

Universidade de Brasília - UnB
Faculdade do Gama - FGA
Engenharia Eletrônica

Sistema de Localização em Recintos Fechados Usando Antenas *Bluetooth*

Autor: Luiz Henrique Rocha Marinho
Orientador: Prof. Dr. Daniel Mauricio Muñoz Arboleda

Brasília, DF
2020



Luiz Henrique Rocha Marinho

Sistema de Localização em Recintos Fechados Usando Antenas *Bluetooth*

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade do Gama - FGA

Orientador: Prof. Dr. Daniel Mauricio Muñoz Arboleda

Brasília, DF

2020

Luiz Henrique Rocha Marinho

Sistema de Localização em Recintos Fechados Usando Antenas *Bluetooth*/ Luiz Henrique Rocha Marinho. – Brasília, DF, 2020-
64 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Mauricio Muñoz Arboleda

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade do Gama - FGA , 2020.

1. Indoor Positioning System. 2. Bluetooth. I. Prof. Dr. Daniel Mauricio Muñoz Arboleda. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade do Gama. IV. Sistema de Localização em Recintos Fechados Usando Antenas *Bluetooth*

CDU 02:141:005.6

Luiz Henrique Rocha Marinho

Sistema de Localização em Recintos Fechados Usando Antenas *Bluetooth*

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 18 de novembro de 2019:

**Prof. Dr. Daniel Mauricio Muñoz
Arboleda**
Orientador

Prof. Dr. Diogo Caetano Garcia
Convidado 1

Prof. Dr. Renato Coral Sampaio
Convidado 2

Brasília, DF
2020

Agradecimentos

Aos meus pais, Luiz Carlos e Sandra, pelo apoio incondicional em todos os momentos da minha vida; à minha irmã, Lizandra, por ser uma grande amiga em momentos difíceis; aos professores que fizeram parte da minha formação acadêmica, em especial ao Prof. Dr. Daniel Muñoz, pela colaboração e dedicação em suas orientações prestadas durante o desenvolvimento deste projeto, mesmo em tempos tão difíceis de pandemia; a todos os meus familiares e amigos, principalmente aos que fiz na Universidade de Brasília - Gama, pelos bons momentos de convivência e aprendizado durante todos esses anos de estudo.

Resumo

Com os avanços da tecnologia, há um interesse crescente em serviços com o reconhecimento de localização. Primeiramente, vale destacar que a estimativa de localização possui diversas aplicações. Desde sistemas que não exigem tanta precisão - como aplicativos de meteorologia - até sistemas que exigem precisão de centímetros - como a navegação de robôs em recintos internos. Um grupo de pessoas que sempre sofreu com a falta de acessibilidade são os deficientes visuais. Nesse sentido, um sistema que auxilie na navegação por um recinto fechado poderia tornar a vida dessas pessoas mais fácil, promovendo, assim, uma maior inclusão social. Utilizando microcontroladores ESP-32 da *Espressif Systems* com antena *bluetooth* 4.0 integrada, é possível implementar o sistema de localização *indoor* de forma eficiente, com o auxílio de ferramentas matemáticas para determinar a localização e as propriedades de um sinal de radiofrequência - como a variação da potência recebida à medida que a distância entre emissor e receptor varia. No entanto, esse comportamento é difícil de ser caracterizado devido a interferências causadas por objetos como paredes, portas, janelas e outros dispositivos eletrônicos que usam tecnologia sem fio. Desse modo, as ondas eletromagnéticas podem sofrer reflexão, refração, difração e espalhamento em um recinto fechado, o que pode causar o multipercurso do sinal, o qual prejudica a eficiência do sistema. Nesse contexto, foram adotadas propostas para reduzir os efeitos do multipercurso e viabilizar o sistema de localização a partir da variação da potência recebida do sinal RSSI - *Received Signal Strength Indicator*. Dentre essas propostas, pode-se mencionar a caracterização simplificada das antenas emissora e receptora, a fim de identificar os melhores pontos de radiação do sinal *bluetooth*, e o direcionamento do sinal das antenas emissoras a partir de uma estrutura com papel de alumínio em sua volta, funcionando como uma semiblindagem eletrostática com o intuito de reduzir a interferência entre as antenas. Partindo do pressuposto de que a potência recebida e a distância têm relação quadrática inversa, foram realizados experimentos para encontrar uma relação matemática entre RSSI e distância que, mais a frente, seria aplicada no método da trilateração. Feito isso, os três métodos de estimativa de posição foram avaliados a partir de experimentos padronizados e com critérios semelhantes, com o fito de comparar a eficiência de cada método. Os métodos de estimativa de posição avaliados foram o método da trilateração, o método das tabelas e o método das regiões. Em seguida, esses métodos foram aplicados dentro dos cômodos de uma residência para validar os experimentos. Por fim, foram levantadas possíveis melhorias de projetos futuros a partir da proposta da implementação de três métodos de estimativa de localização simultaneamente.

Palavras-chaves: localização *indoor*, microcontroladores, ESP-32, *bluetooth*, RSSI, trilateração, multipercurso.

Abstract

With advances in technology, there is a growing interest in location-aware services. First, it is worth noting that the location estimate has several applications. From systems that do not require as much precision - such as meteorological applications - to systems that require centimeter accuracy - such as robot navigation in indoor spaces. The visually impaired have always suffered from a lack of accessibility. In this sense, a system that helps in navigating through an internal space could make life easier for these people, thus promoting greater social inclusion. Using Espressif Systems' ESP-32 microcontrollers with integrated bluetooth 4.0 antenna, it is possible to implement the Indoor Positioning System efficiently using mathematical tools to determine the location and the properties of a radio frequency signal - such as variation of the received power as the distance between emitter and receiver varies. However, this behavior is difficult to characterize due to interference from objects such as walls, doors, windows and other electronic devices that use wireless technology. In this way, electromagnetic waves can undergo reflection, refraction, diffraction and scattering in an enclosure, which may cause the multipath of the signal and impairs the efficiency of the system. In this context, proposals were adopted to reduce the effects of the multipath and make the location system viable from the variation of the received power of the RSSI - Received Signal Strength Indicator. Among these proposals, it can mention the simplified characterization of the sending and receiving antennas, in order to identify the best radiation points of the bluetooth signal, and the direction of the signal of the sending antennas from a structure with aluminum foil around them, working as an electrostatic semi-shield to reduce the interference between the antennas. Based on the assumption that the received power and the distance have an inverse quadratic relationship, experiments were carried out to find a mathematical relationship between RSSI and distance that, later on, would be applied in the trilateration method. That done, the three position estimation methods were evaluated from standardized experiments and with similar criteria, in order to compare the efficiency of each method. The position estimation methods evaluated were the trilateration method, the tables method and the regions method. Then, these methods were applied inside the rooms of a residence to validate the experiments. Finally, possible improvements of future projects were raised from the proposal to implement three methods of estimating location simultaneously.

Key-words: Indoor Positioning, Microcontrollers, ESP-32, Bluetooth, RSSI, Trilateration, Multipath.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Estimativa de uso dos meios sem fio de comunicação.	14
Figura 2 – Ilustração do parâmetro AOA.	17
Figura 3 – Ilustração do parâmetro TDOA.	18
Figura 4 – Representação do parâmetro RSSI em relação à distância entre receptor e emissor.	19
Figura 5 – Gráfico de RSSI em relação à distância para diferentes meios, com valores de n variando de 2 a 6.	19
Figura 6 – Efeito do multipercurso em recinto fechado.	21
Figura 7 – Representação da triangulação.	21
Figura 8 – Representação da trilateração em duas dimensões.	22
Figura 9 – ESP-32.	25
Figura 10 – Caracterização da antena ESP-32 com uma distância de 5 metros entre a antena emissora e a receptora.	26
Figura 11 – Representação dos quatro diferentes posicionamentos das antenas emissora e receptora caracterizados.	26
Figura 12 – Exemplo de um diagrama de irradiação 2D de um dipolo de 4 GHz, em dB.	27
Figura 13 – Representação da coleta de dados com a antena receptora se afastando 0,5 m a cada medida.	28
Figura 14 – Fotografia da ESP-32 com semiblandagem de alumínio e atuando como antena emissora.	29
Figura 15 – Fotografia da garagem após as marcações no chão	30
Figura 16 – Ilustração da garagem após a preparação para o início dos testes	30
Figura 17 – Ilustração dos pontos estimados com marcação em azul.	31
Figura 18 – Regiões de 1 a 8 identificadas pelo método das regiões. A parte listrada entre cada região representa locais onde a interferência é maior.	33
Figura 19 – Representação da distribuição de antenas pela casa com suas respectivas coordenadas.	34
Figura 20 – Exemplo de sistema com baixa resolução.	36
Figura 21 – Exemplo de sistema com resolução melhorada.	36
Figura 22 – Gráfico obtido a partir dos diagramas de radiação padrão normalizados para antenas emissora e receptora variando entre horizontal e vertical.	37
Figura 23 – Gráfico obtido a partir dos diagramas polares de radiação padrão normalizados para antenas emissora e receptora variando entre horizontal e vertical. Quanto maior o diâmetro, maior a potência do sinal recebido.	38

Figura 24 – Médias das amostras do emissor sem semiblandagem de alumínio. O desvio padrão máximo foi de 5,78 dBm em 14 m. Enquanto o desvio padrão mínimo foi de 0,55 dBm em 3 m.	39
Figura 25 – Médias das amostras do emissor com semiblandagem de alumínio. O desvio padrão máximo foi de 3,91 dBm em 14,5 m. Enquanto o desvio padrão mínimo foi de 0,33 dBm em 0 m.	39
Figura 26 – Médias e desvio padrão das distâncias estimadas em comparação com as distâncias reais.	40
Figura 27 – Dispersão no método das tabelas com $y = 1,5$ m - coleta dinâmica. . .	42
Figura 28 – Dispersão no método das tabelas com $y = 1,5$ m - coleta estática. . . .	42
Figura 29 – Dispersão no método das tabelas com $y = 0,5$ m - coleta dinâmica. . .	43
Figura 30 – Dispersão no método das tabelas com $y = 0,5$ m - coleta estática. . . .	43
Figura 31 – Dispersão no método da trilateração com $y = 1,5$ m - coleta dinâmica. .	44
Figura 32 – Dispersão no método da trilateração com $y = 1,5$ m - coleta estática. .	44
Figura 33 – Dispersão no método da trilateração com $y = 0,5$ m - coleta dinâmica. .	45
Figura 34 – Dispersão no método da trilateração com $y = 0,5$ m - coleta estática. .	45
Figura 35 – Experimento de coleta em pontos fora das coordenadas pré-determinadas no método das tabelas.	48
Figura 36 – Experimento de coleta em pontos fora das coordenadas pré-determinadas no método da trilateração.	48
Figura 37 – Mapa de cores - método das tabelas. Medidas que obtiveram erros com raio menor que 2 metros em verde; erros com raio entre 2 metros e 4 metros em amarelo; e erros com raio superior a 4 metros em vermelho.	50
Figura 38 – Mapa de cores - método da trilateração. Medidas que obtiveram erros com raio menor que 2 metros em verde; erros com raio entre 2 metros e 4 metros em amarelo; e erros com raio superior a 4 metros em vermelho.	51
Figura 39 – Mapa de cores - método das regiões. Medidas que não obtiveram erros entre cômodos em verde; medidas que obtiveram até 1 erro entre cômodos em amarelo; e medidas que obtiveram mais de 1 erro entre cômodos em vermelho.	52
Figura 40 – Relação entre área de cobertura e memória ocupada. A área da garagem - $31,1 m^2$ - foi usada como referência. Os valores destacados em vermelho são referentes a essa área.	54
Figura 41 – Proposta de aplicação dos três métodos simultaneamente com funções específicas.	57

Lista de tabelas

Tabela 1 – Resultados obtidos no método das regiões	46
Tabela 2 – Média do erro absoluto para cada um dos métodos	47
Tabela 3 – Erro máximo, mínimo e médio para o teste em pontos fora das coordenadas pré-determinadas	49
Tabela 4 – Método das tabelas nos cômodos de uma residência	50
Tabela 5 – Trilateração nos cômodos de uma residência.	51
Tabela 6 – Implementação do método das regiões nos cômodos de uma residência	52
Tabela 7 – Memória utilizada, velocidade de execução, consumo de bateria, autonomia e custo para cada método.	53
Tabela 8 – Avaliação dos critérios de otimalidade para cada método de localização <i>indoor</i>	55

Lista de abreviaturas e siglas

AOA	<i>Angle of Arrival</i>
BLE	<i>Bluetooth Low Energy</i>
CSMA-CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GTSS	<i>Guaranteed Time Slots</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
IPS	<i>Indoor Position System</i>
MAE	<i>Mean Absolute Error</i>
OMS	Organização Mundial da Saúde
RF	Radiofrequência
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i>
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i>
TDOA	<i>Time Difference of Arrival</i>
TOA	<i>Time of Arrival</i>
URE	<i>Uncorrected Refractive Error</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
WHO	<i>World Health Organ</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Contextualização	13
1.2	Justificativa	14
1.3	Objetivos	15
1.3.1	Objetivos Específicos	15
1.4	Contribuições do Trabalho	15
1.5	Organização do Documento	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	Parâmetros para a Localização	17
2.1.1	Parâmetro AOA - <i>Angle of Arrival</i> .	17
2.1.2	Parâmetros TOA - <i>Time of Arrival</i> - e TDOA - <i>Time Difference of Arrival</i> .	17
2.1.3	Parâmetro RSSI - <i>Received Signal Strength Indicator</i> .	18
2.2	Multipercurso do Sinal	20
2.3	Principais Modelos para <i>Indoor Positioning System (IPS)</i>	21
2.3.1	Triangulação	21
2.3.2	Trilateração	22
2.4	Estado da Arte	23
3	METODOLOGIA	25
3.1	Caracterização da Antena BLE	25
3.2	Relação entre Distância e Potência do BLE	28
3.3	Métodos de Estimativa de Posição	29
3.3.1	Método da Comparação de Potência por Tabelas	31
3.3.2	Método da Trilateração	33
3.3.3	Método da Comparação de Potência por Regiões	33
3.4	Implementação nos Cômodos de uma Residência	34
3.5	Critérios de Comparação entre os Métodos.	35
4	RESULTADOS OBTIDOS	37
4.1	Caracterização da Antena BLE	37
4.2	Relação entre RSSI e Distância	38
4.3	Métodos de Estimativa de Posição	41
4.3.1	Método da Comparação de Potência por Tabelas	42
4.3.1.1	Coletas realizadas no meio do corredor (coordenada $y = 1,5$ m)	42
4.3.1.2	Coletas realizadas próximo à parede (coordenada $y = 0,5$ m)	43

4.3.2	Método da Trilateração	44
4.3.2.1	Coletas realizadas no meio do corredor (coordenada $y = 1,5$ m)	44
4.3.2.2	Coletas realizadas próximo à parede (coordenada $y = 0,5$ m)	45
4.3.3	Método da Comparação de Potência por Regiões	46
4.3.4	Discussão Sobre os Métodos de Estimação de Posição	46
4.4	Teste em Pontos Fora das Coordenadas Pré-Determinadas	47
4.5	Implementação nos Cômodos de uma Residência	49
4.5.1	Método da Comparação de Potência por Tabelas	49
4.5.2	Método da Trilateração	50
4.5.3	Método da Comparação de Potência por Regiões	51
4.6	Critérios de Desempenho do Sistema	53
5	CONCLUSÕES	56
	REFERÊNCIAS	58
	APÊNDICE A – RESULTADOS OBTIDOS NO MÉTODO DAS TABELAS PARA COORDENADA $Y=1,5$ M (MEIO DO CORREDOR).	60
	APÊNDICE B – RESULTADOS OBTIDOS NO MÉTODO DAS TABELAS PARA COORDENADA $Y=0,5$M (PRÓXIMO À PAREDE).	61
	APÊNDICE C – RESULTADOS OBTIDOS NO MÉTODO DA TRI-LATERAÇÃO PARA COORDENADA $Y=1,5$ M (MEIO DO CORREDOR).	62
	APÊNDICE D – RESULTADOS OBTIDOS NO MÉTODO DA TABELAS PARA COORDENADA $Y=0,5$ M (PRÓXIMO À PAREDE).	63
	ANEXO A – LINK DE ACESSO AO REPOSITÓRIO NO GOOGLE DRIVE E GITLAB	64

1 Introdução

1.1 Contextualização

A localização é provavelmente um dos problemas mais antigos enfrentados pela espécie humana. Nesse sentido, os avanços na eletrônica e a natureza dinâmica das sociedades modernas levou a um desejo de navegação em menor escala. De forma mais geral, há um interesse crescente em serviços com o reconhecimento de localização. Esses serviços adaptam sua funcionalidade e processos com base em sua estimativa de localização (SCHEERENS, 2012).

Por exemplo, pode-se pensar em um aplicativo de celular que mostra informações meteorológicas para a área onde o dispositivo está localizado. Embora esse aplicativo não exija uma estimativa de localização muito precisa, há muitos aplicativos e serviços que se beneficiariam de uma estimativa de localização com maior precisão, como as equipes de resgate do corpo de bombeiros que buscam localizar pessoas em um prédio. Para isso, a precisão do sistema de localização poderia fazer a diferença entre a vida ou a morte. Já em casos menos extremos, uma estimativa de localização precisa também poderia ser útil, como encontrar seu colega em um grande prédio de escritórios (SCHEERENS, 2012).

Um sistema de localização também pode ser útil na aplicação de robótica móvel e navegação de pessoas em recintos desconhecidos, especialmente os deficientes visuais. Pois, Além de obstáculos, os deficientes visuais também enfrentam o desafio de se localizar em ambientes com diversas salas, corredores e caminhos possíveis, o que torna inviável a sua autonomia em um recinto diferente daquele que está acostumado (MONTEIRO, 2012).

Conforme declarado pela Organização Mundial de Saúde (OMS) em 2014, estima-se que 285 milhões de pessoas sejam deficientes visuais em todo o mundo e que poderiam ser beneficiadas com sistemas de localização. Sabe-se também que a maioria das pessoas com deficiência visual vêm de países em desenvolvimento e que cerca de 65% dessas pessoas têm 50 anos ou mais (CONTRERAS; ACKLAND, 2017).

Portanto, a necessidade de dispositivos de tecnologia assistiva, de baixo custo e de fácil acesso foi e será constante. Nesse sentido, a ciência e a tecnologia buscam facilitar a vida humana, havendo uma grande necessidade de meios para ajudar as pessoas com deficiência visual a viver sem problemas relacionados à caminhada entre casas, vias públicas ou qualquer outro lugar (THERIB, 2017).

1.2 Justificativa

A partir de microcontroladores e recursos como antenas emissoras de radiofrequência (RF), os sistemas de localização *indoor* IPS - *Indoor Position System* - permitem estimar a localização de um alvo em um recinto fechado em até três dimensões. Nesse contexto, um sistema IPS é mais eficiente que um sistema GPS (*Global Positioning System*), cuja precisão não é adequada para ambientes fechados (OZOY et al., 2013).

O IPS faz uso de técnicas de triangulação, trilateração e/ou multilateração a partir de antenas instaladas nos recintos. No tocante aos meios de estimativa de posição, uma tecnologia amplamente utilizada no comércio eletrônico devido ao seu baixo consumo de energia e consideráveis taxas de transmissão é o *Bluetooth Low Energy* (BLE) (RECK, 2016).

Uma estimativa de demanda por meios de comunicação sem fio realizada pela Telematic News é apresentada na Figura 1. As três áreas na horizontal representam, de baixo para cima, desenvolvimento, lançamento e estabilização. A linha azul caracteriza a tecnologia *Bluetooth* e representa todas as suas 4 versões (1.0, 2.0, 3.0 e 4.0). Observa-se que o *Bluetooth* 4.0 lidera pelas suas características de baixo custo e pouco consumo de energia na versão BLE (RECK, 2016).

