



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
UNIDADE ARAXÁ**

PABLO JOANNES DIAS

**ANÁLISE DO MÉTODO RSSI EM TRIANGULAÇÃO DE BEACONS BLUETOOTH
LOW ENERGY**

ARAXÁ/MG

2025

PABLO JOANNES DIAS

**ANÁLISE DO MÉTODO RSSI EM TRIANGULAÇÃO DE BEACONS BLUETOOTH
LOW ENERGY**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Automação Industrial.

Orientador: Prof. Me. Willian Martins Leão
Coorientador: Prof. Me. Carlos Dias da Silva Junior

ARAXÁ/MG

2025



FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC Nº 3 / 2025 - DELMAX (11.57.05)

Nº do Protocolo: 23062.010423/2025-75

Araxá-MG, 22 de fevereiro de 2025.

COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA DE AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL / ARAXÁ

**ATA DE DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE ENGENHARIA DE
AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL DO ALUNO: PABLO JOANNES DIAS**

Às **13:30** horas do dia **12 de fevereiro de 2025**, reuniu-se, no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG - Campus Araxá, a Comissão Examinadora de Trabalho de Conclusão de Curso para julgar, em exame final, o trabalho intitulado **Análise do método RSSI em triangulação de Beacons Bluetooth Low Energy** como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Automação Industrial. Abrindo a sessão, o(a) Presidente da Comissão, prof. **Willian Martins Leão**, após dar a conhecer aos presentes o teor das Normas Regulamentares do Trabalho Final, passou a palavra ao(à) candidato(a), **Pablo Joannes Dias**, para apresentação de seu trabalho. Após a apresentação, seguiu-se a arguição pelos examinadores, com a respectiva defesa do candidato. Ultimada a arguição, a Comissão se reuniu, sem a presença do candidato e do público, para julgamento e expedição do resultado final.

Após a reunião da Banca Avaliadora, o candidato foi considerado: **APROVADO**, obtendo nota final de: **87/100 (oitenta e sete pontos)**.

O resultado final foi comunicado publicamente ao candidato(a) pelo Presidente da Comissão. O aluno abaixo assinado(a) declara que o trabalho ora identificado é da sua autoria material e intelectual, excetuando-se eventuais elementos, tais como passagens de texto, citações, figuras e datas, desde que as mesmas identifiquem claramente a fonte original, explicitando as autorizações obtidas dos respectivos autores, quando necessárias. Declara ainda, neste âmbito, não violar direitos de terceiros.

Nada mais havendo a tratar, o Presidente encerrou os trabalhos e lavrou a presente ATA, que será assinada por todos os membros participantes da Comissão Examinadora.

Araxá, 12 de fevereiro de 2025

Assinado digitalmente.

(Assinado digitalmente em 23/02/2025 16:02)
FREDERICO DUARTE FAGUNDES
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DELMAX (11.57.05)
Matrícula: 1107165

(Assinado digitalmente em 24/02/2025 22:42)
HENRIQUE JOSE AVELAR
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DELMAX (11.57.05)
Matrícula: 392234

(Assinado digitalmente em 23/02/2025 08:12)
MATEUS ANTUNES OLIVEIRA LEITE
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
CAAAX (11.57.01)
Matrícula: 3138470

(Assinado digitalmente em 23/02/2025 16:08)
WILLIAN MARTINS LEAO
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DELMAX (11.57.05)
Matrícula: 1291584

RESUMO

Os sistemas de posicionamento desempenham um papel fundamental no cotidiano, facilitando a navegação e a localização em diversos contextos. No entanto, em ambientes *indoor*, esses sistemas enfrentam desafios significativos, como a propagação de sinais e interferências, que limitam sua eficácia. Sistemas de posicionamento *indoor*, quando bem implementados, oferecem vantagens notáveis, como a capacidade de localizar pessoas e objetos com precisão, além de possibilitar aplicações em diversas áreas, como logística, segurança e automação residencial.

Nesse contexto, este trabalho propõe-se a investigar e analisar como o *RSSI* (*Received Signal Strength Indicator*), que mede a potência do sinal transmitido via *Bluetooth Low Energy* (*BLE*), pode ser utilizado para sistemas de posicionamento *indoor*. Para isso, foram realizados experimentos em um ambiente controlado, utilizando dispositivos *BLE* baseados no *ESP32-C3* e programados com a plataforma *ESP-IDF*. Protótipos de beacons foram desenvolvidos, com encapsulamentos projetados em software de modelagem *3D* e fabricados em impressora *3D* para garantir a integridade dos componentes durante os testes.

Os testes incluíram a captura de *RSSI*, comunicação *UART* entre dispositivos e envio de dados para um servidor *Node.js* via *websocket*. Para calibrar o sistema, foram realizados testes de linha de visão, determinando os parâmetros "*A*" (referência de *RSSI* a 1 metro) e "*m*" (coeficiente de perda de propagação) do modelo *log-distância*. Em seguida, o sistema foi avaliado em uma sala controlada, com três beacons fixos posicionados em coordenadas pré-definidas e um beacon móvel deslocado entre 11 pontos distintos.

Os resultados mostraram que o *RSSI* apresenta um ruído significativo, atribuído a fatores como reflexões de sinal, interferências de dispositivos eletrônicos e características do ambiente, como superfícies metálicas. Apesar desses desafios, técnicas como a remoção de outliers, o cálculo do centroide e a utilização de médias bidirecionais demonstraram ser eficazes para mitigar parte desses efeitos e melhorar a confiabilidade das estimativas de posição.

Concluiu-se que, apesar dos desafios, o uso de *RSSI* em sistemas de posicionamento *indoor* é viável, porém sugere-se a implementação de outras técnicas, como *Angle of Arrival* (*AoA*) e *Angle of Departure* (*AoD*), além da aplicação de filtros como o *Filtro de Kalman* ou o *Filtro de Partículas*, para reduzir o ruído e aumentar a precisão do sistema. Também é

recomendável explorar a trilateração *3D*, que considera a altura (eixo *z*), e otimizar a arquitetura do sistema para reduzir o consumo de energia. Essas melhorias têm o potencial de tornar os sistemas de posicionamento *indoor* baseados em *BLE* mais robustos e aplicáveis em cenários reais.

Palavras chave: *BLE, indoor, RSSI.*

ABSTRACT

Positioning systems play a fundamental role in everyday life, facilitating navigation and positioning in various contexts. However, in indoor environments, these systems face significant challenges, such as signal propagation and interference, which limit their effectiveness. Indoor positioning systems, when well implemented, offer notable advantages, such as the ability to locate people and objects with precision, in addition to enabling applications in various areas, such as logistics, security and home automation.

In this context, this work aims to investigate and analyze how the RSSI (Received Signal Strength Indicator), which measures the power of the signal transmitted via Bluetooth Low Energy (BLE), can be used for indoor positioning systems. For this purpose, experiments were carried out in a controlled environment, using BLE devices based on ESP32-C3 and programmed with the ESP-IDF platform. Beacon prototypes were developed, with encapsulations designed in 3D modeling software and manufactured in a 3D printer to ensure the integrity of the components during testing.

The tests included RSSI capture, UART communication between devices, and sending data to a Node.js server via websocket. To calibrate the system, line-of-sight tests were performed, determining the parameters "A" (RSSI reference at 1 meter) and "m" (propagation loss coefficient) of the log-distance model. The system was then evaluated in a controlled room, with three fixed beacons positioned at predefined coordinates and a mobile beacon displaced between 11 distinct points.

The results showed that RSSI presents significant noise, attributed to factors such as signal reflections, interference from electronic devices, and environmental characteristics, such as metal surfaces. Despite these challenges, techniques such as outlier removal, centroid calculation, and the use of bidirectional averages have proven to be effective in mitigating some of these effects and improving the reliability of position estimates.

It was concluded that, despite the challenges, the use of RSSI in indoor positioning systems is feasible, but it is suggested that other techniques be implemented, such as Angle of Arrival (AoA) and Angle of Departure (AoD), in addition to the application of filters such as the Kalman Filter or the Particle Filter, to reduce noise and increase the accuracy of the system. It is also recommended to explore 3D trilateration, which considers height (z-axis), and to optimize the system architecture to reduce power consumption. These improvements

have the potential to make BLE-based indoor positioning systems more robust and applicable in real-world scenarios.

Keywords: *BLE*, indoor, *RSSI*.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Classificação das técnicas de posicionamento indoor.....	17
Figura 2 - Diagrama de blocos sistema de automação residencial.....	21
Figura 3 - Diagrama de blocos funcionais ESP32-C3.....	22
Figura 4 - Posicionamento usando o método de trilateração.....	28
Figura 5 - Protótipos dos beacons.....	31
Figura 6 - Ilustrando teste SoC funcionando como gateway.....	31
Figura 7 - Conexão dos pinos entre BMW e BM para comunicação UART.....	32
Figura 8 - Ilustração da sequência de dados UART-Websocket.....	33
Figura 9 - Ilustração do RSSI, UART E WEBSOCKET.....	33
Figura 10 - Ilustração do teste para determinação de “A”.....	34
Figura 11 - Ilustração do teste para determinação de “m”.....	35
Figura 12 - Ilustração do teste de posição.....	36
Figura 13 - Ilustração do teste de posição.....	37
Figura 14 - Beacon BM instalado sobre um suporte estofado.....	38
Figura 15 - Localização dos pontos de medição e beacons fixos.....	38
Figura 16 - Configuração espacial do ambiente experimental.....	39
Figura 17 - Posicionamento dos beacons em banquetas.....	41
Figura 18 - Comparativo dos valores de RSSI bidirecionais.....	42
Figura 19 - Valores de RSSI bidirecionais em diferentes distâncias, com a linha de média RSSI.....	44
Figura 20 - Posicionamento dos beacons FIXO e BM no chão.....	47
Figura 21 - Variação de sinal RSSI em medições próximas ao chão.....	47
Figura 22 - Variação do RSSI para o Ponto 1 com média móvel.....	48
Figura 23 - Posições Estimadas vs Real para Ponto 1.....	49
Figura 24 - Posições Estimadas vs Real para Ponto 2.....	50
Figura 25 - Posições Estimadas vs Real para Ponto 3.....	50
Figura 26 - Posições Estimadas vs Real para Ponto 4.....	51

Figura 27 - Posições Estimadas vs Real para Ponto 5.....	51
Figura 28 - Posições Estimadas vs Real para Ponto 6.....	52
Figura 29 - Posições Estimadas vs Real para Ponto 8.....	52
Figura 30 - Posições Estimadas vs Real para Ponto 9.....	53
Figura 31 - Posições Estimadas vs Real para Ponto 10.....	53
Figura 32 - Posições Estimadas vs Real para Ponto 11.....	54
Figura 33 - Posições Estimadas vs Real para Ponto 12.....	54
Figura 34 - Posições estimadas válidas e centroide para ponto 1.....	55
Figura 35 - Posições estimadas válidas e centroide para ponto 2.....	56
Figura 36 - Posições estimadas válidas e centroide para ponto 3.....	56
Figura 37 - Posições estimadas válidas e centroide para ponto 4.....	57
Figura 38 - Posições estimadas válidas e centroide para ponto 5.....	57
Figura 39 - Posições estimadas válidas e centroide para ponto 6.....	58
Figura 40 - Posições estimadas válidas e centroide para ponto 8.....	58
Figura 41 - Posições estimadas válidas e centroide para ponto 9.....	59
Figura 42 - Posições estimadas válidas e centroide para ponto 10.....	59
Figura 43 - Posições estimadas válidas e centroide para ponto 11.....	60
Figura 44 - Posições estimadas válidas e centroide para ponto 12.....	60
Figura 45 - Ângulo de abertura do SoC no ponto 8.....	61

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1 - Comparação de tecnologias de posicionamento indoor.....	17
Tabela 1 - Características dos métodos de posicionamento indoor.....	19
Tabela 2 - Coordenadas dos pontos medidos no plano xy - BM.....	39
Tabela 3 - Coordenadas no plano xy - FIXOs.....	40
Tabela 4 - Cálculos dos valores médios de “m” obtidos para cada distância.....	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GPS	Global Positioning System
BLE	Bluetooth Low Energy
RSSI	Received Signal Strength Indicator
PA	Pontos de acesso
SoC	System on a chip
ToA	Tempo de Chegada
TDoA	Diferença de Tempo de Chegada
AoA	Ângulo de Chegada / Angle of Arrival
AoD	Ângulo de Partida / Angle of Departure
UWB	Ultra-Wideband
WSN	Wireless Local Networks
WLAN	Wireless Local Area Network
RFID	Radio Frequency Identification Device
NFC	Near Field Communication
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
SLEEP	Modo de espera
MAE	Erro médio absoluto
RMSE	Erro médio quadrático
FK	Filtro de Kalman
E/S	Entrada e Saída
IoT	Internet das Coisas
CPU	Central Processing Unit
IDS	Intrusion Detection System
CSV	Valores Separados por Vírgula (do inglês Comma Separated Values)

LISTA DE SÍMBOLOS

D	Distância entre o transmissor e o receptor.
A	Valor do sinal RSSI medido a uma distância de referência de um metro, em dBm.
m	Expoente de perda de propagação no modelo de path loss.
BC_1	Beacon móvel.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1. TECNOLOGIAS, MÉTODOS E TÉCNICAS PARA SISTEMAS DE POSICIONAMENTO.....	15
2.2. BLUETOOTH LOW ENERGY (BLE).....	19
2.3. SYSTEM-ON-A-CHIP (SoC).....	20
2.4. BEACON BLE.....	23
2.5. RECEIVED SIGNAL STRENGTH INDICATION (RSSI).....	24
2.5.1. CÁLCULO DA DISTÂNCIA UTILIZANDO O RSSI.....	25
2.6. FILTRO DE KALMAN APLICADO NO RSSI.....	26
2.7. TRILATERAÇÃO.....	27
3. METODOLOGIA.....	30
3.1. TESTE DE COMUNICAÇÃO E COLETA DE DADOS.....	31
3.1.1. TESTE WEBSOCKET E UART.....	32
3.1.2. TESTE DE CAPTURA DE RSSI VIA BLE.....	33
3.1.3. TESTE RSSI, UART E WEBSOCKET.....	33
3.2. TESTE DE LINHA DE VISÃO.....	34
3.3. ESTIMATIVA DE POSIÇÃO.....	35
3.3.1. TESTE EM SALA CONTROLADA.....	37
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	41
4.1. DETERMINAÇÃO DO PARÂMETRO “A”.....	41
4.2. DETERMINAÇÃO DO PARÂMETRO “m”.....	43
4.3. INFLUÊNCIA DA ALTURA.....	46
4.4. RESULTADOS TESTE EM SALA CONTROLADA.....	48
5. CONCLUSÕES.....	62
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64

1. INTRODUÇÃO

O *Global Positioning System (GPS)* tem sido utilizado amplamente em aplicações em ambientes externos, e é hoje o sistema de navegação mais popular mundialmente (KHUDHAIR, 2016, p. 9), porém sua eficácia é drasticamente reduzida em espaços fechados ou perto de estruturas altas, que geram restrições, como sombras e perturbações de múltiplos caminhos, desafiando a recepção de sinais de satélite (AZIZ, Muhammad Irfan, 2018). Diante desse desafio, torna-se inviável a utilização do GPS em ambientes fechados (*indoor*) por exemplo (KHUDHAIR, 2016).

Dessa forma, a busca a fim de melhorar a precisão de sistemas de posicionamento *indoor* tem se tornado um tema importante, especialmente com o uso de *Bluetooth Low Energy (BLE)* e *beacons* (KE, 2018). *Beacons* são dispositivos compactos que emitem sinais de baixa intensidade por meio da tecnologia *Bluetooth Low Energy (BLE)* e representam uma revolução nas aplicações de geolocalização, encontrando destaque especialmente em ambientes *indoor*.

Atualmente, há uma diversidade de aplicações para rastreamento e posicionamento que fazem uso da tecnologia *BLE* através de *beacons*. Entre essas aplicações, destaca-se o rastreamento de pacientes em lares de idosos, bem como serviços de mapas internos, que auxiliam os usuários a encontrarem suas posições dentro de um edifício (NOERTJAHYANA, 2017).

Outra aplicação relevante é o rastreamento de dispositivos móveis e o gerenciamento de energia em ambientes domésticos, permitindo maior eficiência no uso de recursos (KE, 2018). Além disso, a tecnologia *BLE* tem sido utilizada para sinalização em cruzamentos, proporcionando acessibilidade para deficientes visuais por meio de alertas e informações transmitidas via *beacon* (SHIN, 2022).

No contexto do varejo, a tecnologia *BLE* é empregada no envio de ofertas de marketing personalizado aos clientes nas proximidades de lojas, otimizando estratégias comerciais. Além disso, os *beacons* facilitam a navegação *indoor* de pessoas com deficiência visual, oferecendo direções e informações espaciais adaptadas às suas necessidades (SILVA, 2020).

A geolocalização em ambientes complexos, como campi universitários, estádios e aeroportos, também se beneficia do uso de *beacons* para rastreamento de pessoas perdidas,

garantindo maior segurança e eficiência na localização. Ademais, essa tecnologia tem sido aplicada no rastreamento e controle de idosos, deficientes ou pacientes da família no ambiente domiciliar, promovendo maior monitoramento e autonomia para indivíduos em situação de vulnerabilidade (RODRIGUES, 2020; CAY, 2017).

A capacidade dos *Beacons* de transmitir sinais *BLE* possibilita a obtenção de medições contínuas de *Received Signal Strength Indicator (RSSI)*, desempenhando um papel fundamental na estimativa da posição do usuário em relação ao *Beacon*.

O método *RSSI*, ao calcular a força do sinal recebido, emerge como uma ferramenta essencial na trilateração, proporcionando dados cruciais para determinar a distância entre *beacons*. No entanto, é crucial compreender os desafios associados, como a suscetibilidade a interferências físicas em ambientes fechados, que podem impactar a qualidade da recepção do sinal *BLE*.

Este trabalho tem como objetivo principal a exploração e análise da eficácia do método algorítmico *RSSI* como um componente crucial para a trilateração de *Beacons BLE*, com o intuito de alcançar uma determinação precisa da localização em ambientes *indoor*.

A abordagem não se limitará apenas à teoria, mas também na aplicação prática do método *RSSI* na trilateração de *Beacons BLE*, especialmente no contexto da geolocalização *indoor*. Ao analisar tanto os benefícios quanto às limitações dessa abordagem, este estudo visa oferecer *insights* valiosos para pesquisadores, desenvolvedores e profissionais interessados na implementação eficaz e otimização contínua da geolocalização por meio de *Beacons* e o algoritmo *RSSI*. Este estudo visa, assim, contribuir significativamente para o avanço do conhecimento e práticas nesse campo em constante evolução.

Dessa forma, o projeto foi estruturado em três fases principais: estudo teórico, desenvolvimento de protótipos e análise dos resultados. Na primeira etapa, concentra-se uma revisão teórica sobre o método algorítmico *RSSI*, fundamental para embasar a pesquisa e compreender seus princípios de funcionamento.

A segunda etapa envolve a concepção e o desenvolvimento dos protótipos, os quais desempenham um papel essencial na validação prática do método. Essa fase representa a aplicação concreta da pesquisa, permitindo a experimentação em ambiente controlado.

Na terceira e última etapa, procede-se à análise e discussão dos resultados obtidos a partir da execução prática, possibilitando avaliar a eficácia da abordagem aplicada.

A localização em sistemas de posicionamento *indoor* tem sido um tema de pesquisa extensivamente investigado nas últimas décadas, especialmente em contextos industriais, para redes de sensores sem fio e robótica (ZAFARI, 2019).

Houve um avanço nas tecnologias que podem ser utilizadas nesses sistemas, e com isso, um interesse comercial crescente, aumentando consideravelmente a demanda por esses tipos de serviço, tornando-se essencial em diversos mercados (MRINDOKO, 2016).

Segundo Mautz (2012, apud SAKPERE, 2017), após o sucesso do GPS em ambientes externos, o desafio foi transferir tais serviços para o ambientes *indoor*. A implantação de *beacons BLE* em sistemas de posicionamento *indoor*, teve uma influência significativa na precisão (KE, 2018). Com uma área de pesquisa ativa, inicialmente no contexto de navegação de robôs e, mais recentemente, em computação móvel (CHINTALAPUDI, 2010).

De acordo com Chan e Chung (2021), os *beacons BLE*, devido ao seu baixo consumo de energia e alta capacidade de estimativa de proximidade, mostram grande potencial em aplicações de cidades inteligentes, especialmente em serviços baseados em localização. A ampla implantação de *beacons BLE* em aplicações centradas no ser humano os torna um alvo atraente para empresas com motivos sociais ou econômicos.

Diante do cenário atual e da crescente demanda por soluções de posicionamento *indoor*, o método *RSSI* apresenta-se como uma solução promissora, mas que enfrenta diversos desafios. Por exemplo, a suscetibilidade a multipercurso, interferências físicas e a fatores ambientais, pode impactar a qualidade do sinal *BLE*, tornando crucial a investigação de métodos/técnicas para mitigar esses efeitos e melhorar a precisão do posicionamento.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. TECNOLOGIAS, MÉTODOS E TÉCNICAS PARA SISTEMAS DE POSICIONAMENTO

Os sistemas de posicionamento *indoor* desempenham um papel crucial na localização de pessoas e objetos em ambientes internos. De acordo com Gu, Lo e Niemegeers (2009, apud SAKPERE, 2017, p. 6, tradução própria), “[...]um sistema de navegação *indoor* consiste em uma rede de dispositivos usados para localizar objetos ou pessoas dentro de um edifício”. Essa definição ressalta a necessidade de se haver uma infraestrutura robusta, que

suporte a comunicação entre os dispositivos, para garantir a eficácia e a eficiência na localização.

