

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ENGENHARIA MECATRÔNICA

Guilherme Arellano Campello

SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO INDOOR HÍBRIDO

Mapeamento de sinais de Bluetooth, Wi-fi
e campo magnético

São Paulo

2021

Guilherme Arellano Campello

SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO INDOOR HÍBRIDO

Mapeamento de sinais de Bluetooth, Wi-fi
e campo magnético

Monografia apresentada no
curso de graduação em
Engenharia Mecatrônica da
Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo.
Sob a orientação do Prof. Jun
Okamoto Junior.

São Paulo

2021

RESUMO

As tecnologias de localização em tempo real e suas aplicações são um campo em constante evolução. O GPS é a principal tecnologia utilizada, no entanto sua atuação é limitada a espaços abertos. Assim, outras tecnologias e técnicas foram desenvolvidas para satisfazer as necessidades de aplicações em ambientes fechados. Este trabalho descreve a construção de um sistema de localização indoor em tempo real por meio da exploração de sinais de Wifi, Bluetooth e do campo magnético, utilizando-se da técnica de “*Fingerprinting*” e o método *WKNN* (*Weighted K-Nearest-Neighbours*). O sistema desenvolvido inclui um aplicativo de celular e um servidor web, e apresentou uma precisão média de 1.93 metros apesar das limitações de infraestrutura existentes, demonstrando-se como uma solução viável e com potencial de aprimoramento com a dedicação de maiores recursos.

Palavras chave: Localização Indoor. Wifi. Bluetooth. Campo magnético. Fingerprinting. WKNN

ABSTRACT

Real-time location technologies and their applications are an ever-evolving field. GPS is the main technology used, however its performance is limited to open spaces. Thus, other technologies and techniques were developed to satisfy the needs of indoor applications. This work describes the development of a real-time indoor location system through the exploration of Wifi, Bluetooth and magnetic field signals, using the “Fingerprinting” technique and the WKNN (Weighted K-Nearest-Neighbours) method. The developed system has a mobile application and a web server, and achieved an average accuracy of 1.93 meters despite the existing infrastructure limitations, demonstrating itself as a viable solution with potential for improvement with the dedication of greater resources.

Key words: Indoor localization. Wifi. Bluetooth. Magnetic field. Fingerprinting. WKNN

Sumário

1 Introdução	5
2 Localização Indoor	7
2.1 Tecnologias	7
2.2 Técnicas para cálculo de posicionamento	8
2.3 Principais algoritmos utilizados	10
2.4 Métricas de performance	12
3 Sistema desenvolvido	14
3.1 Estrutura de banco de dados	15
3.2 Serviços do servidor	17
3.3 Interface do aplicativo de coleta de dados	21
3.4 Algoritmo de estimativa de posição	24
4 Experimentos	27
4.1 Atenuação dos sinais de wifi e bluetooth com a distância	27
4.2 Comportamento do Campo magnético	29
4.2.1 Variabilidade do campo magnético interno da localidade	30
4.2.2 Variação do campo magnético dentro de um pequeno espaço	33
4.3 Construção de mapas de sinais	36
5 Resultados e análise	39
5.1 Resultados experimentais	39
5.2 Uso de pontos fictícios	41
5.3 Otimização de parâmetros	42
6 Conclusão	45
7 Referências	47

1 Introdução

As tecnologias de localização em tempo real são um campo em constante evolução. Desde o surgimento do GPS para fins não militares e sua introdução nos dispositivos celulares, a geolocalização se tornou parte da vida cotidiana e dos negócios. São diversas aplicações já desenvolvidas fazendo uso do monitoramento em tempo real explorando esta tecnologia. No entanto, a localização por GPS tem seu escopo de atuação limitado a espaços abertos- quando utilizado em lugares fechados sua precisão é significativamente prejudicada, sendo superior a 5 metros.

Enquanto isso, a Localização Indoor é uma demanda para diversas aplicações, dentre as quais podem se apontar: automação em smart houses, segurança em edifícios com acesso controlado (escritórios, hospitais, etc), comércio (supermercados, grandes redes varejistas), ambientes fabris e centros de distribuição. Todos estes são exemplos de contextos onde a localização de indivíduos pode ter diversas aplicações e propiciar o desenvolvimento de soluções.

Com este propósito, desenvolveram-se diversas técnicas e algoritmos utilizando outras tecnologias voltadas para a localização *indoor*, cada uma com suas vantagens e desvantagens, dependendo do meio e aplicação específica. Dentre elas podemos citar RFID, UWB, Infravermelho, sinais ultrassônicos, *Zigbee*, *Wi-fi* e *Bluetooth*. No entanto, todas estas estão fortemente associadas à necessidade de instalação de infraestrutura no local e do uso de gadgets específicos para serem identificados e localizados.

Frente ao custo associado para instalação e manutenção desta infraestrutura, bem como para o desenvolvimento de dispositivos específicos para essa aplicação, este trabalho visa expor a possibilidade de explorar os sinais já presentes nos interiores dos ambientes, como Wifi e Bluetooth de dispositivos eletrônicos. Por meio da coleta destes sinais, em conjunto com o campo magnético, os dados podem ser processados através de um sistema de localização indoor fazendo uso apenas de um dispositivo celular e um servidor web.

O sistema desenvolvido é composto por um servidor, contendo uma aplicação de interface web e um banco de dados para armazenamentos das informações referente às

características das localidades. Também conta com um aplicativo para dispositivos celulares capaz de realizar a calibração das posições, bem como solicitar ao servidor sua estimativa de localização.

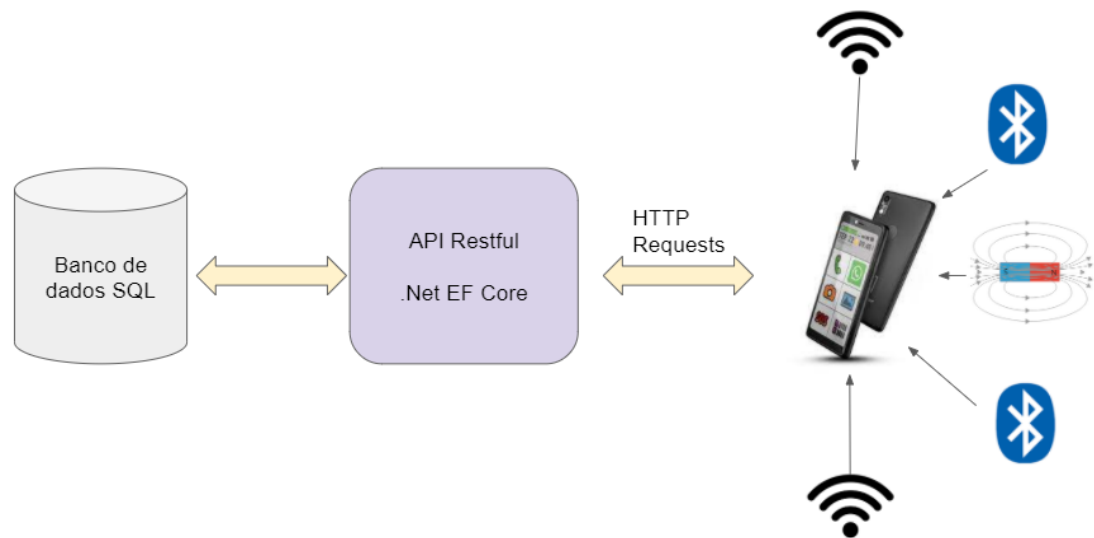


Figura 1. Esquematização do sistema proposto

O sistema tem como objetivo ser capaz de localizar, com precisão superior ao GPS, a posição de um usuário em um ambiente fechado. Como por exemplo, identificar o cômodo em que um indivíduo se encontra em uma residência e de forma passiva, isso é, sem que o indivíduo precise realizar nenhuma ação (como apontar a câmera do celular para algum ponto de referência).

Desafios

A complexidade dos sistemas de Localização Indoor consiste na existência de diversos objetos (como paredes, equipamentos e pessoas), que provocam interferências nos sinais propagados internamente ao ambiente devido a fenômenos como atenuação e reflexão de sinais. A dinamicidade dos ambientes causada pelo fluxo de pessoas e materiais dentro dos locais contribui ainda mais para a variação das medições em lugares fechados. Também, no geral, aplicações voltadas para localização indoor possuem finalidades que necessitam de uma precisão maior do que para aplicações outdoor. Este trabalho busca explorar o comportamento da variação temporal dos sinais, bem como analisar a distribuição destes sinais em um ambiente residencial.

2 Localização Indoor

A Localização Indoor consiste em um conjunto de técnicas e tecnologias voltadas para a identificação da posição de objetos e indivíduos no interior de ambientes fechados. No geral, sua principal diferença em relação à localização outdoor se dá pelo não uso das tecnologias de GPS, uma vez que estas apresentam baixa acurácia em ambientes fechados.

2.1 Tecnologias

As tecnologias utilizadas para Localização Indoor são classificadas de diferentes formas pela literatura. Algumas das propostas de classificação são:

- Necessidade de instalação de hardware ou autossuficientes
- Necessidade de existência de rede
- Arquitetura do sistema (cliente-servidor/aplicação interna)
- Principal tecnologia utilizada
- Instalação fixa ou móvel
- Tipos de sensores
- Fonte de energia

Tabela 1. Análise das tecnologias existentes utilizadas para Localização Indoor

Tecnologia	Celular	Requer infraestrutura	Vantagens	Desvantagens	Faixa de frequência	Alcance	Precisão média
RFID	✗	Sim	- Não é afetado por objetos sólidos e não metálicos. - Não requer <i>LoS</i> entre o transmissor e receptor.	- Sinais de <i>RF</i> podem sofrer interferência. - Pequena área de cobertura. - Alto consumo de energia. - Estruturas metálicas causam interferência	30 a 500 kHz	12~50m	< 1m
UWB	iOS	Sim	- Alta precisão independente da estrutura. - Não causa interferência com RF	- Alto custo - Materiais metálicos e líquidos causam interferência.	> 500 MHz	1~50m	< 1m
Infravermelho	✗	Sim	- Ideal para lugares fechados e pequenos por não atravessar paredes.	- Não penetra paredes, depende de <i>LoS</i> - Afetado pela luz solar - Alta circulação atrapalha	>800 GHz e < 3*10 ⁵ GHz	1~5m	1m
Ultrasônico	✗	Sim	- Não requer <i>LoS</i> - Não sofre e nem causa interferência com ondas eletromagnéticas	- Não penetra paredes - Sinal perde intensidade por obstruções - Reflexões causam falsos sinais - Sofre interferência por sons de alta frequência	> 20KHz	1~10m	<1m
Zigbee	✗	Sim	- Baixo custo - Baixo consumo de energia (até 5 anos de duração)	- Pode sofrer interferência de diferentes sinais na mesma faixa de frequência	2.4 GHz	1~100m	3~5m
WLAN	✓	Sim*	- Já presente em diversas estruturas - Não depende de <i>LoS</i>	- Mudanças no ambiente alteram a intensidade do sinal	2.4 GHz 5 GHz	1~100m	1~5m

Bluetooth	✓	Sim	- Não depende de LoS - Não sofre interferência de outros sinais	- Depende da instalação de beacons	2,4 GHz	1~20m	2~5m
Acelerômetro	✓	Não	- Não depende de sinais nem de infraestrutura	- Erro cresce com o tempo	-	-	0.1% a 20% /amostra
Visão Computacional	✓	Não*	- Não depende de sinais e nem de infraestrutura	- Alto processamento - Alta complexidade matemática no campo da Inteligência Artificial	-	-	-

2.2 Técnicas para cálculo de posicionamento

1. **Trilateração:** a técnica de trilateração baseia-se nas propriedades geométricas do triângulo. Por meio dela, para planos bidimensionais, tendo-se a distância de um ponto em relação a três pontos de um triângulo, é possível se obter a sua posição exata. Quando se deseja obter um posicionamento em 3 dimensões, são necessários 4 pontos de referência não co-planares.

