



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES E  
GESTÃO TERRITORIAL

Ismael Paulo dos Santos

**GESTÃO DE EVACUAÇÃO DE EMERGÊNCIA EM EDIFÍCIOS: UM MÉTODO  
BASEADO EM INTERNET DAS COISAS**

Florianópolis  
2025

Ismael Paulo dos Santos

**GESTÃO DE EVACUAÇÃO DE EMERGÊNCIA EM EDIFÍCIOS: UM MÉTODO  
BASEADO EM INTERNET DAS COISAS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial da  
Universidade Federal de Santa Catarina como requisito  
parcial para a obtenção do título de Mestre em  
Engenharia de Transporte.

Orientador: Prof. João Carlos Souza, Dr.

Florianópolis

2025

dos Santos, Ismael Paulo

Gestão de evacuação de emergência em edifícios: Um método baseado em Internet das Coisas / Ismael Paulo dos Santos; orientador, João Carlos Souza, 2025.

89 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial, Florianópolis, 2025.

Inclui referências.

1. Engenharia de Transportes e Gestão Territorial. 2. Monitoramento em tempo real. 3. Internet das Coisas. 4. Emergência em Edificações. I. Souza, João Carlos. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial. III. Título

Ismael Paulo dos Santos

## **GESTÃO DE EVACUAÇÃO DE EMERGÊNCIA EM EDIFÍCIOS: UM MÉTODO BASEADO EM INTERNET DAS COISAS**

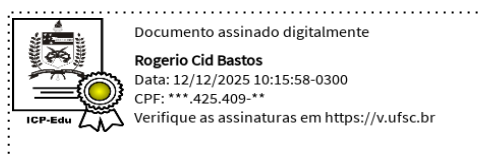
O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado, em 08 de dezembro de 2025, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Arnaldo Debatin Neto, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

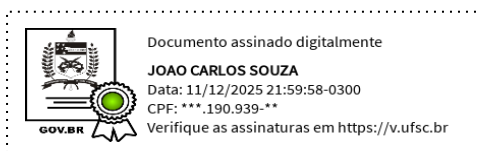
Prof. Eduardo Lobo, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.<sup>a</sup> Fabiana Santos Lima, Dr.<sup>a</sup>  
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial.



Prof. Rogério Cid Bastos, Dr.  
Coordenação do Programa de Pós-Graduação



Prof. João Carlos Souza, Dr.  
Orientador

Florianópolis, 2025.

*“Se eu levantasse meus olhos para as colinas,  
de onde viria meu socorro?  
Meu socorro viria do Senhor,  
o criador do céu e da terra.”*

Salmos 121: 1-2.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Minha querida esposa Margott e filha Olívia, que apesar de todas as adversidades, acreditaram em mim.

Agradeço ao Professor João, por ser meu orientador desde 2017, não desistindo de um péssimo aluno, mas acreditando no engenheiro que sou, sempre incentivando que a pesquisa fosse concluída.

Aos meus amigos, Alexsandro Nanon e Douglas Godinho, vendo a pesquisa como um potencial para ajudar as pessoas, dedicaram horas me ensinando eletrônica e programação, meu muito obrigado!

## RESUMO

As emergências em edificações, entre elas os incêndios, como os históricos casos dos edifícios Andraus, Joelma e da Boate Kiss no Brasil, evidenciam uma falha na segurança e eficiência de evacuações. A ausência de informações da localização dos ocupantes durante um sinistro dificulta a operação das equipes de resgate. Nesse contexto, a Internet das Coisas (IoT) surge como alternativa para integrar sensoriamento e comunicação em situações críticas, permitindo localizar e acompanhar indivíduos durante a evacuação.

O objetivo geral deste trabalho foi desenvolver um método de gestão de evacuação de emergência baseado em IoT, demonstrando sua viabilidade técnica por meio da construção de um modelo de localização e monitoramento em tempo real de indivíduos em edificações. Especificamente, buscou-se avaliar tecnologias de comunicação sem fio aplicáveis à localização interna, além de se projetar e implementar um equipamento utilizando Bluetooth Low Energy (BLE) e propor uma interface de visualização em nuvem capaz de auxiliar as equipes de resgate na tomada de decisão durante emergências.

A metodologia foi dividida em três etapas centrais. A Etapa Física consistiu no projeto e montagem de um hardware de baixo custo, composto por Antenas e um Gateway. A Etapa de Coleta e Comunicação envolveu o desenvolvimento do software embarcado. Por fim, a Etapa de Processamento e Aplicação utilizou serviços em nuvem e a interface de visualização. Foi também apresentada a integração do sistema de gestão de evacuação e sua operação em emergência.

Para a validação do modelo, foi realizado um estudo de caso em um ambiente residencial. Nos testes realizados, o sistema atingiu precisão média entre 0,18 m e 0,86 m em cenário estático e manteve erro inferior a 1,00 m no rastreamento dinâmico. Os resultados confirmam o desempenho estável do método desenvolvido e sua capacidade de fornecer informações precisas em tempo real.

Conclui-se que o método proposto é tecnicamente viável e pode auxiliar significativamente as equipes de resgate ao oferecer consciência situacional durante emergências. A pesquisa reforça o potencial da IoT como ferramenta para transformar a gestão de evacuação em edificações, tornando-a mais proativa, inteligente e segura.

**Palavras-chave:** Monitoramento em tempo real; Internet das Coisas; Emergência em Edificações.

## ABSTRACT

Fires and other emergencies in buildings such as the historical cases of the Andraus and Joelma buildings and the Kiss Nightclub in Brazil highlight failures in safety and evacuation efficiency. The absence of information regarding occupants' locations during an incident hinders rescue operations. In this context, the Internet of Things (IoT) emerges as an alternative to integrate sensing and communication in critical situations, enabling the localization and tracking of individuals during evacuation.

The main objective of this study was to develop an IoT-based emergency evacuation management method, demonstrating its technical feasibility through the construction of a real-time localization and monitoring model for individuals within buildings. Specifically, it aimed to evaluate wireless communication technologies applicable to indoor positioning, to design and implement a device using Bluetooth Low Energy (BLE), and to propose a cloud-based visualization interface capable of assisting rescue teams in decision-making during emergencies.

The methodology was divided into three main stages. The Physical Stage involved the design and assembly of a low-cost hardware system composed of antennas and a gateway. The Data Collection and Communication Stage focused on the development of embedded software. Finally, the Processing and Application Stage utilized cloud services and a visualization interface. The integration of the evacuation management system and its operation under emergency conditions were also presented.

To validate the model, a case study was conducted in a residential environment. In the tests performed, the system achieved an average accuracy between 0.18 m and 0.86 m in static scenarios and maintained an error below 1.00 m in dynamic tracking. The results confirm the stable performance of the developed method and its ability to provide precise real-time information.

It is concluded that the proposed method is technically feasible and can significantly assist rescue teams by providing situational awareness during emergencies. This research reinforces the potential of IoT as a tool to transform building evacuation management, making it more proactive, intelligent, and safe.

**Keywords:** Real-time monitoring; Internet of Things; Building emergency.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Fluxograma da revisão de escopo da literatura .....                                        | 6  |
| Figura 2 – Microcontrolador ESP32 em kit de desenvolvimento. ....                                     | 18 |
| Figura 3 – Diagrama de blocos do hardware. ....                                                       | 19 |
| Figura 4 – Hardware já montado em um gabinete e identificados. ....                                   | 19 |
| Figura 5 – Desenvolvimento dos serviços em nuvem .....                                                | 22 |
| Figura 6 – Exemplo de placa com indicação do sistema. ....                                            | 23 |
| Figura 7 – Inserção dos pavimentos no aplicativo. ....                                                | 23 |
| Figura 8 – Inserção dos equipamentos. ....                                                            | 24 |
| Figura 9 – Cadastro dos usuários.....                                                                 | 25 |
| Figura 10 – Fluxo da integração dos componentes do sistema de gestão de evacuação de emergência. .... | 25 |
| Figura 11 – Visão geral do sistema em operação. ....                                                  | 26 |
| Figura 12 – Cadastro do socorrista no Sistema. ....                                                   | 27 |
| Figura 13 – Painel interativo do sistema em operação. ....                                            | 27 |
| Figura 14 – Fluxo da operação do sistema de gestão de evacuação de emergência.....                    | 28 |
| Figura 15 – Planta baixa do ambiente residencial usado como área de teste. ....                       | 29 |
| Figura 16 – Cenário Estático .....                                                                    | 30 |
| Figura 17 – Cenário Dinâmico .....                                                                    | 31 |
| Figura 18 – Posição das antenas e <i>tags</i> no cenário estático.....                                | 32 |
| Figura 19 – trajeto da <i>Tag</i> 01 da cozinha até a área de relativa segurança. ....                | 35 |
| Figura 20 – Esquema elétrico do circuito. ....                                                        | 46 |
| Figura 21 – Montagem dos componentes no protoboard. ....                                              | 47 |
| Figura 22 – Montagem do circuito na placa de prototipagem.....                                        | 48 |
| Figura 23 – Componentes instalados no gabinete de ABS.....                                            | 49 |
| Figura 24 – Exemplo de mensagem transmitida pela antena ao gateway. ....                              | 51 |
| Figura 25 – Fluxograma do código embarcado para antena.....                                           | 53 |
| Figura 26 – Fluxograma do código embarcado do gateway.....                                            | 56 |
| Figura 27 – Fluxograma Geral dos Serviços .....                                                       | 59 |
| Figura 28 – fluxograma do serviço de validação das leituras.....                                      | 60 |
| Figura 29 – fluxograma do serviço de orquestração do processamento.....                               | 61 |
| Figura 30 – Fluxograma do serviço do filtro de Kalman. ....                                           | 64 |
| Figura 31 fluxograma do serviço de salvamento das leituras.....                                       | 65 |

|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 32 – Fluxograma do serviço de atualização das antenas.....            | 66 |
| Figura 33 – Fluxograma do serviço de coordenação de posicionamento.....      | 67 |
| Figura 34 – representação geométrica da trilateração. ....                   | 69 |
| Figura 35 – Fluxograma do serviço de trilateração. ....                      | 71 |
| Figura 36 – fluxograma do serviço de salvamento da posição e histórico. .... | 72 |
| Figura 37 – Fluxograma da interação entre os serviços. ....                  | 73 |

## **LISTA DE QUADROS**

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| Quadro 1 – Trabalhos defendidos no PPGTG .....                                 | 4  |
| Quadro 2 – Vantagens e desafios das tecnologias para localização interna. .... | 12 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Tabela com as informações coletadas das <i>Tags</i> no ambiente sala de estar. ....    | 32 |
| Tabela 2 – Tabela com as informações coletadas das <i>Tags</i> no ambiente circulação. ....       | 33 |
| Tabela 3 – Tabela com as informações coletadas das <i>Tags</i> no ambiente quarto principal ..... | 33 |
| Tabela 4 – Valores do Caso 01, <i>tag</i> 01 ( <i>Mac Address</i> : C1:4A:7F:32:B8:91).....       | 34 |
| Tabela 5 – Expoentes de perda de trajeto para diferentes ambientes. ....                          | 70 |

## LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

|             |                                                                                    |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| BIM.....    | <i>Building Information Modeling</i>                                               |
| BLE.....    | <i>Bluetooth Low Energy</i>                                                        |
| CFTV .....  | <i>Circuito Fechado de Televisão</i>                                               |
| DE.....     | <i>Distância Euclidiana Medida</i>                                                 |
| GPS.....    | <i>Global Positioning System</i>                                                   |
| IA.....     | <i>Inteligência Artificial</i>                                                     |
| IoT .....   | <i>Internet of Things</i>                                                          |
| LoRa .....  | <i>Long Range</i>                                                                  |
| NFPA.....   | <i>National Fire Protection Association</i>                                        |
| NLOS .....  | <i>Non-Line of Sight</i>                                                           |
| NTP.....    | <i>Network Time Protocol</i>                                                       |
| PPGTG ..... | <i>Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial</i> |
| RA.....     | <i>Realidade Aumentada</i>                                                         |
| RFID .....  | <i>Radio Frequency Identification</i>                                              |
| RSSI.....   | <i>Received Signal Strength Indication</i>                                         |
| RTLS .....  | <i>Real-Time Location System</i>                                                   |
| SIG.....    | <i>Sistema de Informação Geográfica</i>                                            |
| SRAD .....  | <i>Sistema de Resposta Ativa a Desastres</i>                                       |
| UWB.....    | <i>Ultra-Wideband</i>                                                              |
| WLAN .....  | <i>Wireless Local Area Network</i>                                                 |

## SUMÁRIO

|       |                                                                                                          |    |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | INTRODUÇÃO .....                                                                                         | 1  |
| 1.1   | APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA DA PESQUISA .....                                                               | 1  |
| 1.2   | PROBLEMA .....                                                                                           | 2  |
| 1.3   | OBJETIVOS.....                                                                                           | 2  |
| 1.3.1 | Objetivo geral .....                                                                                     | 2  |
| 1.3.2 | Objetivos específicos .....                                                                              | 2  |
| 1.4   | JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DO ESTUDO PROPOSTO .....                                                     | 3  |
| 1.5   | ADERÊNCIA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE<br>TRANSPORTES E GESTÃO TERRITORIAL (PPGTG)..... | 4  |
| 1.6   | ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....                                                                           | 5  |
| 2     | REFERENCIAL TEÓRICO.....                                                                                 | 6  |
| 2.1   | FUNDAMENTOS DA GESTÃO DE EMERGÊNCIAS .....                                                               | 6  |
| 2.2   | TECNOLOGIAS DE MONITORAMENTO E POSICIONAMENTO INTERNO .....                                              | 8  |
| 2.2.1 | Bluetooth Low Energy (BLE) .....                                                                         | 8  |
| 2.2.2 | Wi-Fi.....                                                                                               | 9  |
| 2.2.3 | Radio Frequency Identification (RFID).....                                                               | 9  |
| 2.2.4 | Long Range (LoRa) .....                                                                                  | 10 |
| 2.2.5 | Zigbee .....                                                                                             | 10 |
| 2.2.6 | Ultra-Wideband (UWB) .....                                                                               | 10 |
| 2.2.7 | Circuito Fechado de Televisão (CFTV) e Visão Computacional.....                                          | 11 |
| 2.2.8 | Comparação entre tecnologias.....                                                                        | 11 |
| 2.3   | SISTEMAS E APLICAÇÕES DE IOT EM SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIOS....                                           | 13 |
| 2.3.1 | Deteção inteligente de riscos e previsão de incêndios .....                                              | 13 |
| 2.3.2 | Gerenciamento de evacuação e sistemas de roteamento dinâmico .....                                       | 14 |
| 2.3.3 | Alarme ativo e suporte a resgate.....                                                                    | 15 |
| 3     | METODOLOGIA.....                                                                                         | 17 |
| 3.1   | ETAPA FÍSICA.....                                                                                        | 17 |
| 3.2   | ETAPA DE COLETA E COMUNICAÇÃO DE REDE .....                                                              | 20 |
| 3.2.1 | Desenvolvimento do software da antena .....                                                              | 20 |
| 3.2.2 | Desenvolvimento do software do gateway .....                                                             | 21 |
| 3.3   | ETAPA DE PROCESSAMENTO E APLICAÇÃO .....                                                                 | 21 |

|            |                                                                           |    |
|------------|---------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.4        | INTEGRAÇÃO DO SISTEMA DE GESTÃO DE EVACUAÇÃO.....                         | 22 |
| 3.5        | OPERAÇÃO DO SISTEMA DE GESTÃO DE EVACUAÇÃO EM CASO DE<br>EMERGÊNCIA ..... | 26 |
| 4          | ESTUDO DE CASO .....                                                      | 29 |
| 5          | RESULTADOS .....                                                          | 32 |
| 5.1        | CENÁRIO ESTÁTICO .....                                                    | 32 |
| 5.2        | CENÁRIO DINÂMICO .....                                                    | 33 |
| 6          | CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....                                      | 36 |
| 6.1        | CONCLUSÕES .....                                                          | 36 |
| 6.3        | TRABALHOS FUTUROS .....                                                   | 37 |
| 7          | BIBLIOGRAFIA .....                                                        | 39 |
| APÊNDICE A | REVISÃO DE ESCOPO DA LITERATURA .....                                     | 43 |
| APÊNDICE B | MONTAGEM DO HARDWARE.....                                                 | 46 |
| APÊNDICE C | DETALHES DO SOFTWARE DA ANTENA.....                                       | 50 |
| APÊNDICE D | DETALHES DO SOFTWARE DO GATEWAY .....                                     | 54 |
| APÊNDICE E | DETALHES DO DESENVOLVIMENTO DO SERVIÇO EM NUVEM....                       | 57 |



## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA DA PESQUISA

Na década de 70 do século XX, o Brasil presenciou grandes incêndios tais como nos edifícios Andraus e Joelma, em São Paulo, e das lojas Renner, em Porto Alegre, onde a comoção da sociedade civil exigiu que as normas técnicas e legislações referentes à Segurança Contra Incêndio fossem modificadas e melhoradas. Infelizmente, 40 anos mais tarde, no dia 27 de janeiro de 2013, ocorreu o maior sinistro de incêndio da história brasileira, evento conhecido como Incêndio na Boate Kiss, em Santa Maria – RS, ceifando a vida de 242 pessoas e mais de 168 pessoas feridas. O episódio na boate Kiss mobilizou a sociedade, que exige das autoridades competentes soluções para evitar ou amenizar futuros sinistros (CREA/RS, 2013).

Incêndios em edificações são situações extremas, sendo um fenômeno destrutivo e seus efeitos são aleatórios (Saini; Sengupta; Thakur, 2024). Segundo Simões (2023) a evacuação tradicional, baseada em planos estáticos, pode levar a informações incorretas e colocar pessoas em perigo.

Durante emergências, seja por incêndios, falhas estruturais, ameaças externas ou outras crises, a capacidade de localizar e resgatar rapidamente os indivíduos constitui uma questão crítica (Atencio; Siraj; Tsiropoulou, 2025). Estes eventos imprevisíveis podem desencadear cenários caóticos onde cada segundo é precioso e onde a falta de visibilidade ou comunicação adequada pode resultar em tragédias (Bastos; Vieira; Apolinário, 2015).

Um estudo mais detalhado e criterioso de todos os sistemas de prevenção e combate a incêndio, incluindo, principalmente, as rotas de fuga e a evacuação de pessoas pode proporcionar a retirada da população da edificação de maneira rápida e eficiente (Bi; Gelenbe, 2019). Compreender o comportamento desses usuários durante a permanência no espaço e monitorá-los pode proporcionar melhorias no gerenciamento, inclusive em edificações em emergência (Saini; Kalra; Sood, 2022). Para equipes de salvamento, saber exatamente onde agir e onde está um ponto de risco pode ser a diferença para um resgate bem-sucedido (Bastos; Vieira; Apolinário, 2015).

Os incêndios em edifícios são uma preocupação global, causando numerosas fatalidades e danos materiais todos os anos. De acordo com a *National Fire Protection Association* (NFPA), nos Estados Unidos, um incêndio em estrutura é relatado a cada 63 segundos (NFPA, 2017). Uma das principais dificuldades durante tais eventos é a localização e o resgate eficiente

de pessoas, especialmente em edifícios de grande porte ou estruturas complexas (Chen et al., 2012).

Ainda, segundo Saini, Kalra, Sood (2022) ao se integrar tecnologias de comunicação sem fio aos sistemas de segurança contra incêndio existentes, pode-se localizar indivíduos de forma mais rápida e com relativa precisão, potencializando significativamente os protocolos de emergência.

## 1.2 PROBLEMA

Existe uma necessidade real em ter a maior precisão possível na estimativa da população em risco na localização dos indivíduos. Deste modo, este estudo busca responder à pergunta de pesquisa:

“Como um método de gestão de evacuação de emergência, baseado em IoT, pode auxiliar nas evacuações em edifícios?”

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo geral

Desenvolver um modelo baseado em tecnologia de comunicação sem fio localizando e monitorando indivíduos em edificações durante emergências, de modo a apoiar na gestão de evacuação de emergências.

### 1.3.2 Objetivos específicos

São objetivos específicos pretendidos:

- Avaliar tecnologias de captação de informações para localização de pessoas;
- Propor um equipamento utilizando tecnologia de comunicação sem fio para localização em ambientes internos;
- Propor uma interface de visualização para suporte à tomada de decisão para o gestor de resgate.

## 1.4 JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DO ESTUDO PROPOSTO

Incêndios, desastres naturais (como terremotos) e ameaças externas são eventos que resultam em lesões, fatalidades e perdas financeiras significativas. A principal prioridade em segurança predial é a evacuação segura de todos os ocupantes. No entanto, conforme apontado por Simões (2023) a evacuação na maioria dos edifícios ainda se baseia em planos estáticos, que são considerados insuficientes e ineficazes por não considerarem a localização e as características específicas de cada emergência.

Estudos, como o de Lin et al. (2025a), reforçam que os planos estáticos não conseguem levar em conta mudanças em tempo real, como a propagação de fogo, fumaça ou o surgimento de obstáculos. Sanjay e Libina (2023) observam que os procedimentos padrão podem direcionar pessoas para saídas inseguras por ignorarem a localização do perigo. A falta de informação detalhada e em tempo real é uma das principais causas de vítimas (Chen; Liu; Wu, 2018).

A Internet das Coisas (IoT) e suas tecnologias capacitadoras oferecem soluções eficientes e promissoras para superar essas falhas. A Internet das Coisas pode potencializar significativamente os protocolos de emergência ao integrar tecnologias de comunicação sem fio aos sistemas de segurança (Al-Nabhan; Al-Aboody; Alim Al Islam, 2019).

Sistemas IoT empregam sensores para capturar informações ambientais (temperatura, CO<sub>2</sub>) e rastrear a localização dos ocupantes. A capacidade de localizar indivíduos de forma rápida e com relativa precisão é uma informação crítica para a evacuação e resgate (Bastos; Vieira; Apolinário, 2015).

O sistema IoT permite o monitoramento preciso da posição de socorristas e vítimas, o que é importante para reduzir mortes e ferimentos. Chen, Liu e Wu (2018) destacam que o sistema pode fornecer informações críticas aos bombeiros para um plano de resgate eficaz. Além disso, a IoT pode controlar sinalização inteligente (LEDs) ou atuadores para orientar os ocupantes ao longo da rota mais segura em tempo real (Al-Nabhan; Al-Aboody; Alim Al Islam, 2019).

