

Marco Enrique dos Santos Abensur  
Daniel Nery Silva de Oliveira

## **Warehouse Management System Posicional**

São Paulo  
2019

Marco Enrique dos Santos Abensur  
Daniel Nery Silva de Oliveira

## **Warehouse Management System Posicional**

Trabalho apresentado à Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo para obtenção do  
Título de Engenheiro Eletricista.

São Paulo  
2019

Marco Enrique dos Santos Abensur  
Daniel Nery Silva de Oliveira

## **Warehouse Management System Posicional**

Trabalho apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Engenheiro Eletricista.

Área de Concentração:  
Engenharia Elétrica

Orientador: Gustavo Rehder Pamplona  
Coorientador: Carlos Eduardo Cugnasca

São Paulo  
2019

# Resumo

O estudo de técnicas de localização indoor e outdoor tem crescido muito nos últimos anos. Com a informação da localização de algum ativo em um ambiente controlado, processos podem ser simplificados e dados valiosos podem ser obtidos para os mais variados usos, desde a localização de algum aparelho médico em um hospital, até o de mercadorias em um armazém que é o foco do presente trabalho. Sabendo-se localização de todos os ativos em um armazém, pode-se fazer um uso inteligente desses dados, de forma a otimizar espaço e tempo, o que é essencial para companhias do ramo. O trabalho será feito em um armazém da *Samsung SDS Cello Logistics* onde as localizações para armazenamento de produtos não são fixas e nem delimitadas. Para solucionar o problema, levando-se em conta custos, eficiência energética e precisão, o uso do Bluetooth low energy 5 (BLE) se mostra como a atual solução mais adequada quando em comparação com outras tecnologias, permitindo precisões de menos de 2m a baixos custos.

**Palavras-Chave** – Indoor Location, Bluetooth Low Energy, Warehouse Management System.

# Abstract

The study of indoor and outdoor localization techniques has grown a lot in recent years. With information about the location of an asset in a controlled environment, processes can be simplified and valuable data can be obtained for a variety of uses, from tracking medical devices in a hospital, to tracking assets in warehouses, which is the focus of this work. With location data of all assets in a warehouse, it is possible to optimize space and time, which is essential for companies in this field. The work will be done in a warehouse of *Samsung SDS Cello Logistics* where the locations for assets storage are neither fixed nor bounded. In order to solve the problem, taking into account costs, energy efficiency and precision, the use of Bluetooth low energy 5 (BLE) is shown as the most adequate solution when compared to other technologies, allowing for precision of less than 2m and low costs.

**Keywords** – Indoor Location, Bluetooth Low Energy, Warehouse Management System.

# Listas de ilustrações

Figura 1 – Árvore de objetivos do projeto. Em colchetes os tempos de dedicação para cada parte . . . . .	11
Figura 2 – Técnicas localização indoor . . . . .	13
Figura 3 – Angle of Arrival (AoA) . . . . .	14
Figura 4 – Comparação entre técnicas de localização (1) . . . . .	15
Figura 5 – Triangulação, tirado de (2) . . . . .	16
Figura 6 – Trilateração - Caso ideal . . . . .	17
Figura 7 – Trilateração (3) . . . . .	18
Figura 8 – Comparação entre algoritmos de localização (1) . . . . .	19
Figura 9 – Comparação entre tecnologias possíveis para localização. Tirado de (4)	21
Figura 10 – Arquitetura do stack do protocolo Bluetooth. Tirado de (5) . . . . .	23
Figura 11 – Canais do Bluetooth e de Wi-Fi. nota-se que os canais de advertising do BLE ficam em pontos que minimizam a interferência com os de WiFi. Tirado de (5) . . . . .	25
Figura 12 – <i>Frequency Hopping Spread Spectrum</i> para 3 conexões. Tirado de (5) . .	26
Figura 13 – Pacote de Bluetooth (5) . . . . .	27
Figura 14 – Gráfico de dispersão do RSSI medido para diferentes distâncias conhecidas para diferentes canais sem tratamento. (6) . . . . .	29
Figura 15 – Gráfico de dispersão da média do RSSI calculado por meio do algoritmo MRC (6) . . . . .	30
Figura 16 – Esquemático de uma arquitetura 6-portas. Tirado de (7) . . . . .	33
Figura 17 – Novo campo CTE. Tirado de (8) . . . . .	34
Figura 18 – nRF52811. Tirado de (9) . . . . .	37
Figura 19 – nRF52840. Tirado de (10) . . . . .	38
Figura 20 – Porta serial do nRF52840 imprimindo valores de RSSI recebidos . . . . .	39
Figura 21 – Arranjo experimental da prova de conceito . . . . .	40
Figura 22 – Distância Estimada x distância real na prova de conceito . . . . .	41
Figura 23 – Erro absoluto em metros em cada distância . . . . .	41
Figura 24 – Aparência do <i>DEV SmartTag</i> . . . . .	44
Figura 25 – Aparência do <i>DEV SmartScanner</i> . . . . .	44

# **Lista de tabelas**

Tabela 1 – Resultados Obtidos com RSSI . . . . .	42
Tabela 2 – Comparação hardwares comerciais . . . . .	45

# Sumário

<b>Lista de ilustrações</b>	5
<b>Lista de tabelas</b>	6
<b>Sumário</b>	7
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	9
<b>1.1 Necessidade</b>	9
<b>1.2 Problema</b>	10
<b>1.3 Árvore de Objetivos</b>	11
<b>2 ASPECTOS CONCEITUAIS</b>	12
<b>2.1 Técnicas de localização</b>	12
2.1.1 Angle of Arrival	13
2.1.2 Time of Arrival (ToA)	14
2.1.3 Time Difference of Arrival (TDoA)	14
2.1.4 Received Signal Strength Indication (RSSI)	14
2.1.5 Resumo	15
<b>2.2 Algoritmos</b>	15
2.2.1 Triangulação	15
2.2.2 Trilateração	16
2.2.3 Proximidade	18
2.2.4 Scene analysis/fingerprinting	18
2.2.5 Resumo	19
<b>2.3 Tecnologias para localização</b>	19
2.3.1 WiFi	19
2.3.2 Bluetooth	20
2.3.3 ZigBee	20
2.3.4 Ultra-Wideband (UWB)	20
2.3.5 Sinais sonoros e ultrassônicos	21
2.3.6 Resumo	21
<b>3 CONCEITOS UTILIZADOS</b>	22
<b>3.1 Tecnologia de comunicação</b>	22
3.1.1 Protocolo Bluetooth Low Energy	23
<b>3.2 Propriedades do sinal</b>	27
3.2.1 RSSI	27

3.2.2	Angle of Arrival . . . . .	30
3.2.2.1	Introdução . . . . .	30
3.2.2.2	Dificuldades . . . . .	31
3.2.2.3	Algoritmos . . . . .	31
3.2.2.4	Interferômetro de 6-portas . . . . .	33
3.2.2.5	Bluetooth 5.1 . . . . .	34
<b>3.3</b>	<b>Algoritmos</b> . . . . .	<b>35</b>
<b>3.4</b>	<b>Camada de Aplicação</b> . . . . .	<b>35</b>
<b>4</b>	<b>PROVA DE CONCEITO</b> . . . . .	<b>36</b>
<b>4.1</b>	<b>Hardware</b> . . . . .	<b>36</b>
<b>4.2</b>	<b>Programa</b> . . . . .	<b>38</b>
<b>4.3</b>	<b>Arranjo Experimental</b> . . . . .	<b>39</b>
<b>4.4</b>	<b>Resultados</b> . . . . .	<b>40</b>
<b>5</b>	<b>DESCRIÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO</b> . . . . .	<b>43</b>
<b>5.1</b>	<b>Arquitetura do sistema</b> . . . . .	<b>43</b>
<b>5.2</b>	<b>Hardware</b> . . . . .	<b>43</b>
5.2.1	Especificações técnicas . . . . .	45
<b>5.3</b>	<b>Back-end</b> . . . . .	<b>45</b>
<b>5.4</b>	<b>Funcionalidade</b> . . . . .	<b>45</b>
<b>5.5</b>	<b>Resultados</b> . . . . .	<b>45</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>46</b>

# 1 Introdução

A função primária de um armazém é receber mercadorias de uma fonte, guardar até ser requerido, e enviar para o usuário apropriado quando exigido (11). É uma parte fundamental da cadeia de suprimentos de qualquer rede de mercadorias.

Nos últimos anos, os armazéns vêm cada vez mais enfrentando maiores demandas por custo e produtividade. Estão se tornando uma parte vital para muitas empresas, porém sua complexidade também está aumentando. Consequentemente, o planejamento e controle dos processos de um armazém, também conhecido como *warehouse management*, tem se tornado uma tarefa desafiadora (12).

Nesse contexto, diversas soluções estão sendo buscadas para abaixar os custos, aumentar a produtividade, e melhorar o planejamento dos processos. Um ponto de melhoria, é a localização de ativos em um armazém. Com dados precisos da localização de todos os ativos em tempo real é possível utilizar algoritmos que visam melhorar a eficiência do armazém. Os ambientes de armazém, podem ser os mais variados, desde armazéns indoor em ambientes mais controlados, até armazéns outdoor em que espaços são compartilhados entre várias empresas.

Para a realização da localização de produtos em um local indoor e outdoor, diversas tecnologias, técnicas e algoritmos podem ser utilizados, cada um com seus aspectos positivos e negativos, e a escolha de um em detrimento de outro pode levar em conta diversos aspectos. As principais tecnologias utilizadas para a localização são: infravermelho (IR), ultrassom, som audível, sensores magnéticos, sensores óptico, radiofrequência (RF) e luz visível. As tecnologias de RF incluem Bluetooth, banda ultralarga (UWB), wireless sensor network (WSN), rede Local sem fio (WLAN), identificação por radiofrequência (RFID), Near Field Communication (NFC), WiFi, entre outros. Ja as técnicas de estimativa de localização incluem: Angle of Arrival (AOA), Time of Arrival (TOA), Time Difference of Arrival (TDOA) and Received Signal Strength Indication (RSSI). (1, 4)

Essa pesquisa é motivada pela *Samsung SDS Cello Logistics* para a localização de seus ativos em um armazém localizado no Porto de Tubarões no Espírito Santo. Dada a conjuntura do espaço físico de tal porto, somado com os baixos consumos energéticos do Bluetooth, seus baixos custos, e sua alta portabilidade e facilidade de desenvolvimento, tal tecnologia foi escolhida para o desenvolvimento do trabalho, como será demonstrado nas próximas partes.

## 1.1 Necessidade

À medida que mais empresas buscam cortar custos e melhorar a produtividade dentro de seus armazéns e centros de distribuição, a etapa de coleta tem se tornado um caso de es-

tudo cada vez mais detalhado. *Order Picking* (Coleta de pedidos) - o processo de coleta de produtos do estoque em resposta ao pedido de um cliente - é a operação mais trabalhosa em armazéns com sistemas manuais e uma operação muito intensiva em armazéns com sistemas automatizados. Por essas razões, os profissionais de armazenamento consideram a coleta de pedidos como a área de prioridade máxima para melhorias de produtividade (13). Nesse contexto de busca de melhorias para a coleta e consequente aumento de produtividade, se encaixam as necessidades do estudo em questão de criar métodos melhores de localização de produtos em um armazém, de forma a otimizar a coleta e estoque de produtos.

No sistema atual, de estoque e coleta do espaço da Samsung, códigos de barra em localidades fixas, são utilizados para a demarcação da localização em que um produto foi estocado. Entretanto, tal método não está se mostrando efetivo em um porto outdoor, com espaços para armazenamento que podem mudar a cada chegada de um novo contêiner e que estão sujeitos a adversidades climáticas. Tal situação exigiu a busca de novas soluções para a localização de produtos a fim de manter padrões elevados de produtividade.

## 1.2 Problema

O problema consiste em implementar soluções para a localização de ativos em um espaço físico de um armazém. O problema de localização outdoor para espaços sem muitos obstáculos, já tem como padrão a tecnologia de GPS, entretanto, quando se trata de espaços outdoor com muitos obstáculos ou espaços indoor, diversas tecnologias são levantadas com aspectos positivos e negativos (14), porém a escolha de uma em relação a outra depende do problema em questão

Os principais parâmetros para um sistema ideal de localização, incluem o sistema estar disponível atualmente em dispositivos de usuários, ser econômico, ser energeticamente eficiente, possuir uma ampla faixa de recepção, alta precisão de localização, baixa latência e alta escalabilidade (4).

O problema é que cada tecnologia em conjunto com a aplicação a que se destina pode não apresentar uma ou mais das características ideais desejáveis. Assim, nesse trabalho, será encontrado a solução que melhor se adeque aos parâmetros de um sistema de localização ideal para o armazém específico da Samsung em que o trabalho será feito.

Além disso, o sistema proposto deverá ser facilmente integrável com o *warehouse management system* (WMS) em uso no armazém em questão, de forma a minimizar mudanças na infraestrutura do armazém. Grandes mudanças implicam em custos adicionais, o que é um grande problema em termos comerciais.

