



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CÂMPUS UNIVERSITÁRIO DE PALMAS
CURSO DE CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO**

WILLYÂN ARRUDA DE ARAÚJO

**SISTEMA ELETRÔNICO DE POSIÇÃO E RASTREAMENTO LOCAL
UTILIZANDO BLUETOOTH LOW ENERGY: UM ESTUDO APLICADO AO
FUTEBOL**

PALMAS (TO)

2023

WILLYÂN ARRUDA DE ARAÚJO

SISTEMA ELETRÔNICO DE POSIÇÃO E RASTREAMENTO LOCAL
UTILIZANDO BLUETOOTH LOW ENERGY: UM ESTUDO APLICADO AO
FUTEBOL

Trabalho de Conclusão de Curso II apresentado
à Universidade Federal do Tocantins para
obtenção do título de Bacharel em Ciência da
Computação, sob a orientação do(a) Prof.(a)
Dr. Alexandre Tadeu Rossini da Silva.

Orientador:

Dr. Alexandre Tadeu Rossini da Silva

PALMAS (TO)

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

W742s Araújo, Willyân Arruda de.

Sistema eletrônico de posição e rastreamento local utilizando Bluetooth Low Energy: Um estudo aplicado ao futebol. / Willyân Arruda de Araújo. – Palmas, TO, 2023.

50 f.

Monografia Graduação - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Ciências da Computação, 2023.

Orientador: Alexandre Tadeu Rossini da Silva

1. Sistema de posicionamento. 2. Futebol. 3. EPTS. 4. Placa ESP32. I. Título

CDD 004

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

WILLYÃN ARRUDA DE ARAÚJO

SISTEMA ELETRÔNICO DE POSIÇÃO E RASTREAMENTO LOCAL
UTILIZANDO BLUETOOTH LOW ENERGY: UM ESTUDO APLICADO AO
FUTEBOL

Trabalho de Conclusão de Curso II apresentado à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas, Curso de Ciência da Computação foi avaliado para a obtenção do título de Bacharel e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Data de aprovação: 30 / 6 / 2023

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Alexandre Tadeu Rossini da Silva / UFT

Prof. Dr. Elto Legnani / UTFPR

Prof. Dr. Ary Henrique Moraes de Oliveira / UFT

Prof. Dr. Marcelo Lisboa Rocha / UFT

*Dedico este trabalho ao meu pai
Willian Batista de Araújo e à
minha mãe Carla Arruda, vítima
do Covid-19 em 2021.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiro a Deus por ter me dado forças e saúde para enfrentar cada dia, o que me permitiu chegar até aqui. Aos meus pais, Carla Arruda e Willian Batista de Araújo, que sempre me apoiaram independentemente de qualquer decisão que tomei e que me incentivaram para que eu não desistisse dos meus objetivos. À minha namorada, Júlia Clara Lins, pelo apoio e incentivo desde 2019. Aos meus colegas de classe deixo meus agradecimentos pelo convívio em grupo durante o decorrer deste curso. Agradeço a todos os professores que contribuíram diretamente e indiretamente com minha formação. Obrigado também ao meu orientador, Alexandre Rossini, por me guiar ao longo deste trabalho. Agradeço também à UFT por me proporcionar uma formação acadêmica de qualidade.

RESUMO

Desde os primórdios da humanidade, nós apreciadores de esportes fazemos análises a respeito do desenvolvimento dos atletas em suas atividades esportivas. No futebol, o uso de dispositivos de Sistemas Eletrônicos de Desempenho e Rastreamento (EPTS - *Electronic Performance and Tracking Systems*) foi aprovado pela Federação Internacional de Futebol Associado (FIFA), em 2015. Desde então, a FIFA vem desenvolvendo regulamentações sobre o uso de EPTS no futebol, padronizando tecnologias e procedimentos (BOARD, 2021), algo que também tem ocorrido em outros esportes. Este estudo realizou um levantamento bibliográfico sistematizado acerca das tecnologias de EPTS disponíveis na atualidade e seus tipos. Ademais, como objetivo da pesquisa, foi desenvolvido um protótipo utilizando *Bluetooth Low Energy*, embarcado em uma placa ESP32, e empregando remoção de ruídos utilizando filtros de Kalman. Por fim, foram realizados testes de desempenho do protótipo para avaliar a acurácia dos dados coletados, seu tempo de autonomia e também feita comparação dos resultados obtidos nos testes do protótipo com outros sistemas disponíveis no mercado. Na comparação, também foram considerados o tamanho, o peso e os preços entre os diferentes sistemas utilizados na avaliação.

Palavra-chave: Sistema de posicionamento. Futebol. EPTS. Placa ESP32. Filtro de Kalman.

ABSTRACT

Since the beginning of humanity, we sports enthusiasts have been analyzing the development of athletes in their sports activities. In football, the use of Electronic Performance and Tracking Systems (EPTS) was approved by the *Fédération Internationale de Football Association* (FIFA) in 2015. Subsequently, FIFA has been developing regulations regarding the use of EPTS in football, standardizing technologies and procedures (BOARD, 2021), which has also been happening in other sports. This study conducted a systematic literature review on the available EPTS technologies and their types. Furthermore, as a research objective, a prototype was developed using Bluetooth Low Energy, embedded in an ESP32 board, and employing noise removal using Kalman filters. Finally, performance tests of the prototype were carried out to evaluate the accuracy of the collected data, its battery life, and a comparison was made between the results obtained in the prototype tests and other systems available in the market. In the comparison, factors such as size, weight, and prices were also considered among the different systems used in the evaluation.

Keywords: Positioning system. Football. EPTS. ESP32 board. Kalman filter.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Delineamento da pesquisa	15
Figura 2 – Tipos de EPTS regulamentados atualmente pela FIFA (BOARD, 2021).	19
Figura 3 – Exemplo do método de trilateração com três <i>beacons</i>	22
Figura 4 – ESP32 DevKit (ROBOCORE, 2023)	23
Figura 5 – Diagrama em blocos do funcionamento de um ESP32 (THEESP32, 2022)	24
Figura 6 – Bateria 18650 (LIGHTHOUSE, 2023)	24
Figura 7 – Processo de envio e recepção BLE (TOWNSEND, 2022)	26
Figura 8 – Pinout do módulo embarcado com ESP32	30
Figura 9 – Montagem final dos beacons	31
Figura 10 – Montagem final das tags	31
Figura 11 – Fluxograma de funcionamento do Webservice	37
Figura 12 – Modelagem do invólucro com suas dimensões	40
Figura 13 – Foto do invólucro após impressão 3D	41
Figura 14 – Banco de dados com as leituras de RSSI e distância da TAG	41
Figura 15 – Efeito do filtro de Kalman em dados de distância obtidos no ambiente de teste com a distância de 5m	43
Figura 16 – Efeito do filtro de Kalman em dados de distância obtidos no ambiente de teste com a distância de 15m	43
Figura 17 – Efeito do filtro de Kalman em dados de distância obtidos no ambiente de teste com a distância de 35m	44
Figura 18 – Efeito do filtro de Kalman em dados de distância obtidos no ambiente de teste com a distância de 50m	44
Figura 19 – Efeito do filtro de Kalman em dados de distância obtidos no ambiente de teste com a distância de 60m	44

Figura 20 – Representação gráfica da distribuição de quatro antenas abrangendo a área de um campo de futebol	46
Figura 21 – Representação gráfica da distribuição de 12 antenas abrangendo a área de um campo de futebol	47

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivo geral	14
1.2	Objetivos específicos	14
1.3	Justificativa	14
1.4	Procedimento metodológico	15
1.5	Organização do texto	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	Informática pessoal	18
2.2	EPTS no futebol	19
2.3	Localização e posicionamento	21
2.3.1	Estimativa de distância baseada na intensidade do sinal	21
2.3.2	Trilateração	21
2.4	Dispositivos e tecnologias	23
2.4.1	ESP32	23
2.4.2	Bateria 18650	24
2.4.3	Bluetooth BLE	25
2.4.4	RSSI	26
2.4.5	BLE e posicionamento	26
2.5	Filtro de Kalman	27
2.6	NodeJs	28
2.6.1	<i>Kalman-filter</i> em NodeJs	28
3	SOLUÇÃO PROPOSTA E ARTEFATOS PRODUZIDOS	30
3.1	Hardware	30

3.2	Software	32
3.2.1	<i>Beacons</i>	32
3.2.2	<i>Tags</i>	34
3.2.3	<i>WebService</i>	36
4	TESTES E RESULTADOS	40
4.1	Consumo da bateria	42
4.2	Distância medida com a aplicação do filtro de Kalman	42
5	CONCLUSÃO	45
5.1	Trabalhos futuros	47
	REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

A tecnologia tem desempenhado um papel fundamental na transformação de nossa sociedade e nas diferentes áreas de atuação, incluindo o esporte. No contexto esportivo, especialmente no futebol, diversas ferramentas tecnológicas vestíveis têm surgido para auxiliar os atletas a aprimorar seu desempenho. Essas tecnologias, aprovadas pela Federação Internacional de Futebol Associado (FIFA) em 2015 (BOARD, 2021), proporcionam suporte e informações valiosas aos jogadores durante as partidas, permitindo uma análise mais precisa de seu desempenho e contribuindo para uma evolução significativa no esporte.

Os Sistemas Eletrônicos de Posição e Rastreamento (EPTS) rastreiam principalmente o posicionamento dos jogadores e da bola, se tornando um dos componentes mais importantes no monitoramento da carga mecânicas de treinamento e jogos em atletas (AKENHEAD; NASSIS, 2015). Em particular, Sistemas de Rastreamento por Vídeo (VTS - *Video Tracking Systems*), Sistemas de Posicionamento Local baseados em rádio (LPS - *Local Positioning Systems*) e Sistemas de Posicionamento Global (GPS - *Global Positioning Systems*) tornaram-se tecnologias indispensáveis para avaliar o desempenho físico, técnico e tático em treinamentos e competições de alto desempenho (BUCHHEIT et al., 2014). Portanto, a validade, a intercambialidade e a consistência dos dados fornecidos por um EPTS são essenciais para que a comissão técnica (treinadores e preparadore físicos) possam realizar uma avaliação fidedigna das cargas de treinamento, seja em treinamentos e jogos, auxiliando na prescrição dos treinamentos mais adequados e minimizando o risco de lesões esportivas.

Basicamente, um dispositivo EPTS pode ser fixado ao corpo de jogadores de futebol para serem coletados dados durante uma partida ou uma sessão de treinamento, que possibilita a extração minuciosa de parâmetros físicos, técnicos e táticos, seja pelos dados obtidos diretamente dos sensores ou a partir do processamento destes dados a fim de gerar informações mais complexas. Linke, Link e Lames (2018) concluem que a posição mais adequada do dispositivo no corpo humano não deve ser prescrita por critérios tecnológicos, e sim por considerações biomecânicas. Mesmo assim, os autores sugerem que o EPTS deve ser fixado o mais próximo possível do centro de massa do corpo humano.

Com base na literatura examinada, os EPTS são pouco estudados no campo da computação, o que implica em déficit de tecnologias acessíveis e de baixo custo que cumprem com os requisitos destes dispositivos. Desse modo, atualmente, somente equipes profissionais com alto poder aquisitivo dispõem dessas tecnologias a seu favor, o que, dentro de um contexto social, expõe desigualdades tecnológicas latentes. Assim, este trabalho aborda o desenvolvimento de um EPTS de baixo custo, visando a coleta de dados acura-

dos e que permita obter as variáveis iniciais básicas para estimar o rendimento de atletas durante treinamentos e partidas de futebol.

1.1 Objetivo geral

Desenvolver um sistema eletrônico de rastreamento de desempenho (EPTS - *Electronic Performance Tracking System*) do tipo LPS (*Local Positioning System*), de baixo custo, utilizando Bluetooth Low Energy embarcado em uma placa ESP32.

1.2 Objetivos específicos

- Realizar levantamento bibliográfico acerca de EPTS;
- Projetar diagramas e esquemas eletrônicos de montagem do protótipo;
- Desenvolver os códigos-fontes do protótipo e do servidor;
- Materializar um protótipo que seja um produto mínimo viável;
- Criar um invólucro que acomode o sistema eletrônico desenvolvido e, por ser uma tecnologia vestível, que possa ser acoplado em um top, que é roupa sem gola e sem mangas que envolve a parte superior do tronco.
- Avaliar o protótipo ao submetê-lo a testes quantitativos para aferir seu desempenho de acurácia.

1.3 Justificativa

O desenvolvimento de EPTS tem ganhado destaque no campo do esporte, especialmente no futebol, devido à crescente necessidade de coletar e analisar dados para aprimorar o treinamento e maximizar o rendimento dos atletas e das equipes. Esses sistemas podem fornecer informações precisas sobre a posição, velocidade e movimentos dos jogadores durante as partidas e os treinamentos, permitindo uma análise detalhada do desempenho individual e coletivo.

A utilização de sistemas de rastreamento baseados em tecnologia LPS tem se mostrado promissora devido à sua capacidade de fornecer dados em tempo real e com elevada acurácia. Esses sistemas são capazes de rastrear a posição dos jogadores dentro do campo com margem de erro reduzida, o que permite uma análise mais precisa do desempenho. Além disso, o uso de tecnologia *Bluetooth Low Energy* (BLE), embarcada em placas como a ESP32, oferece uma solução de baixo custo para a implementação de EPTS. O BLE permite a comunicação sem fio entre o sistema de rastreamento e um servidor, o que facilita a coleta e análise dos dados.

Nesse sentido, o desenvolvimento de um protótipo de EPTS de baixo custo utilizando BLE embarcado em uma placa ESP32 é promissora e socialmente justificada, pois torna a tecnologia mais acessível a equipes de futebol de diferentes níveis, incluindo clubes amadores e de categorias de base. Ademais, a criação de um protótipo permite avaliar a proposta por meio da realização de testes quantitativos que visam aferir a sua acurácia e, diante disto, comparar seu o desempenho com EPTS disponíveis no mercado.

