

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

FELIPE TETSUO OHASHI

**AVALIAÇÃO DE QUATRO ALGORITMOS DE TRILATERAÇÃO
BASEADOS EM RSSI CONSIDERANDO A VARIAÇÃO DO
NÚMERO DE NÓS FIXOS**

SÃO CARLOS
2023

FELIPE TETSUO OHASHI

**AVALIAÇÃO DE QUATRO ALGORITMOS DE TRILATERAÇÃO
BASEADOS EM RSSI CONSIDERANDO A VARIAÇÃO DO
NÚMERO DE NÓS FIXOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São Carlos, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. João Vitor de Carvalho Fontes

SÃO CARLOS
2023



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA - CCEMec/CCET

Rod. Washington Luís km 235 - SP-310, s/n - Bairro Monjolinho, São Carlos/SP, CEP 13565-905
Telefone: (16) 33519703 - <http://www.ufscar.br>

DP-TCC-FA nº 36/2022/CCEMec/CCET

Graduação: Defesa Pública de Trabalho de Conclusão de Curso

Folha Aprovação (GDP-TCC-FA)

FOLHA DE APROVAÇÃO

FELIPE TETSUO OHASHI

AValiação de Quatro Algoritmos de Trilateração Baseados em RSSI Considerando a Variação do Número de Nós Fixos

Trabalho de Conclusão de Curso

Universidade Federal de São Carlos – Campus São Carlos

São Carlos, 06 de outubro de 2022

ASSINATURAS E CIÊNCIAS

Cargo/Função	Nome Completo
Orientador	João Vitor de Carvalho Fontes
Membro da Banca 1	João Gustavo Pereira da Silva
Membro da Banca 2	Vitor Ramos Franco



Documento assinado eletronicamente por **João Vitor de Carvalho Fontes, Docente**, em 06/10/2022, às 17:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **João Gustavo Pereira da Silva, Docente**, em 06/10/2022, às 17:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Vitor Ramos Franco, Docente**, em 10/10/2022, às 09:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufscar.br/autenticacao>, informando o código verificador **0836502** e o código CRC **C82DE318**.

[Gostaria de dedicar este trabalho à minha família que me apoiou em todo o meu percurso, sempre me incentivando em minhas escolhas.]

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à minha família, principalmente aos meus pais, que me incentivaram em todo o meu percurso, me apoiaram nos tempos de dificuldade e são responsáveis pela pessoa que me tornei hoje.

Aos professores que foram responsáveis pela minha formação como engenheiro, com desafios e histórias de vida. Ao meu orientador, Prof. João Vitor, que me deu todo o amparo no desenvolvimento deste trabalho, especialmente nesses tempos difíceis de pandemia.

À República Quase Dez que esteve comigo por toda a minha graduação, diante de todas as dificuldades me proporcionou uma família em São Carlos, que estarei levando para o resto da vida.

"O homem é tão grande quanto a medida de seu pensamento."

Napoleon Hill

RESUMO

Veículos aéreos não tripulados (VANTs) são máquinas que estão ganhando grande destaque nos tempos recentes, deixando de ser um recurso, que antes era restrito à aplicações militares, e passando a ter presença no cotidiano da sociedade. Esta mudança se deve ao avanço da tecnologia e à disseminação do IoT, *internet of things*, que está tornando os dispositivos cada vez mais conectados. A utilização de drones para localização possui uma diversa variedade de aplicações, estando presente em áreas como a militar, agrícola, governamental, entre outras. Dentre as técnicas mais populares de estimativa de distâncias, o RSSI, *received signal strenght indicator*, destaca pela sua ampla aplicação em tecnologias sem fio convencionais e sua presença em equipamentos de alta disponibilidade e fácil e aquisição. O presente trabalho propõe uma simulação utilizando o método RSSI com quatro tipos de algoritmos de trilateração a fim de verificar a precisão e acurácia em cenários com diversas quantidades de nós âncoras, de onde são gerados os sinais, para a determinação de uma posição desejada. Utilizando o software MATLAB, foram gerados mapas de calor para cada método de trilateração a fim de se obter o comportamento dos parâmetros escolhidos para uma análise qualitativa do resultados. Com os dados gerados pela simulação, foram calculadas as médias de erro e desvio padrão possibilitando um julgamento geral dos desempenhos dos algoritmos. Realizando a comparação dos resultados extraídos, foi possível levantar pontos fortes e fracos de cada método aplicado ao RSSI, abrindo a possibilidade de se indicar a utilização de um dos quatro algoritmos para cenários específicos, mas não excluindo a necessidade de validar empiricamente as performances apresentadas. A partir dos três parâmetros escolhidos foi possível estimar aplicações em IoT nos quais cada método de triangulação teria um melhor desempenho. Supondo-se, por exemplo, situações nas quais haveria a necessidade de uma maior acurácia para uma aplicação em localização de drones ou um cenário onde o tempo de processamento da posição fosse determinante.

Palavras-chave:RSSI. Trilateração. VANT. Localização.

ABSTRACT

Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) are machines of great importance these days, as they are no longer a resource that was previously limited to military use but are beginning to exist in the everyday life of society. This change is due to the advancement of technology and the prevalence of his IoT (Internet of Things), where devices are becoming more and more connected. The use of drones for tracking has a variety of applications that exist in fields such as military, agriculture, and government. RSSI is one of the most popular distance estimation techniques, notable for its wide use in traditional wireless technologies and its presence in highly available and easy acquisition devices. The current work proposes a simulation using the RSSI, Received Signal Strength Indicator, method using four different trilateration algorithms to determine the number of anchor nodes from which signals are generated to determine the desired position. Check precision and accuracy in different scenarios. Heatmaps were generated for each trilateration method using MATLAB software to obtain the behavior of the parameters selected for qualitative analysis of the results. Using the data generated by the simulations, mean errors and standard deviations medium values were calculated to allow a general assessment of the algorithm's performance. Comparing the extracted results allowed the identification the strengths and weaknesses of each method applied to RSSI, opening the possibility of using any one of the four algorithms in certain scenarios, although the presented It does not obviate the need to empirically verify the performances presented. From the three chosen parameters, it was possible to estimate IoT applications in which each triangulation method would have a better performance. Assuming, for example, situations in which there would be a need for greater accuracy for an application in drone location or a scenario where the position processing was crucial.

Keywords: RSSI, trilateration, UAV, localization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquemática de triangulação	19
Figura 2 – Área definida pelo algoritmo MinMax	20
Figura 3 – Centroeide definido pelo algoritmo MCLA	21
Figura 4 – Fluxograma das etapas do algoritmo computacional	25
Figura 5 – Médias dos erros e desvios padrões para o triângulo [m]	27
Figura 6 – Médias dos erros e desvios padrões para o pentágono [m]	27
Figura 7 – Médias dos erros e desvios padrões para o octágono [m]	28
Figura 8 – Médias dos erros e desvios padrões para o decágono [m]	29
Figura 9 – Mapa do erro para os quatro métodos da configuração triangular [m] .	36
Figura 10 – Mapa do desvio padrão para os quatro métodos da configuração trian- gular [m]	36
Figura 11 – Mapa do erro para os quatro métodos da configuração pentagonal [m] .	37
Figura 12 – Mapa do desvio padrão para os quatro métodos da configuração penta- gonal [m]	37
Figura 13 – Mapa do erro para os quatro métodos da configuração octogonal [m] .	38
Figura 14 – Mapa do desvio padrão para os quatro métodos da configuração octogo- nal [m]	38
Figura 15 – Mapa do erro para os quatro métodos da configuração decagonal [m] .	39
Figura 16 – Mapa do desvio padrão para os quatro métodos da configuração deca- gonal [m]	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Queda percentual dos erros dos algoritmos de trilateração em relação ao triângulo.	29
Tabela 2 – Queda percentual das médias dos desvios padrões algoritmos de trilateração em relação ao triângulo.	29
Tabela 3 – Custo computacional por algoritmo [min]	30

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AOA - Angle of arrival

CSS - Chirp spread spectrum

GPS - Global positioning system

IoT - Internet of things

IoV - Internet of vehicles

LoRa - Long range

LoRaWAN - Long range Wide area network

MCLA - Modified centroid localization algorithm

MinMax - Mínimo e máximo

MMSE - Minimum mean squared error

NB-IoT - Narrow Band - Internet of things

RSSI - received signal strenght indicator

RTT - Round time trip

TDOA - Time difference Of arrival

TOA - Time of arrival

VANT - Veículo aéreo não tripulado

WCL - Weighted centroid localization

LoRaWAN - Long range Wide area network

LoS - loss of signal

LISTA DE SÍMBOLOS

β Fator de ajuste dinâmico para os métodos WCL e MCLA
 σ_p acurciada posiod peso aplicadonos clculos dos algoritmos

d_i Distância entre o nó e os pontos fixos

e_p erro da posição ncora ou representam um dispositivos

max_x Maior valor para x

max_y Maior valor para y

min_x Menor valor para x

min_y Menor valor para y

$RSSI$ valor obtido do RSSI

T Coordenada do nó desconhecido

x_i Coordenada do eixo x

x_{min} Coordenada do eixo x de menor valor

x_{max} Coordenada do eixo x de maior valor

X_{act} Posio real \bar{X}_p Posio obtida

y_i Coordenada do eixo y

y_{min} Coordenada do eixo y de menor valor

y_{max} Coordenada do eixo y de maior valor

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	14
1.1 Objetivos	15
1.2 Estrutura do Texto	16
2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1 Tecnologias de comunicação sem fio	17
2.2 <i>Received Signal Strength Indicator</i> (RSSI)	18
2.3 Métodos de Trilateração	18
2.3.1 Mínimo Erro Quadrático Médio	18
2.3.2 Algoritmo MinMax	19
2.3.3 Modified Centroid Localization Algorithm (MCLA)	20
2.3.4 Weighted Centroid Localization (WCL)	21
3 – ANÁLISE DA SIMULAÇÃO	23
3.1 Método de comparação	23
3.2 Simulação	23
3.2.1 Posicionamento dos nós	24
3.2.2 Etapas	24
4 – RESULTADOS	26
4.1 Resultados da Simulação	26
4.1.1 Triângulo	26
4.1.2 Pentágono	27
4.1.3 Octágono	27
4.1.4 Decágono	28
4.2 Comparações dos Resultados	29
4.2.1 Demanda de processamento Computacional	30
5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO	31
REFERÊNCIAS	33
Apêndices	35
APÊNDICE A – Mapas de calor	36

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, diversos tipos de objetos são conectados à internet por dispositivos sem fio: a *internet of things* (IoT). Dando suporte as redes sem fio para o IoT estão os NB-IoT, *Narrow Band – Internet of Things*, o Sigfox e a LoRaWAN, *Long Range Wide Area Network*, setores típicos para essas aplicações são as *smart cities*, indústria, logística e agricultura (PODEVIJN et al., 2020). Nos tempos recentes, a *Internet of vehicles* (IoV) tem atraído muita atenção tanto da área acadêmica quanto da área de engenharia. No futuro o IoV, terão diversas aplicações para veículos autônomos como sistemas de gerenciamento de tráfego automáticos, piloto automático e aplicações de controle nas quais informações de posicionamento com uma alta acurácia e baixas latências são muito importantes. A utilização de VANTs em modo RTT, round time trip, vinculados com estações de base, pode ser uma alternativa de maior acurácia quando comparada ao GPS (LIU; SHEN, 2018).

