

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL – UCS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA – CCET
CIDADE UNIVERSITÁRIA
ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO**

MARCELO SALA RECK

**Beacons BLE – BLUETOOTH LOW ENERGY – Design e análise de um sistema
de localização indoor**

**CAXIAS DO SUL
2016**

MARCELO SALA RECK

**Beacons BLE – BLUETOOTH LOW ENERGY – Design e análise de um sistema
de localização indoor**

Trabalho de conclusão de curso de graduação,
apresentado como parte dos requisitos para a
obtenção do título de Engenheiro de Controle e
Automação da Universidade de Caxias do Sul.

Orientador: Prof. Dr. André Gustavo Adami

CAXIAS DO SUL

2016

MARCELO SALA RECK

**Beacons BLE – BLUETOOTH LOW ENERGY – Design e análise de um sistema
de localização indoor**

Trabalho de conclusão de curso de graduação,
apresentado como parte dos requisitos para a
obtenção do título de Engenheiro de Controle e
Automação da Universidade de Caxias do Sul.

Aprovado em _____ de _____ de _____.

Banca Examinadora

Professor

Universidade de Caxias do Sul – UCS

Professor

Universidade de Caxias do Sul – UCS

Professor

Universidade de Caxias do Sul – UCS

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado saúde e força durante toda a caminhada.

A minha família, pelo amor, apoio e incentivo incondicional.

A todos meus professores do curso, que foram muito importantes durante toda a graduação, em especial ao meu orientador Prof. Dr. André Gustavo Adami pelo suporte, conselhos e incentivos que foram indispensáveis neste trabalho.

Aos meus amigos e colegas de curso, companheiros de trabalhos e longas horas de estudo, que fizeram parte da minha formação.

RESUMO

Este projeto apresenta a análise e a implementação de um sistema de localização *indoor*, capaz de reconhecer a localização estimada de um *smartphone* em uma área interna. O objetivo é analisar os dados de localização obtidos para posteriormente tratá-los da forma prevista para aplicação em questão. Para tanto, serão utilizados dispositivos denominados Beacons, capazes de localizar e mandar informações em tempo real de acordo com a proximidade entre eles e um *smartphone*, que por sua vez atua como receptor e processador de dados. Os Beacons utilizam a tecnologia sem fio BLE (*Bluetooth Low Energy*, também conhecida como *Bluetooth Smart*) para detectar e ativar sinais que serão tratados em um aplicativo. Um estudo detalhado de todas vertentes e tecnologias envolvidas fazem parte do escopo deste trabalho.

Palavras-chave: Beacons, Bluetooth Low Energy, Bluetooth Smart, Localização Indoor, Indoor Location.

ABSTRACT

This project presents an indoor location system analysis and implementation that is able to estimate the location of a smartphone in an internal area. The purpose is to analyze the gathered location data in order to subsequently apply them effectively in the required application. Hence electronic devices, based on proximity, are utilized in order to locate and send real time data to a smartphone, which becomes a receiver and data processor. Called Beacons, those electronic devices use wireless technology BLE (Bluetooth Low Energy also known as Bluetooth Smart) to detect and activate signals, which will be processed by a mobile app. A detailed research, covering all dimensions and technologies, is within the scope of this study.

Keywords: Beacons, Bluetooth Low Energy, Bluetooth Smart, Indoor Location.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Tecnologias sem fio de transferência de dados.	18
Figura 2: Técnicas de detecção de posição	23
Figura 3: Técnica de Triangulação (Latência).	24
Figura 4: Técnica de Angulação	26
Figura 5: RSSI x Distância.....	28
Figura 6: Técnica de <i>Fingerprinting</i> . A intensidade do sinal recebido dos emissores A, B, C, e D são medidos a fim de caracterizar as características dos sinais em cada subárea.....	29
Figura 7: Fases da técnica de localização por <i>fingerprinting</i>	30
Figura 8: Exemplo para Técnica de proximidade	34
Figura 9: <i>Tags</i> (etiquetas) ativas e passivas	37
Figura 10: Canais do <i>Bluetooth Smart</i> . Os canais de aviso estão representados na cor verde.	45
Figura 11: Redes <i>piconet</i> e <i>scatternet</i> (Bluetooth Clássico).....	47
Figura 12: Topologia Star-bus BLE	48
Figura 13: Pilha do protocolo Bluetooth.....	49
Figura 14: Estimote Beacon BLE.....	50
Figura 15: Comunicação entre Beacon e Smart Device.....	51
Figura 16: Pacote de dados do Beacon BLE.....	51
Figura 17: Zonas de proximidade para Estimote Beacons	54
Figura 18: Arquitetura do sistema.....	56
Figura 19: Distância real de 3 metros X Distância calculada.....	59
Figura 20: Diagrama do Algoritmos de Localização Indoor baseado no RSSI ...	61

Figura 21: Sinal original de um beacon sujeito a dois filtros de média móvel de tamanhos 10 e 20.....	62
Figura 22: Triangulação de um ponto P escolhido aleatoriamente.....	63
Figura 23: Beacons divididos em grupos.....	64
Figura 24: planta baixa sala 404 (bloco 71).....	65
Figura 25: Distribuição dos beacons no ambiente.....	67
Figura 26: Representação 3D da sala com os Beacons afixados nas paredes..	67
Figura 27: Representação das 6 subáreas com seus respectivos pontos de coleta (P1, P2, P3, P4, P5 e P6) localizados no centro de cada uma delas.....	68
Figura 28: Diagrama do sistema de referência.....	70
Figura 29: Erro médio para diferentes valores de K	71
Figura 30: Mapa de <i>fingerprints</i> . Cada ponto representa a localização estimada pelo sistema proposto para cada ponto utilizado na construção dos <i>fingerprints</i>	72
Figura 31: Principais telas do aplicativo de localização indoor	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparativo entre sistemas de posicionamento	22
Tabela 2: Comparação entre as técnicas de detecção de posição	35
Tabela 3: Características das tecnologias de localização <i>indoor</i>	42
Tabela 4: Alcance do Bluetooth	44
Tabela 5: Comparativo entre Bluetooth Clássico e <i>Bluetooth Low Energy</i>	46
Tabela 6: Pacote de dados para um exemplo de aplicação na área comercial..	52
Tabela 7: Especificações dos beacons	57
Tabela 8: Parâmetros dos Beacons	66
Tabela 9: Erro Médio por ponto de teste do sistema de referência para os dois <i>smartphones</i>	70
Tabela 10: Erro para cada ponto de teste e erro global do algoritmo KNN	72

LISTA DE SIGLAS

AES	<i>Advanced Encryption Standard</i>
AoA	<i>Angle of Arrival</i>
API	<i>Application Programming Interface</i>
APP	<i>Application</i>
BLE	<i>Bluetooth Low Energy</i>
FH-DCMA	<i>Frequency Hopping - Code-Division Multiple Access</i>
FHS	<i>Frequency Hopping Synchronization</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HCI	<i>Host Controller Interface</i>
ID	<i>Identification</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
IPS	<i>Indoor Positioning System</i>
IR	<i>Infrared</i>
ISM	<i>Industrial, Scientific, Medical</i>
KNN	<i>K-Nearest Neighbor</i>
LMP	<i>Link Manager Protocol</i>
L2CAP	<i>Logical Link Control and Adaptation Protocol</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
OBEX	<i>Object Exchange</i>
PDA	<i>Personal Digital Assistants</i>
PHY	<i>Physical Layer</i>
PPP	<i>Point-to-Point Protocol</i>

RF	<i>Radio Frequency</i>
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i>
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i>
SIG	<i>Special Interest Group</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TDoF	<i>Time Difference of Arrival</i>
ToA	<i>Time of Arrival</i>
ToF	<i>Time of Flight</i>
UUID	<i>Universally Unique Identifier</i>
WAP	<i>Wireless Application Protocols</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
WKNN	<i>Weighted k-Nearest Neighbor</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Justificativa do Trabalho	16
1.2	Objetivos.....	19
1.2.1	Objetivo Geral.....	19
1.2.2	Objetivos Específicos	19
1.3	Escopo e Restrições.....	20
2	SISTEMAS DE POSICIONAMENTO <i>INDOOR</i>.....	21
2.1	Categorias de Sistemas de Posicionamento	21
2.2	Técnicas de Detecção de Posição.....	23
2.2.1	Triangulação.....	24
2.2.1.1	Latência	24
2.2.1.2	Angulação	26
2.2.2	Análise de Cenas - <i>Fingerprinting</i>	27
2.2.2.1	K-Vizinhos Mais Próximos (<i>KNN - K-Nearest Neighbor</i>).....	31
2.2.3	Proximidade.....	33
2.2.4	Comparação das Técnicas de Detecção de Posição	34
2.3	Tecnologias para Localização	35
2.3.1	Avaliação de Tecnologias para Sistemas de Posicionamento	36
2.3.2	Identificação por Rádio Frequência	37
2.3.3	Wi-Fi	38
2.3.4	ZigBee	40
2.4	Comparação das Tecnologias	41
3	BLUETOOTH E BEACON	43

		13
3.1	Bluetooth Clássico	43
3.2	Bluetooth de Baixa Energia	44
3.3	Pilhas do Protocolo Bluetooth.....	48
3.4	Beacons.....	50
3.4.1	UUID.....	51
3.4.2	Major e Minor.....	52
3.4.3	Intensidade do Sinal Recebido	52
3.4.4	Zonas de Proximidade.....	53
4	PROCESSO DE LOCALIZAÇÃO	55
4.1	Modo de Funcionamento	55
4.1.1	Beacons.....	56
4.1.2	Características do Sinal	57
4.2	Sistema de Localização	60
4.2.1	Pré-Processamento.....	61
4.2.2	K-Vizinho Mais Próximo	62
4.2.3	Triangulação.....	62
4.3	Base de Dados	64
4.3.1	Ambiente de Coleta	65
4.3.2	Processo de Coleta	67
4.3.2.1	Coleta para Análise/Treinamento.....	68
4.3.2.1	Coleta para Avaliação do Sistema	69
4.4	Experimentos e Resultados.....	69
4.4.1	Avaliação do Sistema	69
4.4.2	Sistema de Referência	70
4.4.3	Sistema Proposto	71

		14
4.5	Aplicativo de localização indoor.....	72
5	CONCLUSÕES.....	75
5.1	Trabalhos Futuros.....	77
7	BIBLIOGRAFIA	78
	APÊNDICE A – Formação do mapa de <i>fingerprints</i> (matriz KNN).....	82
	APÊNDICE B – Cálculo do valor RSSI para distâncias e triangulação	83

1 INTRODUÇÃO

Com a evolução da tecnologia GPS (*Global Positioning System*) serviços de localização surgem cada vez mais rápido. Esta tecnologia consiste em uma rede de satélites que orbitam a Terra capaz de enviar informações precisas de sua posição no espaço para um receptor terrestre. Dependendo de algumas condições como clima e localização, receptores GPS de uso civil podem fornecer dados de localização *outdoor* (ao ar livre) com uma faixa de erro entre 1 e 5 metros (PELEG). Algumas aplicações que envolvem posicionamento são rastreamento de veículos ou objetos, instruções de rota e localização de um produto em tempo real. É evidente que para aplicações de posicionamento em ambientes abertos o GPS tornou-se padrão (DAHLGREN e MAHMOOD, 2014). Mas esta tecnologia apresenta restrições para lugares fechados. Quando um receptor se encontra em um ambiente interno é muito difícil decodificar os sinais GPS uma vez que eles são atenuados pelos edifícios e paredes. Isto gera perda no nível de potência dos sinais e conseqüentemente erros na localização do receptor (OZSOY, BOZKURT e AL).

Devido ao fato do sinal GPS não ser eficiente em lugares fechados (*indoor*) como casas e prédios por exemplo, os Sistemas de Localização *Indoor* (IPS – *Indoor Positioning System*) tem sido objeto de pesquisa e desenvolvimento nos últimos anos. Para aplicações *indoor*, não existe ainda um padrão a ser seguido. Embora já existam diversas abordagens com diferentes soluções, a atual premissa na área de localização *indoor* é buscar um sistema com uma proposta mais generalizada, fugindo dos sistemas atuais que são direcionados somente à uma determinada aplicação (DAHLGREN e MAHMOOD, 2014). Tais sistemas apresentam uma nova proposta no que se refere a localização de objetos e pessoas. Não somente útil na navegação *indoor* em aeroportos, museus e hospitais os IPS são muito importantes também na área industrial, onde muitas vezes informações baseadas em localização são muito importantes. Com um *smartphone*, tais informações podem ser rapidamente trocadas e analisadas. Muitas vezes, essas informações estão espalhadas em diversos sistemas pela fábrica e a busca pelos dados desejados demanda um determinado tempo. Este tempo pode ser reduzido utilizando-se um IPS (SOMMER, 2015).

A fase inicial deste trabalho apresenta a análise dos fatores relevantes na composição de um sistema de localização *indoor*. Atualmente diversos dispositivos podem integrar um IPS. Eles devem ser capazes de transmitir e receber os sinais dos dispositivos receptores para que posteriormente estes dados possam ser tratados de modo a se obter as devidas coordenadas de localização. Tais sinais consistem em pacotes de identificação de curta duração que são interpretados por dispositivos móveis como *smartphones* ou *tablets*, através de um aplicativo. A distância entre o dispositivo e o *smartphone* é calculado através do Indicador da Intensidade do Sinal Recebido (RSSI - *Received Signal Strength Indicator*). É importante ressaltar a possível imprecisão nos valores RSSI adquiridos devido a influência que o ambiente ao redor gera no sistema. Objetos de variados materiais, paredes, armários, colunas, prateleiras e diversos outros fatores presentes em um ambiente interno como uma fábrica, por exemplo, diminuem a qualidade do sinal RSSI. A análise da infraestrutura é um fator indispensável para se obter maior precisão no sistema (VERSAMOU e ANTONAKOPOULOS, 2014).

Este trabalho apresenta a análise e a implementação de um sistema de localização *indoor*. O objetivo é determinar a maneira mais eficiente para o reconhecimento da localização de um *smartphone* em uma zona interna. Para tanto serão analisados alguns métodos de reconhecimento de posição. Sendo essa a premissa de um IPS, este trabalho pode servir como base nas diversas aplicações voltadas para ambientes internos, pois sabendo as coordenadas de um *smartphone* é preciso somente avaliar e tratar estes dados para então desenvolver as ações finais da aplicação em questão. Todas as tecnologias que envolvem esse sistema serão devidamente explicadas e detalhadas.

1.1 Justificativa do Trabalho

A geolocalização interior é um tema muito discutido atualmente por sua importância para fins comerciais, segurança pública e aplicações militares (PAHLAVAN, LI e MÄKELÄ, 2002). O rastreamento de objetos, veículos ou pessoas em um edifício ou qualquer ambiente fechado proporciona vantagens nas diversas aplicações. Um exemplo é na área comercial, onde uma loja que dispõe do IPS pode

reconhecer a localização exata do cliente e com isso saber em qual setor (roupas, calçados, casacos, etc) o mesmo se encontra (BOTTONI e NISHIDA). A partir desse momento ações podem ser tomadas exclusivamente a aquele cliente e um aplicativo irá mostrar na tela do seu *smartphone* promoções, descontos, propagandas, sugestões ou qualquer outra informação pré-definida no sistema.

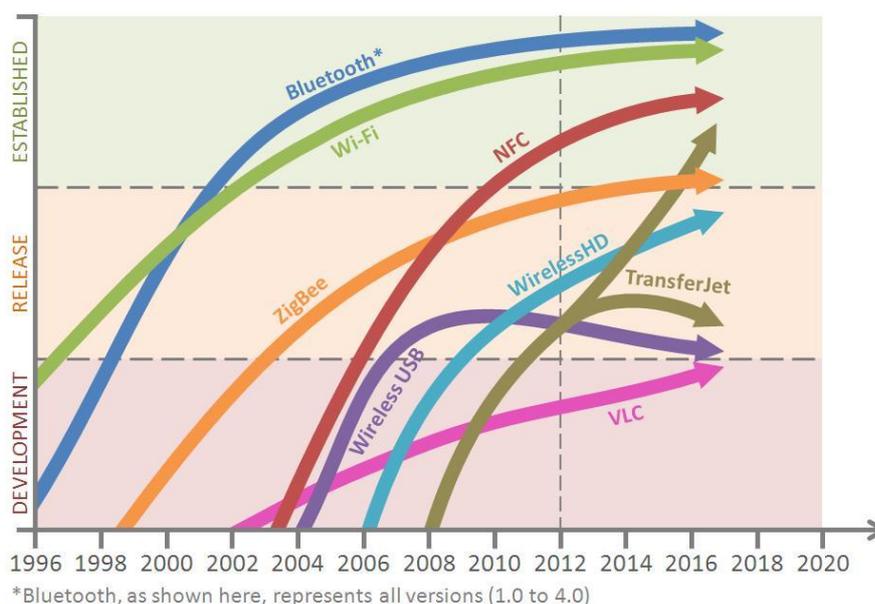
Na área da medicina, hospitais podem ser equipados com IPS (ROZENSKY, SMITH e ENDEE, 2013) (Applications in Health Care) para determinar a localização de médicos, enfermeiros, pacientes e familiares. Esta informação pode ser utilizada por sistemas que estreitem as relações entre os mesmos e melhorem os diversos procedimentos pelos quais eles passam. Quando um paciente específico entrar no hospital por exemplo, a equipe determinada para atendê-lo pode ser avisada automaticamente. Médicos podem prescrever receitas e enviá-las rapidamente por meio do aplicativo, equipes médicas podem saber a localização de seus integrantes a qualquer momento, em uma emergência o médico mais próximo pode ser acionado. Guiar as pessoas até lugares específicos (*indoor navigation* – navegação em lugares fechados) como restaurante, sala de espera, pronto socorro também é um diferencial dos IPS em hospitais.

Na área industrial, a localização *indoor* também encontra suas aplicações. Rastrear equipamentos e ferramentas importantes do chão de fábrica é um exemplo (SCHNEIDER). Atualmente, percebe-se uma crescente automatização nos diversos processos produtivos de uma indústria. Muitas tarefas que antes eram executadas por humanos, hoje são desempenhadas por máquinas ou robôs. Neste caso, é possível implementar um sistema de aquisição de dados que posteriormente serão analisados, com a finalidade de avaliar o desempenho daquela determinada máquina ou robô. Uma vez feita esta avaliação, providências serão tomadas para aumentar a produtividade e conseqüentemente a eficiência da máquina. Já para os processos que necessitam ser desempenhados por humanos este controle é mais difícil. É por esta razão que se estuda a implementação de sistemas de localização *indoor*. Muitas vezes é importante saber a localização de uma pessoa em uma fábrica ou sua movimentação diária para posteriormente fazer uma análise e traçar melhorias.

Existem muitas aplicações que necessitam reconhecer a posição exata de um dispositivo móvel em um ambiente interno. As tecnologias que podem ser empregadas em tais aplicações também são diversas, mas muito vem se destacando a utilização do Bluetooth 4.0 (Bluetooth de Baixa Energia). Seu baixo consumo de energia, o aumento expressivo de aparelhos compatíveis e o baixo custo de implementação são algumas de suas vantagens em relação as demais tecnologias.

A Figura 1 apresenta um gráfico com o crescimento das tecnologias sem fio durante os últimos 20 anos. As três áreas na horizontal representam (de baixo para cima): desenvolvimento, lançamento e estabilização. A linha azul caracteriza a tecnologia Bluetooth e representa todas suas 4 versões (1.0, 2.0, 3.0 e 4.0). Nota-se um crescimento enorme desta tecnologia nas últimas duas décadas.

Figura 1: Tecnologias sem fio de transferência de dados.



Fonte: Telematics News (2012).

Atrelando a necessidade atual de localização em ambientes internos, a tecnologia emergente Bluetooth 4.0 e o crescimento exponencial de dispositivos móveis compatíveis com tal tecnologia, as aplicações de localização *indoor* se tornam viáveis, mas ainda desafiadoras. Desta maneira, este trabalho consiste no estudo dos denominados Beacons, que são dispositivos que possuem a tecnologia *Bluetooth Low Energy* (Bluetooth de Baixa Energia) e podem ser utilizados para localização,

principalmente em ambientes fechados. Estudar sobre as tecnologias envolvidas com o Bluetooth 4.0 e os dispositivos Beacons, comparar com tecnologias concorrentes e implementar um sistema de localização *indoor* fazem parte do desenvolvimento proposto neste trabalho.

1.2 Objetivos

Esta seção descreve o objetivo geral e os objetivos específicos para o desenvolvimento do presente trabalho.

