálculo da distância com os erros presentes representa geometricamente uma área, e não um ponto, que contém a posição procurada (Figura 2) (ILERI; AKAR, 2014).

Figura 2 – Exemplo de trilateração por 3 bases com erro



Fonte: Autoria própria

Na literatura, é possível encontrar muitos artigos que utilizam diferentes tipos de comunicação para o cálculo do posicionamento, tais como Bluetooth, UWB, Zigbee ou WiFi (TIEMANN; RAMSEY; WIETFELD, 2018; YUT; FEI; GENG, 2013; STOJKOSKA et al., 2017), mas a tecnologia LoRa é relativamente nova e, conseqüentemente, existem poucos trabalhos que a utilizam para posicionamento. Os métodos de trilateração são amplamente utilizados neste contexto (ZHILIANG; JINGMIN; JIUHE, 2011; Zhang et al., 2010; ZHILIANG; JINGMIN; JIUHE, 2011; SUBHAN; HASBULLAH; ASHRAF, 2013), mas não é reportada a comparação entre os diferentes algoritmos de estimativa de localização.

A trilateração deve ser aplicada para obtenção da estimativa de posição de um nó com posição desconhecida. Como citado acima, os métodos mais comuns que já foram utilizados são o *Centroid Localization Algorithm* (CLA) e o *Weighted Centroid Localization* (WCL) (WANG; ZHENG, 2014). Já Shi et al. (2020) propõe uma modificação no CLA, através do *Modified Weighted Centroid Localization Algorithm*, ou MCLA. O artigo de Zhang et al. (2010) aplica o *Minimum Mean Squared Error* (MMSE) na trilateração e no trabalho de Subhan, Hasbullah e Ashraf (2013) também é utilizado *MinMax*. Apesar da

literatura apresentar vários algoritmos de trilateração para estimativa de posição, nota-se que o estado da arte ainda carece de uma comparação mais extensa destes métodos de trilateração.

## 1.1 Objetivos

O objetivo geral desse trabalho é a comparação de métodos de trilateração baseados em RSSI utilizando a tecnologia LoRa. Para isso, é necessário o desenvolvimento de um sistema embarcado que utiliza da tecnologia LoRa e RSSI para estimar a posição de um nó receptor no plano, através do modelo logarítmico de propagação de onda e de quatro métodos de trilateração: WCL, MCLA, *MinMax* e MMSE. Os métodos serão simulados e terão suas precisão e acurácia comparadas entre si. Por fim, uma campanha experimental será realizada para obtenção de dados empíricos e todos os métodos serão comparados, tanto à simulação quanto entre si.

Aplicando diferentes métodos de medidas de posição baseados na comunicação LoRa deseja-se determinar se essa tecnologia pode ser aplicada em conjunto através de métodos já bem difundidos. Além disso, a partir das comparações de cada métodos, um algoritmo melhorado é proposto utilizando a formulação do MMSE. Os resultados procuram determinar os benefícios para a localização de cada método em situações variadas.

Para alcançar o objetivo geral deste trabalho, as soluções de localização baseada nos dados de comunicação deverão ser definidas e aplicadas, a fim de confrontar os dados obtidos com os dados reais. Assim, estes objetivos específicos podem ser definidos e organizados da seguinte forma:

- ❑ Desenvolver testes empíricos para definição dos parâmetros do modelo de propagação da onda, relacionando a intensidade do sinal (RSSI) e a distância;
- ❑ Comparar os métodos de trilateração através de simulações, utilizando métricas de precisão e acurácia;
- ❑ Desenvolver um método de trilateração melhorado utilizando a formulação do método MMSE como base, tendo em vista resultados das simulações, e depois compará-lo aos demais através das mesmas métricas;
- ❑ Desenvolver testes empíricos dos cinco métodos de trilateração, reproduzindo no ambiente de teste alguns dos cenários simulados.

As principais contribuições deste trabalho serão a comparação em simulação e experimentalmente dos métodos de trilateração mais comuns na literatura, utilizando a tecnologia LoRa, que é relativamente recente no cenário de Internet das Coisas, e o desenvolvimento de um novo método de trilateração melhorado. Estas contribuições favorecerão

tanto a indústria, que se beneficiará com um novo método de posicionamento de baixo custo e de alta integração aos sistemas correntes, quanto a comunidade científica, que terá uma comparação extensa, simulada e empírica, dos métodos de trilateração atuais.

## 1.2 Estrutura do Texto

Esta monografia está organizada na estrutura seguinte:

- ❑ O capítulo 2 apresenta os conceitos gerais da utilização de RSSI em tecnologias de comunicação, assim como dos métodos de trilateração relacionados. Aqui também será apresentado o método proposto;
- ❑ O capítulo 3 define as etapas do plano de desenvolvimento da pesquisa, desenvolvendo os detalhes de cada método utilizado e as etapas da metodologia deste trabalho;
- ❑ O capítulo 4 mostra os resultados desta pesquisa. A modelagem empírica do modelo de propagação de onda e os testes simulados dos métodos de trilateração são explicados. Por fim, são apresentados os resultados empíricos, que então são comparados com a simulação.
- ❑ O capítulo 5 mostra a conclusão da pesquisa com uma análise geral dos resultados obtidos nos testes, assim como as contribuições alcançadas. As limitações deste trabalho são pontuadas e também são feitas recomendações para continuidade da pesquisa em trabalhos futuros.

---

## Capítulo 2

# Conceitos e Revisão Bibliográfica

---

As técnicas de RSSI são técnicas baseadas nas medidas de intensidade dos sinais de comunicação. A partir destas medidas, é possível estimar a distância com base em modelos de atenuação. Esta técnica é comumente aplicada devido ao seu baixo custo operacional (ILERI; AKAR, 2014), entretanto as medidas de RSSI podem sofrer grandes interferências do ambiente (BARSOCCHI et al., 2009). Devido às interferências na intensidade do sinal, se faz necessário a modelagem matemática dos sinais em função da distância, adicionando fatores oriundos das características do ambiente físico.

Após a aquisição de no mínimo três distâncias de três bases diferentes com coordenadas conhecidas, pode-se aplicar modelos de trilateração, a fim de calcular a posição real de um nó de posição desconhecida. Variações na posição das bases e também na quantidade delas, geram variações significativas nos resultados do posicionamento (ILERI; AKAR, 2014), portanto essas características da trilateração também serão consideradas e estudadas.

Neste capítulo são apresentados os conceitos e formulações para obtenção dos valores de RSSI e para o cálculo das distâncias entre emissor e receptor. Cada algoritmo de trilateração, por sua vez, utiliza destes valores de RSSI e distância a fim de calcular a posição do nó desconhecido dentro da área de testes, suas fórmulas também são apresentadas aqui.

### 2.1 Posicionamento por RSSI

Como demonstrado na literatura, o cálculo do decaimento da potência do sinal em espaço livre é dado pela Equação (1) abaixo, sendo  $P_{RX}$  a potência restante de uma onda no receptor e  $P_T$  a potência da onda no transmissor. A relação descreve um decaimento

logarítmico simples dado em decibel (dB) (ILERI; AKAR, 2014; BARSOCCHI et al., 2009; ZHU; FENG, 2013).

$$L = 10 \times \log(P_{TX}/P_{RX}) \quad (1)$$

$P_{TX}$  é a potência de emissão do sinal pelo módulo emissor e  $L$  é dado em decibel (dB).

Analogamente, o valor de RSSI pode ser calculado no receptor através da equação (2), sendo  $P_{RX}$  a potência restante de uma onda no receptor dada em Watts [W] e  $P_{Ref}$  um valor arbitrário de potência do sinal, usado como referência, dado em [mW]. O valor RSSI então pode ser obtido com uma leitura diretamente no módulo receptor.

$$RSSI = 10 \times \log(P_{RX}/P_{Ref}) \quad (2)$$

Baseado no modelo de dispersão de espaço livre, outros modelos mais precisos podem ser calculados para se estimar a distância. O modelo de longas distâncias realiza um decaimento logarítmico em torno de um ponto  $d_0$  de referência, adicionando perdas inerentes do ambiente, conforme:

$$L(d) = L(d_0) + 10 \times \eta \times \log(d/d_0) \quad (3)$$

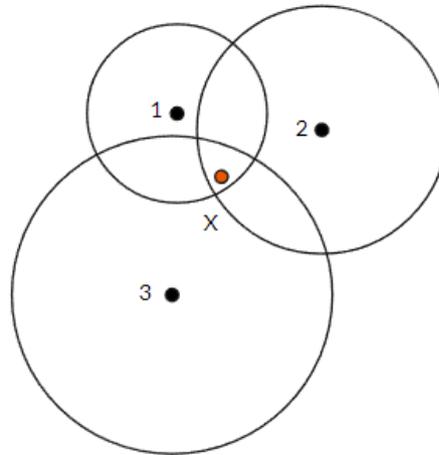
$L(d_0)$  é a dispersão em um ponto de referência,  $d$  é a distância que o módulo receptor está do módulo emissor,  $L(d)$  é a dispersão na distância  $d$  calculado pelo receptor através da Equação (2) e  $\eta$  é o expoente de dispersão do ambiente. Com o modelo definido pela Equação (3), é possível coletar dados empíricos de RSSI e da distância e, através de uma regressão logarítmica, calcular o  $\eta$  específico para um dado ambiente.

Conforme mencionado anteriormente, para a obtenção das coordenadas do nó com posição desconhecida, é necessário o conhecimento prévio da posição das bases, e então aplica-se algoritmos de trilateração que utilizarão de 3 ou mais valores de distância obtidos pelo modelo de propagação.

## 2.2 Métodos de Trilateração

Muitos métodos de trilateração podem ser encontrados na literatura, entretanto poucas comparações são feitas sob as mesmas condições. Segundo Wang e Zheng (2014), o método *Weighted Centroid Localization Algorithm* (WCL) apresenta resultados melhores que o método *Centroid Localization Algorithm* (CLA), pois o primeiro considera a posição dos nós para gerar uma média ponderada. Os fatores desta média levam em consideração o inverso do RSSI, assim priorizando bases próximas do nó com posição desconhecida, uma representação geométrica é dada pela Figura 3, na qual nota-se que o ponto desconhecido X se encontra mais próximo a base 1, fora do centro geométrico da área de intersecção dos círculos.

Figura 3 – Exemplo do posicionamento estimado pelo *Weighted Centroid Localization* (WCL)

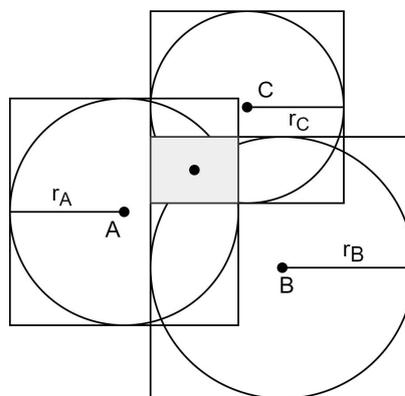


Fonte: Autoria própria

O método *Modified Weighted Centroid Localization Algorithm* (MCLA) é aplicado a partir de fatores diferentes de multiplicação com base na distância entre o nó fixo e o nó desconhecido. Segundo os resultados apresentados por Shi et al. (2020), a aplicação dessa adaptação melhorou a acurácia da simulação em cerca de 33% em comparação com CLA.

O algoritmo *MinMax* utiliza a distância calculada entre uma base fixa e o nó móvel para definir um quadrado dentro do qual é possível encontrar o nó móvel. Esta área alvo é resultante da intersecção de todos os quadrados criados a partir das distâncias calculadas e das posições conhecidas de cada base (SUBHAN; HASBULLAH; ASHRAF, 2013). A Figura 4 ilustra a geometria que emerge dos cálculos deste método.

Figura 4 – Área definida pelo algoritmo *MinMax*



Fonte: (OLIVEIRA; COSTA; FONTES, 2021)

O método Mínimo Erro Quadrático Médio ou *Minimum Mean Squared Error* (MMSE) não possui uma comparação de resultados clara, porém ele se mostrou eficiente para

problemas relacionados à sincronização dos nós prevendo alguns parâmetros incertos ao longo do tempo (Zhang et al., 2010).

Nas secções a seguir, cada método de trilateração é apresentado, assim como as fórmulas que resultam no posicionamento do nó desconhecido dentro da área de testes.

### 2.2.1 *Weighted Centroid Localization Algorithm (WCL)*

A aplicação de pesos aos valores de RSSI é praticamente similar a média ponderada deste valores, considerando pesos maiores para valores menores de RSSI. Utilizando a formulação desenvolvida por Wang e Zheng (2014), Shi et al. (2020) e Fan et al. (2013), pode-se desenvolver uma configuração com pesos diferentes para cada valor de RSSI, buscando ponderar a influência dos sinais em relação a sua intensidade. Um expoente  $\alpha$  pode ser introduzido como um fator de ajuste, com valor maior que 1 e aplicado igualmente sobre todos os valores de intensidade, aumentando ainda mais a influência dos sinais mais fortes.