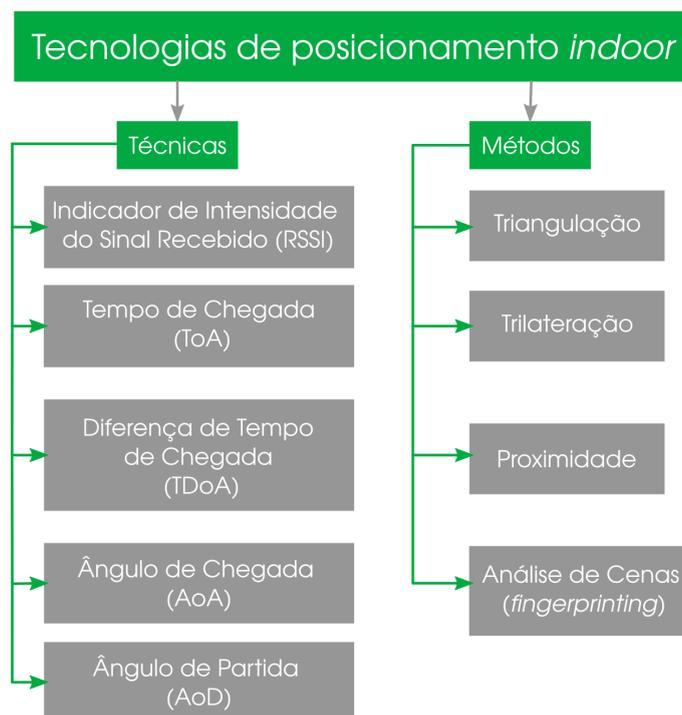
Além disso, no estudo de [Khudhair \(2016, p. 1\)](#), o autor destaca que o sistema de localização interna é um sistema que tenta encontrar a posição precisa da pessoa e do objeto dentro de um edifício, shopping, etc. Essa ênfase na precisão é fundamental, pois qualquer erro na localização pode levar a consequências indesejadas, como a perda de itens ou a ineficiência na navegação.

Para alcançar essa precisão, [Sakpere \(2017, p. 6\)](#) afirma que em sistemas de posicionamento *indoor*, técnicas de posicionamento são usadas para determinar e estimar a posição de nós sensores para melhorar a precisão do posicionamento. Isso mostra que há uma variedade de técnicas que podem ser utilizadas e devem ser escolhidas com base nas características do ambiente a ser implementado.

Também há uma variedade de tecnologias que podem ser utilizadas em sistemas de posicionamento *indoor*, que se inter-relacionam para criar uma solução eficiente e eficaz. Amundson e Koutsoukos (2009, apud [SAKPERE, 2017, p. 6](#)) afirmam que existem vários algoritmos e técnicas para obter informações de direção, alcance ou proximidade com base na medição ou propriedades do sinal. Essa afirmação reforça a ideia de que a escolha da tecnologia, da técnica e dos métodos a serem utilizados depende das necessidades específicas do sistema e do ambiente em que será aplicado.

Conforme os autores ([MRINDOKO, 2016](#); [SAKPERE, 2017](#); [ZAFARI, 2019](#); [KHUDHAIR, 2016](#)) há vários tipos de métodos e técnicas, que são utilizados para determinar a posição de um objeto em ambientes *indoor*. As técnicas, como o Indicador de Intensidade do Sinal Recebido (*RSSI*), o Tempo de Chegada (*ToA*), a Diferença de Tempo de Chegada (*TDoA*), o Ângulo de Chegada (*AoA*), o Ângulo de Partida (*AoD*), avaliam as propriedades dos sinais transmitidos ou recebidos.

Essas técnicas fornecem os dados necessários para que os métodos de posicionamento, como triangulação, trilateração, proximidade e análise de cenas (*fingerprinting*), possam calcular a localização precisa do objeto. Essas abordagens são aplicadas usando as tecnologias, como *Bluetooth*, *Ultra-Wideband (UWB)*, *Wireless Local Networks (WSN)*, *Wireless Local Area Network (WLAN)*, *Radio Frequency Identification Device (RFID)*, *Near Field Communication (NFC)* etc, que fornecem a infraestrutura necessária para a coleta e processamento dos sinais conforme elencado na [Figura 1](#).

Figura 1 - Classificação das técnicas de posicionamento *indoor*.

Fonte: Autoria própria.

Em [Ke \(2018\)](#), é realizada uma comparação de algumas tecnologias disponíveis, conforme adaptado no [Quadro 1](#), apresentando as técnicas/métodos estudados pelo autor, assim como o resumo dos resultados obtidos de sua precisão.

Quadro 1 - Comparação de tecnologias de posicionamento indoor.

Tecnologia	Métodos	Técnicas	Precisão
Bluetooth	Trilateração, Análise de Cenas	TDoA, RSSI	Baixa
Ultra-Wideband (UWB)	Trilateração	ToA, TDoA	Alta
Wireless Local Networks (WSN)	Análise de Cenas	RSSI	Média
Wireless Local Area Network (WLAN)	Trilateração, Análise de Cenas	TDoA, RSSI	Baixa
Radio Frequency Identification Device (RFID)	Análise de Cenas	RSSI	Baixa
Near Field Communication (NFC)	Proximidade	RSSI	Alta

Fonte: adaptado de [\(KE, 2018, p. 6\)](#).

Zafari (2019) destaca que o *RSSI* é de fácil implementação e eficiente em termos de custo, mas é suscetível ao multipercorso e a fatores ambientais, o que pode comprometer a precisão do posicionamento *indoor*:

No *ToA*, *Mrindoko (2016)* observa que essa técnica é extremamente complexa e delicada, por requerer uma perfeita sincronia de tempo entre o transmissor e receptor, o que pode aumentar significativamente o custo e o tempo para implementar o sistema.

Khudhair (2016, p. 7) mostra que uma das vantagens de utilizar o *TDoA* é a necessidade de apenas sincronizar os tempos dos receptores, não precisando da perfeita sincronia de tempo entre o transmissor e receptor como no *ToA*. Porém também é afetado pelo efeito de multipercorso de sinais (*KHUDHAIR, 2016, p. 5*).

Já no *AoA*, *Zafari (2019)* observa que, fornece uma alta precisão a curtas distâncias entre o transmissor e receptor, porém esse exige um alto investimento, devido à necessidade de antenas direcionais e de um hardware complexo. Segundo *Mrindoko (2016)* esse método também pode ser influenciado por efeitos de multipercorso e pela propagação de sinais sem linha de visão, limitando a precisão do sistema de posicionamento.

Em Análises de Cenas (*Fingerprinting*), *Zafari (2019)* aponta que é um método bastante simples de usar, entretanto, assim como apontado por *Mrindoko (2016)*, a desvantagem desse método é a sensibilidade a mudanças no ambiente, como a movimentação de objetos, exigindo novas “*fingerprintings*”, o que torna o processo trabalhoso e tedioso na fase de calibração.

Apesar dos inconvenientes já apontados, é possível combinar esses métodos e técnicas de posicionamento entre si para compensar suas limitações individuais (*KHUDHAIR, 2016, p. 3*).

Ke (2018) fornece análises de outros autores em sua pesquisa e elabora um resumo que destaca algumas características gerais de cada método, conforme apresentado na *Tabela 1*.

Tabela 1 - Características dos métodos de posicionamento indoor.

Método	Precisão indoor	Afetado por Multipercurso	Complexidade
RSSI	Média	Sim	Baixa
ToA	Alta	Sim	Alta
TDoA	Alta	Sim	Alto
AoA	Média	Sim	Alta
Fingerprinting	Alta	Não	Baixa

Fonte: adaptado de (KE, 2018, p. 6).

2.2. *BLUETOOTH LOW ENERGY (BLE)*

O *Bluetooth Low Energy (BLE)* representa uma evolução significativa no cenário de comunicação sem fio, é uma das tecnologias sem fio mais amplamente utilizadas (YE, 2022; MONFARED, 2018), sendo o padrão *wireless* mais popular para dispositivos *IoT* (AL – SHAREEDA, 2023), oferecendo uma solução eficiente e econômica para uma variedade de aplicações.

Em comparação com o *Bluetooth* comum, o *BLE* destaca pela sua notável economia de energia e a sua velocidade de transmissão (TOSI, 2017; WAN, 2024), tornando-o uma escolha ideal para os *beacons*, que podem ser alimentados por uma bateria (CAY, 2017).

As ondas de rádio emitidas pelo *BLE* possuem uma frequência de 2,4 GHz, o que proporciona um alcance maior e uma melhor penetração em estruturas, como paredes de concreto (NOVAIS, 2022; TOSI, 2017). No entanto, ela é propensa a efeitos de multipercurso, o que pode causar erros de posicionamento (KE, 2018).

Al – Shareeda (2023) escreve que, desde o lançamento inicial, a arquitetura do *BLE* sofreu mudanças significativas, o que pode levar a ter sérias dificuldades para identificar vulnerabilidades em seus recursos mais recentes, como no aspecto de segurança, troca de chaves e desempenho. Porém, devido sua popularidade, há várias pesquisas sendo feitas, entre elas, mecanismos de emparelhamento, melhorias de criptografia (GHORI, 2020), topologia de malha estruturada e proteção de rede via *IDS* e *blockchain* (CHA, 2018).

Um dos modos de operação a se destacar e que será utilizado neste trabalho é o modo de espera (*SLEEP*). Nele, o dispositivo *BLE* permanece a maior parte do tempo inativo, sendo ativado apenas para realizar conexões curtas que duram milésimos de segundos (*NOVAIS, 2022*). Isso permite a transmissão de dados por períodos mais longos, o que é ideal para aplicações que enviam informações esporadicamente, como no caso dos beacons (*NOVAIS, 2022*).

Tosi (2017) aponta uma gama de aplicações dessa tecnologia. No contexto da saúde, onde sua portabilidade e eficiência energética são aproveitadas para monitoramento remoto, tornando-se aliados valiosos na vigilância de pacientes, possibilitando a detecção precoce de irregularidades cardíacas e outras condições médicas, como por exemplo, enviar uma mensagem de celular para um parente ou médico quando um paciente apresentar alterações no ritmo cardíaco, o que pode ser um sinal de início de um infarto. A capacidade de estabelecer conexões rápidas e efêmeras para transmitir informações vitais destaca o potencial do *BLE* na criação de soluções tecnológicas que impactam diretamente o bem-estar das pessoas.

Essa aplicação se estende também ao âmbito doméstico, frequentemente empregado para automatizar tarefas cotidianas, como a ativação de luzes ao entrar em um ambiente, o desbloqueio automático de portas em resposta à aproximação de indivíduos ou a notificação de ofertas de produtos para clientes próximos a estabelecimentos comerciais.

Segundo *Zafari (2019)*, apesar do *BLE* ser compatível com diferentes técnicas de localização, como *RSSI* e *AoA*, a maioria das soluções de localização baseadas em *BLE* existentes dependem de entradas baseadas em *RSSI*, por serem menos complexos.

Al – Shareeda (2023) conclui que o *BLE* será uma solução desejável no futuro *IoT* devido ao seu baixo consumo de energia, alta eficiência e alta segurança. Em resumo, o *BLE* é uma tecnologia de rede sem fio com uma eficiência energética, um alcance satisfatório e conectividade ágil, consolidando sua posição como uma solução robusta para uma grande variedade de cenários.

2.3. SYSTEM-ON-A-CHIP (SoC)

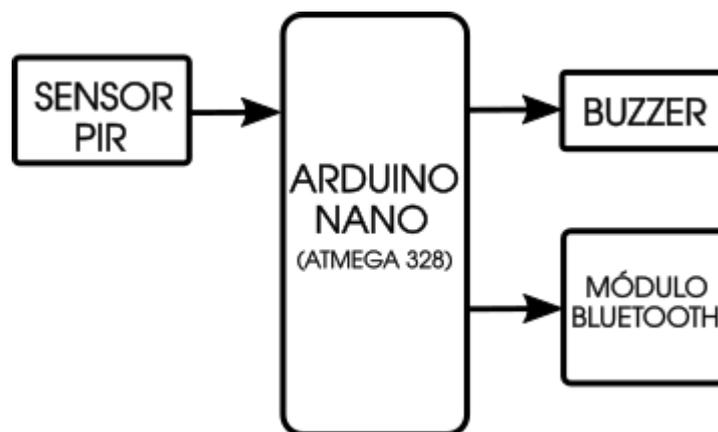
Os avanços na tecnologia de semicondutores deram origem a uma abordagem inovadora na construção de sistemas eletrônicos: o *System-on-Chip (SoC)*, ou Sistema em um

Chip. Um *SoC* é um *microchip* com todos os circuitos e peças necessárias para um determinado sistema, como *smartphone* ou computador, em um único circuito integrado. Uma integração inteligente de diversos componentes essenciais, como processador, memória, periféricos e interfaces, tudo isso em um único *chip* (PATIL, 2017). Esta abordagem visa otimizar o desempenho, reduzir o consumo de energia e aprimorar a eficiência espacial em dispositivos eletrônicos modernos, tornando atraentes para o desenvolvimento de soluções *IoT* (CAYRE, 2023).

A principal diferença entre um *SoC* e um microcontrolador é que o *SoC* integra não apenas a *CPU*, mas também diversos outros componentes essenciais, como interfaces de comunicação sem fio (*Wi-Fi*, *Bluetooth*, etc.), blocos gráficos, módulos de segurança, etc. Enquanto os microcontroladores tendem a ser focados principalmente em controlar entradas e saídas (*E/S*) e realizar operações.

Para exemplificar essa diferença, podemos considerar uma placa *Arduino Nano*, que utiliza o microcontrolador *ATmega328*. O *Arduino Nano*, depende de vários periféricos externos para implementar funcionalidades complexas, como *Wi-Fi* ou *Bluetooth*, na [Figura 2](#) é mostrado um diagrama de blocos de um projeto de automações residenciais, contendo sensores de movimento *PIR*, *buzzers* e um módulo *Bluetooth*, todos conectados e controlados por um *Arduino Nano*.

Figura 2 - Diagrama de blocos sistema de automação residencial.

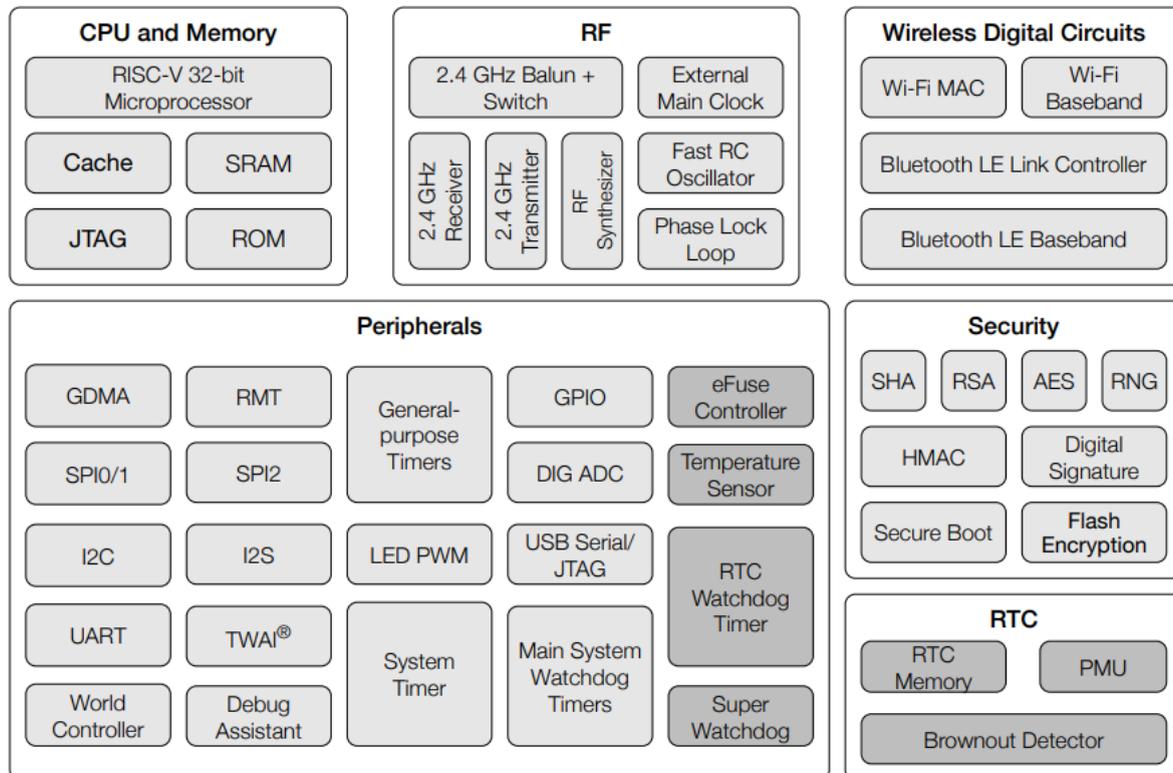


Fonte: Autoria própria.

Voltando ao foco em *SoCs*, a [Figura 3](#) apresenta o diagrama de blocos funcionais do *ESP32-C3*. Ao contrário do *Arduino Nano*, esse *SoC* integra vários

periféricos/módulos/circuitos necessários por exemplo para comunicação sem fio e processamento de dados, que são utilizados neste trabalho.

Figura 3 - Diagrama de blocos funcionais *ESP32-C3*.



Fonte: [ESP32C3 Series Datasheet, 2024](#).

O *ESP32-C3*, desenvolvido pela *Espressif Systems*, é equipado com um microcontrolador *RISC-V* de núcleo único, que opera a uma velocidade de até 160 MHz e é otimizado para consumo de energia. Incorpora recursos avançados de conectividade, como *Wi-Fi 2.4 GHz* e *Bluetooth 5.0 (LE)*. É capaz de executar tarefas complexas, como processamento de dados e execução de protocolos de comunicação simultaneamente ([ESP32C3 Series Datasheet, 2024](#)).

Além das capacidades de conectividade, o *ESP32-C3* conta com recursos de segurança, incluindo criptografia de *hardware (AES-128/256-XTS)* e inicialização segura baseada em *RSA-3072*. Também há a presença de periféricos adicionais, como entradas analógicas e múltiplos *GPIOs* (pinos de *E/S*) ([ESP32C3 Series Datasheet, 2024](#)).

[Patil \(2017\)](#) escreve que os desafios de um *SoC* incluem custos mais altos de prototipagem, além de uma arquitetura e depuração mais complexa. Porém tendem a

consumir menos energia, ter um melhor desempenho, requerer menos espaço e serem mais confiáveis do que sistemas *multichips* (VALES, 2022).

Vales (2022) escreve que a indústria de dispositivos de consumo estão focadas no desenvolvimento de dispositivos/produtos utilizando a família *ESP32-XX* por motivos como o baixo consumo de energia, compatibilidade com ambientes de desenvolvimento populares (*Arduino, MicroPython, etc.*) e a disponibilidade de uma documentação de alta qualidade. Um exemplo de sucesso da linha *ESP*, é de estar presente em diversos projetos de automação, como *ESPHome* (ESPHOME), *Tasmota* (TASMOTA) e *ESP easy* (ESP EASY).

2.4. BEACON BLE

Os *beacons BLE* são dispositivos de transmissão de rádio de baixo custo e curto alcance, sendo instalados em locais estratégicos ou acoplados a objetos móveis para identificação ou rastreamento (CHAN, 2021).

Consiste em nada mais que um *chipset*, uma bateria e uma antena, que emite pacotes com informações que podem ser utilizadas pelos receptores em períodos pré determinados (CAY, 2017).

Cada *Beacon* possui um *ID* único na rede, formado a partir de letras e números (NOVAIS, 2022), como por exemplo “BLUEID04FD62501”, permitindo a identificação precisa do *Beacon* em meio a outros dispositivos semelhantes.

Gradualmente, os aplicativos *BLE Beacon* têm se tornado cada vez mais populares em dispositivos móveis, uma vez que a maioria desses dispositivos possui protocolo *Bluetooth* integrado (HUANG, 2023).

Atualmente, os problemas de segurança enfrentados pelo uso do *Beacon* incluem *spoofing*, *piggybacking* e questões de privacidade, entre outros. Os autores Chan e Chung (2021) escrevem sobre diferentes casos de ataques contra sistemas *Beacon* e nos mostra mecanismos de defesa para mitigar essas ameaças. Além disso, o posicionamento *indoor* apresenta desafios adicionais, como a necessidade de alta precisão de posicionamento e a garantia da disponibilidade e acessibilidade do sinal.

A simplicidade, eficiência e a crescente disponibilidade de dispositivos que saem das fábricas com o protocolo *Bluetooth* integrado, proporciona um grande território a ser explorado com uma ampla gama de aplicações inovadoras utilizando os *Beacons BLE*, desde

experiências de localização em ambientes indoor até interações baseadas na proximidade entre dispositivos.

Neste trabalho, aplica-se o uso de *Beacons BLE* para posicionamento indoor, utilizando a indicação de força do sinal recebido (*RSSI*) para estimar a distância entre o *Beacon* e o receptor. É importante destacar a capacidade que os *Beacons BLE* têm de lidar com ambientes que contém interferência de sinal, tornando-os uma escolha robusta para soluções de localização indoor.

Também, é notável e vale ressaltar que a eficiência no consumo de energia do *Bluetooth Low Energy* (*TOSI, 2017*) foi um fator decisivo para escolha neste trabalho, visto que os dispositivos foram planejados para serem alimentados por baterias. Os *Beacons BLE*, por exemplo, podem durar de 1,8 a 28,7 meses com uma bateria *CR2045* (*HUH, 2017*). Destacando a eficiência energética dessa tecnologia. Essa característica não apenas contribui para a longevidade da bateria, mas também expande as possibilidades de implementação em uma variedade de cenários, sem comprometer a durabilidade e a eficácia do sistema.