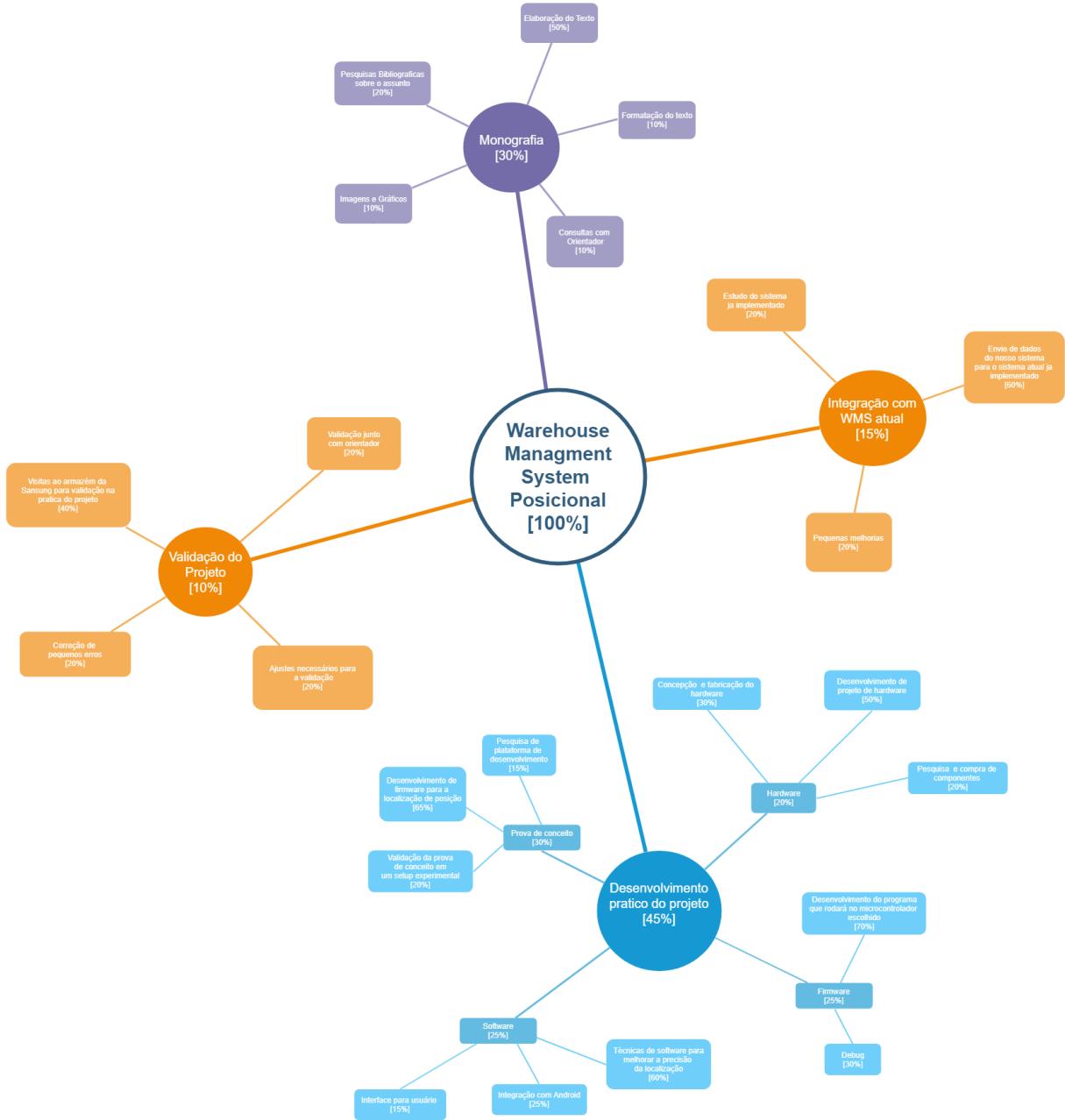


Figura 1 – Árvore de objetivos do projeto. Em colchetes os tempos de dedicação para cada parte

### 1.3 Árvore de Objetivos

Árvore de objetivos: é a representação gráfica do objetivo central do projeto (tronco), dos meios para alcançá-lo (raízes) e dos efeitos positivos que o alcance dos objetivos provoca na população-alvo (galhos e folhas). (15)

Tal ferramenta é importante para definição de objetivos claros a serem seguidos no projeto e auxiliam no desenvolvimento futuro do projeto.

Na figura 1 pode-se ver a árvore de objetivos do presente projeto.

## 2 Aspectos Conceituais

Esta parte se focará nas mais modernas tecnologias e técnicas para a realização da localização de ativos em um ambiente. Em primeiro lugar é importante fazer uma diferenciação entre a localização de ativos em ambientes outdoor e indoor.

A localização indoor é o termo dado para a localização em ambientes com muitos obstáculos, paredes e teto. Em contraste, a localização outdoor, acontece em ambientes abertos com poucos obstáculo e paredes. Justamente, por introduzir obstáculos, a localização indoor apresenta mais desafios em relação à outdoor. O ambiente em que o trabalho será feito, é um porto a céu aberto, entretanto diversos obstáculos e paredes fazem parte desse ambiente, fazendo do problema mais similar com problemas de localização indoor. geralmente, soluções de localização indoor precisam tomar mais cuidado com precisão, economia de energia, alcance limitado e interferências. Aspectos os quais serão necessários no problema em questão. Tais técnicas, em ambientes sem o obstáculo a mais imposto por um teto, podem alcançar resultados ainda melhores. Dessa forma, a partir de agora, o texto se focará mais no estado-da-arte de tecnologias e técnicas desenvolvidas para ambientes indoor que serão as necessárias para esse trabalho.

### 2.1 Técnicas de localização

Existe uma variedade de técnicas e algoritmos para obter informações a partir das propriedades de um sinal recebido por um receptor. Os algoritmos usados em sistemas de localização, traduzem as propriedades de um sinal recebido em distâncias e ângulos, os quais são posteriormente usados para o cálculo da localização real de um determinado objeto (16). Abaixo uma imagem que resume as principais propriedades de sinal analisadas e os principais algoritmos utilizados para a localização:



Figura 2 – Técnicas localização indoor

### 2.1.1 Angle of Arrival

Angle of Arrival (AoA), ou em português, ângulo de chegada é o angulo em que o sinal transmitido chega ao receptor. Abordagens baseadas no AoA, usam matrizes de antenas e exploram a diferença de fase das ondas recebidas em cada elemento dessa matriz. E com tal informação é possível estimar o AoA. Na figura 3 mostra-se uma representação gráfica do processo.

Essa abordagem para estimativa do ângulo de chegada do sinal, geralmente envolve um hardware mais sofisticado quando em comparação com outras propriedades do sinal. Entretanto, com a informação do ângulo de chegada, algoritmos conseguem estimar uma localização com muito mais precisão.(4)

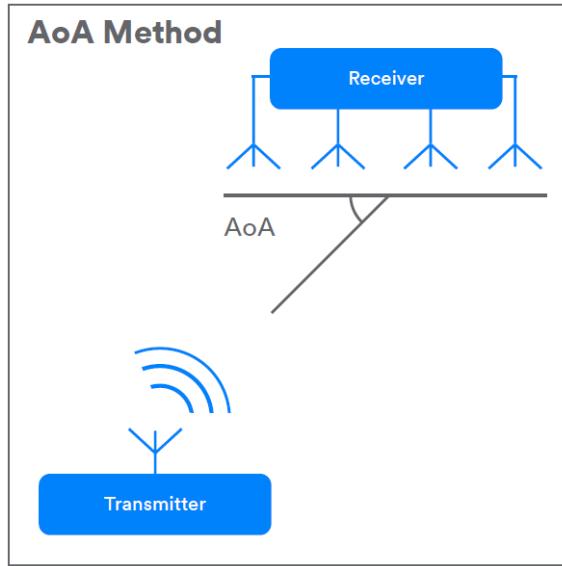


Figura 3 – Angle of Arrival (AoA)

### 2.1.2 Time of Arrival (ToA)

Time of Arrival (ToA) também chamado de Time of Flight (ToF) é uma técnica que explora o tempo transcorrido para o sinal emitido pelo transmissor chegar ao receptor. Multiplicando-se esse tempo pela velocidade de propagação da luz  $c = 3 \cdot 10^8$  é possível achar a distância entre o sinal recebido e o sinal transmitido. Entretanto essa técnica ainda não é muito precisa, devido as dimensões muito pequenas de tempo envolvidas em aplicações de curta distância (17).

### 2.1.3 Time Difference of Arrival (TDoA)

Time Difference of Arrival (TDoA) se baseia na diferença nos tempos de propagação de diferentes transmissores, medidos em um receptor, se diferenciando do ToA em que o tempo absoluto é medido. Por essa razão sua complexidade é menor. nesse método pelo menos 3 transmissores são necessários para determinar a localização do receptor resolvendo-se um conjunto de 3 equações de hipérboles (4)

### 2.1.4 Received Signal Strength Indication (RSSI)

Received Signal Strength Indication (RSSI) é a medida do nível de potência do sinal recebido em uma infraestrutura de radiofrequênci a e pode ser usado para estimativa de distâncias.

Usando um modelo simples de propagação de perda de trajetória, a distância d entre

transmissor e receptor pode ser estimada a partir de (5.1) como:

$$RSSI = -10n \log_{10}(d) + A \quad (2.1)$$

Em que n é o expoente de perda do ambiente (que varia de 2 em um espaço aberto a 4 em ambientes indoor) e A é o valor do RSSI em uma distância de referência do receptor

Entretanto, em ambientes indoor a medição do RSSI e o posicionamento podem ter suas precisões bem reduzidas. (1)

### 2.1.5 Resumo

Pode se construir uma tabela indicando os principais aspectos dos métodos citados:

Signal property	Measurement metric	Pros	Cons
Angle of Arrival (AOA)	Angle-based	High accuracy at room level	Complex, expensive and low accuracy at wide coverage
Time of Arrival (TOA)	Distance-based	High accuracy	Complex and expensive
Time Difference of Arrival (TDOA)	Distance-based	High accuracy	Expensive
Received Signal Strength Indication (RSSI)	Signal-based (RSS)	Low cost	Medium accuracy

Figura 4 – Comparação entre técnicas de localização (1)

## 2.2 Algoritmos

Algoritmos posicionais especificam como calcular a posição de um objeto alvo. Eles traduzem as propriedades dos sinais obtidos em distâncias e ângulos. Os principais algoritmos para localização atualmente são os de triangulação, trilateração, proximidade e o de *scene analysis/fingerprinting*.

### 2.2.1 Triangulação

Triangulação usa as propriedades geométricas de triângulos para estimar a distância ao alvo por meio da computação de medidas angulares de dois pontos fixos de referência. A posição de um objeto é encontrada na intersecção de dois pares de linhas de direção de ângulo. Nesse caso, a propriedade de sinal que está diretamente envolvida é o AoA.

O processo pode ser exemplificado nas imagens abaixo em que A e B são pontos conhecidos e M é o ponto cujas coordenadas se deseja obter.

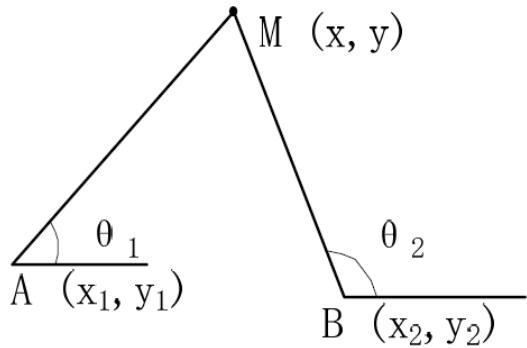


Figura 5 – Triangulação, tirado de (2)

Para se obter as coordenadas x e y do ponto M, o seguinte equacionamento é possível a partir dos pontos conhecidos, em que  $\theta_1$  é o ângulo medido entre A e M e  $\theta_2$  o ângulo entre B e M

$$\begin{bmatrix} \tan(\theta_1) \\ \tan(\theta_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (y - y_1)/(x - x_1) \\ (y - y_2)/(x - x_2) \end{bmatrix}$$

Resolvendo-se essa equação, tem-se os seguintes valores para x e y:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{y_2 - y_1 + x_1 \tan(\theta_1) - x_2 \tan(\theta_2)}{\tan(\theta_1) - \tan(\theta_2)} \\ \frac{y_2 / \tan(\theta_2) - y_1 / \tan(\theta_1) + x_1 - x_2}{1 / \tan(\theta_2) - 1 / \tan(\theta_1)} \end{bmatrix}$$

Muitas vezes, tem-se a disponibilidade de informação do ângulo que M faz com mais de dois pontos conhecidos. Nesses casos é possível ter uma maior precisão na localização do que com o uso de somente dois pontos.

Com um número N de posições conhecidas que localizaram M, tem-se um número  $C_N^2$  de estimativas de posição. A partir dessas  $C_N^2$  estimativas, há algoritmos para tratar essas estimativas de forma a chegar em maior precisão. A referência (2) trata de alguns desses algoritmos, tais como o de média simples, método dos mínimos quadrados ponderados e o método baseado em cluster.

Resumidamente o estudo chega a conclusão de que enquanto o método das médias é o mais simples e direto, sua precisão não é muito alta. O método dos mínimos quadrados ponderados, não obteve precisão muito superior ao da média simples e possui uma complexidade maior. Já o baseado em cluster é o que apresenta maior precisão, tendo uma complexidade também maior.

## 2.2.2 Trilateração

A trilateração é um algoritmo para estimar a localização de posições desconhecidas baseado nas distâncias relativas para pontos conhecidos (3). Nesse método alguma propriedade do sinal fornece a distância relativa aos pontos conhecidos.