Dessa forma, considerando  $k$  nós fixos de coordenadas  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$ , ...,  $(x_k, y_k)$ , e  $RSSI_1, RSSI_2, \dots, RSSI_k$  seus respectivos valores de RSSI em relação ao nó desconhecido, e sendo  $\alpha$  o fator de ajuste dinâmico, os cálculos para encontrar a posição do nó móvel estão representados pelas Equações (4) e (5):

$$x = \frac{\frac{x_1}{RSSI_1^\alpha} + \frac{x_2}{RSSI_2^\alpha} + \dots + \frac{x_k}{RSSI_k^\alpha}}{\frac{1}{RSSI_1^\alpha} + \frac{1}{RSSI_2^\alpha} + \dots + \frac{1}{RSSI_k^\alpha}} \quad (4)$$

$$y = \frac{\frac{y_1}{RSSI_1^\alpha} + \frac{y_2}{RSSI_2^\alpha} + \dots + \frac{y_k}{RSSI_k^\alpha}}{\frac{1}{RSSI_1^\alpha} + \frac{1}{RSSI_2^\alpha} + \dots + \frac{1}{RSSI_k^\alpha}} \quad (5)$$

### 2.2.2 *Modified Centroid Localization Algorithm (MCLA)*

O *Modified Centroid Localization Algorithm* (MCLA) é similar ao WCL, porém utiliza das distâncias estimadas como os pesos do ponderamento, ao invés dos valores diretos de RSSI (FAN et al., 2013). Igualmente ao WCL, a aplicação de expoentes nos pesos, auxilia na precisão e acurácia do modelo (SHI et al., 2020).

Logo, o modelo matemático do MCLA é apresentado pelas Equações (6) e (7), onde  $\beta$  representa o fator de ajuste dinâmico, o qual é dependente das condições do ambiente do teste, e considerando  $k$  nós fixos de coordenadas  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$ , ...,  $(x_k, y_k)$  com distâncias ao nó desconhecido dadas por  $d_1, d_2, \dots, d_k$ , respectivamente.

$$x = \frac{\frac{x_1}{d_1^\beta} + \frac{x_2}{d_2^\beta} + \dots + \frac{x_k}{d_k^\beta}}{\frac{1}{d_1^\beta} + \frac{1}{d_2^\beta} + \dots + \frac{1}{d_k^\beta}} \quad (6)$$

$$y = \frac{\frac{y_1}{d_1^\beta} + \frac{y_2}{d_2^\beta} + \dots + \frac{y_k}{d_k^\beta}}{\frac{1}{d_1^\beta} + \frac{1}{d_2^\beta} + \dots + \frac{1}{d_k^\beta}} \quad (7)$$

### 2.2.3 Algoritmo *MinMax*

Observando novamente a Figura 4, este método consiste em utilizar das intersecções dos possíveis intervalos que o ponto pode se encontrar, sua interpretação geométrica é representada por um quadrado para cada base com sua posição fixa no centro. A sobreposição dos quadrados de cada base formam um retângulo central, e seu centro é dado como a posição do nó desconhecido.

Segundo Subhan, Hasbullah e Ashraf (2013), sendo  $(x_i, y_i)$  pontos fixos conhecidos,  $(x, y)$  a posição do nó desconhecido e  $d_i$  a distância entre o nó e os pontos fixos, os vértices que representam a área formada pela intersecção dos quadrados são representados  $(x_{min}, y_{min})$ ,  $(x_{min}, y_{max})$ ,  $(x_{max}, y_{min})$  e  $(x_{max}, y_{max})$ . Os valores de  $x_{min}$ ,  $x_{max}$ ,  $y_{min}$  e  $y_{max}$  são representados por:

$$\begin{cases} x_{min} = \max(x_i - d_i) \\ x_{max} = \min(x_i + d_i) \\ y_{min} = \max(y_i - d_i) \\ y_{max} = \min(y_i + d_i) \end{cases} \quad (8)$$

Assim, para a definição da posição  $x$  e  $y$  do nó desconhecido, é preciso fazer uma média simples dos valores máximos e mínimos obtidos, conforme (9) e (10).

$$x = (x_{max} + x_{min})/2 \quad (9)$$

$$y = (y_{max} + y_{min})/2 \quad (10)$$

### 2.2.4 *Minimum Mean Squared Error* (MMSE)

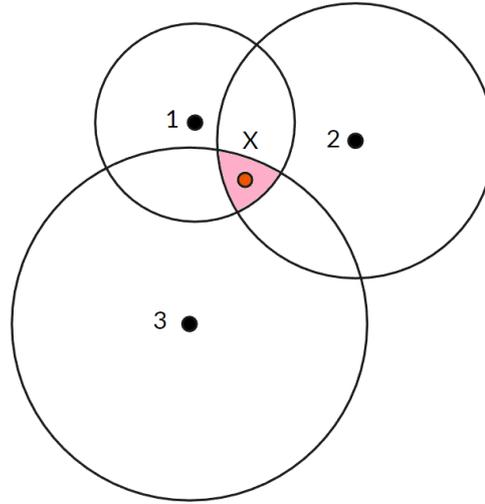
O MMSE é um método para se calcular o ponto de maior probabilidade da real posição do nó (Zhang et al., 2010), representado pela Figura 5.

Para seu cálculo, considerando  $(x_i, y_i)$  pontos fixos e com posições conhecidas e  $N(x, y)$  o nó que é desejado descobrir a posição, a distância  $d_i$  entre o nó e os pontos fixos pode ser determinada com base em Equação (11). Como  $i = 1, 2, 3, \dots, k$ , o sistema de Equações (12) é gerado.

$$d_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (11)$$

$$\begin{cases} d_1 = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} \\ d_2 = \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2} \\ \dots \\ d_k = \sqrt{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2} \end{cases} \quad (12)$$

Figura 5 – Área definida pela trilateração de 3 pontos usando MMSE



Fonte: Autoria própria

Então, o sistema pode ser reescrito subtraindo-se a distância da última base  $k$  de todas as outras distâncias  $i = 1, 2, \dots, k - 1$  assim formando um novo sistema de equações em (13)

$$\begin{cases} d_i - d_k = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} + \\ -\sqrt{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2} \end{cases} \quad (13)$$

Para o sistema descrito pela Equação (13), a solução pode ser escrita vetorialmente como nas Equações (14) e (15) (Zhang et al., 2010; ZHU; FENG, 2013; SUBHAN; HAS-BULLAH; ASHRAF, 2013).

$$A\vec{x} = \vec{b} \quad (14)$$

$$\vec{x} = A^{-1}\vec{b} \quad (15)$$

Sendo:

$$\vec{x} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$A = \begin{bmatrix} 2 \times (x_i - x_k) & 2 \times (y_i - y_k) \\ \dots & \dots \\ 2 \times (x_{n-1} - x_k) & 2 \times (y_{k-1} - y_k) \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\vec{b} = \begin{bmatrix} x_i^2 - x_k^2 + y_i^2 - y_k^2 + d_k^2 - d_i^2 \\ \dots \\ x_{k-1}^2 - x_k^2 + y_{k-1}^2 - y_k^2 + d_k^2 - d_{k-1}^2 \end{bmatrix} \quad (18)$$

### 2.2.5 MMSE Modificado

A Equação (12) pode ser reorganizada de maneira que o sistema resultante descrito pela Equação (13) seja diferente, alterando a ordem das bases conhecidas a fim de subtrair a equação da menor distância às outras distâncias, ou seja, a equação da base que possua a menor distância estimada ao ponto desconhecido será subtraída às demais equações. Como exemplo, observando a Figura 5 onde existem 3 bases, a base escolhida para ter sua equação subtraída às demais é a base 1, e o sistema de equações se torna como na Equação (19).

$$\begin{cases} d_2 - d_1 = \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2} + \\ \quad - \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} \\ d_3 - d_1 = \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2} + \\ \quad - \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} \end{cases} \quad (19)$$

Esta modificação altera significativamente a matriz  $A$  e o vetor  $b$  na Equação (14), principalmente quando a quantidade de bases fixas é maior que 3, portanto o resultado da inversão de  $A$  para a resolução da equação em função de  $(x, y)$  também é alterado.

Desta maneira, este trabalho pretende demonstrar através das simulações e testes empíricos, que esta modificação ao método MMSE traz benefícios significativos à acurácia e precisão da localização do nó desconhecido.



---

## Capítulo 3

# Metodologia

---

O foco deste trabalho é realizar a comparação de diferentes técnicas de trilateração através de vários cenários diferentes, assim como desenvolver um novo método melhorado. Essa comparação inicia-se por uma extensa simulação variando a posição e a quantidade de bases significativamente. Posteriormente, resultados empíricos são tomados utilizando hardware de baixo custo e de fácil aplicação. A Figura 6 mostra um exemplo de hardware LoRa utilizado.

Figura 6 – Exemplo de Hardware utilizando Arduino e LoRa



Fonte: (LAM; CHEUNG; LEE, 2019)

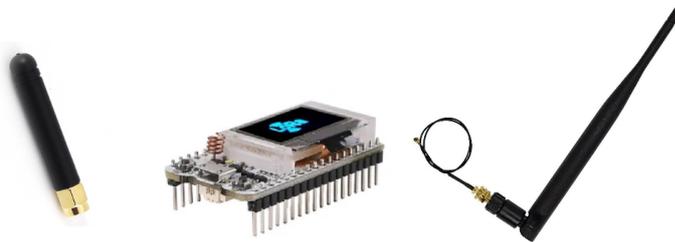
Neste capítulo é apresentado o caminho metodológico tomado para a execução e possível comparação dos métodos de trilateração, utilizando o modelo de longas distâncias

para a propagação de onda. Primeiramente, realiza-se uma campanha experimental para a obtenção dos dados empíricos da propagação do sinal a fim de obter-se sua modelagem dentro do ambiente de teste. Na etapa seguinte, são aplicados os métodos de trilateração propostos em ambiente simulado e os resultados são comparados. Então passa-se para teste empíricos no mesmo ambiente do teste inicial, no qual a propagação da onda foi modelada. Ao final os resultados reais de cada método são discutidos e comparados, tanto em relação aos resultados da simulação, quanto entre si para os resultados empíricos.

### 3.1 Campanha experimental e modelagem

A placa de circuito da *Heltec Automation*, contendo o microcontrolador ESP32 integrado ao módulo LoRa e a um pequeno display de LED (Figura 7), foi utilizada como o hardware principal nos experimentos deste trabalho. Duas antenas foram selecionadas para essa etapa da aplicação, uma da marca *ChenZen* de 3 dBi e outra da marca *RC Aero* de 5 dBi, ambas capazes de receber e enviar sinais de 915 MHz. A implementação do código foi feita em linguagem C utilizando a IDE do Arduino.

Figura 7 – Placa do microcontrolador ESP32 LoRa com antena 3 dBi (esquerda) e 5 dBi (direita)



Fonte: Heltec ESP-32 LoRa

Primeiramente duas placas, uma como receptor e outra como emissor do sinal LoRa, dispostas num plano bem próximo ao solo, são usadas para a tomada de 300 medidas de RSSI, estas são coletadas no receptor para cada distância medida entre as placas, e nesta etapa são utilizadas duas antenas com ganhos de 3 dBi e 5 dBi. Por possuir menor ganho e conseqüentemente menor resolução, para a antena de 3 dBi foram utilizadas distâncias de 1 m à 12 m em incrementos de 1 m, e de 12 m à 20 m em incrementos de 2 m. Para a antena de 5 dBi, as distâncias escolhidas foram de 0,25 m à 3 m em incrementos de 0,25 m, e de 3 m à 27 m em incrementos de 1 m. A maior frequência de pontos selecionados para posições próximas à base se deve ao caráter logarítmico do modelo, que possui grande variação do valor RSSI para distâncias pequenas.

Após a coleta dos valores de RSSI, uma média para cada posição é calculada e os valores da intensidade do sinal em função da distância são plotados em um gráfico, e, por

fim, aplica-se uma aproximação a uma curva logarítmica dos dados medidos para se obter os parâmetros definidos na Equação (3), essa aproximação é feita utilizando a ferramenta chamada "Linha de Tendência Logarítmica", do *Google Sheets*. Assim, a modelagem da propagação da onda inclui as interferências específicas provenientes do ambiente de teste, incluindo as diferenças entre antenas, através dos parâmetros  $L(d_0)$  e  $\eta$ .

Com o modelo bem definido, a próxima etapa é a simulação dos métodos de trilateração, para comparação de desempenho e definição dos melhores métodos, segundo os critérios definidos neste trabalho.

## 3.2 Comparação em ambiente simulado

A fim de verificar o desempenho dos métodos de trilateração, as simulações foram realizadas variando características de quantidade de bases e potência de antena dos nós. Cada método será analisado com base nas seguintes características: acurácia e precisão. A análise foi feita dentro uma área alvo no centro do ambiente simulado de teste. Será evidenciado se a troca da antena, e respectivo modelo, causará alguma modificação nos resultados simulados e o impacto da quantidade de bases no desempenho dos métodos.

A área da simulação é definida por um quadrado de 15 metros de lado, os pontos escolhidos formam uma malha de quadrados de 1 m de lado, inseridos de maneira que suas coordenadas planares variam conforme o seguinte padrão: (0; 0), (0,5; 0), (1; 0) ... (15; 0), (0; 0,5), (0,5; 0,5), (1; 0,5) ... (15; 15). As coordenadas conhecidas das bases formam um polígono equilátero do qual cada base é um vértice, com centro idêntico ao centro da área de teste, em (7,5; 7,5), e a distância de todas as bases ao centro é de 7,5 metros. A área alvo para o cálculo das métricas de precisão e acurácia é definida por um círculo de centro (7,5; 7,5) e raio 3,75 metros. A Figura 8 ilustra a área de teste para 3, 4, 5 e 6 bases.