Localização por drones possui um amplo leque de aplicações, sendo aplicado na área militar, comercial, governamental e para recreação. Dependendo do contexto, o drone pode ou não participar do processo de localização, pelo fato do sistema não ter sido desenvolvido para esta finalidade ou por ser um drone não cooperativo e potencialmente malicioso. Existem estudos recentes para o uso de sinal de rádio frequência (RF) dos drones para o propósito detecção, classificação, localização e monitoramento de drones. Embora o tema drone ou VANT tem sido muito estudado na literatura, seu relacionamento com antenas tem se mantido pouco explorado (SINHA; YAPICI; GUVENC, 2019).

Alguns métodos de localização baseadas na comunicação e disponíveis para serem usadas nesse contexto são: baseados em intervalo e sem intervalo. Nos métodos baseados em alcance, as quatro técnicas mais populares usados para estimar a distância entre os nós são o time of arrival (TOA), o time difference of arrival (TDOA), o angle of arrival (AOA) e o received signal strength indicator (RSSI) (HAN et al., 2013; LIU et al., 2007).

A ideia básica do TOA é baseada no cálculo do tempo absoluto de chegada dos sinais em um determinado nó. É necessário calcular os tempos de transmissão dos sinais que são emitidos do nó transmissor. Esta técnica requer sincronização de tempo entre os nós. Assim, TOA não é prático em situações reais porque a sincronização de tempo entre nós é difícil de alcançar. TDOA usa a diferença do tempo de chegada entre nós de duas fontes diferentes. TDOA, portanto, não requer sincronização de tempo, mas precisa de computação adicional, adicionando complexidade adicional à implementação de sistemas reais. No AOA, o ângulo do sinal recebido é calculado entre os nós. Os esquemas AOA podem ser considerados caros, pois exigem a integração de hardware adicional para o cálculo do ângulo (ABDELRAOUF et al., 2019; HAN et al., 2013). RSSI é a métrica mais popular para localização, pois é implementado em muitas tecnologias sem fio

convencionais (Wi-Fi, Zigbee, Bluetooth) e está normalmente disponível em equipamento de fácil aquisição (KONINGS et al., 2019).

Tais métodos já foram explorados com as tecnologias de comunicação sem fio UWB (SHI et al., 2018; TIEMANN; RAMSEY; WIETFELD, 2018) e ZigBee (RULLAN-LARA; SALAZAR; LOZANO, 2011; YUT; FEI; GENG, 2013). Apesar de serem bons sistemas de comunicação sem fio, seus receptores e transmissores ainda são pouco acessíveis e caros quando comparados com os da tecnologia WiFi e LoRa (*Long Range*). É possível encontrar também na literatura trabalhos que utilizam comunicação WiFi (STOJKOSKA et al., 2017) mas não é reportada a comparação entre os diferentes algoritmos de estimação de localização.

LoRa usa uma modulação Chirp Spread Spectrum (CSS), na qual chirps, sinais senoidais de frequência linearmente variável e duração fixa, são usados para codificar informações (KLIMIASHVILI; TAPPARELLO; HEINZELMAN, 2020). Os sistemas de comunicação Chirp são usados em operações militares há vários anos devido às suas longas distâncias de comunicação alcançáveis e imunidade a interferências devido à modulação que transmite sinais usando toda a largura de banda do canal. LoRa é uma das melhores opções para cenários que exigem baixo consumo de energia, largura de banda moderada e transmissão de longa distância (HERRERA-TAPIA et al., 2017).

1.1 Objetivos

O objetivo desse trabalho é realizar uma simulação com diferentes métodos de trilateração e observar seus comportamentos com diferentes quantidades de nós, a fim de obter uma conclusão qualitativa do impacto do número de nós para a determinação de posição do método RSSI. Os nós em um cenário onde se procura determinar a posição de um determinado objeto, mais especificamente, no contexto deste trabalho, VANTs, são os dispositivos que farão a emissão e captação dos sinais.

Para que esse objetivo seja atingido os seguintes objetivos específicos foram propostos:

- Implementar a modelagem no software MATLAB de modo a se obter dados dos diferentes métodos de triangulação e seus comportamentos em uma dada área;
- Realizar o tratamento dos dados para que dos diferentes métodos possam ser obtidos seus desempenhos em situações com diferentes quantidades de nós;
- Comparar os resultados obtidos para que se possam obter o impacto da presença de diferentes quantidades de nós para os métodos de triangulação;

1.2 Estrutura do Texto

Esta monografia está organizada da seguinte forma:

- O capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica que contextualiza os métodos de localização espacial, a comparação entre os métodos de triangulação;
- O capítulo 3 descreve a simulação proposta para estudar os diferentes comportamentos das diferentes configurações propostas para esse trabalho;
- O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos e as discussões relacionadas;
- O capítulo 5 contém as conclusões do trabalho;

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fim de se obter os resultados desejados, é necessária a aplicação de diferentes métodos de trilateração e uma nova metodologia de simulação pra contemplar diferentes cenários para o número de nós, assim possibilitando uma possível aplicabilidade dos métodos para um sistema de localização de drones. Esta sessão é dividida na exposição do protocolo de comunicação sem fio para o qual este estudo é direcionado, na apresentação do método de estimativa de posição utilizado para o estudo (RSSI) e os diferentes métodos de trilateração explorados na simulação.

2.1 Tecnologias de comunicação sem fio

Os protocolos de comunicação sem fio desempenham um papel importante na transmissão confiável entre nós sensores e servidores na IoT. LoRa é uma das novas conexões sem fio mais avançadas para atender aos padrões de comunicação de longo alcance e consumo mínimo de energia da internet das coisas (BAGWARI et al., 2022). LoRa é uma nova tecnologia sem fio que opera nas bandas de frequência sub-GHz propostas pela LoRa Alliance. LoRaWAN define o protocolo de comunicação da camada física LoRa e a arquitetura do sistema, projetado para otimizar as redes de longa distância de baixa potência (LPWAN) (KLIMIASHVILI; TAPPARELLO; HEINZELMAN, 2020).

Ao contrário do LoRa, uma rede WiFi ad hoc consiste em vários dispositivos que se comunicam entre si através de WiFi. O WiFi permite alta taxa de transferência, comunicações de curto alcance entre dispositivos e, embora seja usado principalmente para implementar redes de salto único, também pode ser usado para implementar redes ad hoc de vários saltos (KLIMIASHVILI; TAPPARELLO; HEINZELMAN, 2020).

A tecnologia LoRa é atualmente uma das tecnologias mais promissoras, alcançando distâncias de 10 km e alta eficiência energética (SANCHEZ-IBORRA et al., 2018). Herrera-Tapia et al. (2017) demonstraram que a comunicação LoRa melhora significativamente a taxa de entrega de mensagens quando comparada ao WiFi no intervalo de cerca de 40% a 50%. Isso ocorre porque uma faixa de comunicação mais ampla permite não apenas mais contatos, mas também esses contatos terão durações maiores.

De acordo com o trabalho de Klimiashvili, Tapparello e Heinzelman (2020), para arquivos maiores que o tamanho máximo de carga útil do LoRa, podemos concluir que o WiFi tem melhor desempenho em termos de latência. Além disso, o WiFi é mais eficiente em termos de energia quando usadas em distâncias curtas. O LoRa, por outro lado, tende a ser mais eficiente em termos de energia ao transferir arquivos em distâncias além do alcance máximo do WiFi. Por fim, o LoRa reduz a latência ao enviar pequenos pacotes em distâncias além do alcance do WiFi.

Diante desses *trade-offs*, a comunicação LoRa foi escolhida para ser o alvo dos quais os resultados deste trabalho precedem. Isso se deve à necessidade de estender as comunicações, longas distâncias e menos tráfego de pacotes.

2.2 Received Signal Strength Indicator (RSSI)

Um método de multilateração amplamente utilizado de estimativa para uma posição desconhecida usando a posição de um nó de referência é o RSSI, que indica a distância entre o alvo e o nó de referência (BOORANAWONG et al., 2021). Os algoritmos tradicionais de localização baseados em RSSI usam as coordenadas de três nós, que podem ser dispositivos que originariam o sinal, conhecidos e o valor do sinal RSSI entre os pontos desconhecidos e esses três nós conhecidos para obter as coordenadas do ponto desconhecido (LI; WANG; LI, 2019).

Variações no sinal RSSI podem causar erros de posição significativos porque o sinal RSSI varia no ambiente físico e ao longo do tempo devido aos efeitos da propagação em várias direções. Portanto, Resultando em imprecisões e todo um sistema com decisões incorretas (BOORANAWONG et al., 2021).

2.3 Métodos de Trilateração

Os termos lateração, tri e multilateração referem-se à localização de um objeto desconhecido com base em medições de distância de três ou mais nós referência conhecidos. Para localização 2D, o objeto deve estar na interseção de pelo menos três círculos/esferas do nó âncora, conforme mostrado na Figura 1. Idealmente, o objeto deve ser cercado por pelo menos 3 âncoras. À medida que o número de nós de ancoragem aumenta, também aumenta a precisão e a confiabilidade do sistema (FARAH SARI et al., 2022).