2.5. RECEIVED SIGNAL STRENGTH INDICATION (RSSI)

O *RSSI*, ou Indicação de Força de Sinal Recebido (*Received Signal Strength Indication*), desempenha um papel crucial em sistemas *BLE*, fornecendo uma estimativa da potência do sinal recebido pelo receptor e o transmissor (*NOERTJAHYANA, 2017*). É uma técnica amplamente utilizada devido ao seu baixo custo e simplicidade de implementação em comparação com outras técnicas (*BAE, 2019*), como *ToA* (*SALIMI, 2013*), *TDoA* (*NOERTJAHYANA, 2017; LIANG, 2021*), *AoA* (*WAN, 2024; YE, 2022; MONFARED, 2018*) e *AoD*. Também pode ser combinado com diversas tecnologias, métodos e técnicas (*ZAFARI, 2019*).

Os valores de *RSSI* estão sempre em escala logarítmica e são negativos, sua unidade de medida geralmente é o *decibel miliwatts (dBm)* ou *miliWatts (mW)* (*ZAFARI, 2019*), indicando a intensidade do sinal recebido em relação a uma potência de referência específica. Quanto mais próximo de 0 *dBm*, pode-se dizer que melhor e mais forte será o sinal.

O *RSSI* é valioso em cenários nos quais a determinação da distância relativa entre dispositivos é essencial. No entanto, é importante notar que o *RSSI* é influenciado por diversos fatores ambientais, havendo situações em que o sinal não alcance o destino esperado,

levando a variação do sinal devido a interferências, obstruções e condições de propagação do sinal, o que pode afetar a precisão das medições (BAE, 2019). Outro ponto, é que infelizmente, a lei do inverso quadrado faz com que a precisão caia inversamente com a distância (HORN, 2020).

Essas influências podem ser reduzidas através da implementação de vários filtros (BENCAK, 2022), os mais comumente usados são variações do Filtro de Kalman (BAI, 2020; CANTÓN PATERNA, 2017) e o Filtro de Partículas (SHEN, 2020).

Outro ponto importante a mencionar é que embora o RSSI seja uma ferramenta útil, os resultados que serão obtidos dependem do tamanho da amostra e da taxa de amostragem utilizada para captar as mudanças no ambiente (HUH, 2017). Isso ressalta as limitações do RSSI, onde sua precisão pode ser limitada em ambientes dinâmicos e complexos.

A precisão da estimativa de posição usando RSSI pode variar de acordo com as circunstâncias do ambiente, sendo instável em alguns casos (BAE, 2019). Assim, em alguns casos, a combinação de RSSI com outras técnicas, como o *Angle of Arrival (AoA)* (WAN, 2024; YE, 2022; MONFARED, 2018) ou *Angle of Departure (AoD)*, pode ser explorada para melhorar a precisão da localização em sistemas BLE.

O RSSI permite a obtenção de dados de posicionamento com menos componentes eletrônicos, o que o torna uma técnica vantajosa em termos de simplicidade e custo (ALKAN, 2019).

2.5.1. CÁLCULO DA DISTÂNCIA UTILIZANDO O RSSI

Por meio de modelos matemáticos, como o modelo *path-loss* (CHINTALAPUDI, 2010; BAI, 2020), é possível obter a distância entre o transmissor e o receptor utilizando o valor do RSSI, tornando viável estimar a posição aplicando métodos e técnicas de geolocalização.

O cálculo da distância, tem como base a relação entre a intensidade do sinal recebido (RSSI) com a distância do transmissor. Essa relação entre RSSI e a distância é modelada usando um modelo *path-loss* conforme as equações (1) e (2) (CHINTALAPUDI, 2010; BAI, 2020):

$$RSSI = - 10 \cdot m \cdot \lg D + A \quad (1)$$

$$D = 10^{\left(\frac{A - RSSI}{10 \cdot m}\right)} \quad (2)$$

Em que:

- *RSSI* é o valor da intensidade do sinal recebido, em *dBm*;
- *D* é a distância em metros, entre o transmissor e o receptor;
- *A* é o valor do sinal *RSSI* medido a uma distância de referência de um metro, em *dBm*;
- *m* é o *path loss*, um parâmetro de ambiente que representa a taxa de atenuação do sinal no ambiente.

2.6. FILTRO DE KALMAN APLICADO NO RSSI

A natureza ruidosa dos sinais de *RSSI* em ambientes indoor, onde obstáculos e interferências podem causar grandes variações nos valores medidos, foi analisada por [Shin \(2022\)](#). O autor destaca essa sensibilidade dos valores de *RSSI* em ambientes circundantes, e sugere o uso de técnicas de cancelamento de ruído. Além disso, a calibração e a filtragem dos *RSSI* são cruciais para aumentar a precisão ([KE, 2018, p. 5](#)).

Um exemplo clássico, para melhorar a estimação de dados sujeitos a ruídos, tanto nas medidas quanto nos processos, é o Filtro de Kalman (*FK*), que estima os valores reais com base em medições sucessivas, minimizando o impacto de ruídos.

Conforme [Cantón Paterna \(2017\)](#), o *FK* é utilizado como uma forma de mitigar os efeitos de estimativas de localização improváveis ou impossíveis devido a medições erradas de *RSSI*, permitindo um rastreamento mais preciso da localização de um dispositivo.

[Liang \(2021\)](#) utiliza o *FK* para aprimorar a precisão das medições de *RSSI*, destacando sua eficácia em ambientes *indoor* complexos. Já no estudo de [Subedi \(2017\)](#), o autor mostra outras técnicas de filtragem, explorando a diferença entre o filtro de média e o filtro de mediana, destacando suas aplicações em sistemas de posicionamento *indoor*. Sadowski (2019, apud [SHIN, 2022, p. 4](#)) faz uso do filtro de média móvel. [Wang \(2017\)](#) utiliza a correção do desvio padrão para normalizar o valor do desvio *RSSI* de diferentes medições em cada experimento de amostragem.

Essas abordagens evidenciam a importância do uso de técnicas de filtragem na melhoria da precisão para sistemas de posicionamento indoor.

2.7. TRILATERAÇÃO

O método de trilateração é um método popular para posicionamento (PAKANON, 2020). É uma técnica utilizada para determinar a posição de um objeto com base em medições de distâncias a partir de múltiplos pontos de referência.

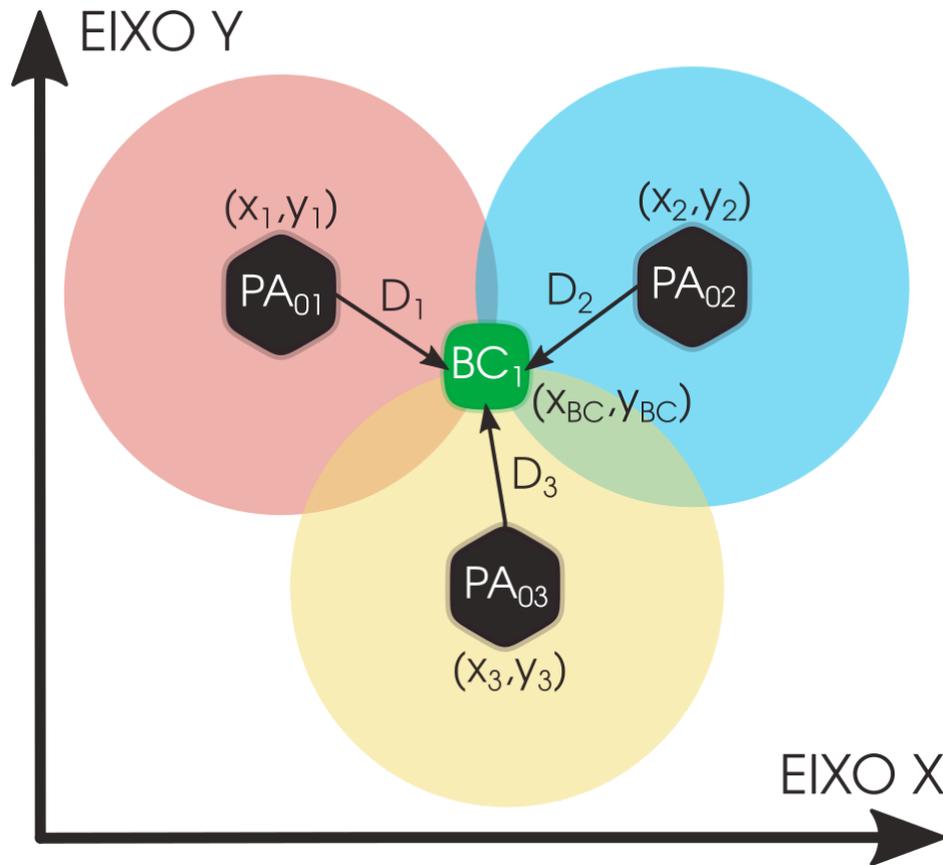
A trilateração exige pelo menos três pontos de referência, que, ao cruzarem suas informações de distância, permitem localizar a posição desconhecida de um objeto (PAKANON, 2020; ALKAN, 2019; NOERTJAHYANA, 2017). O funcionamento da trilateração envolve a estimativa das distâncias entre os *pontos de referência* e o *objeto a ser localizado*. Em nossa pesquisa, os *pontos de referências* são os *beacons BLE fixos* e o *objeto a ser localizado* é denominado *beacon BLE móvel*.

Algumas das formas de calcular as distâncias são a partir do *RSSI*, aplicando a equação *path-loss* equações (1) e (2), o Tempo de Chegada (*ToA*) (SALIMI, 2013) e a diferença de tempo de chegada (*TDoA*) (NOERTJAHYANA, 2017; LIANG, 2021). Além disso, é possível utilizar modelos matemáticos como as equações de *Haversine* (ALKAN, 2019) ou as equações de distância euclidiana (3) (BAI, 2020) para calcular as distâncias em diferentes contextos, como superfícies planas ou esféricas.

$$\begin{cases} D1 = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} \\ D2 = \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2} \\ D3 = \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2} \end{cases} \quad (3)$$

A *Figura 4* ilustra esse método. As posições dos pontos de acesso (*PA*), PA_{01} , PA_{02} e PA_{03} são (x_1, y_1) , (x_2, y_2) e (x_3, y_3) , respectivamente. Os parâmetros D_1 , D_2 , D_3 são as distâncias entre o respectivo *PA* e o *beacon BC₁*. As distâncias estimadas são definidas como os raios dos círculos e as posições dos *beacons BLE* são definidas como o centro dos círculos (PAKANON, 2020).

Figura 4 - Posicionamento usando o método de trilateração.



Fonte: Autoria própria.

[Bai \(2020\)](#) simplifica as equações (3), colocando o PA_{01} (x_1, y_1) como ponto de origem (0,0), obtendo a equação simplificada (4).

$$\begin{cases} x = \frac{D_1^2 - D_2^2 + x_2^2}{2 \cdot x_2} \\ y = \frac{D_1^2 - D_3^2 - x_3 \cdot x + y_3^2 + x_3^2}{2 \cdot y_3} \end{cases} \quad (4)$$

Idealmente, a interseção desses círculos determina a posição exata do objeto a ser localizado. Entretanto, na prática e em ambientes internos, a precisão das medições pode ser afetada por diversos fatores, como a interferência do sinal, atenuação causada por objetos no ambiente e à reflexão do sinal ([PAKANON, 2020](#)), que resulta em erros significativos na determinação da posição do *beacon BLE* móvel.

Como nem sempre as três medições das distâncias convergem para um único ponto de interseção, [Cantón Paterna \(2017\)](#) propõe o uso de um método que ele chama de ‘trilateração ponderada’ como uma melhoria sobre o método de trilateração básica.

[Cantón Paterna \(2017\)](#), demonstra que a combinação do Filtro de Kalman (*FK*) com a trilateração ponderada, resulta em um aumento significativo na precisão. Segundo o autor, houve uma melhoria de 43,47% em ambientes de tamanho médio e de 38,33% em ambientes de grande porte, comparados à precisão sem o uso da combinação dessas técnicas.

Em outro estudo, Radoi et al. (2017, apud [CANTÓN PATERNA, 2017](#)), comparam o desempenho do *BLE* usando o filtro de partículas com o método *fingerprinting* em dois tipos de ambientes, o primeiro um ambiente menor - corredor de 1,5m x 12m e o segundo um ambiente maior - sala de 8m x 6m. Neste estudo, Radoi et al. (2017, apud [CANTÓN PATERNA, 2017](#)) conclui que o método *fingerprinting* teve um desempenho superior em relação ao filtro de partículas em ambientes menores. Já em ambientes maiores o filtro de partículas demonstrou uma precisão melhor que o *fingerprinting*.

A aplicação de algoritmos, métodos e modelos matemáticos como o método dos mínimos quadrados ([PAKANON, 2020](#)), modelo de canal ([PAKANON, 2020](#)), o modelo de Haversine ([ALKAN, 2019](#)) o Filtro Kalman ([BAI, 2020](#); [CANTÓN PATERNA, 2017](#)), o Filtro de Partículas ([SHEN, 2020](#)), entre outros, são formas para ajudar a mitigar esses erros e melhorar a precisão das técnicas de posicionamento *indoor*.

3. METODOLOGIA

A metodologia foi desenvolvida seguindo uma abordagem estruturada e sistemática. Inicialmente, realizou-se uma revisão bibliográfica abrangente sobre as tecnologias, métodos e técnicas aplicáveis a sistemas de posicionamento indoor, com ênfase em tecnologias *BLE*. Essa etapa permitiu identificar os principais algoritmos utilizados, suas respectivas vantagens e desvantagens, além de analisar estudos de caso que demonstraram a aplicabilidade dessas soluções em diferentes ambientes. Paralelamente, buscou-se por beacons *BLE* disponíveis no mercado, avaliando suas características técnicas, precisão e aplicações práticas.

Em seguida, conduziu-se um estudo preliminar sobre os hardwares e softwares necessários para o desenvolvimento do projeto. Adquiriram-se dispositivos, módulos e componentes eletrônicos essenciais para a construção dos protótipos. Optou-se pela utilização da plataforma de desenvolvimento *ESP-IDF*, selecionada por sua capacidade de programação em *C++* para microcontroladores, o que facilitou a implementação das funcionalidades desejadas.

Os protótipos foram constituídos por um *SoC (System on Chip) BLE*. Inicialmente, planejou-se a utilização de baterias para alimentação dos *beacons*. No entanto, devido ao consumo elevado de energia do módulo *Wi-Fi* do *ESP32-C3*, necessário para a comunicação entre o servidor e o *beacon*, optou-se por alimentá-los diretamente por cabo *USB C*. A economia de energia não foi uma prioridade neste projeto.

Para garantir a proteção dos componentes, projetou-se encapsulamentos personalizados em *software* de modelagem *3D*, que foram posteriormente fabricados em impressora *3D*, conforme ilustrado na [Figura 5](#). Essa abordagem assegurou a integridade física dos dispositivos durante os testes e aplicações práticas.

Figura 5 - Protótipos dos *beacons*.

Fonte: Autoria própria.

3.1. TESTE DE COMUNICAÇÃO E COLETA DE DADOS

Para investigar as possibilidades de aplicação do *BLE*, realizaram-se testes de comunicação entre dispositivos. Esses testes incluíram o envio de mensagens entre dispositivos conectados a um *SoC*, o que permitiu verificar a confiabilidade da conexão e a taxa de transferência de dados. Adicionalmente, executou-se um teste no qual o *SoC* funcionou como gateway, responsável por enviar mensagens e armazená-las em um servidor *Node.js* via *websocket*. A [Figura 6](#) ilustra essa sequência de operações, demonstrando a integração entre os componentes do sistema.

Figura 6 - Ilustrando teste *SoC* funcionando como *gateway*.

Fonte: Autoria própria.

Os testes de comunicação e coleta de dados foram realizados seguindo a documentação oficial da *ESPRESSIF* para o *ESP32-C3* (*ESP-IDF*) e os exemplos disponibilizados pelos mesmos.

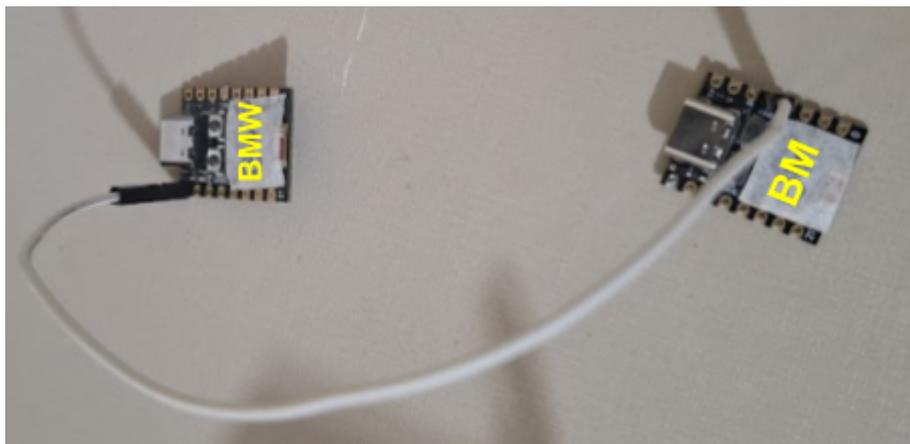
3.1.1. TESTE WEBSOCKET E UART

Para estabelecer a comunicação via *UART* entre dois *beacons*, configurou-se os seguintes pinos no *ESP32-C3*:

```
// Set UART pins(TX: IO4, RX: IO5, RTS: IO18, CTS: IO19)
ESP_ERROR_CHECK(uart_set_pin(UART_NUM_1, 4, 5, 18, 19));
```

Essa configuração pode ser vista de melhor forma na *Figura 7*, onde o *SoC* com a nomenclatura de *BMW* (*Beacon Móvel Wifi*), “recebe” o *RX* (pino *IO5*) e o *BM* (*Beacon Móvel*) “transmite” o *TX* (pino *IO4*).

Figura 7 - Conexão dos pinos entre *BMW* e *BM* para comunicação *UART*.



Fonte: Autoria própria.

Essa configuração permitiu a comunicação serial entre esses dispositivos. Além disso, configurou-se um servidor em *Node.js* para receber dados via *websocket*. Os dados enviados do *BM* para o *BMW* via serial, seriam então enviados pelo *BMW* para o servidor em *Node.js* via *websocket*, a *Figura 8* ilustra essa sequência em que os dados são enviados.

Figura 8 - Ilustração da sequência de dados *UART-Websocket*.



Fonte: Autoria própria.

3.1.2. TESTE DE CAPTURA DE *RSSI* VIA *BLE*

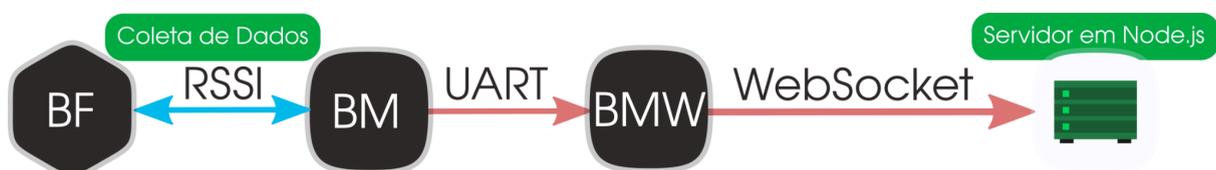
Inicialmente foi realizado um teste de captura de *RSSI* via *BLE*, sem o envio de dados via *UART* ou *websocket*. Temos dois *beacons*, com os nomes de *BM* (*Beacon Móvel*) e *BF* (*Beacon Fixo*), a nomenclatura não é relevante para o sucesso desse teste em questão, porém no código disponível na pasta *2º Teste Captura dos RSSI via BLE* utiliza essa nomenclatura.

Nesse teste, o *BM* apenas captura os sinais *RSSI* do *BF*, e mostra no monitor serial. Esse teste foi essencial para validar a funcionalidade básica do sistema que será utilizado para a captura dos *RSSI*.

3.1.3. TESTE *RSSI*, *UART* E *WEBSOCKET*

Em seguida integrou-se os códigos dos testes de captura de *RSSI* via *BLE* do *BM* com o *BF* com o envio dos dados via *UART* para o *BMW*, que por sua vez, enviou os dados para o servidor em *Node.js* via *websocket*, validando a integração completa do sistema. O código está disponível na pasta “*Teste Captura RSSI e UART WebSocket*”. A *Figura 9* ilustra esse teste.

Figura 9 - Ilustração do *RSSI*, *UART* E *WEBSOCKET*.



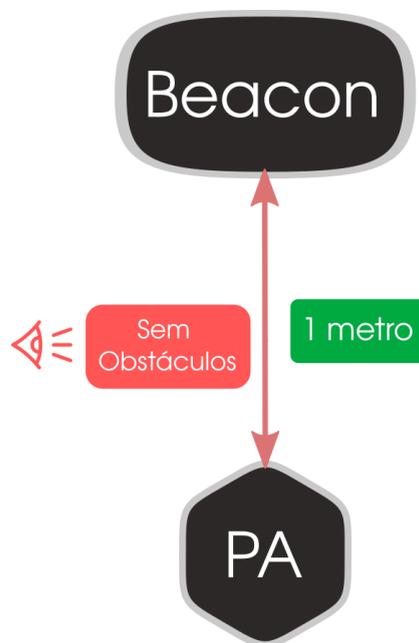
Fonte: Autoria própria.

3.2. TESTE DE LINHA DE VISÃO

Conforme explicitado anteriormente, os parâmetros “ A ” e “ m ” das equações (1) e (2) são essenciais para a precisão do cálculo da distância e são determinados experimentalmente.