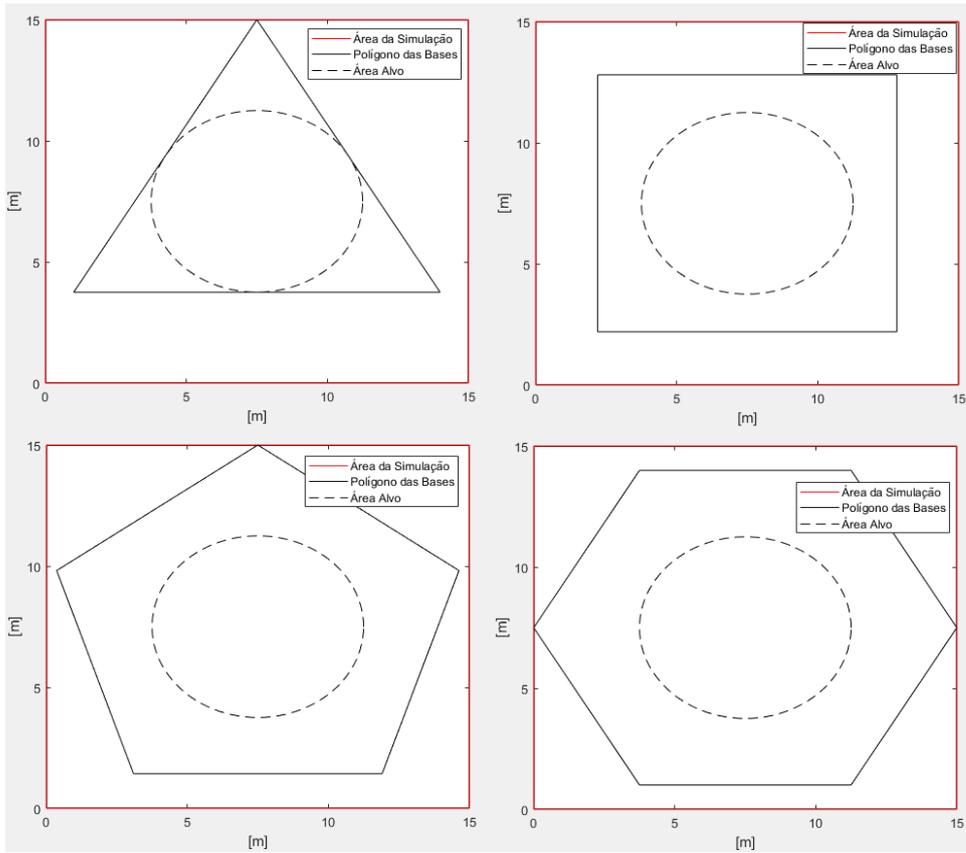
Para cada ponto  $p$  dentro da área de simulação, valores de RSSI ideais são calculados utilizando o modelo obtido empiricamente. Então, ruído Gaussiano é adicionado ao RSSI e esta adição é repetida  $n$  vezes, sendo  $n$  definido arbitrariamente igual a 100. O ruído utiliza parâmetros de deslocamento e dispersão baseados na diferença entre a aproximação feita pela equação do modelo e os valores de RSSI reais, medidos no experimento inicial.

A próxima etapa simulada consiste em calcular a distância a partir dos valores ruidosos da intensidade do sinal, e por fim aplicar os métodos de trilateração para estimar as coordenadas de cada ponto no plano.

A acurácia das medições num ponto  $p$  dentro da área da simulação será identificada através da média obtida das  $n$  simulações que resultam nas coordenadas  $(x_p, y_p)$  em comparação com o valor real  $(x_{real}, y_{real})$ , expresso pela Equação (20).

$$e_p = \|\bar{X}_p - X_{real}\| = \sqrt{(x_p - x_{real})^2 + (y_p - y_{real})^2} \quad (20)$$

Figura 8 – Área da simulação para 3, 4, 5 e 6 bases.



Fonte: Autoria própria

E  $\bar{X}_p$  é calculado através da Equação (21).

$$\bar{X}_p = (x_p, y_p) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i, y_i)}{n} \quad (21)$$

A precisão no mesmo ponto  $p$  será obtida pela dispersão dos  $n$  resultados calculados para a acurácia, ou seja, a precisão será dada pelo desvio padrão dessas medidas, expressa pela Equação (22).

$$\sigma_p = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_p)^2}{n} \quad (22)$$

A quantidade escolhida de repetições para as medições em cada ponto é de 100, ou seja,  $n = 100$ . Considerando um total de  $P$  pontos dentro da área alvo, duas métricas gerais são definidas para a comparação dos métodos: a média de todas as medidas de acurácia de cada ponto  $p$ , e a média de todas as medidas de precisão dos mesmos pontos  $p$ , sendo  $p$  pertencente à área alvo, expressadas pelas Equações (23) e (24) respectivamente.

$$\bar{e} = \frac{\sum_{p=1}^P e_p}{P} \quad (23)$$

$$\bar{\sigma} = \frac{\sum_{p=1}^P \sigma_p}{P} \quad (24)$$

Após o cálculo de todas as métricas, a simulação é repetida modificando-se a quantidade de bases, inicialmente 3, então 4, 5 e finalmente 6 bases.

Abaixo as etapas da simulação são evidenciadas passo a passo:

1. Definir a quantidade de bases e suas posições;
2. Calcular a distancia real e seu valor ideal de RSSI para cada ponto em função de cada base;
3. Adicionar ruído Gaussiano ao RSSI ideal utilizando métricas empíricas de deslocamento e desvio padrão;
4. Calcular a nova distância de cada ponto à cada base, utilizando o valor de RSSI ruidoso, aplicado ao modelo de propagação definido;
5. Calcular a posição de todos os pontos, utilizando 5 algoritmos de trilateração: WCL, MCLA, MinMax e MMSE, e a nova proposta ao MMSE;
6. Repetir os passos 3, 4 e 5, 100 vezes;
7. Calcular a acurácia e precisão de todos os pontos;
8. Calcular a média da acurácia e média da precisão dentro da área alvo, para todos os algoritmos.
9. Repetir todos os passos acima para 3, 4, 5 e 6 bases.

Estes resultados darão a base de comparação para a próxima etapa, na qual a trilateração será aplicada empiricamente, utilizando o hardware apresentado anteriormente, na seção 3.1.

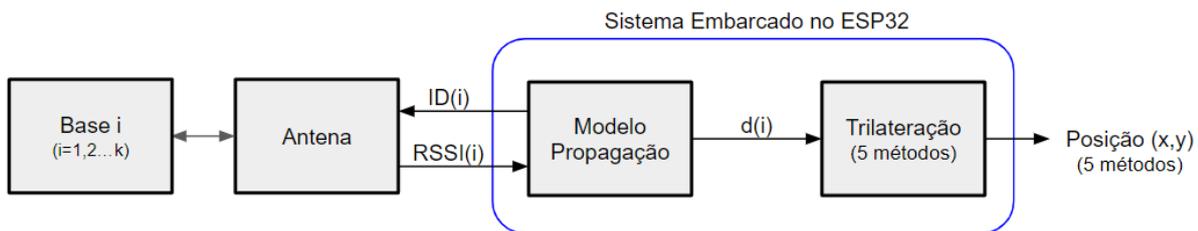
### 3.3 Aquisição e comparação dos dados empíricos

De maneira semelhante ao que foi simulado (Figura 8) as bases LoRa serão posicionadas ao redor da região alvo com antenas bem próximas ao plano do solo, formando um polígono equilátero para cada configuração de quantidade de bases, e em seguida uma última placa alvo será o nó com posição desconhecida, que realizará seu próprio posicionamento. Nesta etapa, somente a antena de 5 dBi será utilizada por ter apresentado os melhores resultados de posicionamento.

Nesta configuração, o programa embarcado na placa alvo deve coletar os valores de RSSI das bases de maneira sequencial, evitando interferência entre os sinais. Para isso,

para cada base foi designado um identificador, e o programa da base a torna um repetidor, que aguarda a mensagem do nó alvo contendo o seu identificador e reenvia a mensagem recebida. Após a obtenção de todos os valores de RSSI, o programa na placa alvo realiza o cálculo das distâncias utilizando o modelo de propagação definido na primeira campanha experimental e as posições das bases, que foram inseridas diretamente na programação do nó móvel, e então este realiza a trilateração, utilizando os cinco métodos. A Figura 9 mostra o diagrama de blocos do sistema embarcado no ESP32 alvo.

Figura 9 – Diagrama de blocos do sistema embarcado para o teste da trilateração para  $k$  bases fixas.



Fonte: Autoria própria

Posteriormente, pretende-se alterar a posição do emissor dentro da área e refazer o procedimento. Cada posição irá gerar 100 resultados para a localização estimada, cada resultado será comparado à localização real, e então o desempenho geral de cada método será avaliado e comparado, conforme as métricas estipuladas na seção anterior. Por fim, comparações com os resultados simulados evidenciarão se existe uma boa verossimilhança do modelo à aplicação prática.

---

# Capítulo 4

## Resultados

---

Neste capítulo, são apresentados os resultados da campanha experimental inicial que gerou o modelo de propagação da onda no ambiente de teste. Então, o modelo é utilizado para as simulações dos métodos de trilateração em um ambiente simulado amplo.

Para avaliar os resultados simulados de cada método, as métricas são calculadas a partir de dados ruidosos provenientes das variações entre os valores de RSSI e a curva logarítmica que representa o modelo.

Por fim, testes empíricos são realizados em um ambiente aberto, sem obstáculos entre as bases e nós. Os resultados empíricos são comparados entre si utilizando as mesmas métricas da simulação e, posteriormente, verifica-se a verossimilhança se os mesmos padrões observados na simulação se repetem nos testes reais.

### 4.1 Modelo Empírico da Propagação da Onda

Primeiramente, o modelo de propagação da onda é calculado utilizando dois controladores equipados com uma antena 3 dBi cada (Figura 7) num ambiente aberto e sem obstáculos próximos ou entre as antenas, a Figura 10 mostra a região utilizada para a modelagem.

Um controlador é somente um emissor e o outro o receptor, no qual são medidos 100 valores de RSSI uma dada distância e a média desses valores é utilizada para obter a distância. As distâncias variam de 1 a 12 metros, em passos de 1 metro, e de 14 a 20 metros, em passos de 2 metros.

Os resultados estão plotados no gráfico da Figura 11, junto à regressão logarítmica aplicada nos pontos empíricos para obtenção dos parâmetros do modelo de propagação

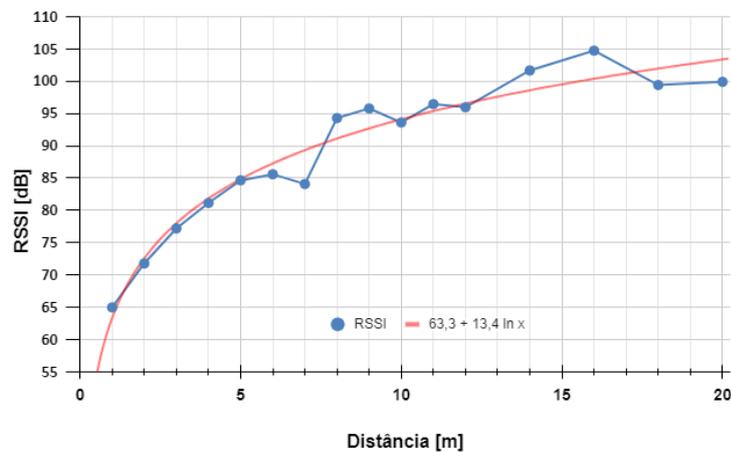
Figura 10 – Região utilizada na modelagem e nos testes empíricos.



Fonte: Autoria própria

(Equação (3)), os quais estão evidenciados na Tabela 1, junto ao erro médio e desvio padrão da curva calculada.

Figura 11 – Gráfico da distância versus valor RSSI para antena de 3 dBi.



Fonte: Autoria própria

Tabela 1 – Parâmetros empíricos da propagação da onda para antena de 3 dBi

Parâmetro	$d_0$	$L(d_0)$	$\eta$	Erro médio	Desvio padrão
Valor	1,0 m	63,3 dB	3,095	-0,13 dB	2,62 dB

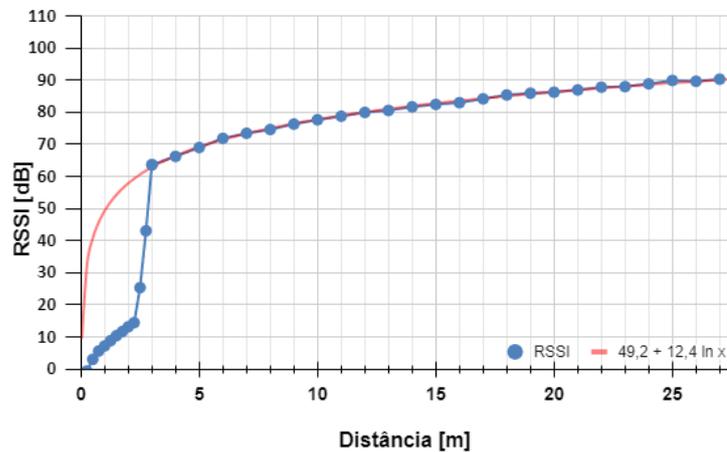
Nota-se que o valor de  $\eta$  está dentro do esperado, normalmente entre 2 e 4 (TARRÍO; BERNARDOS; CASAR, 2011). O erro médio se mostra pequeno, mas esse efeito é esperado em uma regressão, pois provém da simetria que existe entre os pontos e a própria

curva. Já o desvio padrão mostra que as variações são relativamente grandes, tomando um valor de mais de 2 dB.

O mesmo teste acima é repetido para uma antena de 5 dBi, modificando-se também as distâncias entre emissor e receptor para uma coleta de resultados mais populosa devido ao maior ganho da antena. Assim, conforme mencionado anteriormente, tomou-se as distâncias de 0,25 a 3 metros, em incrementos de 25 centímetros, e de 3 a 27 metros, em incrementos de 1 metro.