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é analisar e implementar um sistema para reconhecer a localização estimada de um *smartphone* (ou *tablet*) em um ambiente interno.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Fazer um estudo sobre o estado da arte das tecnologias envolvidas (*Bluetooth Low Energy* e Beacons);
- Analisar as demais tecnologias compatíveis/concorrentes aos Beacons;
- Determinar a melhor técnica de aquisição da localização atual de um *smartphone* (distância do *smartphone* até os Beacons);
- Analisar viabilidade da implementação;
- Definir parâmetros da implementação do sistema.
- Comparar a técnica de localização escolhida com demais técnicas existentes.
- Avaliar e comparar os resultados obtidos com outros trabalhos relacionados.
- Obter uma precisão de 4 metros (de raio).
- Apresentar melhorias que podem enriquecer futuras pesquisas e implementações deste trabalho.

1.3 Escopo e Restrições

Foi aplicada uma restrição no desenvolvimento deste trabalho a fim de atingir os objetivos propostos:

- a) O trabalho se detém tanto à parte teórica do sistema quanto à parte prática. Variados testes com os dispositivos Beacons foram feitos e estão devidamente apresentados ao longo do trabalho.
- b) A implementação e validação do sistema de localização indoor será feita em uma sala de 89,4 m², localizada na Universidade de Caxias do Sul.

2 SISTEMAS DE POSICIONAMENTO *INDOOR*

Um sistema capaz de verificar a posição espacial de um objeto em relação a um sistema de coordenadas é denominado sistema de posicionamento. Sua função é determinar a localização de um objeto de análise, como um *smartphone* por exemplo, automaticamente. (LIU, DARABI, *et al.*, 2007).

Este capítulo trata da caracterização dos sistemas de posicionamento. Na Seção 2.1, os sistemas de posicionamento são categorizados. Na Seção 2.2, técnicas de detecção de posição de um objeto são apresentadas. Na Seção 2.3, são descritas algumas das tecnologias utilizadas para localização. Por fim, na Seção 2.4 é feito um comparativo entre estas tecnologias.

2.1 Categorias de Sistemas de Posicionamento

Os sistemas de posicionamento podem ser divididos em quatro categorias com base no tipo de sensor utilizado: GPS, infravermelho, rádio frequência e ultrassom. Para localização em ambientes externos, o GPS tornou-se padrão por ser um dos sistemas mais bem-sucedidos (LIU, DARABI, *et al.*, 2007). Infelizmente, o GPS não funciona de maneira eficiente em canais urbanos, dentro de casas, em ambientes subterrâneos, perto de árvore e paredes, fazendo com que este sistema seja ineficaz para sistemas de localização *indoor* (FARID, NORDIN e ISMAIL, 2013).

Muito comum em aplicações de sistemas de localização, a tecnologia da radiação infravermelha é utilizada em várias formas para detecção de objetos estáticos ou móveis. Além disso, está disponível em vários dispositivos com e sem fio, como celulares, televisores e PDAs (*Personal Digital Assistants* - Assistente Digital Pessoal). Dispositivos que utilizam radiação infravermelha são pequenos, leves e fáceis de transportar, e, além disso, determinam a posição de um objeto em um ambiente *indoor* de maneira precisa (FARID, NORDIN e ISMAIL, 2013). Suas desvantagens estão em questões como: segurança, privacidade e limitações na determinação da localização de um objeto, pois os sinais IR (infravermelhos) sofrem interferência da fluorescência da luz assim como da luz solar. Hardware caro e alto custo de manutenção também são outros pontos negativos deste sistema.

Os sistemas de localização baseados em ultrassom são difíceis de implementar devido ao fato de que as ondas de som são geralmente refletidas por objetos no ambiente, comprometendo o reconhecimento da posição. A velocidade de propagação das ondas de ultrassom no ar, por exemplo, é muito lenta se comparada a de Rádio Frequência (RF). Enquanto a atenuação do sinal do som no ar varia vários metros, em sistemas baseados em RF a posição do objeto de estudo pode ser detectada com poucos centímetros de variação da sua real posição (HALDER, PARK e KIM, 2011).

Na análise dos sistemas de posicionamento, um fator importante para avaliar a sua aplicabilidade é a média de erro esperada. A média de erro significa a distância que o ponto estimado está da sua real localização (HALDER, PARK e KIM, 2011). A Tabela 1 apresenta a comparação entre esse fator para os quatro sistemas de localização apresentados nesta Seção. Nota-se que, com uma média de erro de 1 a 3 metros, o sistema de posicionamento baseado em radiofrequência é o mais preciso entre os quatro apresentados. GPS e ultrassom apresentam uma média de erro de aproximadamente 10 metros enquanto o infravermelho apresenta um erro em torno de 5 metros. A aplicabilidade em ambientes internos também é apresentada nesta tabela.

Tabela 1: Comparativo entre sistemas de posicionamento

	GPS	Infravermelho	Ultrassom	RSSI
Aplicável em ambientes internos	Não recomendável	Sim	Sim	Sim
Média de erro esperada	± 10 metros	± 5 metros	± 10 metros	De 1 a 3 metros

Fonte: adaptado de (HALDER, PARK e KIM, 2011)

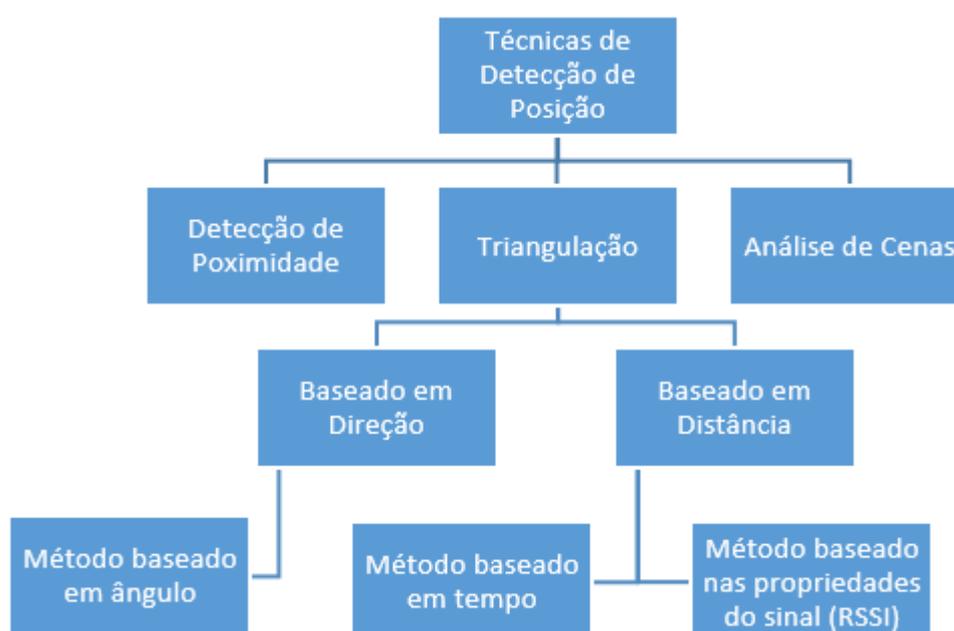
Devido a todos os fatores apresentados, este trabalho irá utilizar sistemas de localização baseados em RF. Normalmente utilizados em sistemas de localização essa técnica apresenta várias vantagens. A capacidade de penetração das ondas de rádio em obstáculos como paredes e corpos humanos, sua maior área de cobertura e melhor precisão em comparação aos outros sistemas apresentados são alguns de seus pontos diferenciais.

Uma vez escolhida a base de um sistema de localização *indoor*, é necessário determinar uma técnica eficiente para detectar a posição de um objeto de análise.

2.2 Técnicas de Detecção de Posição

Existem diferentes técnicas capazes de detectar a posição de um ponto de observação. Elas são divididas em três categorias de acordo com suas particularidades, ilustradas na Figura 2: triangulação, análise de cena (*Fingerprinting*) e proximidade (FARID, NORDIN e ISMAIL, 2013). Enquanto as duas primeiras podem fornecer posições absolutas e relativas, a técnica de proximidade retorna uma informação de posição de proximidade, ou seja, um valor aproximado da distância real. Na implementação de um IPS, é possível empregar não somente uma técnica separadamente, mas sim diferentes técnicas em conjunto de modo a compensar as limitações de cada técnica particular. Com isso, aumenta-se a escalabilidade e a disponibilidade dos serviços de estimação de localização e conseqüentemente os resultados obtidos são melhores (GU, LO e NIEMEGEERS, 2009).

Figura 2: Técnicas de detecção de posição



Fonte: Adaptado de (FARID, NORDIN e ISMAIL, 2013)

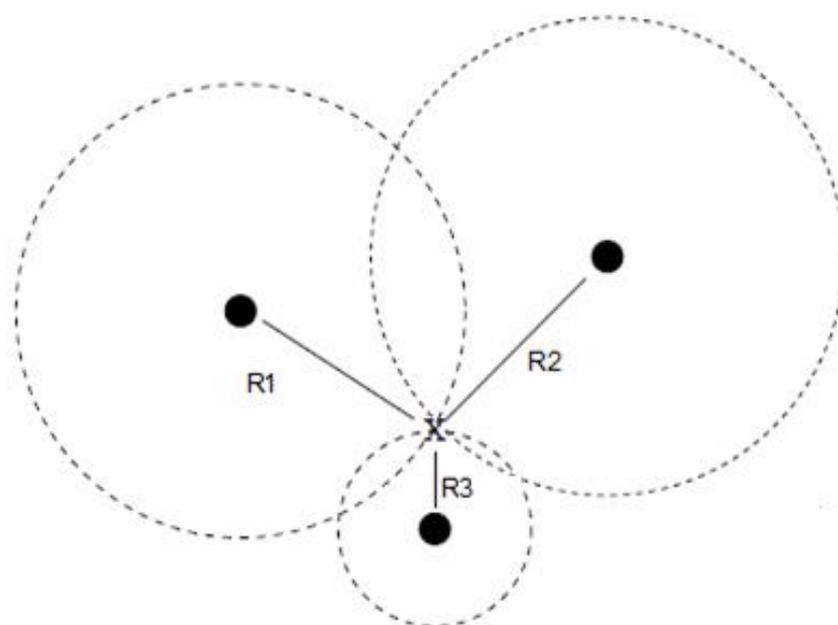
2.2.1 Triangulação

A técnica de triangulação utiliza as propriedades geométricas de triângulos para calcular a posição do objeto. Ela é dividida em duas subcategorias: Latência, que utiliza medidas de distância e Angulação, que como implícito no nome utiliza os ângulos. Em outras palavras, define-se Latência o termo que determina um ponto a partir de medições de distância. Já o termo Angulação define este ponto a partir de medições de ângulos.

2.2.1.1 Latência

A latência calcula a posição de um ponto a partir da distância entre o mesmo e alguns pontos de referência. Em um espaço bidimensional, o cálculo da posição de um ponto necessita pelo menos três pontos de referência, como ilustrado na Figura 3. A posição **X** pode ser determinada uma vez que se conhecem a distâncias R1, R2 e R3. Nota-se que estas três distâncias são os raios que formam três círculos, onde a intersecção entre eles irá determinar a localização do ponto.

Figura 3: Técnica de Triangulação (Latência).



Fonte: (HIGHTOWER e BORRIELLO, 2001)

Para a medição das distâncias, existem as seguintes abordagens:

- **Medição Direta:** a medição de distância é feita a partir do movimento físico do objeto de análise. Para tanto, pode-se utilizar um robô que mede as distâncias entre este ponto (objeto) e as referências. Apesar de ter um conceito simples esta técnica é muito difícil de se implementar devido as complexidades envolvidas na coordenação autônoma dos movimentos físicos (HIGHTOWER e BORRIELLO, 2001).

- **Tempo de Chegada (*Time of Flight – ToF / Time of Arrival – ToA*):** esta técnica mede o tempo necessário que um sinal necessita para ir do ponto de referência até o objeto. A velocidade do sinal deve ser conhecida, assim como a velocidade do objeto (caso o mesmo esteja se movendo) (HIGHTOWER e BORRIELLO, 2001). Como exemplo considera-se um sinal com velocidade igual a 300 m/s (metros por segundo). Após ser emitido pelo transmissor, o sinal retorna após 50 ms (milissegundos). Facilmente é possível concluir que o objeto está à 15 metros de distância da referência (transmissor).

As medidas feitas utilizando a técnica ToF devem levar em consideração a velocidade do sinal emitido pelos aparelhos transmissores em questão (DARDARI, CLOSAS e DJURIC, 2015). Dependendo do dispositivo escolhido, pode-se obter valores pequenos de tempo (na ordem de microssegundos). Os marcadores de tempo devem ter uma resolução elevada para que as distâncias calculadas sejam mais precisas. É possível também que vários transmissores enviem um sinal à um único receptor, que por sua vez calcula o tempo de chegada de todos eles e faz a comparação dos tempos. Portanto, os relógios dos dispositivos devem estar em perfeita sincronia para evitar erros nos tempos calculados e conseqüentemente nas distâncias estimadas. Alguns sinais podem ser perdidos devido aos múltiplos sinais recebidos ao mesmo tempo (ABREU, 2014).

- **Diferença entre os tempos de chegada (TDoA – *Time Difference of Arrival*):** também baseada no tempo de transmissão, esta técnica é uma versão adaptada do ToA/ToF. Um dispositivo qual procura-se localizar recebe

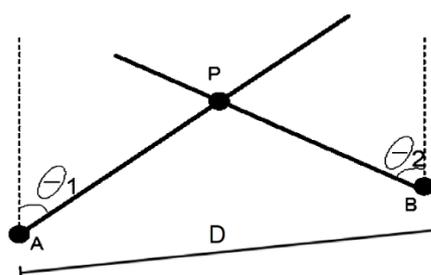
sinais de três ou mais sensores. Para evitar erros nos cálculos estes sensores devem estar perfeitamente sincronizados entre si. As diferenças nos tempos de chegada destes sinais são calculadas e com isso é possível determinar a localização do dispositivo de análise a partir do Tempo de Chegada (ToF/ToA) (FARID, NORDIN e ISMAIL, 2013).

- **Atenuação:** A medida que a distância entre a fonte e o receptor aumenta, a intensidade do sinal diminui (atenuação). Uma vez que se conhece a intensidade do sinal na fonte é possível correlacionar atenuação e distância para uma determinada emissão (onda de rádio frequência por exemplo) e assim obtém-se a distância entre um determinado ponto e a fonte (LIU, DARABI, *et al.*, 2007). Ao chegar neste ponto a intensidade do sinal terá um determinado valor, que significa a força do sinal quando atinge o ponto. Em ambientes internos, esta técnica é menos precisa do que a ToF devido a problemas com a propagação do sinal, como reflexão, refração e outros fatores e objetos que atenuam o sinal (por exemplo armários, portas, paredes, entre outros). Estes fatores geram valores de intensidade errôneos e conseqüentemente distâncias imprecisas.

2.2.1.2 Angulação

A técnica de Angulação é muito semelhante a Latência. A diferença está no uso de ângulos para determinar posição de um ponto ou objeto. No espaço bidimensional, apesar da necessidade de medida de dois ângulos, é preciso medir um comprimento, equivalente a distância entre dois pontos de referência, como pode ser visto na Figura 4 (HIGHTOWER e BORRIELLO, 2001).

Figura 4: Técnica de Angulação



Fonte: adaptado de (HIGHTOWER e BORRIELLO, 2001)

Esta técnica mede o ângulo de chegada (AoA – *Angle of Arrival*) com que o sinal chega aos pontos de referência, neste exemplo os pontos A e B. Uma vez que a distância entre estes pontos de referência é conhecida precisa-se medir os dois ângulos θ_1 e θ_2 (Figura 4). Além deste baixo número de medições necessárias (espaço bidimensional), outra vantagem desta técnica é em relação as unidades de medição, que não necessitam nenhuma sincronização de tempo entre elas (LIU, DARABI, *et al.*, 2007). Entre as desvantagens estão a exigência de hardwares complexos assim como a degradação do sinal a medida que a unidade móvel, como um celular por exemplo, se distancia das unidades de medição.

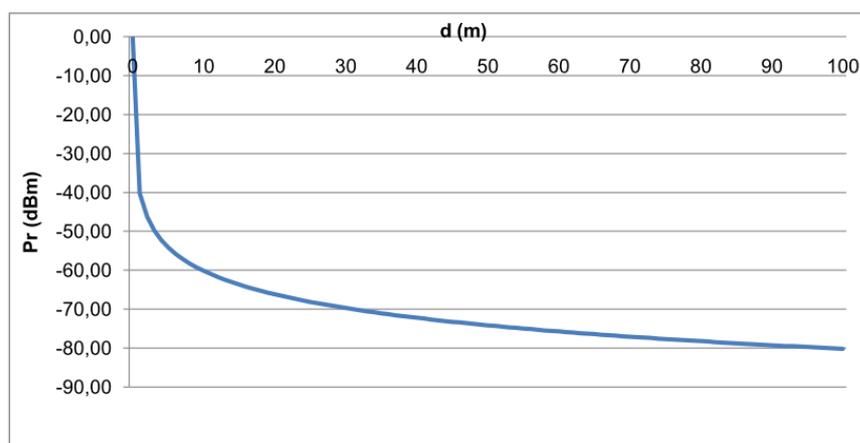
2.2.2 Análise de Cenas - *Fingerprinting*

Análise de Cenas (Em Inglês, *Fingerprinting*) é uma técnica de localização baseada na intensidade do sinal recebido (RSSI). O RSSI é o nível do sinal recebido por um aparelho receptor como um *smartphone*, por exemplo. Este nível significa a potência com que o sinal chega no receptor. O sinal é transmitido com uma determinada potência e vai atenuando com o quadrado da distância. Ao chegar no receptor, a potência do sinal, agora reduzida, pode ser medida. Esta medição geralmente é feita em dBm (Decibel referenciado 1mW). Uma comparação entre a potência do sinal recebido com a potência do sinal enviado é feita e com ela pode-se calcular a distância entre o emissor e o receptor. A equação da potência do sinal recebido em dBm é

$$RSSI = -(10n \log(d) + A)$$

onde n é a constante de propagação do sinal (expoente de propagação), d é a distância em metros entre transmissor e receptor e A é o valor do sinal recebido a um metro de distância. A Figura 5 representa o gráfico RSSI x Distância para um ambiente externo com uma constante de propagação do sinal igual a 2 e um valor do sinal recebido a um metro de distância igual a 40dBm ($n=2$ e $A=40$). A curva na Figura 5 se comporta da mesma forma para ambientes internos, ou seja, a medida que a distância aumenta, o nível do sinal recebido diminui. A diferença está somente nos valores medidos.

Figura 5: RSSI x Distância



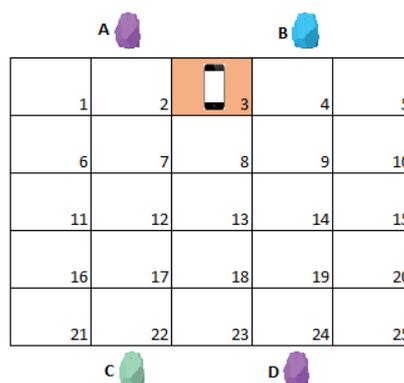
Fonte: adaptado de (RODRIGUES COUTO, 2013)

Uma desvantagem do RSSI é que ele é afetado por multipercurso (sinal chega na referência por mais de um caminho), ruídos e interferências, gerando imprecisão nos cálculos obtidos (ZHANG, LI, *et al.*, 2014). Outros fatores que afetam o sinal RSSI são: o tipo de edifício e material, distância do transmissor, variabilidade nos níveis de potência do transmissor e do receptor, reflexão e multiplicação do sinal, entre outros.

A técnica de Análise de Cenas consiste em duas fases: *off-line* e *online* (MOGHTADAAIEE e DEMPSTER, 2014). A fase *off-line*, também denominada fase de treinamento, consiste na coleta de sinais RSSI em diversos pontos do ambiente. Nela é feito um levantamento do local e a área total a ser mapeada é dividida em subáreas. Os dados das coordenadas (x,y) e da intensidade do sinal recebido pelas estações de referência (emissores) são medidos para cada subárea. Isto resulta em um mapa de *fingerprints*, ou seja, um conjunto de amostras do sinal RSSI feitas em diversos pontos do ambiente. Uma área de 100m², escolhida para ilustrar esta fase, pode ser vista na Figura 6. Nela, a área total foi dividida em subáreas com dimensões de 2m x 2m (largura e comprimento), e cada uma destas subáreas contém um número de 1 a 25. Todo o ambiente possui quatro estações de referência (transmissores) identificadas pelas letras A, B, C e D. Cada subárea terá portanto quatro valores de RSSI por medição. O número de medições feitas para cada subárea depende da complexidade da área (da aplicação) em questão e dos fatores que interferem na transmissão do sinal. Quanto maior o número de medições maior a tendência de se chegar a um valor médio, pois os erros e discrepâncias nos valores medidos tendem

a diminuir cada vez mais, fator positivo para o sistema. Todas as medições feitas são colocadas em uma base de dados formando uma tabela.

Figura 6: Técnica de *Fingerprinting*. A intensidade do sinal recebido dos emissores A, B, C, e D são medidos a fim de caracterizar os sinais em cada subárea.