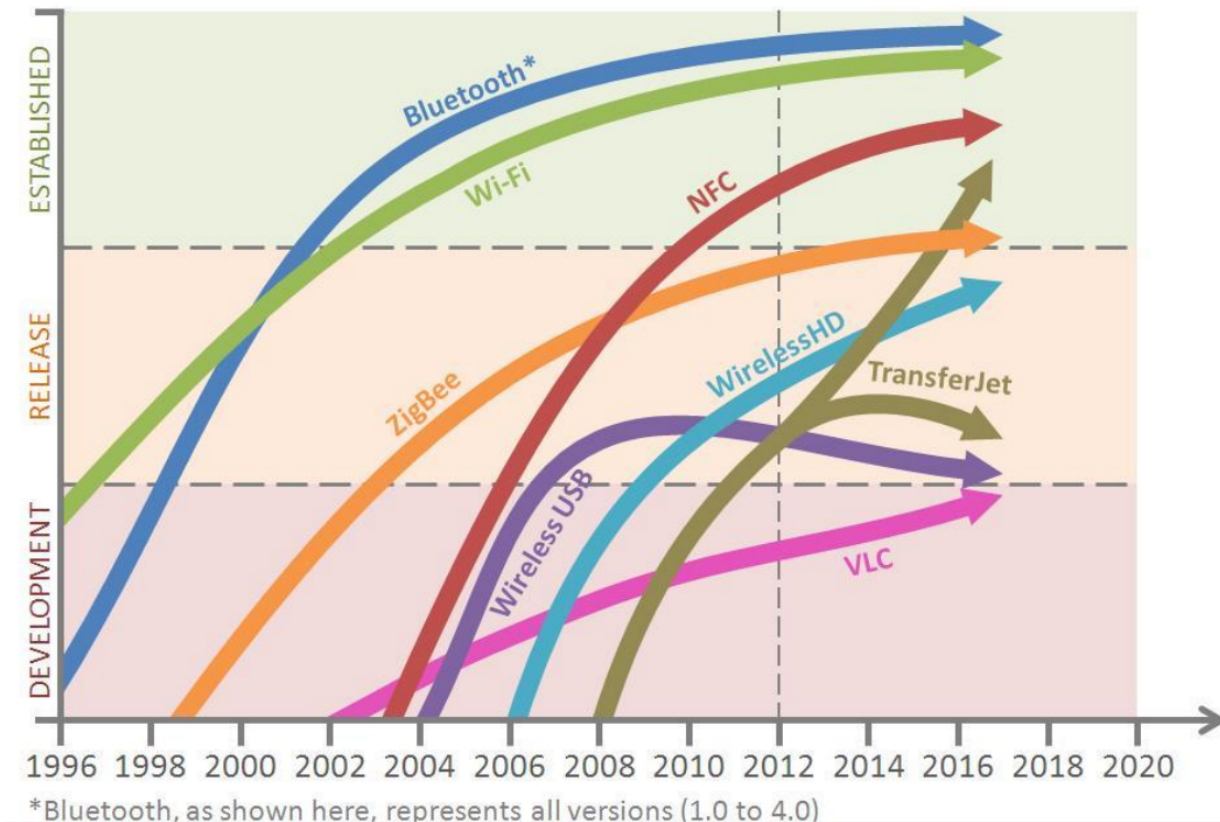


Figura 1 – Estimativa de uso dos meios sem fio de comunicação.

Fonte: Telematic News (TELEMATIC, 2012).

Existem diversas técnicas que podem ser exploradas para implementar um sistema IPS baseado em BLE, tais como construção de tabelas que relacionam a posição com a potência das antenas, triangulação e trilateração. Entretanto, cada recinto e aplicação exige diferentes requisitos de resolução, área de cobertura, velocidade de processamento, robustez, consumo energético e custo. Desse modo, é necessário conduzir experimentos que permitam comparar estatisticamente o desempenho dos métodos.

1.3 Objetivos

Desenvolver um sistema de localização em recintos fechados usando diferentes métodos de estimativa de posição baseados na potência do sinal de antenas *Bluetooth* BLE.

1.3.1 Objetivos Específicos

- Caracterização da antena BLE ESP-32 como emissora e receptora, a fim de identificar a melhor posição de radiação do sinal.
- Validação de uma relação matemática que descreva a variação da potência do sinal em função da distância entre as antenas emissora e receptora.
- Implementação de um modelo de localização *indoor* de baixo custo baseada nos métodos da trilateração e comparação de potências de antena BLE.

1.4 Contribuições do Trabalho

Este trabalho apresenta uma comparação experimental do método da trilateração com os métodos da tabela e das regiões para localização em recintos fechados a partir de medidas de potências do sinal BLE recebidas pela antena receptora (alvo). Até o momento de escrita deste trabalho, não foi encontrada na literatura correlata uma comparação experimental entre esses métodos. Diversos experimentos e testes foram realizados tanto em recintos mais abertos quanto nos cômodos de uma residência para validar os métodos e compará-los a partir de gráficos, de valores estatísticos, e da avaliação de critérios de otimalidade, provando ser viável a sua aplicação.

1.5 Organização do Documento

Este documento é composto por 5 capítulos. No Capítulo 2, é exposta a revisão bibliográfica e o estado da arte que foram utilizados como referência para definir as soluções do problema. São ainda apresentados neste capítulo os modelos teóricos e estudos realizados pela comunidade científica sobre sistemas de localização *indoor*. No Capítulo

3, apresenta-se a proposta de metodologia aplicada no trabalho. Também foi feita uma descrição do procedimento de coleta de dados para caracterizar as antenas e encontrar uma relação entre distância e potência do sinal BLE, assim como o procedimento para implementar os métodos de estimativa de posição. O capítulo se encerra com os procedimentos para a implementação dentro de uma casa com 300 m^2 e os critérios que serão avaliados. No Capítulo 4, os experimentos realizados são discutidos para elencar os melhores resultados obtidos e os problemas e soluções possíveis para a continuação do trabalho. Finalmente, no Capítulo 5, são levantadas as conclusões e a perspectiva para trabalhos futuros.

2 Fundamentação Teórica

Neste capítulo, é apresentado o marco teórico do projeto a partir dos principais conceitos necessários para entender o desenvolvimento do método de trilateração e da proposta do sistema de localização a partir da potência do sinal *bluetooth* BLE.

2.1 Parâmetros para a Localização

2.1.1 Parâmetro AOA - *Angle of Arrival*.

Os parâmetros servem para estimar a distância entre os pontos fixos e o ponto alvo a partir das características de um sinal. O parâmetro AOA - ângulo de chegada - utiliza antenas direcionais para determinar de que direção está vindo um determinado sinal. É possível determinar a posição de um dispositivo móvel, se houver duas ou mais antenas fixas, para detectar um sinal (ZEIMPEKIS et al., 2003). A principal aplicação do AOA está no método da triangulação - vide Figura 2.

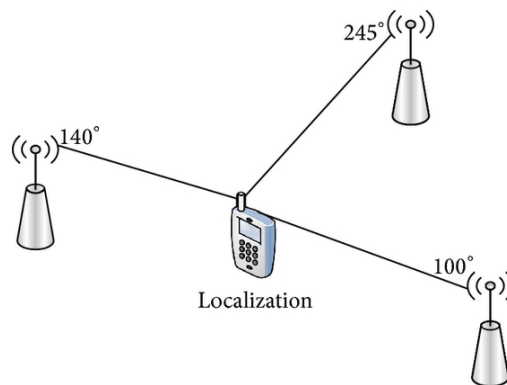


Figura 2 – Ilustração do parâmetro AOA.

Fonte: (FARID et al., 2013).

2.1.2 Parâmetros TOA - *Time of Arrival* - e TDOA - *Time Difference of Arrival*.

Outro parâmetro usado para determinar a distância a partir de um sinal de radio-frequência é o TOA - tempo de chegada -, que consiste em calcular a distância a partir do tempo que o sinal leva da antena emissora até a receptora. Esse parâmetro funciona bem quando há apenas uma emissora e uma receptora, mas apresenta dificuldades quando se aumenta o número de antenas, sendo necessária a sincronização das mesmas (FISCHER et al., 2004).

Isso é corrigido no TDOA - diferença no tempo de chegada -, que possui duas fases - Figura 3. Na fase 1, o transmissor Z_0 envia um sinal que se espalha e atinge destinos diferentes em tempos distintos, com o tempo inicial conhecido - representado por t_{start} em azul -, e com o mesmo *clock* de referência em relação aos receptores (FISCHER et al., 2004).

Quando o sinal chega aos receptores Z_1 , Z_2 e Z_3 ; é iniciada uma contagem individual. Por sua vez, quando o sinal chega em M , é solicitada uma resposta, iniciando-se a fase 2, em que o mesmo procedimento é repetido. Contudo, dessa vez o alvo M exerce o papel de enviar um sinal para as demais antenas. Quando esse sinal atinge as antenas, o contador é interrompido e determina-se, assim, a diferença de tempo entre as antenas Z_0 , Z_1 , Z_2 , Z_3 e o alvo M . A partir da diferença de tempo, calcula-se a distância entre eles. Desse modo, é necessário medir a diferença de tempo individualmente em cada antena para estimar a distância de M em relação às demais antenas, como mostra a Figura 3 (FISCHER et al., 2004).

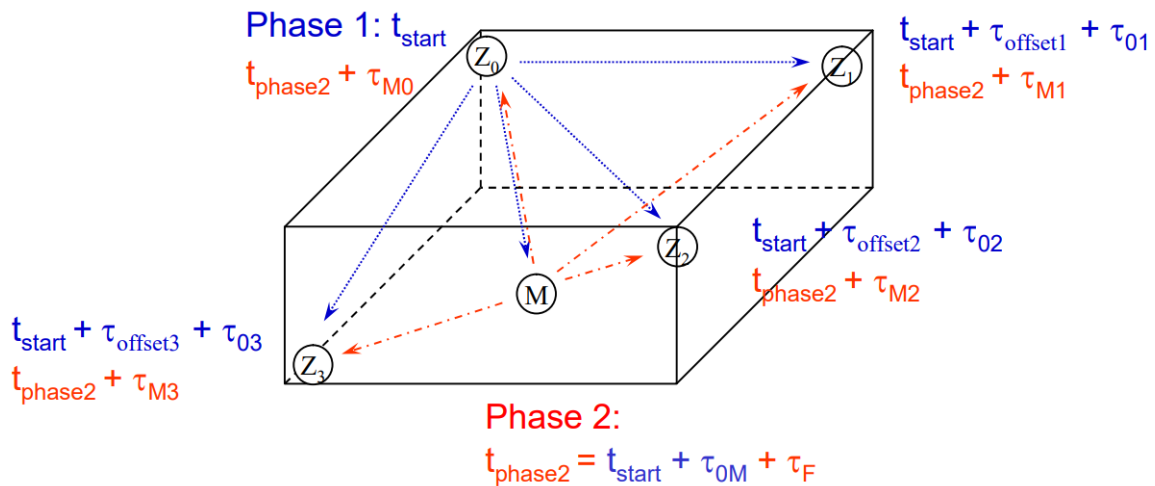


Figura 3 – Ilustração do parâmetro TDOA.

Fonte: Adaptado de (FISCHER et al., 2004).

2.1.3 Parâmetro RSSI - *Received Signal Strength Indicator*.

RSSI é a medida de potência contida em um sinal de rádio recebido, geralmente em dBm - decibel miliwatt - (SAUTER, 2010). É possível determinar a distância entre um transmissor e um objeto através da perda de percurso que o sinal sofre pelo meio físico, considerando que as potências transmitidas (antenas emissoras) e recebidas (antena receptora) são conhecidas, como é ilustrado na Figura 4 (AKASAKA, 2017). Além disso, todas as ondas eletromagnéticas têm relação quadrática inversa entre a potência recebida e a distância (SAVVIDES et al., 2001).

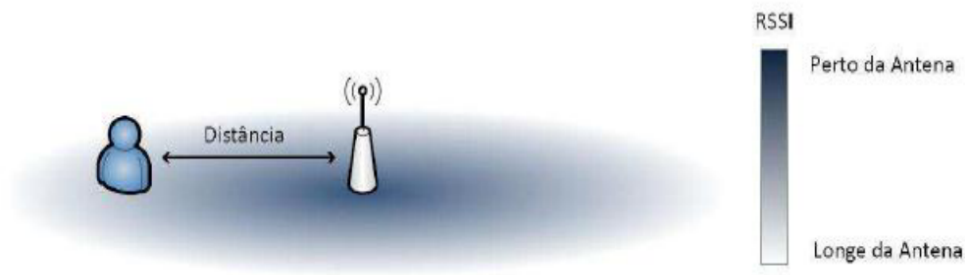


Figura 4 – Representação do parâmetro RSSI em relação à distância entre receptor e emissor.

Fonte: (AKASAKA, 2017)

Assim, é possível determinar a perda da potência do sinal a partir da diferença da potência recebida em relação à transmitida. Para ambientes internos,

$$P_r = \frac{P(d_0)}{\left(\frac{d}{d_0}\right)^n}, \quad (2.1)$$

em que P_r é a potência recebida a uma distância d do transmissor, $P(d_0)$ é a potência recebida à distância d_0 e n é uma constante do meio de propagação que geralmente varia de 2 a 6 (PU, 2009).

Por seu turno, uma das maiores dificuldades na utilização desta equação é a necessidade do conhecimento de n , pois este é dependente do ambiente e, geralmente, obtido a partir de experimentos (PU et al., 2011). A seguir, o gráfico da Figura 5 mostra como o parâmetro n pode influenciar na curva de relação entre RSSI e distância.

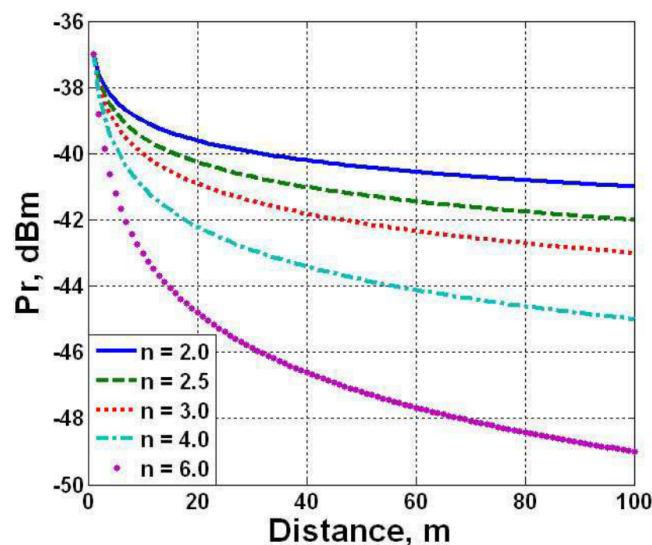


Figura 5 – Gráfico de RSSI em relação à distância para diferentes meios, com valores de n variando de 2 a 6.

Fonte: (PU, 2009)

A precisão do sistema de localização *indoor* depende dos parâmetros selecionados para a estimativa de posição e das características do ambiente. Nesse sentido, as medições podem ser corrompidas por vários fatores externos, tais como temperatura, reflexão, presença de obstáculos, corpo humano e outros sinais de comunicação (JAYAKODY et al., 2016).

A medição do RSSI está prevista pelo padrão IEEE 802.15 - do inglês, *Institute of Electrical and Electronic Engineers* - (IEEE, 2003). De acordo com Müller (2014), algumas das principais características deste padrão são:

- Operação em modo estrela ou ponto a ponto, nos quais os nós se comunicam apenas com um nó central coordenador ou com quem quiserem, respectivamente;
- Evitar conflitos para múltiplos acessos ao mesmo canal (CSMA-CA do inglês *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*);
- Medidor da potência que está sendo recebida no canal, independente se está ou não recebendo mensagens, permitindo detectar se o canal está sendo ocupado por outra transmissão (utilizado pelo algoritmo CSMA-CA) e determinar o RSSI de uma mensagem recebida. Esta característica é importante para o desenvolvimento do sistema de localização do presente trabalho;
- Tempo garantido para determinadas transmissões (GTSs - *Guaranteed Time Slots*);
- Baixo consumo de energia, permitindo que todos os nós entrem em modo de economia de energia (*sleep*) ao mesmo tempo;

2.2 Multipercurso do Sinal

O sinal de radiofrequência do *Bluetooth* é um meio não-guiado de transmissão. Isso significa que ele se propaga em todas as direções ao redor da antena emissora com um raio de alcance que varia de acordo com alguns fatores - como as características da antena e do recinto. Essa propriedade do BLE permite a aplicação da trilateração para um modelo de localização *indoor* em qualquer lugar que o usuário esteja, desde que dentro desse raio de alcance.

No entanto, esse comportamento é difícil de ser caracterizado. Além disso, muitas vezes ocorrem interferências causadas por objetos como paredes, portas, janelas e outros dispositivos eletrônicos que usam tecnologia sem fio. Desse modo, as ondas eletromagnéticas podem sofrer reflexão, refração, difração e espalhamento em um recinto fechado, o que pode causar o multipercurso do sinal - quando o sinal atinge um mesmo destino por diferentes caminhos (M.NAJNUDEL, 2004). A Figura 6 mostra um exemplo de multipercurso.

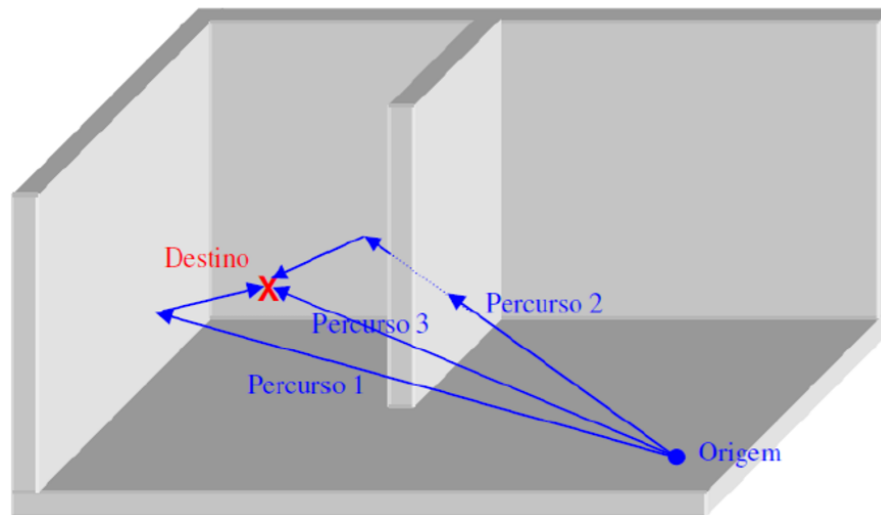


Figura 6 – Efeito do multipercurso em recinto fechado.

Fonte: (M.NAJNUDEL, 2004)

2.3 Principais Modelos para *Indoor Positioning System* (IPS)

2.3.1 Triangulação

Este método baseia-se nas propriedades do triângulo. Cada vértice do triângulo funciona como um transceptor com sua posição conhecida e escolhida no ambiente. O alvo - representado por *Target Node* na Figura 7 - transmite um sinal e os nós de referência - *References Nodes* - mais próximos medem o ângulo do sinal recebido utilizando o parâmetro AOA. Tendo as distâncias entre os pontos fixos pré-definidas, é possível determinar as coordenadas do alvo a partir das propriedades matemáticas da trigonometria (PU et al., 2011).

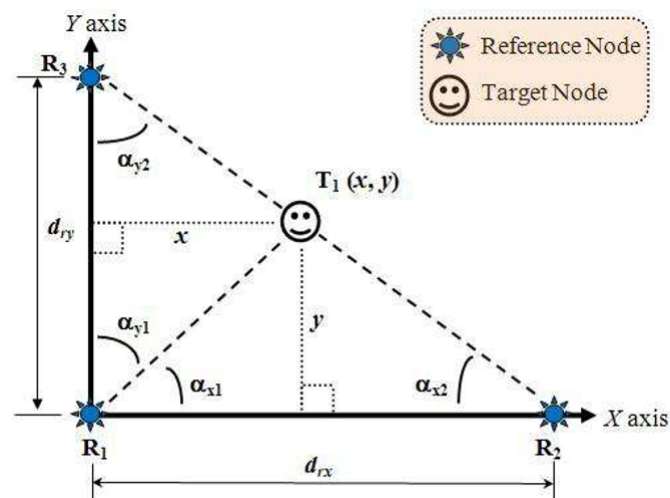


Figura 7 – Representação da triangulação.

Fonte: (PU, 2009)

2.3.2 Trilateração

A estimativa de trilateração é usada para encontrar as coordenadas desconhecidas de um alvo a partir de vários locais de referência conhecidos. Destaca-se que a diferença entre trilateração e triangulação é a informação fornecida no processo de estimativa. Em vez de medir os ângulos entre a antena emissora e as antenas receptoras, a trilateração usa as distâncias entre as antenas para estimar as coordenadas do alvo (PU et al., 2011).

Na trilateração, as distâncias entre os locais de referência e o local desconhecido podem ser consideradas os raios dos círculos com centros em todos os locais de referência (TREVISAN, 2008). Assim, a localização desconhecida é a interseção de todas as superfícies da esfera, como mostrado na Figura 8.

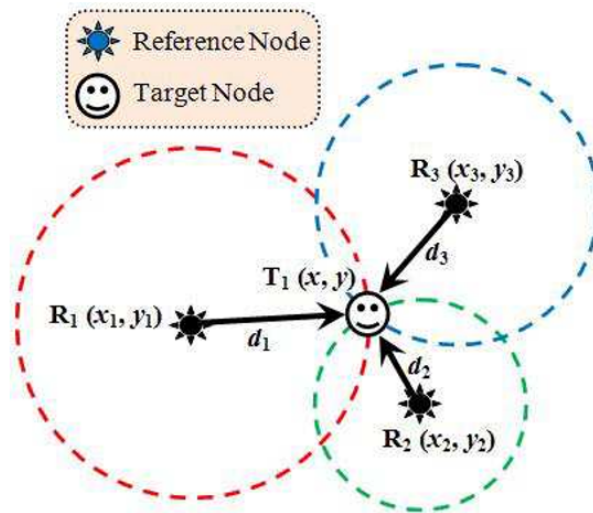


Figura 8 – Representação da trilateração em duas dimensões.