Os resultados plotados e os valores dos parâmetros do modelo estão evidenciados na Figura 12 e Tabela 2, respectivamente. Novamente calcula-se a regressão logarítmica, erro médio e desvio padrão do novo modelo.

Figura 12 – Gráfico da distância versus valor RSSI para antena de 5 dBi.



Fonte: Autoria própria

Tabela 2 – Parâmetros empíricos da propagação da onda para antena de 5 dBi

Parâmetro	$d_0$	$L(d_0)$	$\eta$	Erro médio	Desvio padrão
Valor	1.0 m	49,2 dB	2,856	-0.11 dB	0,35 dB

Como o valor de RSSI é calculado através de uma referência arbitrária no receptor, a antena de 5 dBi apresenta um decaimento relativamente pequeno, um máximo de 13 dBi, que é quase linear até a marca dos 3 metros, ou seja, o indicador de força para sinais próximos é muito próximo da própria referência devido ao ganho superior que a antena possui. Para a regressão logarítmica mostrada na Figura 12, os pontos iniciais até 3 metros foram ignorados, pois produziram um erro muito grande através da curva calculada.

Novamente  $\eta$  apresenta um valor esperado, o valor do erro médio continua baixo, mas este provém da própria regressão, já o desvio padrão se mostrou muito menor do que anteriormente, o que evidencia uma precisão maior da curva calculada. Ao observar

todos os parâmetros empíricos pode-se concluir que antenas com ganhos maiores produzem sinais menos ruidosos devido à maior potência.

Para a medição de RSSI em distâncias menores que 3 metros cogitou-se a aplicação de uma regressão linear, junto a um algoritmo inteligente, que faria a seleção do modelo dado um valor limite de RSSI, porém inconteínuidades surgirão na interface entre equações e os métodos de trilateração poderão apresentar resultados incorretos, não relacionados com as características do método em si, afetando negativamente o objetivo desse trabalho. Portanto, para as métricas dos testes simulados e empíricos da trilateração, apenas distâncias maiores que 3 metros serão utilizadas.

## 4.2 Simulação da Trilateração

A simulação foi realizada em ambiente do software MATLAB 2021, rodando com sistema operacional Windows 10. Um computador possuindo processador Ryzen 7x e memória RAM de 32Gb e 3200Mhz foi utilizado para todas as simulações.

Para a primeira parte da simulação, o modelo obtido com as antenas de 3 dBi foi utilizado (Tabela 1) e a quantidades de bases foi variada de 3 até 6. Para os métodos de trilateração WCL o parâmetro  $\alpha$  foi escolhido como 1,2 (Equações (4) e (5)), e para o MCLA o parâmetro  $\beta$  como 10 (Equações (6) e (7)), igualmente a outros autores citados nesse trabalho (WANG; ZHENG, 2014; SHI et al., 2020; FAN et al., 2013).

Os valores obtidos para média geral do erro e média geral desvio padrão (Equações (23) e (24)) estão dispostas na Tabela 3 e 4, respectivamente. Os resultados para todos os pontos da área de teste foram mapeados, ilustrados e discutidos a seguir.

Tabela 3 – Média geral do erro, em metros, dos métodos de trilateração, utilizando o modelo de 3 dBi.

Bases	3	4	5	6
WCL	1,35	1,12	1,02	0,96
MCLA	1,36	1,23	1,16	1,14
MinMax	1,71	1,24	1,19	1,12
MMSE	1,96	1,79	1,69	1,59
MMSE Modificado	1,96	1,60	1,50	1,41

Tabela 4 – Desvio padrão geral, em metros, dos métodos de trilateração, utilizando o modelo de 3 dBi.

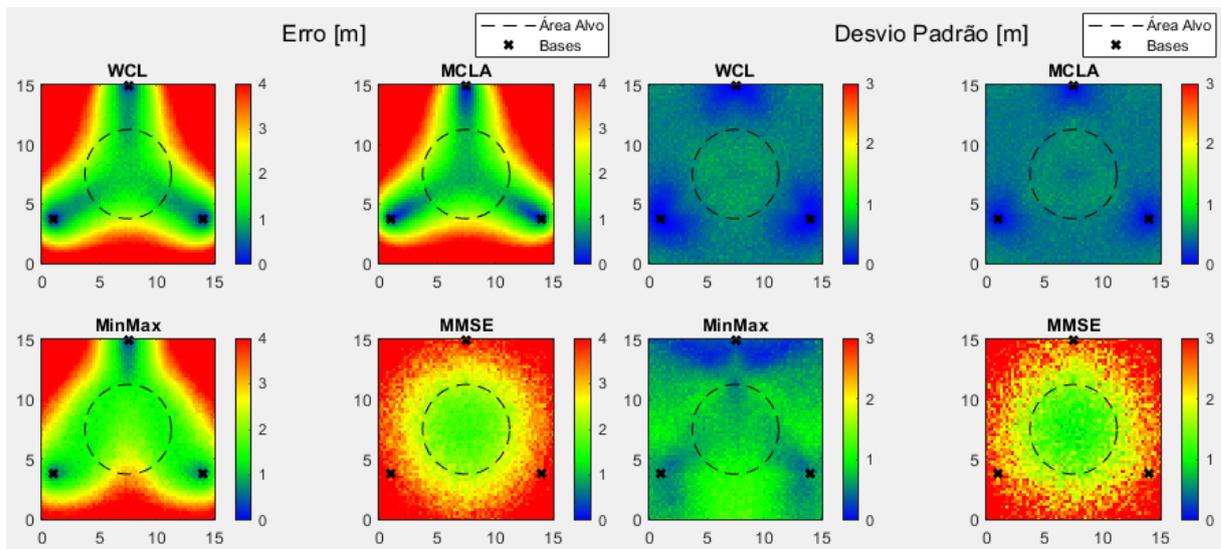
Bases	3	4	5	6
WCL	0,58	0,55	0,51	0,48
MCLA	0,53	0,51	0,48	0,44
MinMax	0,80	0,61	0,62	0,59
MMSE	1,35	1,67	1,06	1,00
MMSE Modificado	1,35	1,02	0,91	0,85

Para 3 bases no modelo de 3 dbi a Figura 13 mostra um mapa de cores para erro e desvio padrão. Pode-se notar que os algoritmos par WCL e MCLA resultaram em ambas métricas melhores e, dentro da área alvo, valores de erro menores que 1 metro são observados.

O algoritmo MinMax apresenta um erro alto em uma boa porção da área alvo e um desvio padrão relativamente alto em toda a região, isso se dá pela geometria retangular que emerge da resolução das equações do método.

O MMSE e sua variação proposta mostraram o pior resultado dentre os métodos, mesmo tendo uma complexidade alta na resolução de suas equações. Dentro da região de teste, o erro e desvio padrão são bem distribuídos, o que é esperado do seu caráter de mitigação de erro na área de intersecção das distancias das bases. A Figura 14 e as métricas calculadas evidenciam que a modificação nos cálculos do MMSE não o influenciaram de nenhuma forma significativa, de fato, os valores obtidos são exatamente iguais já que a permutação de apenas 3 bases não altera as matrizes significativamente.

Figura 13 – Erro e desvio padrão do modelo de 3 dBi com 3 bases.



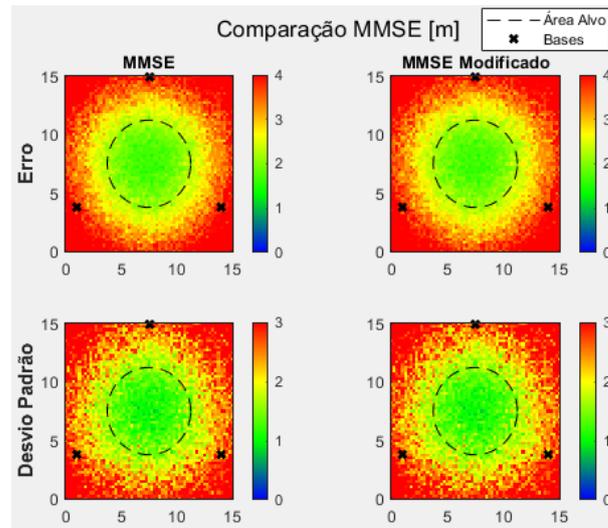
Fonte: Autoria própria

Como método inicial de comparação, a quantidade de bases foi aumentada para 6, conforme a Figura 15, que ilustra o fato esperado de que aumentado-se o número de bases melhora-se o posicionamento em todos os métodos. O Apêndice A também traz as ilustrações das simulações com 4 e 5 bases.

O WCL e MCLA mostraram uma diminuição do erro principalmente nas bordas da área alvo, devido a posições mais próximas na nova disposição das bases, mas o desvio padrão praticamente não se alterou. O WCL apresenta o erro mais baixo de todos os métodos, o que mostra a eficácia da adição de pesos aos valores de RSSI.

MinMax apresentou uma grande melhoria, de 35% para o erro e 26% para o desvio padrão, com a adição de mais bases, corroborando com o caráter retangular deste

Figura 14 – Erro e desvio padrão do modelo de 3 dBi com 3 bases para o MMSE.

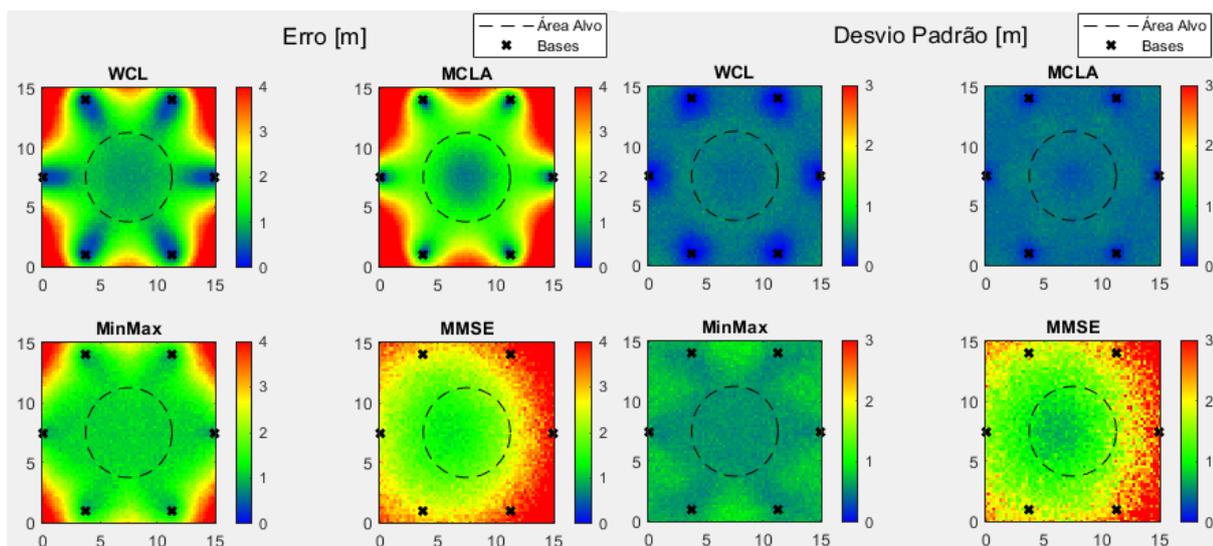


Fonte: Autoria própria

algoritmo.

MMSE apresentou melhorias relativas, mas ainda atrás de todos os outros métodos. A Figura 16 mostra claramente que a modificação do algoritmo afetou os resultados obtidos. O MMSE comum gera melhor precisão e acurácia aos pontos próximos à base 6, então, modificando-se os cálculos para que a base mais próxima do nó seja a distância a ser subtraída (Equação (19)), houve melhoria significativa de ambas as métricas do método, e também fica visível que a área de baixo erro foi aumentada significativamente.

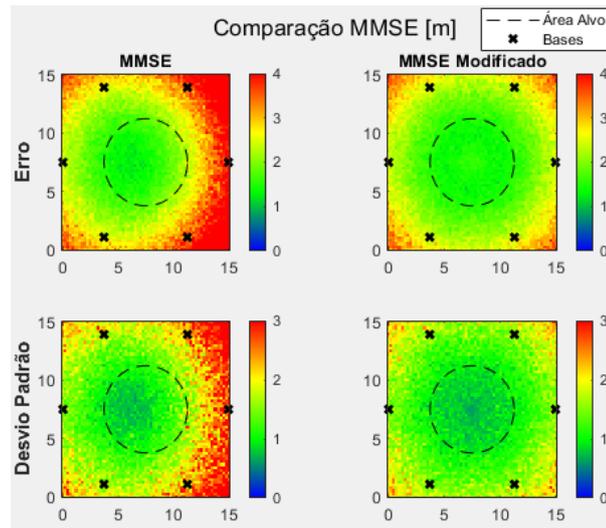
Figura 15 – Erro e desvio padrão do modelo de 3 dBi com 6 bases.



Fonte: Autoria própria

A segunda etapa das simulações é a modificação do modelo obtido com antenas de 3 dBi para o modelo menos ruidoso com antenas de 5 dBi para reavaliar o desempenho dos

Figura 16 – Erro e desvio padrão do modelo de 3 dBi com 6 bases para o MMSE.



Fonte: Autoria própria

métodos em um cenário com menos interferências do ambiente. As Tabelas 5 e 6 mostram as métricas gerais de cada método para esta nova simulação.

Tabela 5 – Média geral do erro [m] dos métodos de trilateração, utilizando o modelo de 5 dBi.