Finalmente, a implementação de métodos de gestão de evacuação baseados em IoT pode auxiliar a segurança dos edifícios, transformando a resposta a emergências de uma abordagem reativa em um sistema proativo, adaptável e com maior taxa de sobrevivência.

## 1.5 ADERÊNCIA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES E GESTÃO TERRITORIAL (PPGTG)

Esta dissertação trata em propor um método de gestão de evacuação de emergência em edifícios utilizando Internet das Coisas. Como tal, está inserida no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial (PPGTG), na área de concentração Sistemas de Transportes e na linha de pesquisa Planejamento de Sistemas de Transportes, que aborda a adequação das necessidades de transporte de uma região ao seu desenvolvimento de acordo com suas características estruturais.

Neste trabalho, focou-se em conceber e elaborar uma ferramenta para auxiliar as equipes de resgate na gestão de evacuação de emergência em edificações em emergência, este tema está alinhado a linha de pesquisa em logística humanitária.

No histórico do PPGTG, encontrou-se uma dissertação que guardam afinidade com a linha em logística humanitária. No Quadro 1, a seguir, está destacado aquele considerado de contexto mais próximo ao desta dissertação.

Quadro 1 – Trabalhos defendidos no PPGTG

| ANO  | AUTOR                  | ABNT                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | OBSERVAÇÃO                                                                                                                                 |
|------|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2023 | Cleonice Maria Beppler | Uma proposta de modelagem dos processos de logística de assistência humanitária em fase de resposta em âmbito municipal. 2021. 123 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial, Florianópolis, 2018. | elaborar um modelo de referência, baseado em BPM/BPMN, para otimizar a gestão de itens de assistência humanitária na resposta a desastres. |

Pode-se perceber que o trabalho tem contexto de aplicação na mesma linha da presente dissertação. No trabalho de Beppler (2023), constata-se o uso de BPM/BPMN para auxiliar na gestão de recursos na logística humanitária em resposta a desastres, aumentando a eficiência, efetividade e transparência das operações municipais.

Ao observar o histórico de trabalhos do PPGTG, é possível notar que a presente dissertação traz como contribuição específica a aplicação de um método para gestão de evacuação de emergência em edificações sobre sinistros. Nesse sentido, este estudo pode vir a ser subsídio para novas pesquisas na área de planejamento de transportes urbanos,

principalmente na logística humanitária, auxiliando gestores de resgate na tomada de decisões quanto ao resgate e acompanhamento de evacuados.

## 1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O trabalho está estruturado da seguinte maneira:

**Capítulo 1 – Introdução**, que aborda de forma geral o tema do trabalho, problema de pesquisa, objetivos, justificativa, limitações e resultados esperados na pesquisa, e por fim, a estrutura.

**Capítulo 2 – Referencial Teórico**, capítulo que traz os conteúdos estudados para elaboração da pesquisa.

**Capítulo 3 – Metodologia da Pesquisa**, é apresentado o desenvolvimento do método, escolhas e conceitos utilizados para o estudo.

**Capítulo 4 – Estudo de Caso**, aqui será apresentado como ocorreu a validação do método proposto.

**Capítulo 5 – Resultados**, neste capítulo, os dados gerados nos testes serão avaliados.

**Capítulo 6 – Conclusões e Trabalhos Futuros**. Após as análises, verifica se o problema de pesquisa foi respondido e quais rumos a pesquisa deve seguir.

Por último o **Capítulo 7 – Bibliografia**, apresenta a lista com as referências bibliográficas utilizadas.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Foi realizada a revisão de escopo da literatura. O APÊNDICE A apresenta o processo de pesquisa. A Figura 1, demonstra de forma simplificada o fluxo da revisão de escopo.

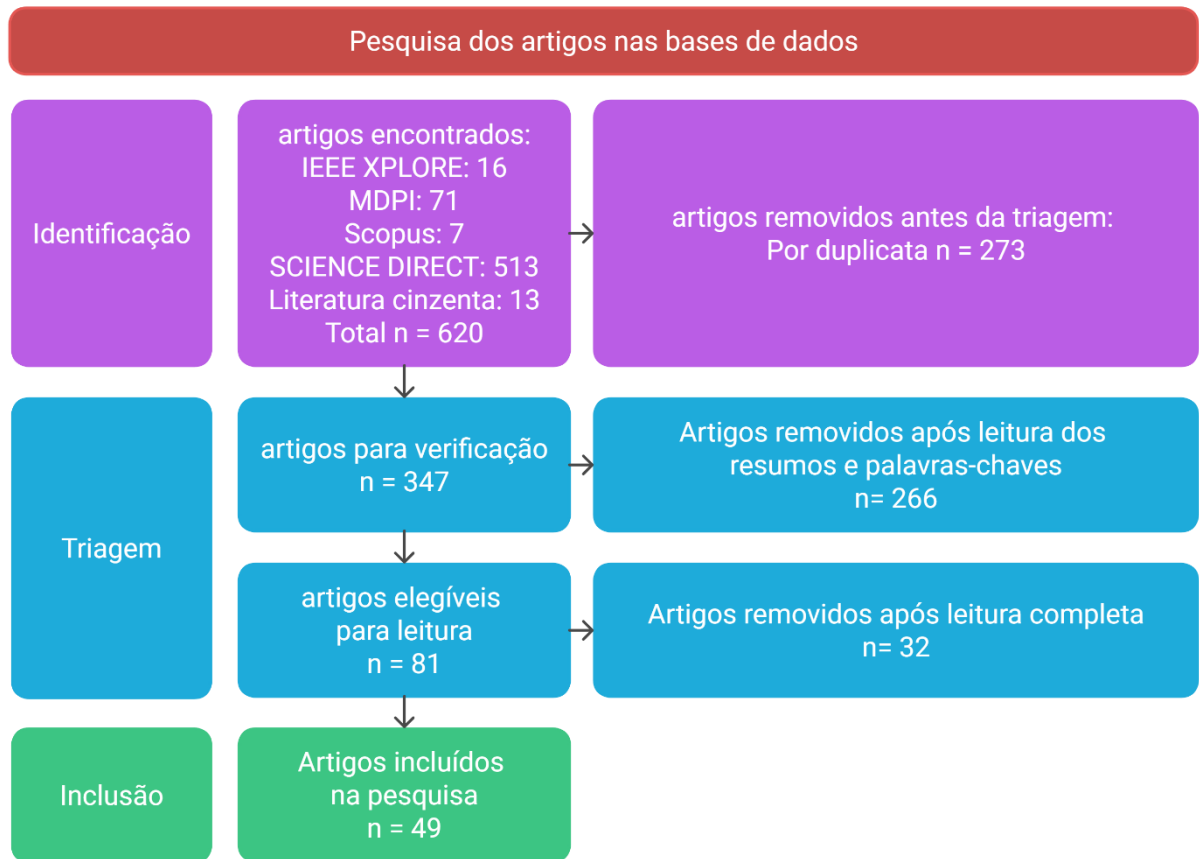


Figura 1 – Fluxograma da revisão de escopo da literatura

### 2.1 FUNDAMENTOS DA GESTÃO DE EMERGÊNCIAS

A Gestão de Emergências é uma etapa importante da segurança em ambientes construídos, sendo definida como o processo contínuo de planejar e executar medidas para reduzir a vulnerabilidade a ameaças e lidar com desastres (Damaševičius; Bacanin; Misra, 2023). O entendimento dos Fundamentos da Gestão de Emergências é essencial devido à natureza catastrófica, complexa e aleatória dos incidentes, como incêndios, falhas estruturais ou ataques terroristas, que exigem uma resposta rápida e eficaz (Lin et al., 2014).

A principal preocupação para a segurança de um edifício é garantir a evacuação segura de todos os ocupantes (Elsayed; Mostafa; Marzouk, 2023). Historicamente, a evacuação na maioria dos edifícios complexos tem-se baseado em planos estáticos, que são representados por mapas e sinalizações fixas (Simões, 2023).

No entanto, o consenso na literatura aponta que esses planos são inerentemente insuficientes. Conforme Simões (2023), os planos estáticos podem fornecer informações erradas e colocar as pessoas em perigo, pois as guiam sempre numa direção predefinida, não levando em conta a localização e as características específicas de cada emergência. A ausência de planos adaptativos e eficientes é identificada por Elsayed, Mostafa e Marzouk (2023) como uma das principais razões para o número devastador de mortes e ferimentos. Wang et al. (2020) complementam, destacando que os métodos tradicionais de evacuação não consideram totalmente parâmetros de fogo dinâmicos em tempo real ou a densidade de pessoal nas saídas, comprometendo a confiabilidade e a pontualidade da rota de fuga.

O comportamento humano é considerado um fator que interfere na precisão e na representatividade da realidade em qualquer plano de evacuação. Kobes et al. (2010) enfatizam que a evacuação é moldada pelas decisões e motivações dos ocupantes com base na sua percepção da situação.

Em ambientes caóticos, o comportamento não é sempre racional. Fatores como o instinto de seguir a multidão ou a influência social na escolha da saída são cruciais (Nilsson; Johansson, 2009). Para modelar essa complexidade, os pesquisadores recorrem a modelos microscópicos de simulação, como o Modelo Baseado em Agentes. Atencio et al. (2025) e Elsayed, Mostafa e Marzouk (2023) destacam a necessidade de incluir atributos humanos (como velocidade, raio corporal e interações) nas simulações para garantir que o plano de evacuação seja preciso e representativo da realidade.

Planos de contingência robustos e a fase de preparação são importantes. No entanto, a eficácia do resgate e da resposta depende criticamente da Consciência Situacional (*Situational Awareness*).

Segundo Naser e Kodur (2018), Consciência Situacional é definida como: a percepção dos elementos ambientais em relação ao tempo e/ou espaço para analisar as consequências adversas da situação durante um desastre e fazer projeções sobre possíveis cenários e alternativas na reação ao evento.

Li et al. (2014) e Groner et al. (2012) *apud* Almatared et al. (2024) identificam que um alto nível de Consciência Situacional é fundamental para a segurança dos socorristas e para apoiar a tomada de decisões críticas. A falta de informações sobre a cena do incêndio pode levar a decisões incorretas na escolha da rota.

Ainda, Almatared et al. (2024) reconhecem que tecnologias como *Building Information Modeling* (BIM), Internet das Coisas e Inteligência Artificial (IA) são essenciais para melhorar os sistemas de gestão de segurança contra incêndio e a capacidade de suporte à decisão. Cheng

et al. (2017) definiram a perspectiva de "*Fire Relief*" (socorro em caso de incêndio), que exige fornecer informações críticas e precisas aos bombeiros em situações de resgate.

Para as equipes de salvamento, saber onde agir e onde está um ponto de risco pode ser a diferença entre um resgate bem-sucedido e uma tragédia. A localização e o monitoramento preciso da posição dos socorristas e vítimas são de extrema importância para reduzir mortes e ferimentos (Callisto De Donato et al., 2024). É por isso que sistemas, como o visualizador BIM proposto por Chen et al. (2018), buscam substituir a metodologia de resgate tradicional e capacitar os bombeiros com dados preditivos.