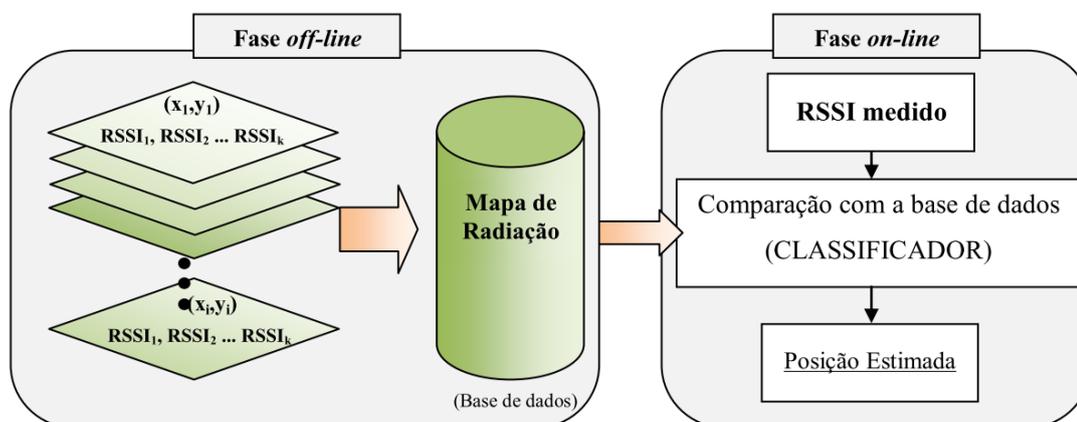


Fonte: O Autor

Imagina-se um *smartphone* situado na subárea 3. O algoritmo de localização deverá comparar os valores atuais de RSSI obtidos pelo *smartphone* com todas as amostras coletadas na fase *off-line* e determinar algumas amostras mais próximas. O modo como isto é feito está explicado mais detalhadamente no Capítulo 4.

Na fase *online* a atual intensidade do sinal recebido por um dispositivo (*smartphone*) é comparada com as informações do banco de dados. Após aplicar técnicas determinísticas e de probabilidade obtém-se uma localização aproximada do dispositivo (LIU, DARABI, *et al.*, 2007). Uma representação da técnica *fingerprinting* na fase *online* pode ser vista na Figura 6. Nela, pode-se assumir que um *smartphone* esteja situado na subárea destacada em laranja, correspondente ao número três. O dispositivo receptor fica recebendo valores RSSI dos quatro emissores a todo instante. Estes valores são comparados com toda a base de dados feita na fase *off-line*. Com isso calcula-se qual a subárea cujos valores estão mais próximos dos valores medidos pelo dispositivo e então sua subárea atual pode ser determinada. As fases da técnica de localização por *fingerprinting* podem ser vistas na Figura 7. Na fase *off-line* é feita uma base de dados com as amostras dos sinais RSSI proveniente dos transmissores. Na fase *online*, os sinais RSSI atuais são comparados com o banco de dados e um algoritmo de localização irá estimar a posição final do *smartphone*.

Figura 7: Fases da técnica de localização por *fingerprinting*



Fonte: Adaptado de (JUNIOR, ANDREÃO e NUNES, 2011)

Para relacionar as duas fases (*off-line* e *online*) da maneira correta, é possível seguir uma abordagem determinística ou uma abordagem probabilística (ROOS, MZLLZMÄKI, *et al.*, 2002). A abordagem determinística caracteriza cada coordenada do mapa, ou seja, cada subárea pelo indicador de força do sinal, valor médio e desvio padrão de todas as medições feitas na fase *off-line* (treinamento). O número de coordenadas de cada subárea é diretamente proporcional ao número de referências e ao número de medições realizadas. A abordagem probabilística utiliza um algoritmo probabilístico para determinar a localização. Alguns dos algoritmos mais utilizados são: teorema de *Bayes*, *k-Nearest Neighbor* e redes neurais artificiais (LIN e LIN, 2005) (JUNIOR, ANDREÃO e NUNES, 2011). Eles utilizam os valores no domínio dos sinais, obtidos na fase *online*, para obter o melhor valor no domínio espacial.

Um dos desafios para essa técnica é que o RSSI pode ser afetado por alguns fatores como difração, reflexão e dispersão, como visto anteriormente. Como não necessita nenhum hardware ou infraestrutura adicional, *fingerprinting* torna-se uma técnica econômica se comparada as outras. Outras vantagens são que ela é independente do tempo e não necessita um processador central remoto, uma vez que todas as tarefas e considerações podem ser feitas pelo dispositivo do usuário (MOGHTADAAIEE e DEMPSTER, 2014). É evidente que a criação do banco de dados é um trabalho extenso e sua complexidade depende da área a ser mapeada, o que pode ser caracterizado como uma desvantagem.

2.2.2.1 K-Vizinhos Mais Próximos (KNN - *K-Nearest Neighbor*)

Muitos algoritmos utilizados para localização *indoor* seguem o princípio do *k-Nearest Neighbor* (LIN e LIN, 2005). *k-Nearest Neighbor* é uma regra de classificação muito popular devido à sua simples especificação. O procedimento de classificação de uma medição a para um conjunto de classes C é feito da seguinte forma (WEBB e COPSEY, 2011):

- Determinar os K vetores de treinamento mais próximos da medição a , usando um método de cálculo de distância adequado (distância Euclidiana, distância de Manhattan, entre outros);
- Atribuir a para a classe com o maior número de representantes dentro do conjunto de K vetores mais próximos.

Outra possível forma ao analisar os K pontos mais próximos é escolher a subárea com o maior número de representantes dentro deste conjunto de K pontos mais próximos. A posição atual do objeto alvo, representada pelas coordenadas (\hat{x}, \hat{y}) , pode então ser determinada pelos pontos representativos k_r desta subárea, que fazem parte do conjunto K , sendo $k_r \leq K$, dado pelas equações

$$\hat{x} = \frac{1}{k_r} \sum_{i=1}^{k_r} x_i \quad (1)$$

$$\hat{y} = \frac{1}{k_r} \sum_{i=1}^{k_r} y_i \quad (2)$$

onde (x_i, y_i) são as coordenadas das i amostras coletadas na fase *off-line*. Suponha que para uma situação onde $K = 5$, a subárea 1 tem 3 representantes ($k_r=3$), a subárea 2 e a subárea 3 tem 1 representante cada ($k_r=1$). Como a subárea 1 tem o maior número de representantes, ela será a escolhida e seus 3 representantes (amostras) irão determinar a posição atual do objeto alvo. Isto pode ser feito pelo centroide (centro de massa de um corpo, ou seja, o centro geométrico) destes 3 pontos. Quando o número K escolhido é igual a um, significa que o ponto mais próximo determinará a coordenada final do objeto alvo. Este é o caso do algoritmo NN (*Nearest Neighbor* – Vizinho Mais Próximo), onde o primeiro vizinho mais próximo é o único que será levado em consideração na determinação da localização final do objeto alvo.

Uma modificação do algoritmo KNN que tem apresentado resultados positivos é a chamada K-Vizinhos Mais Próximos Ponderado (wkNN - *Weighted k-Nearest Neighbour*) (SHIN, LEE, *et al.*, 2012). O algoritmo wkNN consiste em determinar pesos para as p posições de modo a aproximar o centroide das posições mais similares. Este peso é proporcional ao valor da distância calculada ($d_{\text{Manhattan}_i}$ ou $d_{\text{Euclidiana}_i}$). Assim, as Equações (1) e (2) para estimar a localização podem ser reescritas como

$$\hat{x} = \frac{\sum_{i=1}^K \left(\frac{x_i}{d_i} \right)}{\sum_{i=1}^K \left(\frac{1}{d_i} \right)}$$

$$\hat{y} = \frac{\sum_{i=1}^K \left(\frac{y_i}{d_i} \right)}{\sum_{i=1}^K \left(\frac{1}{d_i} \right)}$$

onde d_i é a distância calculada entre o ponto e o centroide. Com isso a localização estimada se aproxima da localização real do objeto alvo.

Para que o KNN possa ser utilizado, é necessário especificar o número de vizinhos K , a distância calculada e o conjunto de dados de treinamento (conjunto de amostras da fase *off-line*). O valor de K é atribuído pelo projetista e seu valor geralmente utilizado é 4 ou 5 para aplicações de IPS (SHIN, LEE, *et al.*, 2012).

Para medir a distância entre dois pontos no KNN normalmente utilizam-se as distâncias Euclidiana e a de Manhattan. Apesar de muito semelhantes, cada uma delas assume sua particularidade. Suponha que N emissores são colocados em pontos específicos do ambiente e são representados por $r = 1, 2, \dots, N$. O ambiente é dividido em M regiões, definidas por $i = 1, 2, \dots, M$. Para calcular a distância segundo o princípio de Manhattan, $d_{\text{Manhattan}_i}$, do ponto de recepção com base nos valores RSSI, utiliza-se

$$d_{\text{Manhattan}} = |\tilde{I}_1 - I_{11}| + |\tilde{I}_2 - I_{12}| + \dots + |\tilde{I}_3 - I_{13}| = \sum_{r=1}^N |\tilde{I}_r - I_{ir}|$$

onde I_{ir} representa o valor RSSI correspondente a região i em relação ao emissor r e \tilde{I}_r é o valor lido na fase *online* correspondente ao emissor r .

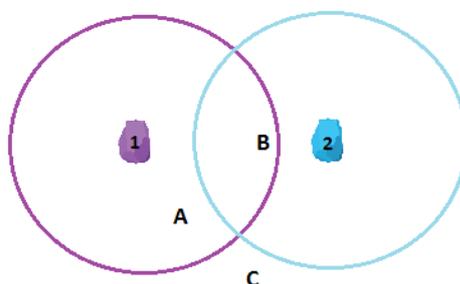
O cálculo da distância Euclidiana, semelhante ao cálculo da distância de Manhattan, é feito a partir da equação

$$d_{\text{Euclidiana}} = \sqrt{(\tilde{I}_1 - I_{11})^2 + (\tilde{I}_2 - I_{12})^2 + \dots + (\tilde{I}_3 - I_{13})^2} = \sqrt{\sum_{r=1}^N (\tilde{I}_r - I_{ir})^2}.$$

2.2.3 Proximidade

A técnica de proximidade determina a localização de um objeto móvel em relação a uma posição fixa já conhecida. Em outras palavras, ela consiste na descoberta de um dispositivo transmissor conhecido por um dispositivo móvel. A distância entre eles não pode ser medida, ou seja, as posições absolutas e relativas dos aparelhos móveis não são estimadas. O que se obtém é se o dispositivo móvel está ou não no campo de atuação do dispositivo transmissor (GU, LO e NIEMEGEERS, 2009). Quando o sinal é recebido por apenas uma estação fixa, o dispositivo móvel é considerado estar na posição desta determinada estação. Já quando várias estações reconhecem a unidade móvel, a que tiver o sinal mais forte determina a posição do mesmo (LIU, DARABI, *et al.*, 2007). Um exemplo desta técnica, visto na Figura 8, ilustra dois dispositivos transmissores (emissores 1 e 2) e três pontos (A, B e C) que representam localidades distintas. Os círculos determinam o alcance máximo de cada um dos emissores, ou seja, o campo de atuação dos mesmos. Nota-se que o ponto A está dentro do alcance do Emissor 1, portanto sua localização é referente a este dispositivo. Já o ponto B está dentro do alcance de ambos dispositivos transmissores. Uma vez que isso acontece, a potência do sinal é um fator indispensável. O ponto em questão irá pertencer somente a área de cobertura do transmissor cuja potência do sinal seja maior. Pela Figura 8 nota-se que este ponto está mais próximo do Emissor 2, o que significa que a intensidade do sinal recebido é maior para este dispositivo do que para o Emissor 1. A região do Emissor 1 é então desconsiderada e conclui-se que um dispositivo móvel situado no ponto B pertence a região do Emissor 2. Já para qualquer ponto fora do alcance dos emissores não é possível obter alguma informação de localização, como é o caso do ponto C.

Figura 8: Exemplo para Técnica de proximidade



Fonte: O Autor

Esta técnica é apropriada para serviços e aplicações que não necessitam das coordenadas de localização exatas de um dispositivo móvel, mas apenas sua localização em relação a uma referência. Um exemplo usual são lojas que visam utilizar esta técnica para reconhecer a localização dos clientes (dispositivo móvel) dentro de suas dependências. A localização do emissor mais próximo do usuário pode ser facilmente obtida e é possível saber então o setor da loja em que o mesmo se encontra. Sabendo em qual setor (vestuário, cama e banho, acessórios, entre outros) o usuário se encontra, ações como promoções, dicas e informações podem ser mostradas a ele através de um aplicativo.

2.2.4 Comparação das Técnicas de Detecção de Posição

As técnicas de medição por proximidade, direção (AoA), tempo (ToA, ToF, TDoF) e análise de cenas foram comparadas com base nos parâmetros: tipo de medição, precisão, cobertura, propagação multipercurso e custo, como mostra a Tabela 2. Tais parâmetros são indispensáveis na escolha da técnica mais apropriada para a aplicação em questão (FARID, NORDIN e ISMAIL, 2013). A técnica de *fingerprinting* se destaca por apresentar uma alta precisão e uma boa cobertura, assim como a técnica de medição por tempo, porém se torna mais vantajosa devido a seu custo reduzido e por não ser afetada por multipercurso. A técnica de proximidade é muito útil para aplicações que não demandam uma precisão muito grande, pois possuem uma boa cobertura e baixo custo. Porém, quando a aplicação demanda precisões altas, o custo desta técnica se torna elevado, fazendo com que a técnica de Análise de Cenas volte a ser a mais favorável.

Tabela 2: Comparação entre as técnicas de detecção de posição

Técnica de Medição	Tipo de Medição	Precisão <i>indoor</i>	Cobertura	Afetada por multipercurso	Custo	Notas
Proximidade	Sinal	Pequena à alta	Boa	Não	Pequeno	- Precisão depende do número de dispositivos transmissores - Quanto maior a precisão, maior o custo
Direção (AoA)	Ângulo de chegada	Média	Boa (problemas com multipercurso)	Sim	Alto	- Precisão depende da propriedade angular das antenas - Localização da antena precisa ser especificada
Tempo (ToA, ToF, TDoA)	Diferença entre tempos de chegada	Alta	Boa (problemas com multipercurso)	Sim	Alto	- Necessária sincronização de tempo - Localização da antena não é necessária
Análise de Cenas (<i>Fingerprinting</i>)	Intensidade do Sinal Recebido (RSSI)	Alta	Boa	Não	Médio	- Precisa de calibração intensa - Localização da antena não é necessária

Fonte: adaptado de (FARID, NORDIN e ISMAIL, 2013).

Assim, com base em todos os fatores apresentados, conclui-se que a técnica mais adequada para detecção da posição de um objeto é por *fingerprinting*. Embora muito trabalhosa em sua fase inicial (*off-line*) de treinamento, esta técnica apresenta vantagens sobre as demais com relação ao custo, cobertura e precisão *indoor*, e por esse motivo foi escolhida para o desenvolvimento deste trabalho.

2.3 Tecnologias para Localização

Os sistemas de posicionamento *indoor* utilizam principalmente três tecnologias: RFID (Identificação por Rádio Frequência – *Radio Frequency Identification*), Wi-Fi e *ZigBee*. Esta seção detalha os principais fatores e parâmetros para avaliação das três tecnologias em questão e fornece as informações básicas necessárias para diferenciar a escolha da tecnologia mais adequada à aplicação que se procura.

2.3.1 Avaliação de Tecnologias para Sistemas de Posicionamento

Em um mundo ideal, um sistema de localização em ambientes internos seria seguro, de baixo custo, altamente preciso, com amplo alcance, pouco complexo e universalmente acessível. No mundo real, isto é quase impossível de se obter. Os seguintes parâmetros são indispensáveis na análise de qualidade de um sistema de localização *indoor* (Lighthouse):

- A. **Segurança:** capacidade com que os dados sejam enviados e recebidos sem serem interrompidos ou acessados por dispositivos não autorizados.
- B. **Custo:** custo pode incluir diversos fatores, como tempo, dinheiro, espaço, peso e energia. No fator tempo entram custos com manutenção e instalação. Já o número de dispositivos necessários pode ser considerado um fator de custo de espaço, por exemplo (LIU, DARABI, *et al.*, 2007).
- C. **Precisão:** fator mais importante de um sistema de posicionamento, a precisão significa a capacidade de estimar um ponto o mais próximo possível de sua verdadeira localização. Em outras palavras, quanto menor a distância entre o ponto calculado e o ponto real, maior a precisão do sistema.
- D. **Alcance:** refere-se a distância que o sinal percorre. Seu valor vai depender dos diversos fatores que podem obstruir o sinal, como visto anteriormente.
- E. **Complexidade/Acessibilidade:** complexidade refere-se aos fatores de hardware, software e operação. No Capítulo 2, por exemplo, foi apresentada a complexidade do software, ou seja, a complexidade do algoritmo de posicionamento. Acessibilidade é uma vertente da complexidade e refere-se a infraestrutura (hardware) necessária para integrar um IPS (transmissor, receptor, serviço de dados, antenas, entre outros). Quanto menor o número de componentes mais acessível o sistema.

Agora é possível analisar as tecnologias que são capazes de integrar um sistema de localização *indoor* e avaliar suas respectivas vantagens e desvantagens uma em relação as outras. Desse modo pode-se escolher a tecnologia de localização mais favorável para a aplicação em questão.

2.3.2 Identificação por Rádio Frequência

A tecnologia RFID é uma forma de comunicação sem fio que utiliza as ondas de rádio para identificar ou rastrear objetos. Seu método consiste em armazenar e recuperar dados através da transmissão eletromagnética a um circuito integrado RF compatível (NI, LIU, *et al.*, 2004). A troca de dados ocorre entre os leitores RFID e as etiquetas RFID (também denominadas *tags* ou *transponders*). O leitor RFID é capaz de ler os dados emitidos pelas *tags*, pois ambos utilizam uma frequência de rádio definida e um protocolo determinado.

As *tags* podem ser categorizadas como ativas ou passivas. *Tags* passivas operam sem bateria interna e por essa razão dependem da energia fornecida pelos leitores para enviarem seus dados. Elas são principalmente utilizadas para substituir o código de barras tradicional. São menores, mais baratas e mais leves do que as *tags* ativas e seu tempo de vida operacional é praticamente ilimitado (NI, LIU, *et al.*, 2004). Quando o leitor emite um sinal de RF as *tags* passivas refletem este sinal e adicionam informações através da modulação do sinal refletido. Por não possuírem bateria interna, a distância de leitura é menor se comparada com as *tags* ativas. A Figura 9 ilustra alguns exemplos de *tags* passivas (B). *Tags* ativas possuem uma bateria interna, o que permite que elas sejam lidas a maiores distâncias do que as *tags* passivas. Elas emitem ativamente seu Identificador (ID) e são adequadas para identificação de produtos de alto valor. A Figura 9 ilustra alguns exemplos de *tags* ativas (A).

Figura 9: Tags (etiquetas) ativas e passivas



Fonte: (SILVA DA ROCHA)

O leitor RFID é o responsável pela comunicação com as *tags* através de uma antena. Sua função é retransmitir os dados recebidos das *tags* para um computador que por sua vez irá tratá-los e disponibilizá-los de acordo com a aplicação em questão.

Na área de localização *indoor*, um sistema frequentemente citado na literatura que utiliza RFID é o LANDMARC (NI, LIU, *et al.*, 2004). Este sistema utiliza alguns leitores RFID e um conjunto de *tags* de referência funcionando como uma técnica de *fingerprinting*. A área total é dividida em subáreas de um metro quadrado cada, sendo que cada uma destas subáreas contém uma *tag* utilizada como ponto de referência. O dispositivo móvel é utilizado como leitor. A partir do sinal RSSI enviado pelas *tags* e sabendo a localização exata de cada uma delas foi possível estimar a localização do dispositivo móvel. Após todas as considerações e estudos feitos conseguiu-se uma precisão com erro máximo de 2 metros.

Mesmo com os satisfatórios sistemas baseados em RFID para localização *indoor*, do ponto de vista de acessibilidade ele se torna uma solução difícil devido a fatores como hardware, software, *tags*, leitores e controle de leitores. Estes fatores também geram um custo mais elevado, uma vez que um único leitor pode custar até U\$1.500,00. Já no quesito precisão o RFID se destaca. Capaz de identificar até 1.000 *tags* por segundo, a precisão é bem alta se comparada com as demais tecnologias. A precisão é alterada devido à frequência (quanto maior a frequência mais sensível a interferências), ao leitor e às antenas das etiquetas e dos leitores (Lighthouse).

2.3.3 Wi-Fi

A Wi-Fi é uma tecnologia de comunicação sem fio que permite a transmissão de dados e informações entre diversos dispositivos. Em outras palavras a Wi-Fi é um conjunto de especificações para redes locais sem fio (WLAN – *Wireless Local Area Network*) que utiliza o padrão IEEE 802.11 (O'HARA e PETRICK, 2005). Com ela é possível criar redes que conectam os variados dispositivos compatíveis (computadores, *smartphones*, *tablets*, impressoras, câmeras, entre outros).