Bases	3	4	5	6
WCL	0,77	0,46	0,39	0,38
MCLA	1,04	0,99	0,98	0,97
MinMax	1,29	0,59	0,45	0,24
MMSE	0,27	0,25	0,23	0,22
MMSE Modificado	0,27	0,22	0,20	0,18

Tabela 6 – Desvio padrão geral [m] dos métodos de trilateração, utilizando o modelo de 5 dBi.

Bases	3	4	5	6
WCL	0,10	0,10	0,10	0,10
MCLA	0,09	0,09	0,08	0,07
MinMax	0,16	0,14	0,14	0,11
MMSE	0,15	0,14	0,13	0,12
MMSE Modificado	0,15	0,12	0,11	0,10

Nota-se que o MMSE apresentou grande melhoria, passando a ser o método mais eficaz dentre todos os métodos testados, com apenas 3 bases o erro já é muito baixo, portanto a aplicações de mais bases se tornam menos importantes. A modificação do MMSE mostra melhoria muito pequena nas métricas gerais, porém os mapas de cores para mais bases mostraram um aumento na área de baixo erro, além dos limites da área alvo. Os novos resultados mostram que a aplicação do MMSE é factível, porém dependente do ambiente

no qual o sistema é inserido, já a modificação proposta pode sempre ser usada, pois melhora efetivamente a precisão e acurácia em mais pontos da área.

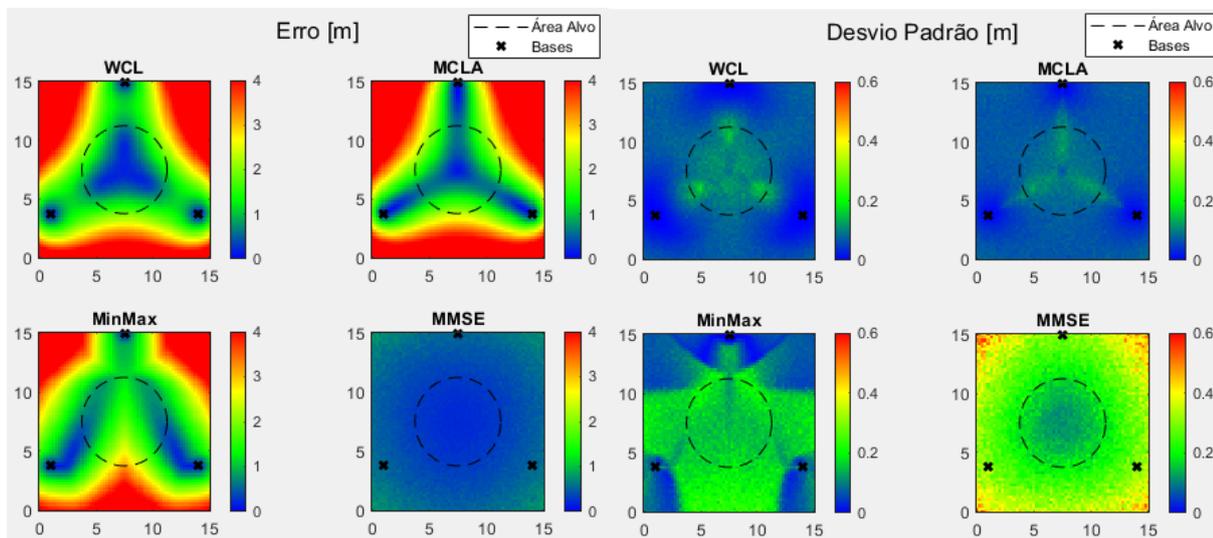
O algoritmo MinMax novamente mostra eficiência quando a quantidade de bases é aumentada, passando de erros acima de 1 metro com 3 bases para 24 centímetros com 6 bases, corroborando os resultados anteriores. O aumento de bases novamente apresentou um limite na aplicação de mais bases, porém o MinMax obteve resultados melhores devido ao caráter geométrico que emerge dos cálculos.

O MCLA apresentou o pior desempenho e melhoria pouco significativa com os aumento da quantidade das bases, diferentemente do WCL, o que mostra um cenário ainda melhor do que o anterior para a aplicação de pesos nos valores de RSSI ao invés das distâncias. No geral, como o erro gaussiano aplicado foi pequeno, os valores de desvio padrão para todos os métodos foi baixo, independente da quantidade de bases.

Em todos os métodos o desvio padrão se manteve bem baixo, e a adição de bases mostrou-se pouco eficaz na melhora dessa métrica. Isso se dá ao fato do erro com ganhos de 5 dBi apresentarem pouca interferência e conseqüentemente pouca variação relativa ao erro médio.

Para uma análise mais específica, o teste com 3 bases foi realizado e seu mapa de cores evidenciado na Figura 17. A Figura 18 mostra a comparação do MMSE e sua modificação para o novo modelo.

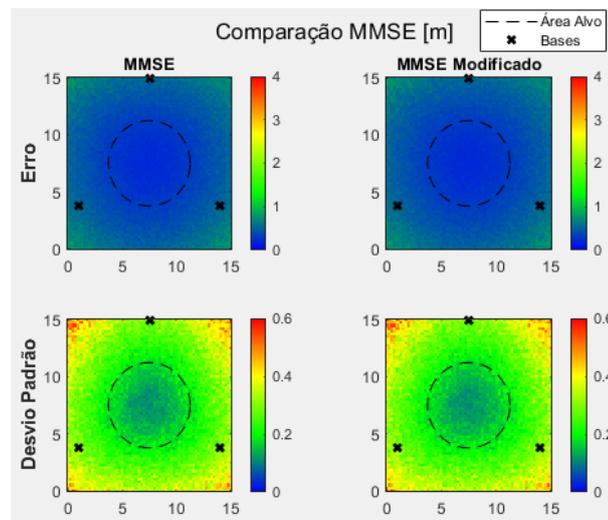
Figura 17 – Erro e desvio padrão do modelo de 5 dBi com 3 bases.



Fonte: Autoria própria

Devido a modificação da antena e conseqüente aumento do ganho do sinal emitido, todos os métodos apresentaram erros baixos na região alvo. As métricas indicam que, apenas com 3 bases, o resultado para 5 dBi é mais eficaz do que 6 bases com antenas 3 dBi, exceto para o MinMax, que apresenta erros relativamente grandes na parte inferior da região alvo, sendo este o método menos preciso neste caso.

Figura 18 – Erro e desvio padrão do modelo de 5 dBi com 3 bases para o MMSE.



Fonte: Autoria própria

Para o WCL e MCLA, muitos pontos dentro da região alvo estão próximos de zero, principalmente no centro e nas direções de cada base, o que evidencia que as menores distâncias possuem melhor precisão, portanto a aplicação de pesos maiores traz melhorias significativas.

O MMSE apresentou o menor erro, com média de apenas 0,27 metros, este é o método mais eficaz neste cenário. Apesar da complexidade presente nos cálculos matriciais, a precisão e acurácia estão visivelmente presentes. A modificação deste método é ilustrada na Figura 18, porém, de maneira similar à simulação de 3 dBi, não há diferença significativa.

Apesar da métrica geral da precisão ser bem parecida entre todos os métodos, o MMSE apresenta uma dispersão um pouco maior além da área alvo, assim como o MinMax. O WCL e MCLA praticamente não apresentam desvio padrão superior a 0,2 metros dentro da área alvo, e perto das bases o desvio é ainda menor, chegando a quase 0 metros.

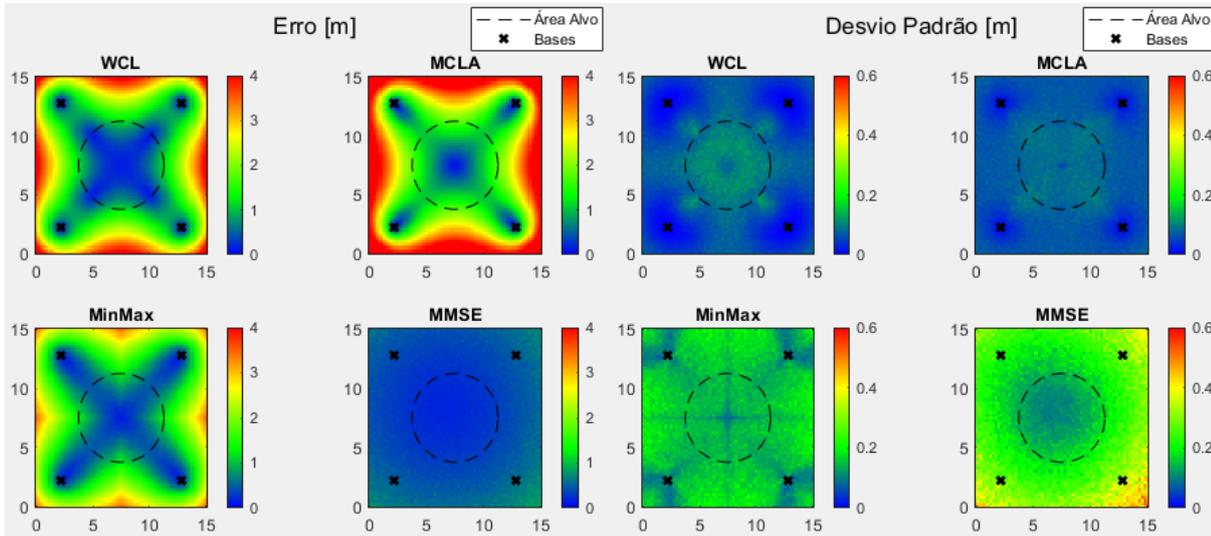
Aumentando-se a quantidade de bases para 4, o mapa de cores de todos os métodos é apresentado na Figura 19. A comparação do MMSE é apresentada na Figura 20.

Corroborando os dados da Tabela 5, o WCL e MinMax mostraram uma acurácia significativamente melhor, mostrando resultados bem similares, tanto nas métricas gerais quanto na distribuição do erro através de toda a área da simulação. A redução no erro foi de 40% e 54% para o WCL e MinMax respectivamente.

O MCLA apresentou uma melhora pequena na acurácia, o que evidencia que a aplicação do peso à distância tem menor impacto do que quando o peso é aplicado diretamente ao valor de RSSI, seu erro médio é mais que o dobro do erro obtido pelo WCL.

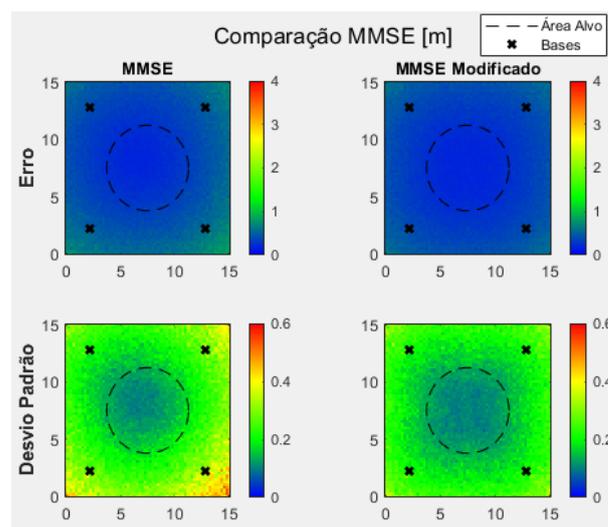
O MMSE continua com o menor erro dentre os métodos, especialmente a modificação proposta neste trabalho. Apesar da alta precisão, a modificação melhora ligeiramente as duas métricas gerais e nota-se uma maior cobertura de baixo erro e desvio padrão através

Figura 19 – Erro e desvio padrão do modelo de 5 dBi com 4 bases.



Fonte: Autoria própria

Figura 20 – Erro e desvio padrão do modelo de 5 dBi com 4 bases para o MMSE.



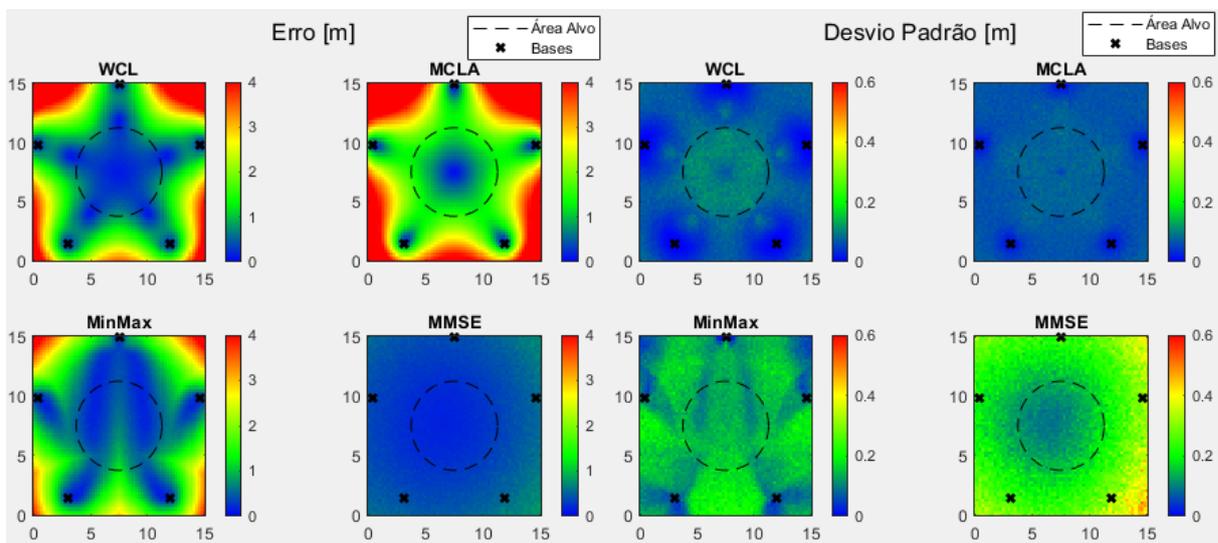
Fonte: Autoria própria

de área de simulação.