2.3.1 Mínimo Erro Quadrático Médio

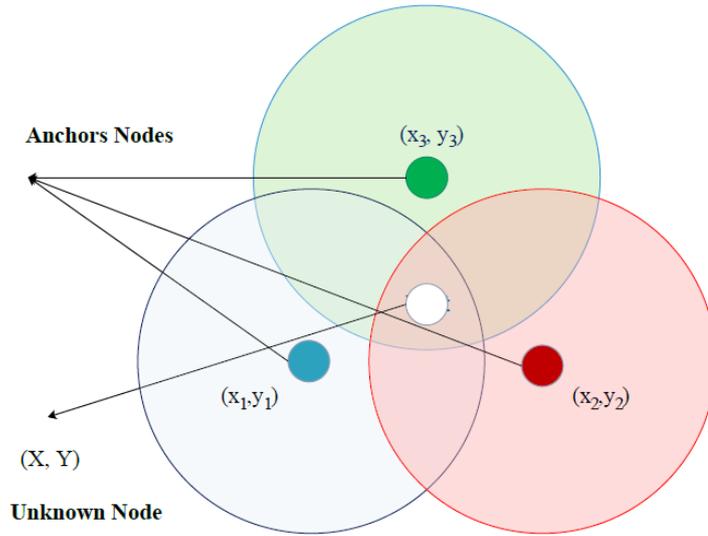
Um dos métodos mais conhecido de se calcular o ponto de maior probabilidade da real posição do nó é utilizando o algoritmo do Mínimo Erro Quadrático Médio, ou MMSE (Minimum Mean Squared Error) (ZHANG et al., 2010).

Considerando (x_i, y_i) pontos fixos e com posições conhecidas e $T(x, y)$ o nó que é desejado descobrir a posição, a distância d_i entre o nó e os pontos fixos pode ser determinada com base na equação 1, onde $i=1, 2, 3, \dots, n-1$.

$$d = \sqrt{((x - x_i)^2 + (y - y_i)^2)} \quad (1)$$

Para o desenvolvimento da Equação 1, com base no método Mínimo Erro Quadrático Médio, responsável por minimizar a variância da estimação do erro, a solução segue a Equação 2 (ZHANG et al., 2010)

Figura 1 – Esquemática de triangulação



Fonte: Farahsari et al. (2022).

$$A\vec{x} = \vec{b} \quad (2)$$

onde,

$$\vec{x} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$A = \begin{bmatrix} 2 * (x_i - x_n) & 2 * (x_i - x_n) \\ \dots & \dots \\ 2 * (x_{n-i} - x_n) & 2 * (x_{n-i} - x_n) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\vec{b} = \begin{bmatrix} x_i^2 - x_n^2 + y_i^2 - y_n^2 + d_n^2 - d_i^2 \\ \dots \\ x_{n-i}^2 - x_n^2 + y_{n-i}^2 - y_n^2 + d_n^2 - d_{n-i}^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.3.2 Algoritmo MinMax

Outro método de triangulação é o algoritmo MinMax. O método pode ser interpretado geometricamente, pois seu cálculo delimita um quadrado para cada módulo da base com sua posição fixa no centro. A distância calculada representa metade do lado deste quadrado, assim, a intersecção de todos os quadrados criados define uma área no espaço de teste e, em seu centro, encontra-se a posição do nó (Figura 2).

Sendo (x_i, y_i) pontos fixos conhecidos, (x, y) a posição do nó desconhecida e d_i a distância entre o nó e os pontos fixos, os vértices do quadrado gerado pela intersecção são representados por (x_{min}, y_{min}) , (x_{max}, y_{min}) , (x_{min}, y_{max}) e (x_{max}, y_{max}) . Os cálculos das coordenadas x_{max} , y_{max} , x_{min} e y_{min} é dado pela equação 6:

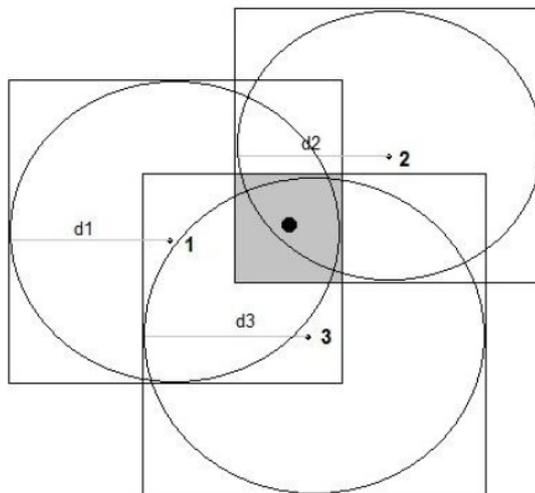
$$\begin{cases} x_{min} = \max(x_i - d_i) \\ x_{max} = \min(x_i + d_i) \\ y_{min} = \max(y_i - d_i) \\ y_{max} = \min(y_i + d_i) \end{cases} \quad (6)$$

Assim, para a definição da posição xy do nó desconhecido, é preciso fazer uma média simples dos valores máximos e mínimos obtidos, conforme a Equação 7 e 8.

$$x = (\max_x + \min_x)/2 \quad (7)$$

$$y = (\max_y + \min_y)/2 \quad (8)$$

Figura 2 – Área definida pelo algoritmo MinMax



Fonte: Monta, Promwong e Kingsakda (2016)

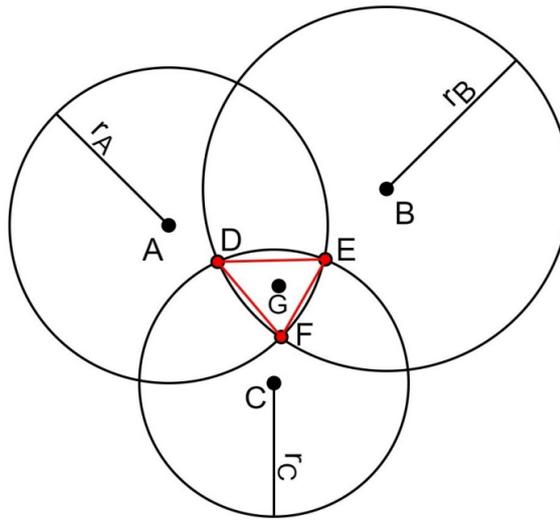
2.3.3 Modified Centroid Localization Algorithm (MCLA)

Na abordagem padrão do algoritmo de localização por centroide, os valores RSSI são tomados para indicar o peso de nós de referência individuais. Os mesmos fatores de ponderação usados para localizar nós sensores. Em geral, com 'n' nós âncoras numerados com pesos d e coordenadas de localização (x_n, y_n) , a fórmula do centroide ponderado pode ser escrita como mostrado na equação 9 por Fan et al. (2013):

$$\begin{cases} x = \frac{\frac{x_1}{d_1} + \frac{x_2}{d_2} + \dots + \frac{x_n}{d_n}}{\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} + \dots + \frac{1}{d_n}} \\ y = \frac{\frac{y_1}{d_1} + \frac{y_2}{d_2} + \dots + \frac{y_n}{d_n}}{\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} + \dots + \frac{1}{d_n}} \end{cases} \quad (9)$$

Conforme observado em Shi et al. (2020), o uso do MCLA melhora a acurácia e a precisão do modelo. Isso ocorre porque as simulações de computacionais mostram que o erro médio diminui com o aumento dos pesos de correção. Portanto, um novo método é criado para integrar as observações dos dois autores e é dado pela equação 10. Nesta equação, β representa um fator de ajuste dinâmico que se correlaciona com as condições do ambiente de teste.

Figura 3 – Centroide definido pelo algoritmo MCLA



Fonte: Oliveira, Costa e Fontes (2020)

$$\begin{cases} x = \frac{\frac{x_1}{d_1^\beta} + \frac{x_2}{d_2^\beta} + \dots + \frac{x_n}{d_n^\beta}}{\frac{1}{d_1^\beta} + \frac{1}{d_2^\beta} + \dots + \frac{1}{d_n^\beta}} \\ y = \frac{\frac{y_1}{d_1^\beta} + \frac{y_2}{d_2^\beta} + \dots + \frac{y_n}{d_n^\beta}}{\frac{1}{d_1^\beta} + \frac{1}{d_2^\beta} + \dots + \frac{1}{d_n^\beta}} \end{cases} \quad (10)$$

2.3.4 Weighted Centroid Localization (WCL)

O método de localização por centroides ponderados (WCL) usa informações do RSSI para localização. Este método usa a posição de cada nó de referência e informações do RSSI sobre a distância entre o alvo e o nó de referência para estimar a posição do alvo. O método WCL aproxima o local de destino calculando o centroide das coordenadas do nó de referência em um local predefinido e atribuindo um peso maior ao nó de referência mais próximo do nó de destino com um peso que é inversamente proporcional ao valor do RSSI (BOORANAWONG et al., 2020).

Com base no que foi proposto por Shi et al. (2020) e Booranawong et al. (2020), um novo modelo foi construído, onde os valores do RSSI são definidos pela ponderação a partir das distâncias calculadas. A posição do nó indefinido é calculada a partir de n nós fixos descritos por (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , ..., (x_n, y_n) e uma variável de ajuste dinâmico β . O cálculo é descrito por 11.

$$\begin{cases} x = \frac{\frac{x_1}{RSSI_1^\beta} + \frac{x_2}{RSSI_2^\beta} + \dots + \frac{x_n}{RSSI_n^\beta}}{\frac{1}{RSSI_1^\beta} + \frac{1}{RSSI_2^\beta} + \dots + \frac{1}{RSSI_n^\beta}} \\ y = \frac{\frac{y_1}{RSSI_1^\beta} + \frac{y_2}{RSSI_2^\beta} + \dots + \frac{y_n}{RSSI_n^\beta}}{\frac{1}{RSSI_1^\beta} + \frac{1}{RSSI_2^\beta} + \dots + \frac{1}{RSSI_n^\beta}} \end{cases} \quad (11)$$

3 ANÁLISE DA SIMULAÇÃO

Neste capítulo são discutidos os critérios selecionados para avaliar o desempenho dos métodos simulados e as etapas percorridas no código do algoritmo para a execução da simulação.