A medição das distâncias em sistemas de *IPS* pode-se dar por diferentes abordagens, sendo as principais:

- *ToF (Time of Flight)*, ou seja, o tempo de voo entre a emissão de um sinal por um referencial emissor, e o seu recebimento pelo receptor, sob uma velocidade de propagação conhecida;
- Atenuação do sinal, sendo medida a gradual diminuição da intensidade do sinal com o aumento da distância entre o emissor e o receptor, de modo a obter-se uma função que relacione a intensidade do sinal com a distância.

Ainda dentro da técnica de trilateração, é possível realizar medidas por meio dos ângulos entre a posição de um objeto em relação a outros pontos de referência. Para medição de uma posição em 2 dimensões por meio da técnica de angulação são necessários 2 ângulos em relação a pontos de referência, e uma medida de distância. Enquanto para medidas de posicionamento em 3 dimensões são necessários uma medida de distância, uma medida de Azimute e dois ângulos. [2, 3]

2. **Fingerprinting:** esta técnica baseia-se na coleta de dados referentes a diferentes sinais e sensores em posições conhecidas, buscando-se obter um mapa das características dos

sinais em cada posição da área de cobertura do sistema. Deste modo, essa técnica caracteriza-se por ser independente do conhecimento da posição dos pontos de referência ou do cálculo da distância relativa, dependendo apenas do conhecimento do sinal característico nos diferentes pontos do mapa.

A aplicação desta técnica consiste em duas etapas. A primeira é denominada “fase offline”, e consiste na abundante coleta dos sinais em posições conhecidas por um período de tempo, para construção e armazenagem do mapa das “impressões digitais” em cada ponto. Os pontos do mapa podem ser discretizados em áreas de interesse de modo a contribuir para a assertividade do método [4]. A segunda fase, denominada “fase online”, refere-se à validação e execução da aplicação, ao tentar estimar o posicionamento com base na semelhança dos sinais obtidos em relação aos pontos armazenados no mapa. [5]

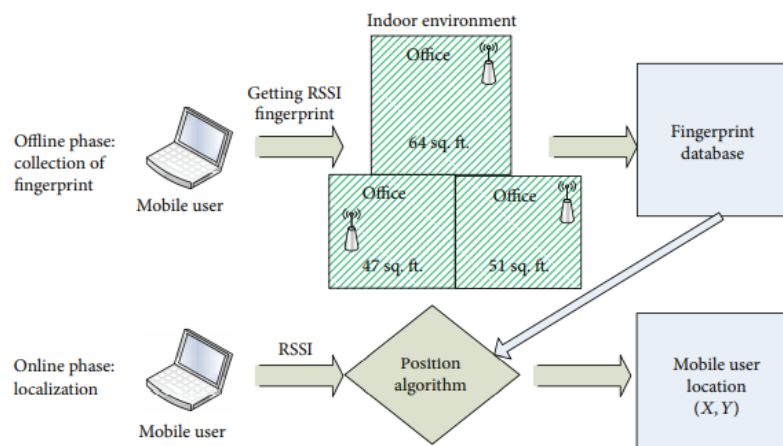


Figura 2. Esquematização da técnica de fingerprinting (Extraído de [5])

3. **Proximidade:** a técnica de proximidade se dá pela detecção da presença do objeto nas proximidades de algum sensor detector. Em geral, essa técnica exige a dispersão de diversos sensores com limitada área de cobertura, de modo que seja garantida a proximidade ao sensor quando um objeto é detectado por ele. As principais abordagens para detectores de proximidade são: por contato físico (sensores de pressão, toque e de campos capacitivos), por detecção de sinal (beacons e RFID com baixa área de cobertura), ou por check-in em posições determinadas, ao fazer login

num terminal ou escanear um código de barras em determinada posição é possível inferir a posição do usuário. [5]

4. **Visão computacional:** esta técnica caracteriza-se pela captura em tempo real de imagens dos arredores da posição que o usuário se encontra, e por meio de algoritmos complexos de inteligência artificial e um alto custo de processamento associado, é possível inferir o correto posicionamento através da detecção de pontos de referência conhecidos. Graças à evolução do poder computacional dos dispositivos celulares, hoje é possível realizar o processamento das imagens nos próprios dispositivos. [5]

2.3 Principais algoritmos utilizados

1. ***Time of Arrival/Time of Flight:*** baseiam-se na diferença de tempo entre a emissão do sinal em um dispositivo emissor e a recepção deste sinal nos dispositivos receptores. Sabendo-se a velocidade de propagação do sinal é possível calcular a distância entre o dispositivo receptor e o transmissor. Esta técnica depende de uma robusta sincronização do relógio tanto do dispositivo emissor quanto dos receptores, uma vez que o tempo de duração do vôo do sinal é calculado por meio da diferença do tempo entre a emissão de um sinal contendo o exato *Timestamp* no dispositivo em que aquele sinal foi emitido e o momento atual em que o sinal foi recebido em cada dispositivo receptor. Este algoritmo costuma ser utilizado para obtenção de distâncias para pontos de referência, possibilitando a aplicação da técnica da Triangulação. [5]

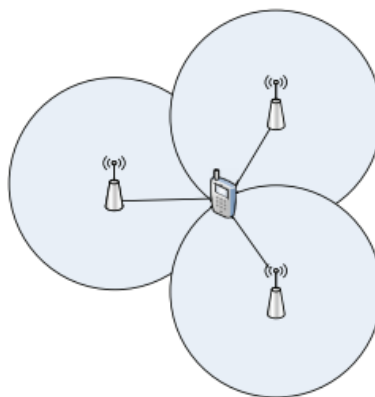


Figura 3. Esquematização do algoritmo ToA/ToF (Extraído de [5])

2. ***Time Difference of Arrival (TDoA)***: também conhecido como multilateração, o *TDoA* também baseia-se no tempo de propagação do sinal. No entanto, este apenas compara a diferença de tempo de recepção do sinal por cada dispositivo receptor e o emissor de modo que torna-se possível inferir as diferenças entre as distâncias que o emissor apresenta para cada um dos receptores. A partir destes valores obtêm-se curvas hiperbólicas cujas intersecções são pontos possíveis para a localização do dispositivo emissor. Este método, em contrapartida ao *ToF* depende da sincronização do relógio apenas dos dispositivos receptores. [5]

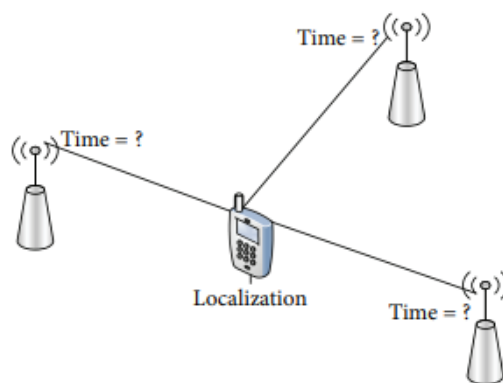


Figura 4. Esquemática do algoritmo TDoA/TDoF (Extraído de [5])

3. ***Angle of Arrival (AoA)***: o algoritmo parte da estimativa do ângulo de um sinal recebido de duas ou mais fontes emissoras com posições conhecidas. Para se obter uma posição em duas dimensões bastam 2 beacons emissores. No entanto, este método depende de antenas capazes de detectar o ângulo de incidência do sinal. [5]

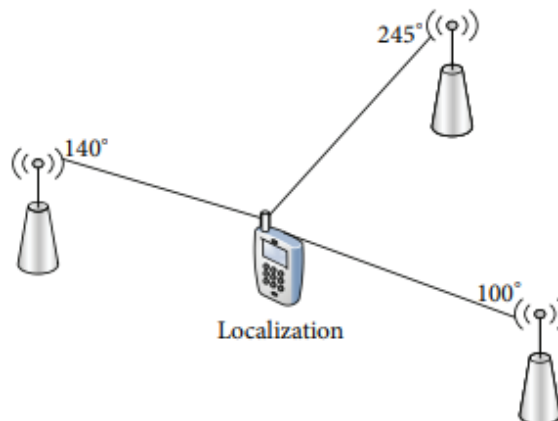


Figura 5. Esquemática do algoritmo AoA (Extraído de [5])

4. **Received Signal Strength (RSSI):** baseia-se na obtenção de uma função que relacione a RSSI com a distância para fonte emissora. Este algoritmo pode ser utilizado para se obter distâncias a serem utilizadas nos cálculos do método de triangulação, ou então também é possível utilizar o valor da RSSI como um dos atributos nos métodos de *Fingerprinting*. [6]

2.4 Métricas de performance

1. **Acurácia:** quando analisamos a acurácia de um *IPS* nos referimos à distância Euclidiana entre a posição real e a posição calculada. A definição das especificações desta métrica é fator fundamental para o correto design da solução para a aplicação que se destinará o sistema. [6]
2. **Disponibilidade:** refere-se à proporção do tempo sob o qual o sistema encontra-se plenamente disponível para uso, calculando corretamente a posição e respondendo às requisições. Esta métrica costuma ser impactada por fatores como a intensidade do tráfego na rede e o custo computacional dos processos. Para efeito de classificação consideram-se valores abaixo de 95% como baixa disponibilidade, acima de 99% como regular, e acima de 99,9% como alta disponibilidade. [6]
3. **Tempo de resposta:** indica a frequência com que o sistema é capaz de atualizar a posição calculada do usuário.
4. **Área de cobertura:** trata-se da área física sob a qual o sistema é capaz de calcular o posicionamento. Classificam-se os níveis de área de cobertura de um *IPS* como: Local (uma área limitada e definida que não pode ser expandida), Escalável (uma área que pode ser incrementada por meio da adição de hardware) e Global (um sistema aplicável em qualquer local do globo terrestre, como o GPS). [6]
5. **Escalabilidade:** pode se referir tanto à viabilidade e facilidade de expansão da área de cobertura por meio de adição de infraestrutura, quanto ao potencial de atendimento de

um maior número de usuários com garantia de alta disponibilidade, ou seja, que o número de cálculos de posições por período de tempo pode ser aumentado. [6]

6. **Custo e complexidade:** o custo de implementação de um sistema pode ser medido por diversos fatores como: dinheiro, tempo, espaço e energia. Tais métricas devem ser medidas em todas etapas de um projeto de *IPS*: desenvolvimento, instalação, calibração e manutenção. Alguns principais custos envolvidos se dão na compra de componentes, instalação de infraestrutura de rede e servidores, e energia utilizada pelos dispositivos. Alguns dispositivos wireless, por utilizarem baterias não recarregáveis, costumam estar associados a um alto custo de manutenção. [6]
7. **Privacidade:** refere-se, na maior parte dos sistemas, à possibilidade da opção do usuário por ter sua posição monitorada e/ou compartilhada com outros usuários, bem como mecanismos de encriptação que garantam a segurança das informações trafegadas no sistema. [6]

3 Sistema desenvolvido

O sistema de Localização Indoor desenvolvido é composto por um servidor, contendo uma aplicação de interface web e um banco de dados para armazenamentos das informações referente às características dos sinais e mapeamento das localidades, e um aplicativo para dispositivos celulares. O sistema é capaz de estimar a localização de um usuário portando um dispositivo celular em uma localidade previamente cadastrada e aferida.