Com 5 bases, a Figura 21 mostra melhorias pouco significativas para o WCL, MCLA e MMSE em relação ao erro na área alvo, e praticamente não há melhoria no desvio padrão destes métodos, isso implica que existe um limite para o qual a adição das bases não traz mais benefícios para o posicionamento por trilateração para estes métodos, dado o fato de que as distancias das bases à região alvo não se altera.

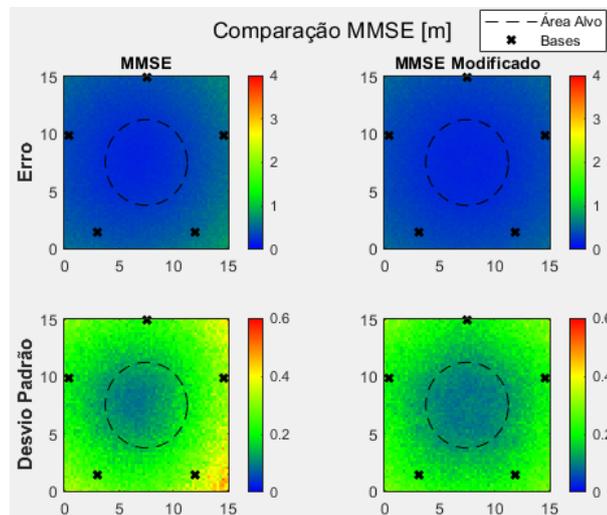
MinMax ainda apresentou uma melhoria considerável em sua precisão, reduzindo seu erro em 24%. Já a modificação do MMSE trouxe novamente uma melhoria muito pequena, de cerca de 11% para o erro, como mostra a Figura 22.

Figura 21 – Erro e desvio padrão do modelo de 5 dBi com 5 bases.



Fonte: Autoria própria

Figura 22 – Erro e desvio padrão do modelo de 5 dBi com 5 bases para o MMSE.

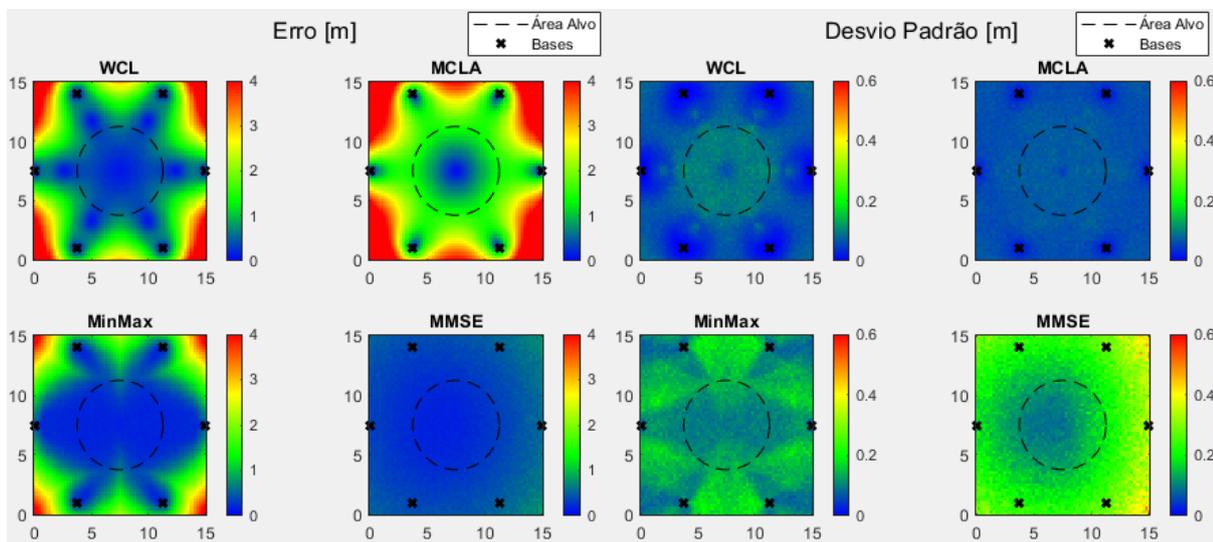


Fonte: Autoria própria

A Figura 23 mostra as simulações para 6 bases e, novamente, vê-se que as melhorias para WCL, MCLA e MMSE foram pequenas, praticamente insignificantes. Já o método MinMax trouxe novamente uma melhoria relativamente grande, reduzindo seu erro em cerca de 47%, e é interessante notar que forma-se uma área bem extensa onde os erros se mantêm próximos de 0 metros. Este resultado é comparável ao MMSE, porém sem a complexidade matricial que este último traz.

A Figura 24 mostra melhoria perceptível do MMSE e MMSE modificado, mas bem reduzida, o que corrobora com o limite discutido anteriormente, da adição de bases sem a redução das distâncias. O MMSE modificado novamente mostra uma melhor distribuição através da área simulada, principalmente no desvio padrão.

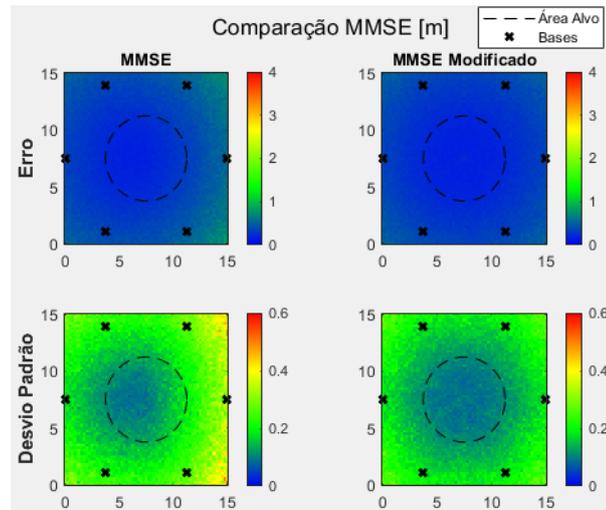
Figura 23 – Erro e desvio padrão do modelo de 5 dBi com 6 bases.



Fonte: Autoria própria

Após a simulação geral de cada método, 5 pontos selecionados são testado empiricamente, para verificação de cada método na prática. Estes testes e seus resultados são compilados na seção seguinte.

Figura 24 – Erro e desvio padrão do modelo de 5 dBi com 6 bases para o MMSE.



Fonte: Autoria própria

### 4.3 Campanha Experimental da Trilateração

Apenas 5 pontos foram selecionados para o cálculo empírico, 1 deles no centro da área de teste, 3 nas extremidades da área alvo e um último perto de uma das bases. A Tabela 7 e a Figura 25 trazem as coordenadas dos pontos e ilustram suas posições.

Tabela 7 – Coordenadas dos pontos escolhidos para os testes empíricos.

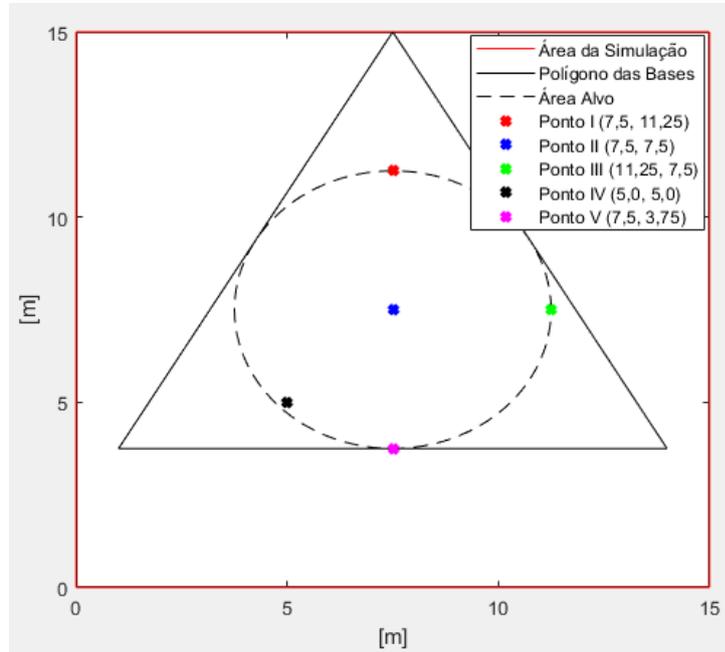
Ponto	x [m]	y [m]
I	7,5	11,25
II	7,5	7,5
III	11,25	7,5
IV	5,0	5,0
V	7,5	3,75

Para a campanha experimental, foram utilizadas antenas de 5 dBi em todas as placas LoRa. A região do experimento foi mapeada e as bases posicionadas da mesma maneira da simulação para 3 bases e 4 bases. Os cinco pontos escolhidos (Tabela 7) receberão a placa com o cálculo das distâncias e os 5 métodos de trilateração embarcados, a posição de cada base foi inserida previamente no código fonte.

A Tabela 8 traz as métricas gerais de cada método, calculada apenas para esses 5 pontos, e como comparação, os resultados simulados desses 5 pontos também estão evidenciados.

Com exceção do MinMax para 3 bases, todos os métodos testados apresentaram métricas gerais maiores empiricamente do que na simulação, isso é esperado já que existem ruídos e interferências do ambiente que não são modeladas pelo modelo logarítmico de propagação de onda. De maneira geral, o desvio padrão se mantém próximo ao simulado,

Figura 25 – Pontos escolhidos para os testes empíricos.



Fonte: Autoria própria

Tabela 8 – Média dos erros e desvio padrão para os métodos de trilateração para os 5 pontos empiricamente testados, utilizando o modelo de 5 dBi.

Método		Erro médio [m]		Desvio padrão [m]	
		3 bases	4 bases	3 bases	4 bases
WCL	Simulado	1,01	0,76	0,10	0,09
	Empírico	1,15	0,93	0,14	0,25
MCLA	Simulado	1,14	1,32	0,08	0,08
	Empírico	1,21	1,35	0,09	0,13
MinMax	Simulado	1,61	0,90	0,14	0,13
	Empírico	1,40	1,00	0,17	0,21
MMSE	Simulado	0,30	0,30	0,17	0,16
	Empírico	0,67	0,52	0,20	0,21
MMSE Mod.	Simulado	0,30	0,26	0,17	0,13
	Empírico	0,67	0,47	0,20	0,17

apresentando pequena variação através dos métodos e cenários testados.

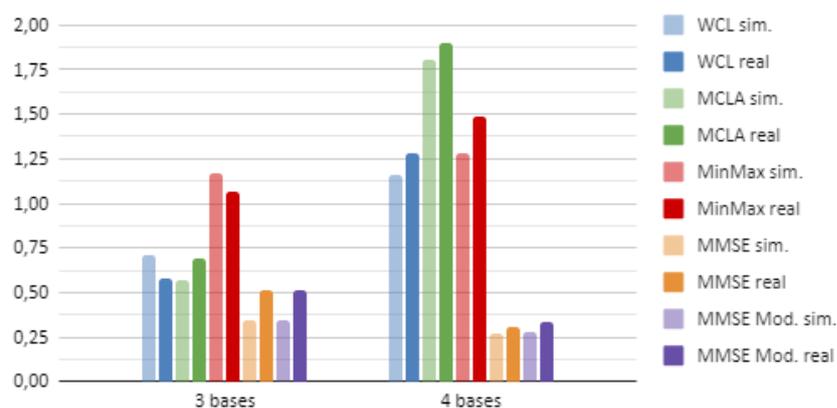
O MCLA perdeu acurácia quando a quantidade de bases foi aumentada de 3 para 4 bases, porém, observando as Figuras 17 e 19, nota-se que os 5 pontos selecionados estão em regiões que desfavorecem o cálculo da posição para este método. É válido ressaltar que o aumento de bases pouco influencia este método, como prevê os valores simulados na Tabela 5.

De maneira similar à simulação, o MMSE apresentou melhoria quase insignificante com o aumento da quantidade de bases, e a modificação proposta mostrou-se ligeiramente melhor tanto na precisão quanto na acurácia. Para 3 bases a modificação não altera os resultados, fato evidenciado e discutido na simulação, ou seja, vemos novamente que o sistema de equações possui apenas uma solução para 3 bases, conseqüentemente a alteração da ordem das bases não altera a solução do método.

É evidente e significativa a melhoria do método MinMax, o aumento de bases proporcionou 44% de aumento da acurácia, saltando do pior erro médio, para o segundo melhor dentre os métodos. Apesar do seu desvio padrão não ter se modificado, o valor é baixo, portanto sua precisão foi mantida.

De maneira individual, os resultados para acurácia são compilados e discutidos a seguir. A Figura 26 mostra o gráfico comparativo para o aumento da quantidade de bases para o Ponto I.

Figura 26 – Resultados empíricos da acurácia dos 5 métodos de trilateração para o ponto I.