O processo pode ser exemplificado nas imagens abaixo em que as posições A, B e C são conhecidas e a D é desconhecida. Há 2 casos principais que podem acontecer dependendo das distâncias relativas obtidas:

1. Círculos se interceptam em um único ponto:

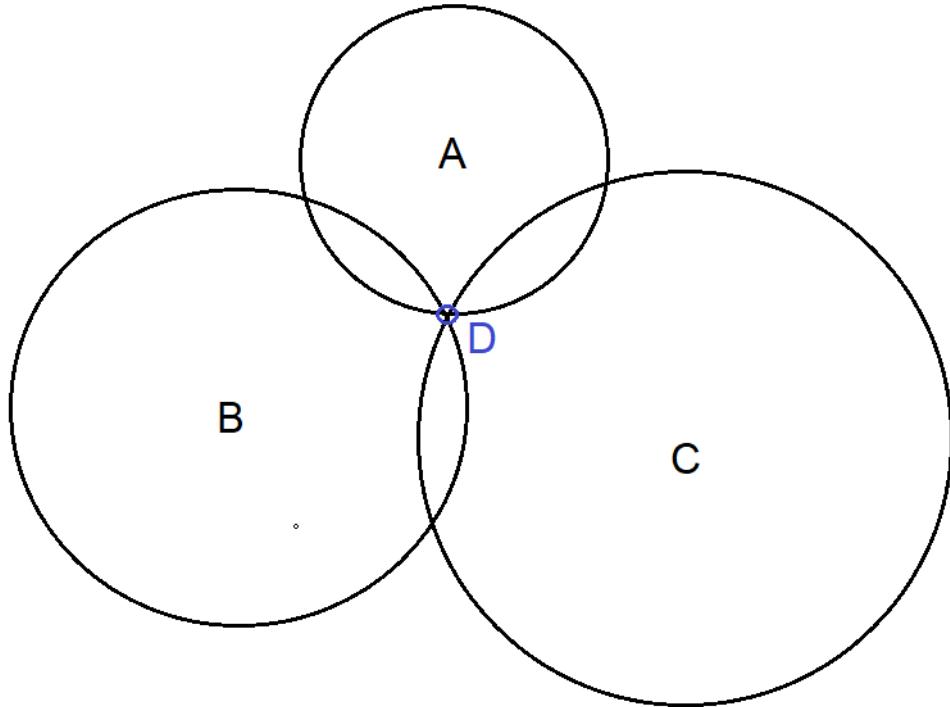


Figura 6 – Trilateração - Caso ideal

As coordenadas podem ser denominadas de  $(x_n, y_n)$  em que n pode ser A, B, C ou D dependendo do ponto em questão. Dessa forma tem-se as seguintes equações:

$$\begin{cases} \sqrt{(x - x_a)^2 + (y - y_a)^2} = d_a \\ \sqrt{(x - x_b)^2 + (y - y_b)^2} = d_b \\ \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2} = d_c \end{cases}$$

Resolvendo-se a equação, obtém-se:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2(x_a - x_c) & 2(y_a - y_c) \\ 2(x_b - x_c) & 2(y_b - y_c) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x_a^2 - x_c^2 + y_a^2 - y_c^2 + d_c^2 - d_a^2 \\ x_a^2 - x_c^2 + y_b^2 - y_c^2 + d_c^2 - d_b^2 \end{bmatrix}$$

2. Círculos se interceptam em uma região e não em um único ponto. Neste caso, pode-se achar o centroide do triângulo formado pelas três intersecções denominadas de  $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$ .

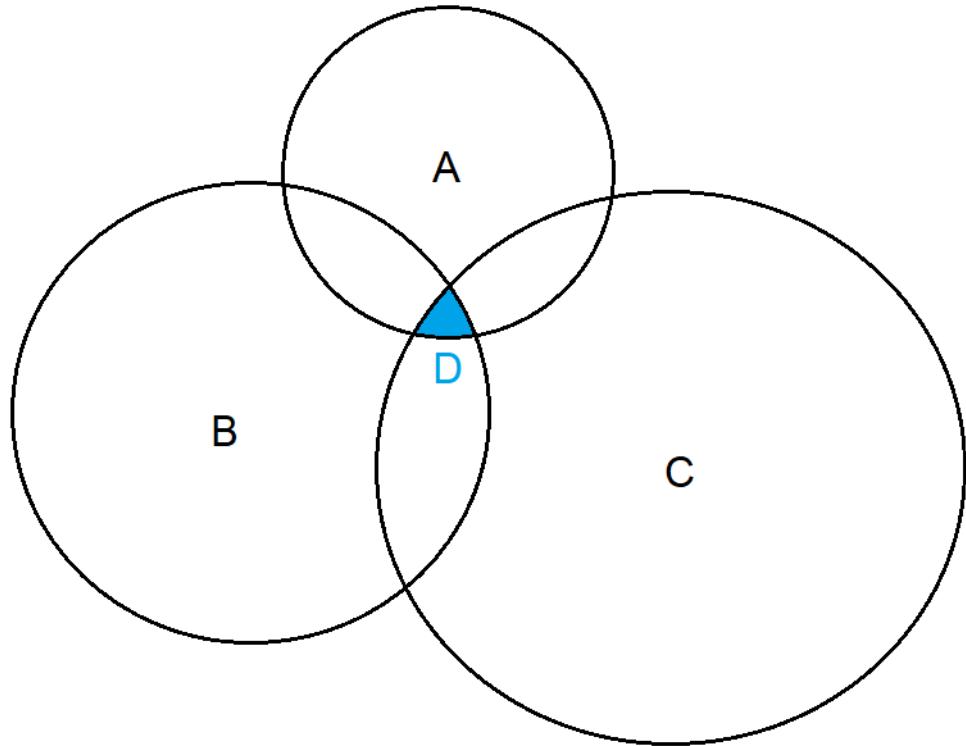


Figura 7 – Trilateração (3)

Em que as cordenadas x e y, são dadas por:

$$x = \frac{P1_x + P2_x + P3_x}{3} \quad (2.2)$$

$$y = \frac{P1_y + P2_y + P3_y}{3} \quad (2.3)$$

### 2.2.3 Proximidade

É o algoritmo mais simples, entretanto só é utilizado para saber a distância de um objeto de interesse e não sua localização. Por tanto foge do escopo do presente trabalho.

### 2.2.4 Scene analysis/fingerprinting

Esses métodos se baseiam em coletar préviamente um conjunto de informações do sinal que são únicas a uma determinada localidade (*fingerprint*) e posteriormente comparar com

o *fingerprint* do alvo. Com técnicas modernas de *machine learning* é possível encontrar padrões no *fingerprint* de determinado sinal e comparar com posições armazenadas em um banco de dados que possuem *fingerprints* similares (18).

Algoritmos baseados nessa técnica são computacionalmente mais caros. Dessa forma o hardware se torna mais complexo. Mas por outro lado, grandes performances podem ser obtidas.

### 2.2.5 Resumo

Uma tabela pode ser construída comparando os principais pontos positivos e negativos de cada um desses algoritmos.

Positioning algorithm	Signal property	Pros	Cons
Triangulation	AOA	Simple, low-cost and high accuracy at room level	Complex, expensive and low accuracy at wide coverage
Trilateration	TOA/TDOA	High accuracy	Complex and expensive
Proximity	RSSI	High accuracy	Complex and expensive
Scene analysis/fingerprinting	RSSI	High performance	Complex, expensive, medium accuracy and time consuming

Figura 8 – Comparação entre algoritmos de localização (1)

## 2.3 Tecnologias para localização

Diversas tecnologias têm-se mostrado úteis na função de localização indoor, porém cada uma delas tem alguns aspectos positivos e negativos. A seguir se mostrará o estado-da-arte para cada tecnologia de localização. Os principais métodos se baseiam em radio-frequência (como Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, RFID e Ultra Wide Band ), entretanto métodos com luz, visível, ondas acústicas também podem ser utilizados.

### 2.3.1 WiFi

Wifi opera na banda ISM (Industrial, Scientific and Medical) utilizando principalmente a banda de 2.4GHz. É usada primariamente para a conexão com a internet e tem um alcance que pode chegar a 1Km. A maioria dos dispositivos portáteis são compatíveis com a tecnologia, assim soluções com Wifi não necessita grandes mudanças de infraestrutura. No entanto, interferências na banda ISM acabam afetando a precisão de localização. Além disso, não sendo o foco primário do WiFi a localização, mas sim a comunicação, faltam algoritmos eficientes para a localização.

Alguns trabalhos foram feitos demonstrando as capacidades de localização com WiFi a exemplo de (19)

### 2.3.2 Bluetooth

Bluetooth é um padrão de tecnologia sem fio para trocar informação entre dispositivos móveis e fixos a curtas distâncias. Usa ondas de rádio na banda ISM de 2.4 a 2.485GHz. Bluetooth Special Interest Group (SIG) é a organização responsável pelos padrões da tecnologia.

A última especificação do bluetooth, conhecida como Bluetooth 5.1 foi lançado em Janeiro de 2019, permite alcances de até 350m, velocidades de 2Mbit/s e possui baixo consumo energético (20).

A maioria dos sistemas atuais de localização com bluetooth utilizam somente RSSI para estimar a posição, tais métodos atingem precisão entre 1m a 10m. Entretanto, a última especificação do Bluetooth, introduziu AoA, e testes iniciais mostram que a precisão para a localização utilizando algoritmos adequados pode chegar na ordem de centímetros (21).

Outro ponto importante do Bluetooth é sua alta compatibilidade com dispositivos atuais. Devido a todos esses fatores, estima-se que até 2022 400 milhões de dispositivos de localização baseados em bluetooth sejam vendidos por ano (21).

Um ponto negativo, é que o sinal de RSSI é reportado ao usuário com um intervalo de tempo grande, o que dificulta a localização em tempo real com tal tecnologia.

### 2.3.3 ZigBee

ZigBee é uma tecnologia sem fio desenhada para ser de baixo custo, ter baixa velocidade de dados e ter eficiência energética. Apesar de ser favorável para a localização em redes sem fio, não está disponível na maioria de dispositivos atuais, fazendo a tecnologia não ser favorável para localização indoor. (4)

### 2.3.4 Ultra-Wideband (UWB)

Ultra-wideband é uma tecnologia de comunicação que trabalha com bandas muito largas quando em comparação com outras tecnologias similares. As bandas passam de 500 MHZ. Tais bandas permitem uma série de vantagens como uma maior confiabilidade, já que o sinal possui diversas componentes de frequência, o que aumenta a possibilidade de que pelo menos algumas passem por obstáculos (22). Além disso, devido aos pulsos de baixa duração (< 1ns) permitem métodos precisos de localização utilizando ToF, com precisão de centímetros. Desse modo é uma tecnologia promissora para a localização indoor.

Entretanto, o progresso lento do padrão de UWB tem limitado a adoção em larga escala da tecnologia.

### 2.3.5 Sinais sonoros e ultrassônicos

Utiliza-se sinais acústicos para a localização, de forma similar as tecnologias de radiofrequência. A principal técnica utilizada é a de ToF, como as ondas de som se propagam a velocidades menores que as eletromagnéticas, tal método apresenta menores desafios em sua implementação. A precisão pode chegar na ordem de centímetros (23).

Os maiores problemas são que na faixa audível potências baixas tem que ser utilizadas para não causar uma poluição sonora. E a faixa audível é a com mais compatibilidade para microfones dos atuais *smartphones*. Já para ondas ultrassônicas, o maior problema, consiste no fato de que a velocidade do som muda de acordo com a temperatura e umidade. Além disso, para ondas sonoras, sons ambientais podem causar uma grande interferência no sistema.

### 2.3.6 Resumo

A seguinte tabela foi tirada de (4) com um resumo dos principais pontos de cada tecnologia. Algumas tecnologias não foram citadas em detalhes no presente texto:

Technology	Maximum Range	Maximum Throughput	Power Consumption	Advantages	Disadvantages
IEEE 802.11 n [67] 802.11 ac 802.11 ad	250 m outdoor 35 m indoor couple of meters	600 Mbps 1.3 Gbps 4.6 Mbps	Moderate Moderate Moderate	Widely available, high accuracy, does not require complex extra hardware	Prone to noise, requires complex processing algorithms
UWB [68]	10-20m	460 Mbps	Moderate	Immune to interference, provides high accuracy,	Shorter range, requires extra hardware on different user devices, high cost
Acoustics	Couple of meters		Low-Moderate	Can be used for proprietary applications, can provide high accuracy	Affected by sound pollution, requires extra anchor points or hardware
RFID [69]	200 m	1.67 Gbps	Low	Consumes low power, has wide range	Localization accuracy is low
Bluetooth [70]	100m	24 Mbps	Low	High throughput, reception range, low energy consumption	Low localization accuracy, prone to noise
Ultrasound [71]	Couple-tens of meters	30 Mbps	Low-moderate	Comparatively less absorption	High dependence on sensor placement
Visible Light [72]	1.4 km	10 Gbps [73]	Relatively higher	Wide-scale availability, potential to provide high accuracy, multipath-free	Comparatively higher power consumption, range is affected by obstacles, primarily requires LoS
SigFox [49]	50 km	100 bps	Extremely low	Wide reception range, low energy consumption	Long distance between base station and device, sever outdoor-to-indoor signal attenuation due to building walls
LoRA [49]	15 km	37.5kbps	Extremely low	Wide reception range, low energy consumption	Long distance between base station and device, sever outdoor-to-indoor signal attenuation due to building walls
IEEE 802.11ah [49]	1km	100 Kbps	Extremely low	Wide reception range, low energy consumption	Not thoroughly explored for localization, performance to be seen in indoor environments
Weightless	2 km for P, 3 km for N, and 5 km for W	100 kbps for N and P, 10 Mbps for W	Extremely low	Wide reception range, low energy consumption	Long distance between base station and device, sever outdoor-to-indoor signal attenuation due to building walls

Figura 9 – Comparação entre tecnologias possíveis para localização. Tirado de (4)

# 3 Conceitos Utilizados

## 3.1 Tecnologia de comunicação

A partir de todo o levantamento teórico e considerando-se o contexto do problema, a tecnologia que mostrou mais destaque, foi o Bluetooth.