A arquitetura do sistema é composta de:

- 1) Banco de dados SQL para armazenamento do mapa obtido a partir da calibração da residência
- 2) Web API implementada em .NET como interface de comunicação do banco de dados e dispositivos móveis.
- 3) Aplicação desenvolvida para dispositivos móveis Android capaz de coletar os sinais de Wi-fi, bluetooth e campo magnético e enviá-los para a API, bem como exibir o mapa da residência e a posição calculada.

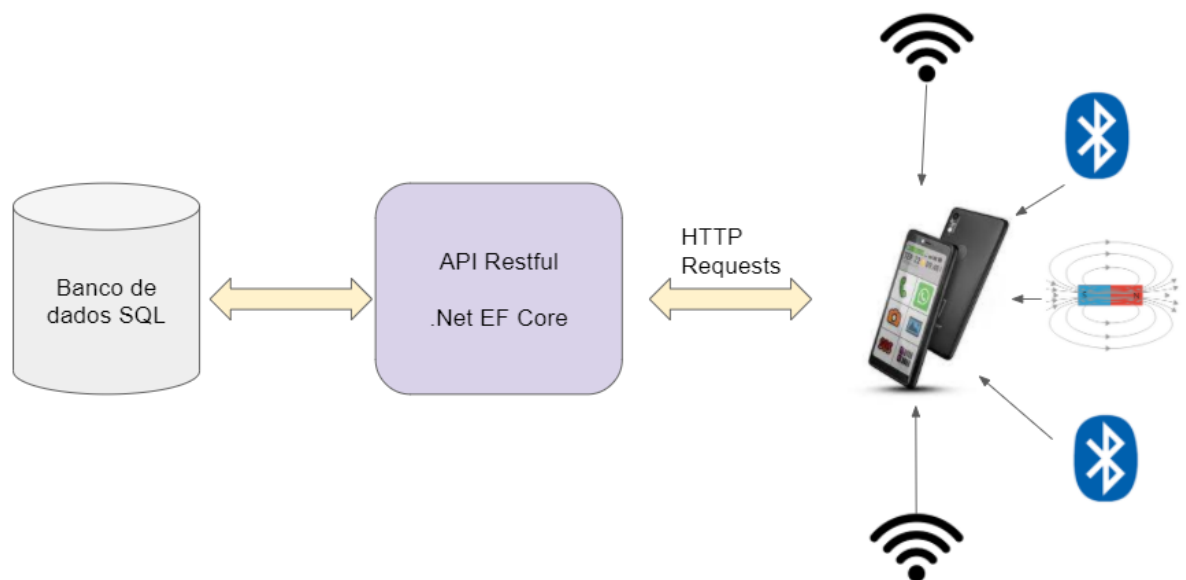


Figura 6. Diagrama dos componentes do sistema

O sistema utiliza-se do método de Fingerprinting o qual é realizado em duas etapas:

- 1) **Fase offline:** o mapa da residência deve ser discretizado em uma malha de pontos de referência. São realizadas medidas consecutivas em cada ponto, de modo a calibrar a posição para adição ao mapa. São medidas a intensidade dos sinais de wi-fi das redes existentes e dos beacons bluetooth instalados, bem como a intensidade e direção do campo magnético. Após a coleta dos dados, estes são tratados de modo a se obter o valor médio e desvio padrão de intensidade para cada sinal em cada posição. Estes, por sua vez, são armazenados no banco de dados e adotados como referência para cada posição.
- 2) **Fase online:** a partir de um aplicativo Android são medidos os sinais de Wifi, Bluetooth e campo magnético, e solicitado ao servidor web o cálculo da estimativa de posição. A posição é calculada a partir da implementação de um algoritmo de WKNN (*Weighted K-Nearest Neighbours*), o qual se mostrou satisfatório em trabalhos semelhantes [9]. Após a solicitação são armazenados os sinais medidos, bem como a resposta calculada pela API e a posição real, de modo que possa se realizar uma análise estatística posteriormente, e trabalhar no aprimoramento do algoritmo.

3.1 Estrutura de banco de dados

O servidor web é responsável por armazenar as informações coletadas pelos dispositivos celulares em um banco de dados durante a fase offline, de calibração. Posteriormente, este servidor será responsável pelo cálculo da posição estimada de determinado usuário, dada as características dos sinais obtidos em determinada localidade, por meio da técnica de fingerprinting.

A arquitetura do banco de dados está organizada de acordo com os seguintes diagramas:

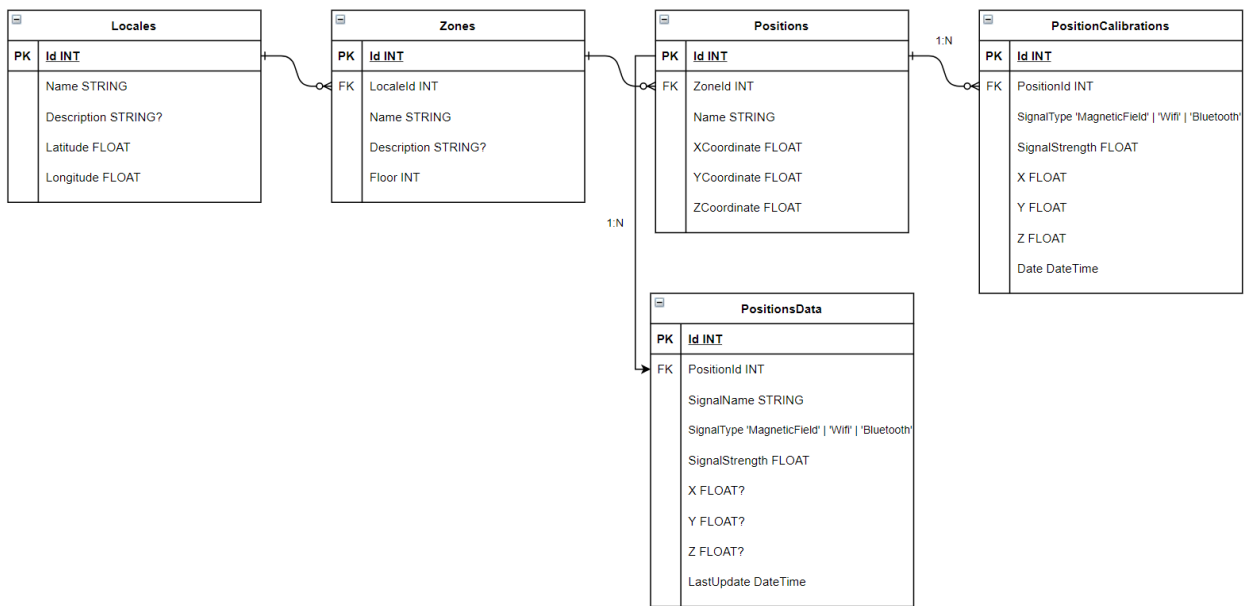


Figura 7. Esquema de arquitetura de banco de dados das entidades utilizadas na fase offline

Para a fase offline são utilizadas as seguintes entidades no banco de dados:

- **Locales:** refere-se a uma localidade, como uma casa específica, um apartamento, um escritório comercial, etc.
- **Zones:** uma zona é uma região interna à uma localidade.
- **Positions:** são posições específicas, internas à uma zona, identificadas por uma coordenada no espaço tridimensional X, Y, Z e um nome/sigla.
- **Calibrations:** são amostras de sinais coletados em dada posição, em dado instante de tempo. Podendo ser sinais de Wifi, Bluetooth ou Campo Magnético.
- **PositionsData:** trata-se de um compilado dos dados coletados para uma posição, o que configura a característica daquela posição. São obtidos, a partir da média e desvio padrão das calibrações realizadas previamente.

Para a fase online utilizam-se as seguintes entidades:

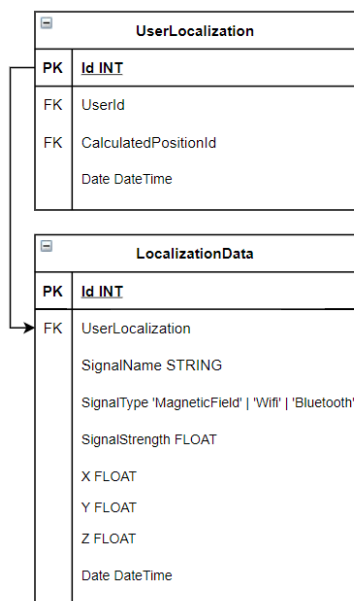


Figura 8. Esquema de arquitetura de banco de dados das entidades utilizadas na fase online

- **UserLocalization:** trata-se de uma requisição de localização realizada por um usuário.
- **LocalizationData:** tratam-se dos dados de sinais coletados pelo usuário naquela localidade em que é feita a requisição de localização.

3.2 Serviços do servidor

Foram criados serviços no servidor, de modo a possibilitar a leitura e inserção de dados no banco de dados por meio de qualquer aplicação que se comunique através de requisições HTTP. No sistema desenvolvido, o principal consumidor destes serviços será o aplicativo de celular de coleta de dados e estimativa de posição. No entanto, também é possível consumir os dados por meio de um cliente que realize requisições HTTP como o CURL do Windows, o software Postman ou até mesmo por um navegador web.

Os serviços do servidor são disponibilizados por meio de uma API HTTP REST. Eles são mapeados em endpoints de acordo com a seguinte estrutura:

`https://<endereço_do_servidor>/api/<entidade>/<serviço><?query>`

Tabela 2. Descrição dos serviços do servidor

Entidade	Serviço	Método	Endpoint	Parâmetros
Locales	Obter dados de uma localidade	GET	../api/locales/{localeId}	
Locales	Criar uma localidade	POST	../api/locales	Body: { "Name": string, "Description": string, "Latitude": float, "Longitude": float }
Locales	Atualizar uma localidade	PUT	../api/locales/{localeId}	Body: { "Name": string, "Description": string, "Latitude": float, "Longitude": float }
Locales	Deletar uma localidade	DELETE	../api/locales/{localeId}	-
Zones	Obter dados de uma zona	GET	../api/zones/{zoneId}	
Zones	Criar uma zona	POST	../api/zones	Body: { "LocaleId": int, "Name": string, "Description": string, "Floor": int }
Zones	Atualizar uma zona	PUT	../api/zones/{zoneId}	Body: { "LocaleId": int, "Name": string, "Description": string, "Floor": int }
Zones	Deletar uma zona	DELETE	../api/zones/{zoneId}	
Positions	Obter dados de uma posição	GET	../api/positions/{positionId}	
Positions	Criar uma posição	POST	../api/positions	Body: { "ZoneId": int, "Name": string, "X": int, "Y": int, "Z": int }
Positions	Atualizar uma posição	PUT	../api/positions/{positionId}	Body: { "ZoneId": int, "Name": string, "X": int, "Y": int, "Z": int }
Positions	Deletar uma posição	DELETE	../api/positions/{positionId}	
Calibrations	Obter uma medida de calibração	GET	../api/calibrations/{calibrationId}	
Calibrations	Obter uma lista de medidas de calibração com opções de filtros	GET	../api/calibrations	Query: [LocaleId: int, ZoneId: int, PositionId: int, SignalType: int, SignalId: string]
Calibrations	Criar diversas medidas obtidas	POST	../api/calibrations	Body: {

	de calibração			PositionId: int, Measurements: [... { SignalId: string, SignalType: int, Strength: int, X: float?, Y: float?, Z: float? }] }
Calibrations	Deletar uma medida de calibração	DELETE	../api/calibrations/{calibrationId}	
PositionEstimation	Retorna uma estimativa de posição ao receber sinais para comparação	POST	../api/position-estimation	Body: { "localeId": int, "realX": int, "realY": int, "neighbours": int, "unmatchedSignalsWeight": int, "bleWeight": int, "wifiWeight": int, "magnetometerWeight": int, "useBestParameters": bool, "useDistance": bool, "standardDeviationFactor": int, "measurements": [{ "signalId": "string", "signalType": int, "strength": int, "x": int, "y": int, "z": int, "dateTime": Date }] }
Reports	Obtém um relatório da precisão do sistema para os parâmetros fornecidos	GET	../api/reports	Query: "neighbours": int, "unmatchedSignalsWeight": int, "bleWeight": int, "wifiWeight": int, "magnetometerWeight": int, "useBestParameters": bool, "useDistance": bool, "standardDeviationFactor": int
Reports	Obtém um relatório da precisão do sistema para os parâmetros fornecidos agrupado por posição	GET	../api/reports/byPosition	Query: "neighbours": int, "unmatchedSignalsWeight": int, "bleWeight": int, "wifiWeight": int, "magnetometerWeight": int, "useBestParameters": bool, "useDistance": bool, "standardDeviationFactor": int
Reports	Testa a precisão do sistema para diferentes parâmetros dada uma especificação de intervalo de variação	GET	../api/reports/parameters	Query: "minNeighbours": int, "maxNeighbours": int, "neighboursStep": int, "minUnmatchedSignalsWeight": int, "maxUnmatchedSignalsWeight": int,

				<pre>"unmatchedSignalsWeightStep": int, "bleWeight": int, "wifiWeight": int, "magnetometerWeight": int, "standardDeviationFactor": int</pre>
--	--	--	--	--

3.3 Interface do aplicativo de coleta de dados

O aplicativo de coleta de dados foi desenvolvido de modo a possibilitar a avaliação do comportamento dos sinais encontrados dentro de um ambiente, medindo a intensidade dos sinais de wifi, bluetooth e campo magnético identificados.