3.1 Método de comparação

As métricas descrevem os parâmetros que afetam a eficiência e o desempenho de um sistema. Para este trabalho foram utilizados para avaliar o desempenho, a precisão, acurácia e custo computacional. As limitações dos dispositivos IoT tornam algumas dessas métricas mais importantes (FARAHSARI et al., 2022). Os parâmetros utilizados para validar a análise dos resultados da simulação foram: acurácia, precisão e demanda de processamento computacional da máquina utilizada para executar o código no *software*.

A acurácia é a proximidade entre a posição medida ou estimada e a posição real. Isso depende de muitos fatores, como ruído, LoS (*loss of signal*) e propagação do sinal. A maioria dos trabalhos se concentra em melhorar a precisão usando filtros de ruído para remover o ruído do sinal e os erros do sistema (FARAHSARI et al., 2022). O erro calculado para a análise é dado pela equação 12.

$$e_p = \|\bar{X}_p - X_{act}\| = \sqrt{(x_p - x_{act})^2 + (y_p - y_{act})^2} \quad (12)$$

onde:

$$\bar{X}_p = (x_p, y_p) = \frac{\sum_{k=1}^N (x_i, y_i)}{n} \quad (13)$$

A precisão é o quão próximo o valor medido está do valor real. A acurácia, por outro lado, é o quão perto as quantidades estão quando medidas repetidamente ao longo do tempo. Isso significa que a distribuição de resultados em vários testes é estreita (FARAHSARI et al., 2022). A precisão no ponto p é dado pela dispersão dos valores obtidos, neste trabalho é representada pelo desvio no ponto.

$$\sigma_p = \frac{\sum_{k=1}^N (X_i - \bar{X}_p)^2}{n} \quad (14)$$

O custo computacional é estimado pelo tempo de processamento da simulação através da Run and Time presente no software MATLAB.

3.2 Simulação

Nesta sessão são descritas algumas das características da parte da simulação deste trabalho

3.2.1 Posicionamento dos nós

Para a realização da simulação foi estipulado um método para o posicionamento dos nós. Considerando o mapa de dimensões sessenta por sessenta, as formas geométricas que caracterizam as configurações, nos quatro cenários, tiveram seu centro definido no meio do mapa na posição (30, 30). A partir deste ponto foi definido um raio de comprimento vinte, que gerou um círculo com diâmetro de quarenta. Ao longo do perímetro deste círculo foram posicionados os nós âncora que deram forma às configurações da simulação, fazendo com que a distância dos nós esteja sempre equidistante do centro, a fim de se ter em todas as situações uma comparação entre as formas utilizadas. O cálculo da posição dos nós foi feito a partir do ângulo e comprimento do raio, inserindo-se os ângulos com referência ao centro do círculo.

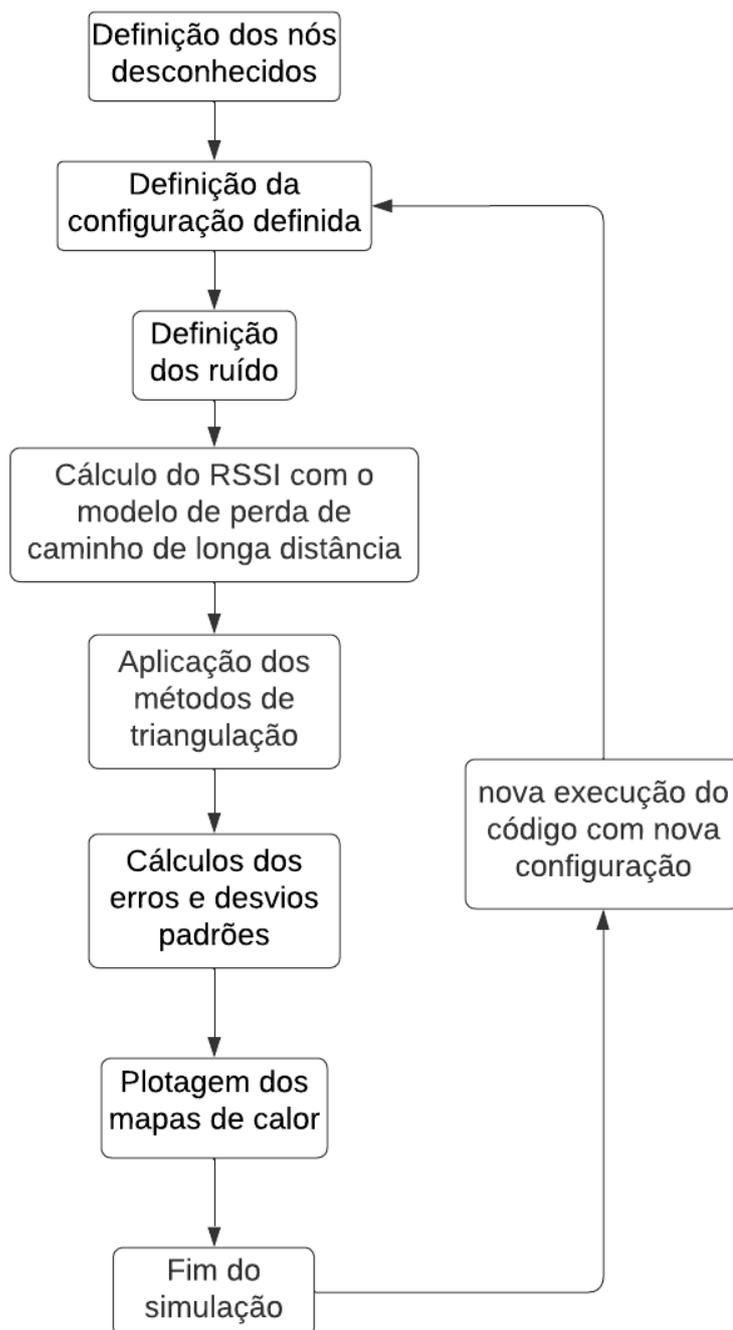
Os mapa de calor foi constituído a partir da definição de nós posicionados com a distância de 1 metro entre eles, cada um seu respectivo valor de erro e desvio padrão.

3.2.2 Etapas

Nesta sessão estão enumeradas e sequenciadas as etapas pelo qual o algoritmo percorre durante a sua execução.

1. Definição do ruído para cálculo do RSSI;
2. Determinação das posições dos nós âncora;
3. Cálculo do RSSI com o modelo de perda de caminho de longa distância;
4. Cálculo da distância entre os nós desconhecidos presentes em uma área estipulada em sessenta por sessenta e o nós fixos;
5. Cálculo de posição usando algoritmos de trilateração: MMSE, MinMax, WCL e MCLA;
6. Cálculo da exatidão e da precisão para toda a extensão da área;
7. Repetição dos cálculos para as quatro disposições propostas, triangular, pentagonal, octogonal e decagonal;
8. Geração dos mapas de calor para a exatidão e precisão dos quatro algoritmos;
9. Cálculo da complexidade computacional;

Figura 4 – Fluxograma das etapas do algoritmo computacional



Fonte: Próprio autor.

4 RESULTADOS

No presente capítulo apresentam-se os resultados adquiridos com a simulação proposta neste trabalho.

4.1 Resultados da Simulação

Para cada configuração dos nós foram gerados um mapa de calor para o erro e para desvio padrão destes erros ilustrando o desempenho de cada método de trilateração utilizado.

Com os dados gerados com a simulação foram plotados gráficos com a média do erro para cada uma das quatro configurações estudadas. Para cada uma foram gerados dois gráficos um para o erro e outro para o desvio padrão, comparando os métodos. As figuras dos mapas geradas pela simulação podem ser encontradas no APÊNDICE A.

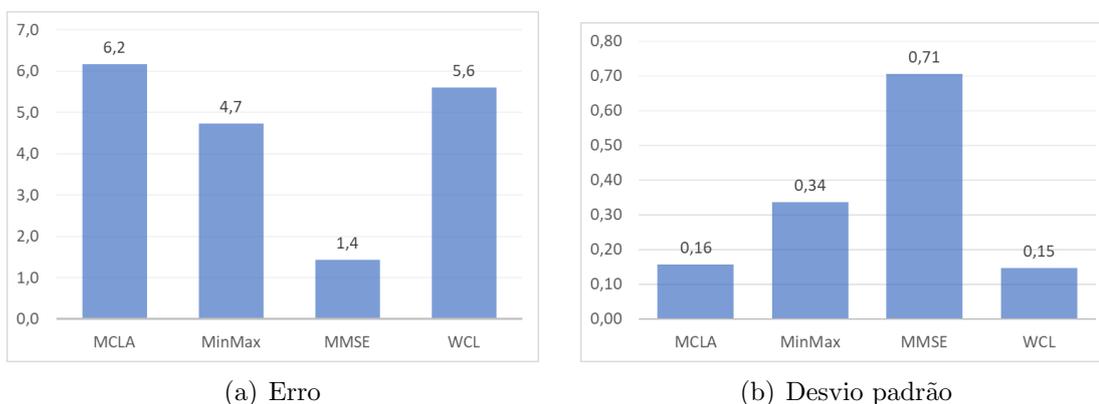
4.1.1 Triângulo

Quando se observam os mapas da Figura 9 o MMSE se mostra com os valores de erro mais uniformes dentre os quatro métodos, a qualidade dos outros métodos está concentrada na região entre os nós base, passando a ter valores bastante elevados a medida que se distanciam deste perímetro. O MinMax tem os melhores resultados para o erro na região dos nós, com uma cobertura mais assimétrica.

Para o desvio padrão os algoritmos MCLA e WCL ilustrados na Figura 10 possuem a melhor uniformidade dos valores na extensão da área estudada, os melhores resultados estão concentrados na região dos nós, mas todo o mapa se mostra com números abaixo ou iguais a 0,5m. Para o MMSE o desvio padrão aumenta ao se distanciar do centro chegando a casa dos 2m nas extremidades do mapa. Para o MinMax o mapa apresenta uma simetria espelhada com a divisão na vertical do mapa, os valores se mostram abaixo de 0,5m, com algumas áreas específicas chegando próximo de 0,7m.

Analisando os métodos para esta disposição, o MMSE apresentou o menor erro médio como observado no Figura 5, inversamente a média do desvio padrão para este método foi o maior como visto no Figura 5, tendo como os melhores valores obtidos pelos métodos MCLA e WCL.