## 2.2 TECNOLOGIAS DE MONITORAMENTO E POSICIONAMENTO INTERNO

Para Bastos, Vieira e Apolinário, (2015) o uso de sistemas de localização interna na gestão de emergência em edifícios, visa auxiliar a evacuação dos ocupantes e socorristas. Neste sentido, segundo Kim et al. (2021) em edificações, tecnologias externas como o *Global Positioning System* (GPS) falham devido à atenuação dos sinais por elementos estruturais.

A implementação de sistemas internos, muitas vezes baseados em IoT, é uma alternativa para orientar ocupantes e forças de resgate. A escolha da tecnologia de monitoramento e posicionamento é fator importante, pois nenhuma tecnologia de localização é ideal para todos os tipos de ambientes internos (Kim et al., 2021).

Os sistemas IoT se apoiam em uma variedade de protocolos e tecnologias, cada um apresentando compensações entre suas características como: precisão, custo, consumo de energia e resiliência em ambientes adversos (como aqueles com fumaça e obstáculos) (Zhang et al., 2019).

Com base na literatura, é apresentada a seguir uma revisão das tecnologias de monitoramento e posicionamento interno mais relevantes para o contexto de edifícios e gestão de emergências.

### 2.2.1 Bluetooth Low Energy (BLE)

O Bluetooth Low Energy (BLE), parte do padrão Bluetooth 4.0, é reconhecido por sua capacidade de baixo consumo energético o que o torna ideal para aplicações de longo prazo em dispositivos alimentados por bateria. (Tatsch, 2018). Em comparação com o Wi-Fi, o BLE tem um custo de implementação relativamente baixo e é facilmente escalável. Além disso, a maioria dos smartphones modernos é capaz de ler seus anúncios (Cheema, 2020).

A precisão do BLE para localização é, em muitos casos, superior à do Wi-Fi, conforme demonstrado por Faragher e Harle, (2015) que obtiveram erros inferiores a 2,6 m em 95% do tempo com uma rede BLE densa, em comparação com os 8,5 m do Wi-Fi na mesma área. Elsayed, Mostafa e Marzouk (2023) indicam que o BLE fornece uma precisão de posição apropriada, variando de 0,9 m a 2 m.

No entanto, o BLE é altamente suscetível ao desvanecimento rápido (*fast fading*), um problema compartilhado com o Wi-Fi (Faragher; Harle, 2015), e depende fortemente de unidades centrais. Além disso, a precisão do BLE pode exigir uma pesada caracterização ambiental (como no método *Fingerprinting*), sugerindo que ele pode não escalar bem em ambientes heterogêneos, conforme argumentado por Cheema (2020). Renzler et al. (2018), contudo, demonstraram estratégias adaptativas que melhoram a eficiência e a capacidade de resposta do BLE.

### 2.2.2 Wi-Fi

Segundo Cheema (2020), a principal vantagem do Wi-Fi é a sua onipresença; a infraestrutura de Wireless Local Area Network (WLAN) já existe na maioria dos edifícios, eliminando a necessidade de desenvolver novas redes. O Wi-Fi também oferece um alcance maior (cerca de 100 m) do que outras tecnologias.

Entretanto, o Wi-Fi tem um consumo de energia significativamente maior do que o BLE e o Zigbee (Al-Nabhan; Al-Aboody; Alim Al Islam, 2019). Sua precisão para localização pode ser erraticamente baixa, variando de 3 m a 30 m, um nível inaceitável para rastreamento de pessoas em emergências (Elsayed; Mostafa; Marzouk, 2023). A precisão pode ser comprometida pelo seu alto poder de transmissão e pela interferência de muitos dispositivos na mesma banda de frequência (Cheema, 2020). Além disso, nem todas as plataformas móveis permitem acesso aos dados de *scan* de Wi-Fi, limitando o uso de *fingerprinting* (Faragher; Harle, 2015).

### 2.2.3 Radio Frequency Identification (RFID)

Os sistemas RFID consistem em etiquetas (*tags*) e leitores, sendo amplamente utilizados em soluções de *Real-Time Location System* (RTLS) devido à sua flexibilidade e custo-benefício para identificar objetos ou pessoas (Zhang et al., 2019). Ainda, O RFID suporta comunicação sem linha de visada (Non Line-of-Sight) (Pattnaik et al., 2022).

Embora as etiquetas passivas sejam baratas e não exijam bateria, seu alcance é muito limitado. Para alcançar uma precisão elevada (centimétrica), Wu, Wu e Tian (2018) afirmam que é necessário instalar um número grande de antenas, o que eleva o custo do projeto. Sua precisão típica é de 1 m a 3 m.

#### **2.2.4 Long Range (LoRa)**

O Long Range (LoRa) é uma tecnologia que se destaca por seu longo alcance (atingindo nível de cidade) e baixíssimo consumo energético (Kim et al., 2021). É especialmente valorizado em emergências, pois seus sinais são resilientes a ruídos e possuem excelente capacidade de penetração através de paredes e móveis, o que não ocorre com outras tecnologias como Wi-Fi e BLE (Kim et al., 2021).

Em experimentos de localização interna, Kim et al, (2021) demonstraram que o LoRa pode alcançar precisão de 1,6 m em linha de visada (Line-of-Sight, LOS) e 3,1 m sem linha de visada (Non-Line-of- Sight, NLOS).

Segundo Tatsch (Tatsch, 2018), o custo de implantação é elevado devido à necessidade de hardware específico patentado (Semtech Corporation). Além disso, ele é projetado para baixas taxas de transmissão de dados.

#### **2.2.5 Zigbee**

O Zigbee é um protocolo sem fio de baixo custo e baixo consumo de energia. Ele suporta redes em malha sem fio, o que permite cobrir alcances mais longos do que o Bluetooth (Al-Nabhan; Al-Aboody; Alim Al Islam, 2019). O Zigbee é frequentemente empregado em tarefas de monitoramento ambiental (Cheng et al., 2017).

No entanto, o Zigbee é uma tecnologia de curto alcance e, para manter uma precisão satisfatória, requer um grande número de nós de sensores e apresenta baixa penetração e pouca capacidade de lidar com interferências (Pattnaik et al., 2022). Bluementhal et al. (2007) relataram um erro médio de localização de 2,6 m, mesmo em uma rede densamente alinhada.

#### **2.2.6 Ultra-Wideband (UWB)**

O Ultra-Wideband (UWB) é considerado uma das tecnologias com os melhores atributos para sistemas de posicionamento interno, Cheema, (2020) aponta a alta precisão dos

sistemas UWB, frequentemente abaixo de 50 cm, e sua imunidade à interferência de dispositivos Wi-Fi ou BLE. Ainda, o UWB também opera com baixa potência de transmissão.

O UWB tem uma limitação significativa em cenários sem linha de visada (*Non-Line of Sight* ou *NLOS*), onde seu desempenho pode ser drasticamente reduzido. Além disso, o custo da infraestrutura UWB tende a ser mais alto do que outros sistemas.(Kim et al., 2021).

### **2.2.7 Circuito Fechado de Televisão (CFTV) e Visão Computacional.**

Os sistemas de Circuito Fechado de Televisão (CFTV), muitas vezes combinados com Visão Computacional oferecem a capacidade de contagem precisa de pessoas e posicionamento (Han et al., 2024). Uma grande vantagem é que não exigem que os ocupantes carreguem dispositivos (Zhang et al., 2019), e podem se apoiar em sistemas de câmeras já implantados (Han et al., 2024). Ding, Zhang e Huang (2023) desenvolveram um sistema que utiliza câmeras e algoritmos de aprendizado de máquina para fornecer informações em tempo real sobre a distribuição dos evacuados.

Os desafios dos sistemas baseados em visão são a questão da privacidade e desempenho em ambientes escuros, empoeirados ou com fumaça, o que é um problema crítico em cenários de incêndio (Zhang et al., 2019). O sistemas requerem também alta capacidade de processamento para algoritmos de vídeo em tempo real (Han et al., 2024).

### **2.2.8 Comparação entre tecnologias**

O Quadro 2 apresenta vantagens e desafios das tecnologias para localização interna no contexto de gerenciamento de emergências.

Quadro 2 – Vantagens e desafios das tecnologias para localização interna.

| Tecnologia                 | Vantagens                                                                                                             | Desafios                                                                                                                             | Referências                                                                       |
|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| BLE                        | Baixo custo e baixo consumo energético. Boa precisão (até 0.9–2 m). Facilmente escalável.                             | Suscetível a fast fading e perda de pacotes. Requer intensa calibração ambiental para precisão.                                      | (Faragher; Harle, 2015), (Cheema, 2020), (Tatsch, 2018) e (Renzler et al., 2018). |
| Wi-Fi                      | Utiliza infraestrutura de WLAN existente (ubiquidade). Alcance maior (cerca de 100 m).                                | Alto consumo de energia. Baixa e errática precisão (3 m a 30 m). Suscetível a alta interferência no espectro 2.4 GHz.                | (Farid; Nordin; Ismail, 2013), (Zou et al., 2018)                                 |
| RFID                       | Flexibilidade e bom custo-benefício para identificação. Suporta comunicação sem linha de visada (NLOS)                | Alcance limitado para tags passivas. Custo elevado se for necessária precisão centimétrica (devido à alta densidade de instalação)   | (Wu; Wu; Tian, 2018), (Costin; Teizer, 2015).                                     |
| LoRa                       | Longo alcance (LPWAN) e baixíssimo consumo. Excelente penetração de obstáculos e estabilidade de sinal em NLOS        | Alto custo de implantação devido ao hardware proprietário (Semtech). Baixas taxas de transmissão de dados                            | (Kim et al., 2021), (Tatsch, 2018), (Manuel; Faied; Krishnan, 2022).              |
| Zigbee                     | Baixo custo e baixo consumo de energia. Suporta redes em malha (mesh)                                                 | Curto alcance e exige alta densidade de nós para precisão aceitável. Baixa penetração em comparação ao LoRa                          | (Blumenthal et al., 2007). (Bianchi; Ciampolini; De Munari, 2019).                |
| UWB                        | Alta precisão (sub-50 cm). Imunidade à interferência de outras tecnologias radiofrequência                            | Desempenho reduzido em cenários de Sem Linha de Visada (NLOS). Infraestrutura geralmente de custo mais alto                          | (Cheema, 2020), (Kim et al., 2021).                                               |
| CFTV / Visão Computacional | Não exige que os ocupantes carreguem dispositivos. Permite contagem precisa de pessoas e monitoramento em tempo real. | Graves preocupações com a privacidade. Ineficaz em condições de fumaça, escuridão ou poeira. Requer alta capacidade de processamento | (Ding; Zhang; Huang, 2023), (Han et al., 2024), (Zhang et al., 2019)              |

Muitas pesquisas recentes sugerem a adoção de abordagens híbridas para mitigar as desvantagens individuais das tecnologias. Por exemplo, a tecnologia IoT baseada em sensores (como BLE, Wi-Fi e LoRa) é frequentemente combinada com modelos de Gêmeos Digitais e BIM para monitoramento em tempo real e simulação de rotas de evacuação, conforme explorado por Lin et al. (2025b). No campo da localização, sistemas como o de Dugdale et al.

(2019) utilizam câmeras para contagem de pessoas e alimentam algoritmos de roteamento. Callisto De Donato et al. (2024), no contexto de emergências sísmicas, usaram o protocolo LoRa devido ao seu longo alcance e baixa energia.