É importante avaliarmos o comportamento dos sinais, tanto espacialmente quanto temporalmente, pois a variabilidade dos sinais ao longo do tempo, ou a coexistência de pontos com “fingerprints” muito semelhantes é um dos principais desafios para a execução do método de fingerprinting.

Para realizar a configuração de um ambiente foi desenvolvido um aplicativo para celular. A Figura 9 mostra a tela, onde é possível realizar o cadastro de diferentes zonas e suas respectivas posições. Exemplo: Quarto 1(zona), Escrivaninha (Posição).

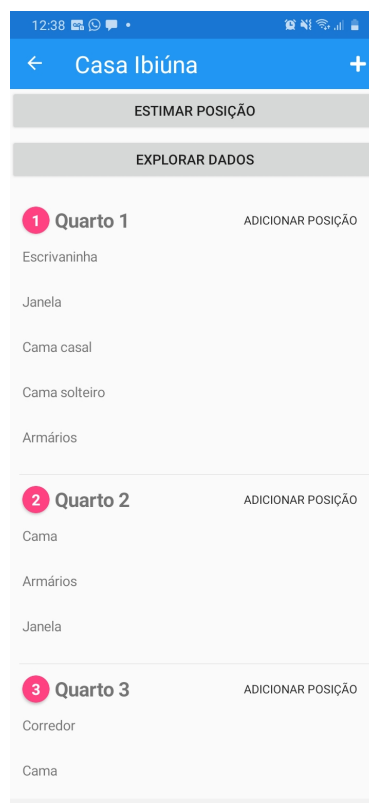


Figura 9. Tela de cadastro de uma localidade, zonas e posições

Ao selecionar uma posição, é possível realizar a calibração desta posição, isto é, permanecendo com o dispositivo por um tempo em determinado local, ele coletará automaticamente a intensidade dos sinais de wifi, bluetooth e campo magnético existentes naquela posição. Após feita a coleta, estes dados são compilados e os seus dados estatísticos, exibidos abaixo. [Figura 10]



Figura 10. Tela de calibração de uma posição

Para facilitar a análise qualitativa do comportamento dos sinais, foi desenvolvida uma tela de análise de sinais. Nesta tela, é exibido um compilado de gráficos com a intensidade de cada um dos sinais encontrados na localidade, agrupados pela média da intensidade encontrada em cada posição. [Figura 11]

Para o campo magnético, é apresentado um gráfico de dispersão com a intensidade média do vetor Y em μT no eixo Y e a intensidade média do vetor Z em μT no eixo Z. Cada ponto representa uma posição dentro da localidade e são identificados por uma cor e uma legenda. [Figura 11, esquerda]

Para os sinais de Bluetooth e Wifi é apresentado um gráfico contendo a intensidade média do RSSI em decibéis no eixo Y, e as posições são distribuídas ao longo do eixo X, também identificadas cada uma por uma cor e uma legenda. [Figura 11, direita]



Figura 11. Telas de visualização dos sinais encontrados em cada localidade

Foi desenvolvida uma tela para visualização da localização em tempo real. Esta tela exibe um mapa com as posições cadastradas em suas respectivas coordenadas e identifica a posição do usuário com um “X” vermelho. Também são marcados com um “▽” as posições vizinhas utilizadas pelo algoritmo WKNN para interpolação da posição estimada. [Figura 12]



Figura 12: Tela de estimativa de posição com base nos sinais encontrados

3.4 Algoritmo de estimativa de posição

O método adotado para o cálculo da estimativa de posições é o WKNN (Weighted K-Nearest-Neighbours), pois como demonstrado pela literatura, apresenta grande adequação à estruturação do problema, como cálculo de coordenadas e existência de pontos de referência (fingerprints). Além disso, este método apresenta resultados satisfatórios, como no trabalho realizado por Pavel em [12], onde obteve-se erros inferiores a 1m utilizando-se desta técnica em um sistema híbrido de Wifi e BLE e em [9] onde os autores aplicaram esta técnica separadamente para os sinais de bluetooth e campo magnético.

Em ambos trabalhos, os autores utilizam-se do WKNN para comparar os sinais coletados por um usuário com os *fingerprints* anteriormente calculados para as posições de referência e armazenados no banco de dados. O método busca encontrar os k pontos de referência cuja média dos sinais medidos minimiza a distância euclidiana D_i em relação aos sinais obtidos pelo usuário naquele instante. Através das k posições obtidas, estima-se a

posição do usuário por meio de uma média ponderada das coordenadas dos k_i pontos, ponderados pelo inverso de suas respectivas distâncias euclidianas (D_i).

A formulação que expressa o cálculo da distância euclidiana para obtenção dos k pontos é dada por:

$$D_i = \sqrt{\sum_{j=1}^N (m_j - s_{ij})^2} \quad (1)$$

Onde, N é o número total dos diferentes sinais m_j encontrados na medição feita pelo usuário, e s_{ij} corresponde à intensidade média do sinal calculada em cada posição de referência i .

Então, ordenam-se os resultados por suas distâncias D_i e escolhem-se os k pontos com menor valor de D . Por fim, a equação para obtenção da coordenada calculada $P [x_i, y_i]$ é dada por:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^k P_i Q_i}{\sum_{i=1}^k Q_i}, \text{ onde } Q = \frac{1}{D_i} \quad (2)$$

Esta técnica demonstra-se bastante adequada para o problema, dado que seus resultados são de fácil interpretação e baixo custo computacional (se aplicadas as devidas otimizações), além de apresentar bons resultados como demonstrado em trabalhos anteriores.

De modo a se aprimorar a precisão do algoritmo foram adicionados alguns fatores de peso como parâmetros do sistema que podem ser testados e adequados para cada localidade.

Tais parâmetros aplicam-se como fatores multiplicativos da distância D_i de cada sinal observado.

Os parâmetros disponíveis para cálculo da estimativa de posição são:

- *Neighbours*: determina o K a ser utilizado pelo KNN
- *UnmatchedSignalsWeight*: determina o peso dado aos sinais ausentes (reduzem o peso de uma posição)
- *BleWeight*: determina o peso dado aos sinais de bluetooth
- *WifiWeight*: determina o peso dado aos sinais de wifi
- *MagnetometerWeight*: determina o peso dado aos sinais de campo magnético
- *StandardDeviationFactor*: determina o peso dado ao grau de confiabilidade do sinal (desvio padrão e número de amostras). Sinais com mais amostras e menor desvio padrão terão um peso maior quanto maior o parâmetro.

Foram desenvolvidas 3 rotinas principais para testar e gerar relatórios para análise destes parâmetros. São elas:

- *AnalyzeParametersReport*: esta rotina aceita um intervalo e passo de cada um dos parâmetros a serem testados, exporta e salva no banco de dados o resultado dos testes.
- *GetPrecisionReport*: a rotina recebe os parâmetros a serem utilizados para cálculo da estimativa de posição e calcula uma posição estimada utilizando-se do algoritmo e parâmetros fornecidos para cada uma das localizações na base de dados teste. Então, exporta os resultados em um arquivo 'csv'.
- *GetPrecisionReportByPosition*: esta rotina realiza a mesma operação que a *GetPrecisionReport*, porém retorna os resultados agrupados por posição, de modo a se obter uma visão sobre a precisão por região da localidade.

Os parâmetros testados têm seus resultados armazenados no banco de dados para que possam ser analisados e/ou utilizados pelo algoritmo de estimativa de posição.

4 Experimentos

De modo a contribuir para a compreensão acerca dos fenômenos e variáveis envolvidas no sistema (como a atenuação dos sinais, interferências e o comportamento do campo magnético), foram desenvolvidos alguns experimentos utilizando-se do aplicativo de coleta de dados.

4.1 Atenuação dos sinais de wifi e bluetooth com a distância

Estes testes consistiram na coleta do RSSI de uma rede de wi-fi predefinida e também de um dispositivo bluetooth HM-10 BLE4.0.

Foram posicionados um dispositivo bluetooth e um roteador wifi, e medidas as distâncias de referência para as quais seriam coletados os dados. Por último, foram coletadas 30 amostras para cada distância do dispositivo celular em relação à fonte emissora do sinal.

A seguir são apresentados gráficos de dispersão referentes ao experimento realizado de modo a facilitar a visualização da correlação entre a distância e as intensidades do sinal medido.

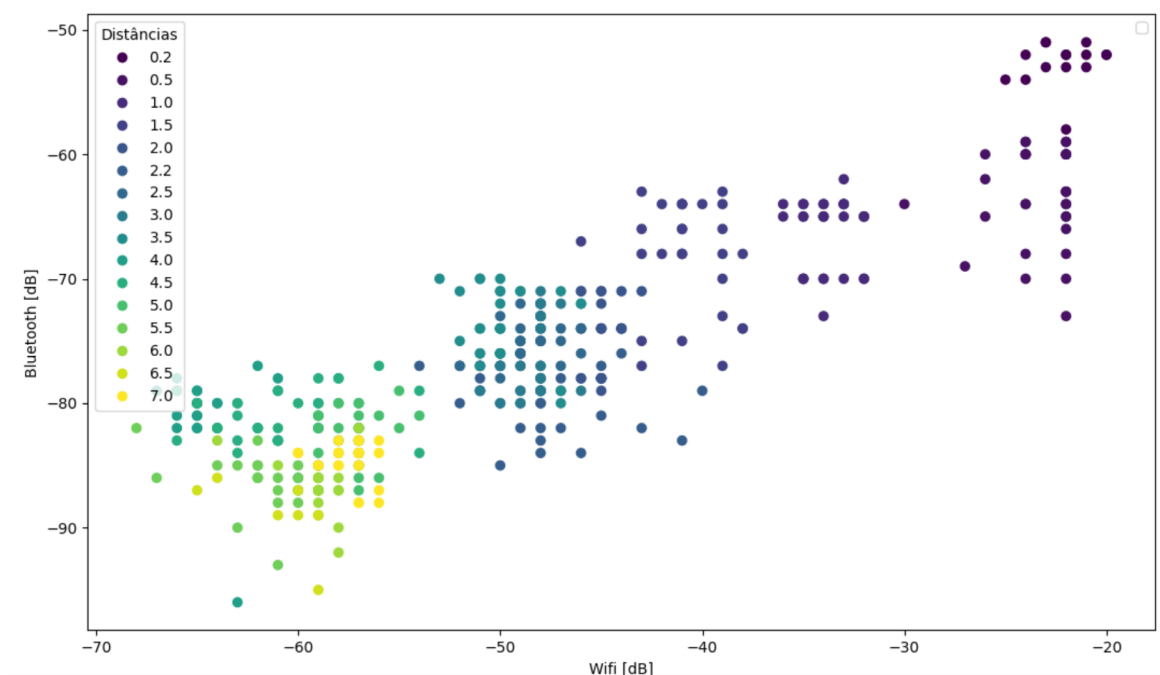


Figura 13. Dispersão da intensidade dos sinais de Wifi e Bluetooth medidos por distância combinados.