Atualmente, os EPTS disponíveis são produzidos por um número reduzido de empresas e eles têm custos elevados, o que torna sua utilização inviável para equipes com menos recursos financeiros, principalmente no futebol de base. Essa falta de acesso tecnológico cria uma desigualdade de oportunidades, uma vez que clubes de elite investem em tecnologias avançadas para aprimorar o desempenho dos atletas e equipes, enquanto clubes de base ou equipes de divisões inferiores enfrentam restrições financeiras. É importante explorar alternativas que tornem os EPTS mais acessíveis e sustentáveis para clubes de menor porte, como o desenvolvimento de soluções de código aberto, parcerias institucionais e apoio governamental. Dessa forma, será possível proporcionar um ambiente mais equitativo para o desenvolvimento dos jovens atletas, promovendo a descoberta de talentos e fortalecendo o futebol de base.

1.4 Procedimento metodológico

A pesquisa realizada neste trabalho é classificada como uma pesquisa de computação aplicada, que é um tipo de investigação científica que se concentra na aplicação prática dos conceitos e técnicas da computação em problemas do mundo real. Essa abordagem de pesquisa busca soluções concretas e aplicáveis para desafios específicos, utilizando os conhecimentos e recursos disponíveis na área da computação.

Nesse sentido, este estudo foi conduzido a fim de desenvolver um protótipo de um EPTS, utilizando uma abordagem prática e baseada em evidências científicas. Para isso, a pesquisa foi decomposta em etapas, conforme ilustrado na figura 1.

Figura 1 – Delineamento da pesquisa



O levantamento bibliográfico foi realizado para obter informações sobre as tecnologias existentes relacionadas ao EPTS. Mais especificamente, a revisão de literatura foi sistematizada no campo da computação, esportes e *gadgets* esportivos. Dessa forma, foram utilizados termos que estavam estreitamente relacionados ao tema de *gadgets* esportivos, como: "EPTS in sports", "Types of EPTS", "Indoor position tracking", "Eletronic

Tracking System”, ”Informática pessoal”. Através dessa pesquisa, foram encontrados trabalhos relacionados ao tema de estudo deste trabalho nos diversos periódicos e banco de dados disponíveis na internet. Foram encontrados alguns trabalhos realizados sobre sistemas de posicionamento local (SILVA, 2019), (SILVA, 2017), (PICAZO-MARTINEZ et al., 2019), (LIU et al., 2021). Contudo, a maioria sobreleva o padrão IEEE 802.11, também conhecido como wi-fi. Esse modelo torna-se menos favorável à este trabalho por necessitar de rádios que não sejam de baixa potência, o que ocasiona um consumo moderado de energia e, conseqüentemente, um hardware de maior tamanho (LARSSON, 2015). Ilci et al. (2015) concluem também que o método de localização interna por wi-fi é muito sensível a ruídos estranhos e, portanto, as distâncias estimadas são muito imprecisas, mesmo estando os *beacons* e *tags* no mesmo campo de visão. Ressalta-se que não foi encontrado estudo que combinasse EPTS do tipo LPS, de baixo custo, aplicado ao esporte e desenvolvido com Bluetooth LE embarcado em um ESP32. Sobre as regras de aplicação de EPTS no futebol, elas foram extraídas diretamente do site da FIFA. Esse levantamento bibliográfico foi fundamental para embasar o desenvolvimento do protótipo e garantir que o protótipo se tornasse, ao término da pesquisa, um produto mínimo viável.

Após o levantamento bibliográfico, foi realizado o projeto de hardware, ou seja, foram projetados diagramas e esquemas eletrônicos que permitissem o desenvolvimento de um protótipo de baixo custo. A saber, basicamente todos os componentes necessários para o funcionamento do EPTS já estão embarcados na placa ESP32, sendo eles: módulo de wi-fi e módulo Bluetooth LE.

Em seguida, foram implementados algoritmos para realizar a comunicação dos dispositivos com o servidor e também para que permitissem a coleta dos dados em sistemas de medidas usuais, o que facilita a interpretação dos dados por atletas e equipes técnicas. Ressalta-se que, para correção dos dados, foi aplicado filtro de Kalman no algoritmo de coleta de dados posicionais.

Ademais, após a implementação dos algoritmos, foi concebido, considerando as características particulares, um invólucro para o protótipo, que foi modelado tridimensionalmente e, em seguida, confeccionado em uma impressora 3D.

Com o protótipo pronto, foram realizados testes quantitativos do protótipo, com o objetivo de aferir/avaliar seu desempenho e, para isto, foram analisados os seguintes itens:

- Capacidade de se conectar ao servidor e enviar informações;
- Capacidade de identificar os *beacons* e seus RSSIs;
- Capacidade de rastreabilidade em tempo real;
- Coerência da distância medida real com a estimada pelo hardware;

- Comparação da distância estimada pelo hardware com a aplicação do filtro de Kalman;

Essa abordagem baseada em evidências permitiu que os resultados fossem mensuráveis, garantindo a confiabilidade dos dados coletados. As etapas foram realizadas sequencialmente para transformar a ideia em um protótipo funcional, que pudesse ser testado e avaliado. Portanto, a pesquisa descrita no contexto combina elementos práticos e teóricos, buscando contribuir para o avanço do conhecimento nessa área específica.

1.5 Organização do texto

Este estudo contém cinco capítulos. No primeiro capítulo foi feita uma introdução ao tema, contextualizando e justificando o problema da pesquisa, além de apresentar os objetivos a serem alcançados, o que delimita o escopo do trabalho.

No capítulo dois é apresentado o referencial teórico sobre as tecnologias existentes relacionadas ao EPTS, onde conceitos, fundamentos e tecnologias são apresentados.

O capítulo três apresenta os materiais, equipamentos e métodos utilizados nesta pesquisa. Além disso, os detalhes de desenvolvimento do protótipo também são relatados, isto é, contém o projeto do hardware desenvolvido e a solução de software que faz o processamento dos dados de posicionamento dos atletas, o que inclui desde a construção do servidor local até a aplicação do filtro de Kalman para redução de ruídos.

O protótipo construído, que é um produto mínimo viável, foi submetido a testes quantitativos para aferir seu desempenho: consumo de bateria; acurácia com e sem filtro de Kalman; comparação com EPTS estabelecidos no mercado. Os resultados dos testes estão expostos no capítulo quatro.

No capítulo cinco estão apresentadas as conclusões obtidas com este estudo. Por fim, todo o código-fonte implementado computacionalmente está disponível nos apêndices A, B e C.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Com o avanço da tecnologia, computadores, laptops, tablets e dispositivos móveis permitem o acesso rápido a uma variedade de recursos e informações. Nesse sentido, os EPTS têm se mostrado uma ferramenta fundamental no futebol moderno para o monitoramento e análise do desempenho dos jogadores e das equipes. Com o avanço da tecnologia, surgiram dispositivos e sensores capazes de coletar uma ampla gama de dados durante as partidas e os treinamentos, fornecendo informações precisas sobre a velocidade, a distância percorrida, entre outros parâmetros relevantes. Esses sistemas têm o potencial de oferecer uma visão detalhada do desempenho individual e coletivo, auxiliando no planejamento tático, no aprimoramento técnico/físico e na tomada de decisões estratégicas.

A integração da informática pessoal com os EPTS tem revolucionado o futebol, proporcionando uma abordagem mais avançada e precisa para a análise e monitoramento do desempenho esportivo. Através da informática pessoal, os profissionais do futebol podem acessar e processar os dados coletados pelos EPTS, permitindo uma análise aprofundada das métricas e estatísticas obtidas durante as partidas e treinamentos. Além disso, a informática pessoal oferece recursos de visualização e compartilhamento de dados, possibilitando a criação de relatórios personalizados e a comunicação eficiente entre os membros da equipe. A combinação da informática pessoal com os EPTS permite uma compreensão mais abrangente do desempenho individual e coletivo, auxiliando na tomada de decisões estratégicas, no planejamento tático e no aprimoramento contínuo das habilidades dos jogadores.

Neste referencial teórico, são abordados estudos e pesquisas que exploram o EPTS no futebol, bem como suas aplicações práticas no contexto esportivo. Contudo, inicia com uma revisão de informática pessoal.

2.1 Informática pessoal

Um sistema de informática pessoal (IP) é qualquer combinação de hardware e software que facilita a coleta, armazenamento, análise e gerenciamento dos dados de condicionamento físico ou saúde de um indivíduo (DIJK et al., 2017)

Segundo Dijk et al. (2017), o campo de pesquisa de IP gira em torno de tecnologias que facilitem a coleta e revisão de informações pessoais relevantes e pertinentes a um problema. Espera-se, então, que sistemas de IP forneçam aos usuários uma autopercepção orientada por dados para ajudá-los corrigir e melhorar seus padrões comportamentais. Os autores também concluem, após análise, que os participantes submetidos a testes com IP, relatam vários tipos de percepções baseadas em dados, podendo até mudar o comportamento pessoal.

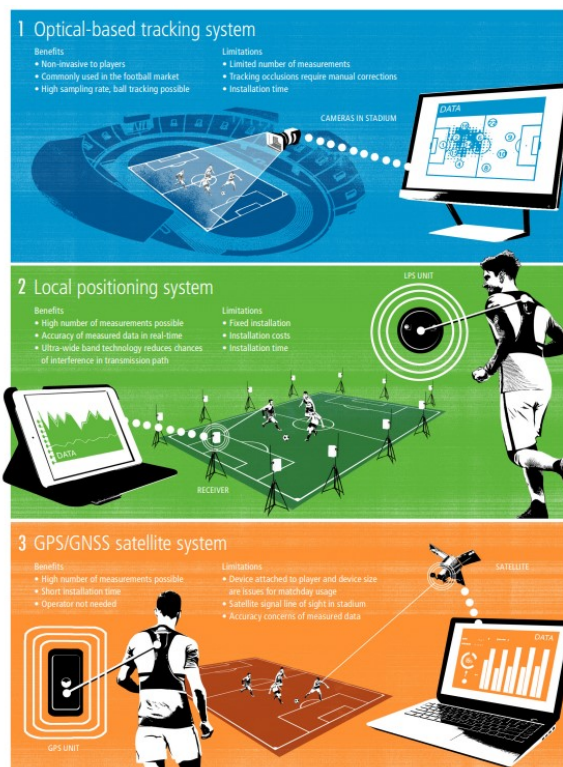
Rapp e Tirabeni (2018), após um estudo com participantes a respeito do uso de IP no esportes, concluíram que este público compreende de forma diferente os instrumentos de IP. O autor ressalta também que os hardwares de IP empregados no esporte devem ser estritamente utilizadas com a supervisão de um treinador ou equipe técnica, haja visto que sua utilização por amadores não possibilita que construam um conhecimento aprofundado a respeito de suas práticas esportivas, podendo até ocasionar mecanização do corpo humano.

O uso de IP é exposto como um processo composto por cinco etapas: preparação, coleta, integração, reflexão e ação (LI; DEY; FORLIZZI, 2010). Durante a fase de preparação, o usuário decide que atividade ele deseja rastrear, como irão rastrear e qual tecnologia ou aplicativo funcionará corretamente. Em seguida, na fase de coleta de dados, a qual leva os usuários à integração, é feita a conversão de dados brutos coletados de uma ou várias fontes em uma planilha coerente para a análise e reflexão. Após a reflexão, os usuários entram na fase de ação, onde os dados obtidos são utilizados para mudar seu comportamento.

2.2 EPTS no futebol

A revisão de literatura dos EPTS ajuda a conceber uma compreensão geral da natureza deles no esporte, abordando também uma criteriosa análise a respeito dos dispositivos vestíveis.

Figura 2 – Tipos de EPTS regulamentados atualmente pela FIFA (BOARD, 2021).



Os EPTS fornecem a posição dos jogadores, em alguns sistemas também rastreiam a posição da bola, durante uma partida de futebol e podem ainda coletar outros dados. Eles podem ser classificados em três tipos conforme mostrado na figura 2: Sistema de Rastreamento Baseado em Óptica, que também são conhecidos por Sistemas de Rastreamento por Vídeo (VTS - *Video Tracking Systems*); Sistemas de Posicionamento Local (LPS - *Local Positioning Systems*) e Sistemas de Posicionamento Global (GPS - *Global Positioning Systems*). Combinar informações de diversos tipos de sistemas pode aumentar a precisão oferecendo uma qualidade e validade significativa (PETTERSEN et al., 2018).

O VTS é uma tecnologia de monitoramento do comportamento e posição dos jogadores, sendo o único EPTS empregado em partidas de futebol antes de 2015, ano que a FIFA regulamentou o uso de dispositivos vestíveis em partidas de futebol. O VTS é um tipo de ferramenta IP que analisa o comportamento e posição dos jogadores com base em diversas câmeras semiautomáticas de alta definição, que rastreiam os jogadores colocados dentro do campo de futebol (PETTERSEN et al., 2018). Com várias câmeras dispersas pelo campo, os movimentos são rastreados por segmentação de imagem, usando diversas técnicas de processamento de imagem. Assim, é possível produzir as trajetórias dos jogadores ao decorrer de uma partida, facilitando o estudo e correção pela equipe técnica (GAMBLE; CHIA; ALLEN, 2020).

Assim como o VTS, LPS e GPS são adotados, de maneira regulamentada, desde 2015 no futebol. Estes sistemas são baseados em tecnologia de radiofrequência e exige que o jogador use um dispositivo fixado, geralmente, na parte superior das costas, podendo conter alguns sensores adicionais. Especificamente, o LPS emite sinais para receptores espalhados estrategicamente pelo campo, que são chamados de *beacons*, os quais calculam e processam a posição de cada jogador. Acelerômetros e monitores de frequência cardíaca, que oferecem uma grande variedade de variáveis, também podem ser usados em combinação com dispositivos LPS (PETTERSEN et al., 2018).

Tecnologias como essas fornecem dados importantes para treinar uma equipe a fim de aumentar seu rendimento e sua qualidade de desempenho em campo. As variáveis mecânicas são críticas para que as equipes de treinamento individualizem as atividades dos jogadores e para que eles possam avaliar sua própria condição física (ROSSI et al., 2018). As variáveis cinemáticas e neuromusculares também contribuem para que os jogadores e equipe técnica entendam as fraquezas do corpo, buscando trabalhar para minimizar estas fraquezas ao atuar nas variáveis associadas à elas. A equipe de treinamento organizará a carga de treino de acordo com os dados. Por último, os treinadores se beneficiam de variáveis táticas que avaliam o time como um todo, reconhecendo as lacunas e brechas a serem compreendidas e preenchidas (GAMBLE; CHIA; ALLEN, 2020).