Em resumo, enquanto o UWB promete a maior precisão teórica e o BLE oferece a solução mais econômica e de menor consumo, o LoRa se destaca pela robustez e penetração em ambientes NLOS, e o CFTV/Visão Computacional fornecem dados de multidão sem exigir cooperação do usuário, apesar dos riscos de privacidade e falhas em condições de fumaça. A tendência, como visto no trabalho de Bastos, Vieira e Apolinário, (2015), é o uso crescente de sistemas híbridos para superar as limitações de qualquer tecnologia única.

## 2.3 SISTEMAS E APLICAÇÕES DE IOT EM SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIOS

A IoT pode auxiliar na Gestão de Emergências, permitindo uma mudança nas abordagens na evacuação de incêndio. Segundo Almatared et al. (2024) a principal preocupação em caso de incêndio é garantir a evacuação segura de todos os ocupantes. A NFPA relatou 1.353.500 incêndios nos Estados Unidos, resultando em 3.800 mortes e uma perda financeira de \$15.9 bilhões de dólares. (US. Fire Administration (2022) apud Amatared (2024)).

### 2.3.1 Detecção inteligente de riscos e previsão de incêndios

Os sistemas IoT são construídos sobre uma camada de sensoriamento físico que coleta dados em tempo real, essenciais para o monitoramento de desastres (Xie et al., 2025). Esta camada integra objetos físicos e sensores inteligentes IoT, como detectores de fogo, extintores, alarmes e sinais de saída de emergência (Almatared et al., 2024). Os dados coletados incluem temperatura, fumaça e níveis de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). O monitoramento de temperatura é um indicador viável e confiável para analisar a intensidade do fogo (Zhang et al., 2022).

Zhang et al.(2022) propuseram o framework AID-Fire para identificação em tempo real da evolução de incêndios em edifícios. O sistema consiste em quatro componentes principais: uma rede de sensores IoT (para coleta de dados de temperatura), um servidor em nuvem (para armazenamento), um algoritmo de aprendizado de máquina (para processamento de dados) e uma Interface de Usuário. O algoritmo foi treinado com uma vasta base de dados numérica de 533 cenários de fogo usando uma rede neural.

Em testes de demonstração em escala real, o sistema conseguiu identificar informações sobre o fogo (como tamanho e localização da fonte) com um erro relativo inferior a 15% e um

atraso de menos de 1 segundo, exibindo o desenvolvimento detalhado do fogo na interface(Zhang et al., 2022).

Sobre previsão de risco e anomalias, Xie et al. (2025) propuseram uma integração de gêmeo digital com a IoT para combate a incêndios, utilizando o modelo computacional para transformar dados de sensores e prever o desenvolvimento futuro do fogo e regiões de risco com previsão com 60 segundos de antecedência.

O trabalho Hitimana et al. (2021) propôs o uso de inteligência artificial para aferir a presença de ocupantes utilizando uma estrutura de IoT para capturar parâmetros ambientais internos e usar o algoritmo de aprendizado de máquina para inferir o conhecimento da presença humana.

### **2.3.2 Gerenciamento de evacuação e sistemas de roteamento dinâmico**

Em gêmeos digitais, o BIM fornece a representação digital em 3D e as características funcionais das instalações (Almatared et al., 2024). O BIM serve como base de dados abrangente para gerenciar informações de segurança contra incêndios e, quando combinado com o Sistema de Informação Geográfica (SIG) permite a integração de dados ambientais internos e externos (Lin et al., 2025b).

No entanto, o BIM é limitado a fornecer dados estáticos. A IoT preenche essa lacuna, permitindo a integração de dados de sensoriamento em tempo real (Almatared et al., 2024).

Chen, Liu e Wu (2018) criaram um sistema de visualização e alerta usando modelo BIM, utilizando sensores Bluetooth e um aplicativo móvel para prever incêndios e determinar as rotas de evacuação conforme cenários de incêndio. O sistema controla luminárias LED de rota de fuga (sistema adicionados a sinalização para abandono de local da edificação).

Um sistema semelhante foi proposto por Wehbe e Shahrour (2021). Além do balizamento inteligente, utiliza sensores de aberturas de porta para visualizar no modelo BIM o progresso da evacuação.

Os sistemas de Li et al. (2014) Chen, Liu e Wu (2018), Wehbe e Shahrour (2021), Hu et al. (2023) e Deng et al. (2025), utilizaram os dados fornecidos pelos sensores para calcular o caminho de evacuação mais curto.

Por fim, Ding, Zhang e Huang (2023) propuseram um Sistema de emergência em conjunto com gêmeo digital, utilizando o circuito fechado de Televisão e visão computacional. Este sistema permite a detecção e rastreamento de evacuados, o cálculo da velocidade de egressão.

### 2.3.3 Alarme ativo e suporte a resgate

Sistemas de resposta ativa podem realizar tarefas de emergência automaticamente. O trabalho de Lin et al. (2014) corrobora com esta ideia. No estudo, foi implementado um Sistema de Resposta Ativa a Desastres (SRAD), que interpreta mensagens de alerta e aciona sistemas embarcados. Tarefas de emergência incluem abrir portas de escape, desativar linhas de energia e de gás combustível entre outros sistemas preventivos.

Em estudo de caso de Lin et al. (2014), o SRAD demonstrou capacidade de reduzir o tempo de reação dos usuários em 15 segundos, tempo suficiente para as pessoas percorrerem 100 metros. Ainda, o SRAD em casos de terremoto pode manter uma rede temporária de internet wi-fi usando o sistema de dispositivos embarcados, permitindo que as vítimas presas nos escombros enviem mensagens de emergência.

Naser e Kodur (2018) idealizaram a adoção de IoT para criar uma infraestrutura cognitiva. Esta estrutura avalia dinamicamente a resposta estrutural em edificações (deformação, vibração, temperatura), prevendo sinais de colapso iminente e notificando ocupantes e socorristas sobre zonas de alto risco.

Callisto De Donato et al (2024) projetaram uma plataforma com objetivo de mitigar os danos da infraestrutura de comunicação em cenários pós-desastre. Usando dispositivos IoT instalados em móveis antissísmicos (como mesas) para detectar a presença de pessoas refugiadas. Após um terremoto, o dispositivo pode alterar seu modo operacional, ativando sensores para detectar movimento e transmitir dados de localização via Gateway instalados ou Gateway móveis (como um drone equipado com Gateway LoRa). A Interface da plataforma utiliza mapas georreferenciados e mapas de calor para guiar os socorristas para a localização estimada das pessoas.

Para missões de Busca e Resgate em locais em sinistro, Manuel, Faied e Krishnan (2022) propuseram uma arquitetura de comunicação baseada em LoRa em conjunto com um robô de busca e resgate (Rescuer). O dispositivo RoboMaC, utiliza o protocolo LoRa, permitindo que a base de controle envie comandos ao robô e receba dados de geolocalização em tempo real.

Usando de ferramentas de Realidade Aumentada (RA), Park et al. (2018) propuseram um Sistema Inteligente de Gerenciamento de Desastres baseado em IoT, utilizando RA para resgate rápido, simulação e orientação de evacuação. Chen, Lai e Lin (2020) desenvolveram um sistema BIM/RA para inspeção e manutenção de equipamentos de segurança e combate contra incêndio, superando as limitações da informação baseada em papel.

A plataforma GUIDE2FR, introduzida por Álvaro et al. (2025), utiliza um gêmeo digital de uma torre de treinamento de bombeiros. A plataforma integra *beacons* (antenas) de sensores IoT (Wi-Fi, Bluetooth, LoRa) e Aprendizado de Máquina para prever parâmetros ambientais, como por exemplo, níveis de CO<sub>2</sub>, fornecendo informações cruciais para o Posto de Comando Avançado durante exercícios de emergência.

### 3 METODOLOGIA

Buscando responder o problema de pesquisa, e após a análise das referências sobre o tema, buscou-se então, desenvolver um método de gestão de evacuação em edifícios que utilize Internet das coisas.

O método proposto visa um sistema dinâmico de gestão de emergência, construído sobre a premissa de que a localização em tempo real auxiliará as tomadas de decisão da equipe de resgate.

As atividades foram divididas em etapas:

1. Etapa Física. Esta camada é responsável pelo hardware utilizado para coletar informações dos usuários.
2. Etapa de Coleta e Comunicação de Rede. Esta camada de desenvolvimento do software embarcado.
3. Etapa de Processamento e Aplicação. É a camada onde será processado os dados coletados e terá as funcionalidades de decisão para os socorristas em ambiente de computação em nuvem.

Depois destas etapas foi descrito a integração dos sistemas e sua operação em emergência.

#### 3.1 ETAPA FÍSICA

Nesta etapa, a pesquisa focou na criação dos equipamentos para o sistema de monitoramento, compreendendo inicialmente a necessidade de um equipamento como antena e um equipamento sendo o gateway.

A antena foi projetada para atuar como um receptor dedicado, capturando os sinais, como os emitidos por dispositivos BLE. Sua principal função é escanear continuamente o ambiente, identificar dispositivos BLE próximos e encaminhar dados brutos (como o Received Signal Strength Indicator - RSSI) para o gateway (Tatsch, 2018).

O hardware do gateway funcionou como um nó de comunicação entre os dispositivos da rede (nós sensores) e a infraestrutura de processamento. O gateway é responsável por gerenciar as antenas, de forma que as identifica, configura, diagnostica seus status e recebe os dados transmitidos. Esses dados são armazenados temporariamente no gateway. Em seguida, o gateway transmite os dados coletados para um serviço central (servidores remotos ou a nuvem) por meio de Wi-Fi.

Para cumprir essas funções, o equipamento contou com um microcontrolador, que deve ser compatível com BLE e Wi-Fi. O equipamento deve incluir periféricos para interação e monitoramento, como LEDs e Buzzers, para indicar status operacional e facilitar o diagnóstico de falhas ou emitir alertas sonoros. Além disso, o dispositivo precisou de uma fonte de alimentação capaz de operar com eficiência energética para suportar longos períodos de funcionamento, podendo ser alimentado por bateria ou pela rede elétrica.

O ESP32 S3 (Figura 2) foi escolhido como microcontrolador principal devido à sua compatibilidade nativa com BLE e Wi-Fi, cumprindo o requisito de comunicação dupla do sistema de monitoramento. Ele representa uma opção de custo viável e suporta baixo consumo energético, o que é crucial para a viabilidade do projeto.

Além disso, plataformas baseadas em ESP32 demonstram robustez, sendo capazes de operar em condições industriais severas (e.g.,  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $+125^{\circ}\text{C}$ ), tornando-o ideal para sistemas em ambientes de desastre.