Para a determinação do parâmetro “ A ”, posicionou-se um *PA* (Ponto de Acesso) a uma distância de um metro na linha de visão de um *beacon*, garantindo que não houvesse obstáculos entre eles. A *Figura 10* ilustra esse método. Realizaram-se várias medições, nas quais os valores de *RSSI* foram registrados em tabelas. Em seguida, efetuaram-se cálculos, como a média dos valores obtidos, que foi considerada como o valor de referência para “ A ”.

Figura 10 - Ilustração do teste para determinação de “ A ”.



Fonte: Autoria própria.

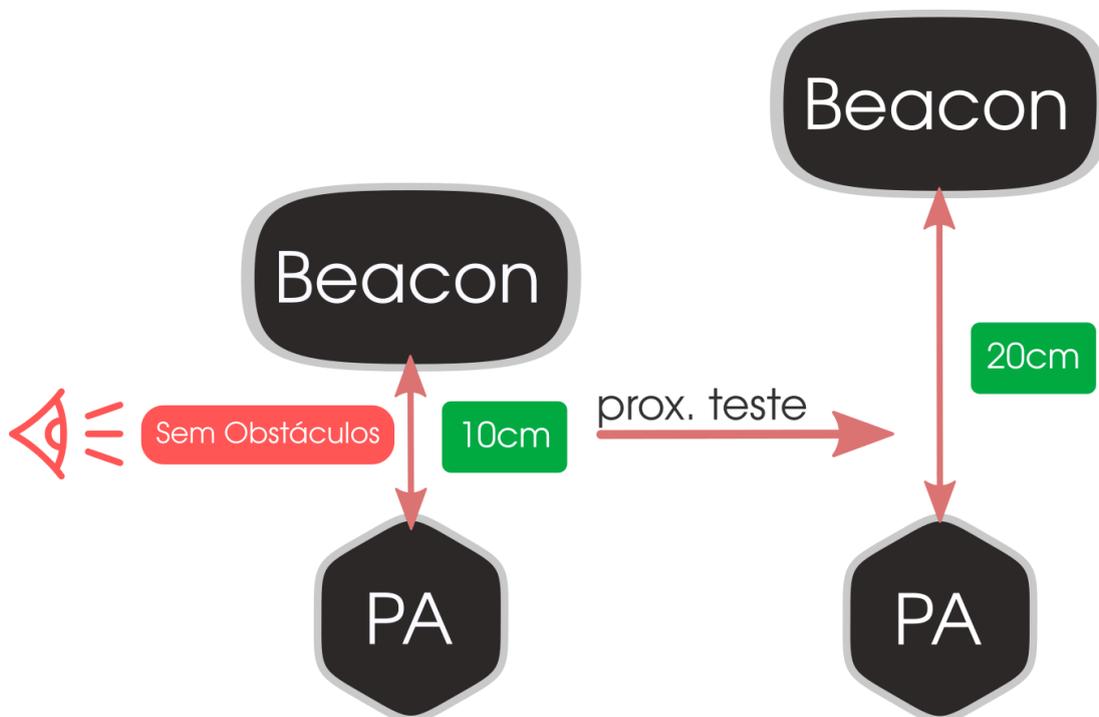
Para a determinação do parâmetro “ m ”, estimou-se seu valor a partir de múltiplas medições de *RSSI* realizadas em diferentes distâncias conhecidas. O teste consistiu em posicionar um *PA* e um *beacon* em pontos estratégicos do ambiente, garantindo que o *PA* permanecesse na “linha de visão” do *beacon*, sem a presença de obstáculos entre eles. Em seguida, coletaram-se os valores de *RSSI* em diversas distâncias, movendo-se o *beacon* a intervalos pré-definidos (ex. 10 cm), até atingir a uma distância máxima estabelecida,

podendo esse ser o limite em um dos eixos do ambiente, ou definir como 3-5 metros. A *Figura 11* ilustra a configuração desse teste.

Os valores de *RSSI* obtidos foram registrados em tabelas, e, posteriormente, realizaram-se cálculos, para se achar a equação para cálculo desse parâmetro, basta isolar o “*m*” na equação (1), com isso obtêm-se a equação (5), também foram realizados cálculos, como média dos valores calculados e medidos, que em seguida foram considerados como o valor de referência para “*m*”.

$$m = \frac{|A| - |RSSI|}{10 \cdot \log_{10}(D)} \quad (5)$$

Figura 11 - Ilustração do teste para determinação de “*m*”.



Fonte: Autoria própria.

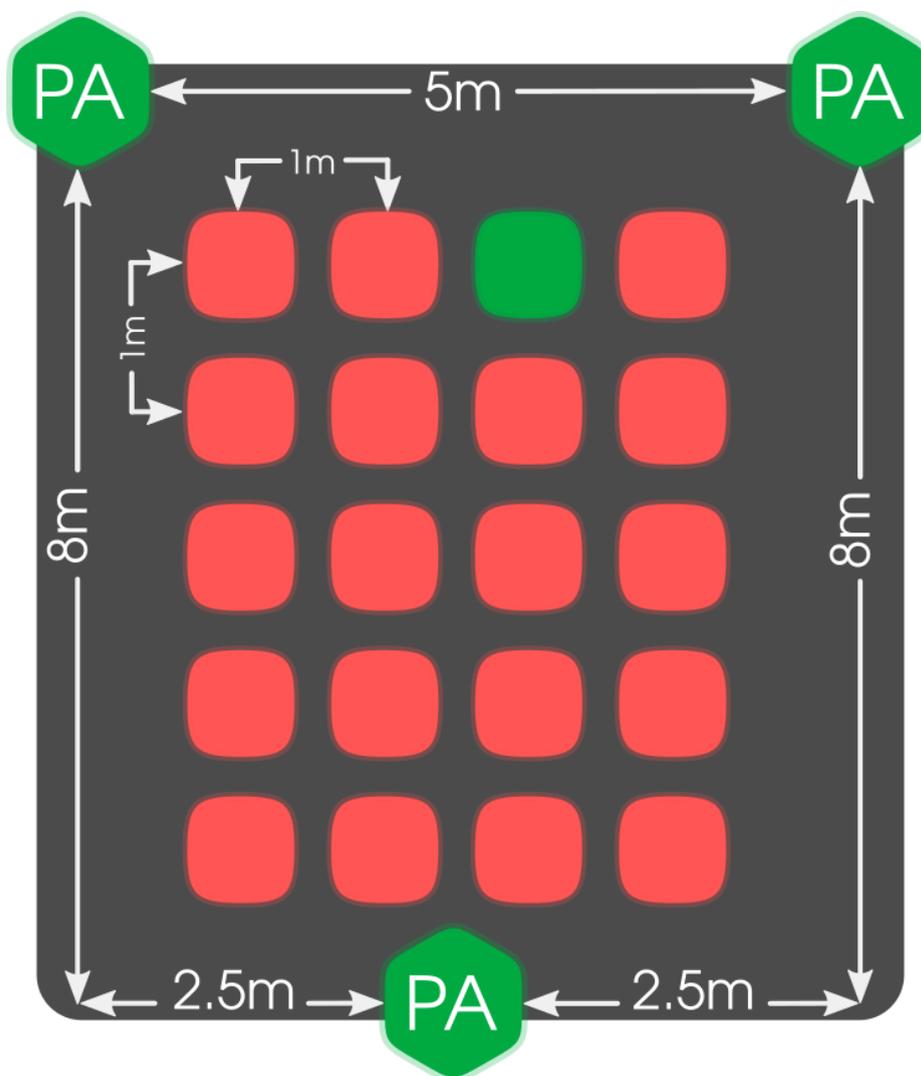
3.3. ESTIMATIVA DE POSIÇÃO

Com base nos métodos e técnicas identificados na revisão bibliográfica, implementou-se, no *SoC*, os algoritmos de localização indoor, com o objetivo de avaliar sua

eficácia para o posicionamento em ambientes internos. Para isso, os testes foram realizados em ambientes controlados, onde todas as condições puderam ser monitoradas e ajustadas conforme necessário.

Configurou-se um ambiente específico, no qual todos os pontos de posição, bem como suas distâncias, foram previamente definidos, conforme ilustrado na *Figura 12*. Nessa configuração, os *PAs* foram representados pelos círculos verdes, enquanto a posição atual do *beacon* foi indicada pelo quadrado verde. O *beacon* foi deslocado apenas para as posições pré-definidas, representadas pelos quadrados vermelhos, garantindo que as distâncias entre os pontos fossem conhecidas e controladas.

Figura 12 - Ilustração do teste de posição.



Fonte: Autoria própria.

Os dados medidos de *RSSI* foram tratados com filtros específicos, descritos anteriormente, e utilizados nos [cálculos de distância](#) para determinar a distância entre os *PAs* e o *beacon*. Os dados coletados e processados, incluindo as medições das distâncias nos eixos “x” e “y”, bem como o *timestamp* correspondente, foram enviados para o ambiente web. Essas informações foram armazenadas em um banco de dados, conforme ilustrado na [Figura 13](#).

Figura 13 - Ilustração do teste de posição.



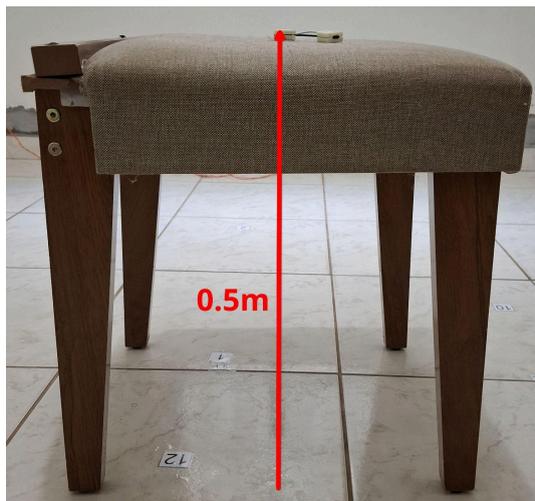
Fonte: Autoria própria.

Essa base de dados foi utilizada para realizar análises estatísticas, incluindo o cálculo do erro médio absoluto (*MAE*), do erro médio quadrático (*RMSE*) e do desvio padrão. Além disso, compararam-se as posições estimadas pelos algoritmos com as posições reais do *beacon*, a fim de avaliar a precisão e a confiabilidade do sistema. Para complementar as análises, geraram-se gráficos e mapas de calor, que permitiram visualizar a distribuição dos erros ao longo do ambiente.

3.3.1. TESTE EM SALA CONTROLADA

O experimento foi conduzido em um ambiente controlado, caracterizado por uma sala vazia, desprovida de móveis ou obstáculos, com o objetivo de minimizar interferências externas no processo de coleta de dados. As condições padrão da sala foram mantidas, incluindo o piso de cerâmica, uma janela metálica com vidro vedado em uma das paredes e uma porta de madeira. Três *beacons* fixos (*FIXOs*) foram posicionados em coordenadas pré-definidas no plano *xy*, enquanto o *Beacon Móvel (BM)* foi instalado sobre um suporte estofado, conforme ilustrado na [Figura 14](#), com a finalidade de elevá-lo em relação ao solo e reduzir possíveis reflexões do sinal causadas pela superfície do piso.

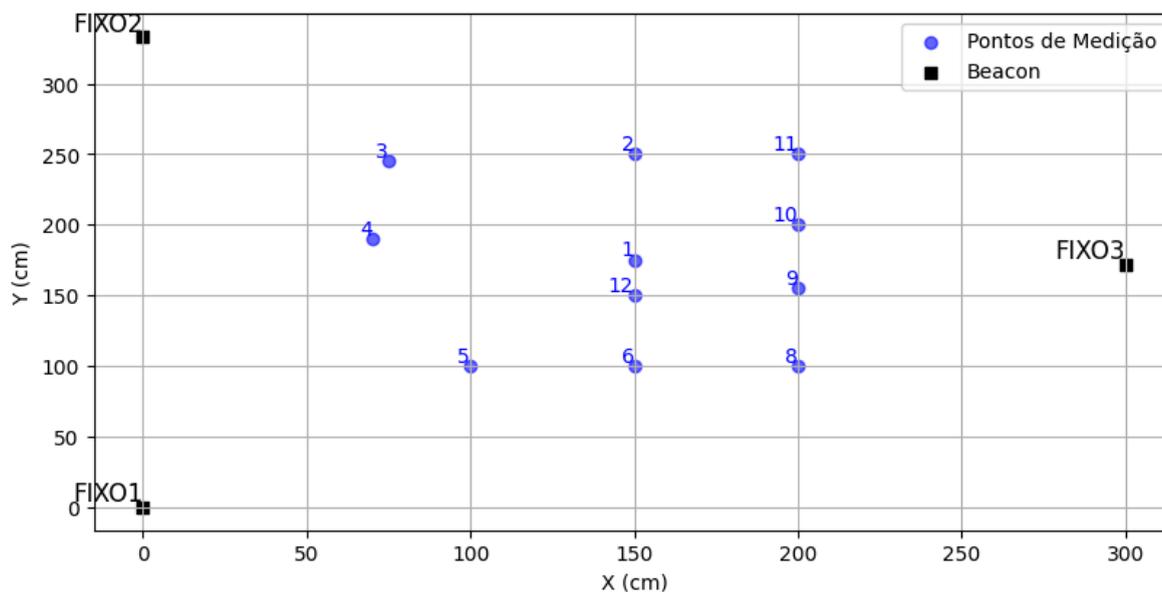
Figura 14 - Beacon BM instalado sobre um suporte estofado.



Fonte: Autoria própria.

O BM foi deslocado sequencialmente entre 12 pontos distintos (1 a 12), nos quais foram registrados os valores de *Received Signal Strength Indicator* (RSSI). As figuras 15 e 16 detalham a configuração espacial do ambiente experimental, incluindo a disposição dos *FIXOs*, do BM e dos elementos estruturais da sala.

Figura 15 - Localização dos pontos de medição e beacons fixos.



Fonte: autoria própria.

Figura 16 - Configuração espacial do ambiente experimental



Fonte: autoria própria.

As coordenadas exatas dos pontos em que o *beacon* móvel foi posicionado e as posições dos *beacons* *FIXOs* no plano *xy* estão descritas nas tabelas 2 e 3, respectivamente.

Tabela 2 - Coordenadas dos pontos medidos no plano *xy* - *BM*.

Ponto	x (cm)	y (cm)	z (cm)	Ponto	x (cm)	y (cm)	z (cm)
1	150	175	50	7	-	-	-
2	150	250	50	8	200	100	50
3	75	245	50	9	200	155	50
4	70	190	50	10	200	200	50
5	100	100	50	11	200	250	50
6	150	100	50	12	150	150	50

Fonte: autoria própria.

Tabela 3 - Coordenadas no plano xy - *FIXOs*.

Beacon	x (cm)	y (cm)	z (cm)
FIXO1	0	0	220
FIXO2	0	333	224
FIXO3	300	172	217

Fonte: autoria própria.

Os dados de *RSSI* coletados foram enviados para um servidor central, que processa as informações. Utilizando os parâmetros “*A*” e “*m*”, previamente calibrados, realizou-se a trilateração da posição do *BM* por meio do modelo *log-distância*, e foi comparado as distâncias estimadas e posições reais.

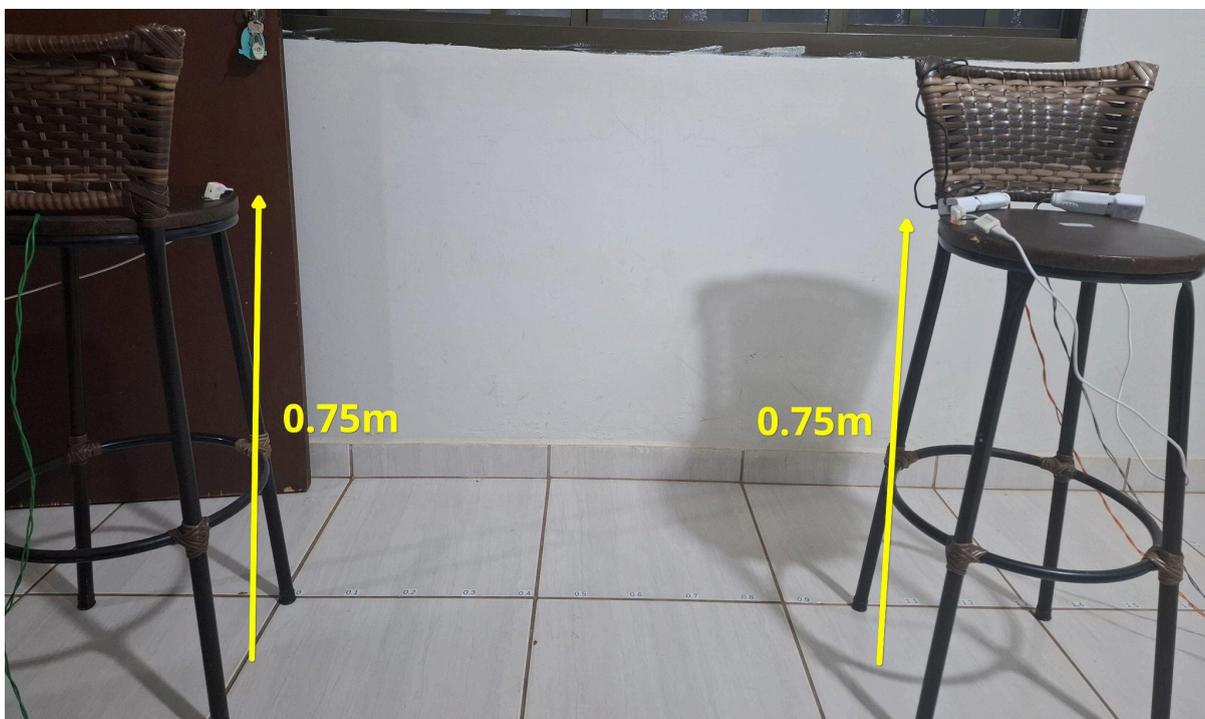
A análise incluiu a geração de mapas de calor de erro, destacando regiões com maiores discrepâncias entre coordenadas estimadas e reais. Avaliou-se estatisticamente a precisão do sistema por meio do erro médio absoluto para cada eixo analisado, bem como os valores máximos e mínimos possíveis.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. DETERMINAÇÃO DO PARÂMETRO “A”

O parâmetro “A”, que representa a média de valores *RSSI* a uma referência de distância igual a 1 metro, foi determinado experimentalmente por meio do *teste de linha de visão*. Para isso, os beacons foram posicionados sobre uma banqueteta a aproximadamente 0.75 metros de altura. Esse posicionamento foi adotado para reduzir possíveis interferências causadas por reflexões próximas no piso e garantir uma linha de visão direta entre os dispositivos. A *Figura 17* ilustra a configuração desse teste, mostrando o *beacon* fixo e móvel posicionados nas banquetetas.

Figura 17 - Posicionamento dos *beacons* em banquetetas.



Fonte: autoria própria.

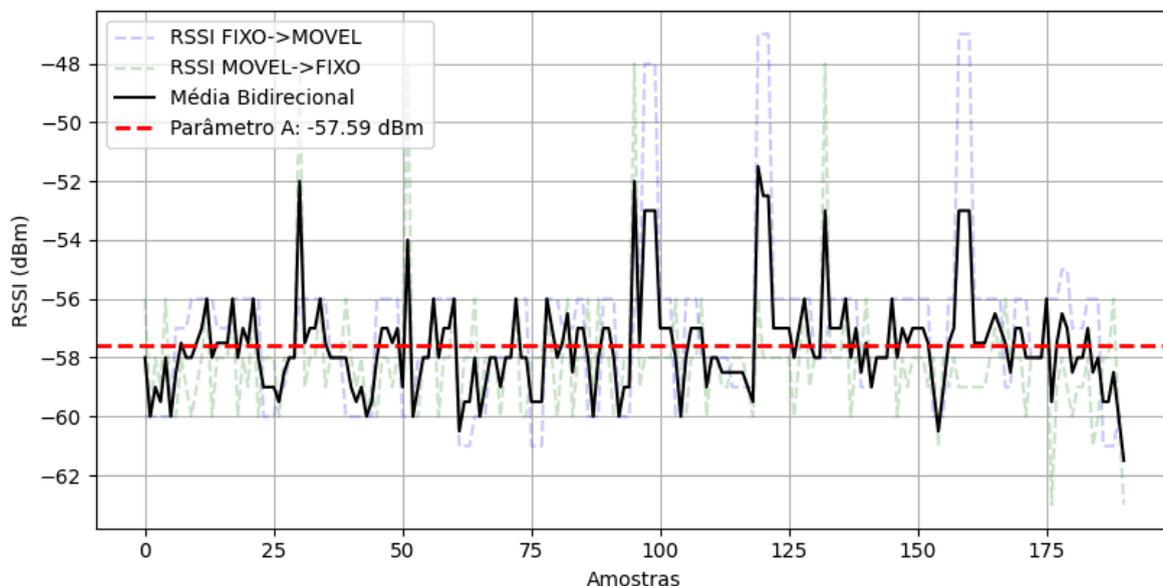
Posicionou-se o beacon *FIXO* a uma distância de 1 metro do beacon móvel (*BM*), garantindo que não houvesse obstáculos entre eles. Foram realizadas 191 leituras bidirecionais, ou seja, os valores de *RSSI* foram capturados tanto na visão do *FIXO* em relação ao *BM* quanto na visão do *BM* em relação ao *FIXO*. Essa abordagem bidirecional foi adotada com o intuito de minimizar possíveis interferências e flutuações no sinal.

Os dados obtidos foram armazenados em um arquivo *CSV*, contendo as seguintes informações para cada medição:

- *Timestamp*: Momento da medição;
- *FIXO->MOVEL*: Valor do *RSSI* do *FIXO* em relação ao *BM*;
- *MOVEL->FIXO*: Valor do *RSSI* do *BM* em relação ao *FIXO*;
- Média simples entre as duas leituras bidirecionais.