2.3 Localização e posicionamento

Existem alguns conceitos de posicionamento básicos pertinentes à este estudo e eles são apresentados nas próximas seções.

2.3.1 Estimativa de distância baseada na intensidade do sinal

A intensidade de um sinal é um parâmetro importante no contexto de comunicações sem fio e pode ser utilizado para estimar a distância entre um ponto transmissor e um ponto receptor. Essa abordagem é conhecida como estimativa de distância baseada na intensidade do sinal. A ideia por trás desse método é que a intensidade do sinal tende a diminuir à medida que a distância entre o transmissor e o receptor aumenta. É importante destacar que a estimativa da distância com base na intensidade do sinal pode ser afetada por diversos fatores, como a presença de obstáculos físicos, interferências e variações no ambiente de propagação. Essas influências podem introduzir erros e imprecisões nas estimativas de distância.

Para aumentar a precisão e alcance pode-se então utilizar várias antenas de rádios em diferentes posições, sobrepondo parte de suas áreas de cobertura para determinar a posição do objeto rastreado (LARSSON, 2015), que é uma técnica chamada de trilateração.

2.3.2 Trilateração

A trilateração é uma técnica de localização que utiliza a medição de distâncias entre um objeto desconhecido em relação a três ou mais pontos de referência conhecidos para determinar a posição do objeto desconhecido. A técnica é amplamente utilizada em aplicações de localização em ambientes internos (*indoor*), como rastreamento de pacientes em hospitais, orientações de pessoas com deficiência visual e orientação de bombeiros (OLIVEIRA; FREITAS, 2021a), (OLIVEIRA; FREITAS, 2021b), (OLIVEIRA; FREITAS, 2021c).

A necessidade de pelo menos três antenas baseia-se em princípios geométricos fundamentais. Para determinar com precisão a posição de um objeto em um sistema bidimensional, são necessárias no mínimo três medidas independentes de distância. Cada antena fornece uma medida de distância entre o objeto a ser localizado e a antena correspondente. Ao ter três medidas de distância, é possível encontrar a interseção dos círculos que representam as distâncias medidas. Essa interseção representa a posição estimada do objeto (ILCI et al., 2015).

Se houvesse apenas duas antenas, as distâncias medidas resultariam em várias posições matematicamente possíveis que satisfariam estas medidas. Isso resultaria em ambiguidade na localização, pois não seria possível determinar com elevada acurácia qual posição é a correta. No entanto, ao ter três ou mais antenas, a interseção dos círculos,

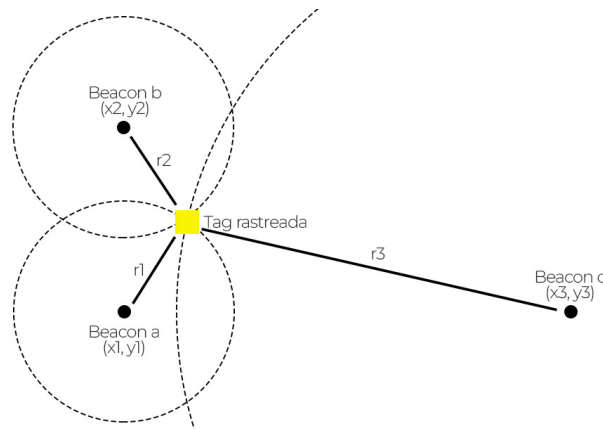
no caso de sistemas bidimensionais, fornecerá uma única posição estimada, eliminando a ambiguidade (ILCI et al., 2015).

É importante mencionar que, além de fornecer uma localização precisa, a adição de mais antenas pode melhorar a precisão da estimativa de posição, especialmente em ambientes com interferências ou obstáculos que possam afetar a qualidade das medidas de distância (ILCI et al., 2015).

A precisão da trilateração depende da precisão das medições de distância e da geometria dos pontos de referência. Em um estudo que comparou o método da trilateração à trena com o método de irradiação, o método da trilateração à trena apresentou 99,75% de precisão (MORAES; MORAES; MORAES, 2019).

Na aplicação da trilateração em redes de sensores wi-Fi para localização em ambientes *indoor*, os pontos de referência são os pontos de acesso wi-Fi presentes no ambiente. Cada ponto de acesso emite um sinal de rádio que pode ser detectado pelos dispositivos móveis presentes no ambiente. A partir da medição da intensidade do sinal recebido por cada ponto de acesso, é possível estimar a distância entre o dispositivo móvel e cada ponto de acesso (OLIVEIRA; FREITAS, 2021a). A figura 3 ilustra um modelo de trilateração utilizando três *beacons* com distâncias previamente conhecidas.

Figura 3 – Exemplo do método de trilateração com três *beacons*



Um ponto (x, y) , no plano cartesiano, está em um círculo de raio r centrado em (cx, cy) se, e somente se, é uma solução para a equação 1:

$$(x - cx)^2 + (y - cy)^2 = r^2 \quad (1)$$

Sendo assim, podemos derivar equações para os círculos gerados pelos *beacons*. Cada um tem sua própria posição, expressada por coordenadas de latitude e longitude, (ϕ_1, λ_1) , (ϕ_2, λ_2) , (ϕ_3, λ_3) .

Logo, o problema de trilateração é resolvido matematicamente encontrando o ponto $P = (\phi, \lambda)$, que satisfaz simultaneamente às equações desses três círculos, e que é apresen-

tando nas equações 2, 3 e 4.

$$(\phi - \phi_1)^2 + (\lambda - \lambda_1)^2 = d_1^2 \quad (2)$$

$$(\phi - \phi_2)^2 + (\lambda - \lambda_2)^2 = d_2^2 \quad (3)$$

$$(\phi - \phi_3)^2 + (\lambda - \lambda_3)^2 = d_3^2 \quad (4)$$

A maneira descrita anteriormente é apenas uma das várias de resolver essas equações (ZUCCONI, 2017).

2.4 Dispositivos e tecnologias

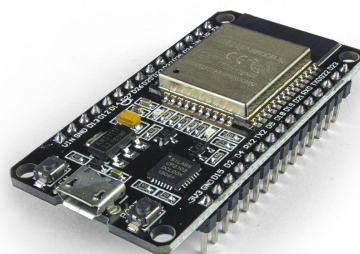
Nesta seção são apresentados alguns dispositivos e algumas tecnologias de baixo custo que podem ser utilizados em EPTS.

2.4.1 ESP32

Os microcontroladores são indispensáveis na atualidade, podendo ser utilizados no desenvolvimento de novos sistemas ou na automação de processos já existentes. São eles os responsáveis por controlar todas rotinas e processos pré-programados, desempenhando, assim, seu papel em uma aplicação.

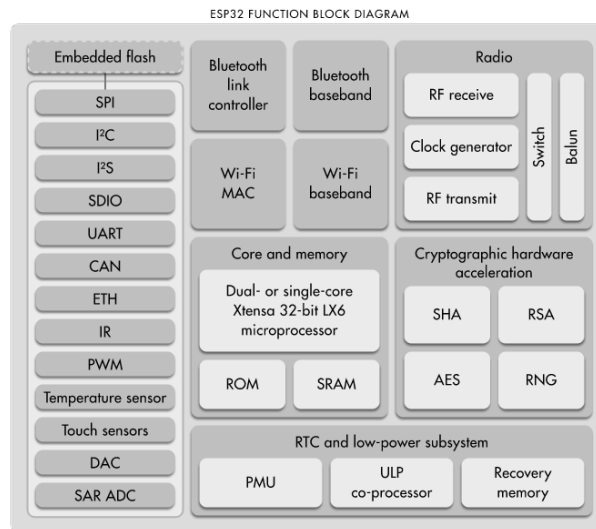
O ESP32 é um microcontrolador do tipo SoC (*System On a Chip*) que possui, em sua estrutura embarcada, módulos de comunicação wi-fi e bluetooth. Ele foi desenvolvido pela Espressif Systems para aplicações móveis, eletro-portáteis e IOT, além de ser otimizado para ter menor consumo de energia (THEESP32, 2022). Uma foto do ESP32 está na figura 4.

Figura 4 – ESP32 DevKit (ROBOCORE, 2023)



Na figura 5, é apresentado o diagrama de blocos detalhando o funcionamento do ESP32, fornecendo uma visão ilustrativa dos módulos e das conexões essenciais para garantir seu correto funcionamento.

Figura 5 – Diagrama em blocos do funcionamento de um ESP32 (THEESP32, 2022)



A seguir são apresentadas algumas especificações técnicas do ESP32:

- Processador Tensilica Xtensa 32-bit com até duas cores;
- Conectividade wi-fi (802.11n) e Bluetooth (BR/EDR e BLE);
- 448 KB de ROM;
- Suporte para armazenamento externo.

2.4.2 Bateria 18650

A bateria 18650, apresentada na figura 6, é uma escolha usual para alimentar dispositivos baseados em ESP32 devido à sua capacidade de fornecer energia suficiente para o dispositivo funcionar corretamente. Além disso, o ESP32 pode ser equipado com um gerenciador de carga confiável, como o módulo TP4056, que permite a alimentação e o carregamento via USB e alterna automaticamente para a bateria sempre que a energia externa for suspensa (TUTORIALS, 2022) (USINAINFO, 2022).

Figura 6 – Bateria 18650 (LIGHTHOUSE, 2023)



Outra vantagem, é sua capacidade de armazenamento de energia. Essas baterias geralmente têm uma capacidade de cerca de 2000 mAh, o que significa que podem fornecer

energia por um longo período de tempo antes de precisarem ser recarregadas. Isso pode ser especialmente útil em aplicações onde a fonte de alimentação externa não está disponível ou é intermitente.

Além disso, o ESP32 possui recursos de economia de energia, como o modo de suspensão profunda, que podem ajudar a prolongar a vida útil da bateria (TUTORIALS, 2022). Isso significa que, ao usar uma bateria 18650 com um ESP32, pode-se aproveitar ao máximo a capacidade da bateria e garantir que o dispositivo continue funcionando por um longo período de tempo.

2.4.3 Bluetooth BLE

O Bluetooth BLE (*Bluetooth Low Energy*), também conhecido como *Bluetooth Smart*, foi introduzido como parte principal do Bluetooth 4.0. Caracterizado por ser um conjunto leve e de baixo consumo energético, o BLE tem uma linguagem diferente e foi criado pela Nokia, que originalmente o nominou de *Wibree*, antes de ser adotado pelo Bluetooth SIG (TOWNSEND, 2022).

O uso de Bluetooth Low Energy (BLE), combinado com indicadores de intensidade de sinal recebido (RSSI), é uma tecnologia eficiente para sistemas de posicionamento local. Um estudo investigou a melhoria do desempenho de um sistema de posicionamento e rastreamento *indoor* através do pré-processamento em tempo real dos dados RSSI medidos. O pré-processamento dos dados RSSI com a técnica de filtro *Maximum Likelihood Estimation*, que é um método estatístico utilizado para estimar os parâmetros de um modelo com base nos dados observados, mostrou aumento no desempenho do posicionamento em mais de 20% para aplicações em tempo real (IEEE, 2022).

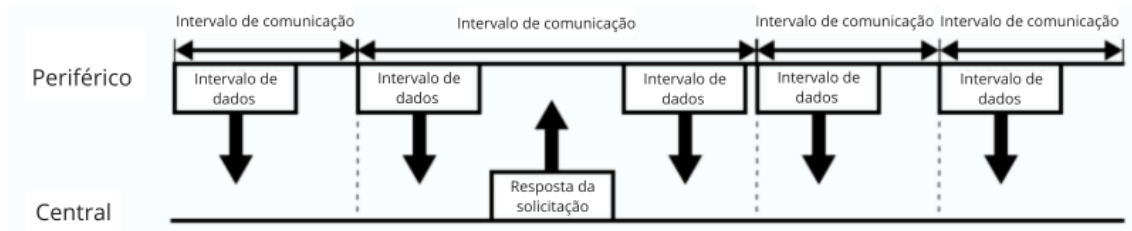
Existem muitos protocolos sem fio disponíveis atualmente, como wi-fi (IEEE 802.11), Bluetooth, Zigbee (IEEE 802.15.4), Z-Wave, NFC, 5G, LoRaWan, entre outros. Todavia, o BLE, que usa protocolo *bluetooth*, se destaca por proporcionar uma maneira mais fácil de projetar algo que pode se comunicar com qualquer plataforma moderna.

A seguir estão apresentadas as plataformas com suporte ao BLE:

- iOS5+ (iOS7+ preferencial);
- Android 4.3+ (várias correções de bugs no 4.4+);
- Windows 8 (XP, Vista e 7 suportam apenas Bluetooth 2.1);
- GNU/Linux Vanilla BlueZ 4.93+.

O diagrama da figura 7 ilustra o processo de envio de dados úteis e como suas respostas são interpretadas. Basicamente, um dispositivo com BLE define um intervalo específico de transmissão e enviará seu pacote, contendo os dados para processamento e/ou análise, sempre que esse intervalo for alcançado.

Figura 7 – Processo de envio e recepção BLE (TOWNSEND, 2022)



Diante disso, é possível criar dispositivos BLE que funcionem como "âncoras", anunciando de tempo em tempo seu *id* e intensidade de sinal para todos os outros dispositivos que o estão "ouvindo" nas proximidades.

2.4.4 RSSI

Received Signal Strength Indicator (RSSI) é uma unidade de medida que mostra o quão bem um dispositivo pode receber um sinal de um ponto de acesso ou emissor. Assim, o RSSI é importante na determinação da qualidade de um sinal de uma conexão sem fio (METAGEEK, 2022).

O valor de RSSI se assemelha à potência de um sinal de rádio recebido, que é medido em dBm, e pode ser utilizado para estimar a distância entre o transmissor e o receptor. Quanto maior o valor do RSSI, maior a força do sinal. A estimativa de intensidade de sinal por meio do RSSI é amplamente aplicada em várias tecnologias, como Wi-Fi, *bluetooth* e redes de sensores sem fio, fornecendo informações valiosas para o monitoramento de qualidade de sinal, localização e tomada de decisões em tempo real. A maioria dos sistemas sem fio fazem o uso de valor RSSI, relatando este valor nativamente. Ressalta-se que a tecnologia BLE também faz uso do valor RSSI (BULTEN, 2015).