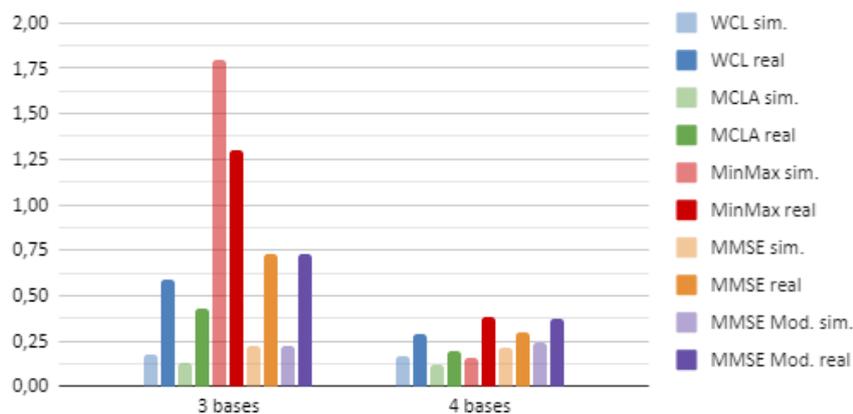
Fonte: Autoria própria

É interessante notar que o aumento de bases piorou os resultados do WCL, MCLA e MinMax, isso se deve ao fato do ponto I estar muito próximo à base 3 no teste com 3 bases e mais distante das bases 3 e 4 no teste com 4 bases, o que mostra que a aplicação dos pesos pode ser mais vantajosa do que a inclusão de novas bases. O WCL também apresentou um resultado melhor do que o simulado com 3 bases, porém pior que o MCLA, já empiricamente, uma inversão é visível, sendo o WCL mais acurado do que o MCLA.

O MMSE e sua modificação apresentaram resultados idênticos para 3 bases, e para 4 bases o resultado da modificação foi ligeiramente pior, tendência esta evidenciada na simulação. Isso se deve ao MMSE comum ter uma melhor acurácia próxima a base 4 em detrimento dos pontos mais distantes desta mesma base, fato que não acontece com o método modificado.

A Figura 27 mostra a mesma comparação para o ponto II, ponto central da área de testes.

Figura 27 – Resultados empíricos da acurácia dos 5 métodos de trilateração para o ponto II.



Fonte: Autoria própria

Neste teste é fácil perceber que todos os métodos mostram grande melhoria com o aumento das bases, em especial o MinMax que apresentou mais de 70% de aumento da acurácia, inclusive resultados melhores do que o simulado para 3 bases.

O MCLA se mostrou superior ao WCL nesse ponto, evidenciando que a aplicação de pesos na distancia pode ser melhor do que a ponderação sobre os valores de RSSI em alguns cenários.

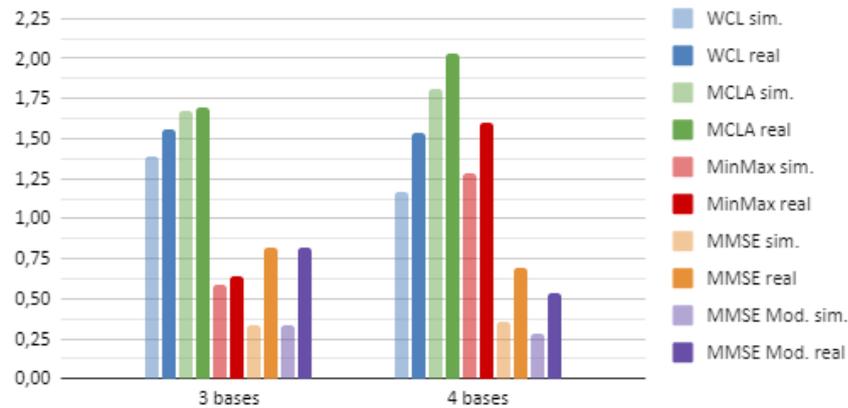
Novamente o MMSE modificado ficou atrás do MMSE comum, já que o último tem uma concentração maior de pontos com baixo erro próximo ao centro, esse fato também é visto na simulação, como mostra a Figura 20.

Para o ponto III, a Figura 28 ilustra os resultados de acurácia, ponto localizado na parte lateral esquerda da região alvo.

Nota-se pouca melhoria do WCL e uma deterioração da acurácia para o MCLA e MinMax, novamente tal fato pode ser atribuído ao ligeiro aumento da distancia entre esse ponto e às bases, quando aumenta-se de 3 para 4 bases. Para 3 bases podemos destacar o MinMax, que apresenta o melhor resultado, com um erro médio de menos de 60 centímetros.

O MMSE modificado melhorou significativamente a acurácia do método, tendo o erro mais baixo neste ponto, de apenas 50 centímetros para 4 bases, e cerca de 23% menor

Figura 28 – Resultados empíricos da acurácia dos 5 métodos de trilateração para o ponto III.

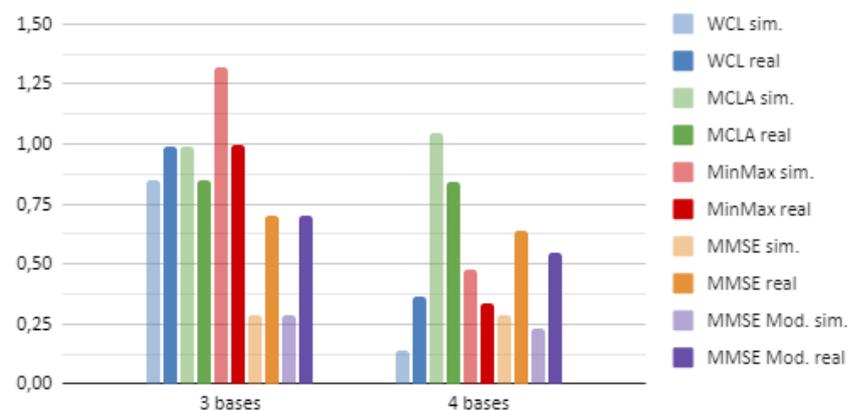


Fonte: Autoria própria

quando comparado com o método comum.

O ponto IV está localizado na parte inferior esquerda da região de teste, um dos pontos mais próximos a base 1 em ambos os testes de 3 e 4 bases. A Figura 29 mostra os resultados de todos os métodos.

Figura 29 – Resultados empíricos da acurácia dos 5 métodos de trilateração para o ponto IV.



Fonte: Autoria própria

O MCLA teve resultados melhores do que o simulado, porém não houve melhoria significativa no aumento das bases. Em contrapartida, o WCL mostrou grande melhoria para 4 bases, com redução de quase 84% em relação ao teste de 3 bases, com erro médio de apenas 36 centímetros.

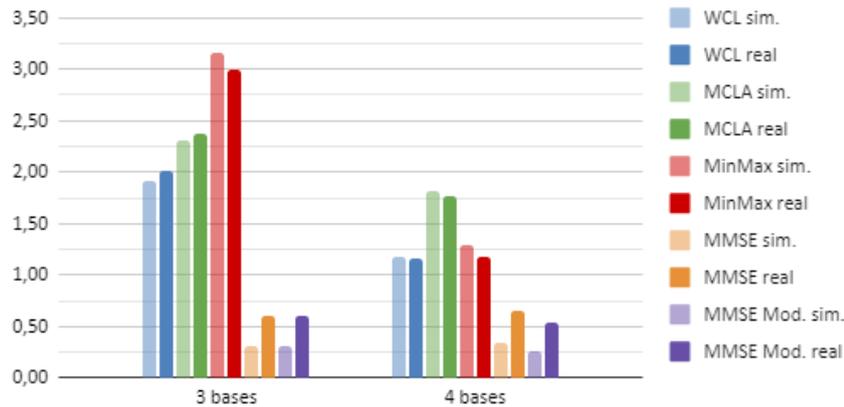
O método mais acurado foi o MinMax para 4 bases, mostrando uma redução de 76% quando comparado à 3 bases, e erro médio de apenas 34 centímetros.

O MMSE teve uma melhoria pequena para o aumento de bases, e sua modificação apresentou redução mais expressiva no erro médio, cerca de 21% de melhora de 3 para 4

bases, o que mostra a superioridade desse método para pontos mais distantes da última base. O resultado de ambos os métodos também mostra que estes não são influenciados pela proximidade de uma das bases, diferentemente dos outros 3 métodos testados.

O último ponto analisado é o ponto V e se encontra na parte inferior da região de teste. A Figura 30 ilustra os resultados neste ponto.

Figura 30 – Resultados empíricos da acurácia dos 5 métodos de trilateração para o ponto V.



Fonte: Autoria própria

Neste ponto todos os métodos apresentaram melhora na acurácia, exceto o MMSE comum, já que ponto 5 está distante da base 4. O MMSE modificado mostra ligeira diminuição do erro, o que evidencia sua melhor distribuição da acurácia através da área alvo. A modificação do MMSE apresentou o erro mais baixo, de apenas 50 centímetros.

O MinMax mostrou grande melhoria no aumento de bases, igualmente à simulação, com cerca de 60% de redução do erro, porém é notável que este método possui erros bem grandes, de 3 metros para 3 bases e mais de 1,1 metro para 4 bases.

O WCL e MCLA também apresentaram melhorias no aumento das bases, mas, similarmente ao MinMax e à simulação, os erros são altos, sempre acima de 1 metro para 4 bases, quase 2 metros para o MCLA, o que corrobora o fato de que o aumento de bases possui um limite, para quando a distância do ponto às bases não é modificada significativamente, o que foi evidenciado nos resultados simulados.

---

# Capítulo 5

## Conclusões

---

Este trabalho traz uma simulação padronizada para diferentes algoritmos de localização por RSSI e trilateração através de vários cenários com alterações na quantidade e posições das bases, e na antena escolhida, verificando também a aplicação da tecnologia LoRa para o posicionamento e sua variação de acordo com o hardware escolhido. A simulação é baseada numa campanha experimental inicial para obtenção dos modelos e posteriormente alguns dos cenários simulados são realizados empiricamente.

Um resultado esperado ao aumento do ganho da antena é a melhoria do erro e desvio padrão, e estes resultados são evidenciados através dos dois modelos obtidos e nas simulações. O método MMSE se beneficia imensamente dos sinais menos ruidosos, e em aplicações reais, uma análise prévia e empírica do ruído e de interferências do ambiente se faz necessária para a escolha do algoritmo de trilateração a ser aplicado.

Um aumento da precisão e acurácia é esperado quando a quantidade de bases é aumentada, porém as simulações e parte dos resultados empíricos mostram que existe um limite neste aumento, quando não se modificam as distâncias entre alvo e base. Adicionar bases além de 5 traz pouco impacto na precisão e acurácia dos métodos de trilateração, porém uma alternativa é posicionar as bases de maneira a reduzir suas distâncias de cada ponto dentro da área alvo, já que os resultados simulados e empíricos mostram menor erro para posições próximas às bases, com a aplicação do algoritmo mais eficaz. Como próximos passos, testes empíricos com mais bases serão muito importantes para evidenciar a efetividade de cada método em uma maior quantidade de cenários.

Os testes empíricos também mostraram que a tecnologia LoRa apresenta algumas limitações. Foram obtidos bons resultados nas distâncias propostas, utilizando a área de teste proposta, porém, devido ao caráter logarítmico dos modelos, distâncias maiores devem perder sua precisão exponencialmente. Outro fator limitante provém da cadência

da troca de sinais LoRa, os quais, por utilizarem uma frequência aberta, devem ter sua frequência limitada pelo tamanho do pacote. Isso significa que, dentro de uma rede de comunicação LoRa, quanto maior o pacote a ser enviado, menor sua frequência de envio por um mesmo emissor. Ambas as limitações não fizeram parte do escopo inicial desse trabalho e poderão ser exploradas em testes futuros.

Considerando os métodos individualmente, o método mais robusto em todas as aplicações simuladas é o WCL, com erros de no máximo 1,54 metro e no mínimo 30 centímetros através de todas os pontos simulados e também empiricamente testados. O MCLA também se mostra similarmente eficaz, mas seus erros podem chegar a mais de 2 metros. Também fica evidente que os pontos próximos às bases possuem um erro menor e, portanto, a aplicação de pesos relativamente a distância ou valor de RSSI, melhoram significativamente a localização, em especial ao RSSI. Um fator pertinente, porém não testado empiricamente, é a possível influência dos expoentes de correção  $\alpha$  e  $\beta$  para o WCL e MCLA respectivamente, portanto a utilização de um algoritmo com expoentes variáveis se torna interessante para um trabalho futuro a este, pois pode trazer benefícios significativos ao posicionamento.

O algoritmo MinMax se beneficia muito da adição de bases e possui cálculos muito simples o que é muito interessante para sistemas embarcados ou com limitações de hardware, com uma área de cobertura ampla e erro e desvio padrão relativamente baixos. Os resultados empíricos estão bem próximos aos simulados e muitas vezes se mostram melhores na prática, e, em alguns casos, o MinMax mostrou o menor erro empiricamente, o que evidencia que sua aplicação pode ser mais vantajosa do que outros métodos mais complexos.

O MMSE apresentou erros maiores quando os dados são muito ruidosos, porém, em ambientes com pouca interferência, este método apresenta erros muito baixos, com alta precisão. A melhoria proposta para este método traz resultados melhores quando comparados ao MMSE padrão, mesmo sendo melhoras relativamente pequenas quando os erros são baixos e para os pontos próximos à última base. A adição de mais bases melhoram os resultados das duas variações do MMSE, porém o cálculo da matriz inversa pode ser um impeditivo para sistemas embarcados, e outro fator importante é a baixa acurácia e precisão desse método para pontos próximos à base, diferentemente dos outros métodos testados.

Conclui-se que, um método simples como o MinMax pode ser extremamente vantajoso, mesmo quando o ambiente possui ruídos significativos, e é especialmente interessante para sistemas que precisam de baixa complexidade, porém desde que a quantidade de bases seja maior do que 4. Métodos de ponderação de base como o WCL e MCLA também são boas alternativas, principalmente quando as bases estão próximas aos alvos, e conseqüentemente, mais bases beneficiam tais métodos, sendo o WCL a melhor alternativa dentre estes 2, pois quase sempre mostra maior acurácia e precisão. Na grande maioria

dos casos, a modificação do MMSE melhora ou se iguala ao MMSE comum, sem aumento significativo de sua complexidade, esta alternativa se faz viável na maioria dos cenários, principalmente quando a área alvo é maior, pois possui uma região significativamente maior com erros baixos e maior precisão.