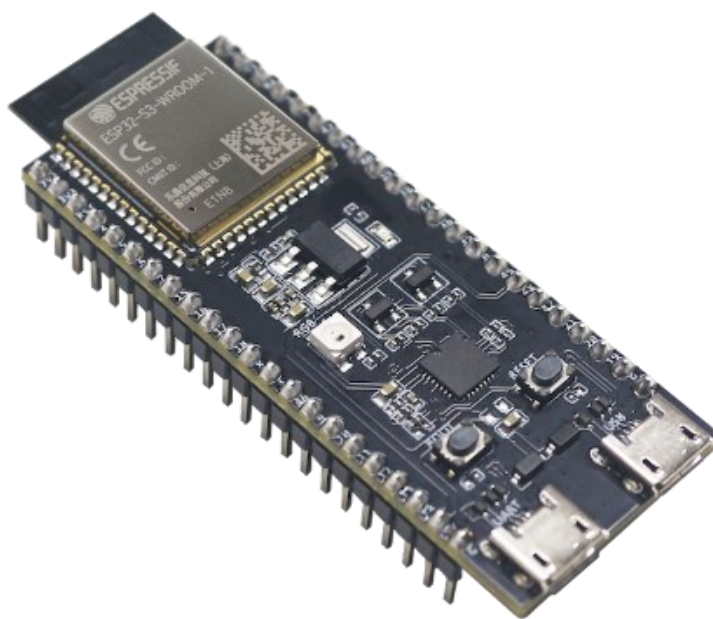


Figura 2 – Microcontrolador ESP32 em kit de desenvolvimento.

Um esboço do projeto foi desenhado em um diagrama de blocos, a fim de visualizar as partes dos principais circuitos, e como elas serão combinadas no equipamento, conforme Figura 3.

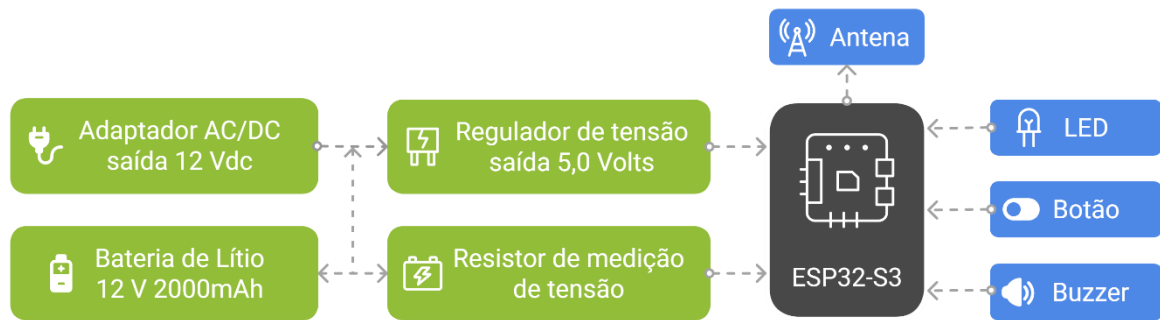


Figura 3 – Diagrama de blocos do hardware.

A Figura 4 apresenta como ficou a montagem final do hardware projetado.

No APÊNDICE B apresenta mais informações sobre a construção do hardware das antenas e gateway.



Figura 4 – Hardware já montado em um gabinete e identificados.

## 3.2 ETAPA DE COLETA E COMUNICAÇÃO DE REDE

Os equipamentos de antena e gateway utilizaram o mesmo hardware, já que foi objetivo do trabalho desenvolver um equipamento versátil usando o potencial do microcontrolador ESP32-S3. A diferença de equipamentos se deu então pelo seu software embarcado.

Utilizando o ambiente de desenvolvimento Arduino IDE e a linguagem de programação C++, desenvolveu-se dois softwares embarcados, o primeiro da antena que tem objetivo principal o escaneamento dos equipamentos BLE e o código para o gateway com objetivo de envio dos dados coletados para um serviço em nuvem.

### 3.2.1 Desenvolvimento do software da antena

Foi desenvolvido um programa para o microcontrolador ESP32 nomeado de antena, utilizando seu rádio BLE para detectar aparelhos Bluetooth próximos. Depois de coletar os dados dos equipamentos BLE, esta antena se comunica com outros dispositivos por uma rede Wi-Fi diferenciada, chamada rede *mesh*, onde cada ponto (normalmente chamado tecnicamente de "nó") pode conversar diretamente com os outros, passando mensagens mesmo que um caminho esteja bloqueado, garantindo que a comunicação continue funcionando.

O código permitiu que a antena escaneie dispositivos Bluetooth, como *tags* ou celulares, coletando informações como nome, endereço único (MAC ADDRESS) e intensidade do sinal (RSSI). Essas informações são guardadas temporariamente em uma memória organizada, como uma fila de espera, e enviadas para um equipamento central, chamado gateway, com a data e hora exatas, sincronizadas pela rede.

Para tornar o sistema confiável e fácil de usar, ele inclui alguns recursos. Ele salva configurações importantes, como o nome da antena, em uma memória ROM, que não se apaga ao desligar o dispositivo. Caso a conexão com o gateway for perdida, a antena tenta se reconectar automaticamente, continuando a coletar dados enquanto espera. Além disso, o gateway pode enviar comandos para mudar como a antena funciona, como ajustar o tempo de escaneamento, sem precisar mexer no aparelho fisicamente. Um sistema de segurança básico, com uma chave, protege essas mudanças contra acesso não autorizado.

O APÊNDICE C demonstra mais informações sobre o código e fluxograma.

### 3.2.2 Desenvolvimento do software do gateway

O gateway é um dispositivo central, construído também com o microcontrolador ESP32, que gerencia a rede de antenas e se conecta à internet para enviar informações coletadas. O gateway coordena várias antenas que detectam os dispositivos Bluetooth e recebendo os dados delas através da rede *mesh*.

O gateway organiza esses dados, adiciona a hora exata obtida da internet (usando um serviço chamado NTP), e os envia para um servidor remoto de forma segura, como se estivesse mandando um e-mail protegido. Ele também pode mudar as configurações das antenas remotamente, como ajustar o nome ou a senha da rede, sem precisar tocar nos aparelhos, e guarda essas configurações em uma memória que não se apaga ao desligar.

Caso não haja conexão com a internet, o gateway armazena os dados das antenas em uma fila organizada, como uma lista de espera, e os envia quando a conexão voltar. Ele também verifica se a comunicação com o servidor foi bem-sucedida; se houver erro (como um problema no servidor), ele tenta novamente e avisa o que deu errado pelo monitor do computador. Além disso, o gateway monitora as antenas, respondendo a mensagens delas e pode mostrar, pelo monitor, quais aparelhos estão conectados e o que está acontecendo.

O APÊNDICE D demonstra mais informações sobre o código e fluxograma.

### 3.3 ETAPA DE PROCESSAMENTO E APLICAÇÃO

Esta etapa do projeto detalha a criação de um sistema de posicionamento em tempo real projetado para localizar objetos ou pessoas em ambientes internos, como em rastreamento de equipamentos, logística ou navegação. O sistema determina suas posições com base na intensidade do sinal recebido.

O desenvolvimento seguiu uma sequência lógica de etapas, organizadas em camadas, onde cada parte do sistema tem uma função específica. Com o envio dos dados coletados pelo gateway, o serviço em nuvem processou e validou os dados recebidos, organizando em um formato padronizado. Depois é aplicado um filtro matemático, chamado filtro de Kalman. Esse filtro auxiliou a reduzir as interferências causadas por obstáculos, como paredes ou objetos metálicos.

Após a filtragem, os dados foram armazenados em um banco de dados. Com os dados agrupados, um serviço usou uma técnica de localização chamada trilateração, que converte a intensidade do sinal em distâncias aproximadas permitindo, assim, determinar as coordenadas

cartesianas planas de um objeto por meio de um sistema linear. Por fim, a posição foi calculada e salva, gerando um histórico de movimentação do equipamento lido.

O sistema foi construído utilizando *TypeScript*, uma linguagem de programação que facilita a criação de códigos organizados e seguros para web. Para gerenciar as interações entre as diferentes partes do sistema, foi adotada uma técnica chamada injeção de dependências, que torna o projeto mais modular e fácil de manter. A Figura 5 ilustra a sequência dos serviços realizada pelo sistema.

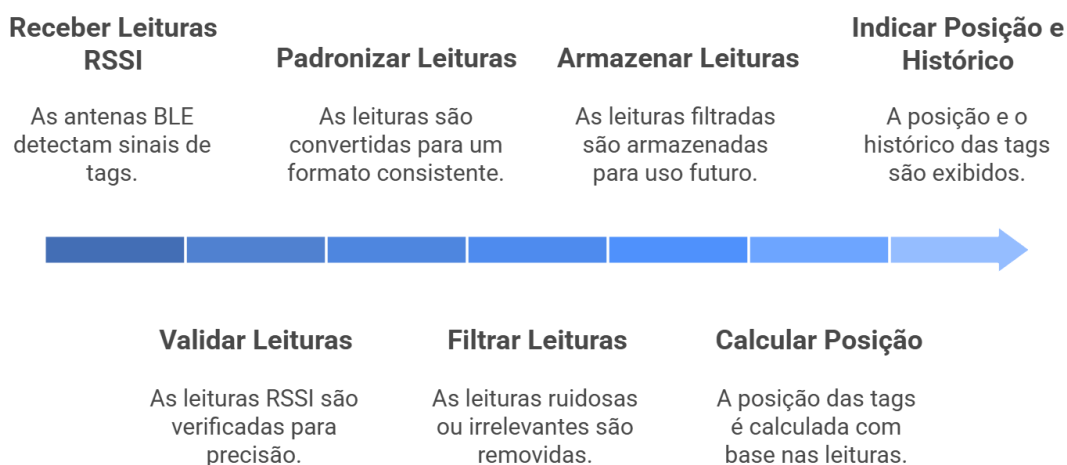


Figura 5 – Desenvolvimento dos serviços em nuvem

O APÊNDICE E traz informações detalhadas de como foi elaborado cada serviço executado em servidor em nuvem.

### 3.4 INTEGRAÇÃO DO SISTEMA DE GESTÃO DE EVACUAÇÃO.

Após a elaboração do serviço em nuvem e do sistema embarcado, foi necessário integrar os sistemas. Esses componentes colaboram para coletar, transmitir e processar dados, com intuito de gerar informações aos socorristas, auxiliando a gestão de evacuação e a consciência situacional da equipe de resgate.

A instalação das antenas e gateway nas edificações seguiu parâmetros utilizados por equipamentos de segurança contra incêndio. Considerou-se o uso da rede elétrica de emergência, utilizado para alimentar as baterias de luminárias de emergência e placas de indicação de saída. Ainda, sobre a altura de instalação, adotou-se 2,10 m, valor típico para sistemas de iluminação de emergência e sinalização para abandono de local.

Na recepção da edificação, ao lado da central de alarme de incêndio, foi instalada uma placa de identificação do sistema de gestão de evacuação, contendo um *QR Code* para acessar

o aplicativo na edificação já cadastrada (Figura 6). O sistema fica disponível apenas quando houver um evento disparado pela central de alarme de incêndio.



Figura 6 – Exemplo de placa com indicação do sistema.

No aplicativo em nuvem, foram inseridas as plantas baixas de cada pavimento da edificação. Tais plantas devem ser colocadas em escala real, para que após configuração das antenas, sejam obtidas distâncias dos usuários que condizem com as dimensões da edificação. Pode-se ainda ser identificados os extintores, hidrantes ou outros equipamentos de combate a incêndio, fora indicação das áreas de relativa segurança e pontos de encontro.