2.4.5 BLE e posicionamento

O BLE, por padrão, possui alguns serviços de localização. Esses serviços são conhecidos por *Find Me Profile* (FMP) e *Proximity Profile* (PXP).

O FMP foi projetado para tornar os dispositivos mais fáceis de localizar em situações de perda. Funciona com dois componentes, um é o localizador e o outro é o alvo a ser encontrado. O destino assume a função de servidor, o que significa que ele escuta as solicitações dos navegadores. Quando chega uma solicitação, algum tipo de alarme é acionado no dispositivo de destino. Na maioria dos casos, para facilitar a localização do dispositivo, um alarme é um sinal visual ou sonoro. Também pode ser usado para acionar transmissões ou tentar fazer com que um dispositivo se localize e informe a sua posição estimada (LARSSON, 2015).

O PXP é outro serviço baseado em localização que utiliza o padrão BLE. Ele define o comportamento de um dispositivo quando o perde ou estabelece conexão com outro

dispositivo do mesmo padrão. Também é possível agir quando os valores de *pathloss/RSSI*, que são predeterminados, são excedidos. Esse serviço é mais interessante para sistemas de localização, mas depende do momento em que o dispositivo estabelece uma conexão (LARSSON, 2015).

Pode-se destacar também um produto comercial denominado *iBeacon* da Apple™, cujo objetivo é disponibilizar serviço de localização com dispositivos compatíveis. Este formato não é um padrão genérico, mas espera-se que no decorrer dos anos novos celulares e computadores o suportem. O *iBeacon* é um sistema de duas vias semelhante ao PXP, onde os *beacons* são capazes de responder e fornecer dados para uma aplicação local no dispositivo que está sendo posicionado (APPLE, 2022).

2.5 Filtro de Kalman

As tecnologias de EPTS do tipo LPS são conhecidas por apresentarem uma elevada taxa de ruído em suas medições. O ruído refere-se à imprecisão ou variação indesejada nos dados coletados pelo sistema. No caso das tecnologias LPS, o ruído pode ser causado por vários fatores, como interferência eletromagnética, reflexões de sinal, obstruções físicas, entre outros. Esses fatores podem afetar a precisão das medições de posição e movimento dos atletas durante as práticas esportivas.

Diante disso, na tentativa de minimizar a taxa de ruído desse tipo de sistema, após traduzir RSSI para distância física em metros (o valor do RSSI depende apenas da distância entre os dois dispositivos), pode-se aplicar o filtro de Kalman. Este filtro é uma técnica estatística que é comumente utilizada para estimar o sinal verdadeiro por trás do ruído e, assim, melhorar a qualidade da transmissão. O filtro de Kalman combina informações medidas com modelos estatísticos para estimar um estado desconhecido, isto é, faz uma estimativa com base em variáveis não observadas em medições ruidosas. Trata-se de um algoritmo recursivo já que concentra-se no histórico de medições (BULTEN, 2015). O filtro de Kalman é usado para estimar o sinal verdadeiro por trás do ruído e, assim, melhorar a qualidade da transmissão.

O filtro de Kalman utiliza duas etapas principais: previsão e correção. Na etapa de previsão, o filtro utiliza o modelo do sistema para estimar o próximo estado do sinal com base nas observações anteriores. Em seguida, na etapa de correção, as novas medições são combinadas com as estimativas anteriores para produzir uma estimativa mais precisa do estado atual.

O filtro de Kalman assume que os dados de entrada seguem um modelo probabilístico, onde o ruído é representado como uma variável aleatória com distribuição conhecida. Ele usa as propriedades estatísticas dessas variáveis para filtrar o ruído indesejado e obter uma estimativa mais confiável do sinal original.

Ao longo do processo de filtragem, o filtro de Kalman atualiza continuamente as

estimativas com base nas medições mais recentes e ajusta sua confiança nas estimativas anteriores e nas medições atuais. Isso permite que o filtro de Kalman reduza efetivamente o ruído presente nos sinais de rádio, melhorando a qualidade da transmissão e tornando os dados mais confiáveis e precisos.

É importante ressaltar que a eficácia do filtro de Kalman depende da precisão do modelo estatístico usado, bem como da qualidade das medições obtidas. Além disso, outros fatores, como a presença de interferências externas, também podem afetar a capacidade do filtro de reduzir o ruído de forma adequada. Portanto, é necessário ajustar e configurar adequadamente o filtro de Kalman de acordo com as características específicas do sinal de rádio e do ambiente em que ele está sendo utilizado.

2.6 NodeJs

NodeJs é um software de código aberto, multiplataforma, assíncrono e orientado a eventos. Ele foi projetado para criar aplicativos de rede escalonáveis. Sua principal característica é a execução de eventos em *single-thread*, onde apenas uma *thread* é responsável pela execução do código (OPENJS, 2022).

2.6.1 *Kalman-filter* em NodeJs

Kalman-filter é uma biblioteca de código aberto disponível em NodeJs para a implementação do filtro de Kalman. Essa biblioteca oferece uma implementação flexível e fácil de usar do filtro de Kalman, o que permite estimar estados desconhecidos em sistemas dinâmicos de forma eficiente.

A biblioteca *Kalman-filter* para Node.js disponibiliza uma variedade de recursos que simplificam a implementação do filtro de Kalman ao oferecer funções e métodos para configurar os parâmetros do filtro, como matrizes de transição de estado, matrizes de observação e matrizes de covariância do processo e das medições. Além disso, ela fornece métodos para atualizar o filtro com novas observações e obter estimativas atualizadas do estado do sistema.

Uma das vantagens da biblioteca *Kalman-filter* é sua flexibilidade. Ela permite adaptar o filtro de Kalman para diferentes tipos de sistemas e aplicações específicas. Seja para rastreamento de objetos, previsão de séries temporais ou fusão de dados de sensores, a biblioteca oferece os recursos necessários para personalizar e ajustar o filtro de acordo com as necessidades do projeto.

Outro aspecto positivo da biblioteca *Kalman-filter* é a documentação abrangente. A documentação detalhada explica os conceitos do filtro de Kalman e descreve os métodos disponíveis na biblioteca. Além disso, os exemplos de uso, também disponibilizado pela biblioteca, ajudam a entender como aplicar o filtro de Kalman em diferentes situações e fornecem um ponto de partida para a implementação em projetos Node.js.

O código-fonte a seguir descreve um exemplo simples da utilização da biblioteca *Kalman-filter*, onde cada parâmetro passado na função *filter* é uma das n leituras passíveis de correção.

```
1 const kf = new KalmanFilter();  
2 console.log(kf.filter(3));  
3 console.log(kf.filter(2));  
4 console.log(kf.filter(1));
```

Com sua funcionalidade abrangente e fácil integração, essa biblioteca facilita o uso do filtro de Kalman e ajuda os desenvolvedores a aproveitar ao máximo seus benefícios de filtragem e estimativa de estados. Assim, a biblioteca *Kalman-filter* é uma opção que apresenta inúmeras vantagens para implementar o filtro de Kalman em projetos Node.js.

Para a sua instalação, inicialmente assegura-se que o ambiente de desenvolvimento possui instalado o Node.js e o npm (gerenciador de pacotes do Node.js). Em seguida, o terminal, ou *prompt* de comando, deve ser aberto na pasta do projeto. Utiliza-se o comando *"npm init"* para inicializar um novo projeto Node.js, seguindo as instruções interativas para configurar o projeto. Posteriormente, o comando *"npm install Kalman-filter"* deve ser executado no terminal para buscar a biblioteca no registro oficial de pacotes. O npm, então, realiza o download e a instalação automática da biblioteca. Após a conclusão da instalação, a biblioteca deve ser importada no código através da declaração *"require('Kalman-filter')"*.

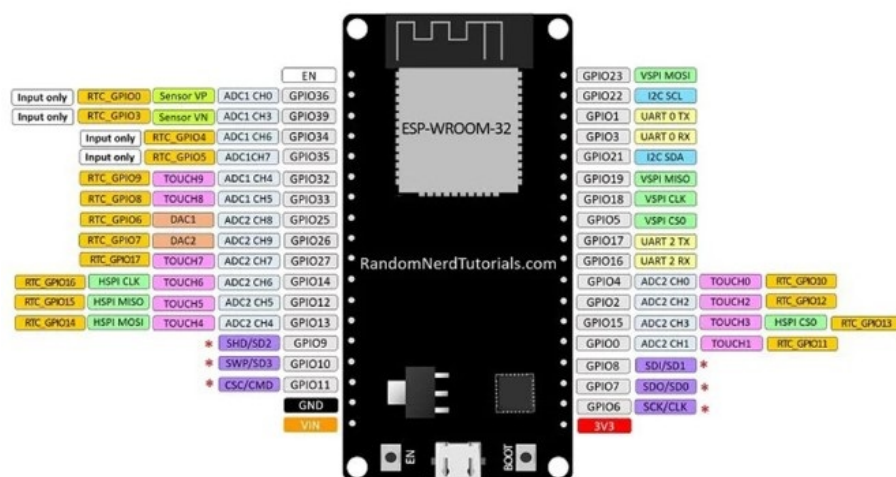
3 SOLUÇÃO PROPOSTA E ARTEFATOS PRODUZIDOS

Neste capítulo são descritos os materiais e equipamentos utilizados no estudo, permitindo que outros pesquisadores possam avaliar e reproduzir os experimentos realizados possibilitando a replicabilidade dos resultados da pesquisa. Os materiais referem-se aos componentes tangíveis necessários para a realização da pesquisa. Os artefatos produzidos são resultado das etapas e procedimentos metodológicos seguidos até a finalização do protótipo de um EPTS do tipo LPS, que é o objetivo desta pesquisa.

3.1 Hardware

No desenvolvimento do protótipo, foi utilizado um módulo ESP32 do modelo Dev-kit v1, da fabricante DOIT. A figura 8 apresenta o *pinout* do módulo embarcado com ESP32. No total foram utilizados quatro módulos do mesmo modelo, sendo três utilizados como *beacons*, conforme apresentado na figura 9, e um deles como *tag* rastreável. Todo o hardware já possui BLE nativamente embarcado e também conectividade wi-fi. Em cada módulo foi vinculada uma bateria do tipo 18650, que é uma bateria de íon de lítio (Li-ion), com 2000mah e 3.7V. A alimentação do ESP32 foi realizada diretamente no pino de 3V. Diferente dos *beacons*, a *tag* rastreável possui um *display* de sete segmentos (vide figura 10), o que facilitou a verificação de informações durante os testes, tais como: conexão a rede bem sucedida, conclusão de envio de informações e códigos de erros.

Figura 8 – Pinout do módulo embarcado com ESP32



Um laptop Asus VivoBook, com um processador Intel Core i7 de 8^o geração, placa de vídeo dedicada Nvidia MX220 com 2Gb, memória ram de 8Gb e Windows™10 Home Edition foi utilizado para criar uma rede Wireless local, a qual a *tag* se conecta para inserir informações no servidor.

Figura 9 – Montagem final dos beacons

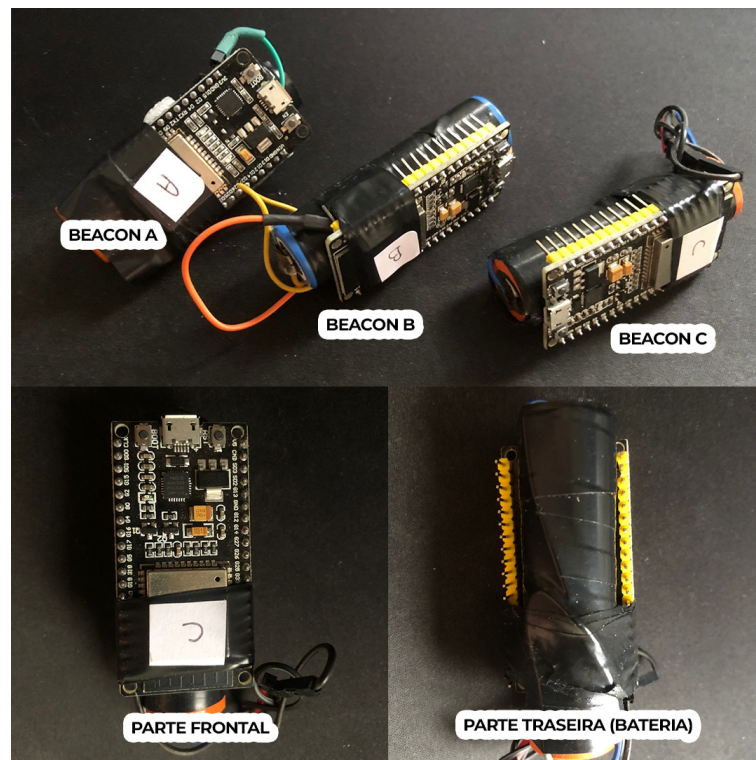
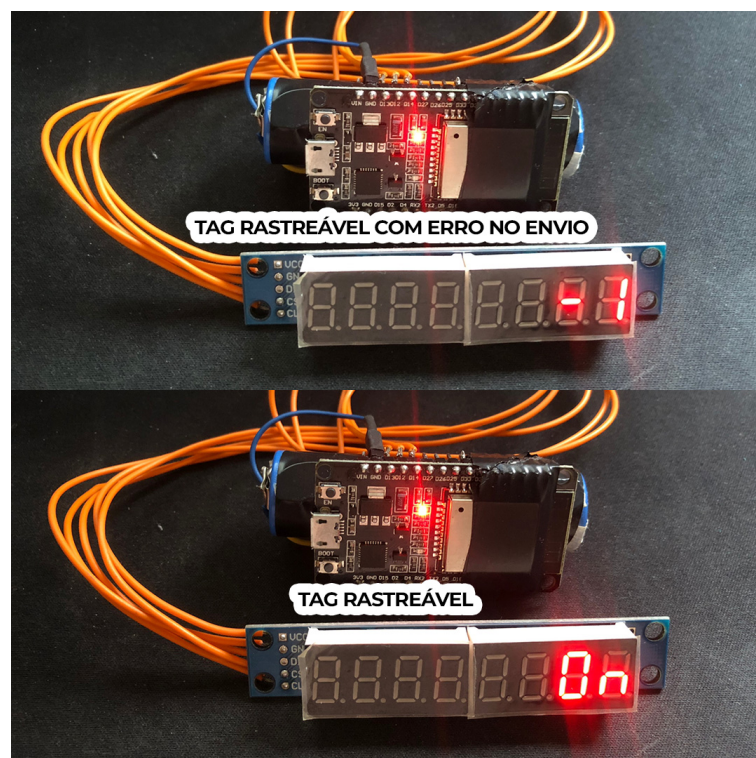


Figura 10 – Montagem final das tags



3.2 Software

Para controlar os equipamentos de hardware desenvolvidos para o protótipo, foi necessário desenvolver softwares, descritos na próxima seção.