Figura 5 – Médias dos erros e desvios padrões para o triângulo [m]

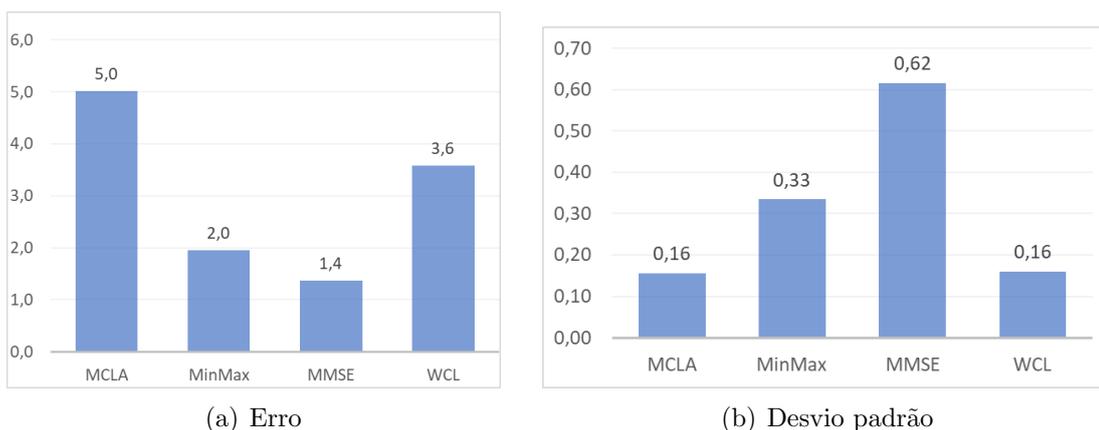


Fonte: Elaborada pelo autor.

4.1.2 Pentágono

Ao se analisar os mapas das Figuras 11 e 12, os comportamentos se mantêm ao que foi observado na configuração triangular, no entanto, é possível observar que com o aumento de nós âncora houve um aumento das regiões com alta precisão e alta acurácia. No caso do desvio padrão do método MMSE, a precisão se mostra ter uma melhora, mas a abrangência destes valores não se mostram seguir a disposição dos nós âncora aparentando mostra uma cobertura triangular, rotacionada quando comparada à configuração anterior, de três nós base.

Figura 6 – Médias dos erros e desvios padrões para o pentágono [m]



Fonte: Elaborada pelo autor.

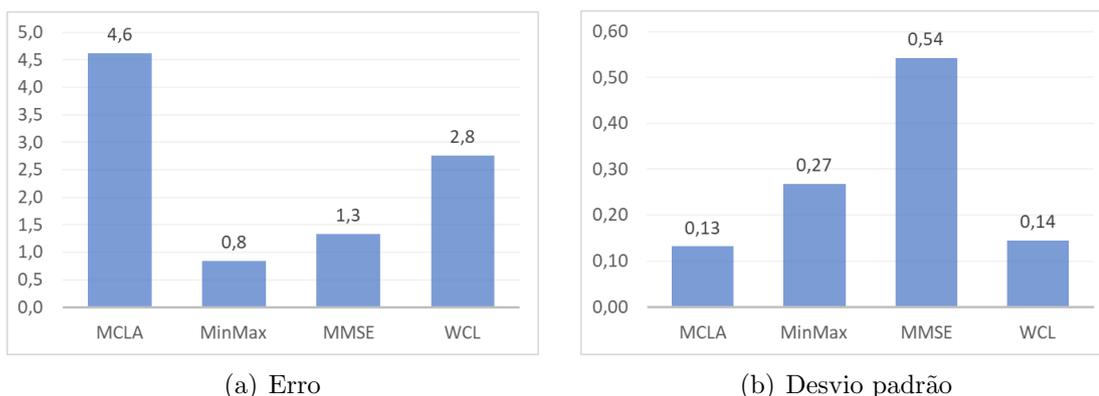
4.1.3 Octágono

Nesta configuração a média do erro do algoritmo MinMax passa a ser a menor, chegando a 0,8m, o MMSE passa ter uma média 1,3m o WCL 2,8m e o MCLA 4,6m. O desvio padrão visto na Figura 7 passa a ter o MCLA como a melhor média, com o valor

de 0,13m, ultrapassando a precisão do WCL que teve um decréscimo de 9,7% em relação à configuração pentagonal variando de 0,16m para 0,14m.

Uma maior uniformidade foi apresentada para esta disposição de nós, como visto nos mapas da Figura 14, para o RSSI, especificamente para os métodos MCLA e WCL juntamente com um aumento no qualidade dos valores. A tendência observada para o pentágono se manteve, exibindo nos mapas uma maior área central com valores abaixo de 1m.

Figura 7 – Médias dos erros e desvios padrões para o octágono [m]

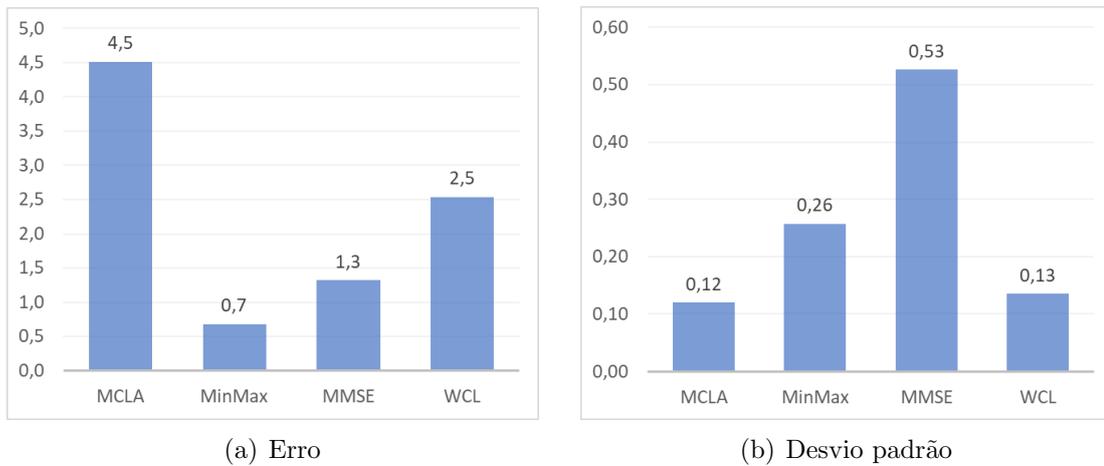


Fonte: Elaborada pelo autor.

4.1.4 Decágono

O comportamento da configuração decagonal apresenta uma evolução semelhante ao octágono, com o método MinMax com a menor média, chegando a 0,7m, e o MCLA com o valor médio de desvio padrão igual a 0,12m. Percentualmente, as variações na acurácia não foram da mesma grandeza quando comparado ao pentágono e octágono ao se comparar com os resultados do triângulo. Classificando do melhor método para o pior método em termos de média, observa-se na Figura 8 o MinMax, MMSE, WCL e MCLA que terminou em 4,5m. De maneira oposta, como é possível notar na Figura 8, a sequência para o desvio padrão se deu por MCLA, WCL, MinMax e MMSE, com 0,12m, 0,13m, 0,26m e 0,53m, respectivamente.

Figura 8 – Médias dos erros e desvios padrões para o decágono [m]



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2 Comparações dos Resultados

Utilizando como referência a configuração triangular, o método MinMax teve a maior redução percentual do erro médio, caindo de 4,7m para 2,0m, seguido do WCL, que foi reduzido em 36,0% indo de 5,6m para 3,6, como demonstrado na Tabela 1. Ao se analisar o desvio padrão, o MMSE se mantém com o maior valor médio de 0,62m. No entanto, a redução percentual, observada na Tabela 2, em relação à configuração triangular foi a maior, caindo em 12,8%. O método WCL sofreu um aumento de 8,3%, em termos absolutos sendo de 0,01, e os demais tiveram variações inferiores de 1%.

Tabela 1 – Queda percentual dos erros dos algoritmos de trilateração em relação ao triângulo.

	MCLA	MinMax	MMSE	WCL
pentágono	18,7%	58,7%	4,0%	36,0%
octágono	25,2%	82,3%	6,9%	50,8%
decágono	26,9%	85,8%	7,5%	54,7%

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 2 – Queda percentual das médias dos desvios padrões algoritmos de trilateração em relação ao triângulo.

	MCLA	MinMax	MMSE	WCL
pentágono	0,9%	0,8%	12,8%	-8,3%
octágono	16,2%	20,7%	23,2%	1,4%
decágono	23,9%	23,7%	25,5%	8,2%

Fonte: Elaborada pelo autor.

O método MMSE apresentou a melhor uniformidade do erro do RSSI pela área estipulado para a simulação como é ilustrado nos mapas das Figuras 9, 11, 13 e 15. Analisando os quatro algoritmos utilizados o MMSE apresentou a melhor precisão quando utilizado poucos nós âncoras, no entanto, essa vantagem é descompensada com o resultados conseguidos para o desvio padrão que apresenta uma má distribuição da acurácia no mapa. Inversamente proporcional ao MMSE os três outros métodos demonstraram melhor acurácia nas regiões externas ao perímetro entre os nós, embora, a precisão só apresente resultados de valores semelhantes ao MMSE dentro da região entre os nós âncora.

Quando se atêm à evolução dos valores médios de erro, a medida que há o aumento no números de nós, O algoritmo MinMax apresentou a maior evolução percentual, passando a ter a melhor média a partir das configurações octogonal. Dos métodos aplicados a progressão que expressou a menor progressão percentual foi o MMSE.

Dos quarto métodos aplicados, o método MCLA obteve a média mais alta em todas as configurações analisadas. Seu desvio padrão foi equiparado ao WCL, ambos com os melhores valores, sendo que o MCLA teve uma evolução de 23,9%, como visto na Tabela 2, que fez com que sua média ficasse 0,01m menor em relação ao WCL na configuração decagonal, indicando que o aumento de nós presentes no sistema favorece uma melhora dos resultados de seu algoritmo.

O WCL na disposição triangular possuía o valor de 5,6m, demonstrado na Figura 5, o segundo pior valor de média, em comparação com a disposição com o maior número de nós, seu valor teve uma melhora de 54,7%, sendo o algoritmo com a segunda maior evolução, sendo inferior apenas ao MinMax, na qual a porcentagem de redução foi de 85,8. A precisão não teve uma variação consistente chegando a 8,2% quando na configuração de dez nós chegando a ter uma aumento de valor do triângulo para o pentágono, mas foi o método com os melhores números de desvio padrão junto ao MCLA.