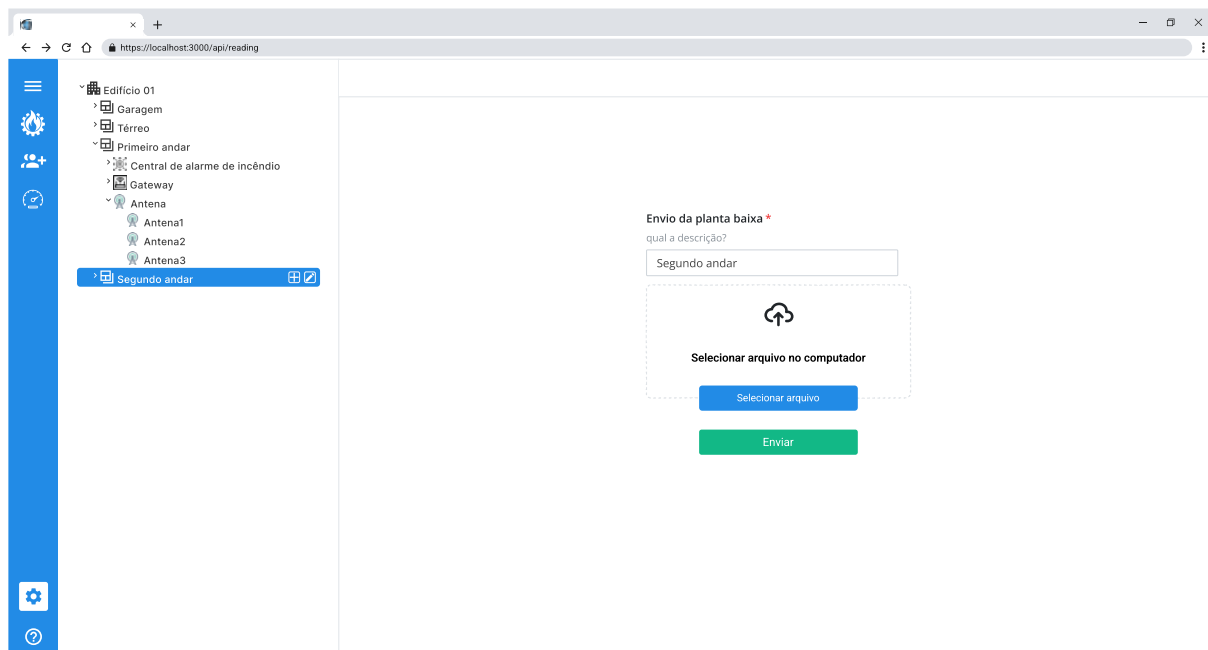


Figura 7 – Inserção dos pavimentos no aplicativo.

Na janela de configuração da antena, foram adicionadas as coordenadas da posição de instalação em planta baixa, seu valor de perda de trajeto, sua identidade e seu nome na rede.

Em janela semelhante é configurado o gateway, dando a ele, nome, identidade, posicionamento de instalação, e dados da rede de Wi-fi.

Após a inserção destes componentes, foi realizado um teste de conexão entre aparelhos, calibração dos valores medidos e verificação da integridade da rede. Por fim, através de componentes de conexão lógica, como relés inteligentes, foi integrado ao aplicativo o alarme de incêndio da edificação.

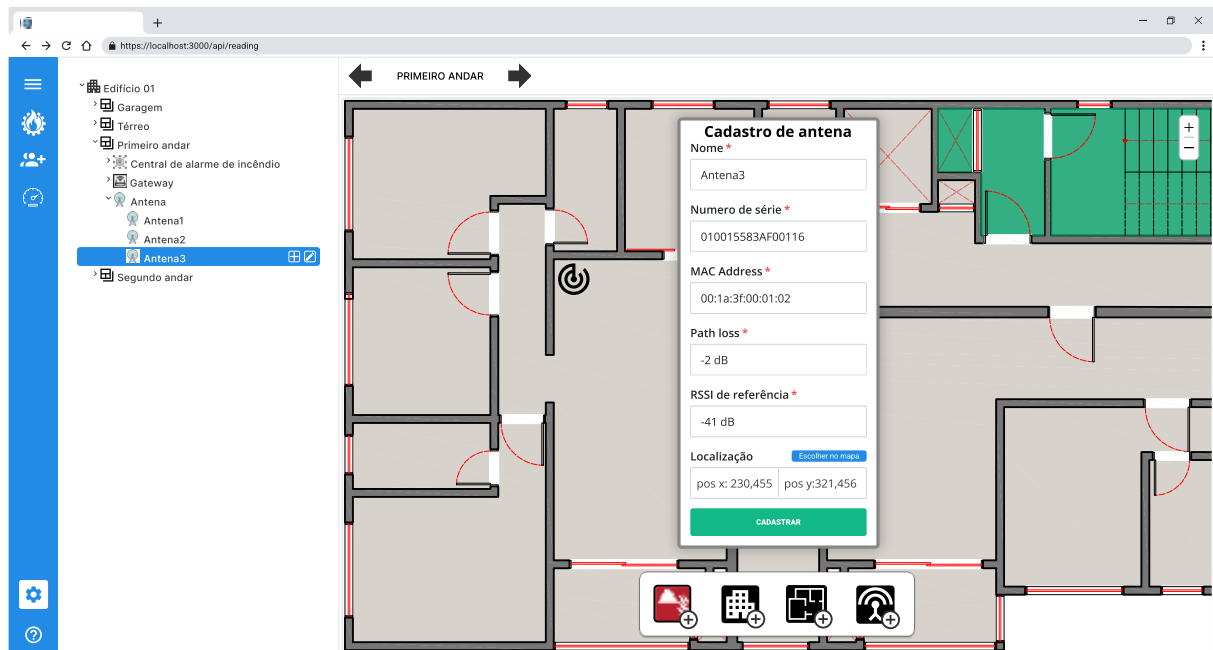


Figura 8 – Inserção dos equipamentos.

Posteriormente, foi realizado o cadastro de usuários. Isso se deu, vinculando ao usuário, o *mac address* de uma *tag* BLE ou utilizando o *smartphone* do usuário. O cadastro pode ter diversas finalidades e integrar outros serviços da edificação, tais como, controle de acessos, prontuários médicos ou ingressos em eventos. Para auxiliar a equipe de resgate é dada uma categoria para o usuário: criança, adulto, idoso ou pessoa com deficiência.

Figura 9 – Cadastro dos usuários

Ressalta-se a importância do cadastramento dos usuários, pois isso auxilia o algoritmo de leitura das antenas a diferenciar os equipamentos *bluetooth* não cadastrados. Isso facilita a verificação da permanência de movimento de usuários cadastrados durante um evento.



Figura 10 – Fluxo da integração dos componentes do sistema de gestão de evacuação de emergência.

### 3.5 OPERAÇÃO DO SISTEMA DE GESTÃO DE EVACUAÇÃO EM CASO DE EMERGÊNCIA

Para a análise hipotética de um sinistro em uma edificação, considera-se a seguinte sequência de eventos. Inicialmente, um usuário da edificação identifica uma situação de risco. Conforme orientado pelos treinamentos simulados de evacuação, a primeira ação deste usuário é acionar o alarme de incêndio, antes de qualquer outra decisão.

O acionamento do alarme é importante para notificar todos os ocupantes sobre o perigo e dar início ao processo de evacuação. Paralelamente ao disparo do alarme, é acionado o contato com o Corpo de Bombeiros local.

Ao chegarem ao local, as equipes de brigadistas e o Corpo de Bombeiros obtêm acesso ao sistema, utilizando-se da câmera de um *smartphone* ou *tablet* para a leitura de um *QR code*, que dá então acesso à visualização das plantas baixas da edificação, a localização dos equipamentos de combate a incêndio e áreas de relativa segurança e ponto de encontro de evacuação.

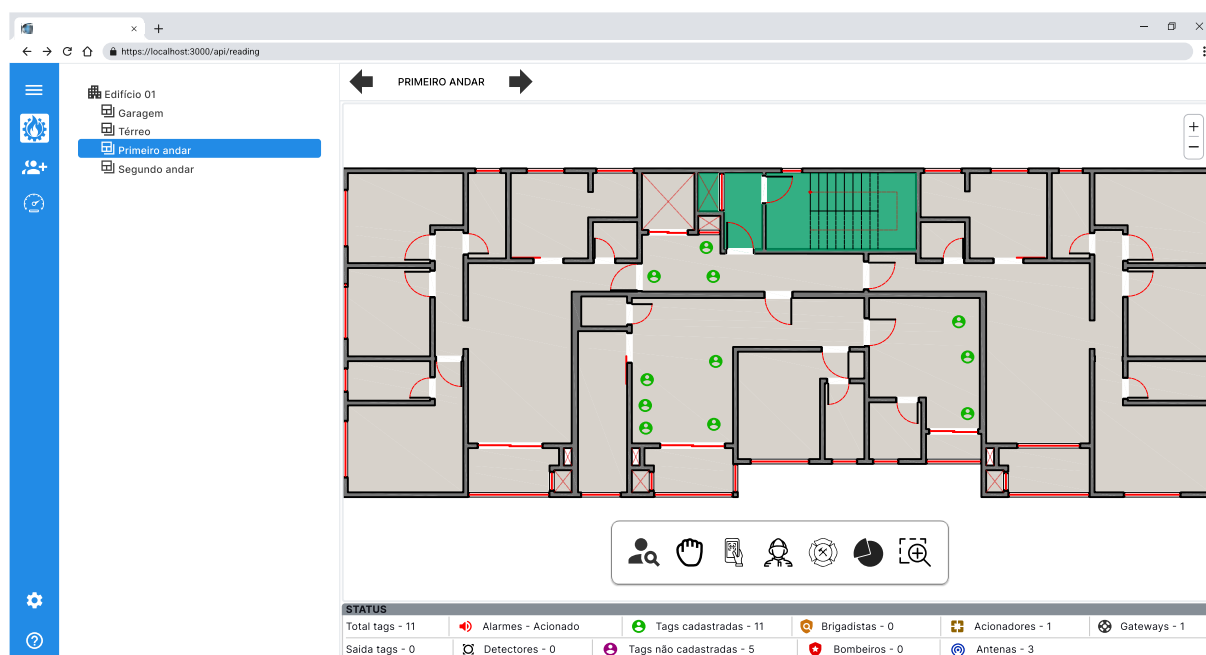


Figura 11 – Visão geral do sistema em operação.

A interface do sistema permite que durante esse sinistro, os socorristas sejam cadastrados a partir de *smartphones* ou *tags* BLE diretamente na tela de visualização, auxiliando a gestão das equipes de resgate enquanto está em andamento. Assim, o gestor da emergência pode monitorar a evacuação dos ocupantes cadastrados no prédio, indicar as posições de equipamentos de combate a incêndio à equipe, verificar a concentração de ocupantes que não evacuaram a edificação e a situação dos membros da equipe de resgate dentro da ocorrência.