3.2.1 Beacons

Os *beacons* executam um código-fonte escrito em linguagem C++. Este código-fonte faz o ESP32 operar como um *beacon*, sinalizando transmitindo suas informações para todos que o estão "ouvindo" nas proximidades. Esse trecho de código-fonte é disponibilizado como exemplo pela própria IDE do Arduino, que possui suporte ao ESP32. Foram feitos pequenos ajustes para adaptar as informações que são sinalizadas pelo *beacon*.

O código-fonte a seguir foi carregado nos três módulos que serão utilizados como *beacons*. Na linha 52 é definido o nome único de cada *beacon*. Para isso, foi definido: ESP32 - Beacon A, ESP32 - Beacon B e ESP32 - Beacon C.

```

1 #include "BLEDevice.h"
2 #include "BLEUtils.h"
3 #include "BLEServer.h"
4 #include "BLEBeacon.h"
5
6 #define GPIO_BREATHING_LIGHT 2
7 #define BEACON_UUID "2fc03570-8ae7-407f-a375-3d2d74d8fc0f"
8 #define ID_FABRICANTE_BEACON 0x4C00
9 #define MAJOR_BEACON 1
10 #define MINOR_BEACON 1
11 #define BEACON_DATA ""
12 #define BEACON_DATA_SIZE 26
13 #define BEACON_DATA_TYPE 0xFF
14 BLEAdvertising *pAdvertising;
15
16 // Funcao para configurar o beacon
17 void configura_beacon(void);
18
19 // Funcao para configurar o beacon
20 void configura_beacon(void)
21 {
22     // Cria uma instancia do objeto BLEBeacon
23     BLEBeacon ble_beacon = BLEBeacon();
24
25     // Define o ID do fabricante do beacon
26     ble_beacon.setManufacturerId(ID_FABRICANTE_BEACON);
27
28     // Define o UUID de proximidade do beacon
29     ble_beacon.setProximityUUID(BLEUUID(BEACON_UUID));

```



```

30
31 // Define o valor do Major do beacon
32 ble_beacon.setMajor(MAJOR_BEACON);
33
34 // Define o valor do Minor do beacon
35 ble_beacon.setMinor(MINOR_BEACON);
36
37 // Cria instancias dos objetos BLEAdvertisementData para os dados de
   anuncio
38 BLEAdvertisementData advertisement_data = BLEAdvertisementData();
39 BLEAdvertisementData scan_response_data = BLEAdvertisementData();
40
41 // Define as flags nos dados de anuncio
42 advertisement_data.setFlags(0x04);
43
44 // Cria uma string para os dados de servico
45 std::string strServiceData = "";
46 strServiceData += (char)BEACON_DATA_SIZE;
47 strServiceData += (char)BEACON_DATA_TYPE;
48 strServiceData += ble_beacon.getData();
49
50 // Adiciona os dados de servico aos dados de anuncio
51 advertisement_data.addData(strServiceData);
52
53 // Define os dados de anuncio e resposta de varredura do objeto
   pAdvertising
54 pAdvertising->setAdvertisementData(advertisement_data);
55 pAdvertising->setScanResponseData(scan_response_data);
56 }
57
58 // Funcao de configuracao inicial
59 void setup()
60 {
61     Serial.begin(115200);
62     Serial.println("Fazendo inicializacao do beacon...");
63
64     // Configura o pino do LED
65     pinMode(GPIO_BREATHING_LIGHT, OUTPUT);
66     digitalWrite(GPIO_BREATHING_LIGHT, LOW);
67
68     // Inicializa o BLEDevice com o nome do dispositivo
69     BLEDevice::init("ESP32 - Beacon C");
70
71     // Cria um servidor BLE
72     BLEServer *pServer = BLEDevice::createServer();
73
74     // Obtem o objeto pAdvertising para configurar o anuncio

```

```

75     pAdvertising = BLEDevice::getAdvertising();
76
77     // Inicia o anuncio BLE
78     BLEDevice::startAdvertising();
79
80     // Configura o beacon
81     configura_beacon();
82
83     // Inicia o anuncio do objeto pAdvertising
84     pAdvertising->start();
85
86     Serial.println("O beacon foi inicializado e ja esta operando.");
87 }
88
89 // Funcao de loop principal
90 void loop()
91 {
92     // Alterna o estado do LED a cada meio segundo
93     digitalWrite(GPIO_BREATHING_LIGHT, LOW);
94     delay(500);
95     digitalWrite(GPIO_BREATHING_LIGHT, HIGH);
96     delay(500);
97 }

```

3.2.2 Tags

Uma das partes principais do software reside na *tag* rastreável. É nela que é feita a busca de todos os *beacons* disponíveis no local, capturando seus respectivos RSSIs e enviando para um servidor, que fará o restante da parte de processamento e localização. O trecho a seguir descreve a função de *loop* gravada na *tag*. Essa função é executada sem uma condição de parada e repete seu processamento a cada ciclo.

```

1 void loop() {
2     //PROCURA AS ITAGS
3
4     BLEDevice::init("");
5     BLEScan* pBLEScan = BLEDevice::getScan(); //CRIA NOVO SCANNER
6     pBLEScan->setAdvertisedDeviceCallbacks(new MyAdvertisedDeviceCallbacks
7         ());
8     pBLEScan->setActiveScan(true);
9     BLEScanResults foundDevices = pBLEScan->start(scanTime);
10
11     if(WiFi.status()== WL_CONNECTED){
12         WiFiClient client;
13         HTTPClient http;

```

```

13
14 //INICIA A CONEXAO
15 http.begin(client , serverName);
16
17 //DEFINE O HEADER DA REQUISICAO
18 http.addHeader("Content-Type", "application/x-www-form-urlencoded"
19 );
20
21 //DEFINE A VARIAVEL COM O CORPO DA REQUISICAO
22 String httpRequestData = "espName=jogador1&espMac="+espMacDevice+"
23 &rssiList=["+dispositivosEncontrados+"];
24
25 dispositivosEncontrados = "";
26
27 //ENVIA A SOLICITACAO
28 int httpResponseCode = http.POST(httpRequestData);
29
30 Serial.println(httpResponseCode);
31
32 showDisp(String(httpResponseCode));
33
34 //LIMPA RECURSOS
35 http.end();
36 }
37 else {
38 Serial.println("WiFi desconectada");
39 }
40 }

```

O *loop principal* inicia verificando a conectividade da *tag* com uma rede wi-fi e, em caso de falha na conexão, novas tentativas são realizadas até obter sucesso. A biblioteca BLEDevice do ESP32 foi modificada para que, durante uma busca de dispositivos BLE nas proximidades, retorne apenas os dispositivos alvos: ESP32 - Beacon A, B e C. A função *scanner*, além de retornar o RSSI de cada *beacon*, retorna seu endereço MAC e nome, que são utilizados no servidor para processamento das distâncias. O retorno da função *scanner* é uma *string* no formato JSON, o que facilita a conversão dos dados quando eles forem recebidos pelo servidor. A seguir a função *scanner* é detalhada.

```

1 // Classe de retorno de chamada para dispositivos BLE anunciados
2 class MyAdvertisedDeviceCallbacks : public BLEAdvertisedDeviceCallbacks
3 {
4 // Metodo chamado quando um dispositivo e encontrado durante a
5 // varredura BLE
6 void onResult(BLEAdvertisedDevice advertisedDevice) {
7 // Extrai o endereco MAC do dispositivo anunciado
8 }
9 }

```

```

6      String macDevice = advertisedDevice.getAddress().toString().
          c_str();
7
8      // Extrai o nome do dispositivo anunciado
9      String nameDevice = advertisedDevice.getName().c_str();
10
11     // Obtem o valor do RSSI do dispositivo anunciado
12     String RSSIDevice = String(advertisedDevice.getRSSI());
13
14     // Verifica se o nome do dispositivo corresponde a um dos
        beacons ESP32
15     if (nameDevice == "ESP32 - Beacon A" || nameDevice == "ESP32 -
        Beacon B" || nameDevice == "ESP32 - Beacon C") {
16         // Constrói uma string formatada com as informacoes do
            dispositivo
17         String dispositivo = "{ 'name': '" + nameDevice + "', 'MAC': '"
            + macDevice + "', 'RSSI': '" + RSSIDevice + "' }, ";
18
19         // Adiciona a string do dispositivo encontrada a lista de
            dispositivos encontrados
20         dispositivosEncontrados = dispositivosEncontrados +
            dispositivo;
21     }
22 }
23 };

```

O retorno da função *scanner*, apresentada anteriormente, é serializado em uma *string* JSON maior, que contém informações do cabeçalho, autenticação e *endpoint*. Posteriormente, o retorno da função *scanner* é enviado ao servidor.

3.2.3 *WebService*

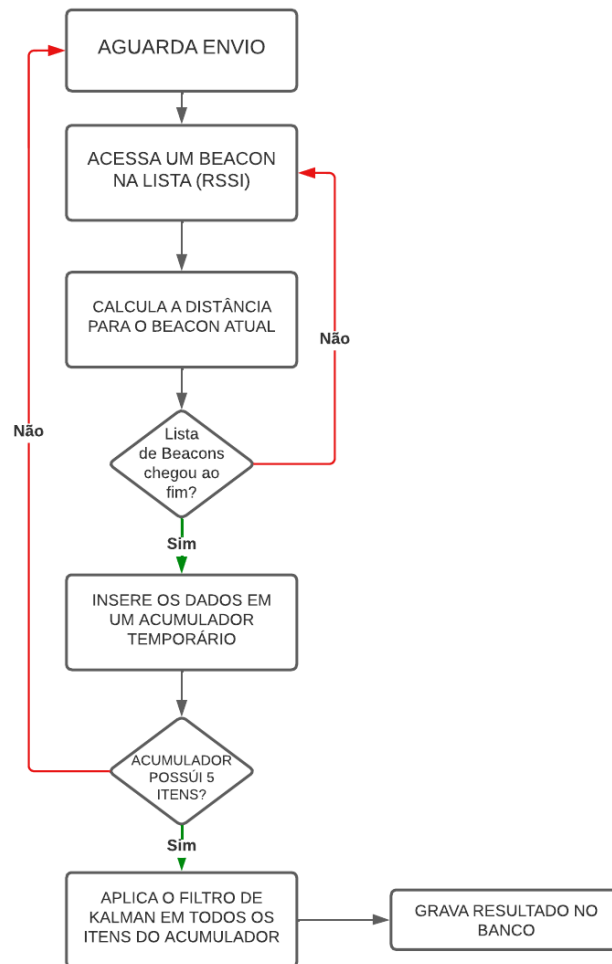
Para receber, processar e exibir os dados, fez-se necessário criar um servidor em NodeJs capaz de lidar com as requisições feitas pela *tag*. O servidor fica em execução na rede local do computador executando o teste, isto é, "ouvindo" as requisições em uma porta descrita no código-fonte.

O servidor utiliza o *framework Express*, que é uma plataforma de código aberto que possibilita a criação rápida de aplicações *back-end*. Com o *framework Express* é possível, de forma simples, configurar rotas, métodos e tornar uma aplicação acessível na rede. Políticas de Cors e segurança foram aplicadas durante o desenvolvimento do código-fonte.

Para armazenar os dados enviados pelas *tags* foi utilizado o NeDB, que é um *framework* de código aberto caracterizado como um banco de dados de memória persistente para NodeJs. A biblioteca é baseada em MongoDB, sendo ela performática nas operações comuns de um banco de dados.

A rota que inicia todo procedimento é a `/updateSignal` e o fluxo seguinte pode ser ilustrado conforme apresentado na figura 11.

Figura 11 – Fluxograma de funcionamento do Webservice



Para cálculo da distância através do RSSI, foi criada uma função para melhor entendimento. Nessa função é implementado o cálculo da distância utilizando RSSI de Ghosh (2020). É importante ressaltar que esse cálculo leva em consideração uma constante de medição da potência de um ESP32 no vazio. O fabricante indica que esta constante é 69 (RSSI). Sendo assim, tem-se que: $Distncia = 10^{((Potnciamedida - RSSI)/(10 * 2))}$.