Mais especificamente, a introdução do Bluetooth Low Energy (BLE) tornou tal tecnologia bem favorável ao uso para localização, devido ao seu baixo consumo energético, mantendo características similares de comunicação.

As principais características da escolha podem ser encontradas abaixo:

- **Economia e eficiência energética**

Uma das principais vantagens da tecnologia Bluetooth para a localização indoor é sua alta eficiência energética. O custo da instalação de um sistema com BLE é baixo quando em comparação de outras tecnologias já que um dispositivo equipado com um chip de BLE pode de 1 a 2 anos com uma única bateria moeda (*coin cell*). No contexto de um armazém, a economia de custos é fundamental.

- **Acessibilidade e Escalabilidade**

Como mencionado, estima-se que até 2022 400 milhões de dispositivos de localização baseados em Bluetooth sejam vendidos por ano (21). Fazendo-o uma tecnologia prontamente acessível e com vários recursos de desenvolvimento.

Para o contexto do projeto, uma rápida implementação é desejável. Além disso, estar presente em dispositivos atuais é um requisito, dado que se deseja a instalação do sistema com o mínimo de mudança na infraestrutura atual. Bluetooth está presente na maioria dos telefones celulares, os quais poderiam se integrar ao sistema prontamente.

- **Precisão**

A precisão necessária é tal que dois SKUs (Unidade de Manutenção de Estoque) em localidades diferentes possam ser diferenciados. Para isso, uma precisão de até 1m é desejada.

Com a tecnologia Bluetooth e os algoritmos corretos tal precisão pode ser alcançada.

- **Latência**

A latência no Bluetooth é elevada quando comparada à outras tecnologias. Para aplicações que precisão de localização em tempo real pode ser uma desvantagem.

Entretanto no projeto em questão os ativos ficam estáticos no armazém. E a latência não se torna um problema tão grande.

Antes de entrar no nas especificidade das propriedades do sinal utilizadas, cabe aqui um detalhamento do protocolo de Bluetooth Low Energy (BLE).

### 3.1.1 Protocolo Bluetooth Low Energy

O Bluetooth Low Energy (BLE) foi introduzido na especificação 4.0 do padrão IEEE 802.15.1 pelo Bluetooth Special Interest Group (Bluetooth SIG). É classificado como uma rede de acesso pessoal sem fio (WPAN) de baixo consumo, latência e custo (8). A arquitetura do stack do protocolo Bluetooth pode ser dividido em várias camadas conforme a imagem 10. Cada camada tem uma função específica. Para o trabalho as partes mais relevantes do funcionamento do protótipo são as partes da Camada Física (PHY), Camada de Enlace (LL) e do Generic Access Profile (GAP).

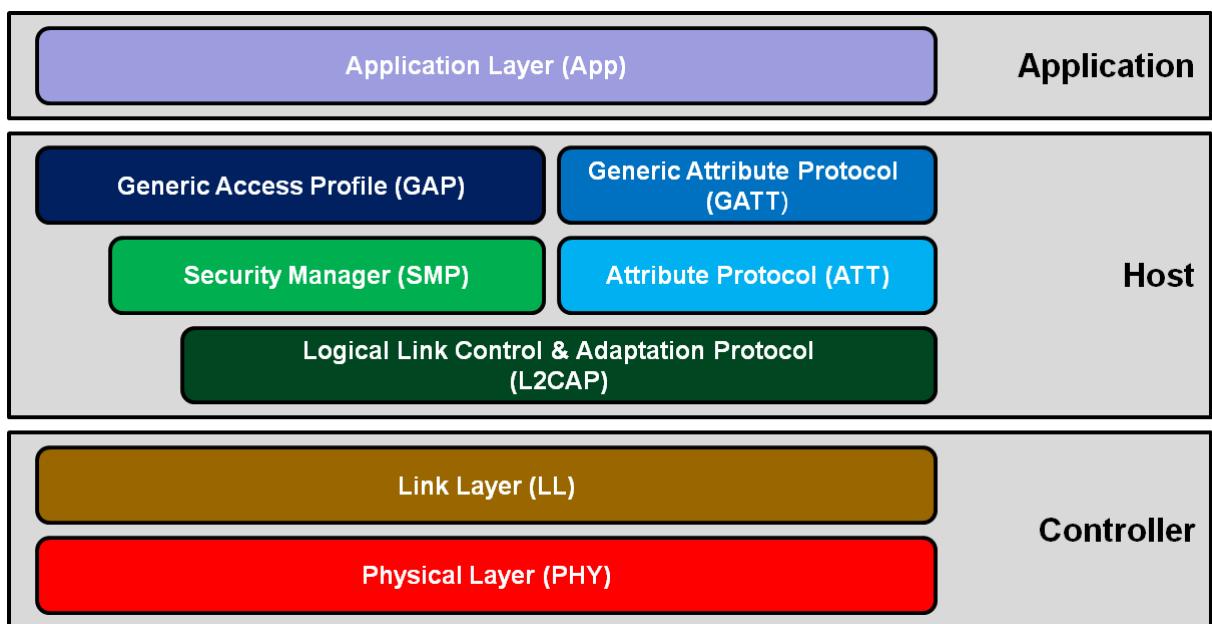


Figura 10 – Arquitetura do stack do protocolo Bluetooth. Tirado de (5)

- **Generic Access Profile (GAP)**

As formas de operação do BLE são definidas pelo General Access Profile (GAP) e este perfil determina que um dispositivo possui 4 formas de operação: Broadcaster, Observer, Slave e Central.

Como Broadcaster, o dispositivo opera somente como transmissor de dados, enviando pacotes de dados periodicamente, a cada ação denominada Advertising, que

podem conter informações sobre o dispositivo e indicam a presença de um dispositivo num dado local. Quando um dispositivo opera apenas como broadcaster, ele não está aberto a receber conexões.

Como Observer, o dispositivo opera somente como um receptor de dados, recebendo apenas os pacotes de advertising enviados por outros dispositivos BLE.

Como Peripheral, o dispositivo suporta estabelecer uma conexão como escravo (slave). Para outro dispositivo detectar sua presença e iniciar uma conexão, é necessário que o peripheral opere antes como um broadcaster, indicando sua presença.

Como Central, o dispositivo suporta múltiplas conexões como mestre (master) e é sempre o responsável por iniciar as conexões com um peripheral. Para detectar um peripheral, é necessário que a central opere como um observer para detectar a presença de outros dispositivos.

Um dispositivo é capaz de suportar múltiplas formas de operação ao mesmo tempo (8).

- **Camada Física (Physical Layer - PHY)**

A camada física contém o circuito analógico responsável pela transmissão de símbolos digitais pelo ar. É a camada mais baixa do stack e provém seus serviços para a camada de enlace (link layer).

Nessa camada, o BLE opera na banda 2.4GHz ISM (Industrial, Scientific, and Medical), contando com 40 canais de radio-frequências espaçados com 2Mhz entre si. Existem dois tipos de transmissão: a transmissão de dados, que é feita em 37 dos canais disponíveis com a capacidade de transmissão de 1Mbits, realizada pelos dispositivos operando como central ou com peripheral; e o advertising, que é feito nos outros 3 canais restantes com as frequências de 2402MHz, 2426MHz e 2480MHz, que é realizado nos dispositivos operando como broadcaster. Esses são os canais 37, 38 e 39.

Esses canais foram escolhidos propositalmente para diminuir a interferência com outros sinais da banda ISM, tais como os de Wi-fi (IEEE 802.11).

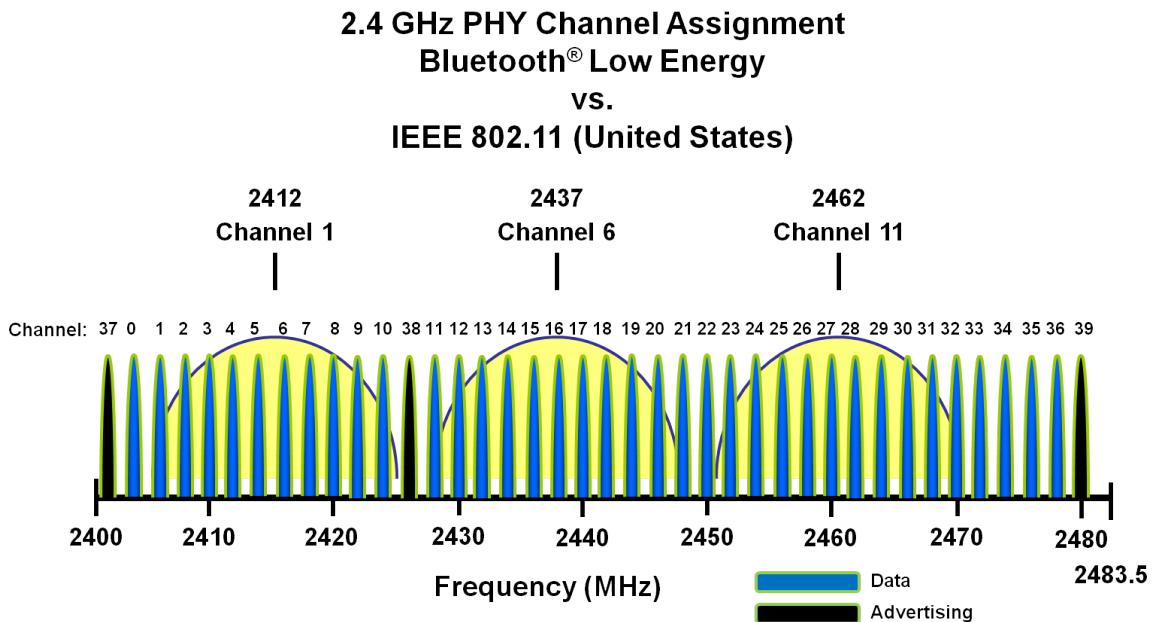


Figura 11 – Canais do Bluetooth e de Wi-Fi. nota-se que os canais de advertising do BLE ficam em pontos que minimizam a interferência com os de WiFi. Tirado de (5)

Enquanto o modo de advertising utiliza os canais com menos interferencia da banda ISM, no modo conectado, o algoritmo FHSS (*Frequency-hopping spread spectrum*) é utilizado para diminuir interferências.

É um algoritmo simples e pseudo-aleatório que dita qual vai ser o próximo canal que o BLE fará a transmissão de dados. Esse canal é alternado entre os 37 possíveis canais o que faz um distribuição de dados sobre eles mais igualitaria diminuindo interferências. Tanto o dispositivo oprando como peripheral quanto o central possuem acesso a esse algoritmo, sabendo qual vai ser o próximo canal em que se dará a comunicação.

O próximo canal é dado pela seguinte formula:

$$f_{n+1} = (f_n + hop) \bmod 37 \quad (3.1)$$

Em que  $f_n$  é o canal atual da comunicação,  $f_{n+1}$  é o próximo e  $hop$  é um valor que pode mudar entre 5 e 16 e é definido no momento em que uma conexão é estabelecida.

O diagrama abaixo mostra que esse algoritmo provém um método robusto para manter uma conexão mesmo na presença de de interferências ou outros dispositivos de rádios no alcance do Bluetooth. No diagrama há 3 conexões de Bluetooth diferentes e o do 3 link está destacado para claridade.

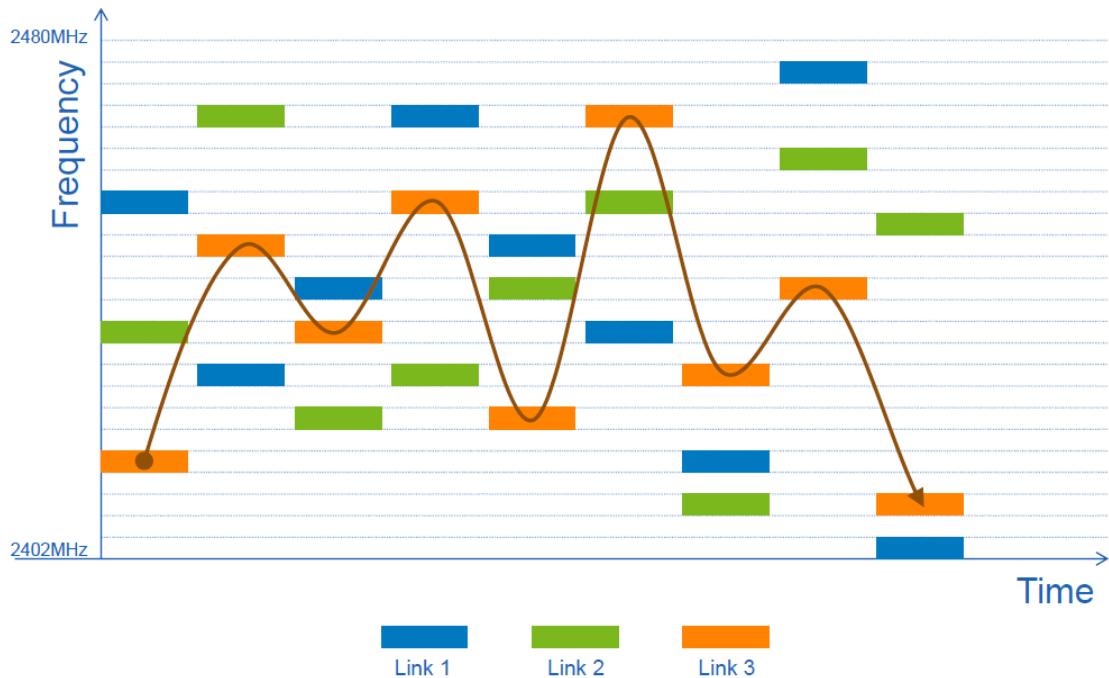


Figura 12 – *Frequency Hopping Spread Spectrum* para 3 conexões. Tirado de (5)

- **Camada de Enlace (Link Layer - LL)**

A Link Layer, é a responsável direta pela comunicação com a camada física. Ela é a responsável pelo advertising, o scanning, e criar e manter as conexões. Ele define quem inicia uma conexão, quando um dispositivo se conecta a outra ou quando fica em modo de stand-by. Os pacotes padrão de Bluetooth também são especificados nessa camada.