Com esses valores, gerou-se a [Figura 18](#) que apresenta um gráfico com um comparativo dos valores de *RSSI* bidirecionais (*FIXO->MOVEL* e *MOVEL->FIXO*), juntamente com a média bidirecional e uma linha horizontal indicando o valor médio geral obtido, que corresponde a $-57,59$ dBm.

Figura 18 - Comparativo dos valores de *RSSI* bidirecionais.



Fonte: autoria própria.

Observa-se que, embora os valores de *RSSI* variem ao longo do tempo, a média bidirecional apresenta uma curva mais controlada, indicando a eficácia dessa abordagem na redução de ruídos. A variabilidade dos valores *RSSI* ao longo do tempo, mesmo que em condições controladas e com linha de visão direta, pode ser atribuída a fatores como flutuações naturais do sinal *BLE*, interferências de outros dispositivos eletrônicos próximos ou pequenas variações no ambiente.

A abordagem bidirecional adotada mostrou-se eficiente para reduzir o impacto de ruídos e flutuações no sinal, resultando em um valor de "A" mais confiável. No entanto, é

importante ressaltar que o valor de "A" pode variar dependendo das características específicas dos dispositivos utilizados e das condições do ambiente. Portanto, recomenda-se que o parâmetro seja recalibrado sempre que houver mudanças significativas no *hardware* ou no ambiente de operação.

A média de todas as médias bidirecionais foi calculada, resultando no valor de $A = -57.59 \text{ dBm}$, esse valor foi utilizado como referência nos cálculos de distância baseados no modelo de *path loss*, conforme descrito nas equações (1) e (2). O valor obtido para o parâmetro "A" (-57.59 dBm) está dentro da faixa esperada, o autor Bai (2020) encontrou $A = -60.17 \text{ dBm}$.

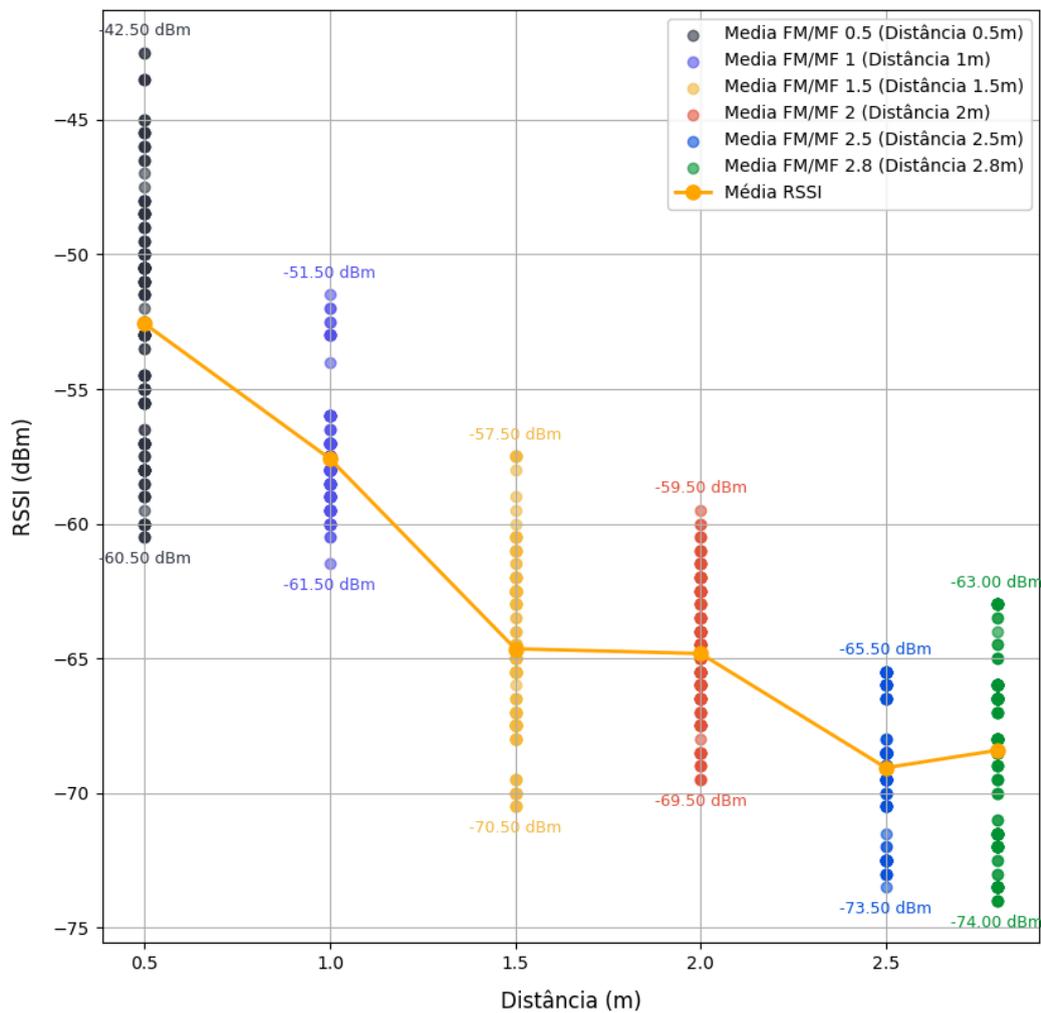
4.2. DETERMINAÇÃO DO PARÂMETRO "m"

O parâmetro "m", que representa o expoente de perda de propagação no modelo de *path loss*, foi determinado experimentalmente conforme escrito no tópico 3.2. *TESTE LINHA DE VISÃO*. Assim como no teste realizado para determinação do parâmetro "A", os beacons foram posicionados em cima de banquetas, ficando a uma altura de aproximadamente 0.75 metros do chão. Essa configuração visa tentar controlar e minimizar interferências causadas por reflexões no piso.

Para obter esse parâmetro, realizou-se múltiplos testes de medições de *RSSI* entre um *FIXO* e um *BM* em diferentes distâncias conhecidas, variando de 0.5 metros a 2.8 metros. Em cada distância, foram realizadas medições bidirecionais de *RSSI*, ou seja, dados capturados tanto na visão do *FIXO* em relação ao *BM* quanto na visão do *BM* em relação ao *FIXO*.

A *Figura 19* apresenta um gráfico de dispersão da média calculada a partir desses valores de *RSSI* bidirecionais. Chamou-se de "Média *RSSI*" a linha que representa a média de todas as médias bidirecionais coletadas e calculadas em cada distância, proporcionando uma visão geral do comportamento do sinal ao longo das diferentes distâncias. Essa linha ajuda a suavizar as flutuações naturais dos dados e fornece uma visão mais clara da relação entre a distância e a intensidade do sinal.

Figura 19 - Valores de *RSSI* bidirecionais em diferentes distâncias, com a linha de média *RSSI*.



Fonte: autoria própria.

Ao analisar os valores bidirecionais de *RSSI* de cada distância, observa-se uma dispersão significativa dos dados mesmo em condições controladas de linha de visão direta. Por exemplo, na distância de 0.5 metros, os valores de *RSSI* variam entre -60.6 dBm (pico mais baixo) e -42.5 dBm (pico mais alto, resultando em uma diferença de 18 dBm). Essa variação diminui conforme a distância entre os beacons aumenta, com diferenças de 10 dBm (1 m), 13 dBm (1.5 m), 10 dBm (2m), 8 dBm (2.5 m) e 11 dBm (2.8m).

A alta variação de 18 dBm observada na distância de 0.5 metros pode ser atribuída às características do ambiente em que o teste foi realizado, como pode-se ser visto na [Figura 17](#), as banquetas onde os *beacons* foram posicionados, são feitas de metal com estofamento em couro. O metal é um material altamente reflexivo para sinais de rádio, o que

pode causar o problema de múltiplos caminhos do sinal dos *beacons*, criando interferências que resultam nessas flutuações significativas que podemos observar no [Figura 19](#).

Apesar de haver essas flutuações, a diferença entre os picos mais altos e mais baixos manteve-se relativamente constante, o que sugere que a variabilidade do sinal é uma característica própria do ambiente, mesmo em distâncias maiores. Essa dispersão pode ser atribuída a fatores como reflexões de sinal, interferências de outros dispositivos eletrônicos e flutuações naturais do sinal *BLE*.

A média dos valores de *RSSI* em cada distância, no entanto, mostrou-se mais estável, reforçando a importância de utilizar médias para reduzir o impacto dessas variações e obter estimativas mais confiáveis de distância.

Os dados coletados foram armazenados em arquivos *CSV*, contendo as seguintes informações para cada distância:

- *Timestamp*: Momento da medição;
- *FIXO->MOVEL*: Valor do *RSSI* do *FIXO* em relação ao *BM*;
- *MOVEL->FIXO*: Valor do *RSSI* do *BM* em relação ao *FIXO*;
- Média *FM/MF*: Média simples entre as duas leituras bidirecionais;
- *m FIXO-MOVEL*: Valor de “*m*” calculado a partir da equação (5) com os dados da coluna *FIXO->MOVEL*;
- *m MOVEL-FIXO*: Valor de “*m*” calculado a partir da equação (5) com os dados da coluna *MOVEL-FIXO*;
- *m FM/MF*: Valor de “*m*” calculado a partir da equação (5) com os dados da Média *FM/MF*.

A [Tabela 4](#) resume os cálculos dos valores médios de “*m*” obtidos para cada distância, onde:

- Média *m FM*: Média dos valores calculados da coluna “*m FIXO-MOVEL*”;
- Média *m MF*: Média dos valores calculados da coluna “*m MOVEL-FIXO*”;
- Média *m FM/MF*: Média dos valores calculados da coluna “*m FM/MF*”.

Tabela 4 - Cálculos dos valores médios de “m” obtidos para cada distância.

Distância	Média m FM	Média m MF	Média m FM/MF
0.5	1,246147757	2,863608198	1,786332704
1.5	3,982378299	4,128193918	3,971417329
2.0	2,61623392	2,129355909	2,372794914
2.5	3,876067432	1,847591982	2,861829707
2.8	2,070323778	2,681591639	2,375957708
Total	2,61623392	2,681591639	2,375957708

Fonte: autoria própria.

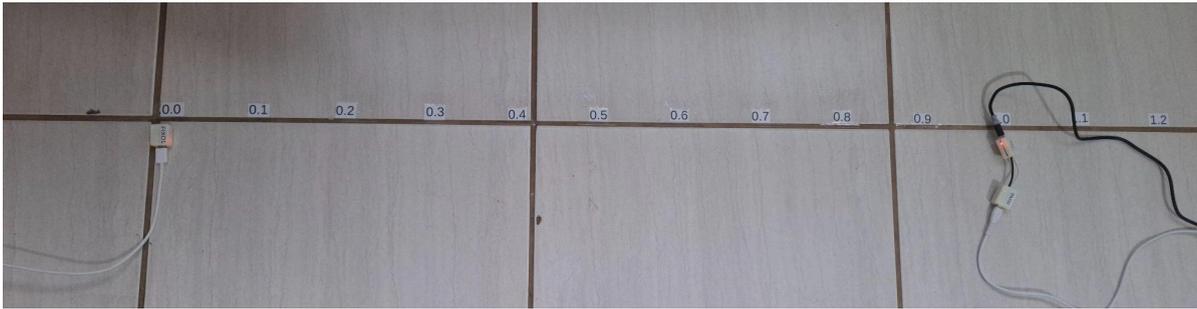
A média de todos os valores da linha “Total” da [Tabela 4](#), resulta em $m=2,557927756$, esse valor foi adotado para o parâmetro “m”, utilizado nos cálculos de distância baseados no modelo de *path loss*, conforme descrito nas equações (1) e (2).

4.3. INFLUÊNCIA DA ALTURA

Nos testes para determinação dos parâmetros “A” e “m”, os *beacons* foram posicionados em cima de banquetas, ficando a uma altura de aproximadamente 0,75 metros do chão. Essa altura foi escolhida para minimizar interferências causadas por reflexões no piso e garantir uma linha de visão direta entre os dispositivos. A [Figura 17](#) ilustra a configuração do teste, mostrando o *beacon* fixo e móvel posicionados em cima das banquetas.

Também foi realizado um experimento com os *beacons* posicionados diretamente no chão de cerâmica, conforme ilustrado na [Figura 20](#), especificamente nas distâncias de 0.5 metros e 1 metro.

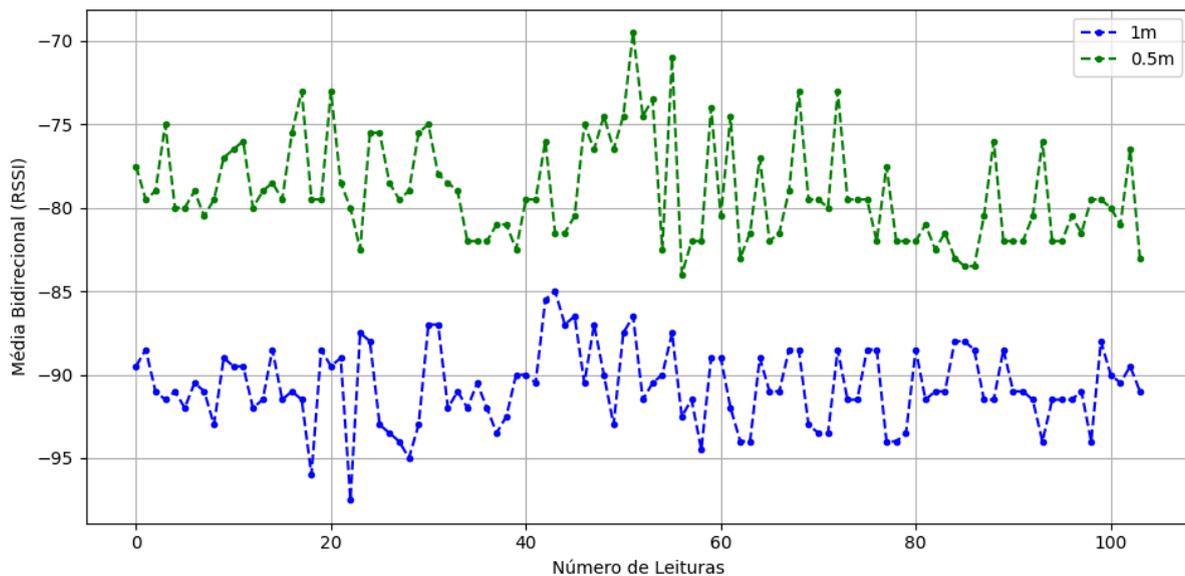
Figura 20 - Posicionamento dos *beacons* *FIXO* e *BM* no chão.



Fonte: autoria própria.

Nesse teste, observou-se que os valores de *RSSI* apresentaram flutuações significativas, com a maioria dos valores variando entre -70 dBm e -90 dBm, podendo ser vistas na [Figura 21](#).

Figura 21 - Variação de sinal *RSSI* em medições próximas ao chão.



Fonte: autoria própria.

Essas flutuações foram muito maiores do que as observadas quando os beacons estavam a 0,75 metros de altura, tornando as medições inconsistentes e inviáveis para a determinação dos parâmetros “*A*” e “*m*”, com esse resultado, esse teste foi descartado.

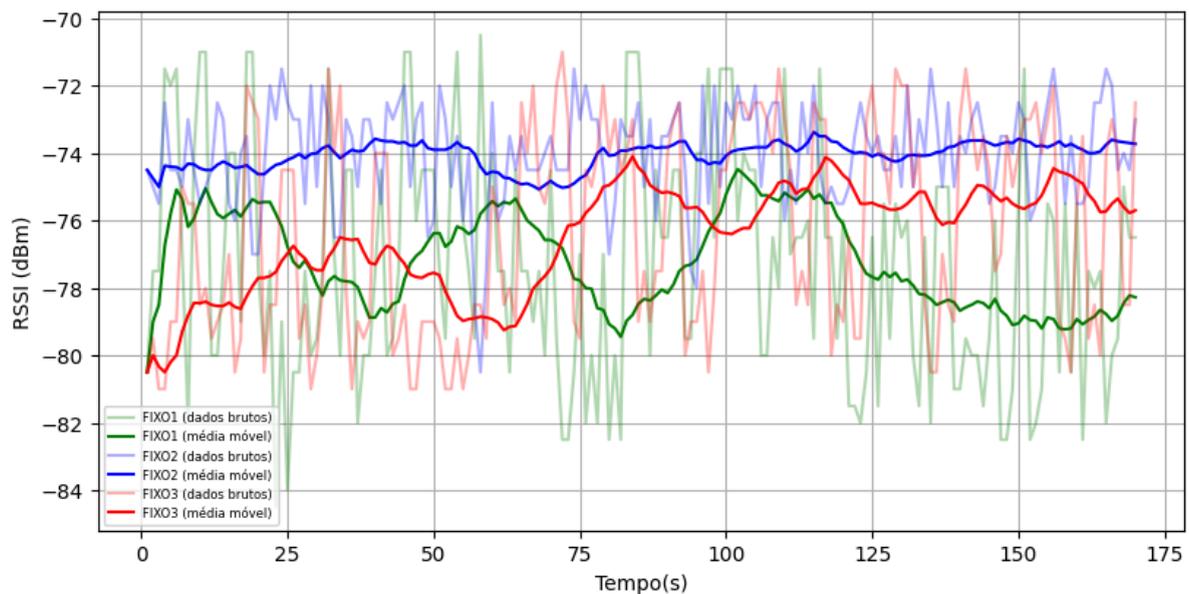
As flutuações observadas quando os dispositivos estavam próximos ao chão podem ser atribuídas a vários fatores, como reflexões no piso de cerâmica, que podem ter criado múltiplos caminhos para o sinal, atenuação por absorção, onde uma parte do sinal pode ter sido absorvida pelo material do piso etc.

4.4. RESULTADOS TESTE EM SALA CONTROLADA

Os dados coletados foram armazenados em arquivos *CSV*, contendo as seguintes informações para cada medição: ponto de medição, valor médio de *RSSI* (calculado entre a leitura do *beacon* móvel em relação aos *FIXOs* e vice-versa), e um contador de amostragem sequencial. Essa abordagem de combinar as médias bidirecionais visou reduzir possíveis ruídos no sinal. Em cada ponto, as medições foram realizadas por pelo menos 1 minuto e 30 segundos, com amostragem contínua a cada 1 segundo, totalizando aproximadamente 90 leituras por posição.

A [Figura 22](#) ilustra a série temporal das leituras médias de *RSSI* para o ponto 1, destacando a variabilidade do sinal ao longo do tempo. Os dados brutos, mesmo após a média bidirecional, ainda apresentaram flutuações significativas. Para mitigar o ruído residual, aplicou-se uma média móvel com janela de 20 segundos, suavizando a curva.

Figura 22 - Variação do *RSSI* para o Ponto 1 com média móvel.



Fonte: autoria própria.

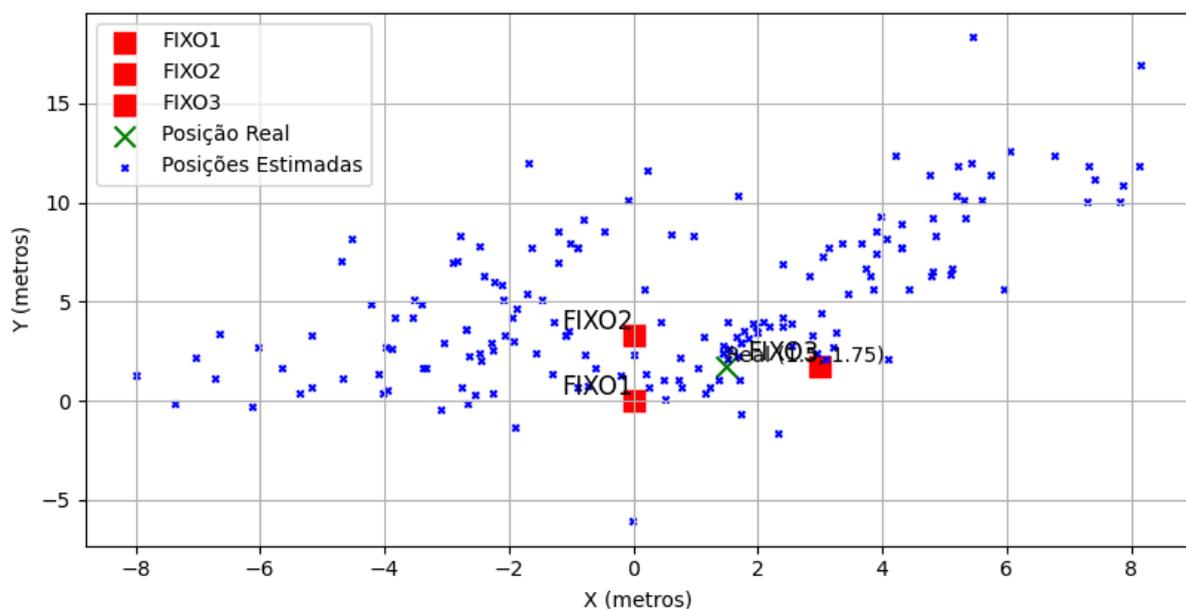
Adicionalmente, na [Figura 22](#), observam-se janelas temporais específicas (ex.: $\approx 75s$ e $\approx 100s$) em que as médias móveis dos três valores de *RSSI* (*FIXO1*, *FIXO2* e *FIXO3*) sofrem alterações abruptas de forma simultânea (até 6 dBm de diferença). Esses eventos caracterizam-se por quedas ou picos súbitos de magnitude, divergindo do comportamento observado na parte anterior das séries.