No código a seguir é apresentada a implementação da função que calcula a distância com base no RSSI.

```

1 // Funcao para calcular a distancia com base no RSSI
2 function calculaDistancia(RSSI) {
3     // Potencia de referencia a uma determinada distancia
4     const potenciaReferencia = -69;
5
6     // Aplica a formula do logaritmo da distancia
  
```

```

7   const distancia = Math.pow(10, ((potenciaReferencia - RSSI) / (10 *
8       2)));
9   // Retorna a distancia calculada
10  return distancia;
11 }

```

A função a seguir descreve a aplicação do Filtro de Kalman nos dados recebidos pelo *WebService*.

```

1  async function kalmanFilter() {
2      // Arrays para armazenar as distancias dos beacons
3      var distanciaA = [];
4      var distanciaB = [];
5      var distanciaC = [];
6
7      // Inicializa a variavel 'result' com o valor de 'acumulador'
8      var result = acumulador;
9
10     // Itera sobre as chaves do objeto 'result'
11     Object.keys(result).forEach(function (key) {
12         // Verifica se ha um objeto com o nome 'ESP32 - Beacon A' na
13         // lista de RSSI
14         if (result[key].rssiList.find(o => o.name === 'ESP32 - Beacon A')
15             ) {
16             // Se encontrado, adiciona a distancia ao array 'distanciaA'
17             distanciaA.push(parseFloat(result[key].rssiList.find(o => o.
18                 name === 'ESP32 - Beacon A').distancia));
19         }
20         // Caso contrario, verifica se ha um objeto com o nome 'ESP32 -
21         // Beacon B'
22         else if (result[key].rssiList.find(o => o.name === 'ESP32 -
23             Beacon B')) {
24             // Se encontrado, adiciona a distancia ao array 'distanciaB'
25             distanciaB.push(parseFloat(result[key].rssiList.find(o => o.
26                 name === 'ESP32 - Beacon B').distancia));
27         }
28         // Caso contrario, adiciona a distancia ao array 'distanciaC'
29         else {
30             distanciaC.push(parseFloat(result[key].rssiList.find(o => o.
31                 name === 'ESP32 - Beacon C').distancia));
32         }
33     });
34
35     // Cria uma instancia da classe 'KalmanFilter'
36     const kFilter = new KalmanFilter();

```

```

30
31 // Aplica o filtro de Kalman em cada array de distancia
32 const distanciaAFiltered = kFilter.filterAll(distanciaA);
33 const distanciaBFiltered = kFilter.filterAll(distanciaB);
34 const distanciaCFiltered = kFilter.filterAll(distanciaC);
35
36 // Atualiza os valores de distancia no objeto 'result' com os
   valores filtrados
37 Object.keys(result).forEach(function (key) {
38   if (result[key].rssiList.find(o => o.name === 'ESP32 - Beacon A
   ')) {
39     result[key].rssiList.find(o => o.name === 'ESP32 - Beacon A
   ').distancia = distanciaAFiltered[key];
40   } else if (result[key].rssiList.find(o => o.name === 'ESP32 -
   Beacon B')) {
41     result[key].rssiList.find(o => o.name === 'ESP32 - Beacon B
   ').distancia = distanciaBFiltered[key];
42   } else {
43     result[key].rssiList.find(o => o.name === 'ESP32 - Beacon C
   ').distancia = distanciaCFiltered[key];
44   }
45 });
46
47 // Insere o objeto 'result' no banco de dados e limpa 'acumulador'
48 db.insert(result, function (err, newDoc) {
49   acumulador = [];
50 });

```

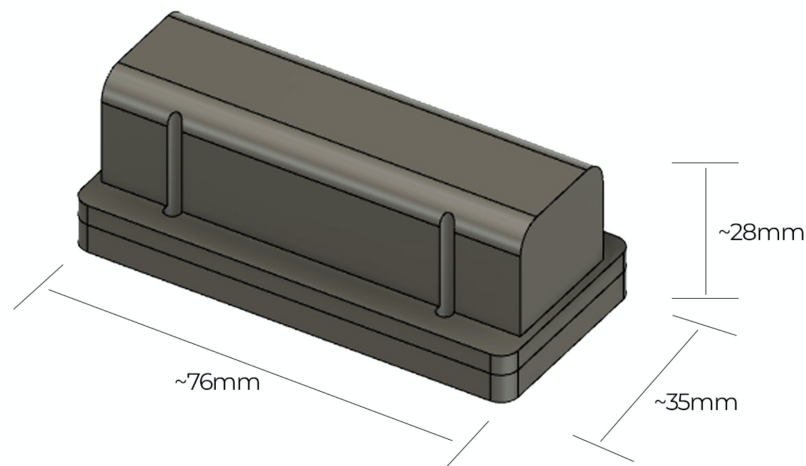
A função *kalmanFilter* recebe os dados, os padroniza pegando as últimas cinco leituras e aplica o filtro de Kalman, utilizado da biblioteca *Kalman-Filter*. O resultado é novamente serializado e gravado no banco de dados.

Por fim, após a execução de um ciclo completo, são obtidos os dados de posição, que são gravados para análise ou consulta.

4 TESTES E RESULTADOS

Foi realizado o desenvolvimento de um invólucro personalizado para abrigar o protótipo do dispositivo. Utilizando a tecnologia de modelagem e impressão em 3D, foi possível criar uma estrutura sob medida, que se adaptou às dimensões e especificações do protótipo. O invólucro foi projetado levando em consideração aspectos funcionais, estéticos e ergonômicos, visando proporcionar proteção adequada ao dispositivo. A utilização da impressão 3D possibilitou a fabricação do invólucro, permitindo realizar ajustes e modificações de forma ágil durante o processo de prototipagem. Na figura 12 é possível visualizar a modelagem com dimensões da case e a figura 13 apresenta a foto do invólucro impresso.

Figura 12 – Modelagem do invólucro com suas dimensões



Os testes foram realizados com o objetivo de verificar o funcionamento da solução desenvolvida e da acurácia do protótipo. Durante o desenvolvimento, testes preliminares foram realizados, tais como: verificar a capacidade de se conectar ao servidor e enviar informações; capacidade de identificar os *beacons* e seus RSSIs. Estes testes preliminares são passíveis de serem realizados com os dispositivos lado a lado durante o desenvolvimento do software e do hardware, facilitando, assim, correção e ajustes quando necessários. Desse modo, ao término da etapa de desenvolvimento, o protótipo estava se conectando ao servidor e enviando informações, bem como identificando os *beacons* e seus RSSIs. Na figura 14 é possível visualizar um exemplo de leituras armazenadas localmente no servidor.

Figura 13 – Foto do invólucro após impressão 3D

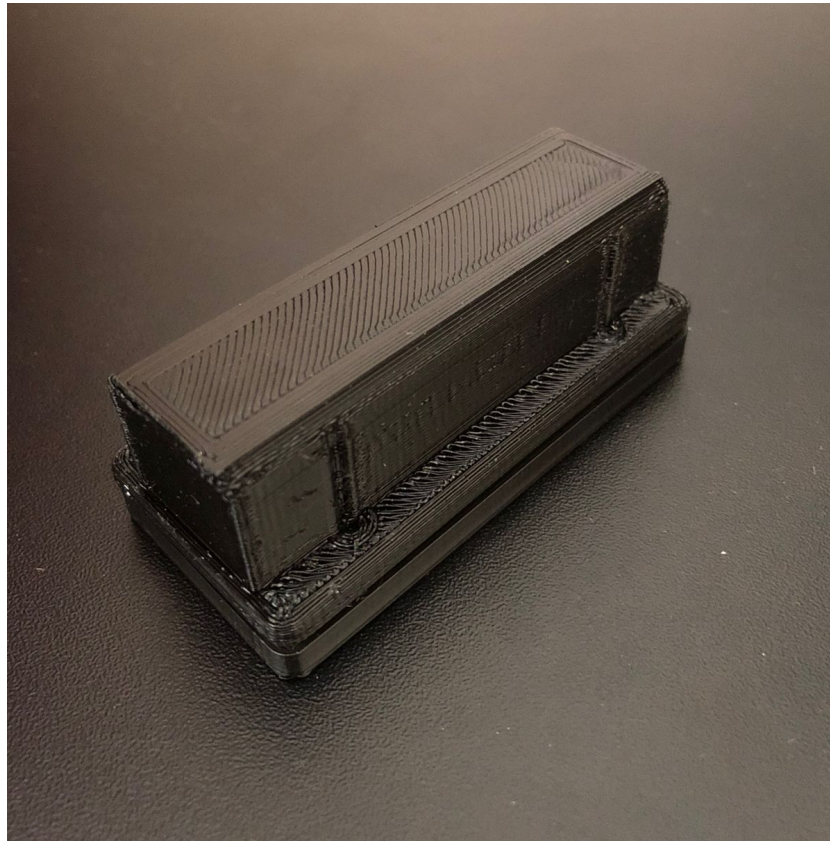


Figura 14 – Banco de dados com as leituras de RSSI e distância da TAG

```

path > to > {} datafile > {} rssilist > {} 0 > RSSI
1 { "criadoEm":{"$date":"1669585434795"}, "espName":"jogador1", "espMac":"24:62:AB:E0:DA:EC", "rssilist":[{"name":"ESP32 - Beacon A", "MAC":"ec:62:60:94:c9:26", "RSSI":"-88", "distancia":[3.466816005107315
2 { "criadoEm":{"$date":"1669585360651"}, "espName":"jogador1", "espMac":"24:62:AB:E0:DA:EC", "rssilist":[{"name":"ESP32 - Beacon B", "MAC":"ec:62:60:82:77:62", "RSSI":"-63", "distancia":[0.5011872336272722
3 { "criadoEm":{"$date":"1669585421309"}, "espName":"jogador1", "espMac":"24:62:AB:E0:DA:EC", "rssilist":[{"name":"ESP32 - Beacon A", "MAC":"ec:62:60:94:c9:26", "RSSI":"-88", "distancia":[8.912500468845899
4 { "criadoEm":{"$date":"1669584995705"}, "espName":"jogador1", "espMac":"24:62:AB:E0:DA:EC", "rssilist":[{"name":"ESP32 - Beacon A", "MAC":"ec:62:60:94:c9:26", "RSSI":"-73", "distancia":[1.893890204519926
5 { "criadoEm":{"$date":"1669584465776"}, "espName":"jogador1", "espMac":"24:62:AB:E0:DA:EC", "rssilist":[{"name":"ESP32 - Beacon A", "MAC":"ec:62:60:94:c9:26", "RSSI":"-76", "distancia":[2.157567505230117
6 { "criadoEm":{"$date":"1669585364066"}, "espName":"jogador1", "espMac":"24:62:AB:E0:DA:EC", "rssilist":[{"name":"ESP32 - Beacon A", "MAC":"ec:62:60:94:c9:26", "RSSI":"-75", "distancia":[2.043689717041872
7 { "criadoEm":{"$date":"1669583105941"}, "espName":"jogador1", "espMac":"24:62:AB:E0:DA:EC", "rssilist":[{"name":"ESP32 - Beacon A", "MAC":"ec:62:60:94:c9:26", "RSSI":"-88", "distancia":[3.11442859675901
8 { "criadoEm":{"$date":"1669585002654"}, "espName":"jogador1", "espMac":"24:62:AB:E0:DA:EC", "rssilist":[{"name":"ESP32 - Beacon A", "MAC":"ec:62:60:94:c9:26", "RSSI":"-76", "distancia":[2.033786256679145
9 { "criadoEm":{"$date":"1669585022636"}, "espName":"jogador1", "espMac":"24:62:AB:E0:DA:EC", "rssilist":[{"name":"ESP32 - Beacon A", "MAC":"ec:62:60:94:c9:26", "RSSI":"-76", "distancia":[2.238718899851678
10 { "criadoEm":{"$date":"1669585032735"}, "espName":"jogador1", "espMac":"24:62:AB:E0:DA:EC", "rssilist":[{"name":"ESP32 - Beacon A", "MAC":"ec:62:60:94:c9:26", "RSSI":"-78", "distancia":[1.3767324259930671
11 { "criadoEm":{"$date":"1669585313538"}, "espName":"jogador1", "espMac":"24:62:AB:E0:DA:EC", "rssilist":[{"name":"ESP32 - Beacon B", "MAC":"ec:62:60:82:77:62", "RSSI":"-56", "distancia":[0.2238721138568336
12 { "criadoEm":{"$date":"1669584462422"}, "espName":"jogador1", "espMac":"24:62:AB:E0:DA:EC", "rssilist":[{"name":"ESP32 - Beacon B", "MAC":"ec:62:60:82:77:62", "RSSI":"-56", "distancia":[0.2238721138568336
13 { "criadoEm":{"$date":"1669585431428"}, "espName":"jogador1", "espMac":"24:62:AB:E0:DA:EC", "rssilist":[{"name":"ESP32 - Beacon B", "MAC":"ec:62:60:82:77:62", "RSSI":"-57", "distancia":[0.251189643150958]
14 { "criadoEm":{"$date":"1669584999110"}, "espName":"jogador1", "espMac":"24:62:AB:E0:DA:EC", "rssilist":[{"name":"ESP32 - Beacon B", "MAC":"ec:62:60:82:77:62", "RSSI":"-56", "distancia":[0.2238721138568336
15 { "criadoEm":{"$date":"1669585357286"}, "espName":"jogador1", "espMac":"24:62:AB:E0:DA:EC", "rssilist":[{"name":"ESP32 - Beacon B", "MAC":"ec:62:60:82:77:62", "RSSI":"-56", "distancia":[0.2238721138568336
16 { "criadoEm":{"$date":"166958516956"}, "espName":"jogador1", "espMac":"24:62:AB:E0:DA:EC", "rssilist":[{"name":"ESP32 - Beacon B", "MAC":"ec:62:60:82:77:62", "RSSI":"-58", "distancia":[0.2818382931264453
17 { "criadoEm":{"$date":"1669583102483"}, "espName":"jogador1", "espMac":"24:62:AB:E0:DA:EC", "rssilist":[{"name":"ESP32 - Beacon B", "MAC":"ec:62:60:82:77:62", "RSSI":"-58", "distancia":[0.2818382931264453
18 { "criadoEm":{"$date":"1669581109171"}, "espName":"jogador1", "espMac":"24:62:AB:E0:DA:EC", "rssilist":[{"name":"ESP32 - Beacon B", "MAC":"ec:62:60:82:77:62", "RSSI":"-58", "distancia":[0.2818382931264453
19 { "criadoEm":{"$date":"1669585029377"}, "espName":"jogador1", "espMac":"24:62:AB:E0:DA:EC", "rssilist":[{"name":"ESP32 - Beacon B", "MAC":"ec:62:60:82:77:62", "RSSI":"-57", "distancia":[0.251189643150958]
20 { "criadoEm":{"$date":"1669585026002"}, "espName":"jogador1", "espMac":"24:62:AB:E0:DA:EC", "rssilist":[{"name":"ESP32 - Beacon B", "MAC":"ec:62:60:82:77:62", "RSSI":"-59", "distancia":[0.3162277668168379

```

4.1 Consumo da bateria

O consumo médio da bateria durante o funcionamento do dispositivo foi de, aproximadamente, 60mA. No entanto, foram observados picos de consumo que atingiram, em determinados momentos de uso, 170mA. Com base nessas informações, foi possível estimar o tempo de funcionamento do dispositivo. No melhor cenário, levando em consideração o consumo médio, estima-se que a bateria apresente autonomia de aproximadamente 33 horas antes de ser necessário recarregá-la. No pior cenário, considerando os picos de consumo mais elevados, a duração estimada foi para cerca de 12 horas. Esses resultados são importantes para compreender a eficiência energética do dispositivo e fornecer uma estimativa realista do tempo de uso contínuo, permitindo uma melhor gestão da energia.