Os pacotes de Bluetooth são constituídos por 1 byte de preâmbulo, 4 bytes de endereço, 2-255 bytes chamados de PDU (Packet Data Unit) e 3 de CRC (Cyclic redundancy check), como visto na imagem abaixo:

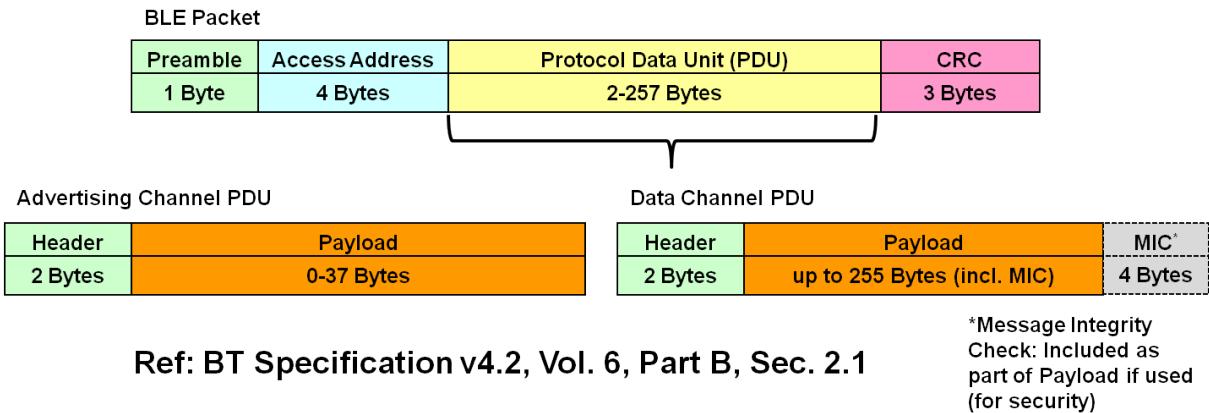


Figura 13 – Pacote de Bluetooth (5)

O PDU é a parte da mensagem propriamente dita, constituída de 2 bytes de cabeçalho seguidos de até 255 bytes de payload no modo conectado e até 37 bytes no modo de advertising.

Para economizar energia o hardware entra em modo de sleep entre as transmissões. Além disso, um intervalo para transmissão de pacotes de advertising pode ser escolhido entre 20ms e 10.24 segundos. Quanto maior o intervalo, maior a economia de energia, porém menos possibilidade de uso em tempo real.

## 3.2 Propriedades do sinal

Os principais algoritmos mencionados anteriormente exigem para sua implementação uma distância conhecida e um ângulo conhecido para um ponto de referência. No presente trabalho, será utilizado o RSSI como método principal para estimar a distância.

Quando um chip de Bluetooth recebe o sinal ele é capaz de retornar o valor da intensidade desse sinal, então a obtenção do RSSI é direta e não exige nenhum hardware adicional. Apesar de não ser o método mais preciso para estimar distância, seu custo benefício é alto.

Já para estimar o ângulo, o angle of arrival de um sinal poderia ser utilizado. Tal propriedade em conjunto com a de intensidade do sinal permite que algoritmos estimem uma localização com uma precisão maior quando em comparação a algoritmos que utilizam apenas a intensidade do sinal. Assim, apesar de necessitar de um hardware mais complexo, há um ganho significativo.

### 3.2.1 RSSI

O RSSI, como uma propriedade bruta do sinal adquirida pelo stack de Bluetooth, fornece uma precisão de menos de 10m. Valor relativamente alto para a realização de localização

indoor. Entretanto, é possível melhor essa precisão com algumas técnicas, em hardware, firmware e software.

Na aquisição do sinal, foi implementado uma técnica para a obtenção da intensidade do sinal em cada um dos três canais de advertising (canal 37, canal 38 e canal 39) separadamente, em contraste com a abordagem clássica de obter o RSSI de todos os canais de advertising simultaneamente, o que permite uma maior precisão no uso do RSSI. A dificuldade desse método aparece porque o padrão BLE nativo, não provém uma API para recuperar informação dos canais de advertising na recepção dos pacotes transmitidos, assim pequenos ajustes no stack de bluetooth devem ser feitos (24).

Essa técnica melhora a precisão do RSSI em relação com a obtenção de todos os sinais simultaneamente pois assim é possível fazer uma análise personalizada para cada um dos canais, mitigando efeitos de interferências entre os canais, efeitos de *fading* e eventuais erros na transmissão de dados (6).

Uma vez coletada a informação dos canais separadamente, deve-se tratá-los adequadamente. Dependendo da situação, uma das formas de tratamento a seguir foi utilizadas :

- Utilizar dados somente do canal que está fornecendo o maior valor de RSSI. O canal que é considerado como dando a maior precisão é o que fornece maior RSSI nesse caso:

$$RSSI_{max} = \max(RSSI_{ch37}, RSSI_{ch38}, RSSI_{ch39}) \quad (3.2)$$

- Utilizar a média dos valores obtidos em todos os canais. Usando a média dos três canais, eventuais erros em um canal tem seu efeito minimizado:

$$RSSI_{average} = \frac{1}{3} \sum_{i=37}^{39} RSSI_{chi} \quad (3.3)$$

- Obter o valor do RSSI pela combinação de razão máxima (*Maximum Ratio Combining* - MRC). Essa abordagem coloca peso nos canais de forma que a combinação resultante dê uma ênfase maior para os canais com maior leitura de RSSI do que para os canais com menor leitura, porém os com menor leitura ainda são levados em conta:

$$RSSI_{MRC} = \sum_{j=37}^{39} \frac{RSSI_{chj} - RSSI_{min}}{\sum_{i=37}^{39} RSSI_{chi}} RSSI_{chi} \quad (3.4)$$

Em que o valor de  $RSSI_{min}$  foi escolhido de acordo com a mínima sensibilidade do módulo bluetooth utilizado.

A partir do valor de RSSI que foi estimado com base no RSSI dos três canais, utilizou-se a triangulação para a determinação da posição de acordo com as equações de 2.2.2.

Nas imagens 14 e 15 tiradas de (6), é possível perceber a diferença que a leitura separada dos canais pode fazer. Na imagem 14, tem-se a leitura bruta dos valores dos canais para 500 medições, nessa caso há uma alta dispersão dos dados para um mesma distância, demonstrando a necessidade de algum tipo de tratamento dos dados. Na imagem 15, utilizou-se o método do MRC descrito acima. Neste caso, há uma flutuação bem menor dos dados, o que é crítico para uma localização precisa.

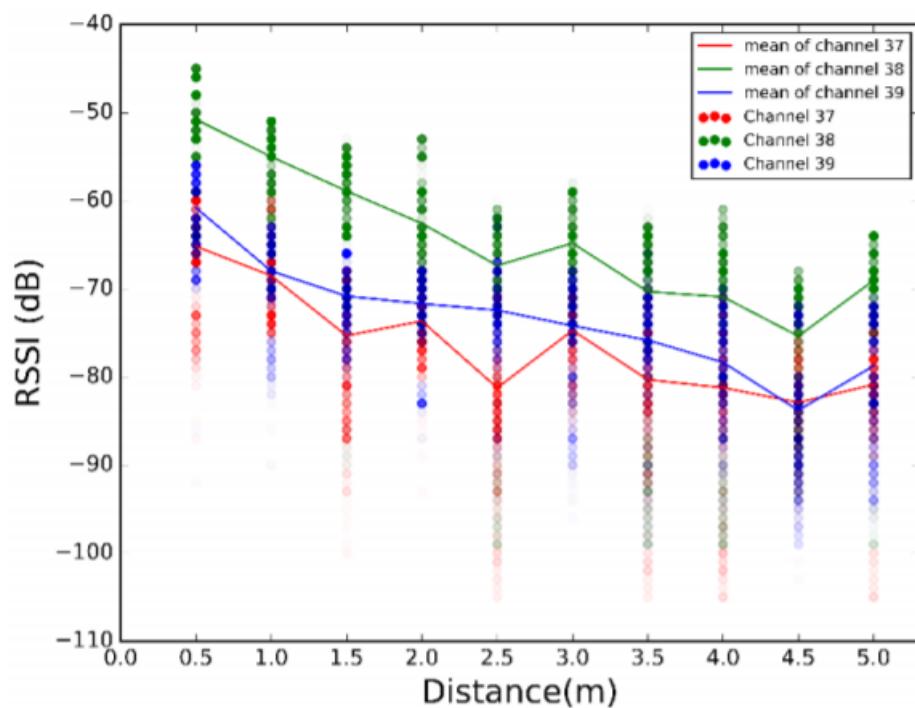


Figura 14 – Gráfico de dispersão do RSSI medido para diferentes distâncias conhecidas para diferentes canais sem tratamento. (6)

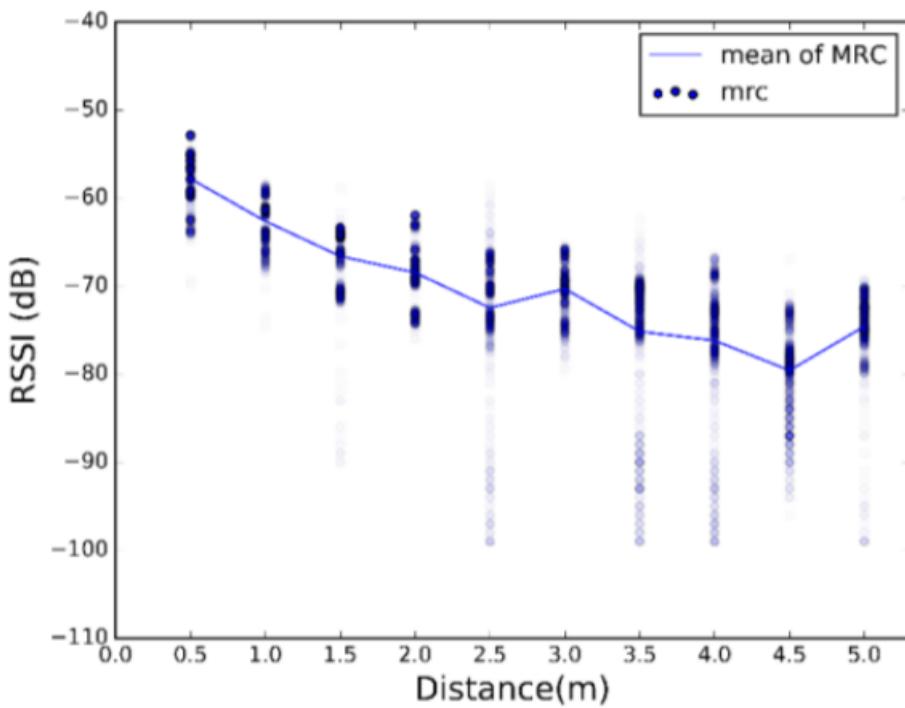


Figura 15 – Gráfico de dispersão da média do RSSI calculado por meio do algoritmo MRC (6)

### 3.2.2 Angle of Arrival

#### 3.2.2.1 Introdução

O Angle of Arrival (Ângulo de Chegada), foi detalhado em 2.1.1, e é uma propriedade capaz de incrementar bastante a precisão da localização indoor. Alguns estudos alegam que é possível obter precisão de centímetros usando essa propriedade do sinal com os algoritmos adequados (21). O problema dessa abordagem entra na grande dificuldade da realização desses algoritmos que permitem uma estimativa precisa de ângulo.

Para o trabalho, a abordagem de AoA não foi implementada, dado que o RSSI separado por canais forneceu uma precisão aceitável para a localização e a abordagem profunda da implementação algoritmos para estimar bem o AoA acabaria fugindo do escopo do projeto, entretanto, dada sua tamanha importância na melhoria de precisão e nos futuros trabalhos de localização indoor, será dado uma explicação da teoria por trás da obtenção do angulo de chegada do sinal de bluetooth e como esse ângulo pode fornecer a posição do que se deseja localizar.

Em primeiro lugar, para se obter a direção de um sinal é necessário um array de antenas, responsável por extrair a informação de ângulo do sinal recebido.

Esse array de antenas pode estar ou no dispositivo a ser localizado ou no localizador. No caso de o dispositivo a ser localizado possuir um array de antenas para estimar o ângulo de chegada o termo utilizado é AoA (Angle of arrival), já no outro caso o processo

é chamado de AoD (Angle of Departure). Os dois casos utilizam os mesmos princípios e podem ser mais ou menos convenientes em cassos específicos. (25) Aqui será referido o AoA, porém a teoria é a mesma para o AoD.

Para longas distancias a onda de rádio transmitida pode ser vista como uma onda planar ao invés de esférica. Se essa onda se propagar na direção normal do array de antenas do receptor cada uma das antenas do array vai receber a mesma fase da onda. Entretanto, quando se quer obter o angulo de um sinal, evita-se deixar nessa posição, de tal forma que cada antena do array de antenas recebe a onda com uma fase diferente. Essa informação de diferença de fase faz com que seja possível estimar o ângulo de chegada de um sinal.