A sincronia das flutuações entre os três beacons sugere a influência de uma fonte externa de interferência, não relacionada à movimentação do *BM* (que estava fixo) ou à geometria da sala. O mesmo padrão de alterações abruptas simultâneas nos dados de *RSSI* foi identificado em outros pontos de medição, porém em intervalos de tempo distintos. Uma hipótese plausível é a atuação de outros dispositivos *BLE* ou de *Wi-Fi* próximos ao ambiente de teste. A sobreposição de sinais pode ter causado colisões de pacotes ou degradação temporária do canal, afetando igualmente todos os *FIXOs*.

Além das análises de interferência no *RSSI*, foi realizada a estimativa da distância para cada amostra utilizando a equação (2). Para isso, considerou-se um valor de referência $A = -57.59 \text{ dBm}$, com um expoente de perda de propagação $m = 2,557927756$. A partir dos valores de *RSSI* recebidos em cada amostra para os três pontos fixos (*FIXO1*, *FIXO2* e *FIXO3*), foram estimadas as respectivas distâncias entre a fonte do sinal e cada *beacon*, aplicando a equação (3).

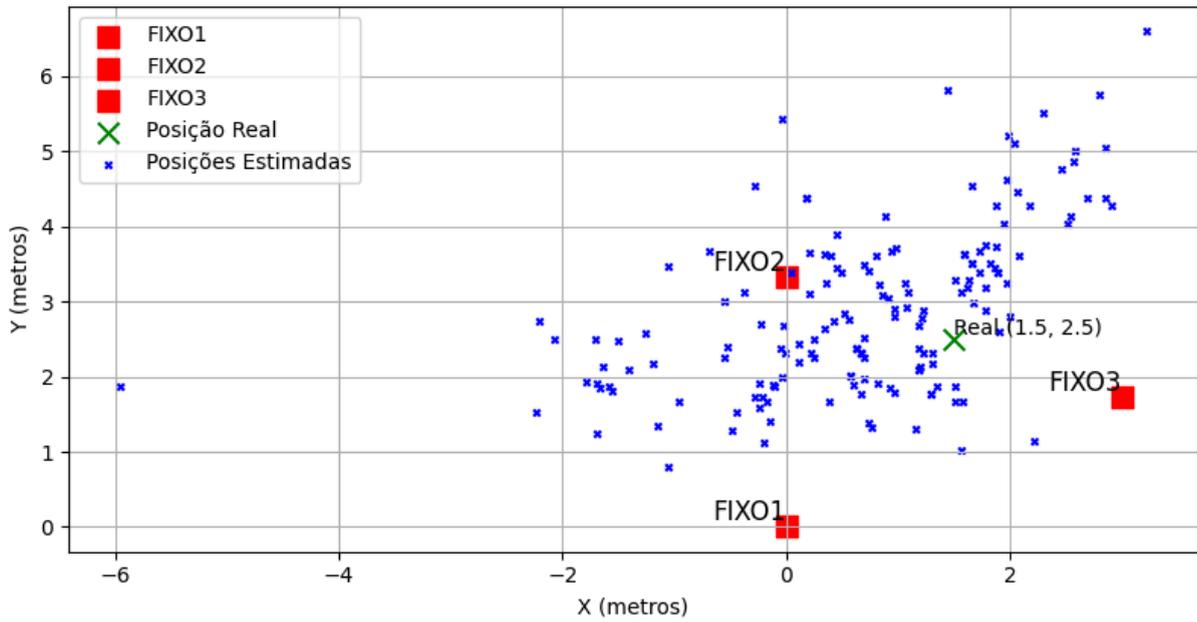
Com as distâncias estimadas, foi realizada a trilateração para determinar as coordenadas x e y de cada amostra. O método foi aplicado a todas as amostras da base de dados, gerando um conjunto de coordenadas estimadas que foram posteriormente comparadas às posições reais, os Figuras 23-33 mostram os gráficos de todas as coordenadas estimadas para cada amostra.

Figura 23 - Posições Estimadas vs Real para Ponto 1.



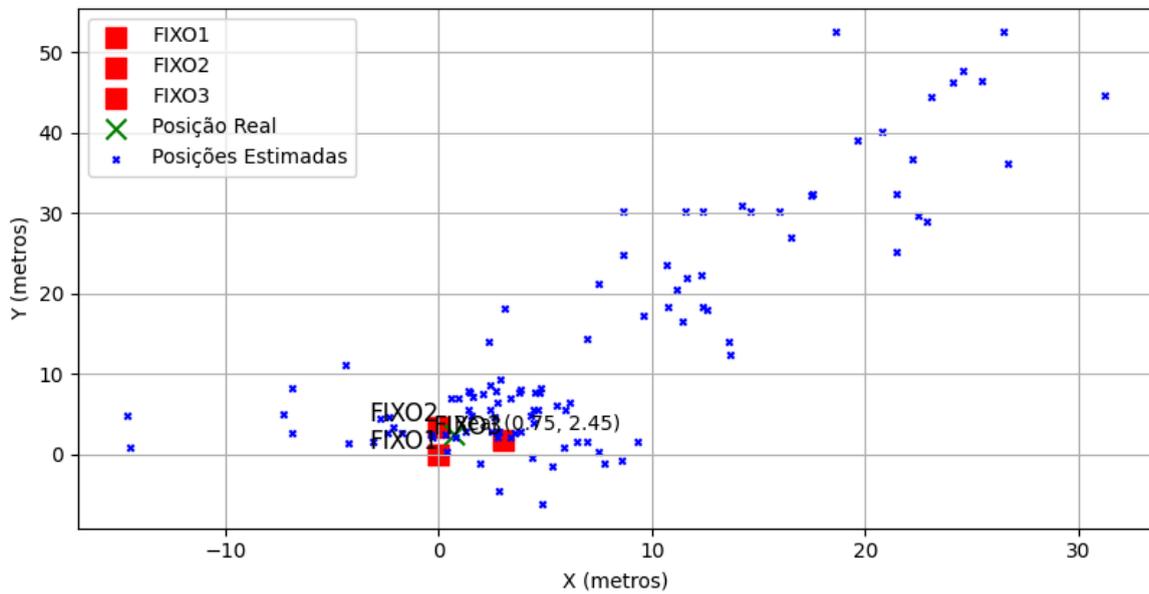
Fonte: autoria própria.

Figura 24 - Posições Estimadas vs Real para Ponto 2.



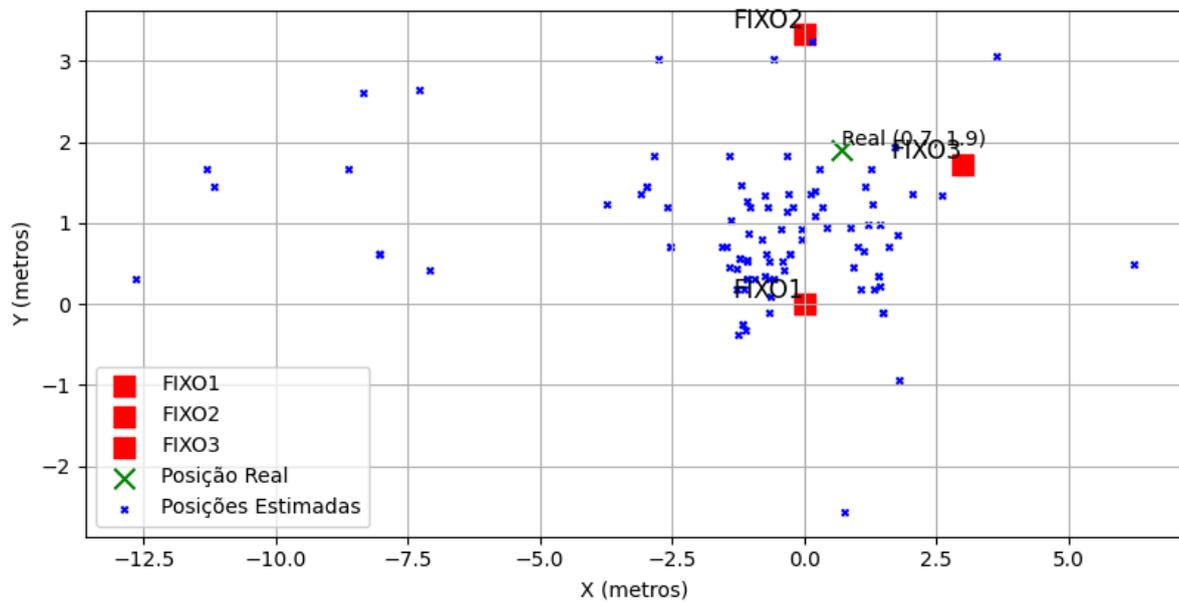
Fonte: autoria própria.

Figura 25 - Posições Estimadas vs Real para Ponto 3.



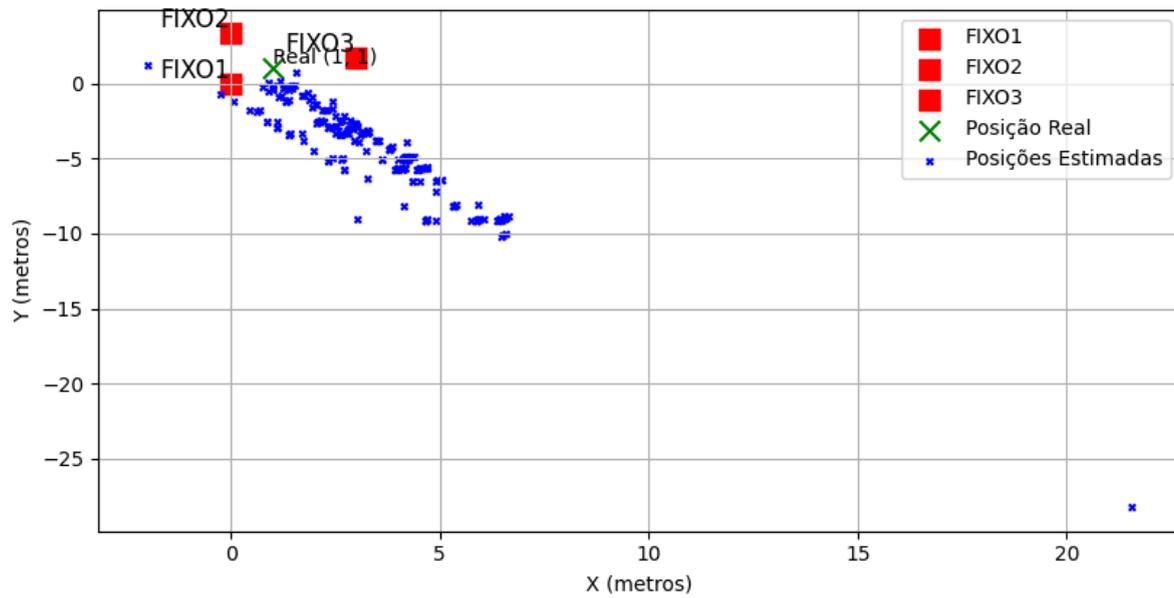
Fonte: autoria própria.

Figura 26 - Posições Estimadas vs Real para Ponto 4.



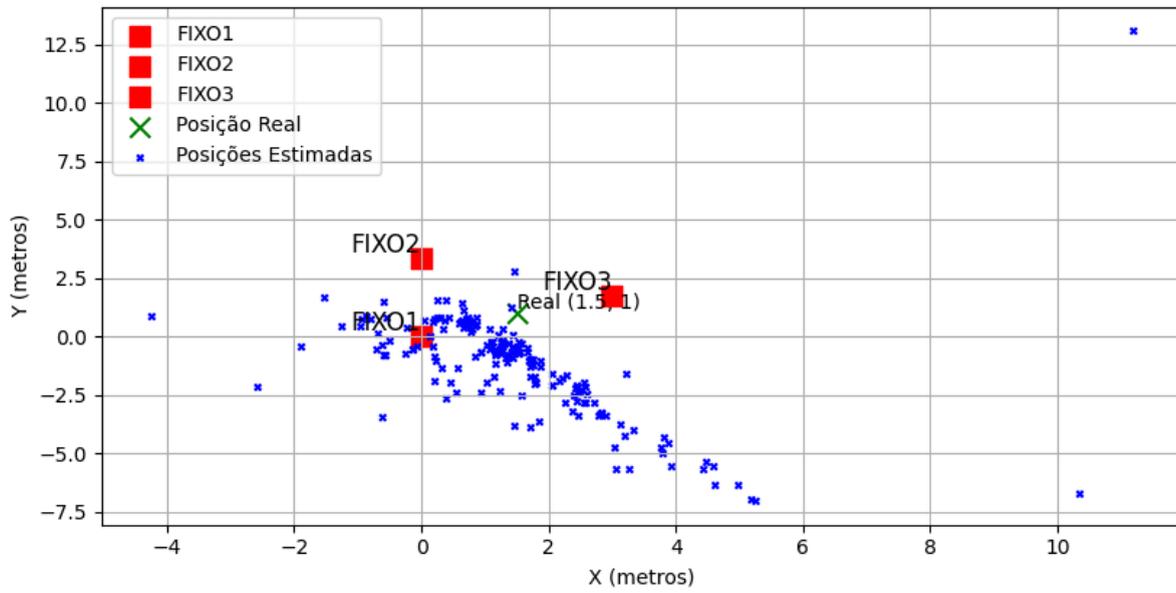
Fonte: autoria própria.

Figura 27 - Posições Estimadas vs Real para Ponto 5.



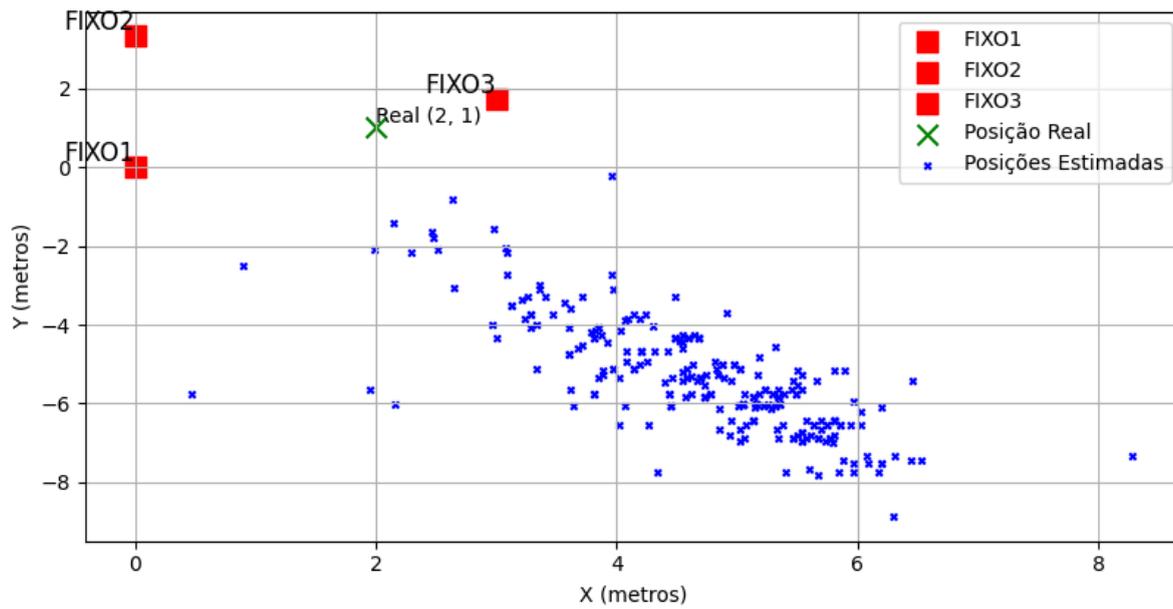
Fonte: autoria própria.

Figura 28 - Posições Estimadas vs Real para Ponto 6.



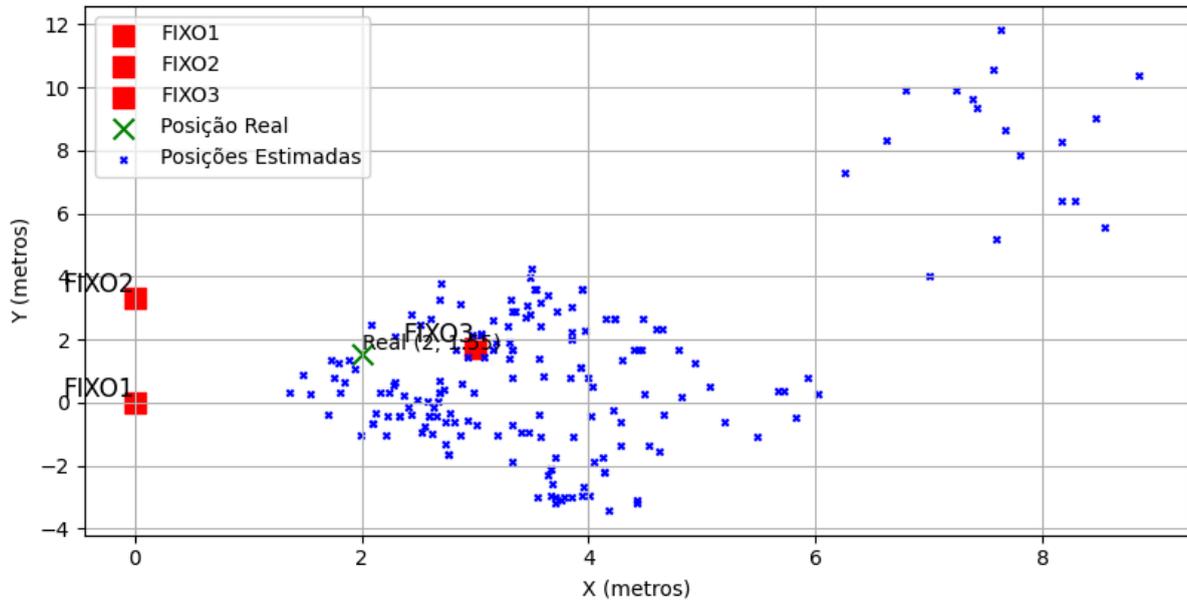
Fonte: autoria própria.

Figura 29 - Posições Estimadas vs Real para Ponto 8.



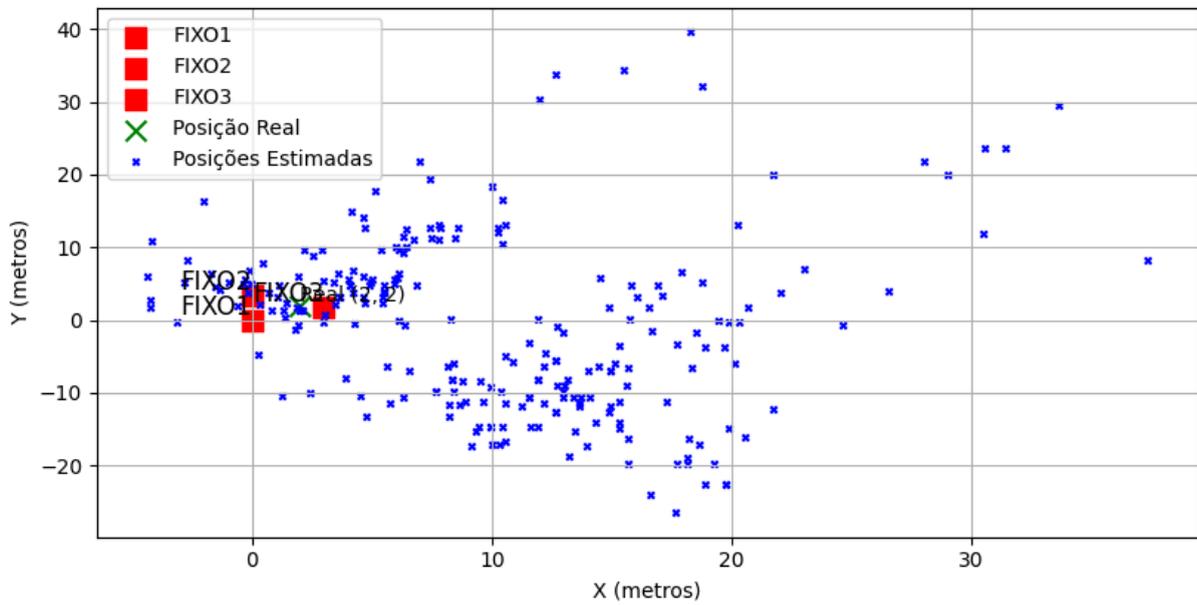
Fonte: autoria própria.

Figura 30 - Posições Estimadas vs Real para Ponto 9.



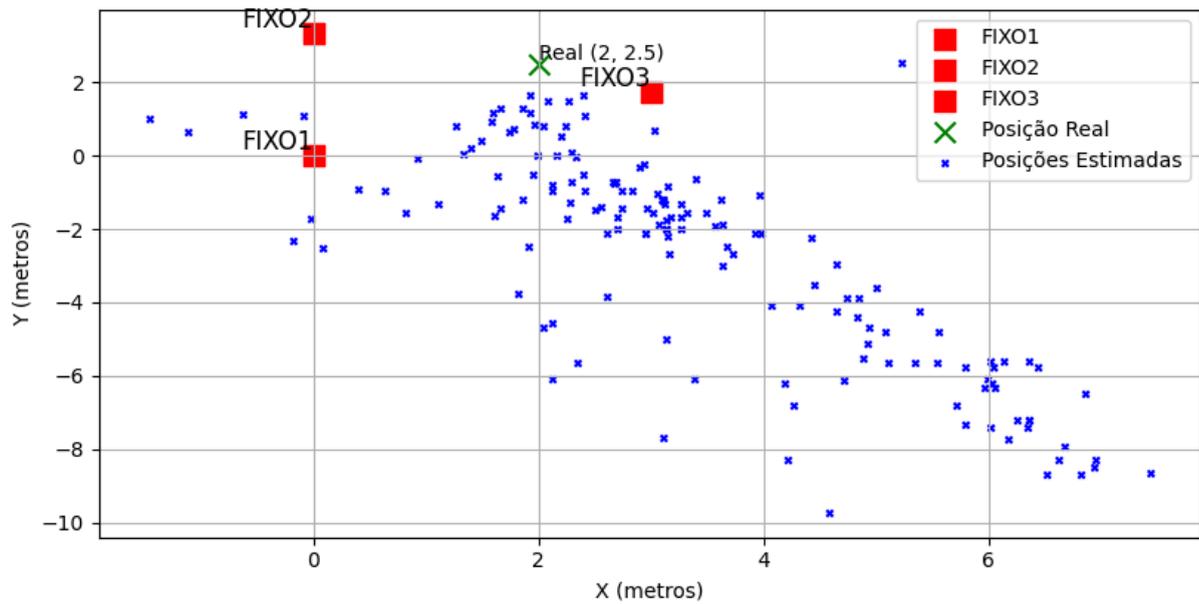
Fonte: autoria própria.