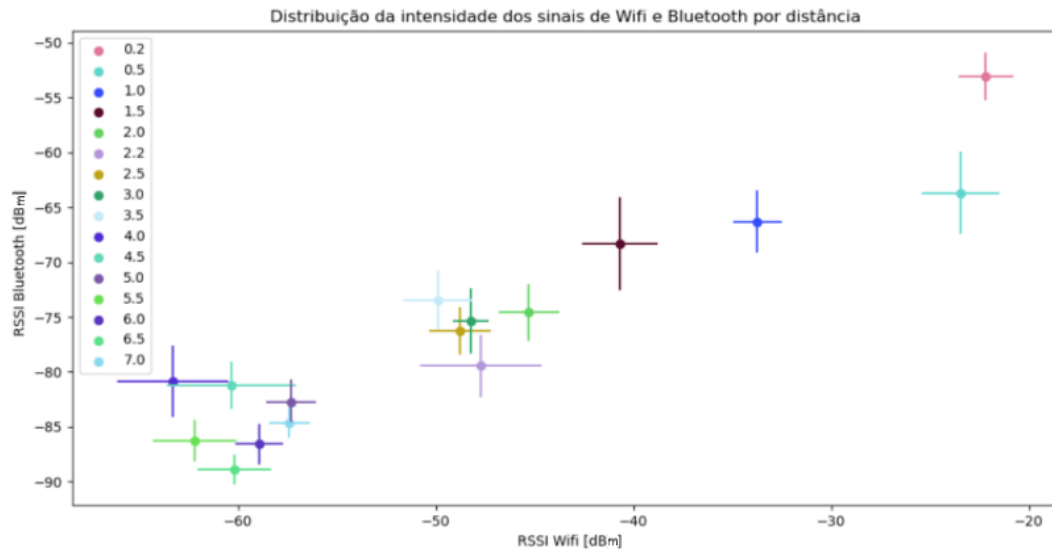


Figura 14. Média da intensidade dos sinais de Wifi e Bluetooth medidos por distância e seus respectivos erros, combinados.

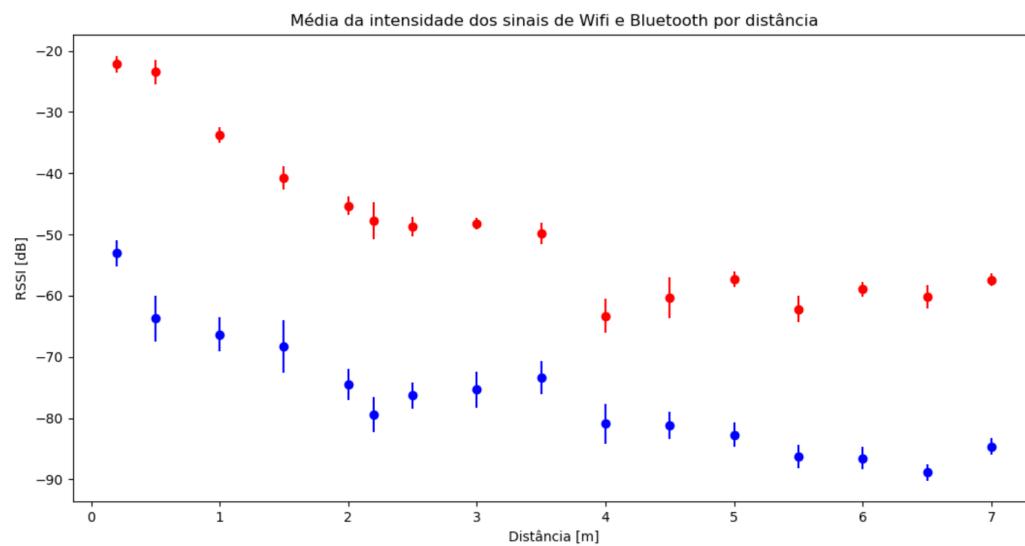


Figura 15. Média e erro da intensidade dos sinais de Wifi e Bluetooth medidos por distância, separados.

Os resultados evidenciaram que é possível se discriminar diferenças de posição da ordem de 1 metro para o sinal de wifi e bluetooth, uma vez que apresentam uma divergência significativa e uma correlação adequada. A quebra de padrão a partir de 6 metros pode se dar pela mudança de ambiente dentro da residência, o que afeta a intensidade dos sinais.

4.2 Comportamento do Campo magnético

Os dispositivos celulares possuem também magnetômetros capazes de medir a intensidade do campo magnético nas 3 direções, relativo à orientação do celular. Por sua vez, os celulares também possuem um acelerômetro que pode ser utilizado em conjunto com o magnetômetro de modo a se calcular a orientação da tela do celular relativa à orientação do campo magnético terrestre.

Para calcularmos a intensidade do campo magnético em dadas posições foi implementado um algoritmo que obtém o vetor campo magnético e rotaciona-o por meio da aplicação do *quaternion* de rotação da orientação da tela do celular relativa ao campo magnético terrestre, obtendo-se assim um vetor campo magnético absoluto, independente da orientação do celular.

A orientação dos eixos em relação ao referencial global é dada por:

X: aponta para o leste terrestre, tangente à superfície terrestre

Y: aponta para o norte terrestre, tangente à superfície terrestre

Z: perpendicular à superfície terrestre e aponta para cima

4.2.1 Variabilidade do campo magnético interno da localidade

O primeiro experimento consistiu na obtenção do vetor de intensidade do campo magnético em uma mesma residência, em diferentes cômodos, com o objetivo de validar que existe uma variabilidade significativa entre as diferentes localizações na residência.

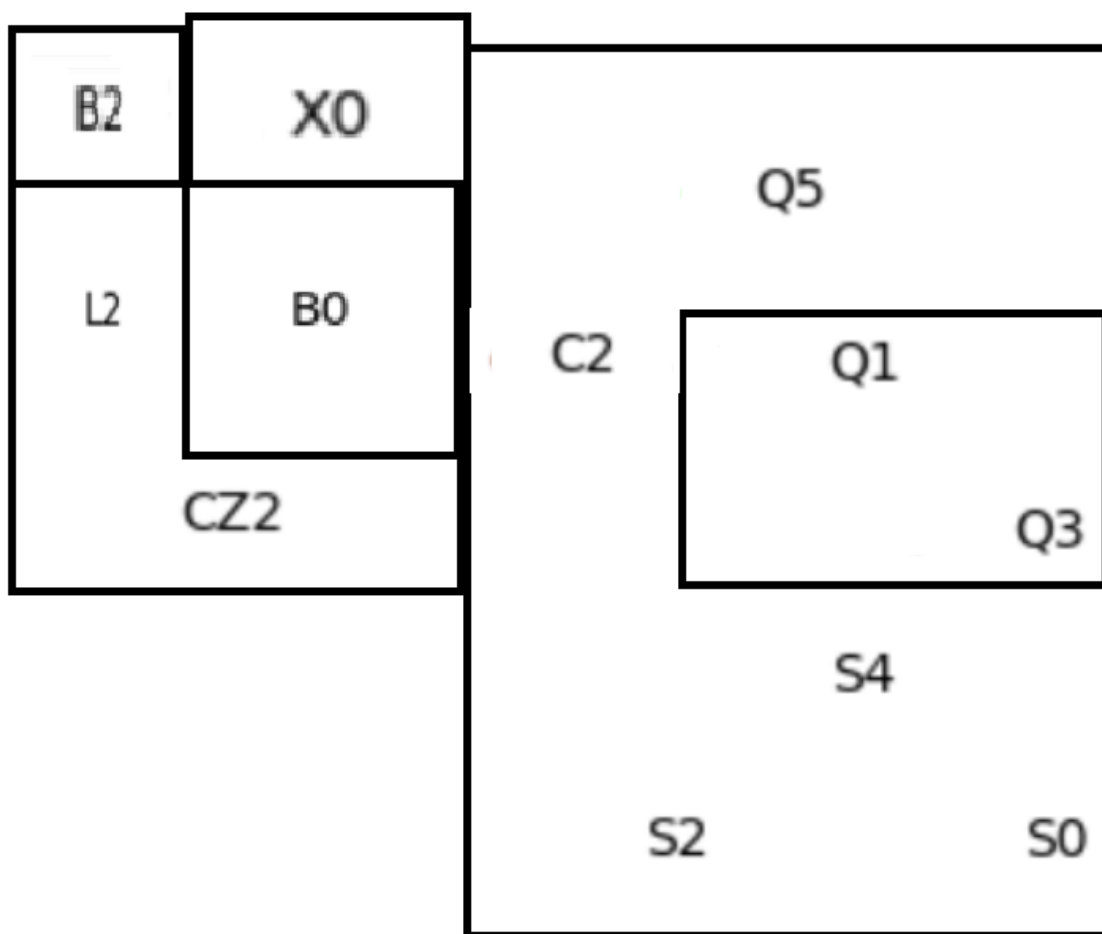


Figura 16. Mapa da residência

Foram obtidos os seguintes resultados para as medições do campo magnético em determinadas posições da residência:

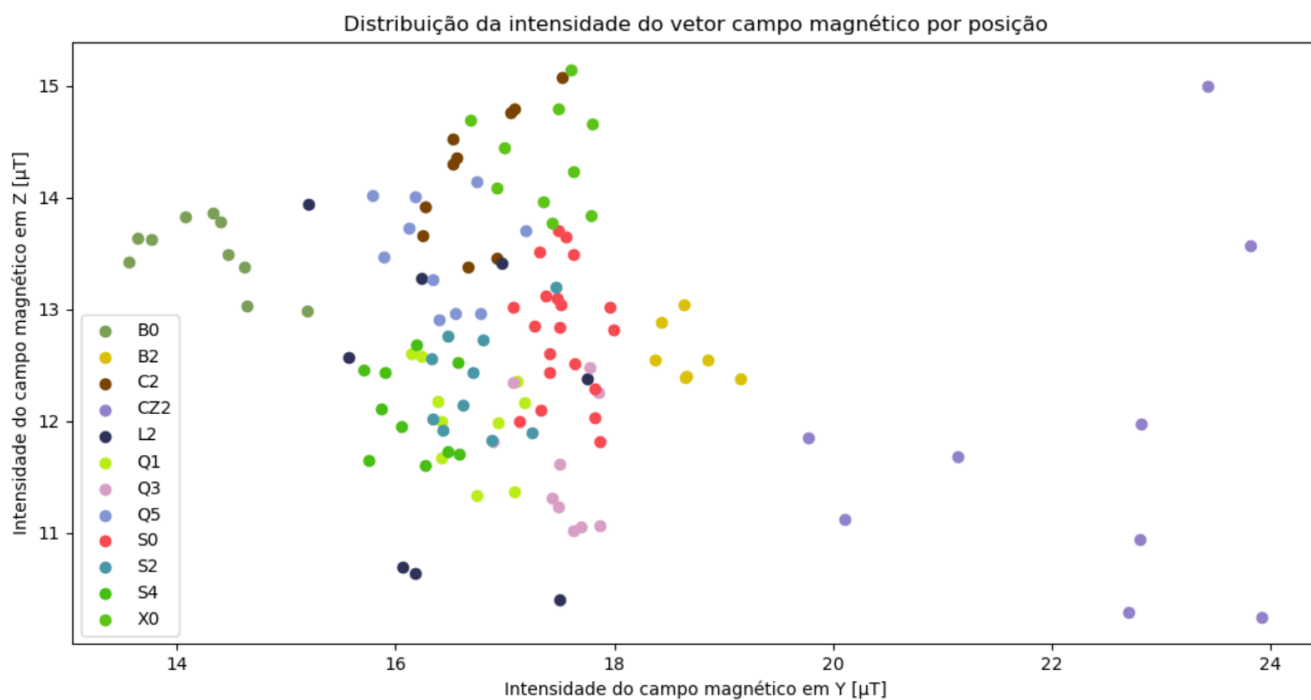


Figura 17. Distribuição das amostras de intensidades do vetor campo magnético na direção Z e Y por posição da residência