4.2.1 Demanda de processamento Computacional

Tabela 3 – Custo computacional por algoritmo [min]

MCLA	MinMax	MMSE	WCL
7,4	1,2	3,9	7,0

Fonte: Elaborada pelo autor.

Analisando a Tabela 3, o algoritmo com o menor custo computacional é o MinMax, com custo 3,16 vezes maior, o MMSE foi segundo menor custo computacional. Os métodos MCLA e WCL foram os mais onerosos com 7,4 e 7,0 minutos, respectivamente.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO

Os resultados apresentados neste trabalho sugerem que a quantidade e posicionamento dos nós âncora interferem nos dados obtidos e, conseqüentemente, afetam a qualidade da precisão e acurácia do RSSI e interferindo na viabilidade de um algoritmo.

Nota-se que os algoritmos demonstraram diferentes comportamentos de acordo com a quantidade de nós utilizada, o MMSE não necessita de muitos nós para de ser alta acurácia, quando comparado aos outros algoritmos, conseguindo ter valores semelhantes para todo o mapa simulado no estudo. Em contrapartida, passa a apresentar uma maior imprecisão a medida que o nó calculado se afasta do centro do mapa. Este método se mostrou não ter ganhos muito expressivos com um aumento do número de nós âncora. No caso de uma situação onde se faça uso deste método para localizar um VANT, seria possível ter uma boa acurácia com poucos nós.

O WCL, MCLA e MinMax tiveram a acurácia dependente da posição dos nós, possuindo resultados melhores dentro do perímetro em que foram posicionados os nós âncoras, ao contrário do MMSE. Para a precisão o resultado foi oposto, apresentando valores para pontos externos ao perímetro interno não muito diferentes ao externo. Quando se analisa estes métodos para aplicações em IoT, áreas controladas onde o objeto não extrapole para regiões fora do perímetro entre os nós fixos seriam as que aplicações mais recomendáveis. Outro ponto a se levar em consideração é que WCL o MCLA necessitariam de dispositivos com um desempenho de processamento mais robusto para terem um tempo de resposta eficiente se comparado ao MMSE e, principalmente, ao MinMax.

Com o aumento do número de nós o algoritmo MinMax apresentou grande melhora na acurácia, indicando ser mais efetivo com uma grande quantidade de nós âncoras, já que com a formação decagonal apresentou o menor valor médio para o erro. O MCLA se mostrou o pior dos métodos utilizados e se mostrando inferior ao WCL, tanto quando comparando a precisão quanto com o ganho ao se adicionarem nós âncoras, sendo que apresentaram uma precisão semelhante.

Em um contexto em que o tempo de execução do algoritmo fosse o critério determinante o método MinMax seria a melhor opção, dado que a precisão e acurácia tiveram os melhores resultados dentro da área entre nós conhecidos.

Assim sendo, mesmo com os objetivos deste trabalho contemplados, propõe-se algumas sugestões de trabalhos futuros como:

- Realizar novas simulações com outros algoritmos, pensando em consolidar o desempenho apresentado pelos métodos utilizados no estudo atual;
- Estudar novas configurações de nós e dimensões de mapa;

- Realizar um estudo em campo, que possibilite validar os dados obtidos com a simulação do estudo atual;

REFERÊNCIAS

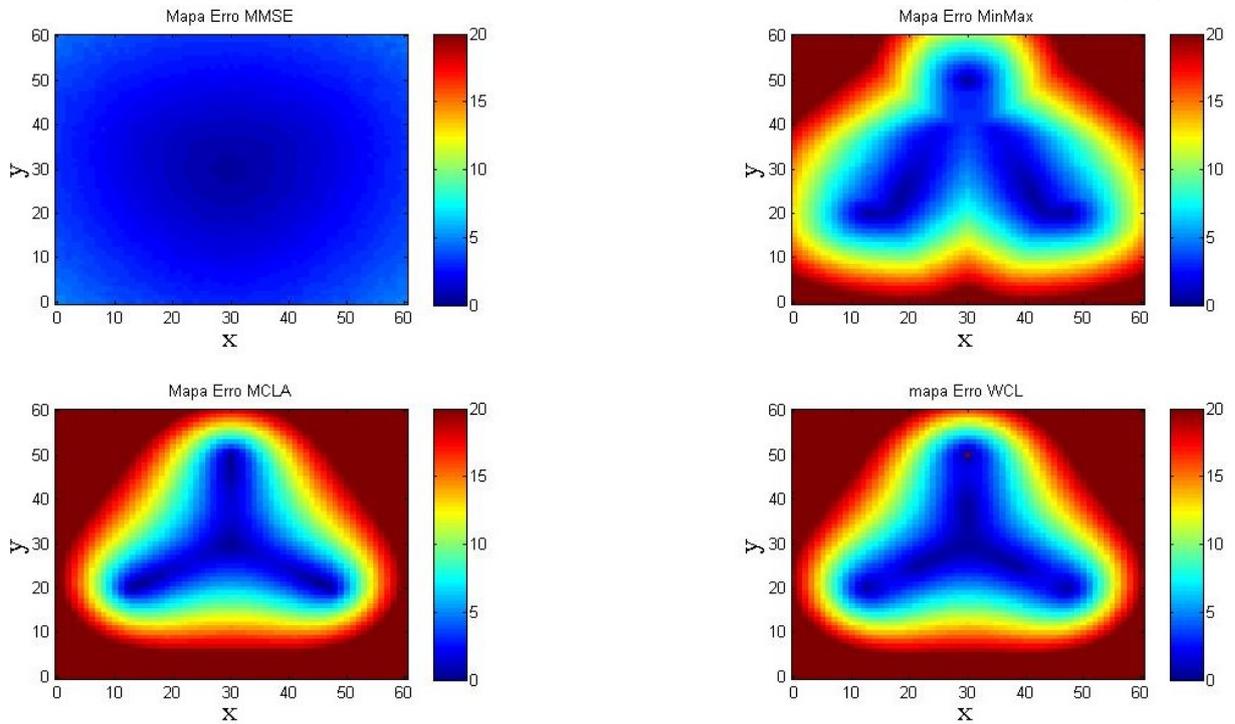
- ABDELRAOUF, A. et al. The Study of Perpendicular Distance Approach Based on RSSI for Indoor Localization. **Proceedings of 2019 International Conference on Innovative Trends in Computer Engineering, ITCE 2019**, IEEE, n. February, p. 208–213, 2019.
- BAGWARI, S. et al. Lora based metrics evaluation for real-time landslide monitoring on iot platform. **IEEE Access**, v. 10, p. 46392–46407, 2022.
- BOORANAWONG, A. et al. RSSI-Based Indoor Localization Using Multi-Lateration with Zone Selection and Virtual Position-Based Compensation Methods. **IEEE Access**, v. 9, n. 46223, p. 46223–46239, 2021. ISSN 21693536.
- BOORANAWONG, A. et al. Enhancement of RSSI-Based Localization Using an Extended Weighted Centroid Method With Virtual Reference Node Information. **Journal of Electrical Engineering and Technology**, Springer Singapore, v. 15, n. 4, p. 1879–1897, 2020. ISSN 20937423. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s42835-020-00457-y>>.
- FAN, H. et al. Weighted centroid localization algorithm based on improved RSSI ranging. **Proceedings - 2013 International Conference on Mechatronic Sciences, Electric Engineering and Computer, MEC 2013**, IEEE, p. 544–547, 2013.
- FARAHSAARI, P. S. et al. A Survey on Indoor Positioning Systems for IoT-Based Applications. **IEEE Internet of Things Journal**, IEEE, v. 9, n. 10, p. 7680–7699, 2022. ISSN 23274662.
- HAN, G. et al. Localization algorithms of Wireless Sensor Networks: A survey. **Telecommunication Systems**, v. 52, n. 4, p. 2419–2436, 2013. ISSN 10184864.
- 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.
- KLIMIASHVILI, G.; TAPPARELLO, C.; HEINZELMAN, W. Lora vs. wifi ad hoc: A performance analysis and comparison. In: **2020 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)**. [S.l.: s.n.], 2020. p. 654–660.
- KONINGS, D. et al. Device-Free Localization Systems Utilizing Wireless RSSI: A Comparative Practical Investigation. **IEEE Sensors Journal**, v. 19, n. 7, p. 2747–2757, 2019. ISSN 1530437X.
- LI, K.; WANG, H.; LI, S. A mobile node localization algorithm based on an overlapping self-adjustment mechanism. **Information Sciences**, Elsevier Inc., v. 481, p. 635–649, 2019. ISSN 00200255. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ins.2018.12.006>>.
- LIU, H. et al. Survey of wireless indoor positioning techniques and systems. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Part C: Applications and Reviews**, v. 37, n. 6, p. 1067–1080, 2007. ISSN 10946977.
- LIU, Y.; SHEN, Y. UAV-Aided high-accuracy relative localization of ground vehicles. **IEEE International Conference on Communications**, IEEE, v. 2018-May, p. 0–5, 2018. ISSN 15503607.