Figura 31 - Posições Estimadas vs Real para Ponto 10.



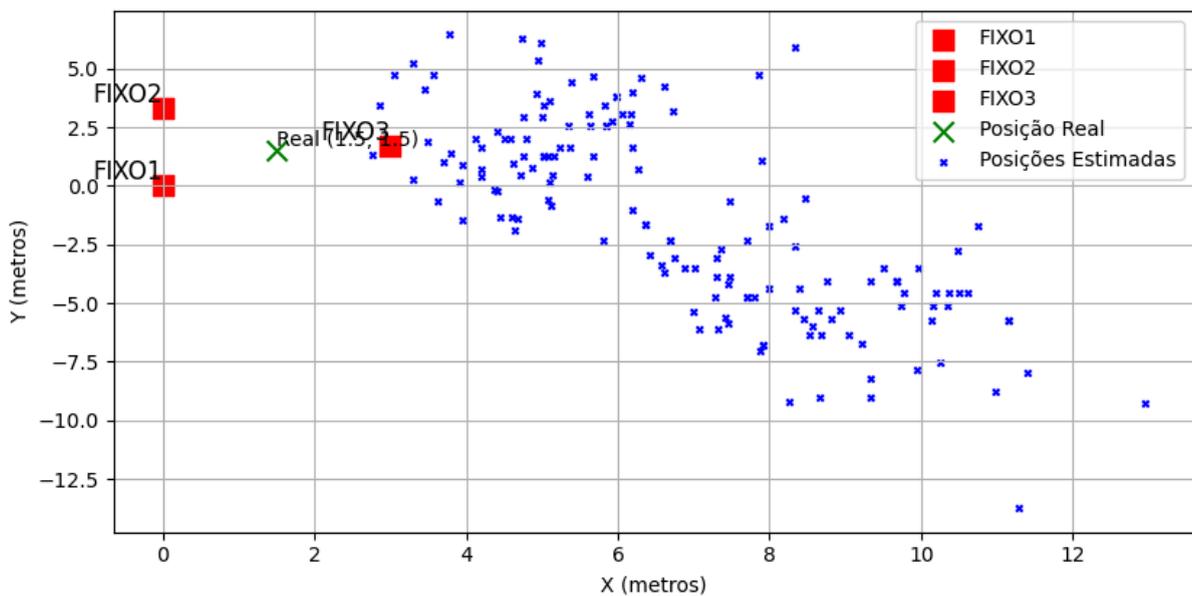
Fonte: autoria própria.

Figura 32 - Posições Estimadas vs Real para Ponto 11.



Fonte: autoria própria.

Figura 33 - Posições Estimadas vs Real para Ponto 12.



Fonte: autoria própria.

Após a obtenção das coordenadas x e y estimadas por meio da trilateração, foi realizada uma filtragem baseada nas coordenadas das posições dos *FIXOs*, removendo os outliers que não estavam dentro desse ambiente, ou seja, todos pontos que excedem o limiar

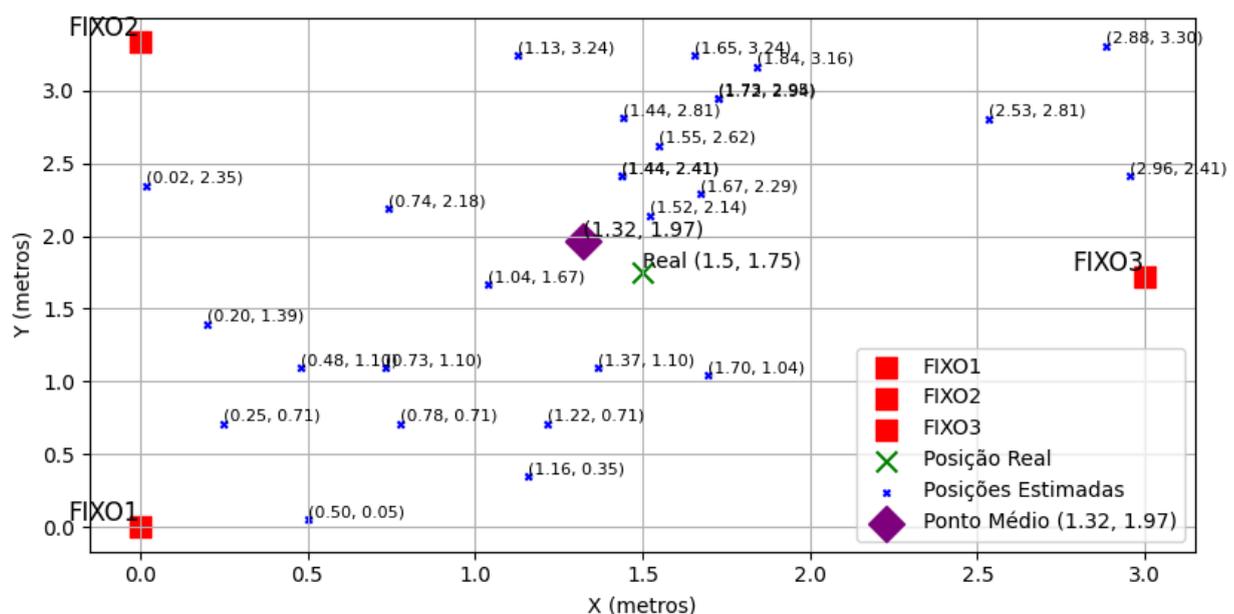
do ambiente pré-definido pelas coordenadas dos *FIXOs* foram considerados inválidos e descartados, os pontos que estavam dentro desse limiar, chamou-se de posições válidas.

É possível perceber que em alguns pontos, todas as posições estimadas são consideradas inválidas, excedem o limiar pré-definido, possivelmente devido a interferências no sinal no momento em que o teste foi realizado.

Com o conjunto de dados filtrado, procedeu-se para o cálculo do ponto médio (ou centroide) das consideradas posições válidas. O centroide é determinado pela média das coordenadas x e y , representando o ponto central da distribuição espacial das medições. Esse processo permitiu uma estimativa mais precisa da posição do *BM*, reduzindo a influência de medições inconsistentes.

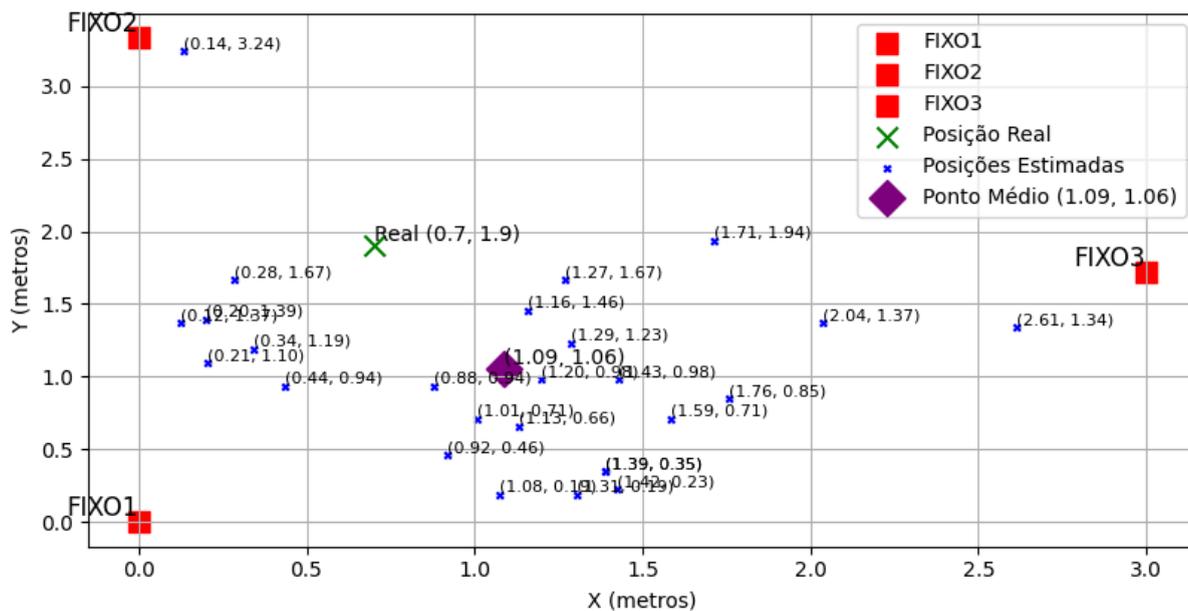
As Figuras 34-44 ilustram a distribuição das posições válidas e o centroide calculado, destacando a concentração das medições em torno do ponto central.

Figura 34 - Posições estimadas válidas e centroide para ponto 1.



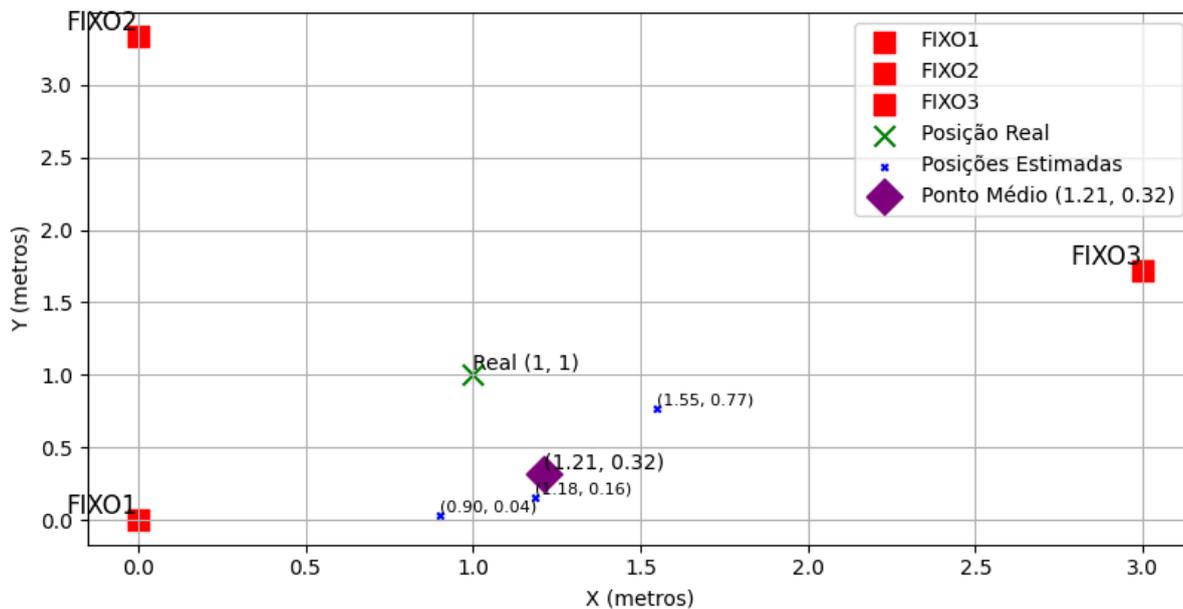
Fonte: autoria própria.

Figura 37 - Posições estimadas válidas e centroide para ponto 4.



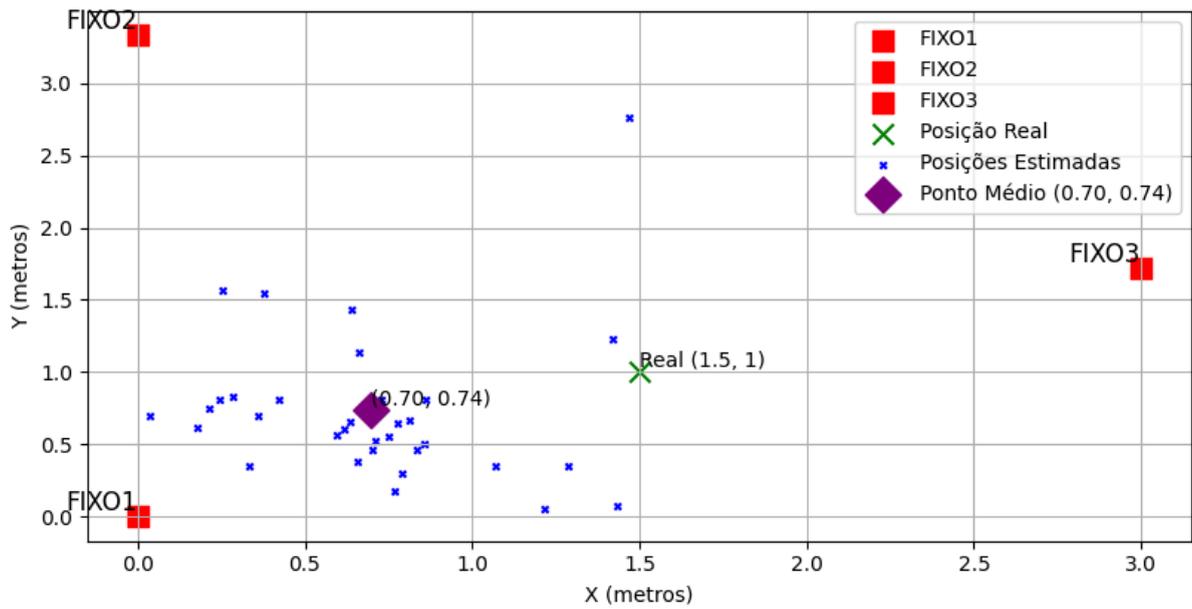
Fonte: autoria própria.

Figura 38 - Posições estimadas válidas e centroide para ponto 5.



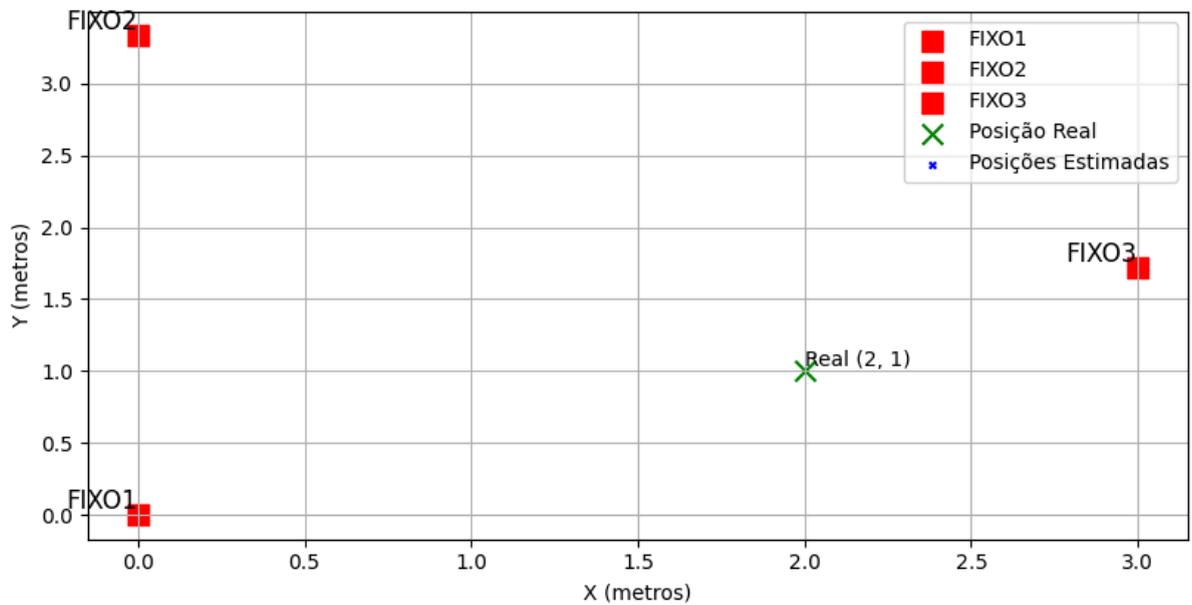
Fonte: autoria própria.

Figura 39 - Posições estimadas válidas e centroide para ponto 6.



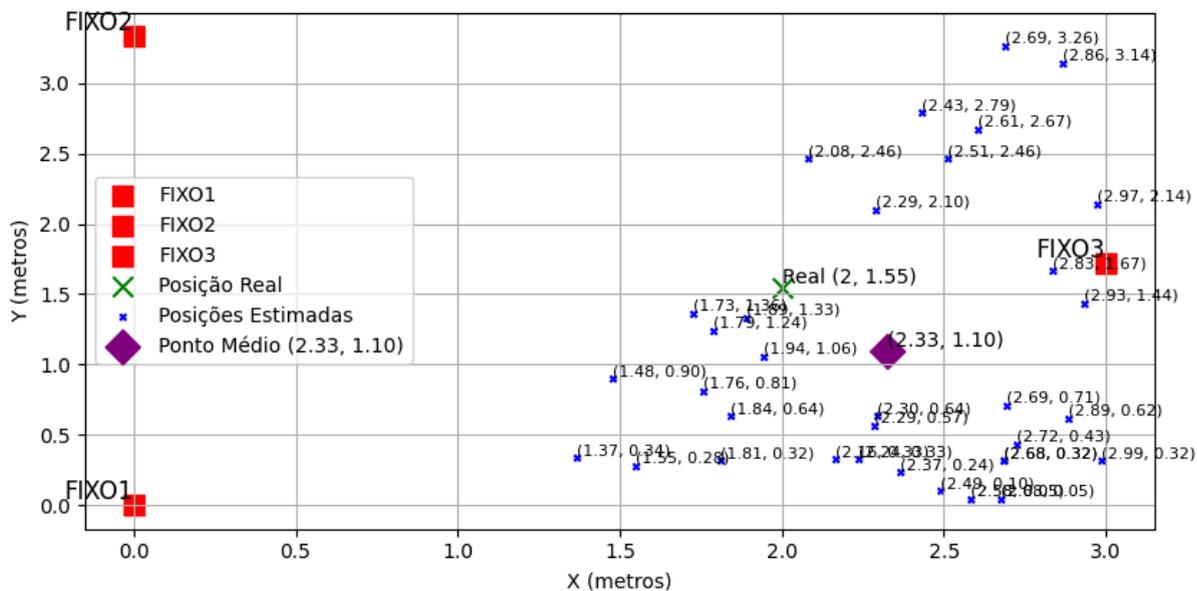
Fonte: autoria própria.

Figura 40 - Posições estimadas válidas e centroide para ponto 8.



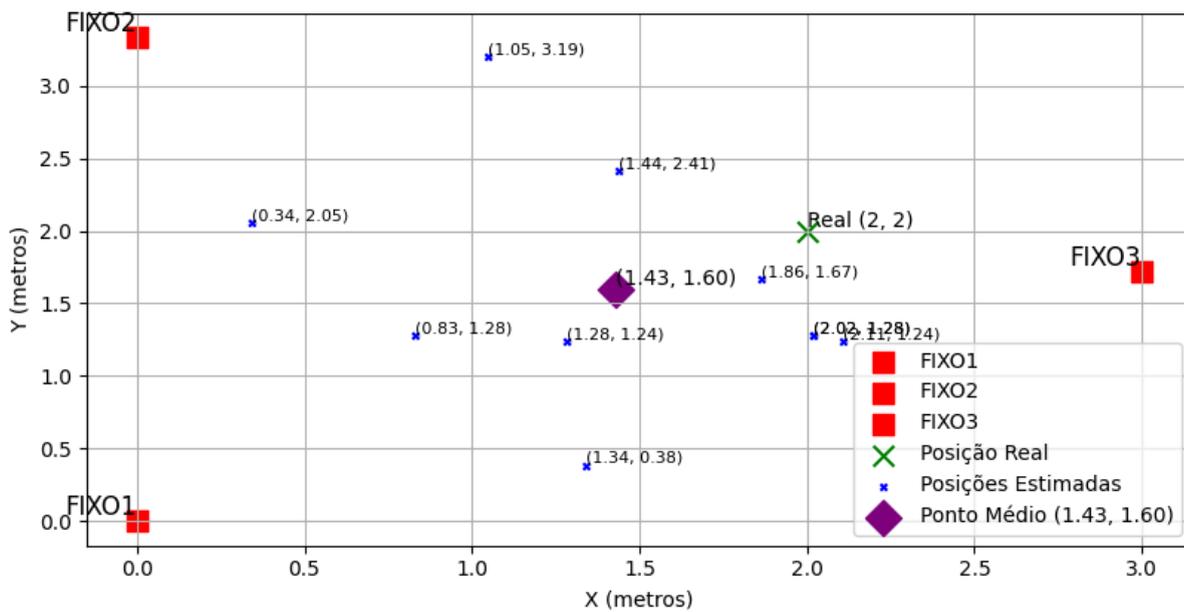
Fonte: autoria própria.

Figura 41 - Posições estimadas válidas e centroide para ponto 9.