Na literatura essas amostras de diferentes fases do sinal pelo array de antenas são chamados de "IQ-Samples" (In-phase and Quadratura-phase samples). Para a maioria dos algoritmos de estimativa de ângulo por meio dos IQ-Samples é necessário uma defasagem máxima de 90 graus entre as amostras. Considerando-se a velocidade da luz como  $300.000 km/s$  e a frequência do sinal do bluetooth aproximadamente  $2.4 GHz$  para uma defasagem de 90 graus é necessário um espaçamento L máximo de  $L = (3 * 10^8) / (2.4 * 10^9) = 0.125 m$ . Já o espaçamento mínimo é limitado pela tecnologia e não há um limite teórico.

### 3.2.2.2 Dificuldades

Os desafios técnicos para a obtenção do ângulo por meio do array de antena se deve ao fato de que os ambientes onde se realizará a amostragem não são ideais. O que faz com que haja sinais "multi-path" que são basicamente uma versão atrasada do mesmo sinal, por reflexões no ambiente, por exemplo. Ou ainda ruídos no ambiente que não podem ser isolados. Por último tem-se o problema que no geral os sistemas embarcados que fazem a coleta dos IQ-Samples, não tem memória limitada, o que dificulta a realização de algoritmos completos no próprio dispositivo.

### 3.2.2.3 Algoritmos

Para a superação desses desafios, algoritmos robustos tiveram que ser desenvolvidos para estimar o ângulo do sinal com base nas amostras. Aqui serão apresentados dois deles em nível alto sem provas do motivo pelos quais funcionam: o Classical Beamformer e o MUSIC:

- **Classical Beamformer**

Considerando-se um vetor de IQ-Samples para cada antena dado por  $x$ , pode-se modelar esse vetor pela seguinte equação:

$$x(t) = a(\theta)s(t) + n(t) \quad (3.5)$$

Em que  $n(t)$  é um modelo de ruídos,  $s(t)$  é o sinal que foi transmitido no ar e  $a$  é o vetor de posição do array de antenas, dado por:

$$a(\theta) = [1, e^{j2\pi d \sin(\theta)/\lambda}, \dots, e^{j2\pi(m-1)d \sin(\theta)/\lambda}] \quad (3.6)$$

Em que  $d$  é a distância entre as antenas,  $\lambda$  o comprimento de onda do sinal transmitido,  $m$  o número de elementos no array de antenas e  $\theta$  o ângulo de chegada

O vetor de posição 3.6 descreve como os sinais em cada antena são deslocados de fase devido às diferentes distâncias para o transmissor. Usando 3.5, podemos calcular uma aproximação da chamada matriz de covariância da amostra,  $R_{xx}$ , essa matrix auxilia depois para encontrar o ângulo:

$$R_{xx} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N x(t)x^H(t) \quad (3.7)$$

Em que  $H$  é a transposição hermitiana de uma matriz.

Finalmente, a parte central do algoritmo, se dá ao se achar  $\theta$  que maximiza a potencia  $P(\theta)$  na seguinte equação:

$$P(\theta) = \frac{a^H(\theta)R_{xx}a(\theta)}{a^H(\theta)a(\theta)} \quad (3.8)$$

Esse  $\theta$  encontrado é a melhor estimativa para o ângulo de chegada nesse algoritmo. Porém ainda assim não é muito preciso, e robusto, apesar de uma simplicidade maior em relação ao próximo.

- **MUSIC (Multiple Signal Classification)**

A ideia desse algoritmo é realizar uma decomposição dos autovalores e autovetores da matriz  $R_{xx}$ :

$$R_{xx} = VAV^{-1} \quad (3.9)$$

Em que  $A$  é a matriz diagonal contendo os os autovalores e  $V$  contendo os respectivos autovetores de  $R_{xx}$

A partir disso é possível construir um pseudo-espectro  $P$  para o sinal dado por:

$$P(\theta) = \frac{1}{a^H(\theta)VV^H a(\theta)} \quad (3.10)$$

E realizando-se um procedimento similar ao algoritmo de cima, encontrando-se o  $\theta$  que maximiza a equacão 3.10, encontra-se o ângulo de chegada mais provável. Esse é um algoritmo bem robusto que fornece boas precições. Entretanto seu peso computacional é alto.

As referências (26), (25) e (27) dão mais detalhes dos algoritmos mencionados e realizam experimentos demonstrando seus usos.

### 3.2.2.4 Interferômetro de 6-portas

Além dos algoritmos mencionados, ainda uma alternativa para estimar o AoA é a utilização de um interferômetro de 6-portas, que é um dispositivo que é baseado nas superposições deslocadas de fase das ondas incidentes e refletidas em uma porta. Diferentes defasagens de fase resultam em diferentes potências nas portas de saída da arquitetura de um 6-portas (28).

Abaixo um desenho esquemático da arquitetura de um 6-portas:

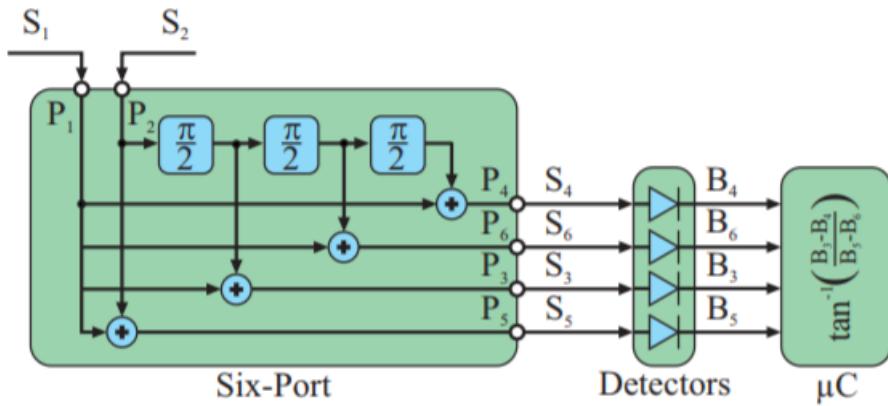


Figura 16 – Esquemático de uma arquitetura 6-portas. Tirado de (7)

Na figura 16 os símbolos  $S_1$  e  $S_2$  representam os de sinais de entrada e  $S_3$  a  $S_6$  representam as potências medidas na saída. Já os símbolos de  $B_3$  a  $B_6$  representam as potências de  $S_3$  a  $S_6$  convertidas para tensões de base.

As equações que relacionam esses sinais são:

$$S_3 = 0.5(S_1 + jS_2) \quad B_3 = |S_3|^2$$

$$S_4 = 0.5(S_1 - jS_2) \quad B_4 = |S_4|^2$$

$$S_5 = 0.5(S_1 + S_2) \quad B_5 = |S_5|^2$$

$$S_6 = 0.5(S_1 - S_2) \quad B_6 = |S_6|^2$$

A partir disso, é possível encontrar diversas propriedades úteis dos sinais incidente, tais como a diferença de fase  $\Delta\phi$ , a distância do sinal  $\Delta\delta$  e a propriedade do ângulo de chegada  $\theta$  a partir das seguintes equações:

$$Z = (B_5 - B_6) + j(B_3 - B_4) \quad (3.11)$$

$$\Delta\phi = \arctan\left(\frac{B_3 - B_4}{B_5 - B_6}\right) \quad (3.12)$$

$$\Delta d = \lambda \frac{\arg(Z)}{4\pi} \quad (3.13)$$

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda\Delta\phi}{2\pi a}\right) \quad (3.14)$$

Em que  $Z$  é um número complexo que relaciona as tensões de saída,  $\lambda$  é o comprimento de onda do sinal e  $a$  a distância entre antenas receptoras.

A referência (7) apresenta um maior detalhamento da arquitetura. Para o contexto de localização indoor, as equações forneceriam o ângulo  $\theta$  desejado.

### 3.2.2.5 Bluetooth 5.1

No contexto de AoA a especificação de bluetooth 5.1 foi disponibilizada em Janeiro de 2019. Uma de suas premissas era facilitar a infraestrutura para a obtenção do AoA e AoD. Por um lado a obtenção do ângulo continuou não sendo trivial, porém uma certa facilidade foi incluída.

A principal mudança ocorreu na Camada de Enlace (Link Layer 3.1.1) e no pacote de Bluetooth. Um novo campo chamado de Constant Tone Extension (CTE) foi introduzido ao pacote. A finalidade desse campo é fornecer um sinal de frequencia e e comprimento de onda constantes na qual é possível realizar o processo de IQ-Sample (3.2.2.1) com maior facilidade e confiabilidade. Este novo campo contém uma sequência de 1s e não está incluído no cálculo da CRC.

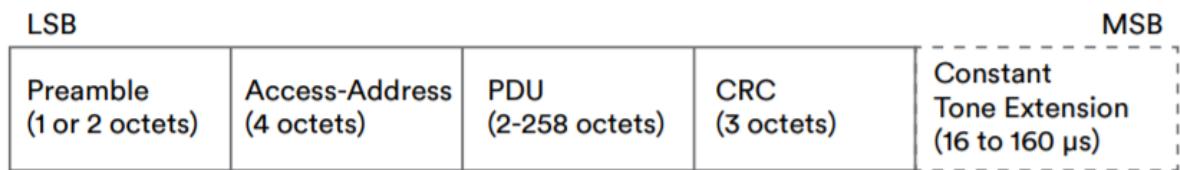


Figura 17 – Novo campo CTE. Tirado de (8)

Enquanto o bluetooth 5.1 de fato pode melhorar a amostragem de IQ-Samples, os algoritmos para se chegar no AoA não foram definidos no protocólo, o que ainda resulta em certas dificuldades na sua obtenção.

Até a data do presente trabalho, poucos foram os CIs lançados comercialmente que possuem suporte para BLE 5.1 (nRF52833 e nRF52811 da *Nordic Semiconductors* e BGM13S da *Silicon Labs*), não há celulares com suporte ainda, e não foi encontrada uma solução ou um SDK que disponibilizasse o tratamento dos dados brutos de Bluetooth 5.1. No

momento só existem códigos proprietários capazes de utilizar com eficiencia as novas funcionalidade.

A referência (29) de setembro de 2019 explora o Bluetooth 5.1 e é uma das primeiras a fazer um estudo detalhado sobre.

### 3.3 Algoritmos

### 3.4 Camada de Aplicação

# 4 Prova de Conceito

Para validar o projeto final, foi proposta uma prova de conceito que aplica as tecnologias mencionadas para obter uma estimativa de distância a partir do Bluetooth. No projeto final algoritmos, e técnicas mais elaboradas serão utilizados para uma maior precisão, porém na prova de conceito, é possível validar o projeto e mostrar os potenciais de atingir o objetivo final do projeto.

A seguir um detalhamento de como foi elaborada a prova de conceitos e os resultados atingidos.

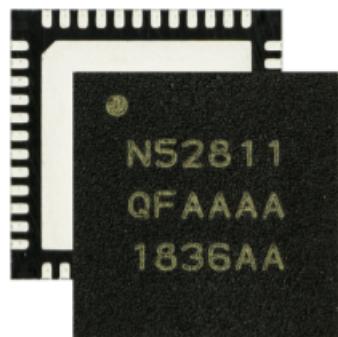
## 4.1 Hardware

O Hardware escolhido para prova de conceito é a placa de desenvolvimento nRF52840 DK da fabricante de componentes Nordic Semiconductor (10).

Tal placa de desenvolvimento conta com o SoC nRF52840 que possui Bluetooth 5.0 integrado, e pinos de GPIO com entrada analógica, além de um amplo suporte de recursos online para o desenvolvimento. Soma-se a isso, sua compatibilidade com o SoC nRF52811 da mesma fabricante, que é um dos unicos chips atualmente que possui Bluetooth 5.1 e planeja-se utilizar na etapa final do projeto (9).

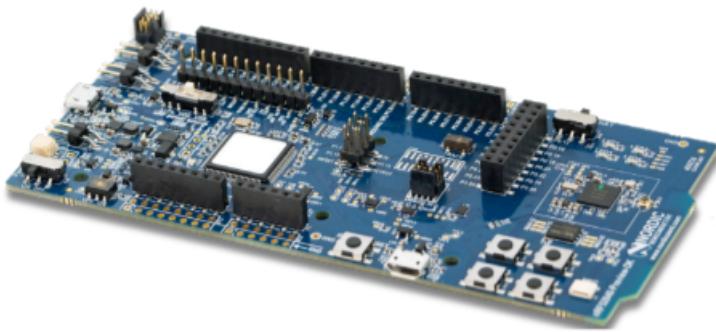
Como o nRF52840 DK não possui suporte para AoA, e placas de desenvolvimento do nRF52811 serão disponibilizadas somente no próximo semestre pela Nordic Semiconductor, pretende-se utilizar um interferômetro de 6-portas desenvolvido no departamento de sistemas eletrônicos da escola politécnica da USP para estimar o ângulo de chegada.

O interferômetro possuí 4 saídas analógicas. Fazendo-se a leitura dessas 4 saídas e utilizando a equação 3.14 encontra-se o AoA.

**Pinpoint anything with the nRF52811 SoC**

The nRF52811 SoC is the 4<sup>th</sup> addition to the nRF52 Series, and adds capabilities for *Bluetooth® 5.1* Direction Finding. Direction Finding enables positioning solutions to not only rely on received signal strength indicator (RSSI), but also the actual direction of a signal. This improves accuracy significantly and opens new possibilities for applications in this segment. There are two types of methods for determining direction, angle of arrival (AoA), where the direction of the received signal is calculated, and angle of departure (AoD), where the direction of the transmitted signal is calculated. The nRF52811 SoC is the perfect choice as a transmitter in both the AoA or AoD scenarios, with its low power character and connectivity features.

Figura 18 – nRF52811. Tirado de (9)



#### Product Overview

The nRF52840 DK is an affordable single-board development kit for Bluetooth® 5, Bluetooth mesh, Thread, Zigbee, ANT, 802.15.4 and 2.4 GHz proprietary applications using the nRF52840 multi-protocol SoC. The nRF52840 DK also supports development for the nRF52811.