A transmissão de dados em uma rede Wi-Fi é feita por meio de radiofrequência. As ondas de rádio são transmitidas a partir de um roteador, aparelho responsável por

receber os sinais, decodificar e emitir a partir de uma antena. Uma vez que um dispositivo esteja dentro do raio de ação (*hotspot*) da rede em questão, ele está apto a receber os sinais enviados pelo roteador. Os roteadores são, portanto, dispositivos fixos que detectam e tratam os sinais enviados pelos dispositivos móveis. Sua área de cobertura depende das características do roteador e da antena.

A Wi-Fi é uma tecnologia dominante na literatura para localização *indoor* (LIU, 2014). Sua principal vantagem é a infraestrutura pré-existente (devido a sua grande adoção) nos variados ambientes internos, o que conseqüentemente reduz os custos. Também é possível estimar a posição de quase todos os dispositivos compatíveis com Wi-Fi sem necessidade de um software extra ou manipulação de hardware (FARID, NORDIN e ISMAIL, 2013). A precisão da localização é um fator crítico, pois ela é afetada por vários elementos em ambientes internos como movimento, orientação do corpo humano, paredes, portas, entre outros (GU, LO e NIEMEGERERS, 2009). Dependendo das características do ambiente interno, a precisão do sistema de localização pode não atender as necessidades da aplicação.

O RADAR (BAHL e PADMANABHAN, 2010) foi o primeiro sistema de localização *indoor* a utilizar o sinal sem fio. Seu objetivo é alcançar uma boa precisão em prédios. Este sistema utiliza o método de *fingerprinting* para estimar a localização de um objeto, conseguindo alcançar uma precisão de 2 a 3 metros. Uma abordagem baseada em modelos de propagação do sinal também é feita, mas segundo os autores, esta é menos exata do que quando utiliza-se o método de *fingerprinting*, pois ela alcança uma precisão de cerca de 4,3 metros. O sistema RADAR pode fornecer informações 2D de posição absoluta e, portanto, permitir aplicativos baseados em localização para usuários. As principais vantagens do sistema RADAR são que a infraestrutura WLAN interna existente é reutilizada e exige algumas estações de base para realizar a detecção de localização. Portanto o sistema RADAR torna-se fácil de ser configurado (GU, LO e NIEMEGERERS, 2009). No quesito segurança este sistema deixa a desejar, pois não existe qualquer consideração de privacidade, de forma que um dispositivo com interface WLAN pode ser rastreado, mesmo que seu proprietário não queira que ninguém saiba sua localização.

O sistema de localização *indoor* Ekahau (Ekahau), também baseado em *ethernet* sem fio (Wi-Fi), tem como objetivo monitorar continuamente a localização de pessoas e objetos. Os usuários têm que estar autorizados para poder receber as informações de localização por meio de Interfaces de Programação de Aplicativo (*Application Programming Interface – API*). Ekahau também utiliza o método de *fingerprinting* para reconhecer a posição do objeto alvo. A fase de calibração é muito minuciosa e deve ser executada com muito rigor para evitar erros futuros de localização. O objeto alvo recebe um *tag* que contém algumas informações como nome e ID. Algoritmos probabilísticos são usados para realizar sua localização. É importante ressaltar que a localização é processada em um dispositivo central, o que permite estimar a localização de dispositivos móveis com pouco poder computacional. Segundo os fabricantes, o sistema tem uma precisão que permite identificar em qual sala o objeto alvo está localizado. Ekahau já foi implementado em vários ambientes no mundo.

2.3.4 ZigBee

A tecnologia ZigBee é um conjunto de protocolos de comunicação sem fio entre dispositivos que tem como características a baixa taxa de transmissão de dados, baixa potência de operação e baixo consumo de energia. Ele é desenvolvido sobre a pilha da norma IEEE 802.15.4 que estabelece a camada física (PHY – *Physical Layer*) e a camada de acesso ao meio (MAC - *Medium Access Control*). O padrão ZigBee define a camada de rede.

Desenvolvido para interligar pequenas unidades de comunicação de dados em áreas muito limitadas, as comunicações pelo padrão ZigBee são feitas na faixa de frequência não licenciada (ISM - *Industrial, Scientific and Medical*). Portanto dispositivos ZigBee operam nas faixas 2,4GHz (Global), 915MHz (América) e 868MHz (Europa) e a taxa de transferência de dados nessas faixas são 250kbps, 40kbps e 20kbps, respectivamente. As topologias de rede Ponto-a-Ponto (Malha), Árvore e Estrela fazem parte desta tecnologia.

Em ambientes internos a cobertura de alcance do sinal varia entre 20 e 30 metros. O cálculo de distância entre dois nodos ZigBee é geralmente feita utilizando os valores RSSI. Como o padrão ZigBee opera na faixa de frequências não licenciadas, seus

dispositivos estão sujeitos a interferências e com isso as estimativas das distâncias e consequentemente de localização podem ser afetadas (FARID, NORDIN e ISMAIL, 2013). Lau et al. (2009) realizaram uma análise deste problema para um sistema de localização via redes ZigBee baseado no método *fingerprinting*. Uma interferência de uma rede Wi-Fi é forçada para avaliar as consequências nos resultados de localização. Segundo os autores, essa interferência gera uma alta perda de pacotes enviados que consequentemente aumentam os erros na estimativa de localização. Gráficos mostram que quanto maior a taxa de transmissão da rede Wi-Fi, pior o desempenho do sistema de localização.

Hu et al (2011) apresenta um algoritmo de localização baseada em ZigBee para ambientes internos. Em uma sala de 56m x 30m, foram colocados dispositivos compatíveis com o padrão ZigBee que estimam a posição e consequentemente a localização baseada no sinal RSSI. Propagação multipercurso e suas devidas correções também são investigadas para a relação entre o sinal RSSI e a distância medida. O desempenho do algoritmo para o ambiente de testes foi de 1 metro de precisão.

Larranaga et al. (2010) também apresenta um sistema de posicionamento *indoor* baseado no padrão ZigBee feito pelo método de *fingerprinting*. Utilizando o sinal RSSI, este sistema consiste em 2 fases: treinamento e localização. O diferencial é que o treinamento (pré-processamento) é feito de maneira automática toda vez que um nodo deve ser localizado. Este sistema apresenta um desempenho bom uma vez que sua precisão pode chegar até 3 metros.

2.4 Comparação das Tecnologias

A Tabela 3 mostra os principais parâmetros das tecnologias atualmente utilizadas em sistemas de localização *indoor*: RFID, Wi-Fi e ZigBee. É importante notar que a escolha da tecnologia mais apropriada vai depender da aplicação em questão. Em outras palavras não se pode definir a melhor tecnologia entre elas, mas sim a que melhor atende as necessidades da aplicação com o maior número de vantagens e menor número de desvantagens. Para fins de comparação, os parâmetros

acessibilidade, privacidade, segurança, precisão e custo foram analisados e submetidos a conceitos de 1 a 5, sendo que o valor 5 é considerado o melhor.

Tabela 3: Características das tecnologias de localização *indoor*

	RFID	Wi-Fi	ZigBee
Funcionamento	- <i>Tags</i> (passivas ou ativas) transmitem informações armazenadas para leitores de dados que registram e/ou executam ações baseadas nas regras de software do aplicativo de leitura.	- Pontos de acesso sem fio detectam dispositivos e fazem a triangulação da distância baseado na intensidade do sinal recebido	- “Nodos de referência” enviam a informação da posição e o valor do sinal RSSI de um “nodo cego” cujo pretende-se localizar - Triangulação para estimar a localização
Banda de Frequência	125 KHz – 915 MHz e 2.4 GHz	2.4 GHz	868/915 MHz e 2.4 GHz
Velocidade de Transmissão	384 Kbps	10 – 105 Mbps	250 Kbps
Bateria	Depende das etiquetas	Depende do dispositivo	Alcalina (Meses – Anos)
Alcance	1 cm – 100m	20 – 50m	10 – 300m
Acessibilidade	2	3	4
Precisão	5	3	4
Privacidade e Segurança	4	2	3
Custo	2	3	3
Adequado para	- Rastreamento de produtos e inventário	- Ambientes com infraestrutura existente e/ou forte necessidade de conexão Wi-Fi e precisão de informações de localização possível somente a poucos metros	- Automação residencial e comercial - Controle Industrial - Rastreamento <i>indoor</i>

Fonte: (HERNANDEZ , JAIN, et al.), (*Lighthouse*) e (LEE, SU e SHEEN, 2007)

3 BLUETOOTH E BEACON

Uma nova tecnologia para localização *indoor* vem ganhando destaque nos últimos anos. São os chamados dispositivos Beacons, aparelhos de proximidade que emitem informações para *smarthphones*, *tablets*, ou qualquer dispositivo compatível por meio da tecnologia *Bluetooth Low Energy* (Bluetooth de Baixa Energia). Seu baixo consumo de energia, característica principal, torna-o eficiente para aplicações de reconhecimento de posição. Neste capítulo será abordada a tecnologia Bluetooth e a sua mais recente versão, Bluetooth de Baixa Energia. Os dispositivos Beacons também serão devidamente apresentados e explicados.

3.1 Bluetooth Clássico

Em meados de 1994, o Bluetooth começou sua história. Neste ano, a companhia Ericsson buscou desenvolver uma tecnologia capaz de comunicar dispositivos sem a utilização de cabos. As pesquisas resultaram no MC-Link, sistema de rádio de curto alcance com implementação simples e barata. Devido ao apoio de várias empresas que viam potencial na tecnologia emergente, em 1998 criou-se o consórcio Bluetooth SIG (*Special Interest Group*) formado por companhias como Ericsson, Intel, IBM, Nokia, entre outras. Isto garantiu a criação de padrões de uso da tecnologia que vieram se desenvolvendo e são seguidos até hoje.

A tecnologia de comunicação sem fio Bluetooth consiste na transmissão de dados e arquivos de maneira rápida e segura através de aparelhos como *smartphones*, *tablets*, teclados, mouses, impressoras, entre outros. Para que isso seja possível, os dispositivos precisam estar próximos um do outro. A transmissão de dados é feita através de uma frequência de rádio de onda curta, permitindo que um dispositivo seja capaz de detectar o outro independente de sua localização, desde que ambos estejam dentro da área limite de proximidade. Em outras palavras o alcance máximo do Bluetooth deve ser respeitado.

Para atender aos diversos tipos de dispositivos existentes, foram criadas classes que determinam a distância de alcance entre dois dispositivos, como mostra a Tabela 4. Ao total três classes fazem parte do Bluetooth, e seus alcances variam de pouco

mais de 1 metro até 100 metros. A definição de cada classe mostra que a potência é determinante na distância final permitida para que ocorra a transmissão de dados entre dois dispositivos. Dispositivos da Classe 3 podem parecer inúteis devido ao baixo alcance de transmissão, mas suas aplicações são diversas. Conectar um mouse a um computador ou um fone de ouvido a um telefone celular são alguns dos exemplos desta classe. Dispositivos de classes diferentes podem se comunicar sem problema algum uma vez que o de maior alcance respeite o limite do de menor alcance. Em outras palavras, um *smartphone* da Classe 2 pode se comunicar com um *tablet* da Classe 1, por exemplo, sendo que eles respeitem a distância máxima de 10 metros relativa a classe inferior.

Tabela 4: Alcance do Bluetooth

Classe	Potência máxima permitida	Alcance (aproximadamente)
Classe 1	100mW (20dBm)	até 100 metros
Classe 2	2.5mW (4dBm)	até 10 metros
Classe 3	1mW (0dBm)	~ 1 metro

Fonte: adaptado de Wikipedia (2012).

3.2 Bluetooth de Baixa Energia

Contando com atualizações ao longo dos anos, foi em 2009 que a tecnologia Bluetooth já estava na sua quarta versão. Surgia então o Bluetooth de Baixa Energia, também denominado *Bluetooth 4.0* ou *Bluetooth Smart* (ALECRIM).

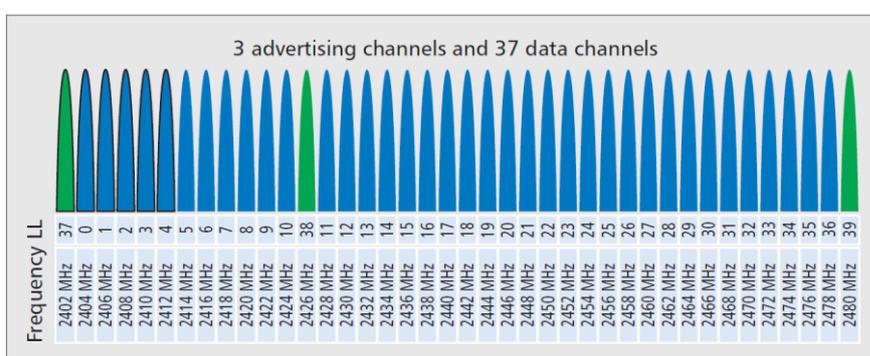
Como implícito no nome, Bluetooth de Baixa Energia surgiu para ser mais eficiente do que o Bluetooth Clássico no que diz respeito ao comportamento energético. Projetado para a Internet das Coisas (IoT – *Internet of Things*), esta tecnologia consome pouca energia e é muito eficiente, o que a torna ideal para dispositivos que utilizam pequenas células de energia, como baterias de moeda e dispositivos de captação de energia (Bluetooth, 2016).

Bluetooth Clássico e BLE possuem diferenças e semelhanças em suas características. Por ser uma tecnologia criada para funcionar no mundo todo, a frequência de rádio adotada é aberta e aceita em praticamente qualquer lugar do

planeta. Ambos operam na faixa ISM de 2,4GHz, porém usam diferentes conjuntos de canais. BLE usa apenas 40 canais (2MHz) enquanto Bluetooth Clássico usa 79 (1MHz) (CHANG, 2014).

A Figura 10 mostra o espectro do *Bluetooth Smart*. Os três canais de “aviso”, representados na cor verde, são responsáveis por reconhecer dispositivos e estabelecer uma conexão entre eles. Estes canais servem de anúncio, por algumas razões como: transmitir normalmente, transmissão de dados a um dispositivo anteriormente ligado, anunciar presença a um dispositivo que se deseja conectar ou agir como um Beacon. Estes canais são escolhidos de modo a se obter a menor interferência possível com comunicações Wi-Fi. A partir deste momento a comunicação entre os dispositivos ocorre através dos canais de dados, representados na cor azul (CHANG, 2014).

Figura 10: Canais do *Bluetooth Smart*. Os canais de aviso estão representados na cor verde.



Fonte: (CHANG, 2014)

Além de seu baixo consumo de energia, sua principal característica, o BLE possui outras vantagens em relação ao Bluetooth Clássico. Como desvantagem, por exemplo, está a distância (alcance) reduzido em relação ao Bluetooth Clássico. A Tabela 5 mostra um comparativo entre as tecnologias Bluetooth Clássico e *Bluetooth Low Energy*. BLE consegue enviar pacotes de dados a uma distância de até 50 metros e sua taxa de transferência é de 1MBit/s. O padrão de segurança é o AES (*Advanced Encryption Standard*) de 128 bits. O tempo total para enviar pequenos pacotes de dados é 3ms, muito abaixo dos 100ms do Bluetooth Clássico. Interoperabilidade, robustez e facilidade de uso são outros pontos positivos desta tecnologia.

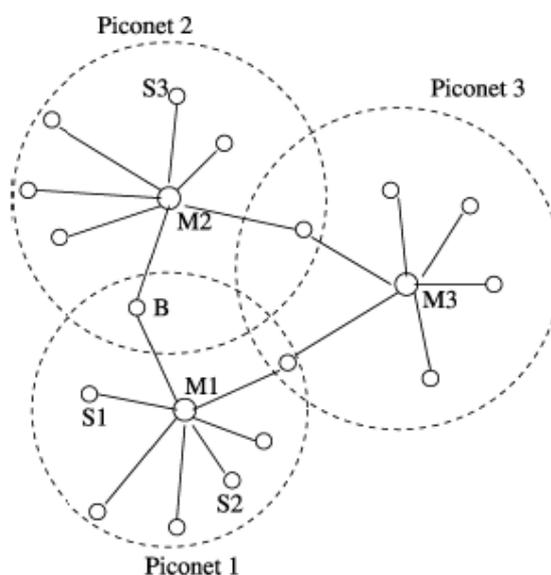
Tabela 5: Comparativo entre Bluetooth Clássico e *Bluetooth Low Energy*

Especificações Técnicas	Bluetooth Clássico	<i>Bluetooth Low Energy</i>
Distância/Alcance	100 m	50 m
Taxa de transmissão de dados	1 – 3 Mbit/s	1 Mbit/s
Capacidade de transmissão	0.7 – 2.1 Mbit/s	0.27 Mbit/s (305 kbit/s)
Escravos ativos	7	Não definido; varia de acordo com a aplicação
Segurança	56 até 128-bit	128-bit AES
Robustez	FHSS	FHSS
Latência (a partir de um estado não conectado)	Tipicamente 100 ms	6 ms
Tempo total para enviar dados (dependendo da vida útil da bateria)	100 ms	3 ms, menos de 3 ms
Topologia de rede	<i>Scatternet</i>	<i>Star-Bus</i>
Consumo de energia	1 como a referência	0.01 até 0.5 (de acordo com o uso em questão)
Consumo de corrente de pico	Menos do que 30 mA	Menos do que 20 mA

Fonte: Adaptado de (Laird).

Em relação a topologia, as duas versões assumem suas particularidades. No Bluetooth Clássico, sempre que dois ou mais dispositivos se comunicam, é formada uma rede denominada *piconet*. Uma *piconet* é uma rede *ad-hoc* (rede sem fio onde todos os dispositivos funcionam como roteador) e utiliza os protocolos da tecnologia Bluetooth para permitir a comunicação entre dispositivos. Nesta comunicação, o dispositivo que iniciou a conexão é denominado *master* (mestre) e os demais assumem o papel de *slave* (escravo). Cada rede *piconet* é capaz de suportar até 8 dispositivos, sendo que somente um pode assumir o papel de mestre. É possível conectar duas ou mais *piconets* juntas, ou seja, comunicar uma *piconet* com outra que esteja dentro do limite de alcance formando uma *scatternet*, como ilustrado Figura 11.

Figura 11: Redes *piconet* e *scatternet* (Bluetooth Clássico)

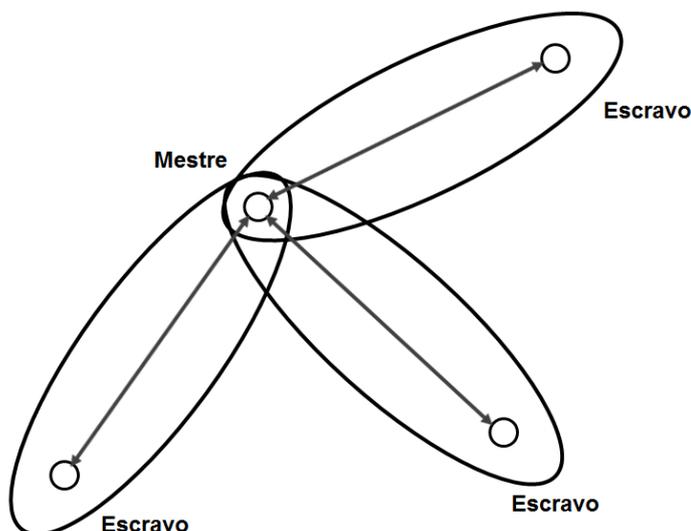


Fonte: Evangelos Vergetis (2005).

Para que um dispositivo possa se conectar a uma rede *piconet* ele deve emitir um sinal denominado *Inquiry*. Os demais dispositivos que estão dentro da distância limite de comunicação respondem com um pacote FHS (*Frequency Hopping Synchronization*) que contém a identificação de cada dispositivo e os dados de sincronização com a respectiva *piconet*. Uma vez apto a fazer parte da *piconet*, o dispositivo emite um sinal chamado *Page*, responsável por estabelecer uma conexão com outro dispositivo. Um terceiro sinal denominado *Scan* faz com que dispositivos ociosos entrem em modo *stand-by* (modo de descanso), economizando energia. Neste modo, os dispositivos verificam a cada 10ms se existem outros aparelhos procurando conexão.

A topologia no BLE é diferente. Cada escravo se comunica com o mestre em uma camada física separada. Um mestre irá reconhecer os pedidos de conexão do escravo e estabelecê-la caso os parâmetros de conexão estejam de acordo. Esta topologia, chamada *Star-bus*, é ilustrada na Figura 12.