- MONTA, S.; PROMWONG, S.; KINGSAKDA, V. Evaluation of ultra wideband indoor localization with trilateration and min-max techniques. **2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, ECTI-CON 2016**, IEEE, n. 3, p. 10–13, 2016.
- OLIVEIRA, L. F. B. M. de; COSTA, J. D. F.; FONTES, J. V. de C. **An Extended Comparison of RSSI-based Position Estimation Algorithms for LoRa Devices**. 2020.
- PODEVIJN, N. et al. Compass Aided TDoA Tracking in LoRaWAN networks. In: **2020 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)**. IEEE, 2020. p. 1420–1424. ISBN 978-1-7281-0244-3. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9110210/>>.
- RULLAN-LARA, J. L.; SALAZAR, S.; LOZANO, R. UAV real-time location using a Wireless Sensor Network. **Proceedings of the 8th Workshop on Positioning Navigation and Communication 2011, WPNC 2011**, p. 18–23, 2011.
- SANCHEZ-IBORRA, R. et al. Performance evaluation of lora considering scenario conditions. **Sensors (Switzerland)**, v. 18, n. 3, 2018. ISSN 14248220.
- 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.
- SHI, Z. et al. A nano-quadcopter formation flight system based on UWB indoor positioning technology. **13th International Conference on Computer Science and Education, ICCSE 2018**, IEEE, n. Iccse, p. 787–790, 2018.
- SINHA, P.; YAPICI, Y.; GUVENC, I. Impact of 3D antenna radiation patterns on TDOA-based wireless localization of UAVs. **arXiv**, IEEE, p. 614–619, 2019.
- STOJKOSKA, B. R. et al. Indoor localization of unmanned aerial vehicles based on RSSI. **17th IEEE International Conference on Smart Technologies, EUROCON 2017 - Conference Proceedings**, n. July, p. 120–125, 2017.
- TIEMANN, J.; RAMSEY, A.; WIETFELD, C. Enhanced UAV indoor navigation through SLAM-Augmented UWB Localization. **2018 IEEE International Conference on Communications Workshops, ICC Workshops 2018 - Proceedings**, IEEE, p. 1–6, 2018.
- YUT, L.; FEI, Q.; GENG, Q. Combining Zigbee and inertial sensors for quadrotor UAV indoor localization. **IEEE International Conference on Control and Automation, ICCA**, p. 1912–1916, 2013. ISSN 19483449.
- ZHANG, D. et al. Localization technologies for indoor human tracking. **2010 5th International Conference on Future Information Technology, FutureTech 2010 - Proceedings**, IEEE, n. 60903153, 2010.

Apêndices

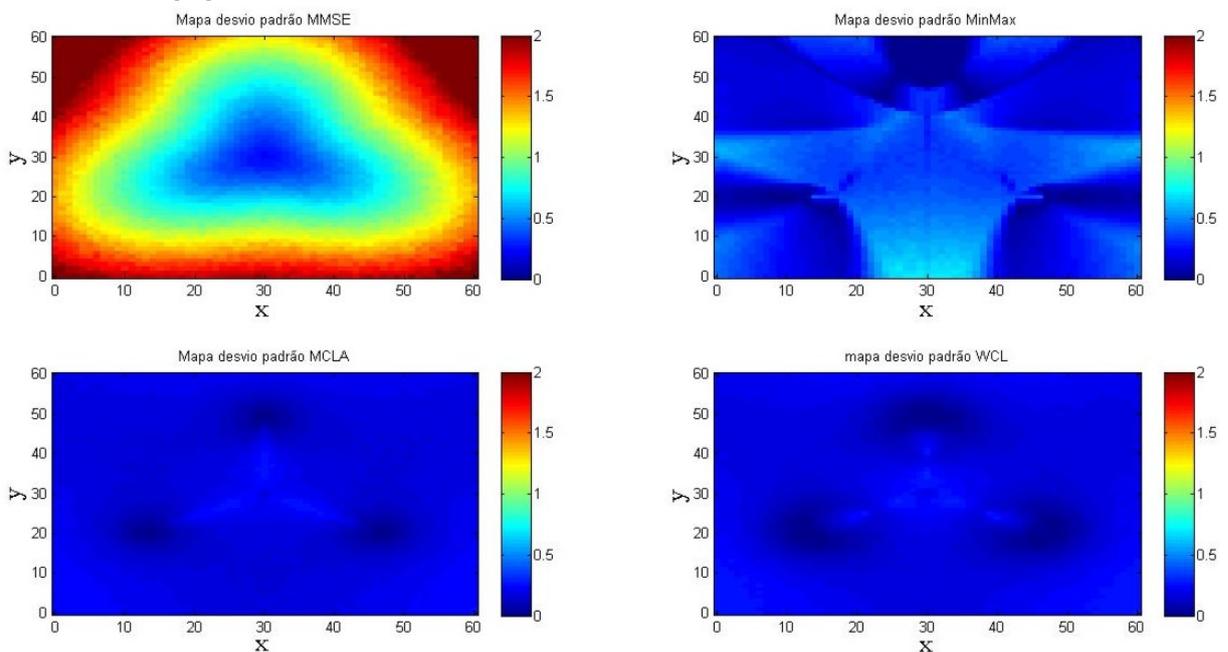
APÊNDICE A – Mapas de calor

Figura 9 – Mapa do erro para os quatro métodos da configuração triangular [m]



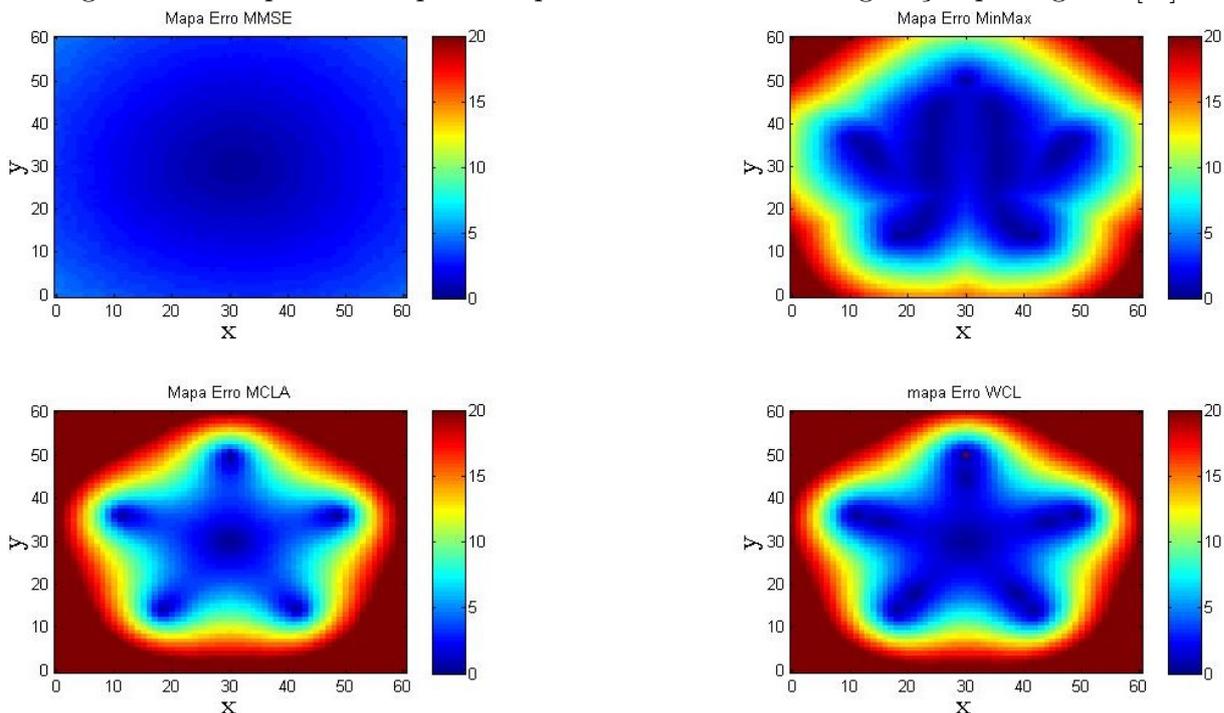
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 10 – Mapa do desvio padrão para os quatro métodos da configuração triangular [m]



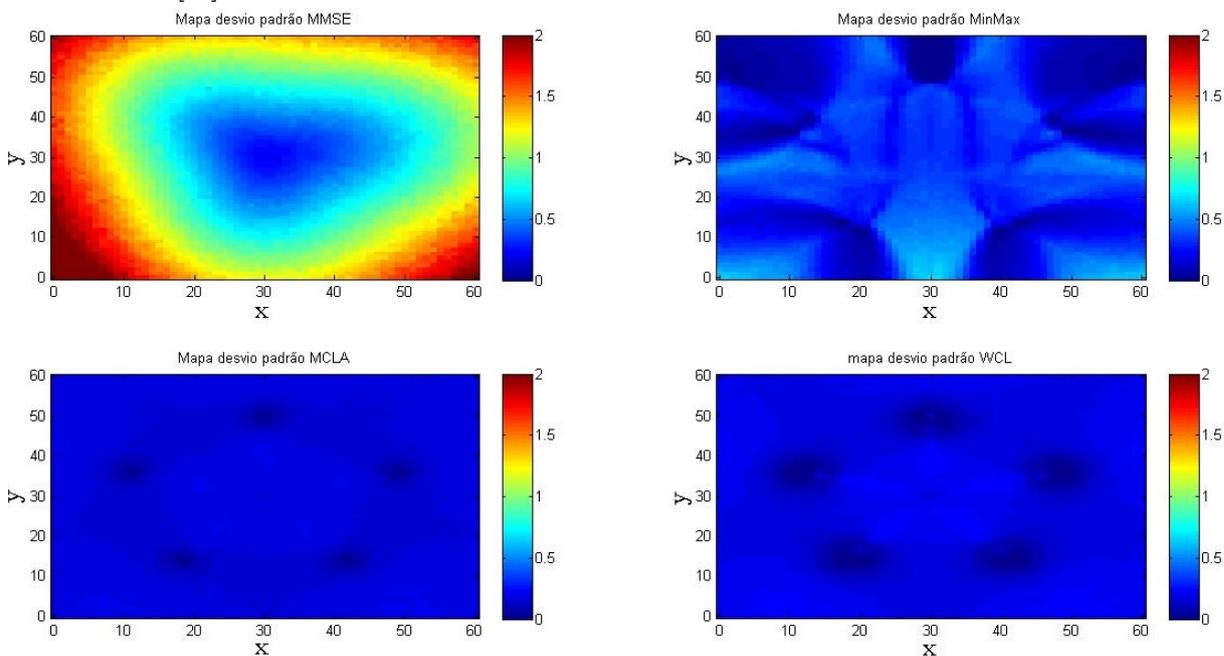
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 11 – Mapa do erro para os quatro métodos da configuração pentagonal [m]