The kit is compatible with the Arduino Uno Rev3 standard making it possible to use a wide range of 3rd-party shields during development.

The kit has access to all I/Os (48) and interfaces via connectors and there is an integrated PCB trace antenna and an RF connector for direct RF test measurements. There is also a connector for an external NFC antenna (included in kit).

Free software development tools, including protocol stacks (SoftDevices) and software development kits, are available to download from [www.nordicsemi.com](http://www.nordicsemi.com)

#### Bluetooth 5 - Longer range and higher throughput

The nRF52840 is ready to take advantage of the considerable performance improvements for Bluetooth Low Energy (LE) with the arrival of the Bluetooth 5 specification. Of greatest importance is the support for longer range (up to x4 compared to Bluetooth 4.x) and doubling of on-air data rate, up to 2 Mbps from 1 Mbps in Bluetooth 4.x

Figura 19 – nRF52840. Tirado de (10)

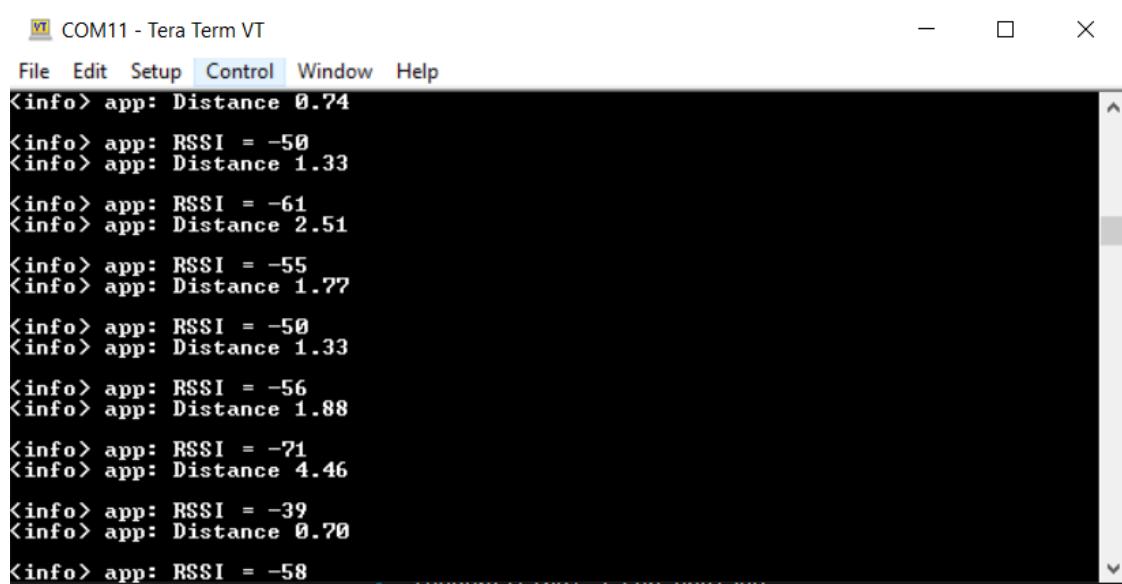
## 4.2 Programa

A placa de desenvolvimento, na prova de conceito foi programada para procurar dispositivos Bluetooth nas proximidades que tivessem um determinado ID no pacote de *advertising*. Caso fosse encontrado, cada instante que houvesse uma mudança de mais de 5dbm na intensidade do sinal, este era imprimido em uma porta serial.

Além disso, utilizou-se a equação 2.1 para estimar a distância do sinal recebido. O valor para o fator de perda utilizado foi de  $n = 4$  e adotou-se o valor de  $A = -45\text{dbm}$ .

O dispositivo que emitia o sinal Bluetooth a ser lido foi um celular Samsung Galaxy S8 com Bluetooth 5.0 e um aplicativo pronto que permitia a configuração de um ID específico para um *advertising* a ser enviado.

No programa, o ângulo de chegada ainda não foi implementado



The screenshot shows a terminal window titled "COM11 - Tera Term VT". The window has a menu bar with File, Edit, Setup, Control (which is highlighted), Window, and Help. The main area displays a series of log entries from an nRF52840 application. Each entry consists of a timestamp (e.g., <info>), followed by "app:", then "RSSI = -" and a numerical value (e.g., 50, 61, 55, 56, 71, 39, 58), and finally "Distance" followed by another numerical value (e.g., 0.74, 1.33, 2.51, 1.77, 1.33, 1.88, 4.46, 0.70). The window has scroll bars on the right side.

```
<info> app: RSSI = -50
<info> app: Distance 0.74
<info> app: RSSI = -61
<info> app: Distance 1.33
<info> app: RSSI = -55
<info> app: Distance 2.51
<info> app: RSSI = -56
<info> app: Distance 1.77
<info> app: RSSI = -50
<info> app: Distance 1.33
<info> app: RSSI = -56
<info> app: Distance 1.88
<info> app: RSSI = -71
<info> app: Distance 4.46
<info> app: RSSI = -39
<info> app: Distance 0.70
<info> app: RSSI = -58
```

Figura 20 – Porta serial do nRF52840 imprimindo valores de RSSI recebidos

### 4.3 Arranjo Experimental

O arranjo experimental, consistiu em fazer medições de distâncias reais de 0.5m em 0.5m em um ambiente fechado e compará-las com as distâncias estimadas pelos programas e hardware descritos, como se observa na seguinte figura:

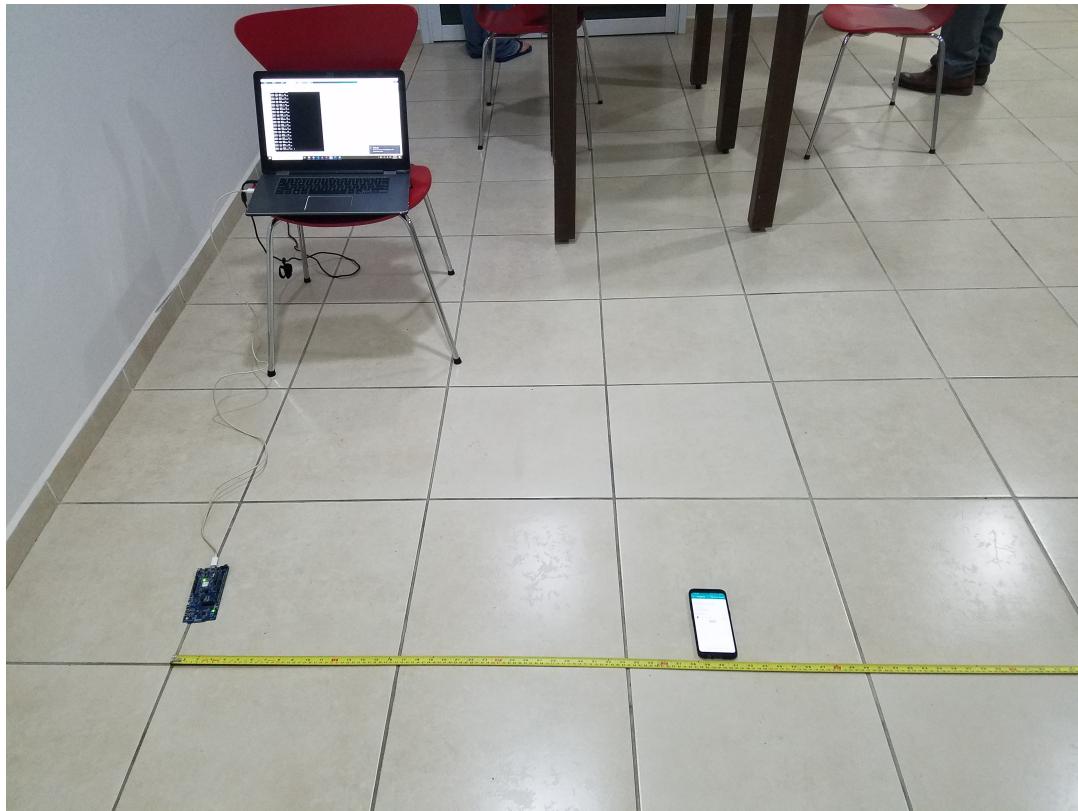


Figura 21 – Arranjo experimental da prova de conceito

#### 4.4 Resultados

Com os dados obtidos, foi possível construir os seguintes gráficos que evidenciam a precisão obtida. Nota-se que a distância estimada é uma média de 10 leituras diferentes do celular na mesma posição.

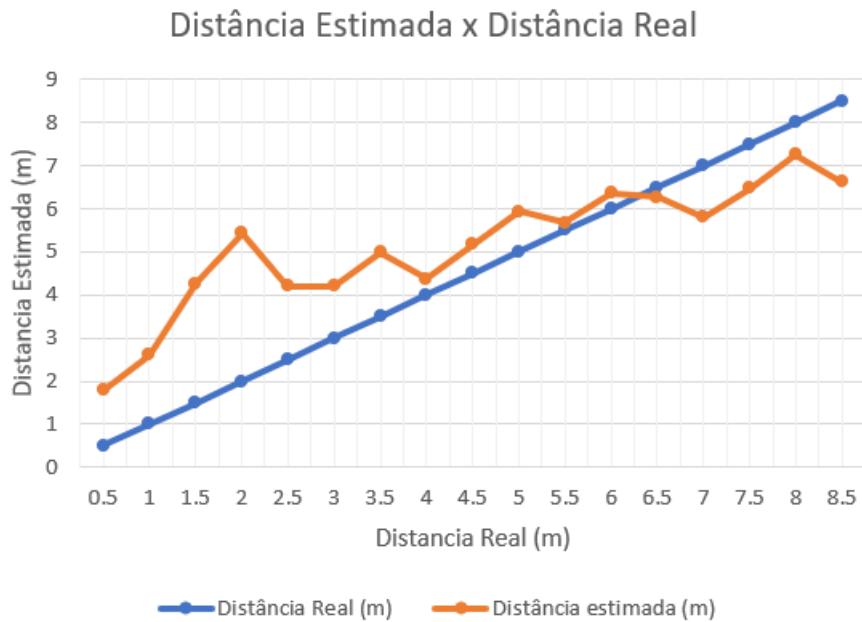


Figura 22 – Distância Estimada x distância real na prova de conceito

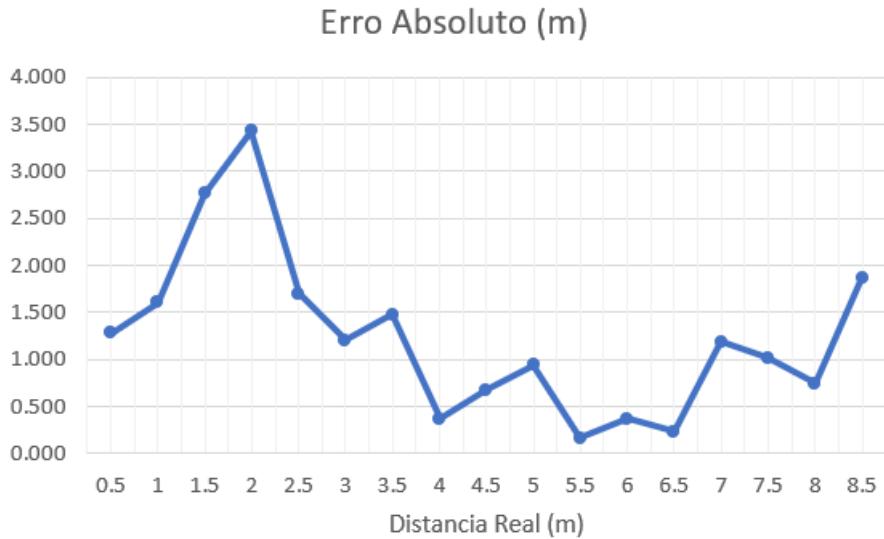


Figura 23 – Erro absoluto em metros em cada distância

Deste modo, pelos gráficos apresentados, nota-se que a precisão fica na ordem de 1m a 10m. Tais resultados foram obtidos com o algoritmo mais direto possível e somente utilizando a intensidade do sinal recebido. Ao se introduzir algoritmos mais robustos, a exemplo dos que usam *fingerprint* e AoA, a precisão encontrada será ainda maior.

Ainda como prova de conceito. Simulou-se um sistema de localização 2D utilizando-se somente RSSI e as medidas obtidas anteriormente de distância linear. Estimou-se uma distância de 5m entre placas, sendo que a placa 1 está na coordenada (0,0) e a placa

a Real 1	b Real 2	a 1	b 2	x Calc	y Calc	x Real	y Real	Erro
1	5	2.61	5.94	-0.34	2.58	0.10	0.99	1.64
2	5	5.43	5.94	1.92	5.07	0.40	1.95	3.47
3	2.5	4.21	4.20	2.50	3.38	2.77	1.15	2.24
3	5	4.21	5.94	0.74	4.14	0.90	2.86	1.29
3	7.5	4.21	6.48	0.07	4.20	-2.22	2.01	3.16
4	1	4.37	2.61	3.72	2.29	4.00	0.00	2.30
4	2.5	4.37	4.20	2.64	3.48	3.47	1.98	1.71
4	5	4.37	5.94	0.88	4.27	1.60	3.66	0.94
4	7.5	4.37	6.48	0.20	4.36	-1.52	3.69	1.84
5	1	5.94	2.61	5.34	2.60	4.90	0.99	1.66
5	2.5	5.94	4.20	4.26	4.14	4.37	2.42	1.72
5	5	5.94	5.94	2.50	5.38	2.50	4.33	1.05
5	7.5	5.94	6.48	1.82	5.65	-0.62	4.96	2.53
6	1	6.37	2.61	5.87	2.47	6.00	0.00	2.47
6	2.5	6.37	4.20	4.79	4.19	5.47	2.46	1.85
6	5	6.37	5.94	3.02	5.60	3.60	4.80	0.98
6	7.5	6.37	6.48	2.35	5.92	0.47	5.98	1.88
7	2.5	5.81	4.20	4.11	4.10	6.77	1.77	3.53
7	5	5.81	5.94	2.34	5.31	4.90	4.99	2.57
7	7.5	5.81	6.48	1.67	5.56	1.77	6.77	1.21
8	5	7.25	5.94	4.22	5.89	6.40	4.80	2.43
8	7.5	7.25	6.48	3.55	6.32	3.27	7.30	1.01

Tabela 1 – Resultados Obtidos com RSSI

dois na coordenada (5,0). Fazendo-se simplificações para o caso 2D na equação 2.1 e substituindo-se os valores, as equações para obter coordenadas em tal sistema são:

$$x = \frac{a^2 - b^2 + 25}{10} \quad (4.1)$$

$$y = \sqrt{a^2 - x^2} \quad (4.2)$$

Em que  $a$  é a distância para a placa na posição (0,0) e  $b$  a distância para a placa da posição (0,5).