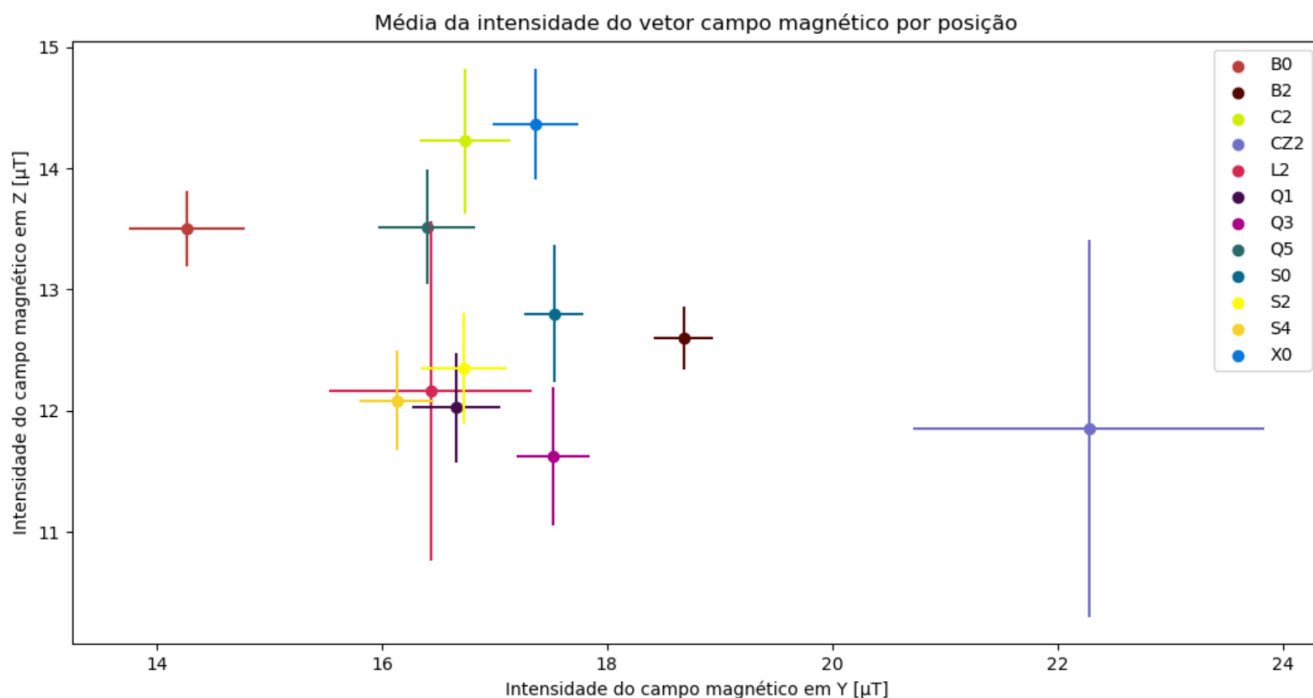


Figura 18. Distribuição da média e erro das intensidades do vetor campo magnético na direção Z e Y por posição da residência

4.2.2 Variação do campo magnético dentro de um pequeno espaço

Com o intuito de analisar a variação do campo magnético no interior de um cômodo mais precisamente, foram realizadas medições em 16 posições de um mesmo cômodo de acordo com a seguinte distribuição de coordenadas de um quarto:

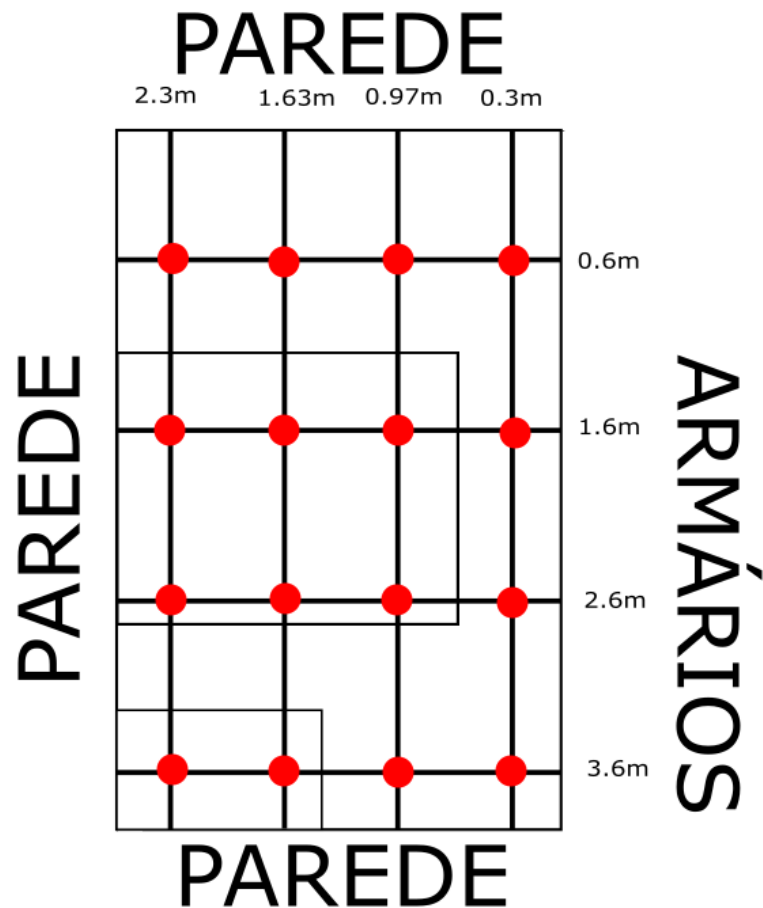


Figura 19. Coordenadas adotadas em um quarto para o experimento de medição do campo magnético

Nos seguintes resultados apresentados abaixo, as colunas identificam a coordenada em X, e as linhas identificam a coordenada em Y. As células interiores da tabela representam a intensidade do campo magnético em cada direção. Os dados referentes à intensidade do vetor na direção X não foram considerados para análise por apresentarem um desvio padrão muito elevado.

Tabela 3. Vetor campo magnético na direção Y por coordenada

Vetor Y(μ T)	0.3	0.97	1.63	2.3
0.6	17,52	18,56	18,48	19,36
1.6	15,07	18,29	20,02	20,96
2.6	15,54	12,62	13,23	16,85
3.6	18,11	13,26	12,49	7,59

Tabela 4. Vetor campo magnético na direção Z por coordenada

Vetor Z(μ T)	0.3	0.97	1.63	2.3
0.6	11,35	11,59	13,27	12,72
1.6	10,72	6,69	5,91	9,44
2.6	11,74	6,09	4,82	7,96
3.6	13,72	15,47	15,32	19,37

Tabela 5. Intensidade total do campo magnético por coordenada

Total (μ T)	0.3	0.97	1.63	2.3
0.6	20,92	21,99	22,97	23,31
1.6	18,55	19,60	21,06	23,08
2.6	19,56	14,20	14,24	18,71
3.6	22,80	20,42	19,86	20,85

Intensidades do vetor campo magnético $Z(\hat{z})$ e $Y(\hat{y})$ por coordenada

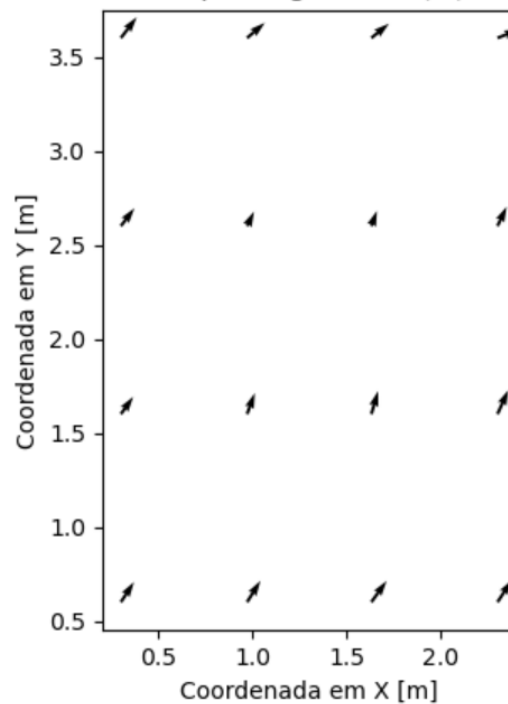


Figura 20. Vetores de intensidade do campo magnético em cada coordenada adotada para medição

A partir dos dados obtidos observa-se que na região central do cômodo, o campo magnético é menos intenso. Isto pode estar associado ao fato de que o campo magnético no interior das construções é intensificado devido às estruturas metálicas presentes nas vigas, de modo que a maior intensidade do campo magnético costuma se encontrar próximo às paredes. Este fato contribui para que haja uma maior variabilidade do campo magnético na maioria dos ambientes fechados, favorecendo a execução do método de fingerprinting.

Também foi possível notar a interferência de dispositivos eletrônicos próximos à coordenada (2.3, 3.6), alterando a orientação do vetor campo magnético.

Com este experimento, conclui-se que há grande variabilidade do campo magnético entre posições próximas (distância de 1m). Graças a essa variabilidade é possível distinguir até mesmo posições em um mesmo cômodo, de modo que este sinal demonstra grande potencial de ser explorado para obtenção de maior precisão.

4.3 Construção de mapas de sinais

De modo a se obter uma melhor visualização do comportamento dos sinais dentro de uma residência foi construído um mapa de intensidade de sinal para um roteador wifi, um dispositivo bluetooth e para o campo magnético.