Fonte: (PU, 2009)

Nesse sentido, basta conhecer as coordenadas de R_1 , R_2 e R_3 , que são estabelecidas previamente e não variam, já que essas antenas são de referência; e estimar as distâncias d_1 , d_2 e d_3 a partir da potência do sinal BLE que varia de acordo com o deslocamento do alvo. Com esses dados, é possível estimar as coordenadas de T_1 a partir da equação reduzida da circunferência (PU, 2009),

$$\begin{aligned} d_1^2 &= (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 \\ d_2^2 &= (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 \\ d_3^2 &= (x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2. \end{aligned} \tag{2.2}$$

Porém, é preciso isolar os termos x e y , que são as coordenadas variáveis do alvo.

Rearranjando as equações em (2.2):

$$\begin{aligned} x &= \frac{AY_{32} + BY_{13} + CY_{21}}{2(x_1Y_{32} + x_2Y_{13} + x_3Y_{21})} \\ y &= \frac{AX_{32} + BX_{13} + CX_{21}}{2(y_1X_{32} + y_2X_{13} + y_3X_{21})}, \end{aligned} \quad (2.3)$$

em que,

$$\begin{aligned} A &= x_1^2 + y_1^2 - d_1^2 \\ B &= x_2^2 + y_2^2 - d_2^2 \\ C &= x_3^2 + y_3^2 - d_3^2, \end{aligned} \quad (2.4)$$

além disso,

$$\begin{aligned} X_{32} &= (x_3 - x_2) \\ X_{13} &= (x_1 - x_3) \\ X_{21} &= (x_2 - x_1) \\ Y_{32} &= (y_3 - y_2) \\ Y_{13} &= (y_1 - y_3) \\ Y_{21} &= (y_2 - y_1). \end{aligned} \quad (2.5)$$

Quando se utiliza mais que três antenas fixas, a trilateração passa a se chamar multilateração. Segundo [Norridine \(2012\)](#), multilateração é o cálculo das coordenadas espaciais de um ponto desconhecido a partir da sua distância em relação pontos conhecidos. Nesse sentido, a trilateração é um tipo de multilateração com três antenas de referência.

Por fim, vale ressaltar que tanto na triangulação quanto na trilateração o alvo deve estar sempre no alcance de pelo menos três antenas. Além disso, uma quantidade maior de antenas pode resultar em uma maior precisão da estimativa de localização ([THOMAS; ROS, 2005](#)).

2.4 Estado da Arte

Nesta seção será apresentada uma análise do estado da arte sobre técnicas de localização indoor baseadas em trilateração e multilateração. A análise será feita com base no meio de propagação do sinal, plataformas computacionais para embarcar os algoritmos e os principais resultados alcançados pelos autores.

O trabalho realizado por [Akasaka \(2017\)](#) é de relevante interesse para este estudo, pois o autor levantou as principais diferenças entre técnicas de localização *indoor* (triangulação, trilateração e multilateração). Além disso, o autor abordou os diferentes ruídos

e interferências que podem ser causados em uma onda eletromagnética dentro de um recinto fechado, podendo causar o multipercurso do sinal. Há também uma breve comparação entre os meios sem fio disponíveis para esse tipo de tarefa: BLE, ZigBee, Wi-Fi e RFID (*Radio Frequency Identification*).

Para entender melhor sobre as ondas eletromagnéticas e os fatores que interferem na sua propagação, o trabalho apresentado em [M.Najnudel \(2004\)](#) mostra aspectos que podem causar o multipercurso do sinal como a reflexão, refração, difração e espalhamento em um recinto fechado.

Já o trabalho de [Pu et al. \(2011\)](#), que é uma continuação de sua tese de doutorado ([PU, 2009](#)), foi fundamental para o entendimento dos conceitos de trilateração e multilateração por meio das ilustrações e figuras utilizadas neste capítulo. Além disso, o autor expõe matematicamente o parâmetro RSSI e suas propriedades.

O trabalho de [Norridine \(2012\)](#) descreve detalhadamente os métodos algébricos por trás da trilateração e a multilateração em três dimensões, fornecendo um sistema de equações para um número n de antenas.

No trabalho de [Junior \(2017\)](#), há uma abordagem completa sobre os requisitos de um IPS. O autor aborda os modelos matemáticos mais comuns em IPS, os parâmetros de transmissão de dados e realiza um estudo comparativo sobre o desempenho do BLE, Wi-fi e RFID para o problema de localização, realizando conclusões pertinentes a respeito de cada técnica.

Na dissertação de mestrado de [Müller \(2014\)](#), o autor trata dos algoritmos de um IPS e sua caracterização, tendo como principal objetivo a redução da complexidade computacional com o mínimo de perda de precisão. Apresenta ainda diversas simulações e resultados no MATLAB.

O projeto desenvolvido por [Silva et al. \(2016\)](#) tem muito em comum com este trabalho. O autor utiliza o RSSI do Bluetooth BLE e, por meio da trilateração, consegue estimar as coordenadas de um objeto. Contudo, os experimentos são realizados para pequenas distâncias, na grandeza de centímetros. Diferente de muitos artigos, o autor realiza experimentos práticos em um microcontrolador e apresenta uma tabela com valores teóricos e experimentais, além do erro percentual.

Por fim, vale ressaltar que não foi encontrada na literatura científica nenhuma menção ao método da comparação de potência por tabelas nem ao método da comparação de potência por regiões, que foram implementados nos testes deste trabalho com o objetivo de avaliar alternativas ao método da trilateração.

3 Metodologia

Neste capítulo, serão tratados os métodos e os modelos utilizados para o levantamento de dados. Inicialmente, a antena BLE da ESP-32 foi caracterizada com o intuito de verificar qual a orientação mais adequada da antena para irradiar o sinal com mais qualidade. Posteriormente, foi encontrada uma relação entre distância e potência do sinal BLE (RSSI), visando a observação de como os elementos de um ambiente podem interferir nos valores coletados. Em seguida, foram testados os requisitos e propriedades dos três modelos para estimativa de posição: método da comparação de potência por tabelas, o método da trilateração, e o método da comparação de potência por regiões. Por fim, implementaram-se os três métodos a fim de comparar a sua eficiência na localização de um usuário nos cômodos de uma residência.

3.1 Caracterização da Antena BLE

Segundo [Akasaka \(2017\)](#), o BLE - também conhecido como *bluetooth* 4.0 - foi projetado com o objetivo de consumir o mínimo de energia possível no processo de transferência de dados. Mesmo assim, o alcance de seu sinal supera o do *bluetooth* clássico, o que o torna adequado para um projeto de localização *indoor*. Neste trabalho, foram utilizados microcontroladores da ESP-WROOM-32 (ESP-32) da *Espressif Systems* (vide [Figura 9](#)), com módulo *bluetooth* integrado atuando como antenas emissoras e como antena receptora.

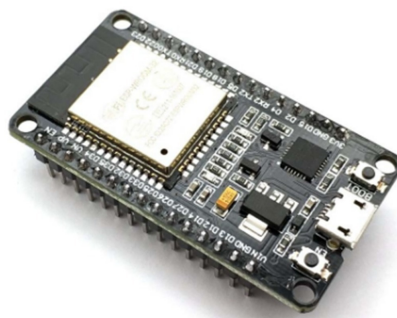


Figura 9 – ESP-32.

Fonte: ([ESPRESSIF, 2020](#))

Os testes de caracterização de antena realizados nesta seção foram baseados no trabalho de [Ramos \(2016\)](#), embora de forma simplificada e com adaptações. Nesse caso, o objetivo é caracterizar e obter o diagrama de radiação da antena BLE da ESP-32,

identificando os melhores pontos de irradiação do sinal e os pontos cegos. Para isso, a antena emissora foi posicionada a 5 metros da antena receptora, como mostra a Figura 10.

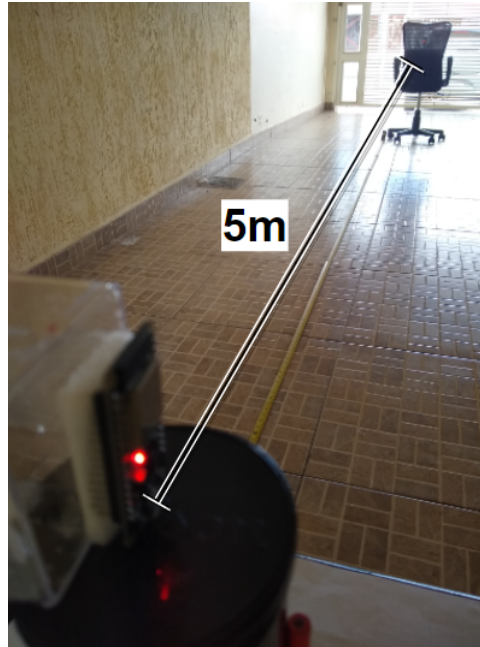


Figura 10 – Caracterização da antena ESP-32 com uma distância de 5 metros entre a antena emissora e a receptora.

Foram realizadas medidas do RSSI variando o ângulo da antena emissora em relação à receptora, a cada 10° , começando em 0° até 180° , em torno de seu próprio eixo. As antenas emissora e receptora foram posicionadas nas orientações horizontal e/ou vertical seguindo as 4 combinações possíveis, como ilustrado na Figura 11.

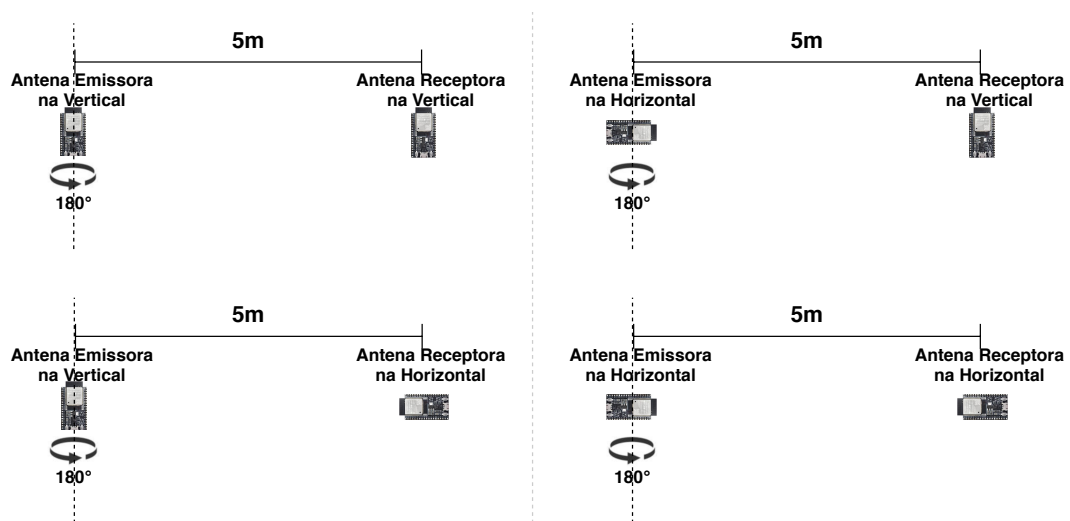


Figura 11 – Representação dos quatro diferentes posicionamentos das antenas emissora e receptora caracterizados.

Assim, foi possível encontrar a orientação em que a antena é omnidirecional e a direção em que é unidirecional. Uma antena que tem um padrão de radiação essencialmente não direcional em um dado plano da antena e um padrão de radiação direcional em qualquer outro plano ortogonal é denominada antena omnidirecional. Por sua vez, uma antena unidirecional possui um ponto de polarização máxima em determinado eixo (IEEE, 1993).

A Figura 12 mostra um exemplo de radiação omnidirecional, em vermelho, e radiação unidirecional, em azul.

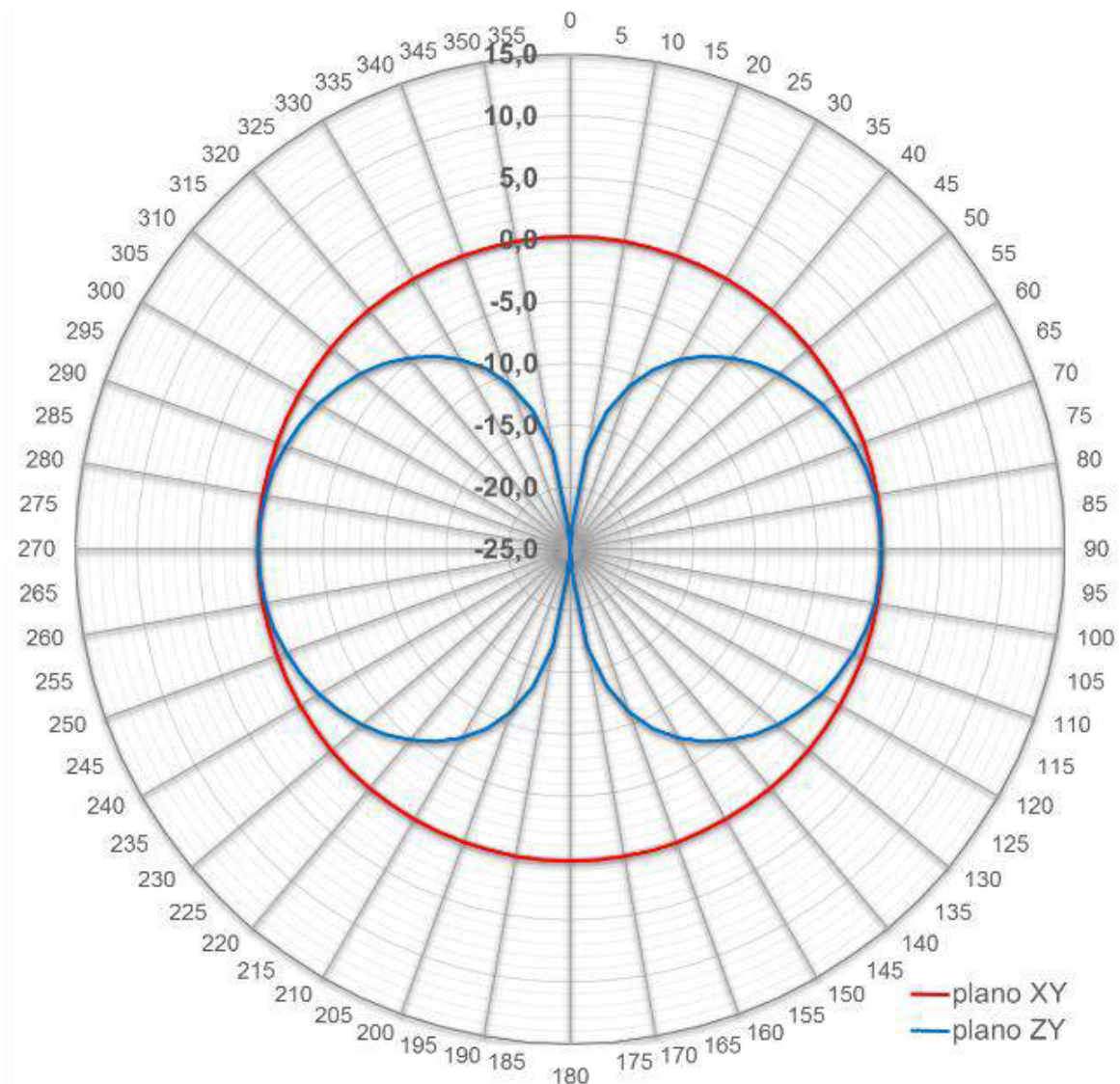


Figura 12 – Exemplo de um diagrama de irradiação 2D de um dipolo de 4 GHz, em dB.

Fonte: (RAMOS, 2016)

Por fim, para fazer os diagramas de radiação padrão, os valores de RSSI coletados, em dBm, foram convertidos para dB (decibel) a partir da relação,

$$1 \text{ dB} = 1 \text{ dBm} - 30, \quad (3.1)$$

feito isso, os valores foram normalizados para que a medida de maior magnitude em dB seja igual a zero.

3.2 Relação entre Distância e Potência do BLE

Após avaliar o melhor posicionamento de radiação para as antenas emissora e receptora, o próximo passo foi obter uma relação matemática entre distância e RSSI. Fixou-se a antena ESP-32 emissora no extremo de um corredor de 15 metros de comprimento e mediram-se 100 amostras de RSSI com a antena receptora a cada 0,5 metro (vide Figura 13).

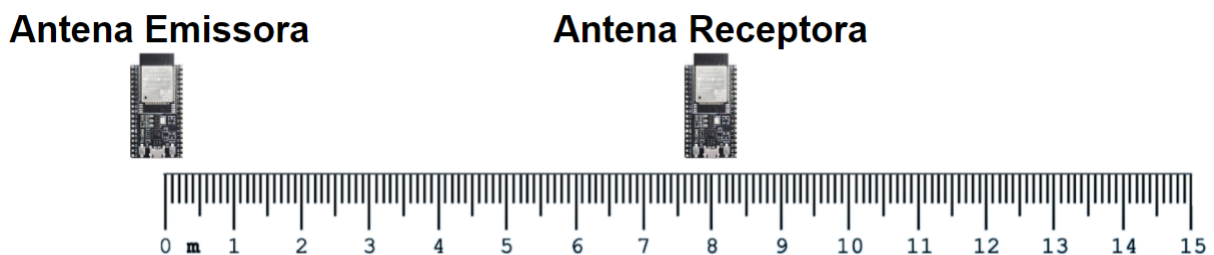


Figura 13 – Representação da coleta de dados com a antena receptora se afastando 0,5 m a cada medida.

Com os dados obtidos, foram calculados a média, a mediana e o desvio padrão para cada conjunto de 100 amostras a cada 0,5 m no software MATLAB. Além disso, foi obtida uma curva que melhor se ajusta aos valores através da função *polyfit* - como será mostrado no Capítulo 4. A partir das raízes da função de segundo grau que descreve essa curva, é possível converter o valor da potência (RSSI) do sinal em distância.

No intuito de direcionar melhor o sinal, reduzindo o multipercurso e a interferência que as antenas exercem entre si, foi criada uma semiblandagem eletrostática de alumínio na antena ESP-32 emissora. A Figura 14 mostra um exemplo de antena semiblandada. Os resultados de conversão de potência para distância com a blindagem eletrostática serão apresentados no Capítulo 4.



Figura 14 – Fotografia da ESP-32 com semiblindagem de alumínio e atuando como antena emissora.

3.3 Métodos de Estimativa de Posição

Nesta seção, serão abordadas as características dos três métodos usados neste trabalho para estimar a posição do usuário - método da comparação de potência por tabelas; método da trilateração e método da comparação de potência por regiões. Para isso, padronizou-se a forma de testes e coleta de dados da seguinte forma:

- Os testes foram realizados em uma garagem cuja área é de $31,1 m^2$ e com as seguintes medidas: 9,73 m de comprimento e 3,2 m de largura. Considerou-se o comprimento como o eixo x e a largura como o eixo y, ambos em metros;
- Foram distribuídas cinco antenas de maneira uniforme, buscando maximizar a cobertura da área da garagem. As coordenadas das antenas 1, 2, 3, 4 e 5 em metros são, respectivamente: (0;0), (3,2;3,2), (4,8;0), (6,4;3,2) e (9,6;0);
- Em seguida, foram feitas marcações com um X no chão, partindo da coordenada (0,5;0,5), avançando de metro em metro, em ambos os eixos, até a coordenada (9,5;2,5). As Figuras 15 e 16 mostram como foi feita a preparação:



Figura 15 – Fotografia da garagem após as marcações no chão

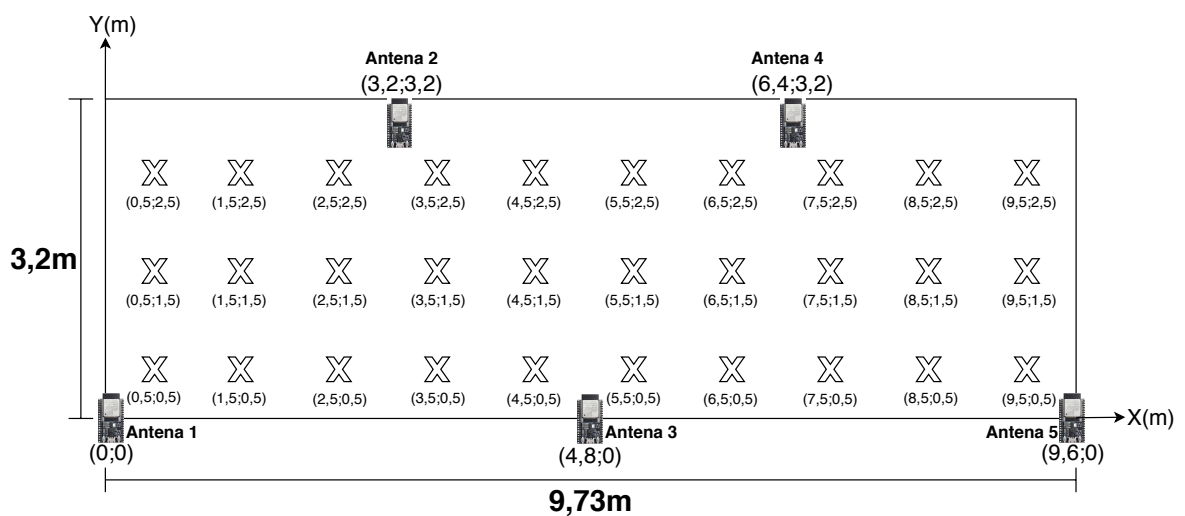


Figura 16 – Ilustração da garagem após a preparação para o início dos testes

- Os testes foram classificados em dois tipos: a coleta dinâmica, em que a aquisição de dados foi feita com a antena receptora em velocidade constante, simulando uma caminhada lenta; e a coleta estática, em que os dados foram obtidos com a antena receptora parada em cada coordenada X até obter 20 amostras. Isso se repetiu no meio do corredor - partindo das coordenadas (0,5;1,5) até as coordenadas (9,5;1,5) - e próximo à parede - partindo das coordenadas (0,5;0,5) até as coordenadas (9,5;0,5).