Os resultados obtidos a partir disso foram:

Da tabela, observa-se que mesmo no caso 2D os erros absolutos continuam na faixa de 1m a 10m utilizando-se somente o RSSI.

# 5 Descrição da Implementação

Neste capítulo, serão dados detalhes de como os conceitos do capítulo anterior foram implementados na prática, da descrição geral do sistema e dos resultados obtidos. Nota-se, que os conceitos utilizados descritos, não são dependentes da plataforma e ferramentas específicas utilizadas para a solução encontrada, assim, discussões acerca do uso das ferramentas específicas também serão abordadas, tais como seus pontos positivos e negativos.

## 5.1 Arquitetura do sistema

O sistema proposto será constituído de diversas partes que integram tanto software, quanto hardware e firmware, como visto no diagrama abaixo.

## 5.2 Hardware

Após resultados positivos, com a prova de conceito, optou-se por seguir na mesma linha de hardware, utilizando-se microcontroladores da família nRF5 que possuem bluetooth integrado. Após pesquisas entre hardwares que usavam tal chip e a possibilidade de desenvolvimento de um hardware próprio, chegou-se à conclusão de que, com a finalidade de minimizar erros, a melhor opção seria a busca por hardwares capazes de realizar a tarefa de localização eficientemente. Isto é, dispositivos que possuem um preço acessível, uma alta eficiência energética e escalabilidade.

Com esses requisitos, um dispositivo que se mostrou como uma boa opção foi o *Dev SmartScanner* e o *DEV SmartTag* da empresa DEV Tecnologia (30), *designhouse* brasileira com foco em IoT. Após uma parceria com a empresa, foi possível obter alguns desses dispositivos, com a finalidade de melhorias no sistema de localização e integração com a localização em armazéns, característica muito desejada, porém que ainda não havia sido feita com esse dispositivo.

O *DEV SmartTag* consiste em um *beacon* que possui um *hardware* simples, composto por um microcontrolador com bluetooth integrado, uma bateria e um medidor de bateria. Esse dispositivo tem uma única funcionalidade: emitir sinal de bluetooth. Esse sinal é capturado pelo *Dev SmartScanner* e transmitido para internet por meio de uma rede sem fio, de forma que o processamento dos algoritmos de localização aconteça na nuvem. O *Dev SmartScanner* é composto principalmente por um microcontrolador equipado com bluetooth, para ser capaz de receber sinal do beacon e por um módulo Wi-Fi com capacidade de comunicação com a internet. Ele não é alimentado por bateria, mas sim por uma

fonte, já que parte-se do pressuposto que de que ele fique em localização fixa e os tags que se mexem.



Figura 24 – Aparência do *DEV SmartTag*



Figura 25 – Aparência do *DEV SmartScanner*

Outras opções levantadas de *hardware* que possibilitariam o uso específico para localização indoor de armazéns encontram-se na tabela abaixo:

Empresa	Modelo	Preço (USD)	Versão BLE	Link
DEVTecnologia	DEV SmartTag	35	4.1	(30)
Kontakt	Tough Beacon	25	4.2	(31)
Beaconstac	Pocket	23	4.0	(32)
Estimote	Proximity	25	4.2	(33)
Quuppa	Q17	-	5.1	(34)

Tabela 2 – Comparaçao hardwares comerciais

Apesar do preço um pouco mais elevado comercialmente e de não utilizar as especificações mais modernas de bluetooth (como a solução da Quuppa) a vantagem do hardware escolhido é que no trabalho foi possível ter acesso ao código fonte e fazer as modificações necessárias específicas na localização de ativos em um armazém. Além disso, foi o único hardware encontrado que foi desenvolvido no Brasil e que possui especificação Anatel, o que facilita a utilização e suporte em território brasileiro.

Além do hardware escolhido, cabe uma atenção especial ao Quuppa (34). Essa empresa, é a pioneira no desenvolvimento de técnicas de localização indoor e atuou diretamente junto com o Bluetooth SIG no desenvolvimento de especificações atuais do bluetooth foco em localização indoor. Por ser uma empresa desse porte, suas soluções acabam saíndo por um preço alto, entretanto uma boa precisão de localização é obtida.

### 5.2.1 Especificações técnicas

O DEV SmartScanner possui as seguintes especificações técnicas:

- Microcontrolador

## 5.3 Back-end

O sistema de localização deve se comunicar com o sistema do armazém de forma que os dados coletados possam ser usados com alguma finalidade. Dessa forma, é necessário uma forma de comunicação com algum sistema de gerenciamento de armazéns, que no caso é o sistema da samsung logistcs.

Para fazer essa integração o hardware é capaz de se conectar a internet e enviar pacotes de mensagens a algum servidor. Isso é feito com base em MQTT e o programa de back-end é feito em Go, para adquirir esses dados do MQTT.

## 5.4 Funcionalidade

## 5.5 Resultados

## Referências

- 1 SAKPEREA, W.; ADEYEYE-OSHINB, M.; MLITWAC, N. B. A state-of-the-art survey of indoor positioning and navigation systems and technologies. *South African Computer Journal*, South African Institute of Computer Scientists and Information Technologists, v. 29, n. 3, p. 145–197, 2017. Disponível em: <<http://sacj.cs.uct.ac.za/index.php/sacj/article/view/452>>.
- 2 ZHONG, X. et al. A survey of indoor location algorithms based on aoa. In: *International Conference on Engineering Technology and Application (ICETA)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 273–278.
- 3 CHENG-XU, F.; ZHONG, L. A new node self-localization algorithm based rssi for wireless sensor networks. IEEE, 2013. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6643341>>.
- 4 ZAFARI, F.; GKELIAS, A.; LEUNG, K. K. A survey of indoor localization systems and technologies. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, IEEE, 2019. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8692423>>.
- 5 MICROCHIP. *Introduction to Bluetooth Low Energy*. Disponível em: <<https://microchipdeveloper.com/wireless:ble-introduction>>. Acesso em: 16 nov. 2019.
- 6 PATERNA, V. C. et al. A bluetooth low energy indoor positioning system with channel diversity, weighted trilateration and kalman filtering. *Sensors*, Basel Suiça, v. 17, n. 12, 2017. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5750706/>>. Acesso em: 12 nov. 2019.
- 7 KOELPIN, A. et al. Six-port based interferometry for precise radar and sensing applications. *Sensors*, v. 16, n. 1556, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/s16101556>>.
- 8 BLUETOOTH. *Bluetooth Core Specifications 5.1*. Disponível em: <<https://www.bluetooth.com/specifications/bluetooth-core-specification/>>. Acesso em: 16 nov. 2019.
- 9 NORDIC SEMICONDUCTOR. *nRF52811*. Disponível em: <[https://www.nordicsemi.com/?sc\\_itemid=%7B7CBDF55C-9745-4A7D-A491-5B66AE9454B6%7D](https://www.nordicsemi.com/?sc_itemid=%7B7CBDF55C-9745-4A7D-A491-5B66AE9454B6%7D)>. Acesso em: 23 jun. 2019.
- 10 NORDIC SEMICONDUCTOR. *nRF52840 DK*. Disponível em: <[https://www.nordicsemi.com/?sc\\_itemid=%7B6BECB3CF-00F7-4B2D-8553-F1AD6AC458EF%7D](https://www.nordicsemi.com/?sc_itemid=%7B6BECB3CF-00F7-4B2D-8553-F1AD6AC458EF%7D)>. Acesso em: 23 jun. 2019.
- 11 TOMPKINS, J.; SMITH, J. *The Warehouse Management Handbook*. Raleigh, North Carolina: Tompkins Press, 1998.
- 12 FABER, N. *Structuring Warehouse Management*. [S.l.: s.n.].
- 13 KOSTER, R. de; LE-DUC, T.; ROODBERGEN, K. J. Design and control of warehouse order picking: A literature review. *European Journal of Operational Research*, ELSEVIER, v. 182, p. 481–501, 2007.

- 14 RUSTINOV, V.; SOROKIN, A. Selection of technology for building an indoor localization and tracking system. IEEE, 2015. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7230829>>.
- 15 BUVINICH, M. R. *Ferramentas para o monitoramento e avaliação de programas e projetos sociais*. [S.l.: s.n.], 1999.
- 16 NUAIMI, K. A.; KAME, H. Survey of indoor positioning systems and algorithms. IEEE, 2011. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/5893813>>.
- 17 LIU, H. et al. Survey of wireless indoor positioning techniques and systems. *IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS MAN AND CYBERNETICS*, IEEE, v. 37, n. 6, p. 1067–1080, 2007. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/4343996>>.
- 18 YU, T. et al. A guide of fingerprint based radio emitter localization using multiple sensors. *IEICE Transactions on Communications*, E101-B, n. 10, 2018.
- 19 VASISHT, D.; KUMAR, S.; KATABI, D. Decimeter-level localization with a single wifi access point. 2016. Disponível em: <<https://www.usenix.org/system/files/conference/nsdi16/nsdi16-paper-vasisht.pdf>>.
- 20 WOOLLEY, M. Bluetooth 5: Go faster, go further. Disponível em: <<https://www.bluetooth.com/bluetooth-resources/bluetooth-5-go-faster-go-further/>>.
- 21 ENHANCING Bluetooth Location Services with Direction Finding. Disponível em: <<https://www.bluetooth.com/bluetooth-resources/enhancing-bluetooth-location-services-with-direction-finding/>>.
- 22 GEZICI, S. et al. Localization via ultra-wideband radios. *IEEE SIGNAL PROCESSING MAGAZINE*, IEEE, v. 22, n. 4, p. 70–84, 2005. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/1458289>>.
- 23 HAZAS, M.; HOPPER, A. Broadband ultrasonic location systems for improved indoor positioning. *IEEE Transactions on mobile Computing*, IEEE, v. 5, n. 5, p. 536–547, 2006. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/1610595>>.
- 24 ISHIDA, S. et al. Proposal of separate channel fingerprinting using bluetooth low energy. IEEE, Kumamoto, Japan, 2016. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7557608>>. Acesso em: 12 nov. 2019.
- 25 LEHTIMAKI, S. *Bluetooth Angle Estimation for Real-Time Locationing*. [S.l.]. Disponível em: <[http://pages.silabs.com/rs/634-SLU-379/images/Whitepaper\\_Bluetooth\\_Angle\\_Estimation\\_for\\_Real\\_Time\\_Locationing\\_FINAL.pdf?\\_s=7uqqtq6y59nus9kfxikg](http://pages.silabs.com/rs/634-SLU-379/images/Whitepaper_Bluetooth_Angle_Estimation_for_Real_Time_Locationing_FINAL.pdf?_s=7uqqtq6y59nus9kfxikg)>. Acesso em: 12 nov. 2019.
- 26 BAIG, N. A.; MALIK, M. B. Comparison of direction of arrival (doa) estimation techniques for closely spaced targets. *International Journal of Future Computer and Communication*, v. 2, n. 6, p. 654–659, 2013. Disponível em: <<http://www.ijfcc.org/papers/246-B243.pdf>>. Acesso em: 19 nov. 2019.
- 27 BADAWY, A. et al. A simple angle of arrival estimation scheme. 2014.

- 28 WINTER, S. M.; KOELPIN, A.; WEIGEL, R. Six-port receiver analog front-end: Multilayer design and system simulation. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, v. 55, p. 254–258, 2008. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/4470569>>.
- 29 COMINELLI, M.; PATRAS, P.; GRINGOLI, F. Dead on arrival: An empirical study of the bluetooth 5.1 positioning system. Arxiv, 2013. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/1909.08063>>. Acesso em: 20 nov. 2019.
- 30 DEV TECNOLOGIA. *DEV Tecnologia*. Disponível em: <<https://devtecnologia.com.br/>>. Acesso em: 12 nov. 2019.
- 31 KONTAKT. *Kontakt*. Disponível em: <<https://store.kontakt.io/our-products/28-tough-beacon-tb15-1.html>>. Acesso em: 12 nov. 2019.
- 32 BEACONSTAC. *Beaconstac*. Disponível em: <<https://www.beaconstac.com/buy-beacons/>>. Acesso em: 12 nov. 2019.
- 33 ESTIMOTE. *Estimote*. Disponível em: <<https://estimote.com/>>. Acesso em: 12 nov. 2019.
- 34 QUUPPA. *Quuppa*. Disponível em: <<https://quuppa.com/>>. Acesso em: 12 nov. 2019.