---

## Referências

---

- ANUGRAH, T. W.; RAKHMATSYAH, A.; WARDANA, A. A. Non-Line of Sight LoRa –Based Localization using RSSI-Kalman-Filter and Trilateration. **International Journal on Information and Communication Technology (IJoICT)**, v. 6, n. 2, p. 1, 2020.
- BARSOCCHI, P. et al. A Novel Approach to Indoor RSSI Localization by Automatic Calibration of the Wireless Propagation Model. In: **VTC Spring 2009 - IEEE 69th Vehicular Technology Conference**. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–5. ISSN 1550-2252.
- CHAN, S.; SOHN, G. Indoor Localization Using Wi-Fi Based Fingerprinting and Trilateration Techiques for Lbs Applications. **ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, XXXVIII-4/, p. 1–5, 2012. ISSN 1682-1750.
- FAN, H. et al. Weighted centroid localization algorithm based on improved rssi ranging. In: **Proceedings 2013 International Conference on Mechatronic Sciences, Electric Engineering and Computer (MEC)**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 544–547.
- GERWEN, J. V. V. et al. Indoor drone positioning: Accuracy and cost trade-off for sensor fusion. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., v. 71, p. 961–974, 1 2022. ISSN 19399359.
- GEZICI, S. A Survey on Wireless Position Estimation. **Wireless Personal Communications**, v. 44, n. 3, p. 263–282, feb 2008. ISSN 0929-6212. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s11277-007-9375-z>>.
- HERRERA-TAPIA, J. et al. Evaluating the use of sub-gigahertz wireless technologies to improve message delivery in opportunistic networks. In: **2017 IEEE 14th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 305–310.
- ILERI, F.; AKAR, M. RSSI Based Position Estimation in ZigBee Sensor Networks. **Recent Advances in Circuits, Systems, Signal Processing and Communications**, p. 62–73, 2014.
- LAM, K. H.; CHEUNG, C. C.; LEE, W. C. RSSI-Based LoRa Localization Systems for Large-Scale Indoor and Outdoor Environments. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, IEEE, v. 68, n. 12, p. 11778–11791, 2019. ISSN 19399359.

- LIU, H. et al. Survey of wireless indoor positioning techniques and systems. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)**, IEEE, v. 37, n. 6, p. 1067–1080, 2007.
- MAZUELAS, S. et al. Robust indoor positioning provided by real-time rssi values in unmodified wlan networks. **IEEE Journal on Selected Topics in Signal Processing**, v. 3, p. 821–831, 2009. ISSN 19324553.
- NAVIDI, W.; MURPHY, W. S.; HEREMAN, W. Statistical methods in surveying by trilateration. **Computational Statistics and Data Analysis**, v. 27, n. 2, p. 209–227, 1998. ISSN 01679473.
- OLIVEIRA, L. F. B. M. D.; COSTA, J. D. F.; FONTES, J. V. D. C. An extended comparison of rssi-based position estimation algorithms for lora devices. In: **2021 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)**. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1–6. ISSN 2642-7389.
- RUSLI, M. E. et al. An improved indoor positioning algorithm based on rssi-trilateration technique for internet of things (iot). In: . [S.l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2016. p. 12–77. ISBN 9781509024278.
- SANCHEZ-IBORRA, R. et al. Performance Evaluation of LoRa Considering Scenario Conditions. **Sensors (Basel, Switzerland)**, MDPI, v. 18, n. 3, p. 772, mar 2018. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29510524https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5876541/>>.
- SHI, H. A new weighted centroid localization algorithm based on rssi. **International Conference on Information and Automation**, p. 1–5, 06 2012.
- SHI, Y. et al. Research on Three-Dimensional Localization Algorithm for WSN Based on RSSI. In: XU, Z. et al. (Ed.). **Cyber Security Intelligence and Analytics**. Cham: Springer International Publishing, 2020. p. 1048–1055. ISBN 978-3-030-15235-2.
- SHIN, B. et al. Lte rssi based vehicular localization system in long tunnel environment. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, IEEE Computer Society, 2023. ISSN 19410050.
- STOJKOSKA, B. R. et al. Indoor localization of unmanned aerial vehicles based on rssi. In: **IEEE EUROCON 2017 -17th International Conference on Smart Technologies**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 120–125.
- SUBHAN, F.; HASBULLAH, H.; ASHRAF, K. Kalman Filter-Based Hybrid Indoor Position Estimation Technique in Bluetooth Networks. **International Journal of Navigation and Observation**, v. 2013, p. 1–13, 2013. ISSN 1687-5990. Disponível em: <<https://www.hindawi.com/archive/2013/570964/>>.
- TARRÍO, P.; BERNARDOS, A. M.; CASAR, J. R. Weighted least squares techniques for improved received signal strength based localization. **Sensors**, v. 11, n. 9, p. 8569–8592, 2011. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/11/9/8569>>.
- TIEMANN, J.; RAMSEY, A.; WIETFELD, C. Enhanced uav indoor navigation through slam-augmented uwb localization. In: **2018 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–6. ISSN 2474-9133.

WANG, Z. min; ZHENG, Y. The Study of the Weighted Centroid Localization Algorithm based on RSSI. **International Conference on Wireless Communication and Sensor Network**, p. 1–4, 2014.

YUT, L.; FEI, Q.; GENG, Q. Combining zigbee and inertial sensors for quadrotor uav indoor localization. In: **2013 10th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA)**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1912–1916. ISSN 1948-3449.

Zhang, D. et al. Localization technologies for indoor human tracking. In: **2010 5th International Conference on Future Information Technology**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–6.

ZHILIANG, Z.; JINGMIN, G.; JIUHE, W. **Algorithm Based on RSSI for WSN**. Springer International Publishing, 2011. v. 2. 453–460 p. ISBN 9783030152352. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-15235-2\\_139](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-15235-2_139)>.

ZHOU, B. et al. Wi-fi rtt/encoder/ins-based robot indoor localization using smartphones. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), p. 1–13, 1 2023. ISSN 0018-9545.

ZHU, X.; FENG, Y. RSSI-based Algorithm for Indoor Localization. **Communications and Network**, v. 05, p. 37–42, 01 2013.



# Anexos



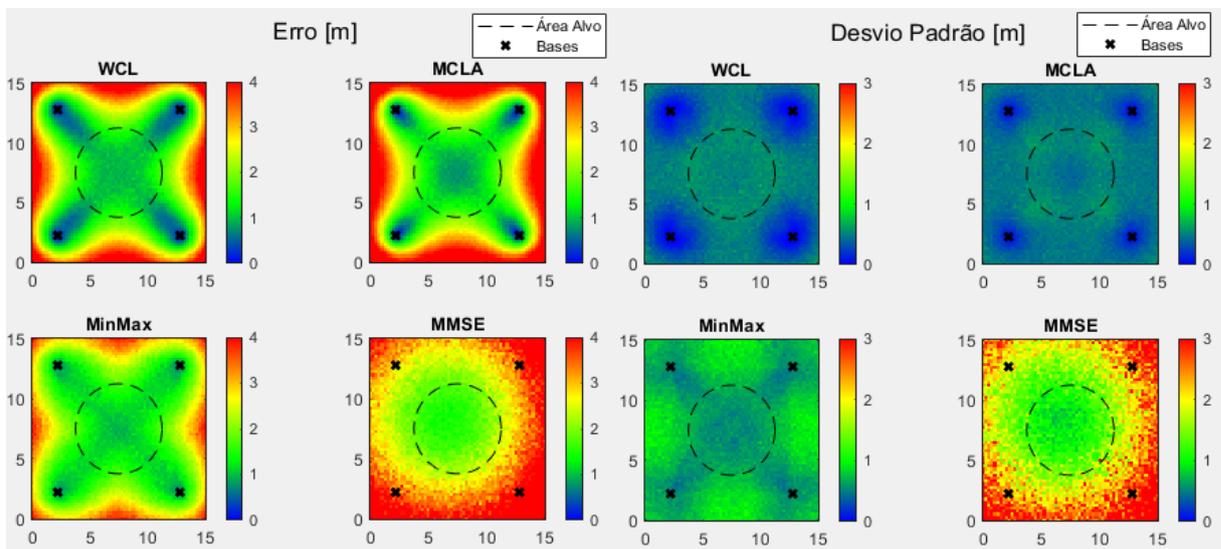
---

# ANEXO A

## Figuras complementares das simulações e dos testes empíricos.

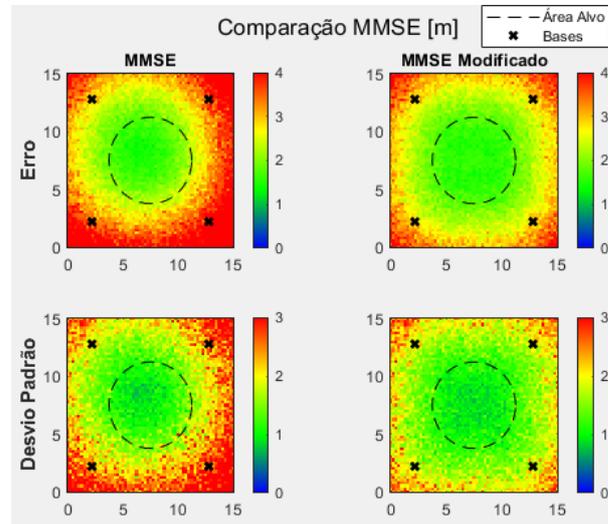
---

Figura 31 – Erro e desvio padrão do modelo de 3 dBi com 4 bases.



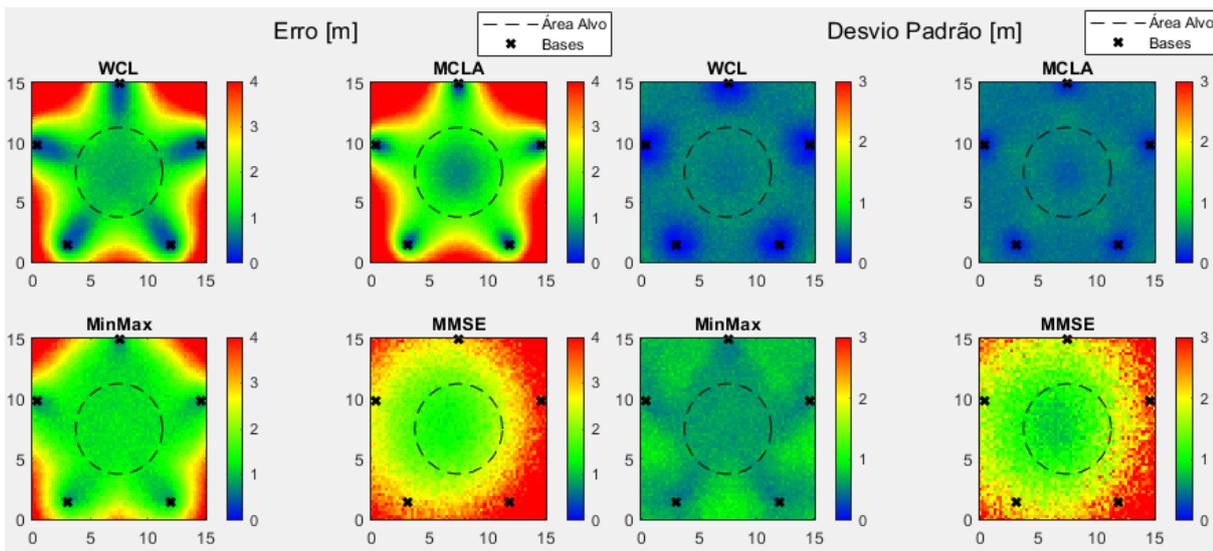
Fonte: Autoria própria

Figura 32 – Erro e desvio padrão do modelo de 3 dBi com 4 bases para o MMSE.



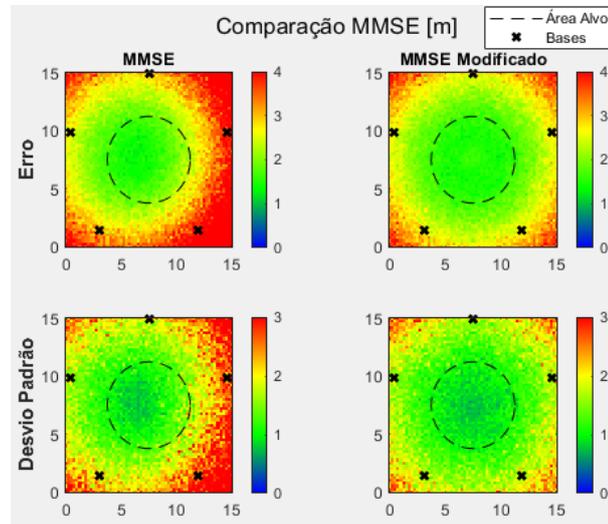
Fonte: Autoria própria

Figura 33 – Erro e desvio padrão do modelo de 3 dBi com 5 bases.



Fonte: Autoria própria

Figura 34 – Erro e desvio padrão do modelo de 3 dBi com 5 bases para o MMSE.



Fonte: Autoria própria

Figura 35 – Teste empírico para 3 bases com antena 5 dBi.



Fonte: Autoria própria

Figura 36 – Teste empírico para 4 bases com antena 5 dBi.



Fonte: Autoria própria