Figura 12: Topologia Star-bus BLE



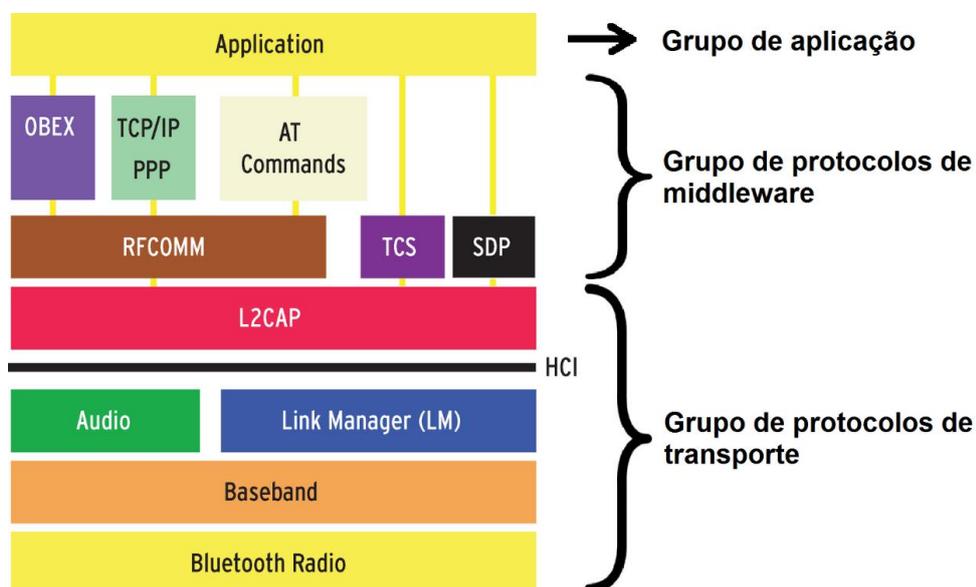
Fonte: Adaptado de (Laird).

Devido ao fato da faixa ISM ser aberta, o tráfego na rede Bluetooth fica suscetível a interferências geradas por qualquer sistema de comunicação que utilize a mesma banda. Para que isso não ocorra, o esquema de comunicação *FH-CDMA* (*Frequency Hopping - Code-Division Multiple Access*) faz com que a frequência seja dividida em canais de transmissão. O dispositivo mestre muda de um canal para o outro em um período bastante pequeno, procedimento chamado *frequency hopping* (salto de frequência). Se dois dispositivos estiverem transmitindo na mesma faixa de frequência o canal será trocado e a interferência deixará de existir, não causando grandes danos. Do ponto de vista de segurança, este conceito torna-se interessante, uma vez que apenas os dispositivos conectados com o mestre podem reconhecer a sequência de saltos a ser realizada. Assim, dispositivos localizados fora de rede não conseguirão obter a sequência correta dos saltos.

3.3 Pilhas do Protocolo Bluetooth

Como se trata de uma tecnologia de informação, o Bluetooth segue alguns protocolos para poder funcionar. Eles são divididos em três grupos, como ilustra a Figura 13: protocolos de transporte, protocolos de middleware e aplicações.

Figura 13: Pilha do protocolo Bluetooth



Fonte: adaptado de (Toothache).

O grupo de protocolos de Transporte permite que dois dispositivos se reconheçam. Os seguintes protocolos fazem parte deste grupo: *Radio Frequency (RF)*, *Baseband*, *Link Manager Protocol (LMP)*, *Host Controller Interface (HCI)* e *Logical Link Control and Adaptation Protocol (L2CAP)*. Neste grupo é possível fazer o gerenciamento dos links físicos e lógicos para protocolos e aplicações das camadas mais altas (CRIS BRITO, PUSKA e OGLIARI).

No grupo de protocolos Middleware estão inseridos protocolos desenvolvidos pelo grupo Bluetooth SIG e protocolos adicionais e de padrões industriais. Eles são responsáveis por permitir a interação entre aplicações antigas e novas. Alguns exemplos de protocolos que fazem parte deste grupo são: *Point-to-Point Protocol (PPP)*, *Internet Protocol (IP)*, *Transmission Control Protocol (TCP)*, *Wireless Application Protocols (WAP)* e protocolos *Object Exchange (OBEX)* (CRIS BRITO, PUSKA e OGLIARI).

A camada de Aplicações consiste em aplicações reais, ou seja, aplicativos que podem desempenhar uma função específica utilizando a especificação Bluetooth.

3.4 Beacons

Beacons são pequenos dispositivos que emitem sinais de rádio em intervalos definidos através da tecnologia *Bluetooth Low Energy*. Um dispositivo compatível, como um *smartphone* por exemplo, pode receber e interpretar estes sinais através de um aplicativo. Este por sua vez é responsável por mostrar na tela do usuário as ações pré-determinadas. Atualmente, existem Beacons de vários modelos e tamanhos com as mais diversas implementações. No desenvolvimento deste trabalho foram escolhidos Beacon BLE do fabricante Estimote (Figura 14). Acompanhado por um sensor de movimento de três eixos e um sensor de temperatura, Estimote Beacons possuem um invólucro impermeável, permitindo-lhe ser instalado até mesmo em baixo d'água. Uma única bateria CR2477 é utilizada como fonte de alimentação. Com ela os dispositivos Beacons são capazes de operar por mais de 3 anos (dependendo da aplicação) sem a necessidade de trocá-la (Estimote).

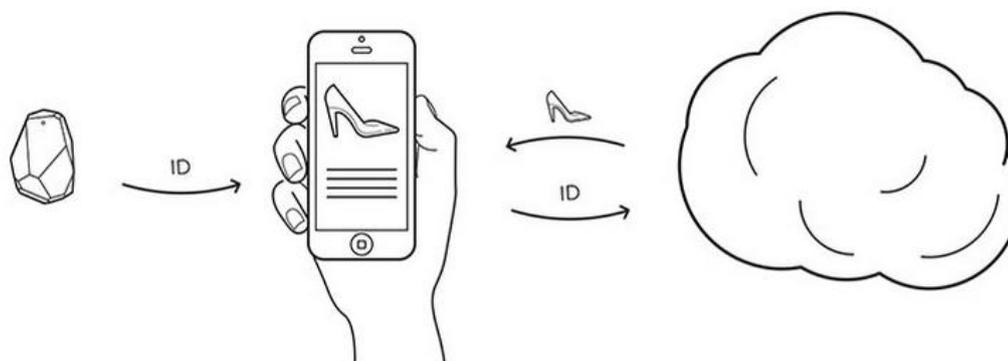
Figura 14: Estimote Beacon BLE



Fonte: Estimote.

Toda vez que um *Smart Device* (dispositivos compatíveis com a tecnologia BLE) entrar na zona de alcance de um dispositivo Beacon, este envia um código ID (Identidade) para o dispositivo final. Este por sua vez é capaz de interpretar este código através de um aplicativo. Feito isso, ele busca na nuvem de dados a informação referente a este código e a mostra na tela do usuário. A sequência de comunicação entre os dispositivos pode ser vista na Figura 15. Nela é possível observar que após identificado o código ID pelo *smartphone*, a informação resultante baseia-se em um objeto (neste exemplo um sapato).

Figura 15: Comunicação entre Beacon e Smart Device



Fonte: Estimote.

Para que seja possível reconhecer um *Smart Device*, os Beacons emitem periodicamente pacotes de dados de 31 bytes. Por esta razão muitas vezes são associados a um farol por emitir sempre o mesmo sinal periodicamente. Neste pacote de dados fazem parte um Identificador Único Universal UUID (*Universally Unique Identifier*), um indicador do nível de potência de recepção (RSSI) e dois parâmetros denominados Major e Minor, que formam uma espécie de região e sub-região, respectivamente. O pacote de dados é ilustrado na Figura 16.

Figura 16: Pacote de dados do Beacon BLE

9 bytes	16 bytes	2 bytes	2 bytes	2 bytes
Prefixo	UUID	Major	Minor	RSSI

Fonte: Adaptado de (Havlana)

3.4.1 UUID

O Identificador Único Universal (UUID) é utilizado para diferenciar os Beacons relacionados a uma determinada aplicação. Ele representa um grupo, como uma empresa por exemplo. Composto por uma série de 16 bytes, ele é representado na forma hexadecimal (HEIL, 2012), o que permite gerar $3,402823669 * 10^{38}$ combinações diferentes. Portanto, por se tratar de um pacote muito grande torna-se quase nula a possibilidade de dois grupos conterem o mesmo UUID.

3.4.2 Major e Minor

Formado por um pacote de 2 bytes, Major e Minor são os níveis mais baixos do UUID. São comumente conhecidos como conjunto e subconjunto, respectivamente. A possibilidade de combinações também é muito grande, possibilitando que muitos Beacons possam compartilhar o mesmo UUID sem conflitos.

Para simplificar a compreensão destes parâmetros, imagina-se um exemplo na área comercial. Considera-se que existam três lojas da mesma rede situadas em cidades diferentes como Curitiba, Florianópolis e Porto Alegre. O UUID deve ser o mesmo para todas, o que permite que o aplicativo reconheça qualquer uma das três lojas. Cada loja é caracterizada como uma região e por isso recebe um valor Major diferente. Isto fará com que o aplicativo reconheça em qual loja específica o usuário está. Dentro de cada loja existem setores como por exemplo vestuário, utilidades domésticas e móveis. A cada um deles é atribuído um valor Minor distinto que irá determinar o departamento exato em que o usuário se encontra. Os mesmos departamentos em diferentes lojas podem ter o mesmo código Minor, uma vez que suas regiões (valores Major) sejam diferentes. Os parâmetros deste exemplo podem ser vistos na Tabela 6.

Tabela 6: Pacote de dados para um exemplo de aplicação na área comercial

Localização da Loja		Curitiba	Florianópolis	Porto Alegre
UUID		B9407F30-F5F8-466E-AFF9-25556B57FE6D		
Major		10000	20000	30000
Minor	Vestuário	10010	10010	10010
	Utilidades Domésticas	10020	10020	10020
	Móveis	10030	10030	10030

Fonte: O Autor.

3.4.3 Intensidade do Sinal Recebido

O pacote de intensidade do sinal recebido (RSSI) é muito importante para sistemas de posicionamento *indoor*. Com ele é possível determinar a distância aproximada entre um Beacon e um dispositivo BLE. Como visto na Seção 2.2.2, ele

contém o nível de potência (medida em dBm) que é utilizado para transmitir um pacote de dados, e seu valor pode sofrer alterações indesejadas devido a diversos fatores, como por exemplo ruído e interferências. Este nível de potência pode ser visto no dispositivo de recepção. O RSSI depende do poder de transmissão (Tx) e da distância entre os dispositivos. O valor de Tx para os Estimote Beacons podem ser facilmente alterado pelo desenvolvedor (Estimote). No valor máximo de Tx (4dBm), o RSSI para Estimote Beacons varia na faixa de -26dBm a -100dBm, o que em distância significa de algumas polegadas até 50 metros de distância.

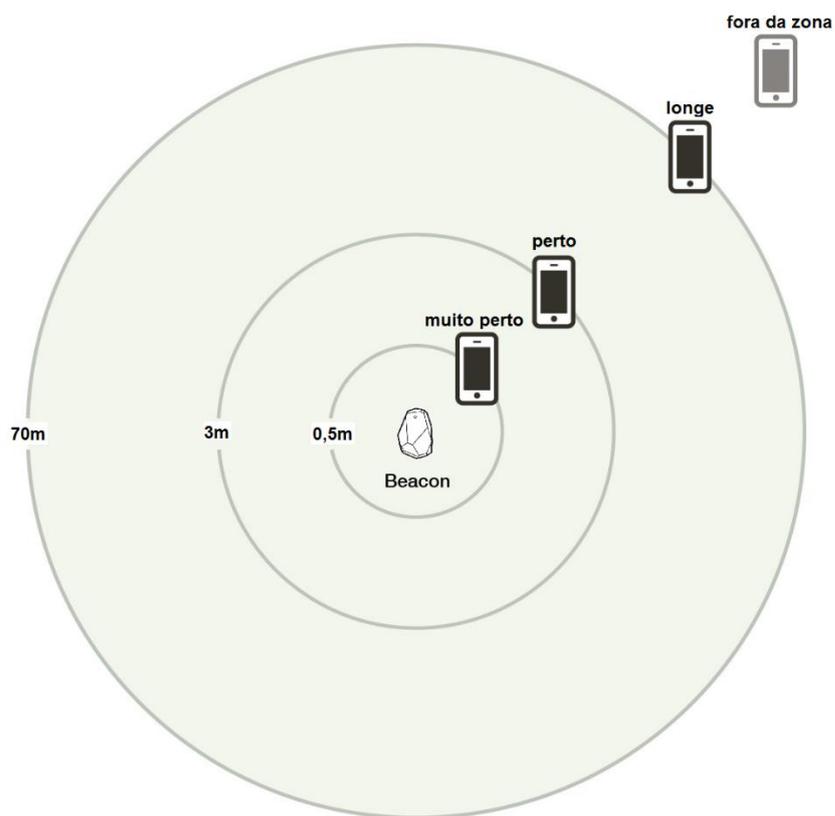
3.4.4 Zonas de Proximidade

Estimote Beacons tem um alcance de até 70 metros (caso ideal). Entretanto o sinal transmitido pode ser interferido, absorvido ou desviado por diversos motivos, devendo-se então contar com um alcance máximo, agora em condições reais, entre 40 e 50 metros (Estimote). Existem quatro zonas de proximidade, denominadas *Proximity Zones* para estimar a distância de um Beacon até um *Smart Device*, ilustradas na Figura 17:

- *Immediate* (muito perto): com uma distância de comunicação de até meio metro, o *Smart Device* precisa quase encostar no Beacon para poder acionar um evento. É útil para aplicações que requerem segurança, como pagamento ou transferência de dinheiro por exemplo, onde o usuário deve ativar conscientemente um determinado evento. Com isso, ações ativadas automaticamente ou por acidente são evitadas.
- *Near* (perto): nesta zona um *Smart Device* pode se comunicar com Beacons há poucos metros de distância. Bom para aplicações na área comercial por exemplo, onde eventos irão aparecer na tela do usuário (consumidor) quando o mesmo passar na frente de uma loja que contenha dispositivos Beacons.
- *Far* (longe): estar longe de um Beacon significa estar mais do que 3 metros de distância do mesmo. Com um alcance de até 70 metros em casos ideais, a transmissão de dados encontra nesta zona sua maior gama de aplicações.
- *Unknown* (desconhecido): fora da zona de alcance do Beacon. Um *Smart Device* localizado nesta zona não é capaz de se comunicar com o emissor

devido a distância entre eles ser maior do que a distância máxima de transmissão do sinal.

Figura 17: Zonas de proximidade para Estimote Beacons



Fonte: O Autor.

4 PROCESSO DE LOCALIZAÇÃO

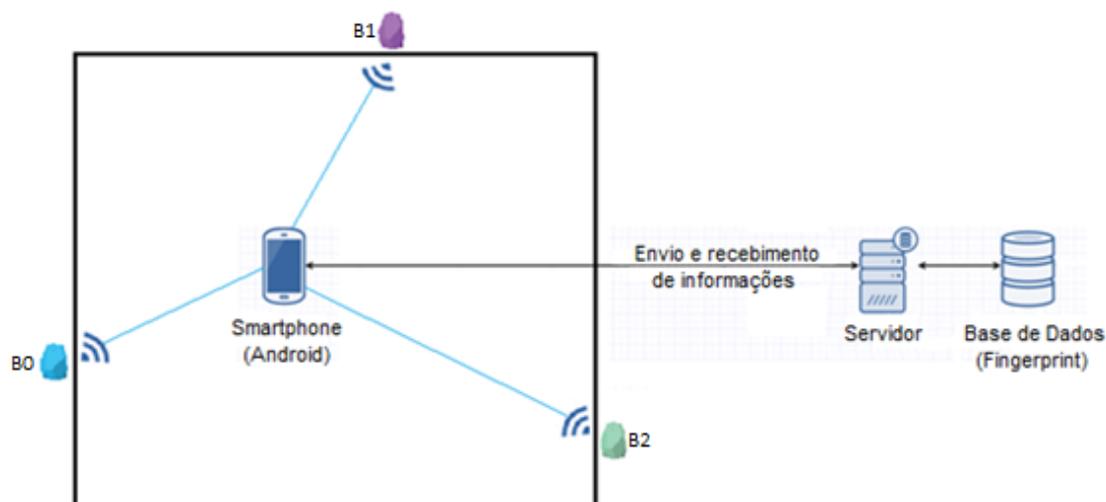
Este capítulo apresenta uma descrição detalhada do sistema proposto de localização *indoor* que utiliza a tecnologia Bluetooth de Baixa Energia. O sistema utiliza a técnica de *fingerprinting* e é avaliado em uma base de dados própria. Além disso, o sistema proposto é comparado a um método clássico de localização.

Este capítulo está organizado da seguinte maneira. Na Seção 4.1 é apresentado o modo de funcionamento do sistema de localização indoor proposto e quais as especificações dos beacons foram utilizadas. As características do sinal RSSI também são vistas nesta seção. Na Seção 4.2 são explicadas as etapas do sistema de localização indoor proposto. A Seção 4.3 apresenta o ambiente utilizado para os testes e demonstra como foram feitas as coletas de dados. A Seção 4.4 contém os resultados do sistema proposto assim como os resultados de um sistema de referência. O modo de avaliação destes sistemas está descrito nesta seção. Por fim, a Seção 4.6 descreve o aplicativo de localização indoor, desenvolvido para que o usuário visualize sua posição estimada na sala em tempo real.

4.1 Modo de Funcionamento

O sistema de localização *indoor* proposto neste trabalho possui 3 elementos essenciais, conforme ilustrado na Figura 18: beacons, *smartphone* e *servidor*. Considerando que o ambiente indoor está completamente mapeado (isto é, beacons de tecnologia Bluetooth de Baixa Energia afixados nas paredes em localizações conhecidas), o *smartphone* recebe os sinais de B beacons (B0, B1 e B2). Para cada sinal de rádio recebido dos beacons, a medida de potência do sinal recebido, o RSSI, é estimada. Quando o *smartphone* tiver recebido o sinal RSSI de no mínimo três beacons, estes sinais são transformados em distâncias (em metros). Estas distâncias correspondem a assinatura (*fingerprint*) da posição do *smartphone*, a qual é comparada com um conjunto de *fingerprints* já coletados. A partir desta comparação, os *fingerprints* selecionados da base em conjunto com o *fingerprint* do *smartphone* são utilizados para estimar a localização do *smartphone* através da triangulação.

Figura 18: Arquitetura do sistema



Fonte: O Autor.

Como o sistema proposto exige a existência de um conjunto de *fingerprints* dos ambientes de interesse, este conjunto deve ser armazenado em um servidor. Assim, o *smartphone* funciona como um coletor de dados, os quais são enviados para processamento. Portanto, não é preciso que o *smartphone* tenha grande capacidade de armazenamento ou até de processamento. Neste trabalho o servidor não foi implementado. Todo o processo é realizado no próprio *smartphone*.

4.1.1 Beacons

O sistema foi desenvolvido com dispositivos beacons os quais utilizam tecnologia Bluetooth de Baixa Energia (BLE). Seu alcance é ajustável e pode chegar até 70 metros em casos ideais. Atualizações do firmware podem ser feitas a qualquer instante, até mesmo com o sistema já em funcionamento. As especificações dos beacons utilizados neste projeto são apresentadas na Tabela 7:

Tabela 7: Especificações dos beacons

Versão do firmware	4.5.0
Versão do hardware	F2.3
Potência de transmissão	-12dBm (fraco)
Intervalo de transmissão	490ms
Alcance	~15m
Frequência	2.4GHz

Fonte: O Autor.

Um *smartphone* que roda o sistema operacional Android foi utilizado na fase de coleta e na fase de teste (explicadas na Seção 4.3), onde ele passa a ser o objeto alvo para localização. Ele utiliza a versão 4.1 do BLE. Na etapa de validação foi utilizado um segundo *smartphone* para analisar as coordenadas finais de localização. Ele também roda o sistema operacional Android, porém sua versão do BLE é a 4.0. Isso foi feito para investigar a hipótese de que alguns celulares interpretam de maneiras diferentes os valores do sinal RSSI, resultando assim em estimativas de localização diferentes.

4.1.2 Características do Sinal

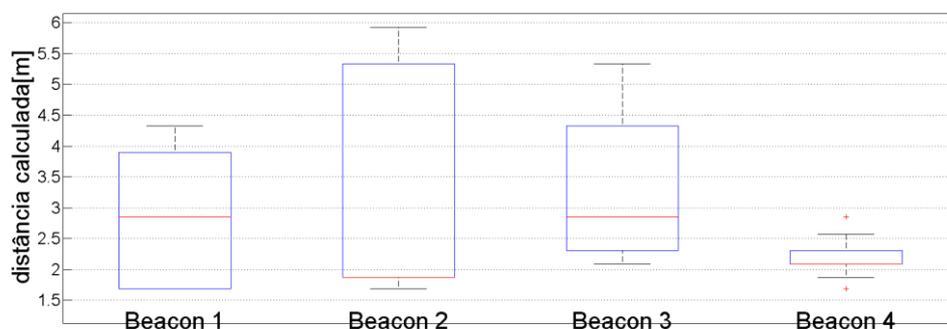
Para desenvolver um sistema de localização *indoor* é preciso levar em consideração alguns fatores que alteram as características do sinal. Eles são muito importantes pois afetam diretamente a estimativa de localização do objeto alvo e, portanto, a precisão do sistema. Algumas destas características indesejáveis do sinal são apresentadas nesta seção.