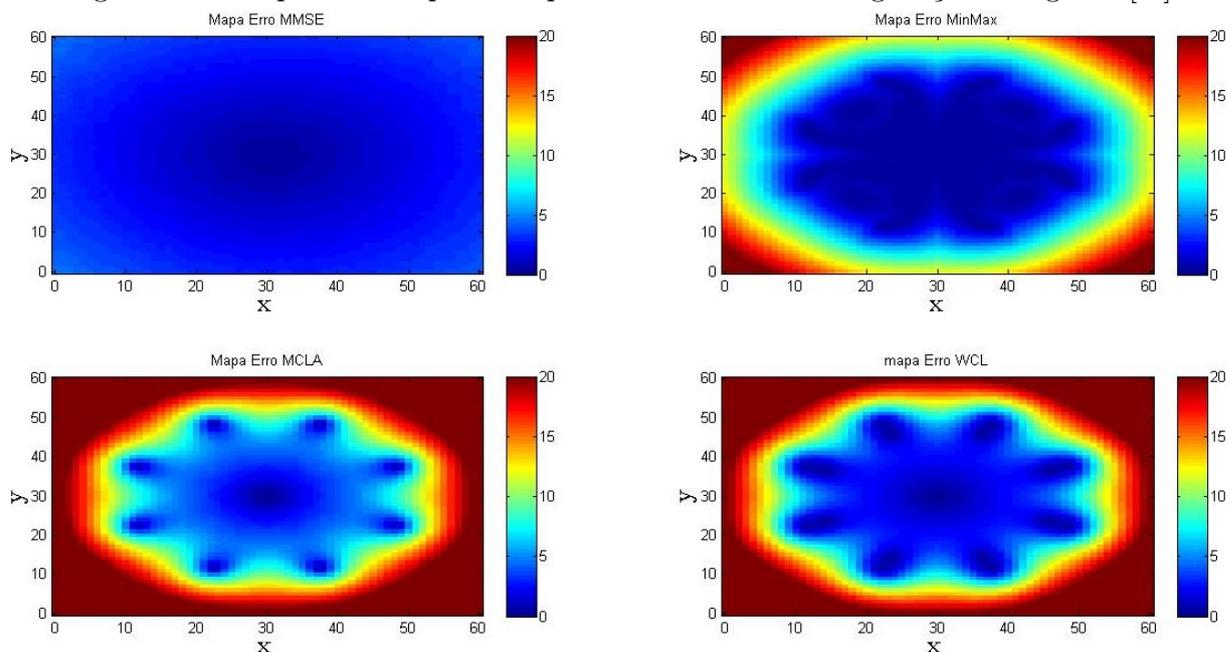
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 12 – Mapa do desvio padrão para os quatro métodos da configuração pentagonal [m]



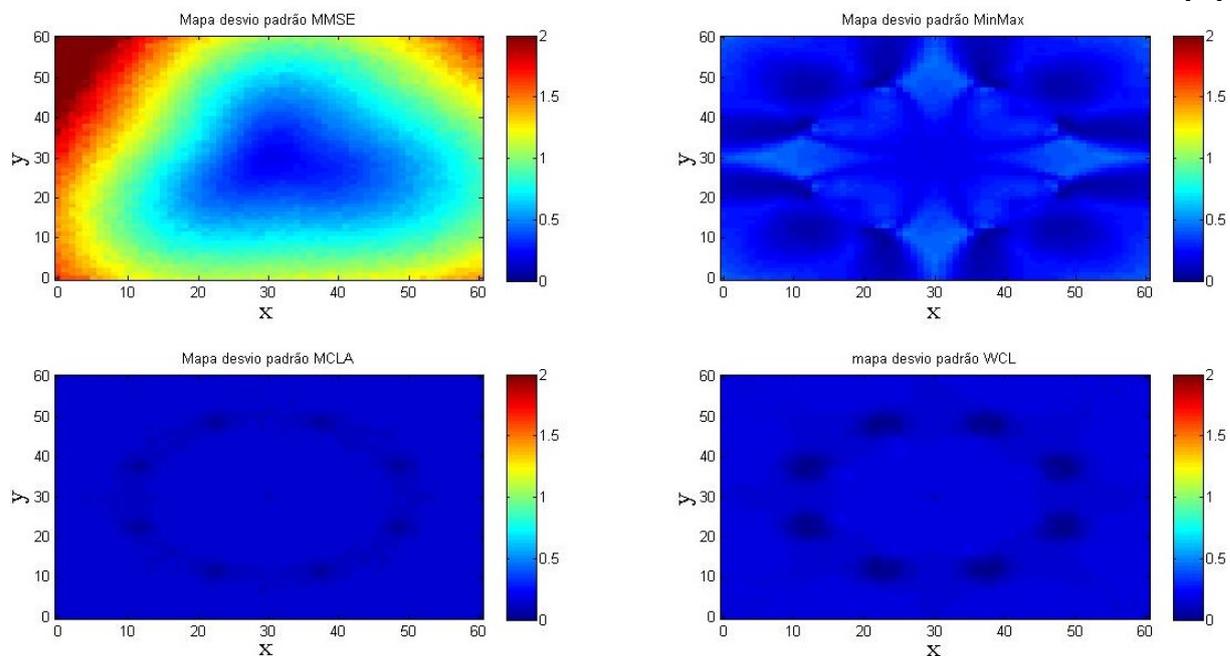
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 13 – Mapa do erro para os quatro métodos da configuração octogonal [m]



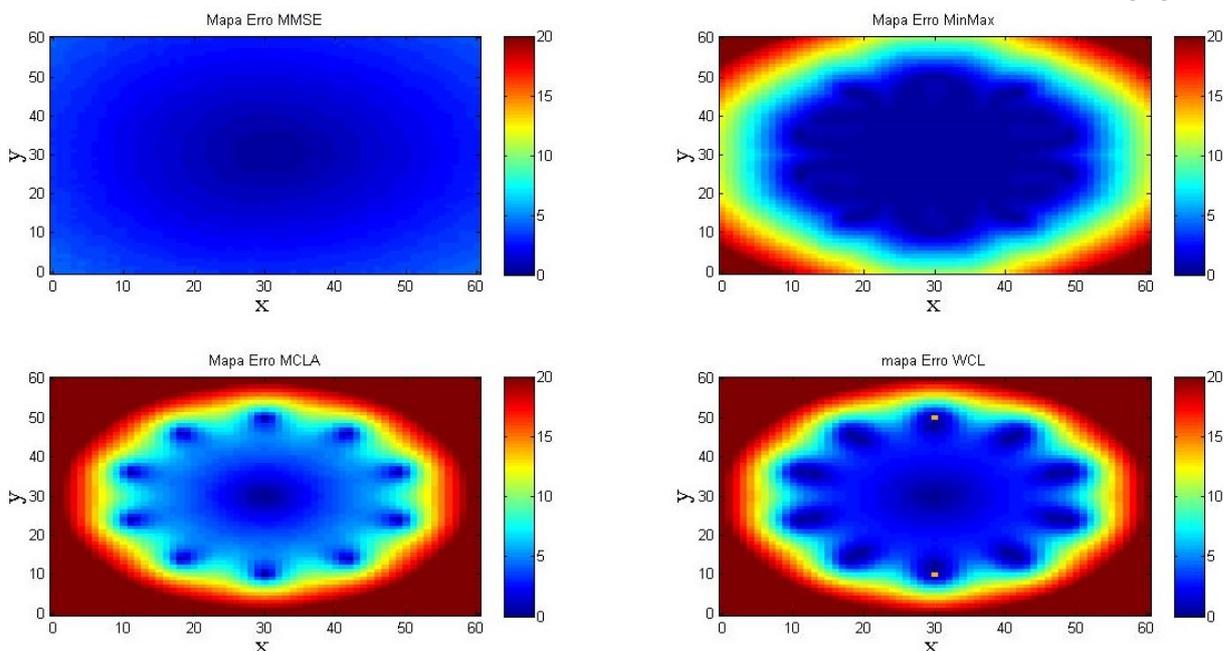
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 14 – Mapa do desvio padrão para os quatro métodos da configuração octogonal [m]



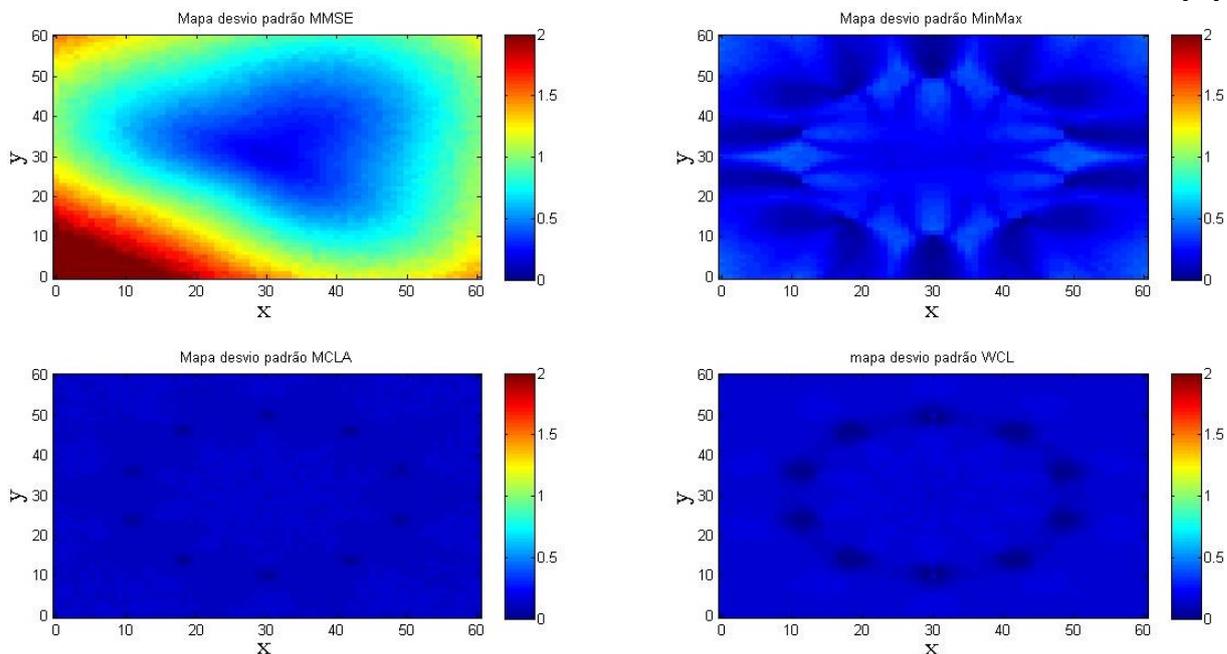
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 15 – Mapa do erro para os quatro métodos da configuração decagonal [m]



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 16 – Mapa do desvio padrão para os quatro métodos da configuração decagonal [m]



Fonte: Elaborada pelo autor.