4.2 Distância medida com a aplicação do filtro de Kalman

Neste teste, com o auxílio de uma fita métrica, a *tag* foi posicionada a 5m de um dos *beacons* e a análise foi iniciada. No decorrer do tempo, foram feitas nove medições e seus resultados salvos no banco de dados. O resultado do teste com 5m é apresentado na figura 15. Observa-se, visualmente, que há bastante ruído nas leituras obtidas. Esse ruído foi confirmado analisando o arquivo bruto com as leituras diretas de RSSI. Entretanto, foi verificado que o filtro de Kalman age suavizando a curva do ruído. Observa-se também que as leituras iniciais são mais consistentes, já as finais possuem um ruído maior. Uma possível causa seria a fonte de alimentação utilizada, já que não foi medido durante os testes o pico de consumo.

O mesmo teste e a mesma avaliação, descritos no parágrafo anterior, foram replicados aumentando as distâncias. Do mesmo modo, ainda foi observado um ruído moderado, que é compensado pelo filtro de Kalman. Os resultados das observações referentes às medições de 15m, 35m, 50m e 60m são apresentados na figura 16, na figura 17, na figura 18 e na figura 19, respectivamente.

O teste de 5m apresentou erro médio absoluto de 1,51m sem filtro e de 1,13m com filtro de Kalman. Já o teste de 15m, o erro médio absoluto sem filtro foi de 2,92m e com filtro de Kalman foi de 1,96m. O teste de 35m, apresentou erro médio absoluto sem filtro de 3,11m e de 2,25m com filtro de Kalman. Em 50m, o erro médio absoluto foi de 4,55m sem filtro e de 3,48m com filtro. Por fim, em 60m o erro médio absoluto foi de 11,22m sem o filtro e 9,22m com o filtro de Kalman. Desse modo, a partir dos testes, evidencia-se que o filtro de Kalman cumpriu, como esperado, seu papel, que é o de reduzir o ruído do sinal e, deste modo, aumentar a precisão do sistema proposto. A tabela 1 apresenta os resultados de maneira sumarizada em suas respectivas medidas, assim como a porcentagem de erro obtido em relação ao tamanho do campo. Para o cálculo foi considerado um campo com 105m de comprimento por 68m de largura, o que resultou em área total de 7140 m².

Tabela 1 – Resultados com percentuais de erro dos testes aplicados

Variável	Distância				
	5 metros	15 metros	35 metros	50 metros	60 metros
Erro médio sem utilização do filtro (m)	1,5	2,9	3,1	4,5	11,2
Erro médio com a utilização do filtro (m)	1,1	1,9	2,2	3,4	9,2
% de erro sem utilização do filtro	30,2	19,4	8,8	9,1	18,7
% de erro com a utilização do filtro	22,6	13,0	6,4	6,9	15,3
% de erro sem utilização do filtro em relação ao campo	0,4	0,3	0,1	0,1	0,3
% de erro com a utilização do filtro em relação ao campo	0,3	0,2	0,1	0,1	0,2

Figura 15 – Efeito do filtro de Kalman em dados de distância obtidos no ambiente de teste com a distância de 5m

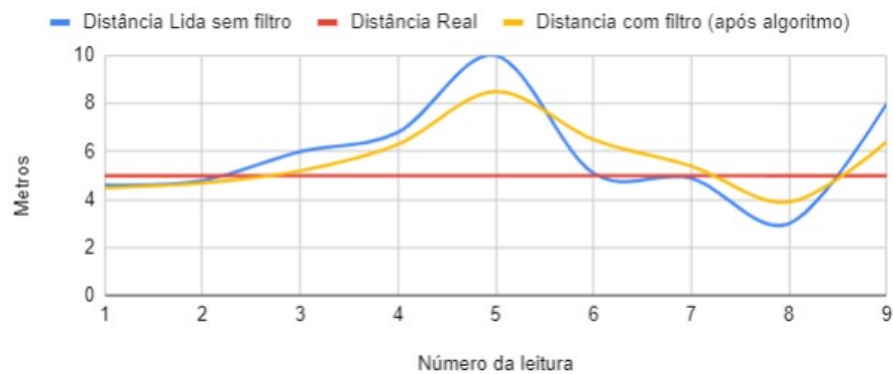


Figura 16 – Efeito do filtro de Kalman em dados de distância obtidos no ambiente de teste com a distância de 15m

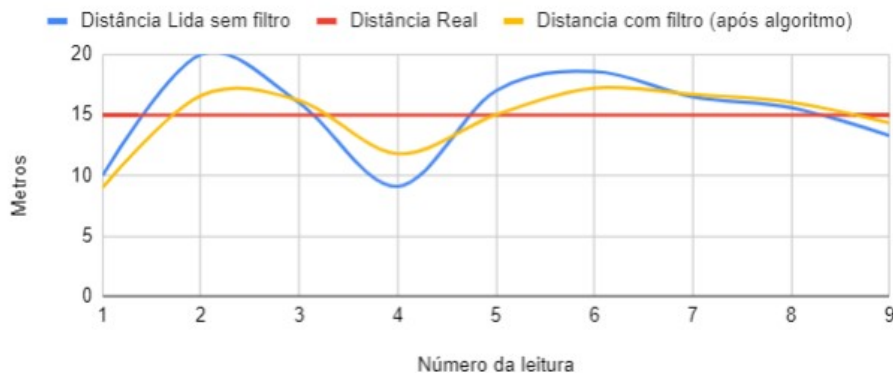


Figura 17 – Efeito do filtro de Kalman em dados de distância obtidos no ambiente de teste com a distância de 35m

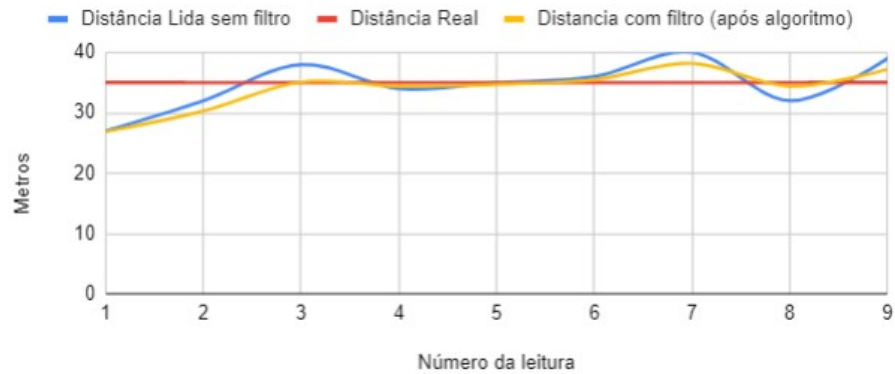


Figura 18 – Efeito do filtro de Kalman em dados de distância obtidos no ambiente de teste com a distância de 50m

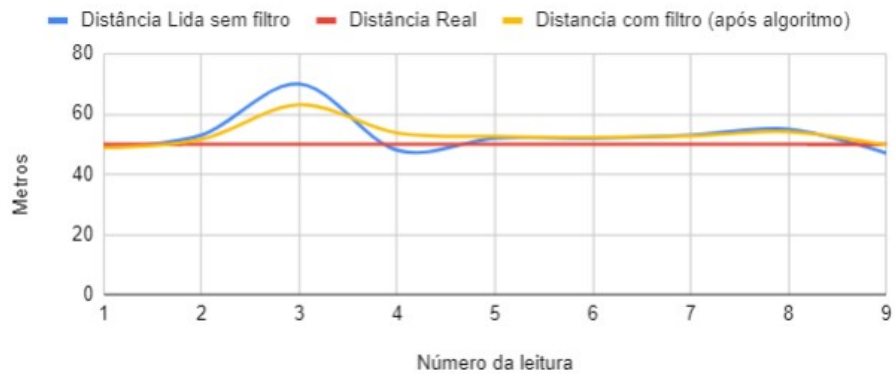
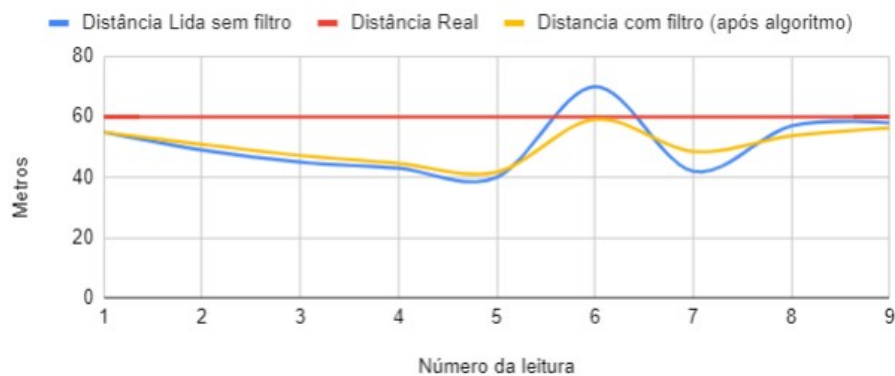


Figura 19 – Efeito do filtro de Kalman em dados de distância obtidos no ambiente de teste com a distância de 60m



5 CONCLUSÃO

A pesquisa teve como objetivo o desenvolvimento de um sistema eletrônico de rastreamento de desempenho (EPTS) do tipo LPS, utilizando Bluetooth Low Energy (BLE) embarcado em uma placa ESP32, com o intuito de criar uma solução de baixo custo. Os resultados alcançados demonstram claramente que o objetivo da pesquisa foi concluído com sucesso. Foi desenvolvido um protótipo funcional do EPTS baseado em LPS, que utiliza a tecnologia BLE. O custo do protótipo foi significativamente inferior em comparação aos EPTS disponíveis no mercado, tornando-o uma opção mais acessível a equipes de futebol que não tenham alto poder aquisitivo, contribuindo para diminuir as desigualdades tecnológicas no esporte.

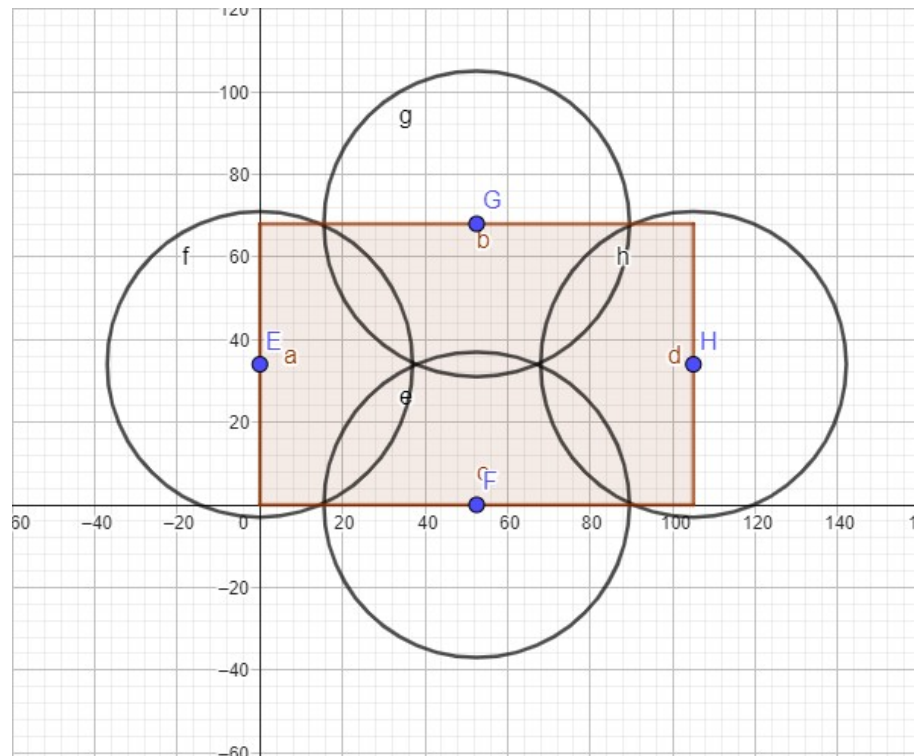
Além disso, a acurácia obtida pelo protótipo utilizando filtro de Kalman mostrou-se superior à do GPS de uso civil, indicando um erro menor na estimativa de posição. Adicionalmente, o protótipo possui uma autonomia energética de pelo menos 11 horas, o que é satisfatório para a maioria das aplicações. Esses resultados comprovam que o objetivo da pesquisa foi concluído de forma bem-sucedida, oferecendo um sistema de rastreamento de desempenho eficiente de baixo custo. Os dados sugerem que o BLE é indicado para sistemas de posicionamentos cujo a área é significativamente pequena, haja visto que a discrepância aumenta quando a distância medida ultrapassa 15 metros. Desse modo, o protótipo do EPTS desenvolvido mostra-se mais eficaz do que o método por GPS, já que este possui, para aplicações de uso civil, precisão planimétrica de ordem de três a dez metros (OLIVEIRA; SILVA; SANTANA, 2021).

Para realizar a cobertura de todo o campo com o EPTS proposto neste trabalho, foram elaborados mapas para ilustrar duas ideias de distribuição das antenas (*beacons*) no campo. O primeiro mapa, contido na figura 20, utiliza quatro antenas, cada uma com um raio de alcance de 47 metros, abrangendo todo o campo. Embora essa configuração proporcione uma cobertura completa e de custo reduzido, o erro médio de distâncias superiores a 35 metros é relativamente alto, comprometendo a acurácia do sistema em determinados momentos.

No segundo mapa, apresentado na figura 21, foram utilizadas mais antenas a fim de garantir que a distância máxima de qualquer atleta em campo não fosse superior a 35 metros. Nessa abordagem, foram utilizadas 12 antenas. Foram distribuídas 5 antenas em cada lateral do campo em seu sentido longitudinal e uma atrás de cada gol, sendo estas últimas para permitir obter dados com melhor acurácia nas áreas próximas aos gols, onde as jogadas decisivas podem ocorrer com maior frequência.

Cabe ressaltar que a escolha entre as duas configurações dependerá das prioridades e necessidades específicas de cada aplicação, considerando o custo de implantação e a importância da precisão do rastreamento em diferentes partes do campo de futebol.