Ao utilizar o sinal RSSI para um sistema de localização *indoor*, deve-se levar em consideração alguns fatores que podem afetar sua propagação: atenuação do sinal, interferência, ruído, reflexão e refração do sinal, propagação multipercurso, entre outros (TRAN, SILVA, *et al.*, 2011). Isso faz com que os valores obtidos sejam errôneos e a estimação de localização seja imprecisa.

A interferência consiste na alteração das características do sinal transmitido devido a um outro sinal exterior. O ruído é semelhante a interferência, porém esta alteração também pode ser gerada pelo próprio sistema de transmissão. Para o ruído, estes sinais indesejados são aleatórios e não podem ser previstos. A atenuação consiste na redução da potência do sinal ao longo do meio de transmissão. Neste trabalho o meio de transmissão é o ar (espaço livre) e a potência que atinge o receptor é menor do que a potência emitida pelo beacon. Quando um sinal emitido chega ao receptor por mais de um caminho tem-se a chamada propagação multipercurso. Ela é muito comum em ambientes internos e é a grande responsável pela variação da potência do sinal. Outros fatores que afetam o sinal RSSI obtido são o tipo da construção e material, distância do transmissor e variabilidade nos níveis de potência do transmissor e do receptor.

Um teste foi realizado para verificar a grande variação nos valores do sinal RSSI coletados pelo *smartphone*, resultado das características do sinal. Quatro beacons foram colocados a uma distância de 3 metros do *smartphone* e 200 amostras do sinal RSSI foram coletadas para cada um deles. Estes sinais foram transformados em distâncias. A distribuição destas distâncias foi analisada utilizando o gráfico boxplot apresentado na Figura 19. Note que cada beacon apresenta uma distribuição diferente para as distâncias. Os beacons 1 e 3 foram os melhores no quesito precisão devido ao fato de que a mediana (linha vermelha) dos seus valores está próxima de 3 metros. Entretanto, apresentam uma grande variação (beacon 1 possui $\sigma = 2,64$ e beacon 3 possui $\sigma = 3,25$). Os beacons 2 e 4 apresentaram a pior precisão com diferentes variações. Enquanto que o beacon 2 apresentou a maior variação de todos os beacons, o beacon 4 apresentou a menor. Por isso, a informação de localização produzida pelo sinal de cada um dos beacons deve sofrer devido a estas diferenças constatadas por este experimento. O algoritmo deve ser robusto o suficiente para lidar com estas imprecisões e variações do sinal.

Figura 19: Distância real de 3 metros X Distância calculada



Fonte: O Autor.

O corpo humano pode afetar os níveis do sinal RSSI lidos em um determinado ponto. Uma vez que o usuário se encontra entre o dispositivo beacon e o *smartphone*, uma medição do sinal RSSI será diferente de uma outra medição feita quando o usuário estiver fora da linha de transmissão entre os dois dispositivos. Por isso deve ser levada em consideração na fase de coleta das amostras.

Assim, o sistema de localização deve levar em consideração todas estas características destrutivas do sinal. Na prática, o ambiente de coleta deve ser o mais próximo da realidade (alterações no ambiente afetam o sinal) e o operador, ao coletar as amostras, deve-se portar como o usuário real do sistema. O operador deve coletar algumas amostras estando situado entre os beacons e o *smartphone* por exemplo. Os valores RSSI obtidos serão diferentes de uma coleta no mesmo ponto quando não existe nenhum obstáculo entre transmissor e receptor. Isto é essencial para calibrar o sistema para todos os tipos de variações. Outras considerações são em relação aos obstáculos do ambiente. Estes podem estar entre o transmissor e o receptor, e por esse motivo não devem ser removidos para que o mapa de *fingerprints* seja o mais parecido possível com a realidade do ambiente. Os níveis de potência entre transmissor e receptor devem ser atribuídos com o mesmo valor. Neste trabalho alguns fatores destrutivos do sinal como paredes e distâncias muito altas (mais de 50m) entre beacon e *smartphone* foram desconsideradas, uma vez que as mesmas não existem. Estes são alguns dos motivos pelos quais a parte *off-line* do método *fingerprinting* é muito importante e torna-se muito trabalhosa.

4.2 Sistema de Localização

O sistema de localização proposto pode ser decomposto em 5 etapas, como ilustrado na Figura 20:

1. **Pré-processamento:** esta etapa é responsável por filtrar o sinal RSSI e convertê-lo em um *fingerprint* (representação vetorial com base no tempo, onde cada elemento representa o valor RSSI de cada beacon). Primeiro, o sinal de cada beacon recebido pelo *smartphone* é filtrado utilizando um filtro média móvel de tamanho L . Os sinais filtrados são então alinhados temporalmente e transformados em *fingerprints*, que contém os sinais de todos os beacons.
2. **K-NN (K-Vizinho Mais Próximo):** o algoritmo K-NN é utilizado para selecionar os K *fingerprints* do ambiente mais próximos ao *fingerprint* produzido pelo *smartphone*.
3. **Cálculo das Distâncias:** esta etapa é responsável por calcular a distância entre o *smartphone* e os beacons para cada um dos K *fingerprints*. A matriz D com dimensões $K \times B$ é gerada com a distância para cada um dos beacons no *fingerprint* utilizando a equação

$$\tilde{d}_i = 10^{\frac{T_{x_i} - RSSI_i}{10n}} \quad (3)$$

onde T_{x_i} representa a potência de transmissão do i -ésimo beacon, $RSSI_i$ a potência do sinal recebido em dBm do i -ésimo beacon e n a constante de propagação do sinal, geralmente utilizada entre 2 e 4.

4. **Triangulação:** com base nas distâncias dos K *fingerprints* mais próximos e a informação da localização dos beacons no ambiente, a triangulação é realizada a fim de estimar as coordenadas do *smartphone*. Como K pode ser maior do que 3 e a triangulação utiliza somente 3 distâncias, esta etapa gera uma coordenada de localização para cada combinação de 3 distâncias.
5. **Fusão:** como o a etapa de triangulação gera mais do que uma coordenada, esta etapa estima a localização final do *smartphone* (consequentemente, do usuário) com base na média das coordenadas de localização.

Figura 20: Diagrama do Algoritmos de Localização Indoor baseado no RSSI



Fonte: O Autor.

4.2.1 Pré-Processamento

Esta etapa consiste em alinhar o sinal RSSI transmitido pelos beacons através de um filtro para posteriormente criar vetores alinhados temporalmente. Com o objetivo de atenuar a instabilidade e as interferências do ambiente características do RSSI, o filtro média móvel é aplicado ao sinal.

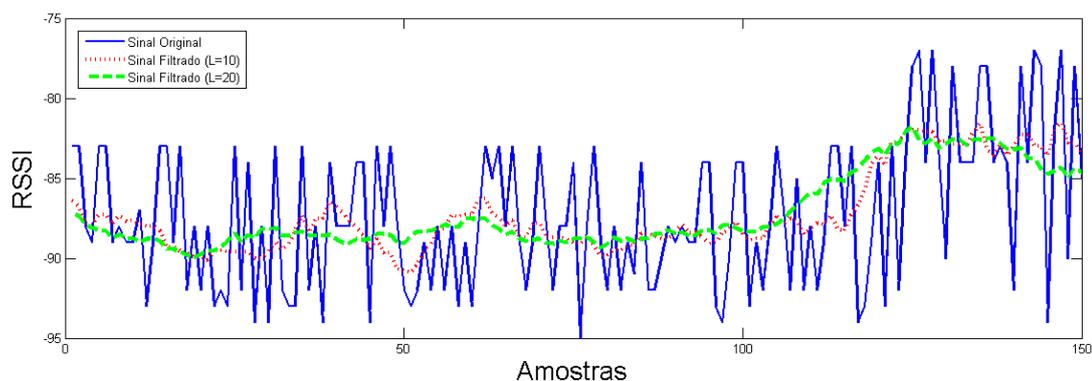
O filtro média móvel realiza uma média do sinal de entrada para produzir o sinal de saída conforme a equação

$$y[t] = \frac{1}{L} \sum_{i=0}^{L-1} x[t - i]$$

onde $x[t]$ é o sinal de entrada, $y[t]$ é o sinal de saída e L é o número de pontos na média. O filtro média móvel é um filtro passa-baixa, o qual retém as frequências inferiores a uma frequência de corte (SMITH, 1997).

À medida que o número de pontos no filtro de média móvel aumenta, o ruído causado pelas frequências mais altas diminui. No entanto, as bordas (picos e curvaturas) tornam-se menos afiadas, conforme ilustrado na Figura 21. O sinal original (azul) com os valores RSSI de um beacon foi sujeito a dois filtros média móvel de tamanhos 10 e 20. As respostas estão representadas nas cores vermelho e verde, respectivamente. Nota-se que após o processo de filtragem a amplitude do ruído diminui, porém, a nitidez das bordas é reduzida.

Figura 21: Sinal original de um beacon sujeito a dois filtros de média móvel de tamanhos 10 e 20



Fonte: O Autor.

A quantidade de redução do ruído é igual a raiz quadrada do número de pontos na média. Neste caso, para as 10 e 20 amostras utilizadas, a quantidade de redução foi de 3,16 e 4,47, respectivamente. O filtro de média móvel é a solução ideal, pois proporciona o menor ruído possível para uma determinada nitidez de borda. Pode-se dizer que a média móvel é um filtro excepcional de suavização no domínio do tempo, porém um filtro passa baixa ruim no domínio da frequência (SMITH, 1997).

4.2.2 K-Vizinho Mais Próximo

O algoritmo K-NN é responsável por selecionar os K *fingerprints* do ambiente mais próximos ao *fingerprint* produzido pelo *smartphone*. Isto é feito a partir do módulo da diferença entre o *fingerprint* do *smartphone* com o mapa de *fingerprints* do ambiente. Os respectivos K *fingerprints* mais próximos da base de dados são então copiados e armazenados em um vetor. A partir deste momento, os *fingerprints* selecionados da base em conjunto com o *fingerprint* do *smartphone* são utilizados para estimar a localização do *smartphone* através da triangulação.

4.2.3 Triangulação

A etapa de triangulação utiliza as coordenadas dos beacons afixados no ambiente e a matriz de distância D para estimar a localização do *smartphone*.

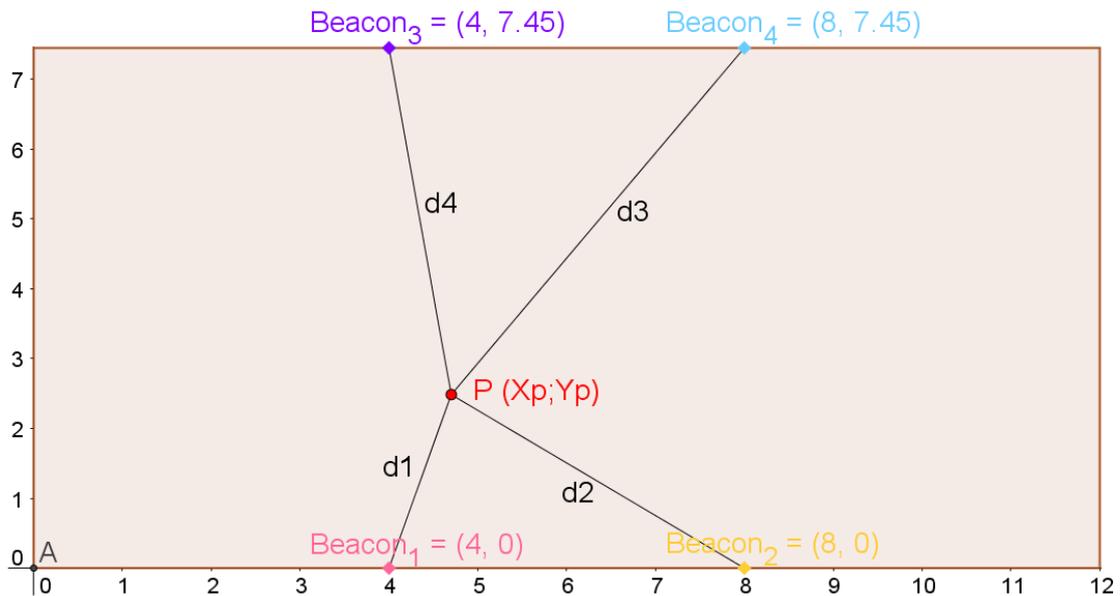
Utilizando o teorema de Pitágoras a fim de relacionar as coordenadas conhecidas dos beacons com as coordenadas de um ponto $P(x_p, y_p)$, a localização do *smartphone* pode ser estimada resolvendo-se o seguinte sistema de equações

$$\begin{cases} \sqrt{(x_1 - x_p)^2 + (y_1 - y_p)^2} = d_1 \\ \sqrt{(x_2 - x_p)^2 + (y_2 - y_p)^2} = d_2 \\ \sqrt{(x_3 - x_p)^2 + (y_3 - y_p)^2} = d_3 \\ \sqrt{(x_4 - x_p)^2 + (y_4 - y_p)^2} = d_4 \end{cases} \quad (4)$$

onde x_i e y_i para $1 \leq i \leq 4$ representam as coordenadas do beacon i .

A Figura 22 ilustra a etapa de triangulação para um ponto P escolhido aleatoriamente no ambiente. As distâncias entre este ponto e cada um dos quatro beacons estão representadas por d_1 , d_2 , d_3 e d_4 .

Figura 22: Triangulação de um ponto P escolhido aleatoriamente



Fonte: O Autor.

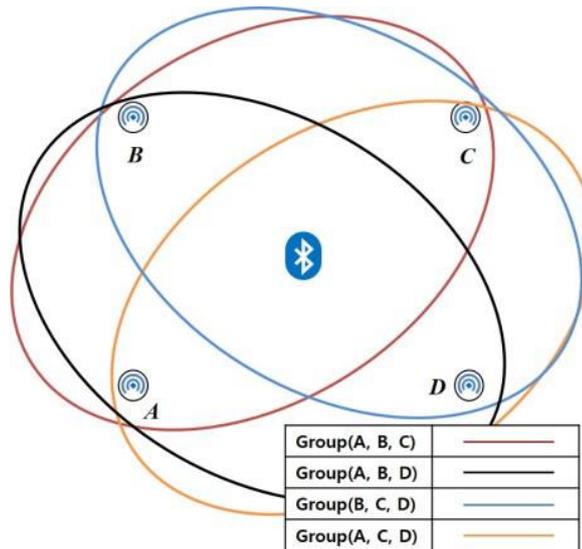
Com o objetivo de atenuar os ruídos do RSSI, a triangulação é realizada para cada conjunto de 3 beacons. Assim, caso o RSSI coletado para um beacon possuir muito ruído, tornando-o não confiável para estimar a localização, este por sua vez afetará somente as localizações onde ele fizer parte. Portanto, a resolução do sistema de equações (4) para 3 beacons produz as equações

$$x_p = \frac{[(d_2^2 - d_3^2 + y_3^2 - y_2^2 + x_3^2 - x_2^2)(2(y_2 - y_1))] - [(d_1^2 - d_2^2 + y_2^2 - y_1^2 + x_2^2 - x_1^2)(2(y_3 - y_2))]}{[2(x_3 - x_2)2(y_2 - y_1)] - [2(x_2 - x_1)2(y_3 - y_2)]} \quad (5)$$

$$y_p = \frac{[(d_2^2 - d_3^2 + y_3^2 - y_2^2 + x_3^2 - x_2^2)(2(x_2 - x_1))] - [(d_1^2 - d_2^2 + y_2^2 - y_1^2 + x_2^2 - x_1^2)(2(x_3 - x_2))]}{[2(x_2 - x_1)2(y_3 - y_2)] - [2(x_3 - x_2)2(y_2 - y_1)]} \quad (6)$$

Dado um conjunto de beacons $\{b_1, b_2, b_3, \dots, b_n\}$ com $n \geq 3$, formam-se s subconjuntos com 3 beacons. A Figura 23 mostra um exemplo de subconjuntos para um conjunto de 4 beacons (A, B, C e D) (GAOYANG, SONG-HYEON, *et al.*, 2015). Com $n=4$ foram formados os s subconjuntos $\{A, B, C\}$, $\{A, B, D\}$, $\{B, C, D\}$ e $\{A, C, D\}$. Ao utilizar as equações (3), (5) e (6) para cada subconjunto s , obtém-se uma coordenada de localização.

Figura 23: Beacons divididos em grupos



Fonte: (GAOYANG, SONG-HYEON, *et al.*, 2015).

O algoritmo de localização proposto foi desenvolvido no software Matlab. Alguns dos códigos utilizados podem ser vistos nos Apêndices A e B.

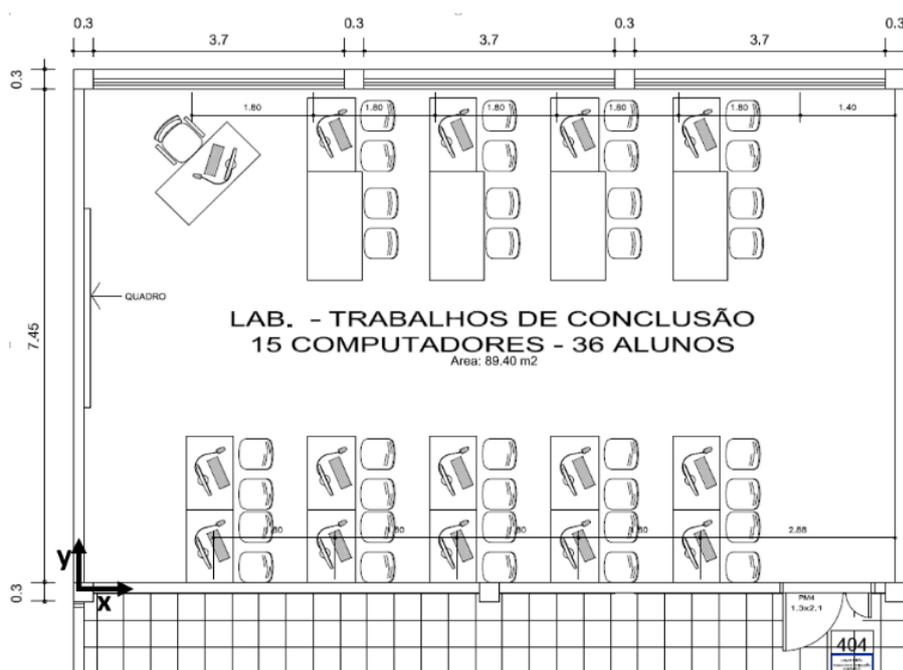
4.3 Base de Dados

A base de dados utilizada para avaliar o sistema de localização foi coletada durante a realização deste trabalho. Esta seção descreve o ambiente de coleta e como foi realizada a coleta.

4.3.1 Ambiente de Coleta

O ambiente escolhido para o sistema de localização indoor é uma sala de aula localizada na Universidade de Caxias do Sul, Rio Grande do Sul. Situada no quarto andar (bloco 71), a sala possui dimensões de 12m x 7,45m, totalizando uma área de 89,4m². A planta baixa desta sala pode ser vista na Figura 24. Nela estão representadas as coordenadas de referência X e Y, localizadas no canto inferior esquerdo.

Figura 24: planta baixa sala 404 (bloco 71)



Fonte: O Autor.