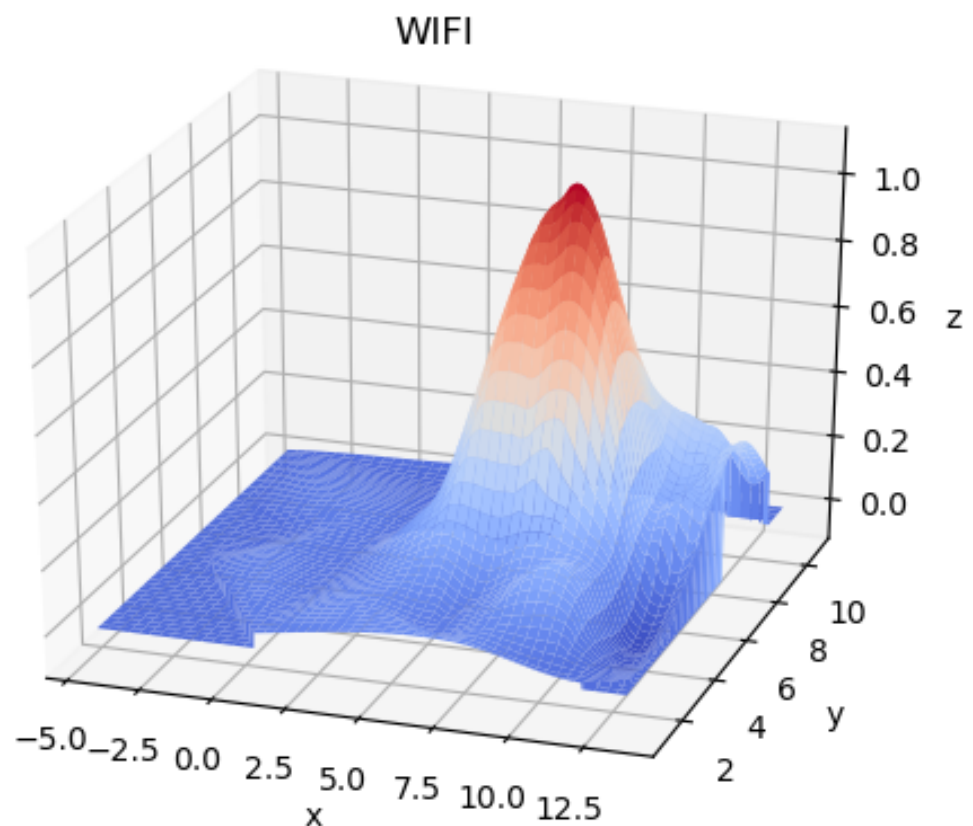


Figura 21. Mapa de intensidade normalizada do sinal de wifi em cada coordenada da residência.

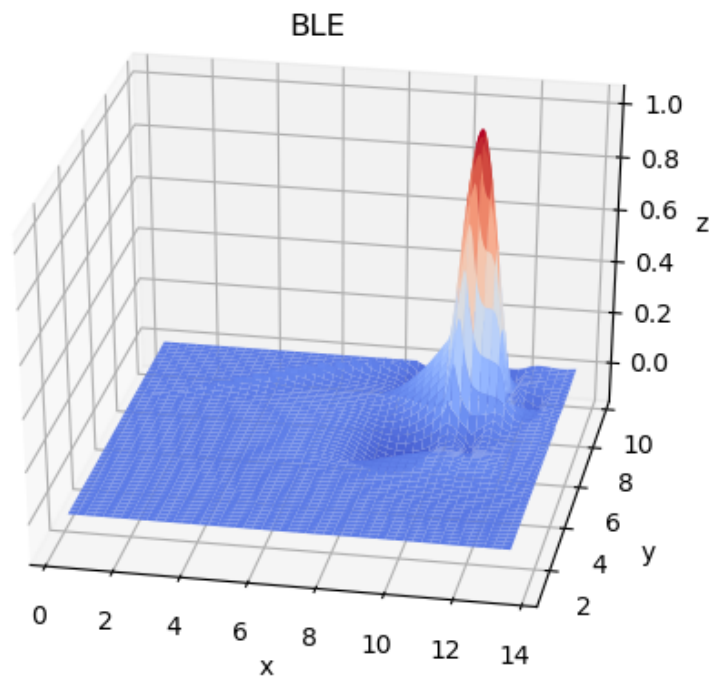


Figura 22. Mapa de intensidade normalizada do sinal de bluetooth de um emissor em cada coordenada da residência.

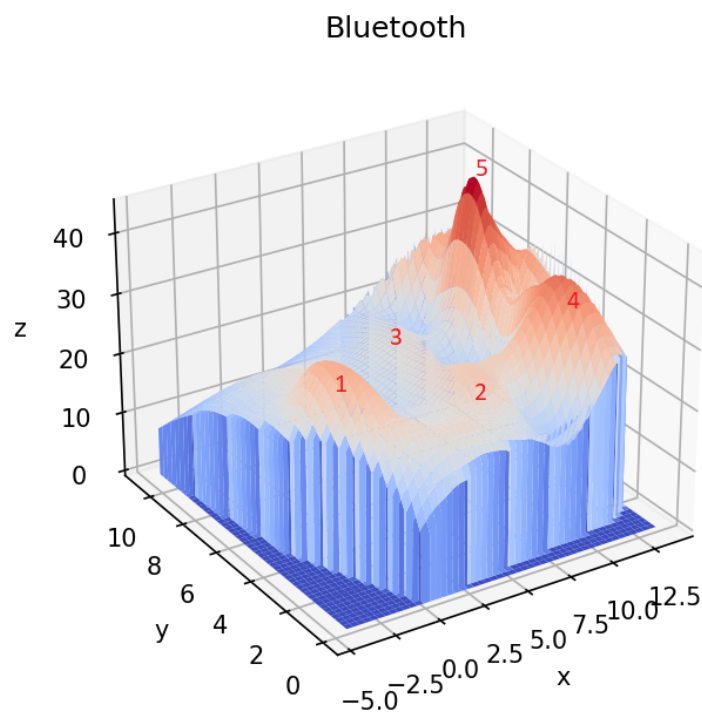


Figura 23. Mapa da composição da intensidade do sinal de bluetooth dos 5 emissores em cada coordenada da residência.

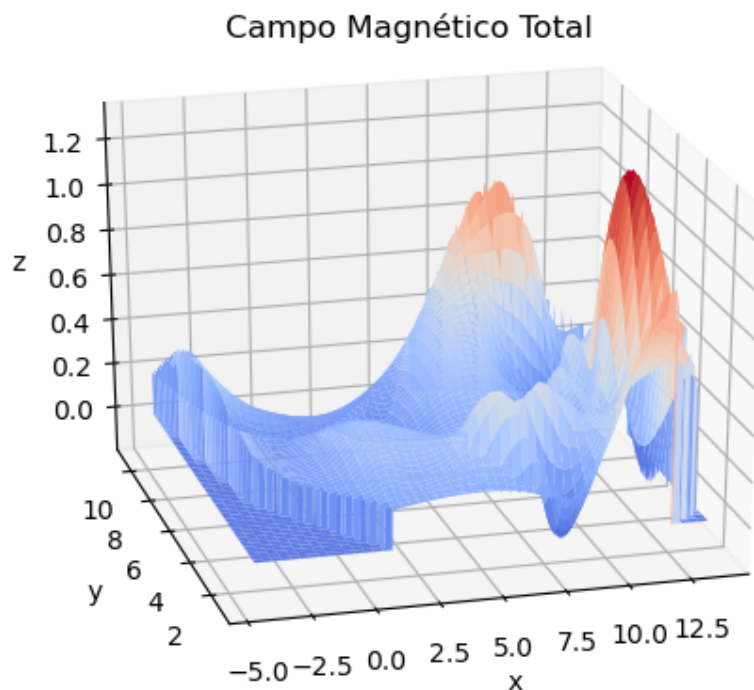


Figura 24. Mapa de intensidade normalizada do campo magnético em cada coordenada da residência.

Através destes experimentos observa-se a continuidade da intensidade dos sinais de wifi e bluetooth, e a concordância entre a maior intensidade nas proximidades dos dispositivos emissores. Da mesma forma, o campo magnético apresenta uma variabilidade suficiente para que este sinal possa ser utilizado como fator discriminante entre posições.

5 Resultados e análise

Para análise dos resultados foi construída uma base de dados testes utilizando uma funcionalidade desenvolvida no aplicativo de celular para armazenar os dados coletados em determinadas posições em uma tabela de testes denominada ‘UserLocalizations’.

A partir destes dados representativos dos sinais medidos em cada localidade (separados dos dados coletados para calibração das posições) é possível executar rotinas disponíveis via serviços web, que testam diferentes parâmetros para estimativas de posição naquela localidade e geram relatórios da precisão obtida com cada conjunto de parâmetros.

5.1 Resultados experimentais

Foram realizadas coletas de dados testes em uma residência de 180 m², preparada com 5 dispositivos bluetooth e uma rede de wifi própria como sinais de referência, além dos sinais da vizinhança. Foram cadastradas 48 posições nesta localidade.

As coletas de dados foram realizadas em 2 datas diferentes com 3 semanas de diferença entre elas.

Foi testado o algoritmo utilizando-se os parâmetros que maximizam a precisão média considerando as duas coletas de modo a se evitar um “overfitting”.

Os parâmetros utilizados foram:

- Neighbours: 3
- UnmatchedSignalsWeight: 0.5
- BleWeight: 3
- WifiWeight: 2
- MagnetometerWeight: 4
- StandardDeviationFactor: 1.32

Os resultados obtidos foram os seguintes:

Erro médio [m]	$1,93 \pm 1,45$
$P(Err < 5m)$	0,96
$P(Err < 4m)$	0,92
$P(Err < 3m)$	0,79
$P(Err < 2m)$	0,62
$P(Err < 1m)$	0,33
Erro mínimo [m]	0,1
Erro máximo [m]	6,4

Tabela 6. Resultados do algoritmo de estimativa de posicionamento com parâmetros ótimos

O gráfico a seguir demonstra o erro médio normalizado por coordenada na residência.

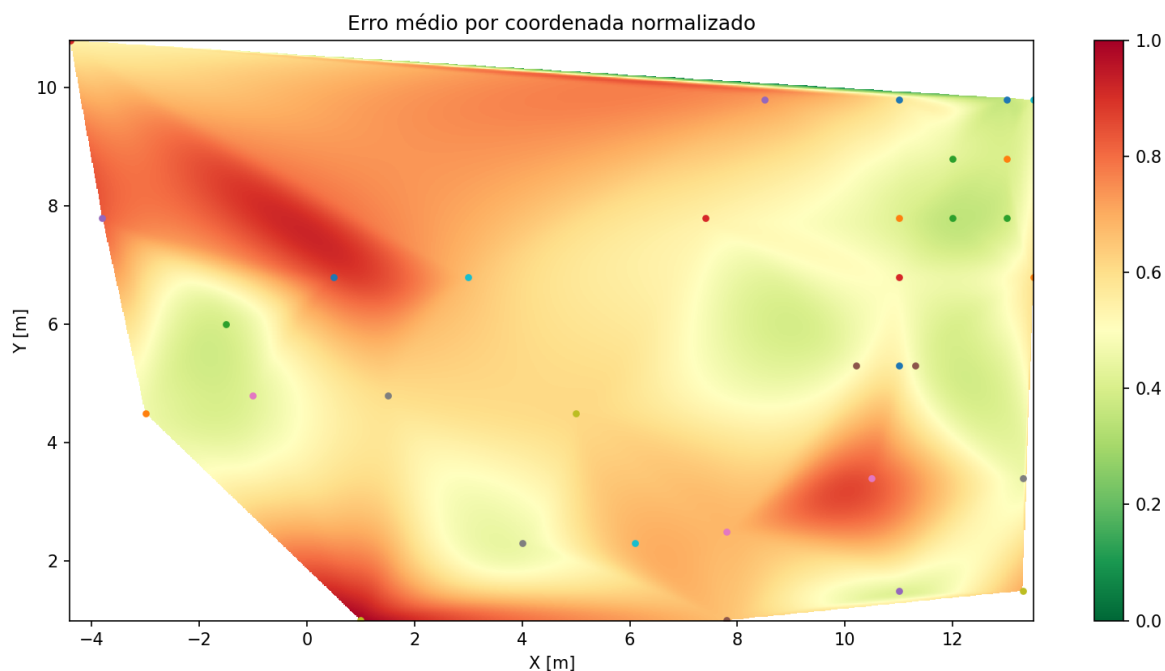


Figura 25. Mapa do erro médio de estimativa de posição normalizado por coordenada da residência

Neste gráfico os pontos representam as posições de referência cadastradas no sistema, e a partir da análise deste gráfico observa-se a influência da densidade de pontos de referência sob a precisão do cálculo de estimativa de posição em cada região. Isto é, as regiões onde foram cadastrados mais pontos de referência, tiveram maior precisão quanto a sua localização (regiões verdes).