Figura 20 – Representação gráfica da distribuição de quatro antenas abrangendo a área de um campo de futebol



A tabela 2 engloba diversas características relevantes dos dispositivos comparados (HIGHTECINSPO, 2022). Ao comparar o protótipo desenvolvido neste projeto, denominado "ESP32-LE LPS", com outros sistemas disponíveis no mercado, constatou-se que o protótipo apresenta acurácia inferior em relação às características analisadas. Contudo, o custo do equipamento é consideravelmente menor, o que atende ao objetivo desta pesquisa, que é de desenvolver um EPTS de baixo custo do tipo LPS. Ressalta-se que nos valores apresentados na tabela 2, não constam o custo da vestimenta e da mão de obra de implantação do protótipo "ESP32-LE LPS". Fica em aberto saber se a acurácia do protótipo está dentro de um erro tolerável para uso, contudo, por ser um protótipo de uma primeira versão, ele pode ser aprimorado com outras tecnologias que tendem a reduzir seus custos no futuro ou ainda com o surgimento de novas tecnologias, o que possibilitará maior acurácia ao sistema proposto.

É importante ressaltar que o protótipo se destaca pelo seu baixo custo em relação aos outros sistemas disponíveis no mercado. Apesar de não oferecer a mesma acurácia e funcionalidades além do posicionamento, o "ESP32-LE LPS" pode ser uma opção mais acessível para times com restrições orçamentárias ou de pequeno porte.

Figura 21 – Representação gráfica da distribuição de 12 antenas abrangendo a área de um campo de futebol

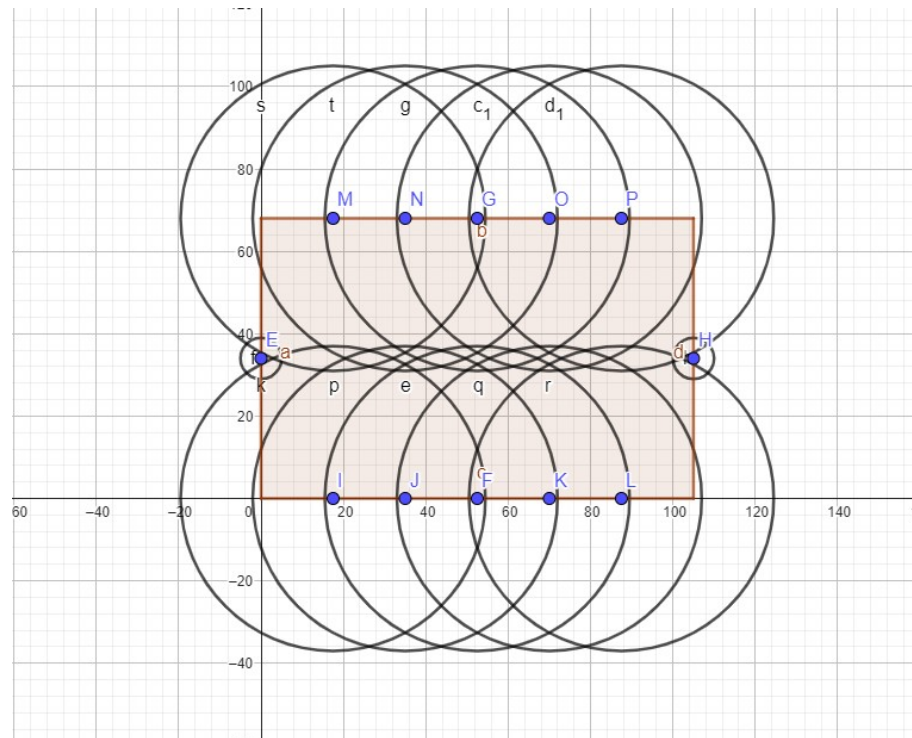


Tabela 2 – Comparação de marcas/modelos de EPTS

Métrica	Descrição	Unidade	Marcas/Modelo				
			ESP32-LE LPS	Catapult	Clearsky T6	XSens VIPS	StatSports Apex
Preço	Por Unidade	€	12,00	2100,00	3000,00	2000,00	1500,00
Custo de implantação	10 beacons, 20 tags + software	€	360,00*	54000,00	75000,00	58000,00	35000,00
Taxa anual	20 jogadores e 1 sistema	€	0,00	10700,00	8500,00	17000,00	22000,00
Tamanho da TAG	Comprimento x Largura	mm	76 x 35	48 x 40	124 x 74	84 x 44	81 x 45
Peso	-	g	75,6	53	350	63	70
Acurácia	Em posição estática	cm	≤ 350	≤ 35	≤ 2	≤ 20	≤ 22
Alcance máximo	-	m	100	300	50	100	100
Atualizações	Leituras por segundo	read/s	1	10	10	10	10
Capacidade da bateria	-	mA	2000	350	-	400	1300
Tempo operacional	-	h	11 - 33	3	-	3,8	5,4
Tecnologia Usada	Chipset ou módulo	-	ESP32	DW1000	DW1000	DW1000	DW1000

*Preço sem vestimenta e sem a mão de obra de implantação
Fonte: Hightecinsport (2022)

5.1 Trabalhos futuros

Considerando o campo de estudo relacionado aos EPTS no futebol, existem várias direções que podem ser exploradas para trabalhos futuros do protótipo desenvolvido:

- Amplificação do sinal - É necessário um estudo sobre a viabilidade do uso de antenas que amplifiquem o alcance do BLE, viabilizando a utilização em locais maiores e ambientes *outdoor*.
- Testes em ambientes reais - O estudo foi concebido com testes em ambientes controlados. É importante realizar testes em meios reais, como campos de futebol ou ginásios esportivos, para avaliar o desempenho do sistema em condições mais próximas da realidade e identificar possíveis desafios ou limitações.

- Melhorias na precisão - A utilização de tecnologias complementares ao BLE pode reduzir significativamente erros. Recomenda-se considerar a incorporação de tecnologias como LoRa (*Long Range*), UWB (*Ultra Wide Band*) e GPS em conjunto. O DW1000 é um circuito integrado de rádio frequência e UWB desenvolvido pela Decawave, utilizado em aplicações de localização *indoor* de alta precisão e comunicação de curto alcance. Com o seu módulo embarcado, é possível implementar a tecnologia UWB para medir distâncias com precisão entre dispositivos. O custo adicional para adquirir um módulo DW1000 é de, aproximadamente, €24,41. Além disso, é importante destacar a possibilidade de incidência de impostos de importação. Essas tecnologias combinadas podem assegurar um nível de precisão mais elevado.
- Sensores embarcados - Propõe-se explorar a utilização de sensores, como acelerômetros e giroscópios, para fornecerem medições precisas de aceleração e mudanças de direção dos atletas. Esses sensores podem ser integrados ao equipamento utilizado pelos atletas, permitindo o monitoramento em tempo real de suas atividades físicas e desempenho durante treinamentos e competições. Com base nestas medições, é possível desenvolver algoritmos e modelos para avaliar o desempenho físico, identificar padrões de movimento, detectar possíveis lesões e fornecer *feedback* em tempo real para os atletas e treinadores. O módulo mpu-6050 pode ser utilizado para obter tais dados, já que este possui um acelerômetro e giroscópio embarcados. O custo do mpu-6050 é de, aproximadamente, €6,40.
- Viabilidade de implementação em outros esportes - É necessário explorar a possibilidade de adaptar e implementar o sistema em outros esportes, como basquete, vôlei ou até mesmo esportes individuais, como atletismo ou ciclismo. Isso permitirá avaliar a eficácia e a utilidade do sistema em diferentes contextos esportivos.

REFERÊNCIAS

- AKENHEAD, R.; NASSIS, G. P. Training load and player monitoring in high-level football: Current practice and perceptions. **human kinetics journals**, v. 11, p. 587–593, 2015.
- APPLE. **iBeacon**. 2022.
- BOARD, I. F. A. **Laws of the Game**. 2021. <<https://digitalhub.fifa.com/m/5371a6dcc42fbb44/original/d6g1medsi8jrrd3e4imp-pdf.pdf>>. Último acesso em 28/3/2022.
- BUCHHEIT, M. et al. Integrating different tracking systems in football: multiple camera semi-automatic system, local position measurement and gps technologies. **Journal of Sports Sciences**, v. 32, n. 20, p. 1844–1857, 2014.
- BULTEN, W. **Note on Calculating Distance From RSSI Value of BLE Devices**. 2015.
- DIJK, E. T. K. van et al. Personal informatics, self-insight, and behavior change: A critical review of current literature. **Human-Computer Interaction**, Informa UK Limited, v. 32, n. 5-6, p. 268–296, fev. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/07370024.2016.1276456>>.
- GAMBLE, P.; CHIA, L.; ALLEN, S. The illogic of being data-driven: reasserting control and restoring balance in our relationship with data and technology in football. **Sci. Med. Footb.**, Informa UK Limited, v. 4, n. 4, p. 338–341, out. 2020.
- GHOSH, A. **Kalman filters explained: Removing noise from RSSI signals**. 2020. <<https://thecustomizewindows.com/2020/03/note-on-calculating-distance-from-rssi-value-of-ble-devices/>>.
- HIGHTECINSPOORT. **LPS performance and price comparison**. 2022. <https://www.hightecinsport.com/tech/lps/lps_sport_tracking.html>.
- IEEE. Live rssi filtering for indoor positioning with bluetooth low-energy. In: **2022 IEEE 12th International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)**. [s.n.], 2022. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9918138>>.
- ILCI, V. et al. Trilateration technique for wifi-based indoor localization. In: . [S.l.: s.n.], 2015.
- LARSSON, J. **Distance Estimation and Positioning Based on Bluetooth Low Energy Technology**. 2015.
- LI, I.; DEY, A.; FORLIZZI, J. A stage-based model of personal informatics systems. In: **Proceedings of the 28th international conference on Human factors in computing systems - CHI '10**. ACM Press, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1145/1753326.1753409>>.

LIGHTHOUSE. **Rechargeable 18650 Li-ion Battery 3.7V 2000mAh**. 2023. Disponível em: <<https://www.lighthouse-torches.com/p/L-HSB372000/Rechargeable-18650-Li-ion-Battery-3.7V-2000mAh>>.

LINKE, D.; LINK, D.; LAMES, M. Validation of electronic performance and tracking systems EPTS under field conditions. **PLOS ONE**, Public Library of Science (PLoS), v. 13, n. 7, p. e0199519, jul. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0199519>>.

LIU, Y. et al. Accurate indoor positioning using ieee 802.11mc round trip time. **Pervasive and Mobile Computing**, Elsevier, v. 77, p. 101416, 2021.

METAGEEK. **Understanding RSSI**. 2022.

MORAES, A. L.; MORAES, L. F.; MORAES, J. C. Ajustamento de rede geodésica 3d por trilateração. **UNIPAMPA**, 2019. Disponível em: <https://guri.unipampa.edu.br/uploads/evt/arq_trabalhos/17708/seer_17708.pdf>.

OLIVEIRA, C. P. D.; SILVA, S. M. D. A.; SANTANA, R. V. ANÁLISE DA PRECISÃO e DA ACURÁCIA DO GPS DE NAVEGAÇÃO PARA LEVANTAMENTO DE LOCAÇÃO DE PEQUENAS ÁREAS. **Observatorium: Revista Eletrônica de Geografia**, EDUFU - Editora da Universidade Federal de Uberlândia, v. 11, n. 03, p. 109–125, maio 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.14393/oreg-v11-n03-2020-58574>>.

OLIVEIRA, M. A. de; FREITAS, R. C. S. **Análise Da Aplicação Da Técnica de Trilateração em Redes de Sensores Wi-Fi Para Localização em Ambientes Indoor**. 2021. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/572981607/Analise-da-Applicacao-da-Tecnica-de-Trilateracao-em-Redes-de-Sensores-Wi-Fi-Para-Localizacao-em-Ambientes-Indoor>>.

OLIVEIRA, M. A. de; FREITAS, R. C. S. Análise da aplicação da técnica de trilateração em redes de sensores wi-fi para localização em ambientes indoor. **ResearchGate**, 2021. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/355083832_Analise_da_Aplicacao_da_Tecnica_de_Trilateracao_em_Redes_de_Sensores_Wi-Fi_Para_Localizacao_em_Ambientes_Indoor>.

OLIVEIRA, M. A. de; FREITAS, R. C. S. Xxxix simpósio brasileiro de telecomunicações e processamento de sinais. In: . [s.n.], 2021. Disponível em: <<https://biblioteca.sbrrt.org.br/articlefile/2813.pdf>>.

OPENJS. **About Node.js®**. 2022.

PETTERSEN, S. A. et al. Quantified soccer using positional data: A case study. **Front. Physiol.**, Frontiers Media SA, v. 9, jul. 2018.

PICAZO-MARTINEZ, P. et al. Ieee 802.11az indoor positioning with mmwave. **arXiv preprint arXiv:2303.05996**, 2019.

RAPP, A.; TIRABENI, L. Personal informatics for sport. **ACM Transactions on Computer-Human Interaction**, Association for Computing Machinery (ACM), v. 25, n. 3, p. 1–30, jun. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1145/3196829>>.

- ROBOCORE. **ESP32 WiFi + Bluetooth**. 2023. Disponível em: <<https://www.robocore.net/wifi/esp32-wifi-bluetooth?newlang=english>>.
- ROSSI, A. et al. Effective injury forecasting in soccer with GPS training data and machine learning. **PLoS One**, Public Library of Science (PLoS), v. 13, n. 7, p. e0201264, jul. 2018.
- SILVA, L. d. S. **Localização em Ambientes Internos utilizando redes IEEE 802.11 e Aprendizado de Máquina**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Amazonas, 2019.
- SILVA, R. d. S. **Localização em ambientes internos utilizando redes IEEE 802.11**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Amazonas, 2017.
- THEESP32. **The internet of things with ESP32**. 2022. Disponível em: <<http://esp32.net/>>.
- TOWNSEND, K. **Introduction to bluetooth low energy - adafruit industries**. 2022.
- TUTORIALS, R. N. **Power ESP32/ESP8266 with Solar Panels and Battery**. 2022. Disponível em: <<https://randomnerdtutorials.com/power-esp32-esp8266-solar-panels-battery-level-monitoring/>>.
- USINAINFO. **NodeMCU ESP32 com Bateria 18650 e Gerenciador de Carga**. 2022. Disponível em: <<https://www.usinainfo.com.br/nodemcu/nodemcu-esp32-wifi-e-bluetooth-com-suporte-para-bateria-18650-e-gerenciador-de-carga-5490.html>>.
- ZUCCONI, A. **Positioning and Trilateration**. 2017.