Esses percursos foram realizados de ida e volta. O propósito é verificar se há diferença significativa na precisão dos métodos quando o usuário está mais centralizado no corredor ou andando próximo à parede;

- A partir dos valores coletados, para as 20 amostras de cada coordenada, calculou-se a média; a mediana; e o erro médio absoluto (MAE, do inglês *Mean Absolute Error*);
- Por fim, foi feito mais um teste com o propósito de avaliar como o sistema se comporta quando o usuário está em pontos fora das coordenadas pré-determinadas. Para isso, foi feito um percurso em forma de elipse, estimando-se a posição nos pontos marcados com bolinhas azuis na Figura 17.

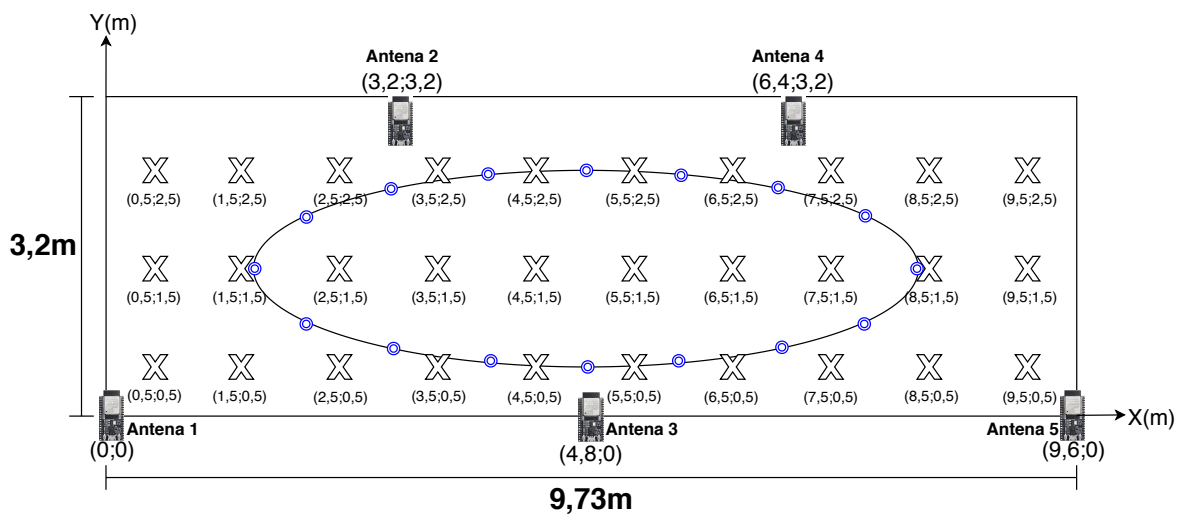


Figura 17 – Ilustração dos pontos estimados com marcação em azul.

3.3.1 Método da Comparação de Potência por Tabelas

Para este método, foram coletadas amostras de RSSI das cinco antenas em cada coordenada marcada com um X. A média de 20 valores para cada X foi armazenada em uma tabela no Excel para ser usada como referência no momento da estimativa de posição. Nesse sentido, ao comparar os valores obtidos, termo a termo, o que mais se aproximar ao valor da tabela será equivalente a posição real.

Os valores coletados compõem uma matriz $MR_{30 \times 5}$ (chamada de Matriz Real) de 30 linhas, que representam a quantidade de posições na garagem, de (0,5;0,5) até (2,5;9,5) - vide Figura 16 - e 5 colunas, que representam os valores de RSSI para as antenas de 1 a 5 em cada posição da garagem, como mostra a Equação 3.2.

$$MR_{30 \times 5} = \begin{bmatrix} \overbrace{RSSI_{11}}^{\text{Antena 1}} & \overbrace{RSSI_{12}}^{\text{Antena 2}} & \overbrace{RSSI_{13}}^{\text{Antena 3}} & \overbrace{RSSI_{14}}^{\text{Antena 4}} & \overbrace{RSSI_{15}}^{\text{Antena 5}} \\ RSSI_{21} & RSSI_{22} & RSSI_{23} & RSSI_{24} & RSSI_{25} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ RSSI_{301} & RSSI_{302} & RSSI_{303} & RSSI_{304} & RSSI_{305} \end{bmatrix} \begin{array}{l} \longrightarrow (0, 5; 0, 5) \\ \longrightarrow (0, 5; 1, 5) \\ \vdots \\ \longrightarrow (9, 5; 2, 5) \end{array} \quad (3.2)$$

Por sua vez, quando o usuário estiver se locomovendo, os valores de RSSI das 5 antenas no momento em que se quer estimar sua posição são recebidos e armazenados no vetor $VE_{5 \times 1}$ (*Vetor Estimado*).

$$VE_{5 \times 1} = [\overbrace{RSSI_1}^{\text{Antena 1}} \ \overbrace{RSSI_2}^{\text{Antena 2}} \ \overbrace{RSSI_3}^{\text{Antena 3}} \ \overbrace{RSSI_4}^{\text{Antena 4}} \ \overbrace{RSSI_5}^{\text{Antena 5}}] \quad (3.3)$$

Por exemplo: supondo-se que em certa medição, a potência média para as antenas 1, 2, 3, 4 e 5 sejam, respectivamente, -57, -65, -68, -71 e -76, então, os valores serão armazenados da seguinte forma:

$$VE = [-57 \ -65 \ -68 \ -71 \ -76] \quad (3.4)$$

Os elementos do *Vetor Estimado* são comparados com cada linha da matriz $MR_{30 \times 5}$, fazendo-se a subtração dos termos correspondentes a cada coluna. O resultado da subtração é elevado ao quadrado e, em seguida, os 5 termos quadráticos são somados. Por fim, é calculada a raiz quadrada dessa soma, sendo o resultado armazenado no *Vetor Norma N*. O cálculo do vetor N para o exemplo da Equação 3.4, seria o seguinte,

$$N = \begin{bmatrix} \sqrt{\{RSSI_{11} - (-57)\}^2 + \{RSSI_{12} - (-65)\}^2 + \dots + \{RSSI_{15} - (-76)\}^2} \\ \sqrt{\{RSSI_{21} - (-57)\}^2 + \{RSSI_{22} - (-65)\}^2 + \dots + \{RSSI_{25} - (-76)\}^2} \\ \vdots \\ \sqrt{\{RSSI_{301} - (-57)\}^2 + \{RSSI_{302} - (-65)\}^2 + \dots + \{RSSI_{305} - (-76)\}^2} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Assim, se $N[1]$ for o menor valor do vetor $N[30]$, a posição estimada é (0,5;0,5); se $N[2]$ for o menor valor entre os 30 valores, a posição estimada é (0,5;1,5); e assim por diante.

3.3.2 Método da Trilateração

Este método consiste em estimar as coordenadas de um alvo - antena receptora - a partir de sua distância em relação a três antenas emissoras de coordenadas fixas. Para saber essas distâncias, é preciso converter o RSSI obtido em distância para, então, aplicar os cálculos da trilateração.

Para implementar este método, identifica-se qual das 5 antenas possui o sinal com maior RSSI no instante da medição, presumindo-se ser esta a antena mais próxima. Esse RSSI é convertido para distância (em metros) e armazenados na variável $d1$. O mesmo é feito para as duas antenas imediatamente mais próximas, tendo seus RSSIs convertidos e armazenados nas variáveis $d2$ e $d3$, respectivamente.

Por exemplo: analisando-se a Figura 16, se a Antena 3 possuir o maior RSSI medido, então seu RSSI será convertido em distância e armazenado em $d1$. Nesse sentido, percebe-se que as antenas imediatamente mais próximas da Antena 3 são as Antenas 2 e 4. Assim, os RSSIs da Antena 2 e da Antena 4 serão convertidos em distância e armazenados nas variáveis $d2$ e $d3$. Depois de estimar as distâncias $d1$, $d2$ e $d3$, o próximo passo é aplicar as equações da trilateração abordadas na subseção 2.3.2 para obter as coordenadas (x;y) estimadas. É importante ressaltar que a eficiência deste método depende da precisão da conversão de RSSI em distância abordada na seção 3.2. Os resultados da relação de conversão de RSSI em distância serão apresentados e debatidos no Capítulo 4.

3.3.3 Método da Comparação de Potência por Regiões

Este método consiste na comparação das potências instantâneas medidas para cada antena. Utilizando 5 antenas, foi possível identificar 8 regiões diferentes na garagem com área de aproximadamente $3,84 m^2$ cada, podendo variar, sendo 1,2 metros no eixo x, como é mostrado na Figura 18.

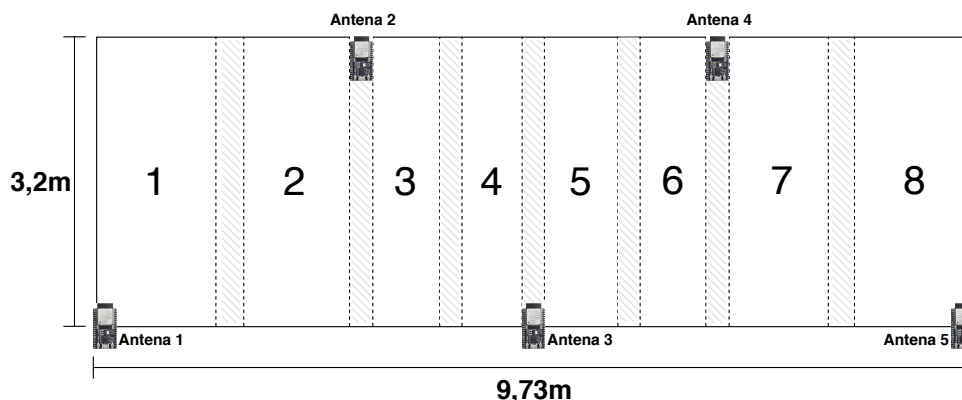


Figura 18 – Regiões de 1 a 8 identificadas pelo método das regiões. A parte listrada entre cada região representa locais onde a interferência é maior.

Assim como no método da trilateração, o primeiro passo é identificar qual das 5 antenas possui o sinal com maior RSSI no instante da medição, presumindo-se ser esta a antena mais próxima. Em seguida, os RSSIs obtidos das duas antenas imediatamente mais próximas à antena de maior RSSI são comparadas entre si. Determinando, desse modo, a região estimada.

Por exemplo: supondo-se que o maior RSSI recebido seja o da Antena 4, observa-se na Figura 18 que as duas antenas imediatamente mais próximas são a Antena 3 e a Antena 5. Portanto, se o RSSI da Antena 3 for maior que o RSSI da Antena 5, pressupõe-se que o usuário está dentro da região 6. Ao passo que, no mesmo exemplo em que o RSSI da Antena 4 é o maior, se o RSSI da Antena 5 for maior que o da Antena 3, a estimativa é que o usuário esteja na região 7.

Uma das vantagens desse método é a celeridade e a simplicidade da implementação, se comparado com os métodos das tabelas e da trilateração. Por outro lado, uma desvantagem é a menor quantidade de regiões que podem ser estimadas, diminuindo-se, assim, a resolução. Esses aspectos serão tratados no Capítulo 4.

3.4 Implementação nos Cômodos de uma Residência

Após a realização dos testes de precisão na garagem, iniciaram-se os testes do sistema de localização dentro de uma residência de área 300 m^2 , com 10 metros de largura e 30 metros de comprimento.

Foram espalhadas 14 antenas emisoras pela casa, buscando abranger a maior parte dos cômodos. Além disso, pelo menos 3 dessas antenas devem estar no alcance do alvo (antena receptora) para que os métodos de estimativa de posição sejam aplicados (THOMAS; ROS, 2005). A Figura 19 é uma representação de como as antenas foram distribuídas.

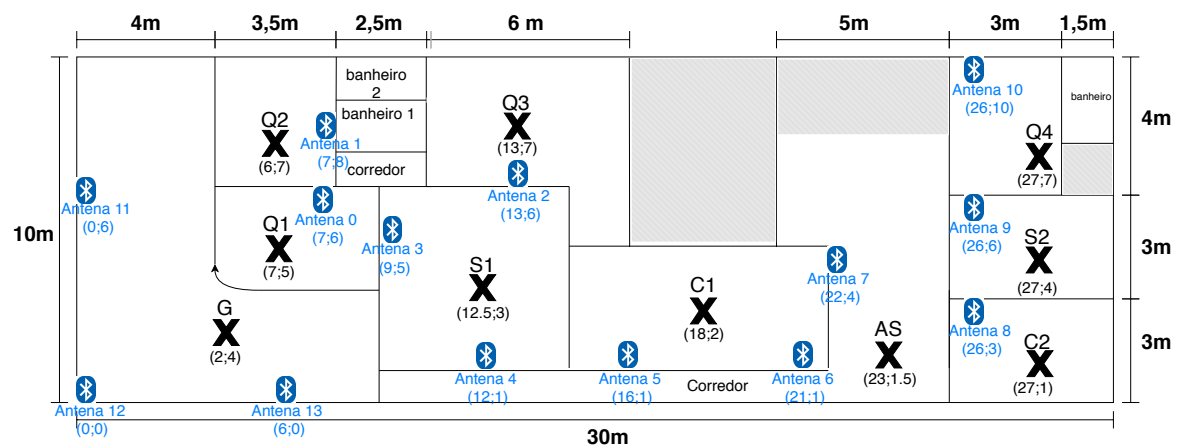


Figura 19 – Representação da distribuição de antenas pela casa com suas respectivas coordenadas.

Na Figura 19, foram utilizadas abreviações nos cômodos, em que Q1 - Quarto 1; Q2 - Quarto 2; Q3 - Quarto 3; S1 - Sala 1; C1 - Cozinha 1 - AS - Área de Serviço; C2 - Cozinha 2; S2 - Sala 2; Q4 - Quarto 4; e G - Garagem. Os pontos marcados com X em cada cômodo representam o local e as coordenadas onde foram realizadas as estimativas de posição para cada método.

3.5 Critérios de Comparação entre os Métodos.

A fim de comparar o custo-benefício dos três métodos de estimativa de posição aplicados nos cômodos da residência, foram estimados o armazenamento ocupado, a velocidade de execução e o consumo de bateria para cada método. Tendo em mãos todos esses dados, foram analisados os seguintes critérios de otimalidade:

- Espaço: o sistema deve ocupar o mínimo de memória possível;
- Energia: o sistema deve consumir o mínimo de energia por unidade de tempo;
- Robustez: o sistema não deve falhar;
- Testabilidade: o sistema deve ser fácil de testar;
- Custo: o sistema deve ser o mais barato possível;
- Desempenho: abrange os seguintes requisitos:
 - Tempo de execução: o sistema deve ser o mais veloz possível;
 - Precisão e exatidão: os valores estimados pelo sistema devem ser consistentes e devem apresentar o menor erro e desvio padrão possível;
 - Resolução: o sistema deve ser capaz de identificar a maior quantidade de coordenadas possíveis no ambiente de trabalho.

Para explicar melhor o conceito de resolução do sistema, dois casos serão comparados a seguir. No exemplo da Figura 20, a resolução no eixo x é de 2 metros e no eixo y é de 1 metro. É possível observar que caso o alvo esteja em um ponto equidistante das coordenadas pré-determinadas, fica difícil estimar a sua posição. Ao aumentar a resolução do sistema para 1 metro no eixo x e sem alterar a resolução do eixo y o problema é atenuado, como mostra a Figura 21.

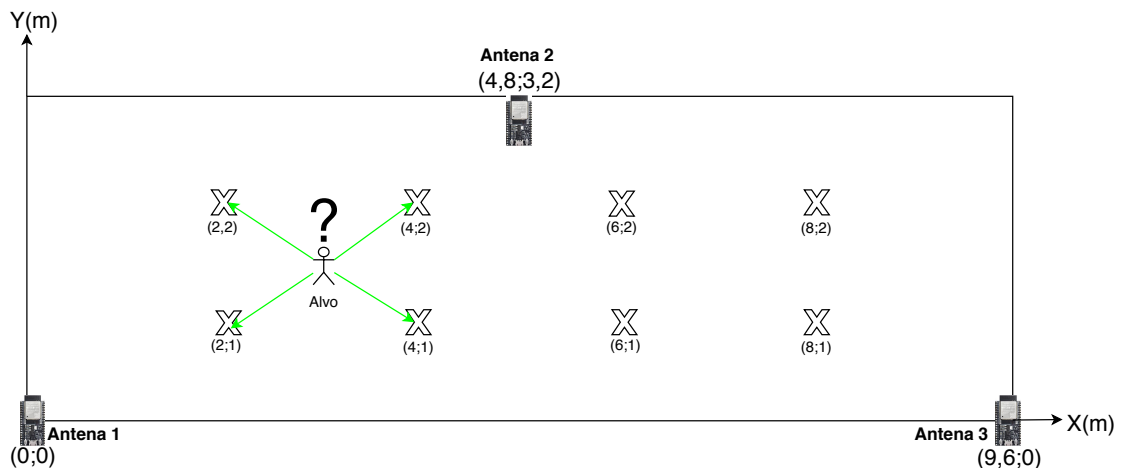


Figura 20 – Exemplo de sistema com baixa resolução.

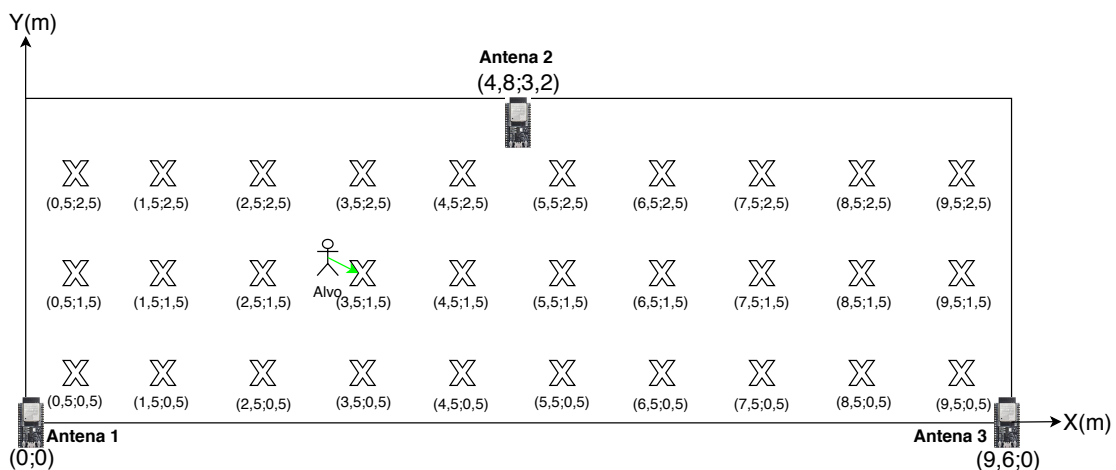


Figura 21 – Exemplo de sistema com resolução melhorada.

Portanto, quanto maior a resolução do sistema, maior a chance de estimar com precisão a localização do usuário. Entretanto, como consequência disso, o consumo de memória e de energia aumenta e a velocidade de execução diminui.

A ESP-32 utilizada possui 1,3 MB de memória disponível. Para estimar a velocidade de execução de cada método, foi considerado o intervalo de tempo entre o momento em que os valores de RSSI das antenas são obtidos até o momento em que a posição do usuário é estimada. A fonte de energia utilizada é uma Bateria Recarregável FX-L18650 que possui uma tensão nominal de 3,7 V e capacidade de carga de 9900 mAh.

Para avaliar a autonomia da ESP-32, a bateria foi carregada e cronometrou-se o tempo que levou para ser descarregada completamente em cada método. Esse procedimento também foi feito para as antenas emissoras. Além disso, a taxa de leitura de valores utilizada foi de cerca de 22 amostras de RSSI por segundo.

4 Resultados Obtidos

4.1 Caracterização da Antena BLE

Após a realização da coleta do RSSI descrita na Seção 3.1, os seguintes diagramas de radiação foram obtidos no MATLAB. As coletas de 0° até 180° foram espelhadas para completar os 360° .