Como este trabalho utiliza quatro beacons para estimar as coordenadas finais dos pontos de teste, cada um dos quatro beacons possui uma identificação única (através dos parâmetros major e minor) para diferenciá-los na fase de coleta. A configuração dos beacons utilizados neste projeto pode ser vista na Tabela 8:

Tabela 8: Parâmetros dos Beacons

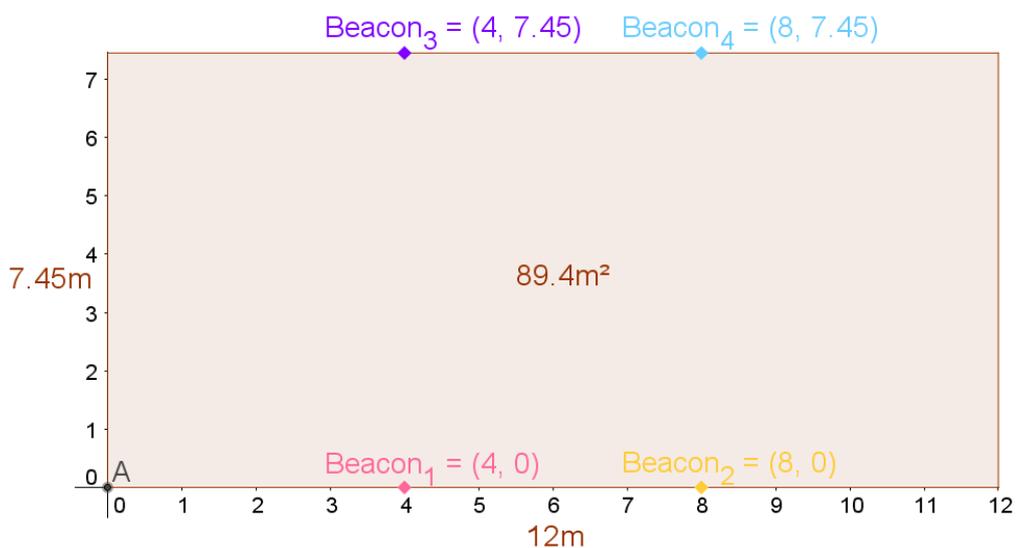


Beacons	Candy - rosa	Lemon - amarelo	Beetroot - roxo	Ice - azul
UUID	B9407F30-F5F8-466E-AFF9-25556B57FE6D			
Major	10000	20000	30000	40000
Minor	1	2	3	4

Fonte: O Autor.

Os beacons foram afixados nas paredes da sala e sua organização obedeceu alguns parâmetros. O primeiro é que cada ponto no ambiente deve ser capaz de receber sinais RSSI de pelo menos três beacons, pois somente assim é possível fazer uma triangulação e obter as coordenadas estimadas. O segundo é de que as coordenadas dos beacons, ou seja, as localizações onde eles estão afixados no ambiente devem ser medidas, pois elas são essenciais na determinação final das coordenadas dos pontos de teste. Caso as coordenadas dos beacons sejam medidas erroneamente, os resultados de localização também apresentarão erros, desqualificando o sistema de localização indoor. A disposição dos beacons na sala está ilustrada na Figura 25. Os valores ao lado do nome de cada beacon representam suas coordenadas X e Y em metros, separadas por ponto e vírgula (X ; Y). Os beacons 1 e 2 estão localizados no eixo Y igual a zero, e os beacons 3 e 4 no eixo Y igual a 7,45 metros. Já para o eixo X, os beacons 1 e 3 apresentam o mesmo valor (4 metros) e os beacons 2 e 4 também (8 metros). As coordenadas de referência, onde X (horizontal) e Y (vertical) são iguais a zero, estão representadas pela letra A situada no canto inferior esquerdo. Como o alcance dos beacons é de 15 metros, é possível afirmar que, independentemente da localização do *smartphone* no ambiente, ele irá receber amostras do sinal RSSI dos quatro beacons, pois a maior distância possível entre um beacon e um ponto de coleta é de 10,93 metros.

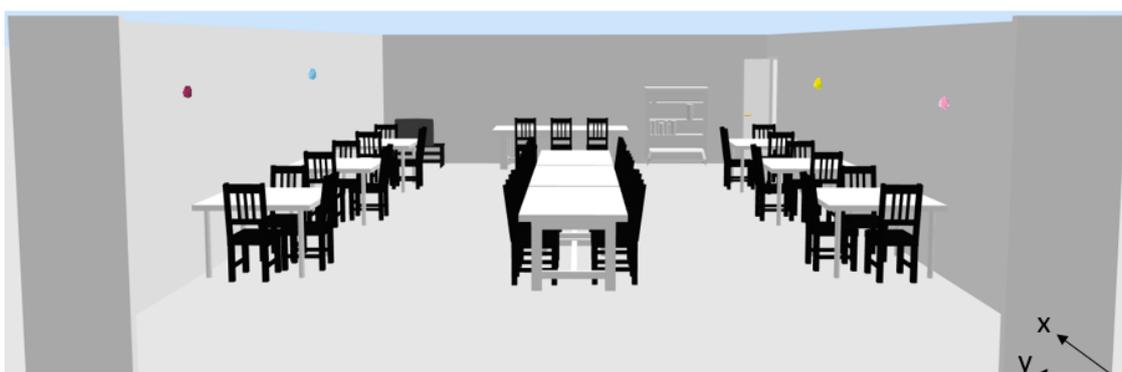
Figura 25: Distribuição dos beacons no ambiente



Fonte: O Autor.

Um desenho em 3D da sala utilizada nos testes foi feito para melhor visualização da distribuição dos beacons em relação aos objetos presentes no ambiente (Figura 26). As coordenadas de referência estão localizadas no canto inferior direito.

Figura 26: Representação 3D da sala com os Beacons afixados nas paredes



Fonte: O Autor.

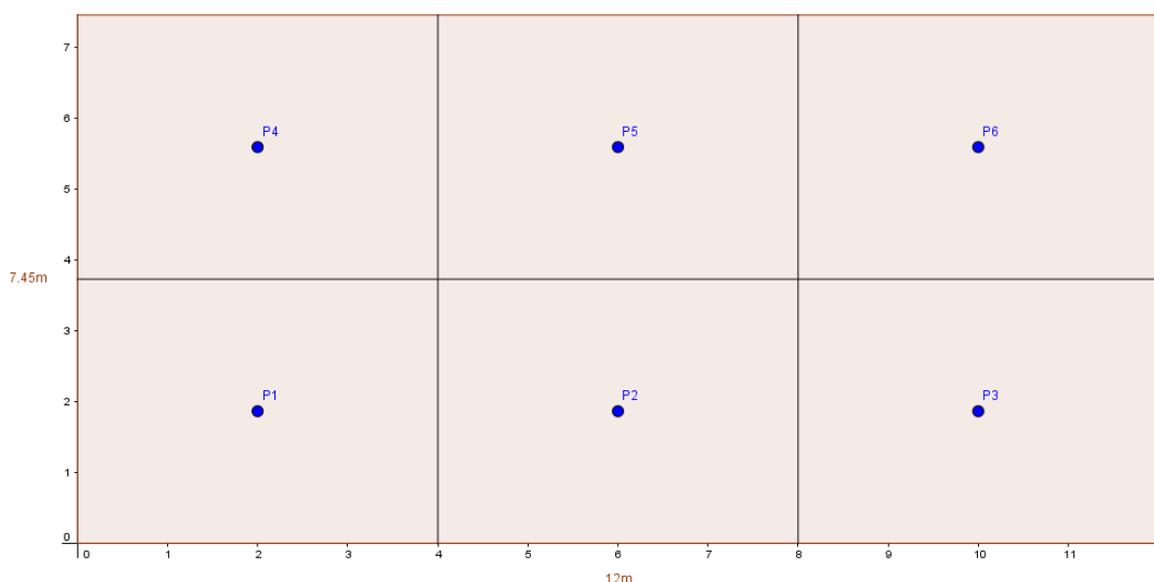
4.3.2 Processo de Coleta

O processo de coleta pode ser dividido em duas etapas. Na primeira etapa, dados foram coletados para realizar a análise do sinal e treinar o sistema de localização. Na segunda etapa, dados foram coletados para realizar a avaliação dos sistemas desenvolvidos. Ambas as etapas utilizaram o software “Beacon Scanner & Logger”.

4.3.2.1 Coleta para Análise/Treinamento

O ambiente de coleta foi dividido em 6 subáreas com aproximadamente 4m² cada, conforme ilustrado na Figura 27. Para cada subárea P, foi definido um ponto de coleta de referência no centro da subárea (representados por P1, P2, P3, P4, P5 e P6).

Figura 27: Representação das 6 subáreas com seus respectivos pontos de coleta (P1, P2, P3, P4, P5 e P6) localizados no centro de cada uma delas.



Fonte: O Autor.

Os seguintes parâmetros foram utilizados para realizar a coleta de dados:

- **Múltiplas sessões:** a fim de capturar qualquer diferença causada pelos efeitos multi-sessão, a coleta do sinal RSSI para cada ponto foi realizada em 2 dias e em pelo menos 2 turnos.
- **Orientação:** como o corpo pode afetar a propagação do sinal, 20% da coleta foi realizada com orientações diferentes do operador (norte, sul, leste, oeste) para cada ponto de coleta. As amostras restantes foram coletadas sem nenhum obstáculo entre *smartphone* e os beacons. O *smartphone* foi posicionado em cima de uma mesa de 1 metro de altura.
- **Amostragem:** o sinal foi amostrado a uma taxa de 1 Hz com um tempo de coleta de pelo menos 10 minutos em cada ponto. A fim de obter um sinal mais próximo da realidade, toda coleta foi realizada com *smartphones*, sem qualquer adaptação.

Nesta etapa, o processo de coleta de dados produziu 12.744 amostras, onde cada amostra é um vetor composto pelo RSSI de cada um dos 4 beacons, referenciados como *fingerprints*. Assim, para cada subárea foram coletados 2.124 vetores de 4 dimensões. Estes *fingerprints* foram utilizados para construir o mapa de *fingerprints* que caracterizam o ambiente.

4.3.2.1 Coleta para Avaliação do Sistema

Para avaliar os sistemas, foram coletados dados em cada uma das subáreas em locais diferentes dos pontos centrais. A coleta foi realizada em uma única sessão com orientações diferentes do operador. A mesma frequência de amostragem foi utilizada e 200 amostras foram coletadas por ponto.

4.4 Experimentos e Resultados

Esta seção apresenta uma análise dos resultados alcançados. O sistema de localização indoor proposto neste trabalho foi comparado com um sistema clássico de localização. Para todos os algoritmos implementados, o tamanho do filtro utilizado na etapa de pré-processamento é $L=20$.

4.4.1 Avaliação do Sistema

A avaliação do sistema é realizada com base no erro médio (EM) da distância entre a coordenada real e a estimada através da equação

$$EM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{(\hat{x} - x_r)^2 + (\hat{y} - y_r)^2} \quad (10)$$

onde N é o número de coordenadas utilizadas para testes, \hat{x} e \hat{y} são os valores das coordenadas de localização estimadas e x_r e y_r são os valores das coordenadas verdadeiras do ponto observado, obtidos (medidos) na etapa de coleta (LONG, BEHNAD e WANG, 2015).

4.4.2 Sistema de Referência

O sistema de referência utilizado neste trabalho é baseado na triangulação do RSSI coletados em tempo real, conforme ilustrado na Figura 28. Primeiro, estes sinais RSSI são passados por um filtro de média móvel (pré-processamento). As amostras resultantes deste filtro são utilizadas na equação (3) para calcular as distâncias entre o *smartphone* e os beacons. Feito isto, as amostras do sinal, agora em distâncias, são utilizadas nas equações (5) e (6) para o cálculo das estimativas finais de localização. A coordenada final é obtida pela média das estimativas finais de localização.

Figura 28: Diagrama do sistema de referência



Fonte: O Autor.

O sistema de referência obteve um erro médio de 3,38 metros para o primeiro *smartphone*. Para o segundo *smartphone*, o erro médio obtido foi de 3.46 metros. O desempenho do sistema em cada ponto é apresentado na Tabela 9. Nota-se que o ponto de teste P1 apresenta o pior desempenho para o *smartphone* 1. Isto pode ter influência tanto das características físicas do ambiente quanto aos níveis de sinais medidos pelo *smartphone*. Como as características do ambiente para o ponto P1 são praticamente as mesmas do ponto P4, o segundo *smartphone* foi utilizado para que os resultados pudessem ser comparados. Para ele, o pior desempenho foi obtido no ponto P3. Nota-se que os *smartphones* apresentam resultados diferentes, efeito tanto de fatores que simultaneamente alteram os valores do sinal RSSI quanto das características do próprio *smartphone*.

Tabela 9: Erro Médio por ponto de teste do sistema de referência para os dois *smartphones*

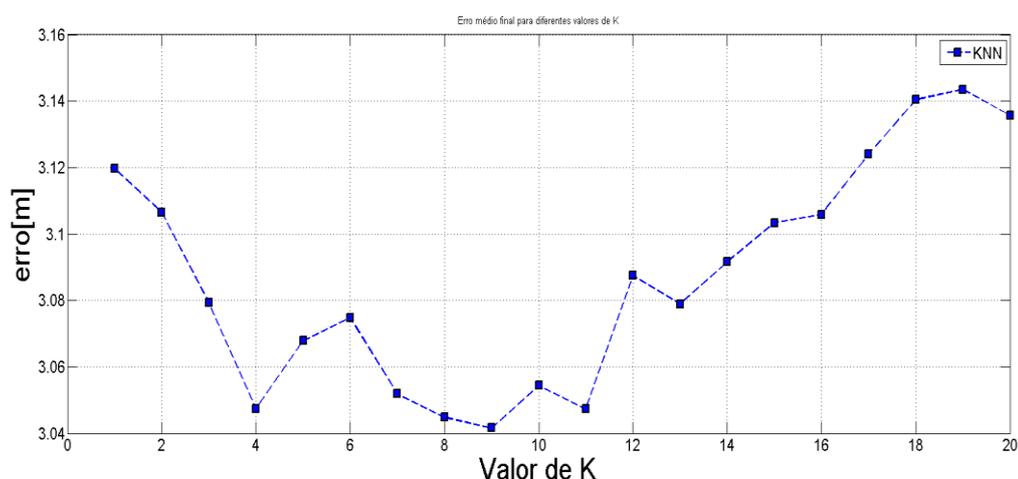
Ponto de teste		P1	P2	P3	P4	P5	P6
Erro médio [m]	Smartphone 1	4,48	3,43	4,33	3,05	2,60	2,34
	Smartphone 2	4,10	1,22	5,25	2,94	3,20	4,08

Fonte: O Autor.

4.4.3 Sistema Proposto

O sistema proposto foi avaliado com o parâmetro K igual a 9. Para selecionar o parâmetro K, foram realizados experimentos variando este parâmetro nos dados de teste. Para diferentes valores de K foram obtidos diferentes valores de erro médio final. A Figura 29 mostra os erros para diferentes valores de K. Note que o sistema de localização com base no ponto mais próximo (i.e., K=1, o que equivale ao algoritmo Vizinho Mais Próximo - *Nearest Neighbor*) não produz um dos menores erros. A variabilidade do sinal causados pela interferência do sinal e as diferenças apresentadas pelos beacons mostram que não é possível estimar localização de maneira confiável com base na informação de uma única *fingerprint*.

Figura 29: Erro médio para diferentes valores de K



Fonte: O Autor.

Utilizando L=20 para o filtro do pré-processamento e K=9 para a seleção dos *fingerprints*, o sistema proposto obteve erro médio de 3,05 metros para o primeiro *smartphone*. Comparando com o sistema de referência, o sistema proposto oferece uma melhor precisão relativa de 9,8%. Já o segundo *smartphone* obteve um erro médio de 2,93 metros e uma precisão relativa de 15,32%. É importante salientar que a similaridade entre os métodos mostra que o pré-processamento realizado antes da triangulação produz um desempenho melhor.

A Tabela 10 apresenta o desempenho para os dois *smartphones* em cada um dos pontos de teste. O mesmo ponto para os dois *smartphones* pode apresentar

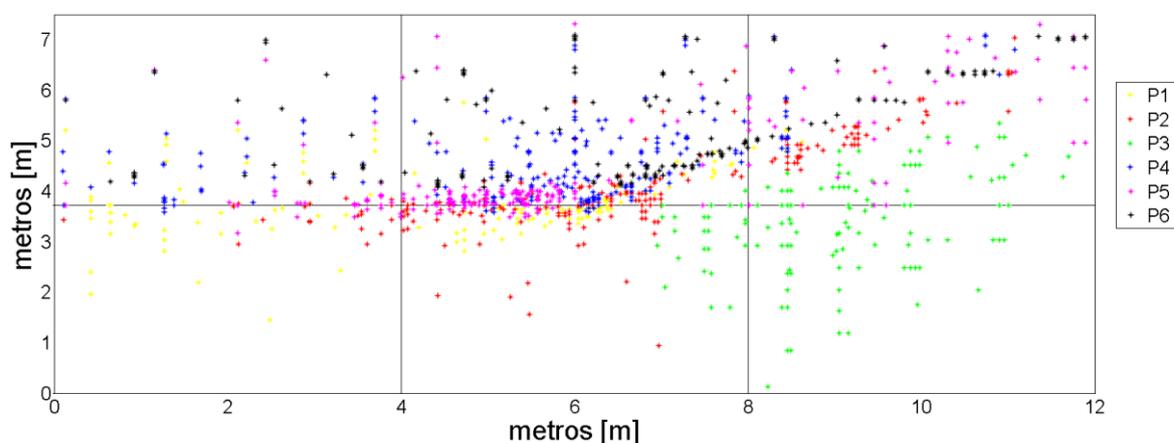
resultados similares, como é o caso do ponto P1, ou também bastante diferentes, como o ponto P6. Nota-se que o ponto de teste P6 apresenta o melhor desempenho para o *smartphone* 1 e o pior desempenho para o *smartphone* 2. Isto deixa claro que além dos fatores que alteram o sinal RSSI, o *smartphone* influencia nos resultados finais de localização. O mapa de *fingerprints* criado na etapa de coleta está representado na Figura 30.

Tabela 10: Erro para cada ponto de teste e erro global do algoritmo KNN

Ponto de teste		P1	P2	P3	P4	P5	P6
Erro médio [m]	Smartphone 1	4,25	3,61	3,85	2,88	2,42	1,27
	Smartphone 2	4,30	1,24	2,33	1,56	3,23	4,88

Fonte: O Autor.

Figura 30: Mapa de *fingerprints*. Cada ponto representa a localização estimada pelo sistema proposto para cada ponto utilizado na construção dos *fingerprints*.



Fonte: O Autor.

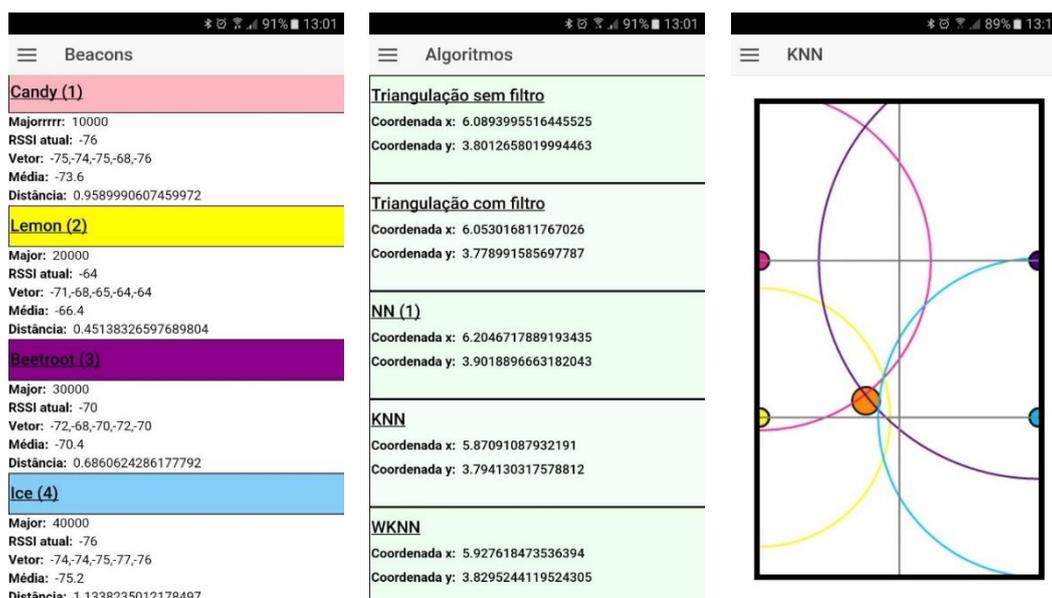
4.5 Aplicativo de localização indoor

Um aplicativo foi criado para que um usuário, portando seu *smartphone*, visualize sua posição estimada na sala. Ele é o responsável por receber o sinal RSSI recebido pelo *smartphone*, estimar a localização do *smartphone* e mostrar a informação final para o usuário através de uma interface gráfica. Desenvolvido para *smartphones* com

sistema operacional Android, ele contém 4 algoritmos diferentes que retornam à localização em x e em y do *smartphone* (usuário).

O objetivo do aplicativo é que o usuário, ao saber a posição real na sala, possa analisar as estimativas de cada um deles e determinar a que mais se iguala as coordenadas reais. Três das principais telas estão representadas na Figura 31. Com a primeira tela é possível observar os beacons de acordo com seu número major e analisar o sinal RSSI atual coletado pelo *smartphone* para cada um deles. O vetor, referente ao filtro de tamanho L, assim como distância calculada entre o beacon e o *smartphone* também estão representadas. Já a segunda tela retorna o valor das coordenadas estimadas x e y para cada algoritmo implementado. Estes valores são numéricos e foram usados na representação gráfica dos algoritmos, conforme ilustrado na terceira tela. Nela, as semicircunferências preenchidas com diferentes cores representam os beacons e o arco com uma determinada cor representa a distância calculada até o beacon da mesma cor. A circunferência laranja é a coordenada final, ou seja, a localização final do usuário (*smartphone*) no ambiente indoor.