5. 2 Uso de pontos fictícios

Com o intuito de amenizar o impacto provocado pela baixa densidade de posições de referência em certas regiões foi aplicado o método dos “*fictitious training points*” sugerido por Hossain em [11].

Este método consiste na criação de pontos adicionais de referência através da interpolação dos dados das posições já cadastradas, sem que seja necessário calibrar cada uma das posições adicionais manualmente.

Para isso, foi desenvolvida uma rotina que procura a posição que contém o n -ésimo vizinho mais distante, e adiciona uma nova posição fictícia intermediária a esta posição e o seu vizinho mais próximo.

Esta rotina é configurável para ser executada até que todas as posições cadastradas possuam ao menos n vizinhos com no máximo uma distância d também parametrizável.

Foram utilizados os mesmos parâmetros, e a mesma base de testes do experimento anterior e os resultados obtidos após a aplicação do método foram os seguintes:

Tabela 7. Comparativo do resultado do algoritmo de estimativa de posicionamento anteriormente e após a aplicação de pontos fictícios

	Sem pontos fictícios	Com pontos fictícios
Erro médio [m]	$1,93 \pm 1,45$	$1,84 \pm 1,41$
$P(Err < 5m)$	0,96	0,96
$P(Err < 4m)$	0,92	0,93
$P(Err < 3m)$	0,79	0,8
$P(Err < 2m)$	0,62	0,63
$P(Err < 1m)$	0,33	0,36

Erro mínimo [m]	0,1	0,05
Erro máximo [m]	6,4	6,13

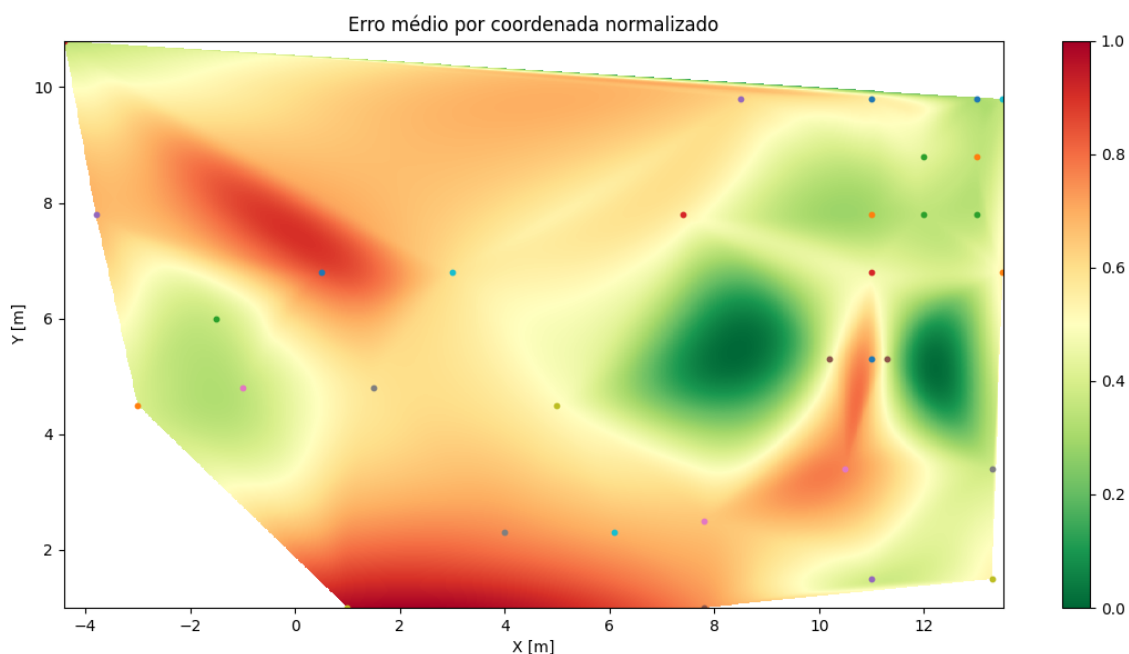


Figura 26. Mapa do erro médio de estimativa de posição normalizado por coordenada da residência após aplicação do método dos “pontos fictícios”

Os resultados apresentados na tabela 13 e o gráfico da figura 27 evidenciam a contribuição da aplicação do método de pontos fictícios para a precisão do algoritmo. Também é válido ressaltar a praticidade da execução deste algoritmo ante à calibração de posições de referência adicionais.

5. 3 Otimização de parâmetros

Foi observado que diversos fatores podem influenciar a confiabilidade de um sinal utilizado pela técnica de fingerprinting. Assim, de modo a se analisar a contribuição dos diferentes sinais e fatores aplicados ao algoritmo, foi realizado um outro teste para o qual a precisão média foi de 2.11 metros, e então foram executados novos testes alterando apenas um

fator por vez em comparação à configuração ótima encontrada. (Neighbours:3, UnmatchedSignalsWeight:0.33, BleWeight:3, WifiWeight:2, MagnetometerWeight:4,StandardDeviationFactor:1.32).

Tabela 8. Comparativo da influência do peso dos sinais sob o erro médio

Parâmetro alterado	Valor ótimo	Erro médio com valor alterado [m]	Variação do erro
BleWeight: 0	3	4.21	2.10
BleWeight: 1	3	2.97	0.86
BleWeight: 2	3	2.41	0.30
BleWeight: 4	3	2.16	0.05
BleWeight: 5	3	2.18	0.07
WifiWeight: 0	2	2.89	0.78
WifiWeight: 1	2	2.40	0.29
WifiWeight: 3	2	2.35	0.24
WifiWeight: 4	2	2.59	0.7
WifiWeight: 5	2	2.78	0.89
MagnetometerWeight: 0	4	2.35	0.24
MagnetometerWeight: 1	4	2.31	0.20
MagnetometerWeight: 2	4	2.21	0.1
MagnetometerWeight: 3	4	2.18	0.07
MagnetometerWeight: 5	4	2.27	0.16

Outros parâmetros adicionais também tiveram impacto significativo sobre os resultados:

Tabela 8. Comparativo da influência dos parâmetros adicionais sob o erro médio

Parâmetro alterado	Valor ótimo	Erro médio com valor alterado [m]	Variação do erro
UnmatchedSignalsWeight: 0	0.5	2.84	0.79
UnmatchedSignalsWeight: 0.33	0.5	2.15	0.04
UnmatchedSignalsWeight: 0.66	0.5	2.16	0.05
UnmatchedSignalsWeight: 1	3	2.24	0.09
StandardDeviationFactor: 0	1.32	2.14	0.03
StandardDeviationFactor: 0.33	1.32	2.39	0.28
StandardDeviationFactor: 0.66	1.32	2.24	0.13
StandardDeviationFactor: 0.99	1.32	2.18	0.07
StandardDeviationFactor: 1.65	1.32	2.15	0.04
Neighbours: 1	3	2.4	0.29
Neighbours: 2	3	2.21	0.1
Neighbours: 4	3	2.19	0.08
Neighbours: 5	3	2.25	0.14
Neighbours: 6	3	2.29	0.18
Neighbours: 7	3	2.42	0.31

6 Conclusão

O trabalho consistiu no desenvolvimento de um sistema de Localização Indoor arquitetado de modo a contemplar a execução da técnica de Fingerprinting, mas também capaz de sustentar o desenvolvimento de estudos estatísticos acerca do comportamento de sinais de wifi, bluetooth e campo magnético em diferentes ambientes. O resultado obtido foi a criação de um sistema aberto e completamente configurável por qualquer usuário portador de um dispositivo Android.

Os diversos experimentos realizados corroboram com as premissas impostas pela técnica de fingerprinting, como a variabilidade da intensidade dos sinais nos ambientes, e os resultados foram favoráveis para o desenvolvimento do sistema, aprimoramentos futuros e incentiva a exploração desta técnica voltada para aplicações de localização indoor.

A escolha dos sinais de wifi, bluetooth e campo magnético mostraram-se bastante satisfatórias, dada a alta disponibilidade destes sinais em qualquer ambiente nos dias de hoje, e sua fácil captação por dispositivos celulares comuns. Os experimentos e resultados evidenciaram o potencial de exploração destes sinais.

O uso de um dispositivo celular para coleta de dados mostrou-se muito positivo por contemplar as necessidades do sistema e por ser um dispositivo já inserido no cotidiano das pessoas.

Ainda que o resultado obtido (erro médio de $1.84 \pm 1.41\text{m}$) tenha sido satisfatório, destacam-se como limitações dos experimentos realizados o pequeno número de pontos de referência, onde foram instalados apenas 5 dispositivos emissores bluetooth e um roteador wifi para uma área de 180 m^2 . Acredita-se que com um incremento do número de sinais identificáveis seja possível obter precisões médias de cerca de 1m .

Outro fator a ser considerado é a importância da realização de uma distribuição igualitária das posições de referência para aplicação do KNN, uma vez que foi observado um prejuízo de precisão nas regiões onde havia um menor número de pontos de referência.

Apesar da utilização do “método dos pontos fictícios” contribuir para a amenização do erro causado por este fenômeno, recomenda-se a construção de uma malha de posições de referência igualmente distribuída.

Por fim, destaca-se a evidência da contribuição de todos os diferentes sinais (wifi, bluetooth e campo magnético) para a precisão do método, assim como a consideração de parâmetros adicionais e a incorporação dos mesmos no algoritmo de estimativa de posicionamento de modo a se obter melhores precisões.

7 Referências

- [1] K. Al Nuaimi and H. Kamel. A survey of indoor positioning systems and algorithms. In Innovations in Information Technology (IIT), International Conference on, pages 185–190. IEEE, 2011.
- [2] J. Hightower and G. Borriello. Location sensing techniques. Technical report, IEEE Computer, 2001.
- [3] Y. Gu, A. Lo, and I. Niemegeers. A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks. Communications Surveys & Tutorials, IEEE, 11(1):13–32, 2009.
- [4] C. Wu, Z. Yang, Y. Liu, and W. Xi. Will: Wireless indoor localization without site survey. Parallel and Distributed Systems, IEEE Transactions on, 24(4):839–848, 2013
- [5] H. Mehmood and N. K. Tripathi, Hybrid Positioning Systems: A Review, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011.
- [6] M. A. Al-Ammar, Comparative Survey of Indoor Positioning Technologies, Techniques, and Algorithms, International Conference on Cyberworlds, 2014, pp. 245-252
- [7] Z. Y. Dong, W. M. Xu, H. Zhuang(2019) *Research on ZigBee Indoor Technology Positioning Based on RSSI*, Procedia Computer Science,154, pp. 424-429, ISSN 1877-0509 <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.06.060>.
- [8] Jimenez, A.R.; Seco, F.; Prieto, C.; Guevara, J. A comparison of Pedestrian Dead-Reckoning algorithms using a low-cost MEMS IMU. In Proceedings of the IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing, Budapest, Hungary, 26–28 August 2009; pp. 37–42.
- [9] H. Gang and J. Pyun. A Smartphone Indoor Positioning System Using Hybrid Localization Technology, 2019, Energies, 12, pp 1-20

- [10] M. A. Youssef, A. Agrawala, and A. U. Shankar. WLAN location determination via clustering and probability distributions. In Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PERCOM '03), March 2003
- [11] A. Hossain, H. Van, Y. Jin et al. Indoor localization using multiple wireless technologies, 2007, IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems, MASS
- [12] K. Pavel, M. Filip and T. Koze. Improving Indoor Localization Using Bluetooth Low Energy Beacons, 2016. Mobile Information Systems.l