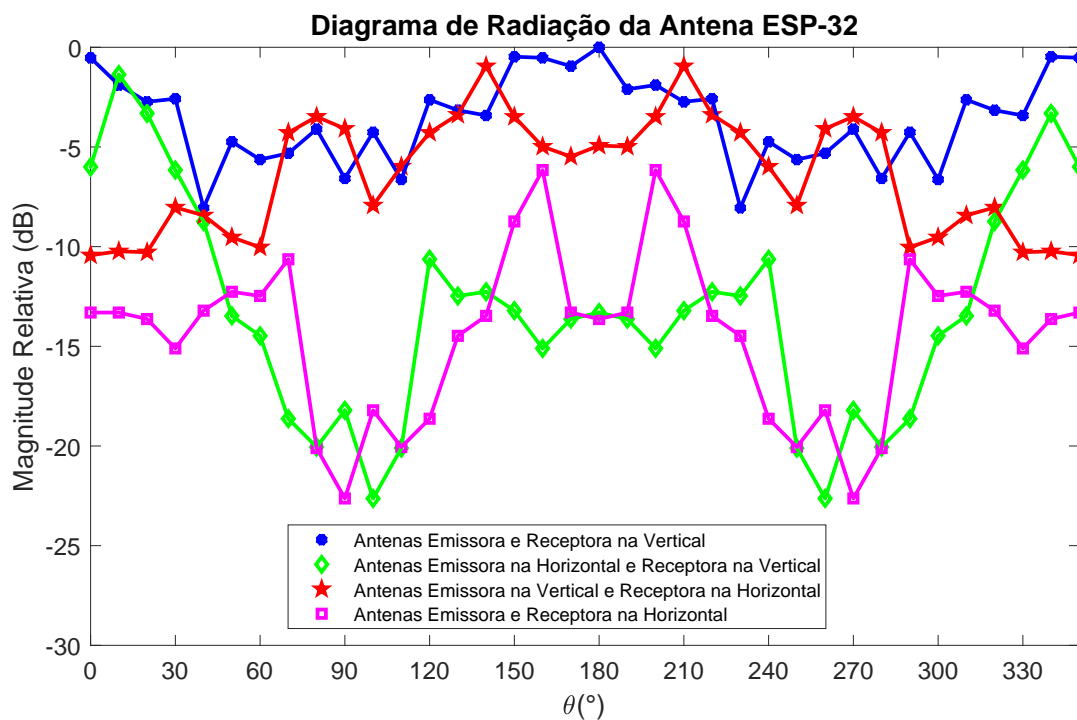


Figura 22 – Gráfico obtido a partir dos diagramas de radiação padrão normalizados para antenas emissora e receptora variando entre horizontal e vertical.

Analisando a Figura 22, é possível notar que a antena emissora na posição vertical obteve uma melhor irradiação em relação à posição horizontal, pois nesse eixo ela é omni-direcional. Por sua vez, quando a antena emissora estava na vertical, a antena receptora apresentou resultados semelhantes tanto na vertical como na horizontal, com uma sutil melhora na posição vertical.

Assim, a maneira do usuário portar a antena receptora não impacta de forma relevante na radiação do sinal. A Figura 23 elucida essas informações por meio de um diagrama polar. Os resultados condizem com a Figura 12, embora os testes não tenham sido realizados com os recursos disponíveis em um laboratório, tais como antenas tipo cornetas para direcionamento dos sinais, analisador de rede, entre outros instrumentos.

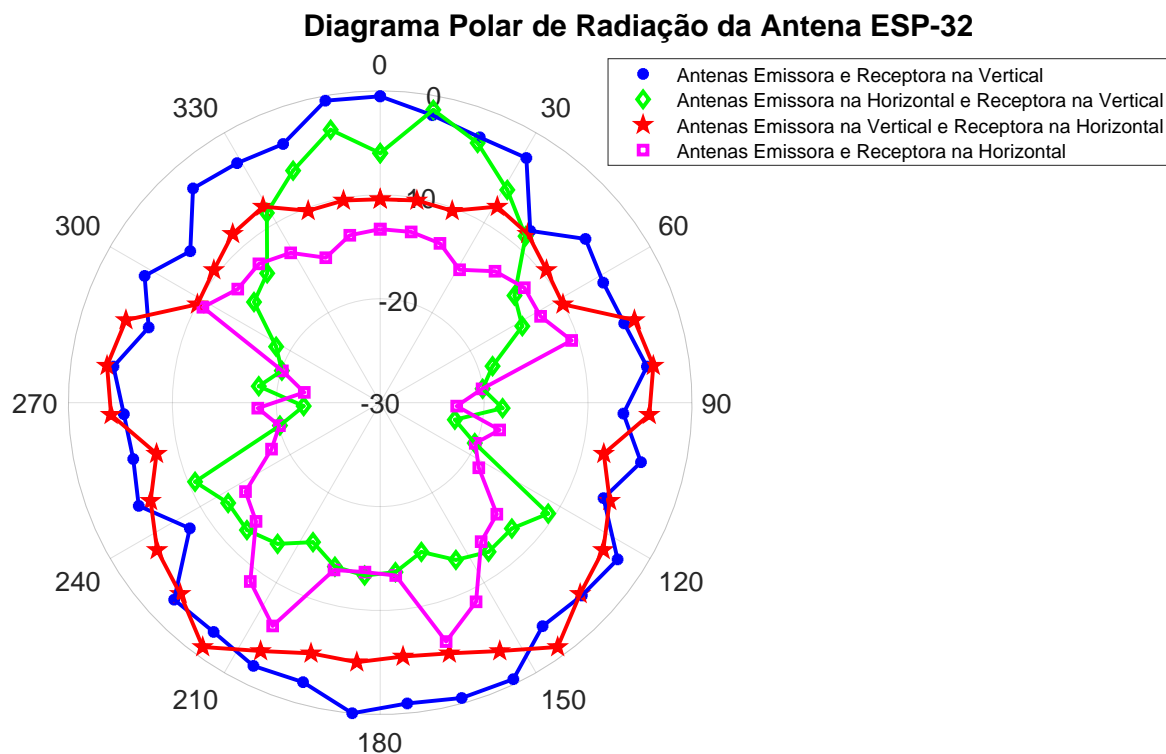


Figura 23 – Gráfico obtido a partir dos diagramas polares de radiação padrão normalizados para antenas emissora e receptora variando entre horizontal e vertical. Quanto maior o diâmetro, maior a potência do sinal recebido.

4.2 Relação entre RSSI e Distância

Tendo em mãos o melhor posicionamento das antenas emissora e receptora obtidos na caracterização, foram realizados experimentos para determinar uma relação matemática entre a variação da potência do sinal e a variação da distância.

Primeiramente, utilizou-se a antena emissora sem nenhuma semiblandagem. Foram coletadas 100 amostras de RSSI a cada 0,5 m, e foi calculado a média e o desvio padrão desses valores, como mostra na Figura 24.

Com o intuito de melhorar os valores obtidos e reduzir o desvio padrão das amostras, utilizou-se um recipiente coberto de papel alumínio ao redor da antena emissora, criando uma semiblandagem eletrostática. O mesmo procedimento descrito no parágrafo anterior foi realizado e os resultados dessa nova coleta estão apresentados na Figura 25.

É possível notar a diferença no desvio padrão da antena com semiblandagem - Figura 25 - em comparação com as medidas sem a semiblandagem de alumínio - Figura 24. Além disso, a potência decaiu com menos intensidade à medida que a distância foi aumentando, o que sugere uma viabilidade de implementação com maior alcance entre a antena emissora e receptora. Os gráficos estão sobrepostos para facilitar a comparação.

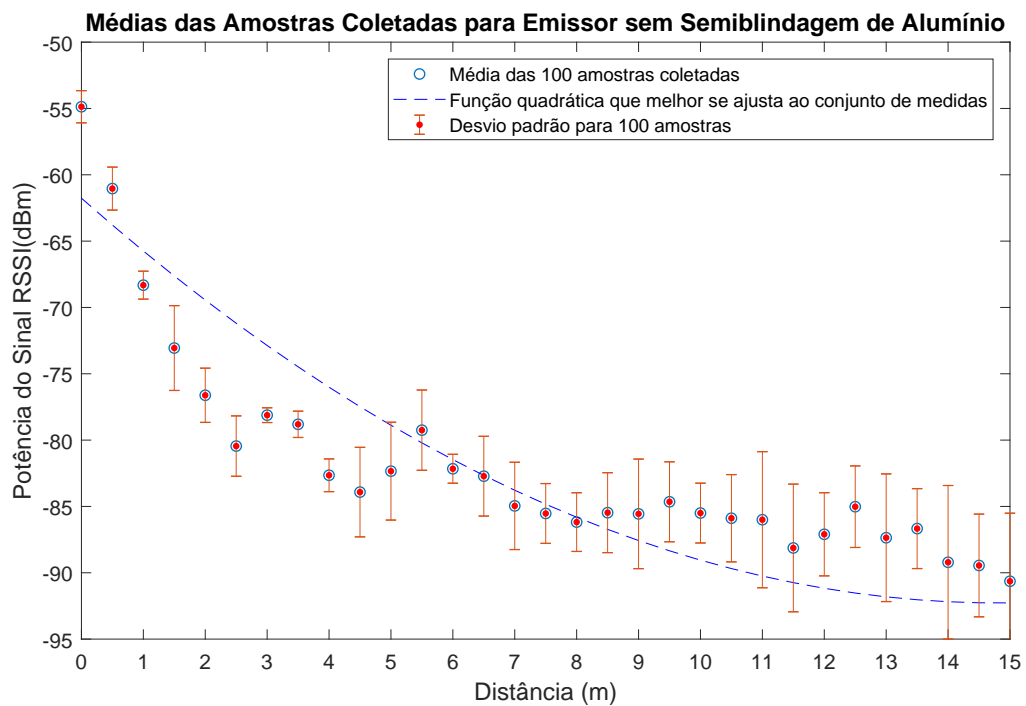


Figura 24 – Médias das amostras do emissor sem semiblandagem de alumínio. O desvio padrão máximo foi de 5,78 dBm em 14 m. Enquanto o desvio padrão mínimo foi de 0,55 dBm em 3 m.

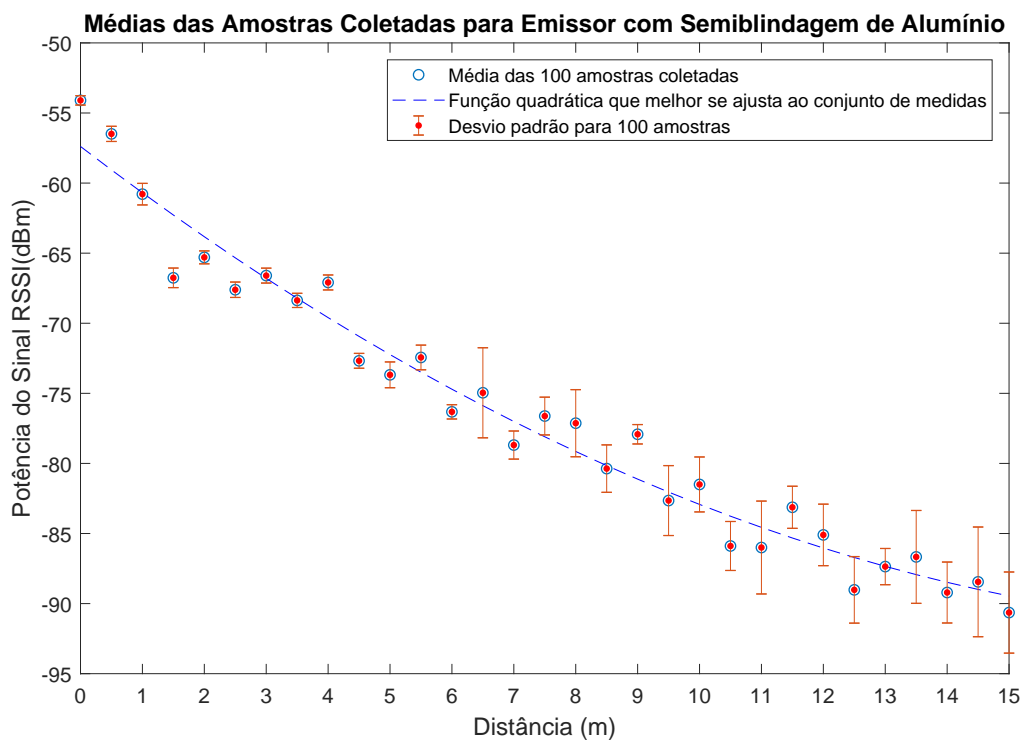


Figura 25 – Médias das amostras do emissor com semiblandagem de alumínio. O desvio padrão máximo foi de 3,91 dBm em 14,5 m. Enquanto o desvio padrão mínimo foi de 0,33 dBm em 0 m.

Com o auxílio da função *polyfit* do MATLAB, foi encontrada uma função quadrática com o RSSI em função da distância que se ajusta aos pontos encontrados. Representada na Figura 25 por uma linha azul tracejada, a função obtida foi

$$f(x) = 0.083x^2 - 3.385x - 57.388, \quad (4.1)$$

em que $f(x)$ é o valor de RSSI coletado pela antena receptora e x é a distância, em metros, que se deseja estimar. A partir dessa função, é possível converter o valor recebido pela antena, em dBm, para distância, em metros, por meio das raízes encontradas na fórmula de resolução da equação de segundo grau (Fórmula de Bhaskara)

$$x = \frac{3.385 - \sqrt{30.51 + 0.332f(x)}}{0.166}. \quad (4.2)$$

Estimar a distância em metros é essencial para o método da trilateração, pois para calcular as coordenadas, é preciso saber a distância entre as antenas emissoras e a antena receptora. Nesse sentido, foram realizados testes com a Equação 4.2 para comparar as distâncias estimadas com as distâncias reais. Essa comparação foi feita a partir da coleta de 100 amostras a cada 0,5m, até completar 9m, conforme apresentado na Figura 26.

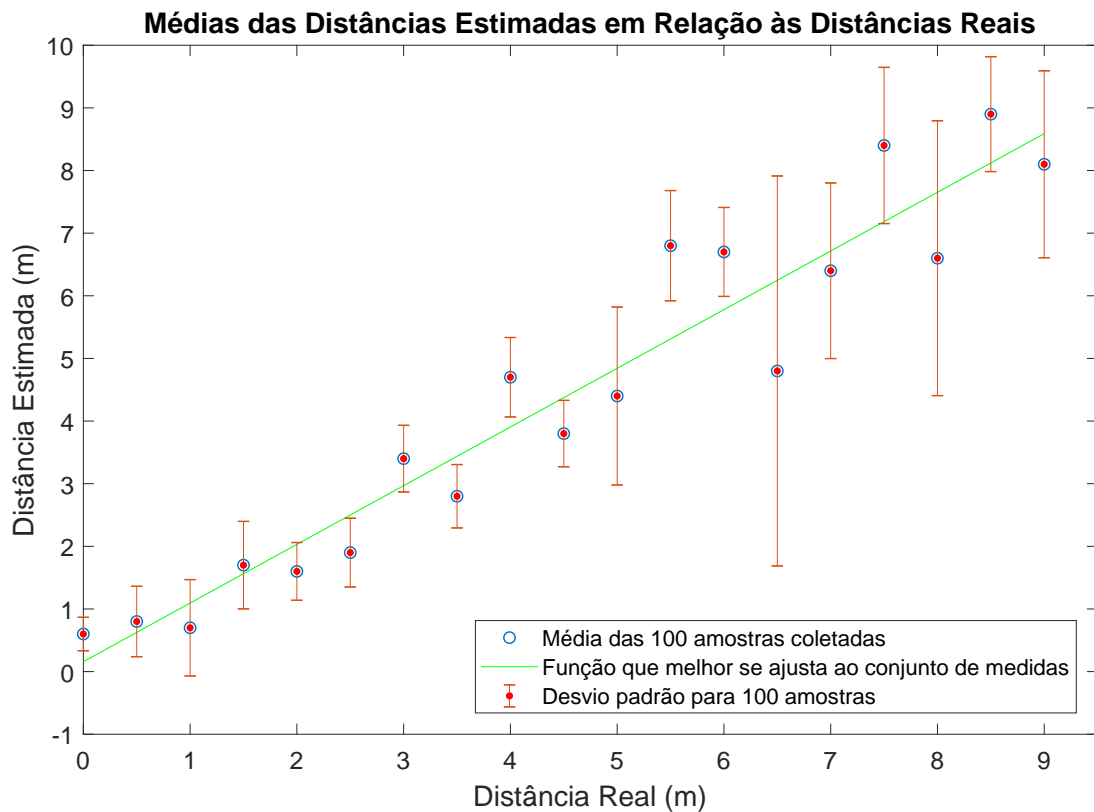


Figura 26 – Médias e desvio padrão das distâncias estimadas em comparação com as distâncias reais.

Como esperado, quando a antena receptora se afasta da antena emissora, os valores das médias tendem a se dispersar e o desvio padrão tende a aumentar. Na Figura 25, para 6,5 m, houve um desvio padrão grande. Isso se repetiu na Figura 26, a partir dessa distância, há uma tendência do desvio padrão se manter elevado.

4.3 Métodos de Estimativa de Posição

Todos os experimentos desta seção foram gravados em vídeos e compartilhados no repositório do Google Drive, cujo *link* foi disponibilizado no Anexo A deste documento. O procedimento deste experimento foi explicado na Seção 3.3. Vale ressaltar que este experimento tem por objetivos:

- Comparar os três métodos em um mesmo cenário a partir dos erros de estimativa de posição;
- Analisar o comportamento de cada método com deslocamento do alvo em duas velocidades (coleta dinâmica e coleta estática);
- Analisar o comportamento de cada método em locais diferentes no corredor, a saber, meio do corredor ($Y = 1,5$ m) e próximo à parede ($Y = 0,5$ m).

Nas figuras que serão apresentadas a seguir, a reta em preto representa os pontos em que os valores estimados coincidem com os valores reais. Inicialmente serão apresentadas as gráficas de cada método, para posteriormente discutir os resultados a partir de uma análise estatística. As tabelas de cada figura estão nos apêndices do documento. Vale ressaltar que para o percurso da volta, em azul, foi utilizado um *offset* de 10 m para facilitar a visualização dos resultados.

4.3.1 Método da Comparação de Potência por Tabelas

4.3.1.1 Coletas realizadas no meio do corredor (coordenada $y = 1,5$ m)

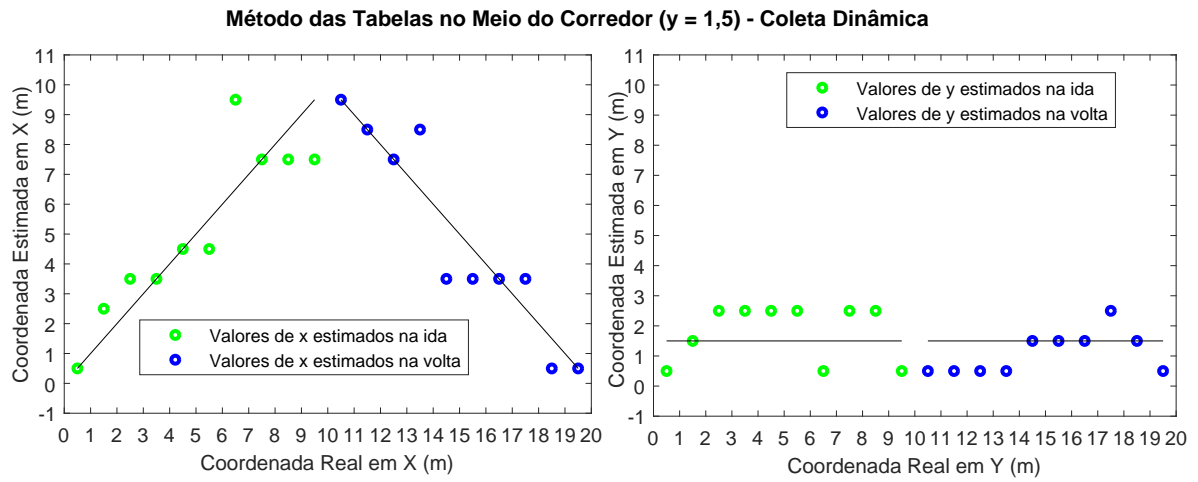


Figura 27 – Dispersão no método das tabelas com $y = 1,5$ m - coleta dinâmica.