Figura 31: Principais telas do aplicativo de localização indoor



Fonte: O Autor.

Além da visualização em tempo real da localização do usuário no ambiente interno, o aplicativo foi criado para que fosse possível, também em tempo real, analisar os valores RSSI recebidos pelo *smartphone*. Conforme visto anteriormente, a grande variação dos sinais RSSI é resultado de vários de fatores que afetam a propagação do sinal. Muitos deles puderam ser observados com a ajuda do aplicativo e suas possíveis soluções puderam ser analisadas e testadas.

5 CONCLUSÕES

Localização *indoor* é um tema recente que vem despertando interesse devido a sua alta variedade de aplicações. Estimativas precisas de localização em um ambiente interno são necessárias em serviços como saúde, comércio, controle, segurança, entre outros. Portanto este trabalho buscou analisar uma solução para localização de um *smartphone* em um ambiente interno. O objetivo foi desenvolver um sistema que forneça informações da localização do *smartphone* em tempo real, de baixo custo, precisão mínima de 4 metros, baixo consumo e boa cobertura do sinal.

Foram analisadas diversas técnicas e tecnologias para localização *indoor*. Dentre as 3 técnicas citadas neste trabalho, a Análise de Cenas foi a escolhida por apresentar vantagens sobre as demais com relação ao custo, cobertura e precisão *indoor*. Sua desvantagem se encontra na fase *off-line* por ser muito trabalhosa e demandar bastante tempo. Algumas tecnologias atualmente utilizadas em sistemas de localização *indoor*, como RFID, Wi-Fi e ZigBee também foram apresentadas.

Uma nova tecnologia que tem potencial para aplicação de localização é o Bluetooth de Baixa Energia. Seu baixo consumo de energia, o aumento expressivo de aparelhos compatíveis e o baixo custo de implementação são algumas de suas vantagens em relação as demais tecnologias. Por esses motivos ela foi a escolhida para o sistema de localização proposto.

Com a utilização de beacons, dispositivos transmissores de sinais RSSI a partir da tecnologia Bluetooth de Baixa energia, foi desenvolvido um sistema de localização *indoor* para estimar a coordenada de um *smartphone* dentro de uma sala de 89,4m². O sistema foi avaliado neste ambiente obtendo uma precisão média de 3,05 metros. Comparando com um sistema baseado somente na triangulação, o sistema proposto produziu um resultado em 9,8% mais preciso que o sistema de referência.

Dentre as dificuldades encontradas, a maior delas foi em relação ao comportamento do sinal RSSI. Como seus valores oscilam muito, torna-se difícil desenvolver uma forma de análise que englobe todas as características que modificam os valores do sinal RSSI, como orientação do corpo, ruído, multipercuro, objetos e pessoas no ambiente interno, entre outros. Nos testes realizados, foi observada uma grande diferença entre o modelo de propagação teórico estudado e o

obtido na prática. Muitas vezes obteve-se um sinal RSSI muito próximo para distâncias diferentes, ou também sinais RSSI muito diferentes para as mesmas distâncias. De maneira geral, pode-se afirmar que a poucos metros dos beacons (de 2 a 3 metros), o comportamento do sinal é satisfatório e condiz com a propagação teórica estudada. A partir de distâncias maiores, os sinais obtidos apresentam grandes variações, dificultando as análises e conseqüentemente piorando as estimativas de localização.

Outros testes também foram realizados a fim de observar as características que modificam a propagação do sinal RSSI para possivelmente tratá-las e obter sinais mais próximos do real. Na criação do mapa de *fingerprints*, notou-se que os valores RSSI variam ao longo do dia, característica negativa para o sistema de localização indoor. Muitas vezes, diferentes pontos do mapa de *fingerprints* apresentam o mesmo resultado, fator que torna o algoritmo KNN mais impreciso.

Devido a todos estes fatores destrutivos do sinal, foram implementados alguns algoritmos a fim de dirimir o máximo possível as características indesejáveis do sinal RSSI. Em um primeiro momento, estes algoritmos foram implementados no software Matlab. Apesar de ser uma boa ferramenta, a análise dos valores RSSI só era feita de maneira *off-line*. Com isso, muitas vezes tornava-se difícil determinar os valores que se esperava obter. Em outras palavras, a comparação entre os valores obtidos e os valores esperados era crítica. Portanto, foi criado um aplicativo para que estas análises pudessem ser feitas de forma *online*. Ao se movimentar com o *smartphone* dentro do ambiente interno, o operador conseguiu comparar sua real localização com a estimada pelo aplicativo. Os sinais RSSI de cada beacon puderam ser vistos em uma das telas, tornando mais visível a comparação entre os mesmos com a distância real. Ao saber o valor teórico para uma distância de 3 metros, por exemplo, o operador se manteve a esta distância de um dos beacons e analisou os valores obtidos, averiguando as discrepâncias e oscilações nos valores RSSI. Desta forma, constatações como as citadas acima puderam ser feitas para posteriormente serem analisadas e tratadas.

Por fim, o sistema de localização indoor proposto neste trabalho cumpriu os objetivos propostos. De forma geral, a localização de um *smartphone* dentro do ambiente interno é estimada com alguns metros de distância de sua real localização.

O sistema possui limitações, resultantes de algumas características indesejáveis do sinal RSSI. Nem sempre a localização estimada obedece aos 4 metros de precisão preestabelecidos no escopo do projeto, porém em média respeita esta premissa.

5.1 Trabalhos Futuros

Outro problema que deve ser tratado é o caso em que o *smartphone* não recebe o sinal de todos os beacons. Neste trabalho, se o sinal de um determinado beacon não é recebido, o sistema não gera uma amostra que deve ter a localização detectada.

Quando o sistema trabalha com um grande número de beacons, é possível assumir que nem todos os sinais são confiáveis para estimar a localização. Por exemplo, a questão do multipercurso e das interferências podem afetar a precisão da detecção da localização. Assim, o sistema poderia avaliar a confiança do sinal recebido de um determinado beacon utilizando, por exemplo, a cobertura ou área de sobreposição produzida por cada beacon.

A utilização de um servidor externo é outro assunto a ser considerado. Neste trabalho a base de dados está inserida no aplicativo. Com um servidor externo, o *smartphone* serve apenas como coletor de dados. O aplicativo, por sua vez, é o responsável por reconhecer os beacons e comunicar dados importantes (major, minor, UUID, RSSI) para o servidor, que engatilha uma ação. O resultado é mostrado para o usuário em forma de uma interface gráfica, por exemplo.

7 BIBLIOGRAFIA

Bluetooth, 2016. Disponível em: <<https://www.bluetooth.com/what-is-bluetooth-technology/bluetooth-technology-basics/low-energy>>. Acesso em: 05 março 2016.

ABREU, R. F. P. **Localização Indoor em Ambientes Inteligentes**. [S.l.]. 2014.

ALECRIM, E. **Info Wester**. Disponível em: <<http://www.infowester.com/bluetooth.php>>. Acesso em: 03 março 2016.

ANDROID Studio. Disponível em: <<https://developer.android.com/studio/index.html>>. Acesso em: 24 maio 2016.

APPLICATIONS in Health Care. **Navizon**. Disponível em: <<https://www.navizon.com/health-care>>. Acesso em: 8 abril 2016.

BAHL, P.; PADMANABHAN, V. N. **RADAR: An In-Building RF-based User Location and Tracking System**. [S.l.]. 2010.

BOTTONI, F.; NISHIDA, E. Beacons: pega ou não pega? **Proxima**. Disponível em: <<http://www.proxima.com.br/home/negocios/2014/06/02/Beacons--pega-ou-n-o-pega-.html>>. Acesso em: 5 abril 2016.

CHANG, K.-H. **Bluetooth: A viable solution for IoT?** [S.l.], p. 2. 2014.

CRIS BRITO, R.; PUSKA, A.; OGLIARI, R. DEVMEDIA. Disponível em: <<http://www.devmedia.com.br/introducao-a-comunicacao-bluetooth-no-android-revista-mobile-magazine-47/27636>>. Acesso em: 1 maio 2016.

DAHLGREN, E.; MAHMOOD, H. **Evaluation of indoor positioning based on Bluetooth Smart technology**. Göteborg. 2014.

DARDARI, D.; CLOSAS, P.; DJURIĆ, P. M. **Indoor Tracking: Theory, Methods, and Technologies**. [S.l.], p. 16. 2015.

EKAHAU. Disponível em: <<http://www.ekahau.com/>>. Acesso em: 2 junho 2016.

ESTIMOTE. Disponível em: <<http://estimote.com/>>. Acesso em: 6 junho 2016.

FARAGHER, R.; HARLE, R. **Location Fingerprinting With Bluetooth Low Energy Beacons**. [S.l.], p. 11. 2015.

FARID, Z.; NORDIN, R.; ISMAIL, M. **Recent Advances in Wireless Indoor Localization Techniques and System**. [S.l.]. 2013.

GAOYANG, S. et al. A 3-Dimensional Triangulation Scheme To Improve The Accuracy of Indoor Localization for IoT Services, 2015.

GU, Y.; LO, A.; NIEMEGERES, I. **A Survey of Indoor Positioning Systems for Wireless Personal Networks**. [S.l.]. 2009.

HALDER, S. J.; PARK, J.-G.; KIM, W. **Adaptive Filtering for Indoor Localization using ZIGBEE RSSI and LQI Measurement**. [S.l.]. 2011.

HAVLENA. Disponivel em: <<http://www.havlena.net/en/location-technologies/ibeacons-how-do-they-technically-work/>>. Acesso em: 25 maio 2016.

HEIL, M. **Evaluation of Bluetooth 4.0 and its aptitude for a reliable indoor positioning system on today's smartphones**. Stuttgart. 2012.

HERNANDEZ , O. et al. **Position Location Monitoring Using IEEE 802.15.4/ZigBee technology**. [S.l.], p. 67 - 73.

HIGHTOWER, J.; BORRIELLO, G. **Location Sensing Techniques**. [S.l.]. 2001.

HU, X.; CHENG, L.; ZHANG, G. **A Zigbee-based localization Algorithm For Indoor Environments**. [S.l.], p. 6. 2011.

JUNIOR, V. A. S.; ANDREÃO, R. V.; NUNES, R. B. **SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO PARA AMBIENTES FECHADOS BASEADO NA INTENSIDADE DE SINAL RECEBIDO EM REDE ZIGBEE**. [S.l.], p. 6. 2011.

LAIRD. Disponivel em: <<http://www.summitdata.com/blog/ble-overview/>>. Acesso em: 19 maio 2016.

LARRANAGA, J. et al. **An Environment Adaptive ZigBee-based Indoor Positioning Algorithm**. [S.l.], p. 8. 2010.

LAU, S.-Y. et al. **A Measurement Study of Zigbee-based Indoor Localization Systems Under RF Interference**. [S.l.], p. 8. 2009.

LEE, J.-S.; SU, Y.-W.; SHEEN, C.-C. **A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi**. [S.l.], p. 6. 2007.

LIGHTHOUSE. Disponível em: <<http://lighthouse.io/indoor-location-technologies-compared/>>. Acesso em: 10 junho 2016.

LIN, T.-N.; LIN, P.-C. **Performance Comparison of Indoor Positioning Techniques based on Location Fingerprinting in Wireless Networks**. [S.l.], p. 6. 2005.

LIU, H. et al. **Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems**. [S.l.]. 2007.

LIU, J. **Survey of Wireless Based Indoor Localization Technologies**. [S.l.]. 2014.

LONG, F.; BEHNAD, ; WANG,. **Optimum Reference Node Deployment for Indoor Localization Based on the Average Mean Square Error Minimization**. [S.l.], p. 6. 2015.

MOGHTADAAIEE, V.; DEMPSTER, A. G. **Indoor Location Fingerprinting Using FM Radio Signals**. [S.l.]. 2014.

NI, L. M. et al. **LANDMARC: Indoor Location Sensing Using Active RFID**. [S.l.], p. 10. 2004.

O'HARA, B.; PETRICK, A. **IEEE 802.11 Handbook: A Designer's Companion**. [S.l.]: Wiley-IEEE Standards Association, 2005.

OZSOY, K.; BOZKURT, A.; AL, E. **Indoor Positioning Based on Global Positioning System Signals**. Istanbul.

PAHLAVAN, K.; LI, X.; MÄKELÄ, J.-P. **NEXT-GENERATION BROADBAND WIRELESS NETWORKS AND NAVIGATION SERVICES**. [S.l.]. 2002.

PELEG, M. <http://searchmobilecomputing.techtarget.com/definition/Global-Positioning-System>. **Tech Target**. Acesso em: 12 abril 2016.

RODRIGUES COUTO, L. M. **SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO INDOOR COM BASE NO PROTOCOLO ZIGBEE**. [S.l.]. 2013.

ROOS, T. et al. **A Probabilistic Approach to WLAN User Location Estimation**. [S.l.]. 2002.

ROZENSKY, R.; SMITH, S.; ENDEE, L. **Bluetooth Low Energy Technologies for Applications in Health Care: Proximity and Physiological Signals Monitors.** [S.l.], p. 4. 2013.

SCHNEIDER, D. New Indoor Navigation Technologies Work Where GPS Can't. **IEEE Spectrum.** Disponível em: <<http://spectrum.ieee.org/telecom/wireless/new-indoor-navigation-technologies-work-where-gps-cant>>. Acesso em: 5 junho 2016.

SHIN, B. et al. **Enhanced Weighted K-Nearest Neighbor Algorithm for Indoor Wi-Fi Positioning Systems.** [S.l.], p. 4. 2012.

SILVA DA ROCHA, J. **ajautomação.** Disponível em: <<http://www.ajautomacao.com/tags-etiquetas-de-rfid/#gsc.tab=0>>. Acesso em: 14 maio 2016.

SILVA, M. N. P. D. Disponível em: <<http://www.mundoeducacao.com/matematica/plano-cartesiano.htm>>. Acesso em: 15 outubro 2016.

SMITH, S. W. **Digital Signal Processing.** [S.l.]: [s.n.], 1997.

SOMMER, J. **Indoor Positioning Technologien für mobile Endgeräte.** Stuttgart. 2015.

TOOTHACHE. Disponível em: <https://nnc3.com/mags/LM10/Magazine/Archive/2007/80/022-026_BlueSecurity/article.html>. Acesso em: 28 abril 2016.

TRAN, T.-D. et al. **Characteristics of Channels of IEEE 802.15.4 Compliant Sensor Networks.** [S.l.]. 2011.

VERSAMOU, M.; ANTONAKOPOULOS, T. **A Bluetooth Smart Analyzer in iBeacon Networks.** Patras. 2014.

WEBB, A. R.; COPSEY, K. D. **Statistical Pattern Recognition.** [S.l.]: [s.n.], 2011.

ZHANG, C. et al. **iLocScan: Harnessing Multipath for Simultaneous Indoor Source Localization and Space Scanning.** [S.l.], p. 14. 2014.

APÊNDICE A – Formação do mapa de *fingerprints* (matriz KNN)

```

arquivos_coleta = {
    'treinamento\pos11_2909.txt';
    'treinamento\pos1_1209.txt';
    'treinamento\pos1_1508.txt';
    'treinamento\pos22_2909.txt';
    'treinamento\pos2_1209.txt';
    'treinamento\pos2_1508.txt';
    'treinamento\pos33_2909.txt';
    'treinamento\pos3_1209.txt';
    'treinamento\pos3_1508.txt';
    'treinamento\pos44_2909.txt';
    'treinamento\pos4_1209.txt';
    'treinamento\pos4_1508.txt';
    'treinamento\pos55_2909.txt';
    'treinamento\pos5_1209.txt';
    'treinamento\pos5_1508.txt';
    'treinamento\pos66_2909.txt';
    'treinamento\pos6_1209.txt';
    'treinamento\pos6_1508.txt'
};
num_coleta = 3;
for i = 1:length(arquivos_coleta);
    [rssi{i}, sensores{i}] = processaArquivoRSSI(arquivos_coleta{i});
end

tam_filtro = 200;
for i=1:length(arquivos_coleta)
    for j=1:4
        [lin,col] = size((rssi{i}{j}));
        if lin < tam_filtro
            tam_filtro = lin;
        end
    end
end
for j=1:length(arquivos_coleta)
    for i=1:tam_filtro
        matriz_knn{j} = [double(rssi{j}{1}(1:tam_filtro))
double(rssi{j}{2}(1:tam_filtro)) double(rssi{j}{3}(1:tam_filtro))
double(rssi{j}{4}(1:tam_filtro))];
    end
end
f=0;
a=2;
multiplicador = 1;
separacoes(1) = 0;
for p=1:1:length(arquivos_coleta)
    for i=1:1:length(matriz_knn{1})
        f=f+1;
        MATRIZ_KNN(f,:) = [posicoes_coleta(p) matriz_knn{p}(i,:)];
        if f==multiplicador*length(matriz_knn{1})*num_coleta
            separacoes(:,a) = multiplicador*length(matriz_knn{1})*num_coleta;
            multiplicador = multiplicador+1;
            a = a+1;
        end
    end
end
end

```

APÊNDICE B – Cálculo do valor RSSI para distâncias e triangulação

```

numero_knn = 9;
janela = 20;
Tx = -74;
var1 = 10;
n_parametro=2.4;
num_coleta = 3;
[lin_MATRIZ_KNN,col_MATRIZ_KNN] = size(MATRIZ_KNN);
linha_mt = 1;
cont=0;
for j =1:length(matriz_teste_total)
    for i=1:lin_MATRIZ_KNN
        a = abs(matriz_teste_total(j,2) - MATRIZ_KNN(i,2)) ;
        b = abs(matriz_teste_total(j,3) - MATRIZ_KNN(i,3)) ;
        c = abs(matriz_teste_total(j,4) - MATRIZ_KNN(i,4)) ;
        e = abs(matriz_teste_total(j,5) - MATRIZ_KNN(i,5)) ;
        a2 = a^2;
        b2 = b^2;
        c2 = c^2;
        e2 = e^2;
        soma_erro_quadratico_rssi_on_off(i,:) = [i MATRIZ_KNN(i,1)
a2+b2+c2+e2];
    end
    erro_q = sortrows(soma_erro_quadratico_rssi_on_off,3);
    for p=1:numero_knn
        erro_quadratico_crescente2(p,:) = [matriz_teste_total(j,1)
erro_q(p,:)];
    end
    resultado_knn_todos_pontos{j} = erro_quadratico_crescente2;
end

for m=1:length(resultado_knn)
    for i=1:numero_knn
        for j=1:4
            var2 = ((Tx - k_amostras{m}(i,j+1))/(10*n_parametro));
            knn_d(i,j) = var1^var2;
        end
        end
        k_a{m} = knn_d;
end
for m=1:length(resultado_knn)
    for i=1:numero_knn
        x = [c_b(1,1) c_b(2,1) c_b(3,1) c_b(4,1)];
        y = [c_b(1,2) c_b(2,2) c_b(3,2) c_b(4,2)];
        d = [k_a{m}(i,1) k_a{m}(i,2) k_a{m}(i,3) k_a{m}(i,4)];
        soma1 = 0;
        soma2 = 0;
        for p=1:4
            if p==1 %combinação 1 - beacon 123
                d1 = d(1);d2 = d(2);d3 = d(3);
                x1 = x(1);x2 = x(2);x3 = x(3);
                y1 = y(1);y2 = y(2);y3 = y(3);
            else if p==2 %combinação 2 - beacon 124
                d1 = d(1);d2 = d(2);d3 = d(4);
                x1 = x(1);x2 = x(2);x3 = x(4);
                y1 = y(1);y2 = y(2);y3 = y(4);
            else if p==3 %combinação 3 - beacon 134

```

```

        d1 = d(1);d2 = d(3);d3 = d(4);
        x1 = x(1);x2 = x(3);x3 = x(4);
        y1 = y(1);y2 = y(3);y3 = y(4);
    else %combinação 4 - beacon 234
        d1 = d(2);d2 = d(3);d3 = d(4);
        x1 = x(2);x2 = x(3);x3 = x(4);
        y1 = y(2);y2 = y(3);y3 = y(4);
    end
end
end
end
%Triangulação
F=d1^2-d2^2+y2^2-y1^2+x2^2-x1^2;
G=2*(x2-x1);
H=2*(y2-y1);
M=d2^2-d3^2+y3^2-y2^2+x3^2-x2^2;
N=2*(x3-x2);
P=2*(y3-y2);
A=[G H; N P];
B=[F;M];
RESULTADO = linsolve(A,B);
soma1 = soma1 + RESULTADO(1);
soma2 = soma2 + RESULTADO(2);
end
estimativa_xy{m}(i,1) = soma1/4;
estimativa_xy{m}(i,2) = soma2/4;
end
estimativa_xy_MEDIA{m} = mean(estimativa_xy{m}(1:numero_knn,:));
end

```