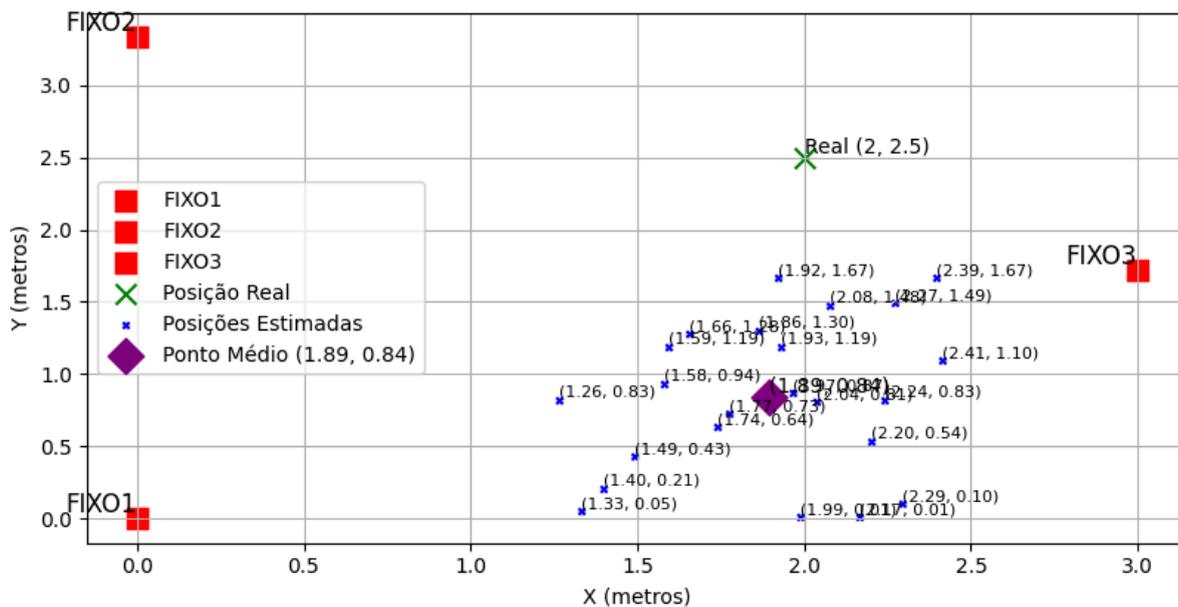
Fonte: autoria própria.

Figura 42 - Posições estimadas válidas e centroide para ponto 10.



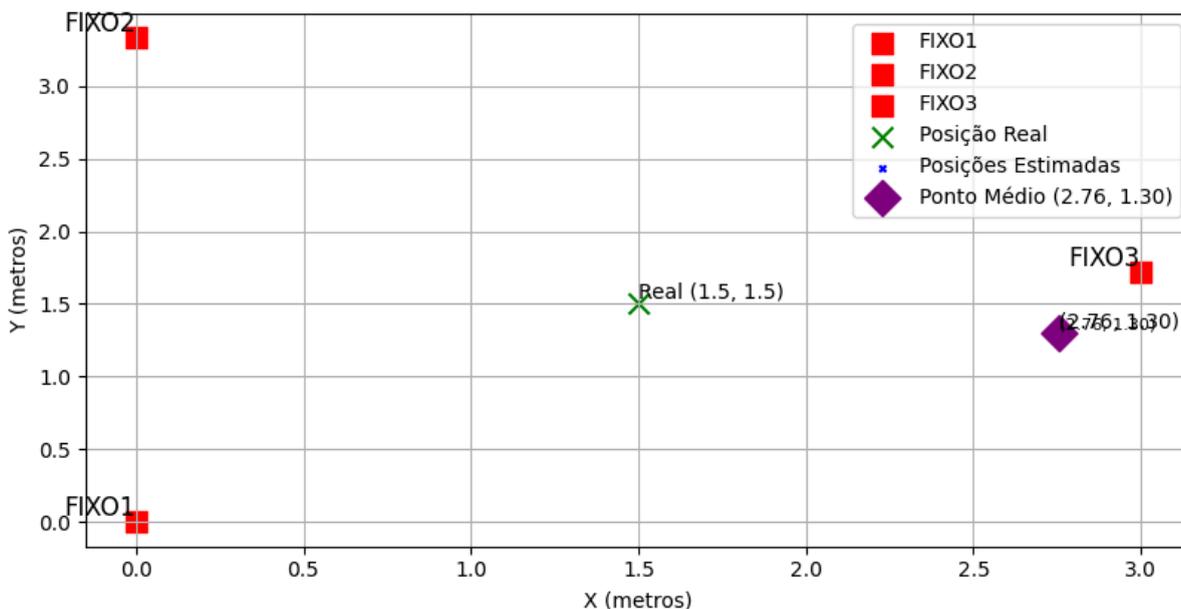
Fonte: autoria própria.

Figura 43 - Posições estimadas válidas e centroide para ponto 11.



Fonte: autoria própria.

Figura 44 - Posições estimadas válidas e centroide para ponto 12.



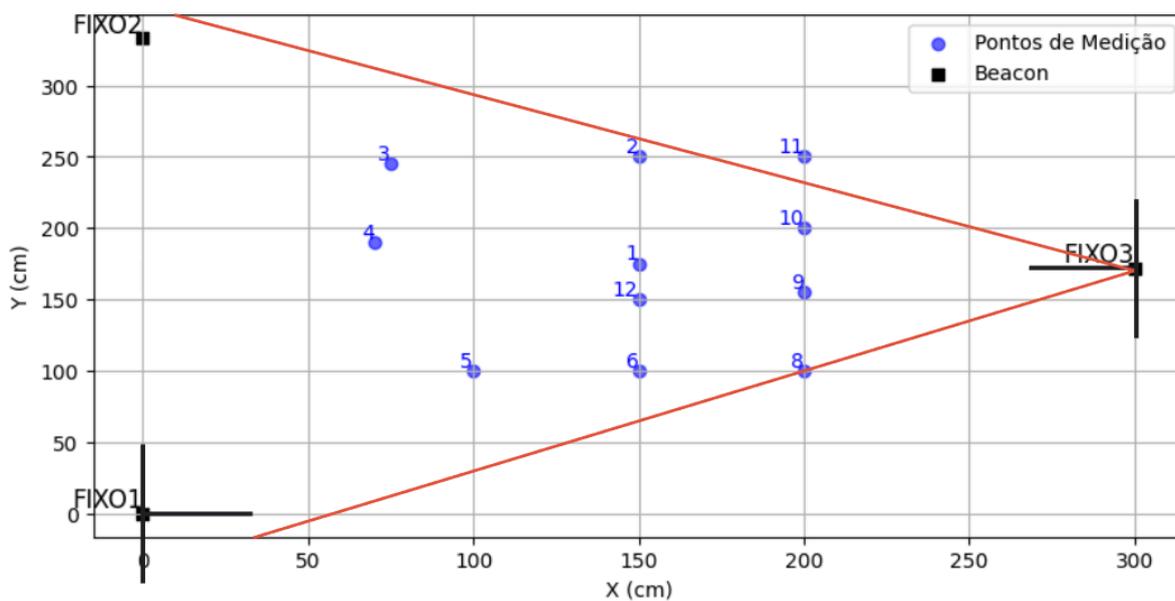
Fonte: autoria própria.

A remoção dos *outliers* e o cálculo do centroide demonstraram ser uma boa abordagem para melhorar a precisão da estimativa da posição do *beacon* móvel, reduzindo a influência de medições imprecisas. No entanto, em alguns casos, como no ponto 8, não foi

possível obter estimativas dentro do limiar estabelecido para o ambiente. Esse efeito pode ter sido causado pelo limite do ângulo de abertura do *SoC* utilizado.

Na *Figura 45*, uma linha do *FIXO3* até o ponto 8 foi traçada e, em seguida, uma linha paralela invertida para cima, a fim de tentar visualizar a abertura angular. Dentro do limiar formado por essas duas linhas, é possível observar que todos os pontos dentro desse ângulo foram “enxergados” pelo *FIXO3*.

Figura 45 - Ângulo de abertura do *SoC* no ponto 8.



Fonte: autoria própria.

Contudo, conforme ilustrado na *Figura 29*, que mostra as estimativas do ponto 8, podemos ver que os resultados foram ruins, com todas as estimativas de posição ficando fora dos limites do ambiente ou além da área esperada.

Diante desses resultados, sugere-se, como trabalho futuro, a implementação das técnicas de *AoA* e *AoD* para aprimorar a precisão e a confiabilidade das estimativas de posicionamento.

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos nos testes realizados em ambiente controlado, permitiram identificar diversos fatores que influenciam a precisão e a estabilidade de um sistema para posicionamento *indoor* baseado em *BLE*. A altura em que os *beacons* são posicionados, mostrou-se ser uma influência significativa à propagação do sinal *RSSI*, com medições indicando que posicionar os dispositivos diretamente no chão resulta em maior instabilidade. Recomenda-se evitar a colocação dos *beacons* diretamente no chão e mantê-los em uma altura adequada.

A remoção de *outliers* e o cálculo do centroide demonstraram ser uma abordagem eficaz para melhorar a precisão da estimativa da posição do *beacon* móvel, reduzindo a influência de medições imprecisas e proporcionando uma localização mais confiável. Além disso, a disposição dos *beacons* no ambiente experimental também se mostrou fundamental. A orientação das antenas para frente e o ângulo de incidência dos sinais, contribuíram para melhorar a cobertura reduzindo erros associados a variações no ângulo de propagação e minimizando efeitos indesejáveis, como reflexões e perdas excessivas.

Observou-se uma dispersão significativa dos dados mesmo em ambientes controlados de linha de visão direta. Essa dispersão pode ser atribuída a características do ambiente, como a presença de superfícies metálicas (por exemplo, as banquetas onde os *beacons* foram posicionados nos testes para determinação de “*A*” e “*m*”), que causam reflexões e problemas de múltiplos caminhos do sinal. Apesar dessas flutuações, a variação de intensidade do sinal *RSSI* (pico mais alto e mais baixo) manteve-se constante, sugerindo que a variabilidade do sinal é uma característica própria do ambiente.

A utilização de médias dos valores de *RSSI* em cada distância mostrou-se uma estratégia eficiente para reduzir o impacto das variações e obter estimativas mais confiáveis. Além disso, a abordagem adotada de obter leituras bidirecionais, em que os valores de *RSSI* foram capturados tanto na visão dos *beacons* *FIXOs* em relação ao *beacon* móvel, quanto na visão inversa, demonstrou ser eficiente para a redução de ruídos e flutuações no sinal.

Como trabalhos futuros, sugere-se a implementação de métodos/técnicas, como o *AoA* e o *AoD*, para melhorar a precisão do sistema, além de otimizar o tempo de sincronia e a obtenção dos valores de *RSSI*, aumentando o número de amostras em um período mais curto. Outra proposta, seria a aplicação de filtros avançados, como o *Filtro de Kalman* e o *Filtro de Partículas*, para suavizar os dados e aumentar a precisão das estimativas. Adicionalmente,

pode ser explorada a utilização de modelos matemáticos que considerem o eixo z , como a trilateração $3D$, que considera os três eixos (x, y, z) , permitindo lidar com a variação da altura em que os *beacons* são posicionados.

Por fim, recomenda-se revisar a arquitetura do projeto, visando o consumo de energia. Uma abordagem é inverter a lógica atual, utilizando os *FIXOs* para enviar as informações para o servidor e manter apenas um *SoC* como *beacon* móvel, realizando *advertising*, assim, poderia ser reduzido o gasto energético e simplificar a implementação.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] HUANG, Chi-Jan; CHI, Cheng-Jan; HUNG, Wei-Tzu. **Hybrid-AI-Based iBeacon Indoor Positioning Cybersecurity: Attacks and Defenses**. *Sensors*, v. 23, n. 4, p. 2159, 2023. [[CrossRef](#)]
- [2] CHAN, Aldar CF; CHUNG, Raymond MH. **Security and privacy of wireless beacon systems**. arXiv preprint arXiv:2107.05868, 2021. [[CrossRef](#)]
- [3] CHINTALAPUDI, Krishna; PADMANABHA IYER, Anand; PADMANABHAN, Venkata N. **Indoor localization without the pain**. In: Proceedings of the sixteenth annual international conference on Mobile computing and networking. 2010. p. 173-184. [[CrossRef](#)]
- [4] BAI, Lu et al. **A low cost indoor positioning system using bluetooth low energy**. *Ieee Access*, v. 8, p. 136858-136871, 2020. [[CrossRef](#)]
- [5] PAKANON, Noppapadon; CHAMCHOY, Monchai; SUPANAKOON, Pichaya. **Study on accuracy of trilateration method for indoor positioning with BLE beacons**. In: 2020 6th international conference on engineering, applied sciences and technology (ICEAST). IEEE, 2020. p. 1-4. [[CrossRef](#)]
- [6] ALKAN, Huseyin; CELEBI, Hasari. **The implementation of positioning system with trilateration of haversine distance**. In: 2019 IEEE 30th annual international symposium on personal, indoor and mobile radio communications (PIMRC). IEEE, 2019. p. 1-6. [[CrossRef](#)]
- [7] NOERTJAHYANA, Agustinus; WIJAYANTO, Ignatius Alex; ANDJARWIRAWAN, Justinus. **Development of mobile indoor positioning system application using android and bluetooth low energy with trilateration method**. In: 2017 international conference on soft computing, intelligent system and information technology (ICSIIT). IEEE, 2017. p. 185-189. [[CrossRef](#)]
- [8] CAY, Elif et al. **Beacons for indoor positioning**. In: 2017 International Conference on Engineering and Technology (ICET). IEEE, 2017. p. 1-5. [[CrossRef](#)]

- [9] SHEN, Yiwen; HWANG, Beom; JEONG, Jaehoon Paul. **Particle Filtering-Based Indoor Positioning System for Beacon Tag Tracking**. IEEE Access, [s. l.], v. 8, p. 226445–226460, 2020. [[CrossRef](#)]
- [10] BENČAK, Primož; HERCOG, Darko; LERHER, Tone. **Indoor positioning system based on bluetooth low energy technology and a nature-inspired optimization algorithm**. Electronics, v. 11, n. 3, p. 308, 2022. [[CrossRef](#)]
- [11] BAE, Youngchul. **Robust localization for robot and IoT using RSSI**. Energies, v. 12, n. 11, p. 2212, 2019. [[CrossRef](#)]
- [12] SALIMI, Behnam et al. **Localised single-station lightning detection by using TOA method**. Jurnal Teknologi, v. 64, n. 4, 2013. [[CrossRef](#)]
- [13] AZIZ, Muhammad Irfan; OWENS, Thomas; UZ ZAMAN, Uzair Khaleeq. **RSSI based localization of bluetooth devices using trilateration: an improved method for the visually impaired**. In: 2018 10th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI). IEEE, 2018. p. 1-5. [[CrossRef](#)]
- [14] NOVAIS, Heitor Augusto de. **Sistema de posicionamento indoor baseado em bluetooth low energy utilizando IOT**. 2022. [[CrossRef](#)]
- [15] WAN, Qing et al. **A high precision indoor positioning system of BLE AOA based on ISSS algorithm**. Measurement, v. 224, p. 113801, 2024. [[CrossRef](#)]
- [16] TOSI, Jacopo et al. **Performance evaluation of bluetooth low energy: A systematic review**. Sensors, v. 17, n. 12, p. 2898, 2017. [[CrossRef](#)]
- [17] YE, Hongyun et al. **A Method of Indoor Positioning by Signal Fitting and PDDA Algorithm Using BLE AoA Device**. IEEE Sensors Journal, [s. l.], v. 22, n. 8, p. 7877–7887, 2022. [[CrossRef](#)]

- [18] MONFARED, Shaghayegh et al. **Experimental demonstration of BLE transmitter positioning based on AOA estimation**. In: 2018 IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). IEEE, 2018. p. 856-859. [[CrossRef](#)]
- [19] LIANG, Genhua et al. **An Indoor Integrated Localization Algorithm Based on UWB/BLE**. In: Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2021. p. 012058. [[CrossRef](#)]
- [20] HUH, Jun-Ho; SEO, Kyungryong. **An indoor location-based control system using bluetooth beacons for IoT systems**. Sensors, v. 17, n. 12, p. 2917, 2017. [[CrossRef](#)]
- [21] RODRIGUES, Matheus S.; CARVALHO, Sérgio T. **CareLoc: Uma Aplicação de Localização de Pacientes usando Beacons em Ambiente Domiciliar**. In: Simpósio Brasileiro de Computação Aplicada à Saúde (SBCAS). SBC, 2020. p. 93-98. [[CrossRef](#)]
- [22] DA SILVA, Henrique Dal Mora Rosendo. **Estudo e Implementação de uma Plataforma Baseada em Computação Visual com o uso de BEACONS para facilitar a Navegação Indoor de Pessoas com Deficiência Visual**. [sn], 2020. [[CrossRef](#)]
- [23] KE, ChihKun et al. **Developing a BLE beacon-based location system using location fingerprint positioning for smart home power management**. Energies, v. 11, n. 12, p. 3464, 2018. [[CrossRef](#)]
- [24] MRINDOKO, Nicholaus R.; MINGA, Lusajo M. **A comparison review of indoor positioning techniques**. International Journal of Computer (IJC), v. 21, n. 1, p. 42-49, 2016. [[CrossRef](#)]
- [25] SAKPERE, Wilson; ADEYEYE-OSHIN, Michael; MLITWA, Nhlanhla BW. **A state-of-the-art survey of indoor positioning and navigation systems and technologies**. South African Computer Journal, v. 29, n. 3, p. 145-197, 2017. [[CrossRef](#)]
- [26] ZAFARI, Faheem; GKELIAS, Athanasios; LEUNG, Kin K. **A survey of indoor localization systems and technologies**. IEEE Communications Surveys & Tutorials, v. 21, n. 3, p. 2568-2599, 2019. [[CrossRef](#)]

- [27] KHUDHAIR, Ahmed Azeez et al. **Wireless indoor localization systems and techniques: survey and comparative study**. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, v. 3, n. 2, p. 392-409, 2016. [[CrossRef](#)]
- [28] SHIN, Kiyong et al. **Outdoor localization using BLE RSSI and accessible pedestrian signals for the visually impaired at intersections**. Sensors, v. 22, n. 1, p. 371, 2022. [[CrossRef](#)]
- [29] CANTÓN PATERNA, Vicente et al. **A bluetooth low energy indoor positioning system with channel diversity, weighted trilateration and kalman filtering**. Sensors, v. 17, n. 12, p. 2927, 2017. [[CrossRef](#)]
- [30] SUBEDI, Santosh; PYUN, Jae-Young. **Practical fingerprinting localization for indoor positioning system by using beacons**. Journal of Sensors, v. 2017, n. 1, p. 9742170, 2017. [[CrossRef](#)]
- [31] WANG, Qi et al. **Bluetooth positioning based on weighted K-nearest neighbors and adaptive bandwidth mean shift**. International Journal of Distributed Sensor Networks, v. 13, n. 5, p. 1550147717706681, 2017. [[CrossRef](#)]
- [32] PATIL, A.; SHIROLKAR, A. A. **A review on system-on-chip (SoC) designs for real-time industrial application**. International Journal of Trend in Scientific Research and Development (IJTSRD), v. 2, n. 1, p. 1534-1537, 2017. [[CrossRef](#)]
- [33] CAYRE, Romain; CAUQUIL, Damien; FRANCILLON, Aurélien. **ESPwn32: Hacking with ESP32 System-on-Chips**. In: 2023 IEEE Security and Privacy Workshops (SPW). IEEE, 2023. p. 311-325. [[CrossRef](#)]
- [34] ESP32C3 Series Datasheet UltraLowPower SoC with RISC-V SingleCore CPU Supporting IEEE 802.11b/g/n (2.4 GHz WiFi) and Bluetooth® 5 (LE) Including. [s.l: s.n.]. [[CrossRef](#)]
- [35] VALES, Valentín Barral et al. **Fine time measurement for the Internet of Things: A practical approach using ESP32**. IEEE Internet of Things Journal, v. 9, n. 19, p. 18305-18318, 2022. [[CrossRef](#)]

[36] ESPHOME - **ESPHome**. [[CrossRef](#)]

[37] TASMOTA - **Tasmota**. [[CrossRef](#)]

[38] ESP EASY - **ESP Easy**. [[CrossRef](#)]

[39] AL-SHAREEDA, Mahmood A. et al. **Bluetooth low energy for internet of things: review, challenges, and open issues**. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, v. 31, n. 2, p. 1182-1189, 2023. [[CrossRef](#)]

[40] CHA, Shi-Cho et al. **A blockchain connected gateway for BLE-based devices in the internet of things**. iee access, v. 6, p. 24639-24649, 2018. [[CrossRef](#)]

[41] GHORI, Muhammad Rizwan; WAN, Tat-Chee; SODHY, Gian Chand. **Bluetooth low energy mesh networks: Survey of communication and security protocols**. Sensors, v. 20, n. 12, p. 3590, 2020. [[CrossRef](#)]

[42] HORN, Berthold KP. **Doubling the accuracy of indoor positioning: Frequency diversity**. Sensors, v. 20, n. 5, p. 1489, 2020. [[CrossRef](#)]

[43] ESP-IDF Programming Guide - ESP32-C3 - — **ESP-IDF Programming Guide v5.4 documentation**. [[CrossRef](#)]

[44] **Códigos Compartilhados** - Google Drive. [[CrossRef](#)]



CÓPIA DO TRABALHO Nº 32/2025 - DELMAX (11.57.05)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 26/02/2025 23:15)

WILLIAN MARTINS LEAO

PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO

DELMAX (11.57.05)

Matrícula: ###915#4

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/documentos/> informando seu número: 32, ano: 2025, tipo: **CÓPIA DO TRABALHO**, data de emissão: 26/02/2025 e o código de verificação: **b3566f9f69**