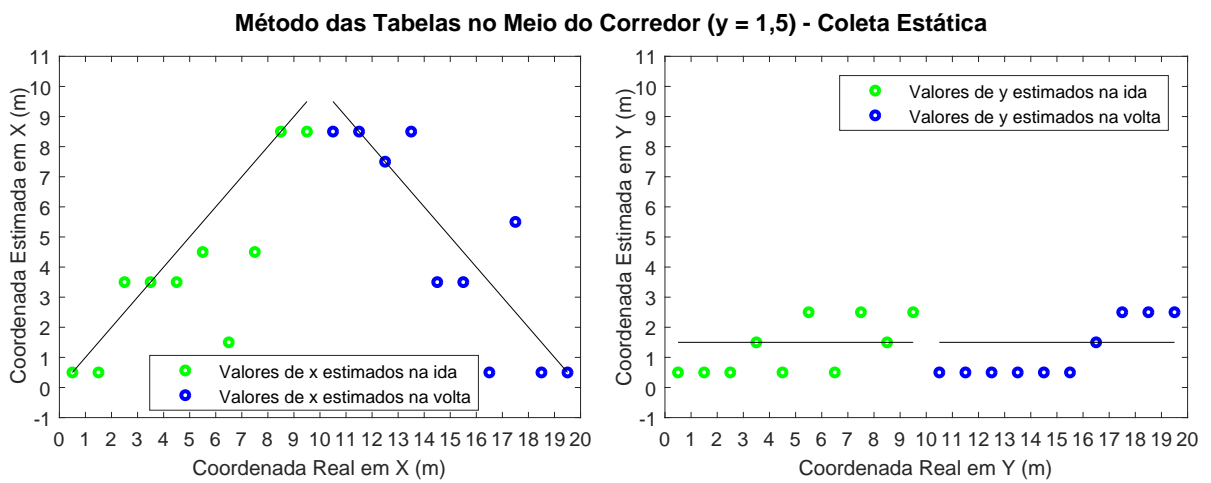


Figura 28 – Dispersão no método das tabelas com $y = 1,5$ m - coleta estática.

4.3.1.2 Coletas realizadas próximo à parede (coordenada $y = 0,5$ m)

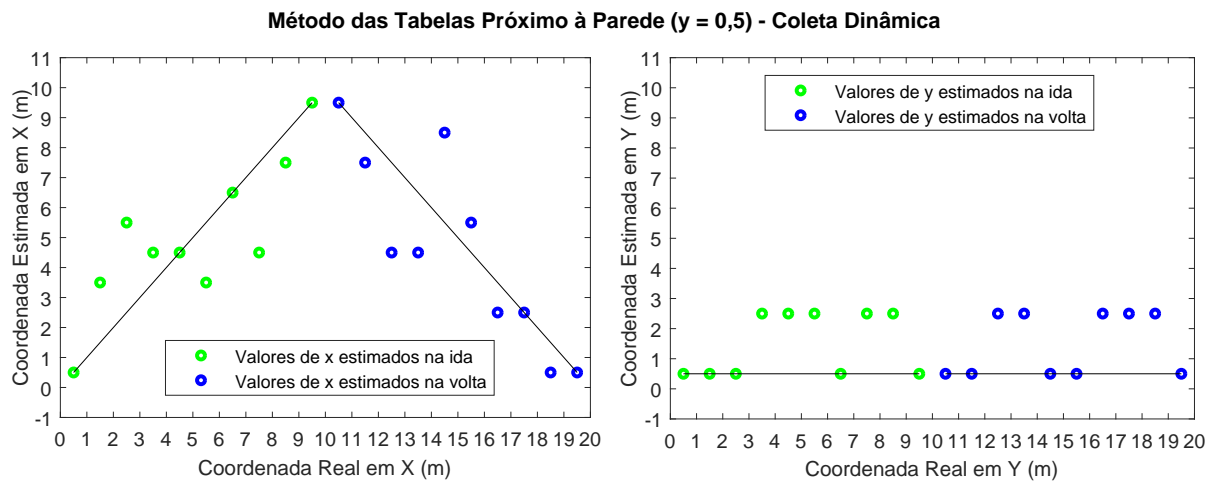


Figura 29 – Dispersão no método das tabelas com $y = 0,5$ m - coleta dinâmica.

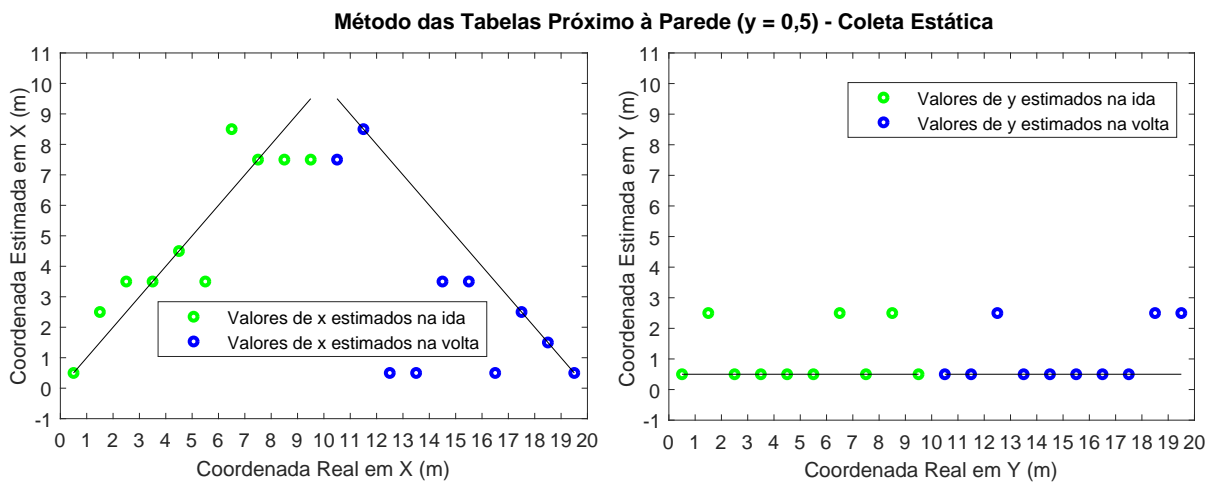


Figura 30 – Dispersão no método das tabelas com $y = 0,5$ m - coleta estática.

4.3.2 Método da Trilateração

4.3.2.1 Coletas realizadas no meio do corredor (coordenada y = 1,5 m)

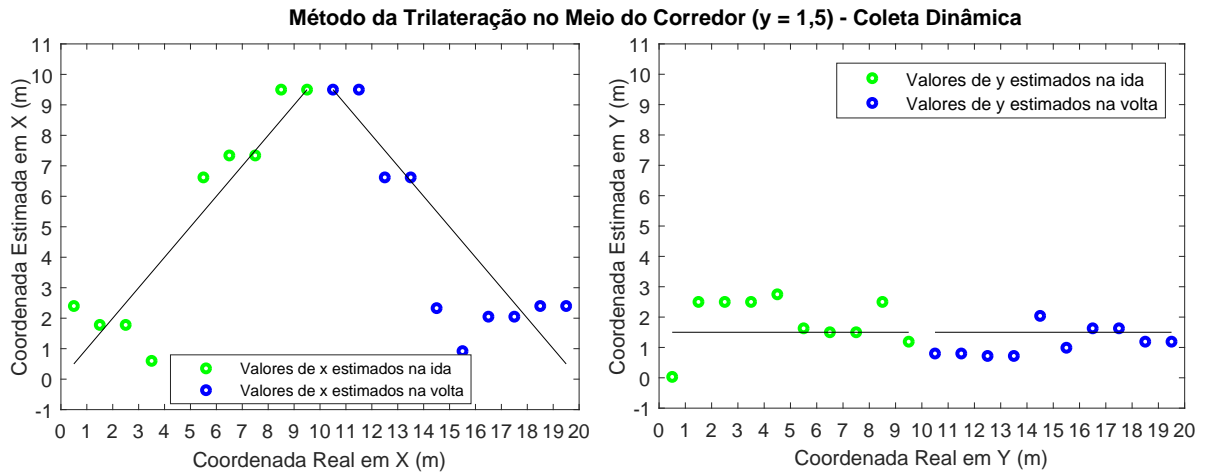


Figura 31 – Dispersão no método da trilateração com y = 1,5m - coleta dinâmica.

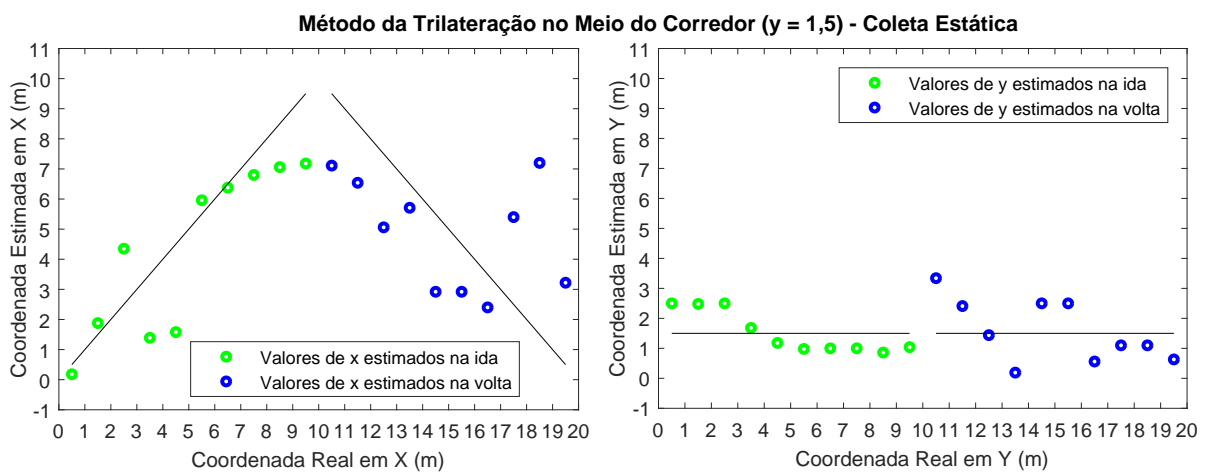


Figura 32 – Dispersão no método da trilateração com y = 1,5 m - coleta estática.

4.3.2.2 Coletas realizadas próximo à parede (coordenada $y = 0,5$ m)

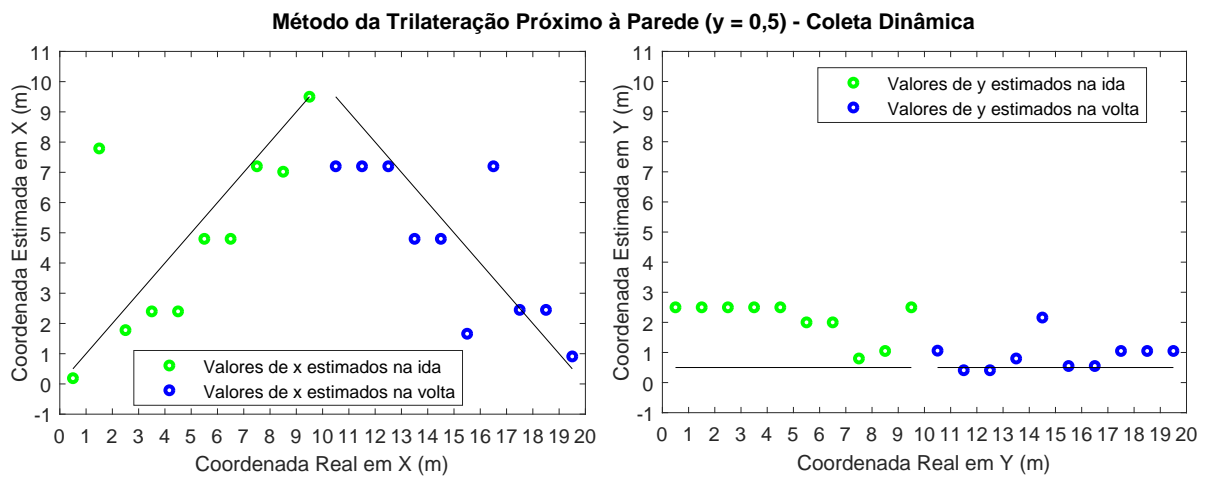


Figura 33 – Dispersão no método da trilateração com $y = 0,5$ m - coleta dinâmica.

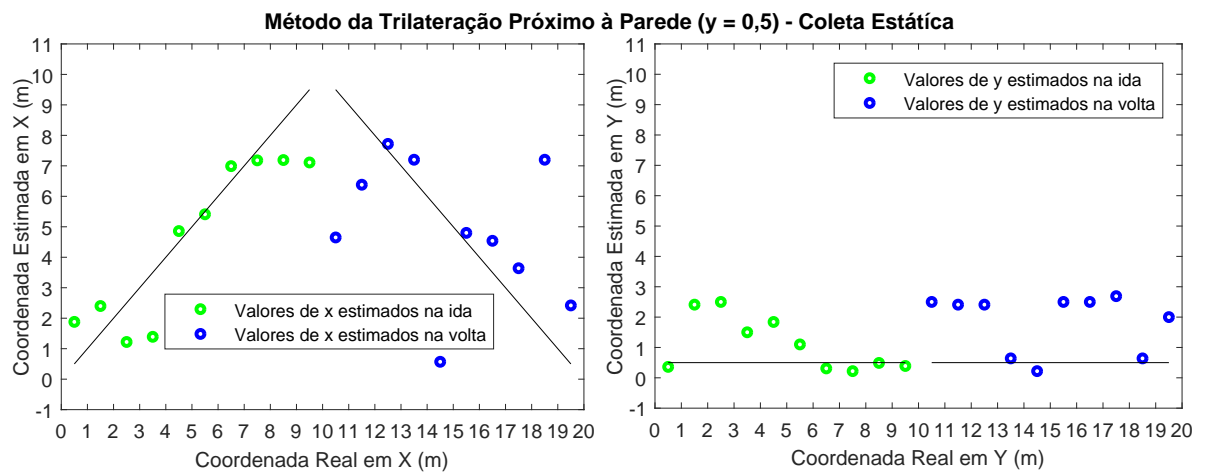


Figura 34 – Dispersão no método da trilateração com $y = 0,5$ m - coleta estática.

4.3.3 Método da Comparação de Potência por Regiões

Como já explicado no Capítulo 3, foi utilizada uma metodologia diferente para este método. Os pontos medidos foram os mesmos dos demais métodos, a diferença é que em vez de analisar as coordenadas, verificou-se qual a região correspondente a cada ponto marcado.

Tabela 1 – Resultados obtidos no método das regiões

Posição real	Dinâmica	Erro	Estática	Erro
1	1	0	1	0
2	2	0	2	0
2-3	2	0	3	0
3	3	0	3	0
4	3	-1	5	1
5	6	1	7	2
6	3	-3	7	1
6-7	6	0	7	0
7	7	0	7	0
8	8	0	8	0
8	8	0	8	0
7	8	1	3	-4
6-7	7	0	7	0
6	7	1	7	1
5	4	-1	6	1
4	4	0	3	-1
3	3	0	2	-1
2-3	3	0	2	0
2	2	0	2	0
1	2	1	1	0

4.3.4 Discussão Sobre os Métodos de Estimação de Posição

A Tabela 2 apresenta as médias dos erros absolutos para cada método nas coletas estáticas e dinâmicas. Observa-se que o método das tabelas apresentou erros menores que o método da trilateração no eixo x. Nesse caso, para a coleta dinâmica, o MAE do método das tabelas chega a ser 38% melhor que o método da trilateração. Por outro lado, o método da trilateração apresentou erros menores que o método das tabelas no eixo Y para coletas no meio do corredor. Essa melhora chegou a 15% no caso da coleta estática no meio do corredor.

Tabela 2 – Média do erro absoluto para cada um dos métodos

Método analisado	Média do Erro Absoluto - Dinâmica (x;y)	Média do Erro Absoluto - Estática (x;y)
Método das Tabelas - coordenada y = 1,5 m (meio do corredor)	(0,875 m;0,700 m)	(1,200 m;0,900 m)
Método das Tabelas - coordenada y = 0,5 m (próximo à parede)	(1,200 m;0,900 m)	(1,450 m;0,600 m)
Método da Trilateração - coordenada y = 1,5 m (meio do corredor)	(1,427 m;0,624 m)	(1,715 m;0,761 m)
Método da Trilateração - coordenada y = 0,5 m (próximo à parede)	(1,387 m;1,087 m)	(1,677 m;0,982 m)
Método das Regiões	0,45*	0,6*

* A média do erro absoluto para o método das regiões não considera os eixos x e y, e sim a diferença entre região estimada e região real.

O método das regiões apresentou o menor erro médio dentre os três métodos abordados neste trabalho. No entanto, a sua resolução é bem menor em comparação com os outros métodos. Enquanto no método das tabelas e no método da trilateração foi possível estimar 30 posições diferentes, no método nas regiões só foi possível estimar 8 regiões diferentes. Desse modo, este método é mais adequado quando o objetivo é estimar uma região mais abrangente na qual se encontra o usuário.

Os resultados obtidos sugerem a viabilidade de se aplicar os três métodos simultaneamente no sistema de localização *indoor*, já que uma maior redundância na estimativa de posição pode garantir menos erros. Outra alternativa seria utilizar os métodos individualmente de acordo com os melhores resultados: o método das regiões para identificar a região mais próxima do usuário; o método das tabelas para se estimar o eixo x e o método da trilateração para se estimar o eixo y.

4.4 Teste em Pontos Fora das Coordenadas Pré-Determinadas

Conforme explicado na Seção 3.3, neste teste foram feitas coletas de dados em pontos diferentes daqueles usados para criar as tabelas do método das tabelas. A seguir,

apresenta-se uma ilustração dos resultados obtidos neste experimento. As bolinhas azuis representam os pontos em que a antena receptora estava no momento da estimativa e as setas verdes apontam para a bolinha verde, que representa o local em que o respectivo método estimou a posição do usuário. Na Figura 35 apresenta-se o resultado para o método das tabelas e na Figura 36 para o método da trilateração.

A priori, já se sabia que esse experimento apresentaria alguns erros. Isso aconteceu por duas razões: os pontos em que a localização foi estimada estão fora das coordenadas pré-determinadas; e devido à baixa resolução dos experimentos, principalmente no método das tabelas, em que a diferença mínima entre duas coordenadas estimáveis é de um metro.

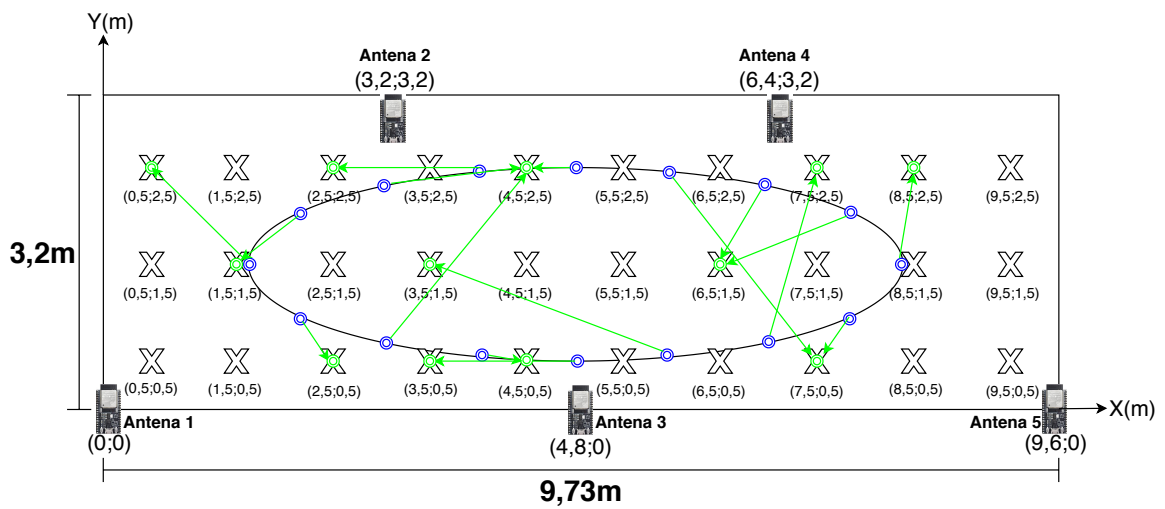


Figura 35 – Experimento de coleta em pontos fora das coordenadas pré-determinadas no método das tabelas.

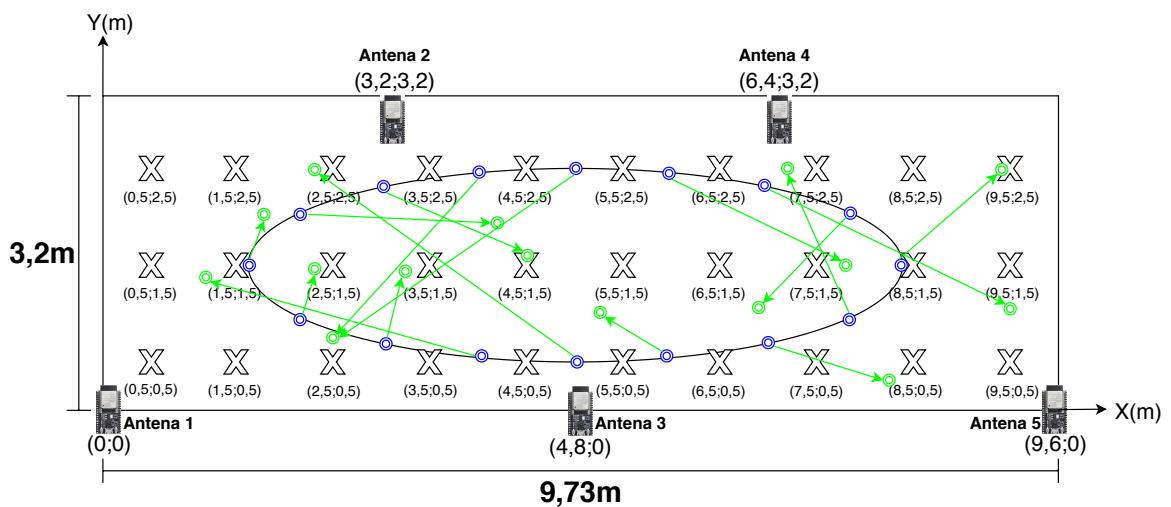


Figura 36 – Experimento de coleta em pontos fora das coordenadas pré-determinadas no método da trilateração.

Comparando os resultados obtidos nos dois métodos, observa-se que o método das tabelas - Figura 35 - apresentou, no geral, uma distância menor entre a posição medida (bolinhas azuis) e a posição estimada (bolinhas verdes apontadas por setas verdes), embora o método da trilateração teoricamente apresente uma maior resolução. Este experimento não foi realizado para o método das regiões.

Essa observação pode ser confirmada a partir da Tabela 3, que apresenta o erro mínimo, máximo e médio obtido por cada um dos métodos neste teste.

Tabela 3 – Erro máximo, mínimo e médio para o teste em pontos fora das coordenadas pré-determinadas

Método analisado	Erro máximo (x;y)	Erro mínimo (x;y)	Erro médio (x;y)
Método das Tabelas	(-2,5 m;1 m)	(0,5 m;0 m)	(-0,95 m;0,98 m)
Método da Trilateração	(-2,75 m;2 m)	(0,25 m;0,5 m)	(-1,31 m;0,94 m)

4.5 Implementação nos Cômodos de uma Residência

O procedimento descrito na Seção 3.4 foi realizado para os três métodos de estimativa de posição. Os valores estimados foram colocados em uma tabela e um mapa de cores foi confeccionado indicando as regiões e os cômodos da residência que apresentaram os melhores e piores resultados de estimativa. Os experimentos desta seção foram gravados em vídeos e compartilhados no repositório do Google Drive, cujo *link* encontra-se no Anexo A.

4.5.1 Método da Comparação de Potência por Tabelas

A Tabela 4 apresenta a posição real, a posição estimada e o erro de estimação para cômodo da residência para o método das tabelas. Para a maioria dos cômodos, o erro da estimativa da posição foi de zero em ambas as coordenadas x e y. Entretanto, na Sala 2 (S2), um erro máximo de 9 metros foi obtido na coordenada x, enquanto um erro máximo de 3 metros para a coordenada y foi obtido na Cozinha 2 (C2).

Apesar de este método ter apresentado erros pontuais nos cômodos Sala 2 - S2 e Cozinha 2 - C2, observou-se um melhor desempenho em corredores e em locais próximos a portas e janelas do que os outros métodos (vide Figura 37). Isso aconteceu pois, diferentemente do método da trilateração, este método não depende da conversão de RSSI para distância em metros - o que o deixaria suscetível a muitas interferências dentro de uma residência com muitos obstáculos -, e sim da base de dados de referência de RSSI que já foi coletada para aquela região.

Tabela 4 – Método das tabelas nos cômodos de uma residência

Cômodos	Posição real	Posição estimada - método das tabelas	Erro
Quarto 1 - Q1	(7;5)	(7;5) - Q1	(0;0)
Quarto 2 - Q2	(6;7)	(6;7) - Q2	(0;0)
Quarto 3 - Q3	(13;7)	(13;7) - Q3	(0;0)
Sala 1 - S1	(12,5;3)	(12,5;3) - S1	(0;0)
Cozinha 1 - C1	(18;2)	(18;2) - C1	(0;0)
Área de Serviço - AS	(23;1,5)	(23;1,5) - AS	(0;0)
Cozinha 2 - C2	(27;1)	(27;4) - S2	(0;3)
Sala 2 - S2	(27;4)	(18;2) - C1	(-9;2)
Quarto 4 - Q4	(27;7)	(27;7) - Q4	(0;0)
Garagem - G	(2;4)	(2;4) - G	(0;0)

Vale ressaltar que o erro da Tabela 4 é discretizado de 1 em 1 metro. De maneira oposta ao método das regiões, este método possui uma base de dados de referência e não depende exclusivamente da coleta precisa do RSSI de todas as antenas emissoras no momento da estimativa.

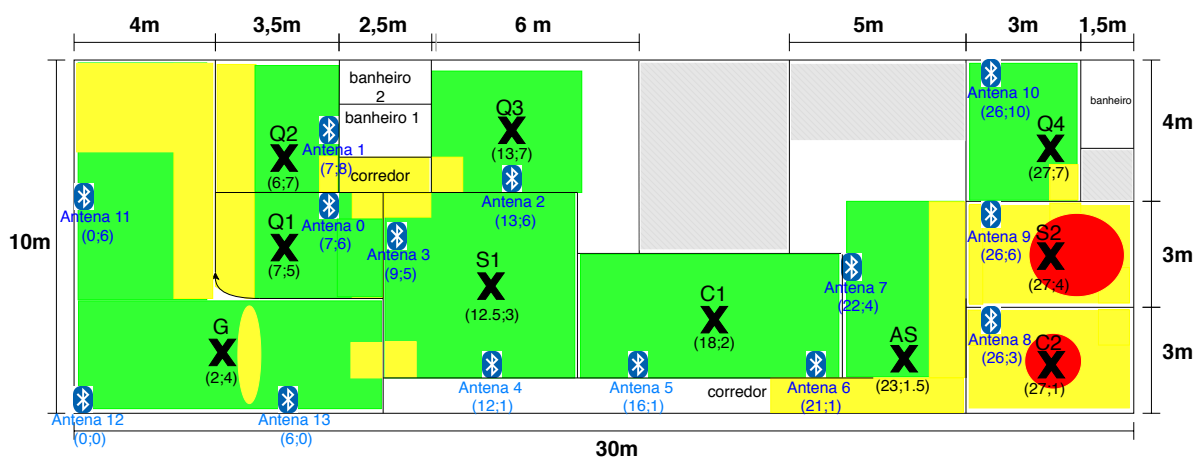


Figura 37 – Mapa de cores - método das tabelas. Medidas que obtiveram erros com raio menor que 2 metros em verde; erros com raio entre 2 metros e 4 metros em amarelo; e erros com raio superior a 4 metros em vermelho.

4.5.2 Método da Trilateração

A Tabela 5 apresenta a posição real, a posição estimada e o erro de estimativa para cômodo da residência para o método da trilateração. O erro máximo de 14,25 metros foi

obtido na coordenada x para a Área de Serviço (AS), e um erro máximo de 11,64 metros foi obtido na coordenada y para a Cozinha 2 (C2).

Tabela 5 – Trilateração nos cômodos de uma residência.

Cômodos	Posição real	Posição estimada - método da trilateração	Erro
Quarto 1 - Q1	(7;5)	(11,49;12,49) - Q3	(4,49;7,49)
Quarto 2 - Q2	(6;7)	(6,96;3,42) - Q1	(0,96;-3,58)
Quarto 3 - Q3	(13;7)	(9,59;11,15) - Q3	(-3,41;4,15)
Sala 1 - S1	(12,5;3)	(14,00;1,99) - S1	(1,50;-1,01)
Cozinha 1 - C1	(18;2)	(16,86;2,54) - C1	(-1,14;0,54)
Área de Serviço - AS	(23;1,5)	(8,75;7,00) - G	(-14,25;5,50)
Cozinha 2 - C2	(27;1)	(17,36;12,64) - X	(-9,64;11,64)
Sala 2 - S2	(27;4)	(17,36;12,64) - X	(-9,64;8,64)
Quarto 4 - Q4	(27;7)	(17,36;12,64) - X	(-9,64;5,64)
Garagem - G	(2;4)	(3,55;6,09) - G	(1,55;2,09)

Em geral, o método da trilateração apresentou resultados abaixo do esperado (vide Figura 38), com muitos erros na estimativa das coordenadas. Isso se deve às condições que interferem na conversão do RSSI em distância dentro dos cômodos em relação a essa mesma conversão nos experimentos realizados na garagem.

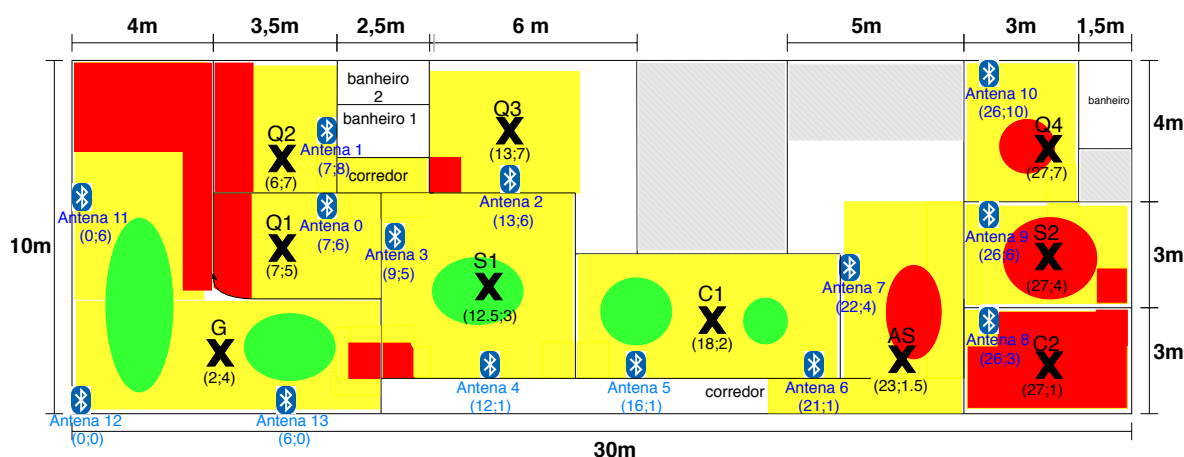


Figura 38 – Mapa de cores - método da trilateração. Medidas que obtiveram erros com raio menor que 2 metros em verde; erros com raio entre 2 metros e 4 metros em amarelo; e erros com raio superior a 4 metros em vermelho.

4.5.3 Método da Comparação de Potência por Regiões

Este método não apresenta uma estimativa de coordenadas do usuário, e sim a região em que ele se encontra no momento da medida. Por isso, só será considerado um

erro caso o usuário esteja em um cômodo e seja estimado que ele está em outro cômodo.

Tabela 6 – Implementação do método das regiões nos cômodos de uma residência

Cômodos	Posição real	Posição estimada - método das regiões	Erro
Quarto 1 - Q1	(7;5)	Q1	0
Quarto 2 - Q2	(6;7)	Q2	0
Quarto 3 - Q3	(13;7)	Q3	0
Sala 1 - S1	(12,5;3)	S1	0
Cozinha 1 - C1	(18;2)	C1	0
Área de Serviço - AS	(23;1,5)	AS	0
Cozinha 2 - C2	(27;1)	C2	0
Sala 2 - S2	(27;4)	S2	0
Quarto 4 - Q4	(27;7)	Q4	0
Garagem - G	(2;4)	G	0

Observa-se que, no geral, este método apresenta bons resultados quando a medida é realizada no interior de cada cômodo. Por isso, nas medidas analisadas na Tabela 10, os resultados não apresentaram erros nos pontos marcados com um X. Por sua vez, quando as medidas são realizadas próximo a portas, janelas ou em corredores, pode haver interferência e alguns erros de estimativa de cômodos, como mostra a Figura 39.

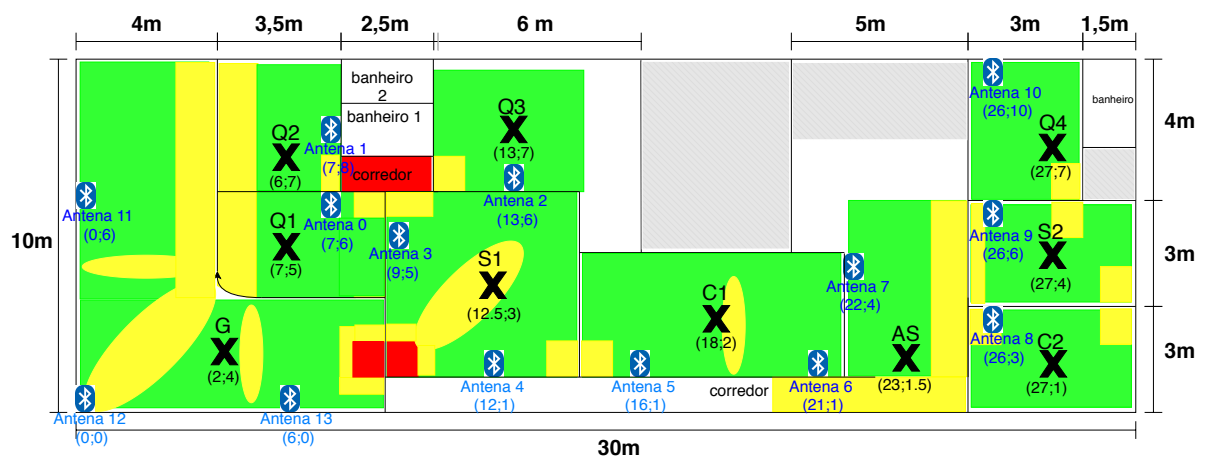


Figura 39 – Mapa de cores - método das regiões. Medidas que não obtiveram erros entre cômodos em verde; medidas que obtiveram até 1 erro entre cômodos em amarelo; e medidas que obtiveram mais de 1 erro entre cômodos em vermelho.

No intuito de estabelecer qual método tem melhor desempenho, deve-se considerar, além da sua exatidão e precisão, o consumo de recursos, tempo de execução, autonomia e

custo. Entretanto, uma análise de escalabilidade da solução em ambientes internos maiores e mais abertos tais como faculdades, museus ou centros comerciais, deve ser realizada a fim de confirmar os dados experimentais extraídos nas seções anteriores.

4.6 Critérios de Desempenho do Sistema

A diferença no armazenamento ocupado por cada método é pequena. Isso acontece porque as bibliotecas e funções de recebimento do valor do RSSI do BLE e conversão do valor para dBm - que são utilizadas em todos os métodos - ocupam a maior parte da memória, enquanto as variáveis e funções utilizadas especificamente em cada método ocupam pouco mais que 200 kB, enquanto a memória disponível é de 1,3 MB. A tabela a seguir possui os valores dos parâmetros avaliados em cada método.

Tabela 7 – Memória utilizada, velocidade de execução, consumo de bateria, autonomia e custo para cada método.

Objeto a ser analisado	Método das Tabelas	Trilateração	Método das Regiões
Armazenamento (kB)	212,3 (16 %)	210,5 (16 %)	208,1 (15 %)
Tempo médio de execução (ms)	4,5	2,5	2
Autonomia com uma bateria de 9900 mAh	6h28m	6h31m	7h22m
Carga consumida em uma hora (mAh)	1532,51	1516,08	1345,11
Custo aproximado do projeto (USD)	\$95,62	\$95,62	\$95,62

Para o levantamento de custos, foram considerados os gastos com as 15 ESP-32 e as 15 baterias recarregáveis. No dia da compra, o dólar custava cerca de R\$ 4,00.

Vale destacar que o método das tabelas apresentou um armazenamento de memória levemente superior devido à sua base de dados de valores de referência do RSSI, que são armazenados em variáveis do tipo *float* - 4 bytes. Desse modo, em um recinto de grande extensão - como um hospital ou uma universidade -, a memória ocupada pode ser significativa, uma vez que quanto maior a quantidade de antenas e coordenadas para se estimar, maior a base de dados de referência do RSSI tipo *float* que serão armazenados

no microcontrolador.

É preciso, então, fazer uma análise de escalabilidade para o método das tabelas. Essa análise consiste na quantidade de memória para a implementação da base de dados mantendo-se a proporção de resolução em metros, da precisão da estimativa e do número de antenas. Neste caso, para uma área de $31,1 m^2$, foram usadas 5 antenas e 30 valores de RSSIs de referência, um para cada coordenada. Assim, a memória ocupada pela base de dados é a multiplicação do número de RSSIs armazenados pelo número de antenas e pela memória ocupada por uma variável tipo *float* (4 B), totalizando 600 bytes.

Nesse sentido, caso seja proposta uma aplicação deste método com a mesma precisão da estimativa, em uma área duas vezes maior, será necessário usar 60 valores de RSSIs de referência para cada antena. O total de antenas também deve aumentar proporcionalmente, totalizando 10. Assim, a memória ocupada pela base de dados passaria a ser 2400 bytes. Caso se deseje aumentar a área em três vezes, a memória ocupada será de 5400 bytes. Se aumentar cinco vezes, 15000 bytes. Se aumentar dez vezes, 60000 bytes. Portanto, a ocupação da memória cresce exponencialmente com o aumento da área do recinto - vide Figura 40.

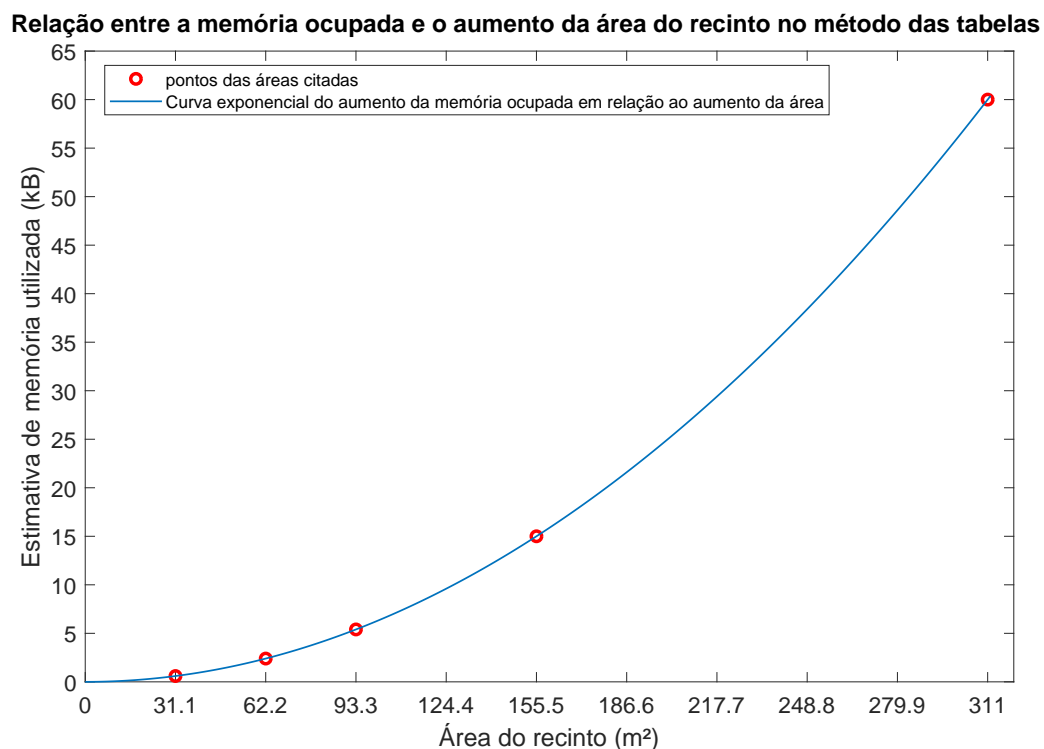


Figura 40 – Relação entre área de cobertura e memória ocupada. A área da garagem - $31,1 m^2$ - foi usada como referência. Os valores destacados em vermelho são referentes a essa área.

Desse modo, é fácil entender o porquê de o método das regiões apresentar o menor consumo de memória e a maior velocidade de execução. Isso acontece devido às suas

características de celeridade, simplicidade e baixa resolução. Diferentemente do método das tabelas, o método das regiões não resultará em um maior armazenamento em caso de um recinto maior, pois ele trabalha na comparação dos RSSIs das antenas que estão mais próximas, utilizando sempre a mesma função. Além disso, esse método também apresentou uma maior autonomia e durou quase uma hora a mais que os outros métodos para uma mesma bateria em um mesmo regime de funcionamento.

Por outro lado, a aplicação do método das regiões se dá em um contexto específico, quando apenas ter uma noção da posição do alvo é suficiente. Afinal, este método apenas fornece a região em que o usuário está sem estimar a coordenada exata.

Em relação ao método da trilateração, a escalabilidade se mantém constante quando se deseja aumentar o número de antenas e locais a serem estimados. Isso acontece pois o método da trilateração usa uma função em C pré-determinada que calcula a posição a partir das três antenas mais próximas, independentemente da quantidade de antenas que o projeto esteja usando.

É importante ressaltar que a bateria utilizada para os testes possui uma autonomia de 9900 mAh. Para as antenas emisoras, o funcionamento foi de 21 horas ininterruptas, o que equivale a um consumo de 471,42 mAh a cada hora.

Por fim, os três métodos foram avaliados para os critérios de otimalidade citados na Seção 3.5, como mostra a tabela a seguir. A avaliação foi dada por uma nota de 1 a 5, em que 1 significa péssimo; 2 - ruim; 3 - razoável; 4 - bom; e 5 - ótimo.

Tabela 8 – Avaliação dos critérios de otimalidade para cada método de localização *indoor*

Critérios de otimalidade	Método das Tabelas	Trilateração	Método das Regiões
Espaço	4	5	5
Energia	4	4	5
Robustez	4	2	4
Testabilidade	2	3	4
Custo	4	4	4
Desempenho	4	3	2

5 Conclusões

Neste trabalho foi proposto um sistema de localização *indoor* a partir do RSSI do sinal BLE. Com o intuito de encontrar a melhor relação entre custo-benefício e critérios de desempenho, três diferentes métodos de estimativa de posição foram propostos e avaliados em diferentes situações.

Na caracterização da antena da ESP-32, observou-se, a partir dos diagramas de radiação, um melhor resultado com a antena na vertical - que pode chegar a uma diferença de 20 dB de magnitude relativa em relação à posição horizontal. Desse modo, destaca-se a importância de manter as antenas emisoras na posição vertical para potencializar a emissão do sinal BLE em todas as direções. Já a antena receptora apresentou uma diferença pequena entre a posição vertical e horizontal, com oscilações em torno de 5 dB, o que permite ao usuário decidir como deseja utilizá-la sem interferir de maneira significativa na medição do RSSI.

No tocante à relação entre a potência do sinal e a distância entre as antenas emissoras e receptoras, buscaram-se soluções para os problemas de inexatidão e falta de precisão na conversão de RSSI para distância em metros. Nesse contexto, a tentativa de criar uma semblindagem eletrostática com papel alumínio apresentou uma melhora nos resultados. Principalmente no que tange ao decaimento do RSSI em relação à distância - facilitando, assim, a obtenção da função matemática que descreve a curva - e à redução do desvio padrão para cada média de 100 amostras. Entretanto, a conversão de RSSI para distância ainda apresenta erros, o que impacta diretamente no desempenho do método da trilateração.

Os três métodos de estimativa de posição foram testados em uma garagem com área $31,1 \text{ m}^2$. Os testes foram padronizados e analisou-se o comportamento de cada método com deslocamento do alvo em duas velocidades - coleta dinâmica e coleta estática - e em locais diferentes no corredor - meio do corredor ($Y = 1,5 \text{ m}$) e próximo à parede ($Y = 0,5 \text{ m}$). Em seguida, os métodos foram implementados dentro dos cômodos de uma residência com área de 300 m^2 para avaliá-los em uma situação mais próxima da realidade.

O método das tabelas apresentou uma boa relação entre resolução e erro MAE, principalmente para as medidas realizadas no eixo X. Há uma perspectiva de melhora para esse método caso sejam utilizados mais RSSIs de referência na base de dados. Além disso, a resolução também seria consideravelmente aumentada, resolvendo os problemas dos testes realizados fora das coordenadas pré-determinadas. Já nos testes realizados dentro das residências, o método apresentou um melhor desempenho em corredores e em locais próximos a portas e janelas do que os outros métodos de estimativa de posição.

Desse modo, esse foi o método que apresentou um melhor desempenho nos critérios de desempenho.

Já o método da trilateração apresentou uma maior MAE nos experimentos realizados na garagem e nos cômodos da residência. Isso aconteceu porque a função de conversão de RSSI para distância, em metros, não é tão precisa, principalmente em recintos em que o sinal BLE sofre muita interferência. Portanto, para um melhor desempenho desse método, seria necessário melhorar a conversão de potência para distância. No entanto, os resultados no eixo y foram razoáveis e, em alguns casos, melhor que o método das tabelas.

O método das regiões apresentou poucos erros tanto nos testes realizados na garagem quanto nos cômodos da residência, embora com uma resolução bem menor. Este método pode ser útil em um primeiro momento da estimativa, em que se deseje ter uma noção de onde o usuário está em um recinto grande para, em seguida, aplicar os outros métodos com mais precisão.

Nesse sentido, para trabalhos futuros, é possível aplicar os três métodos simultaneamente, em detrimento da diminuição da velocidade de execução e do aumento da memória ocupada. A partir da redundância das medidas, é possível aumentar a exatidão e a precisão, aplicando-se o método das regiões para estimar uma região mais genérica em que o usuário esteja no recinto, o método das tabelas para estimar o eixo x e o método da trilateração para estimar o eixo y, como mostra o esquema da Figura 41.

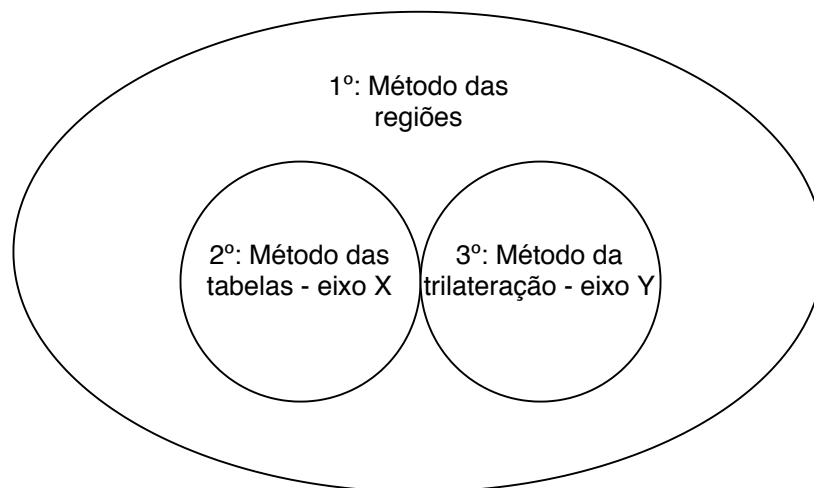


Figura 41 – Proposta de aplicação dos três métodos simultaneamente com funções específicas.

Referências

AKASAKA, W. A. C. Localização de pessoas e objetos em ambientes internos utilizando radio frequência. São Paulo, Brasil, 2017. Citado 4 vezes nas páginas 18, 19, 23 e 25.

CONTRERAS, A.; ACKLAND, P. Spectacle coverage report. *International Agency for the Prevention of Blindness*, p. 24, 2017. Citado na página 13.

ESPRESSIF. esp32. 2020. Disponível em: <<https://www.espressif.com/>>. Citado na página 25.

FARID, Z. et al. Recent advances in wireless indoor localization techniques and dystem. Selangor, Malaysia, 2013. Citado na página 17.

FISCHER, G. et al. Bluetooth indoor localization system. Berlin, Germany, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.

IEEE. *IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas*, Std 145-1993, 1993. Citado na página 27.

IEEE. 2003 wireless medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications for low rate wireless personal area networks (lr-wpans). 2003. Disponível em: <<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4-2003.pdf>>. Citado na página 20.

JAYAKODY, J. et al. Indoor positioning: Novel approach for bluetooth networks using rssi smoothing. 2016. Citado na página 20.

JUNIOR, C. Sistema de multilateração com antenas monopolo impressas. São Paulo, Brasil, 2017. Citado na página 24.

M.NAJNUDEL. Estudo de propagação em ambientes fechados para o planejamento de wlans. Rio de Janeiro, Brasil, 2004. Citado 3 vezes nas páginas 20, 21 e 24.

MONTEIRO, J. L. Os desafios dos cegos nos espaços sociais: Um olhar sobre a acessibilidade. Florianópolis-SC, Brasil, 2012. Citado na página 13.

MÜLLER, C. Método de multilateração para algoritmo de localização em redes de sensores sem fio. 2014. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 24.

NORRIDINE, A. An algebraic solution to the multilateration problem. 2012. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.

OZOY, A. K. et al. Indoor positioning based on global positioning system signals. Istanbul, Turkey, 2013. Citado na página 14.

PU, C.-C. Development of a new collaborative ranging algorithm for rssi indoor location tracking in wsn. *PhD Thesis*, Dongseo University, South Korea, 2009. Citado 4 vezes nas páginas 19, 21, 22 e 24.

PU, C.-C. et al. Indoor location tracking using received signal strength indicator. Malaysia, South Korea, 2011. Citado 4 vezes nas páginas 19, 21, 22 e 24.

- RAMOS, N. Caracterização de antena tipo refletor de canto utilizando superfícies seletivas em frequência. Paraíba, Brasil, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 27.
- RECK, A. Beacons ble – bluetooth low energy – design e análise de um sistema de localização indoor. Caxias do Sul-RS, Brasil, 2016. Citado na página 14.
- SAUTER, M. *From GSM to LTE: An introduction to mobile networks and mobile broadband*. [S.l.]: John Wiley Sons, Ltd, 2010. Citado na página 18.
- SAVVIDES, A. et al. Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors. Rome, Italy, 2001. Citado na página 18.
- SCHEERENS, D. Practical indoor localization using bluetooth. Enschede, Nederlanden, 2012. Citado na página 13.
- SILVA, J. et al. Desenvolvimento de um sistema de localização indoor utilizando sinal de radio frequência de modulos bluetooth®. 2016. Citado na página 24.
- TELEMATIC. Exclusive: Wi-fi direct, bluetooth 4.0 nfc to appear in cars by 2015. 2012. Disponível em: <http://telematicsnews.info/bulletin/TN_Bulletin_Nov_2012.pdf>. Citado na página 14.
- THERIB, M. A. Smart blinding stick with holes, obstacles and ponds detector based on microcontroller. *Journal of University of Babylon*, Babylon University, v. 25, n. 5, p. 1759–1768, 2017. ISSN 1992-0652. Disponível em: <<https://www.iasj.net/iasj?func=article{&}aId=132>>. Citado na página 13.
- THOMAS, F.; ROS, L. Revisiting Trilateration for Robot Localization. *IEEE Robotics*, v. 21, n. 1, p. 93–101, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 34.
- TREVISAN, L. Um algoritmo de localização de nós em redes sem-fio usando nível de potência do sinal. Paraná, Brasil, 2008. Citado na página 22.
- ZEIMPEKIS, V. et al. A taxonomy of indoor and outdoor positioning techniques for mobile location-based applications. Athens, Greece, 2003. Citado na página 17.

APÊNDICE A – Resultados obtidos no método das tabelas para coordenada $y=1,5$ m (meio do corredor).

Tabela 9 –

Posição real (x;y)	Dinâmica (x;y)	Erro (x;y)	Estática (x;y)	Erro (x;y)
(0,5;1,5)	(0,5;0,5)	(0;-1)	(0,5;0,5)	(0;-1)
(1,5;1,5)	(2,5;1,5)	(1;0)	(0,5;0,5)	(-1;-1)
(2,5;1,5)	(3,5;2,5)	(1;1)	(3,5;0,5)	(1;-1)
(3,5;1,5)	(3,5;2,5)	(0;1)	(3,5;0,5)	(0;-1)
(4,5;1,5)	(4,5;2,5)	(0;1)	(3,5;0,5)	(-1;-1)
(5,5;1,5)	(4,5;2,5)	(1;1)	(4,5;2,5)	(-1;1)
(6,5;1,5)	(9,5;0,5)	(3;-1)	(1,5;0,5)	(-5;-1)
(7,5;1,5)	(7,5;2,5)	(1;0)	(4,5;2,5)	(-3;1)
(8,5;1,5)	(7,5;2,5)	(-1;1)	(8,5;1,5)	(0;0)
(9,5;1,5)	(7,5;0,5)	(-2;-1)	(8,5;2,5)	(-1;1)
(9,5;1,5)	(9,5;0,5)	(0;-1)	(8,5;2,5)	(-1;1)
(8,5;1,5)	(8,5;1,5)	(0;0)	(8,5;2,5)	(0;1)
(7,5;1,5)	(7,5;2,5)	(0;1)	(7,5;2,5)	(0;1)
(6,5;1,5)	(8,5;1,5)	(2;0)	(8,5;1,5)	(1;0)
(5,5;1,5)	(3,5;1,5)	(-2;0)	(3,5;0,5)	(-2;-1)
(4,5;1,5)	(3,5;1,5)	(-1;0)	(3,5;0,5)	(-1;-1)
(3,5;1,5)	(3,5;0,5)	(0;-1)	(0,5;0,5)	(-2;-1)
(2,5;1,5)	(3,5;0,5)	(1;-1)	(5,5;0,5)	(3;-1)
(1,5;1,5)	(0,5;0,5)	(-1;-1)	(0,5;0,5)	(1;-1)
(0,5;1,5)	(0,5;0,5)	(0;-1)	(0,5;0,5)	(0;-1)

APÊNDICE B – Resultados obtidos no método das tabelas para coordenada $y=0,5m$ (próximo à parede).

Tabela 10 –

Posição real (x;y)	Dinâmica (x;y)	Erro (x;y)	Estática (x;y)	Erro (x;y)
(0,5;0,5)	(0,5;0,5)	(0;0)	(0,5;0,5)	(0;0)
(1,5;0,5)	(3,5;0,5)	(2;0)	(2,5;2,5)	(1;2)
(2,5;0,5)	(5,5;0,5)	(3;0)	(3,5;0,5)	(1;0)
(3,5;0,5)	(4,5;2,5)	(1;2)	(3,5;0,5)	(0;0)
(4,5;0,5)	(4,5;2,5)	(0;2)	(4,5;0,5)	(0;0)
(5,5;0,5)	(3,5;2,5)	(-2;0)	(3,5;0,5)	(-2;0)
(6,5;0,5)	(6,5;0,5)	(0;0)	(8,5;2,5)	(2;2)
(7,5;0,5)	(4,5;2,5)	(-3;2)	(7,5;0,5)	(0;0)
(8,5;0,5)	(7,5;2,5)	(-1;2)	(7,5;2,5)	(-1;2)
(9,5;0,5)	(9,5;0,5)	(0;0)	(7,5;0,5)	(-2;0)
(9,5;1,5)	(9,5;0,5)	(0;0)	(7,5;2,5)	(-2;2)
(8,5;1,5)	(7,5;2,5)	(-1;2)	(8,5;2,5)	(0;2)
(7,5;1,5)	(4,5;2,5)	(-3;2)	(0,5;0,5)	(-7;0)
(6,5;1,5)	(4,5;2,5)	(-2;2)	(0,5;0,5)	(-6;0)
(5,5;1,5)	(8,5;0,5)	(3;0)	(3,5;0,5)	(-2;0)
(4,5;1,5)	(5,5;0,5)	(1;0)	(3,5;0,5)	(-1;0)
(3,5;1,5)	(2,5;2,5)	(-1;2)	(0,5;0,5)	(-2;0)
(2,5;1,5)	(2,5;2,5)	(0;2)	(2,5;2,5)	(0;2)
(1,5;1,5)	(0,5;0,5)	(-1;0)	(1,5;0,5)	(0;0)
(0,5;1,5)	(0,5;0,5)	(0;0)	(0,5;0,5)	(0;0)

APÊNDICE C – Resultados obtidos no método da trilateração para coordenada $y=1,5$ m (meio do corredor).

Tabela 11 –

Posição real (x;y)	Dinâmica (x;y)	Erro (x;y)	Estática (x;y)	Erro (x;y)
(0,5;1,5)	(2,40;0,03)	(1,90;-1,47)	(0,18;2,50)	(-0,32;1,00)
(1,5;1,5)	(1,78;2,50)	(0,28;1,00)	(1,88;2,48)	(0,38;0,98)
(2,5;1,5)	(1,78;2,50)	(-0,75;1,00)	(4,35;2,50)	(1,85;1,00)
(3,5;1,5)	(0,60;2,50)	(-2,90;1,00)	(1,39;1,68)	(-2,11;0,18)
(4,5;1,5)	(0,34;2,75)	(-4,15;1,25)	(1,58;1,18)	(-2,92;-0,32)
(5,5;1,5)	(6,62;1,63)	(1,12;0,13)	(5,96;0,98)	(0,46;0,52)
(6,5;1,5)	(7,34;1,50)	(0,84;0,00)	(6,38;1,00)	(-0,12;-0,50)
(7,5;1,5)	(7,34;1,50)	(-0,16;0,00)	(6,80;1,00)	(-0,70;-0,50)
(8,5;1,5)	(9,50;2,50)	(1,00;1,00)	(7,06;0,86)	(-1,44;-0,64)
(9,5;1,5)	(9,50;1,19)	(-2,00;-1,00)	(7,18;1,04)	(-2,39;-0,46)
(9,5;1,5)	(9,50;1,19)	(0;-0,31)	(7,11;0,63)	(-2,32;-0,87)
(8,5;1,5)	(9,50;1,19)	(1;-0,31)	(6,54;1,10)	(-2,86;-0,40)
(7,5;1,5)	(6,62;1,63)	(-0,88;0,13)	(5,06;1,10)	(-2,44;-0,40)
(6,5;1,5)	(6,62;1,63)	(0,12;0,13)	(5,71;0,56)	(-0,79;-0,94)
(5,5;1,5)	(2,33;0,99)	(-3,17;-0,51)	(2,92;2,50)	(-2,58;1)
(4,5;1,5)	(0,92;2,04)	(-3,58;0,54)	(2,92;2,50)	(-1,58;1)
(3,5;1,5)	(2,05;0,72)	(-1,45;-0,78)	(2,4;0,19)	(-1,1;-1,31)
(2,5;1,5)	(2,05;0,72)	(-0,45;-0,78)	(5,4;1,44)	(2,9;-0,46)
(1,5;1,5)	(2,40;0,80)	(0,9;-0,7)	(7,2;2,41)	(-2,32;0,91)
(0,5;1,5)	(2,40;0,80)	(1,9;-0,7)	(3,22;3,34)	(2,72;1,84)

APÊNDICE D – Resultados Obtidos no método da tabelas para coordenada $y=0,5$ m (próximo à parede).

Tabela 12 –

Posição real (x;y)	Dinâmica (x;y)	Erro (x;y)	Estática (x;y)	Erro (x;y)
(0,5;0,5)	(0,19;2,50)	(-0,31;2)	(1,88;0,36)	(1,38;-0,14)
(1,5;0,5)	(7,79;2,50)	(6,29;2)	(2,40;2,41)	(0,9;1,91)
(2,5;0,5)	(1,78;2,50)	(-0,72;2)	(1,22;2,50)	(-1,28;2)
(3,5;0,5)	(2,40;2,50)	(-1,1;2)	(1,39;1,50)	(-2,11;1)
(4,5;0,5)	(2,40;2,50)	(-2,1;2)	(4,86;1,84)	(0,36;-1,34)
(5,5;0,5)	(4,80;2,00)	(-0,70;1,5)	(5,41;1,10)	(-0,09;0,6)
(6,5;0,5)	(4,80;2,00)	(-1,70;1,5)	(6,99;0,31)	(0,49;-0,19)
(7,5;0,5)	(7,20;0,80)	(-0,3;0,3)	(7,18;0,22)	(-0,32;-0,28)
(8,5;0,5)	(7,02;1,05)	(-1,48;0,55)	(7,19;0,49)	(-1,31;-0,01)
(9,5;0,5)	(9,50;2,50)	(0;2)	(7,11;0,39)	(-2,39;-0,11)
(9,5;0,5)	(7,20;1,05)	(-2,3;0,55)	(4,65;2,00)	(-4,85;-1,50)
(8,5;0,5)	(7,20;1,05)	(-1,3;2)	(6,38;0,64)	(-2,12;0,14)
(7,5;0,5)	(7,20;1,05)	(-0,3;0,55)	(7,72;2,69)	(0,22;2,19)
(6,5;0,5)	(4,80;0,55)	(-1,7;0,05)	(7,20;2,50)	(0,7;2,00)
(5,5;0,5)	(4,80;0,55)	(-0,7;0,05)	(0,57;2,50)	(-4,93;2,00)
(4,5;0,5)	(1,66;2,16)	(-2,84;1,66)	(4,80;0,22)	(0,3;-0,27)
(3,5;0,5)	(7,20;0,80)	(3,7;0,3)	(4,54;0,64)	(1,04;0,14)
(2,5;0,5)	(2,45;0,41)	(-0,05;-0,09)	(3,64;2,41)	(1,14;1,91)
(1,5;0,5)	(2,45;0,41)	(-0,95;-0,09)	(7,20;2,41)	(5,7;1,91)
(0,5;0,5)	(0,91;1,06)	(0,41;0,56)	(2,42;2,50)	(1,92;2)

ANEXO A – Link de acesso ao repositório no Google Drive e GitLab

Links para acesso ao repositório com base de dados deste trabalho:

Google Drive:

https://drive.google.com/drive/folders/13ouhk_Ox5azV5XJELkxIMAR6Ub8m1IDq?usp=sharing

GitLab:

https://gitlab.com/lhrm/tcc_ips

Obs: os vídeos dos experimentos estão disponíveis apenas no Google Drive.