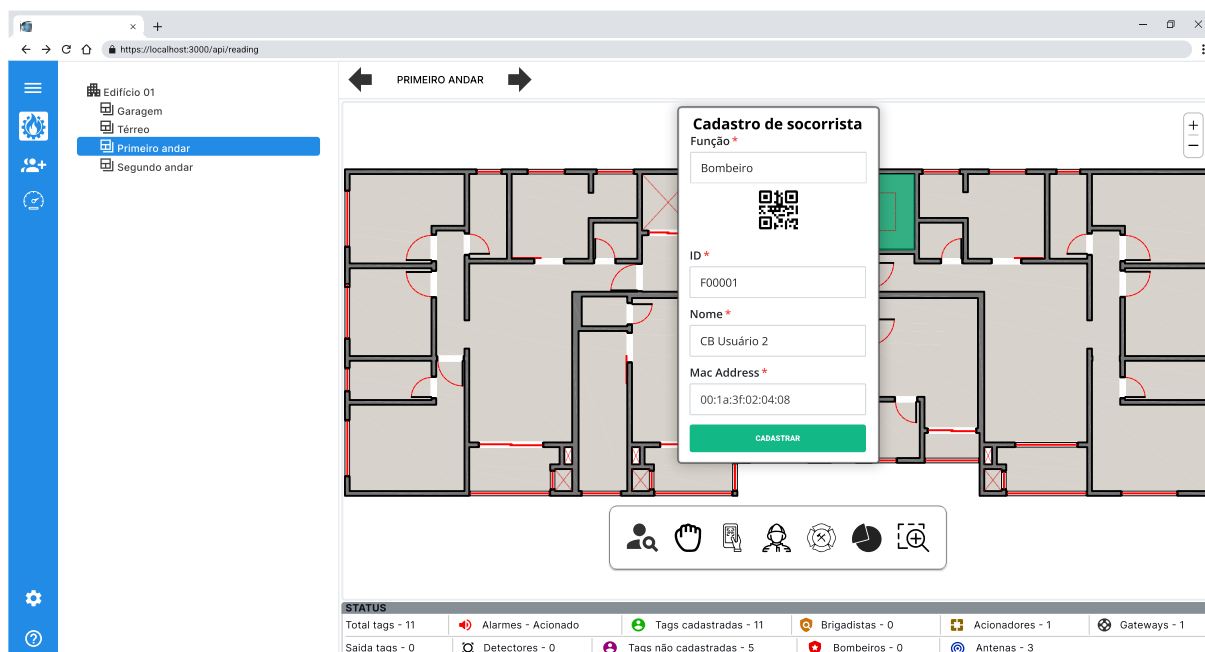


Figura 12 – Cadastro do socorrista no Sistema.

O aplicativo apresenta métricas em um painel interativo (*Dashboard*) com número de ocupantes cadastrados no instante do acionamento do alarme de emergência, o número de ocupantes que evacuou e o que ainda estão nela e o número de socorristas. Essas informações são apresentadas por andar, permitindo que o gestor selecione os andares e obtenha o panorama da evacuação, andar por andar.

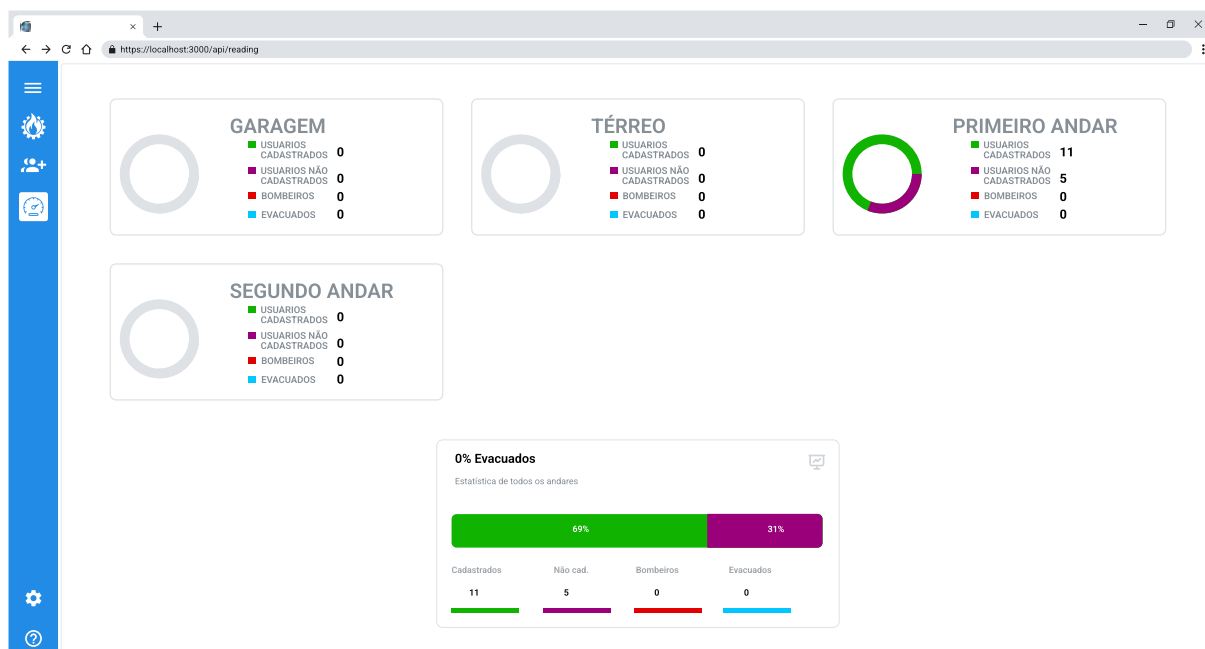


Figura 13 – Painel interativo do sistema em operação.

Na tela do andar, seria possível verificar informações dos usuários e suas categorias. Um usuário cadastrado que não se movimenta pode ser uma pessoa em situação de risco crítico

ou um equipamento que foi deixado de lado durante a evacuação de emergência. Essas informações auxiliarão a tomada de decisão do gestor, permitindo que ele envie as equipes, de acordo com a estratégia do resgate.

A Figura 14 demonstra de forma resumida o fluxo de operação do sistema proposto.



Figura 14 – Fluxo da operação do sistema de gestão de evacuação de emergência.

#### 4 ESTUDO DE CASO

Foi ensaiada a validação empírica do funcionamento do sistema de localização interna contemplado pelas antenas, gateway e serviços em nuvem proposto na metodologia. O ensaio consistiu na instalação de três antenas receptoras (A01, A02 e A03) instaladas em pontos conhecidos em um ambiente residencial, conforme a planta baixa ilustrada na Figura 15.

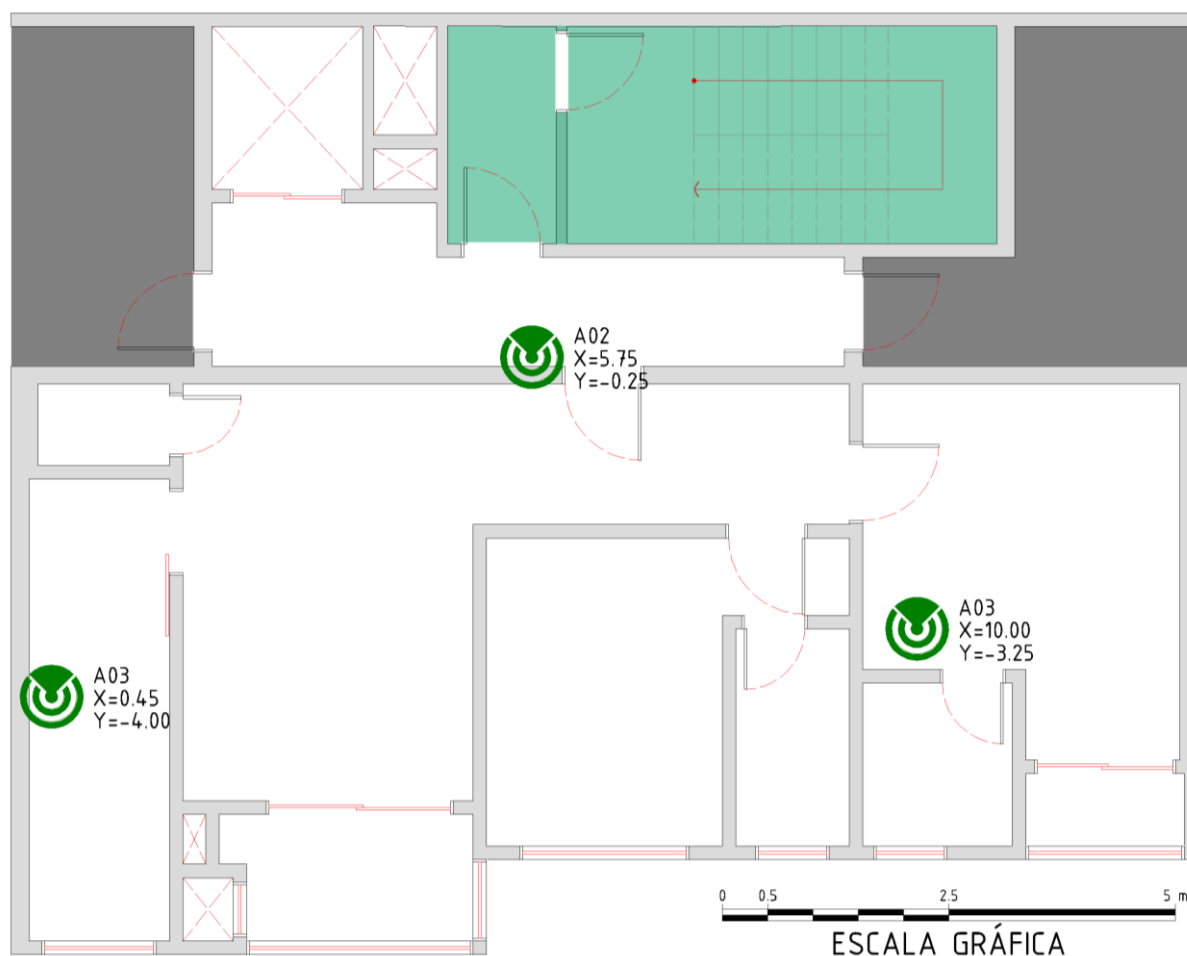


Figura 15 – Planta baixa do ambiente residencial usado como área de teste.

O apartamento selecionado para os testes possui uma área de aproximadamente 70 metros quadrados, distribuída em sala de estar/jantar, cozinha, duas suítes e um lavabo, com paredes de alvenaria e móveis típicos. O objetivo principal dos testes foi validar a precisão do sistema na identificação da posição de objetos em diferentes cômodos, considerando fatores como obstáculos e interferências de outros dispositivos eletrônicos, como roteadores Wi-Fi e eletrodomésticos.

Além disso, buscou-se avaliar a confiabilidade da comunicação entre as antenas e o gateway, bem como a capacidade do sistema de manter o rastreamento contínuo mesmo em situações de desconexão temporária.

A metodologia envolveu a instalação de três antenas posicionadas na sala, quarto principal e cozinha, para cobrir toda a área do apartamento. Cada antena, coleta dados de dispositivos BLE conhecidos, registrando informações como identificador único e intensidade do sinal, que são enviadas ao gateway por meio de uma rede Wi-Fi Mesh. O gateway, sincroniza o horário das antenas com um serviço de tempo online e encaminha os dados a um servidor remoto, onde um sistema de posicionamento calcula as localizações dos objetos com base na força do sinal.

Os testes incluem dois cenários: (1) rastreamento estático, com dispositivos posicionados em pontos como visto na Figura 16; e (2) rastreamento dinâmico, com dispositivos sendo movidos entre cômodos (Figura 17). As posições calculadas serão comparadas com as localizações reais para avaliar a precisão, e a estabilidade da comunicação.

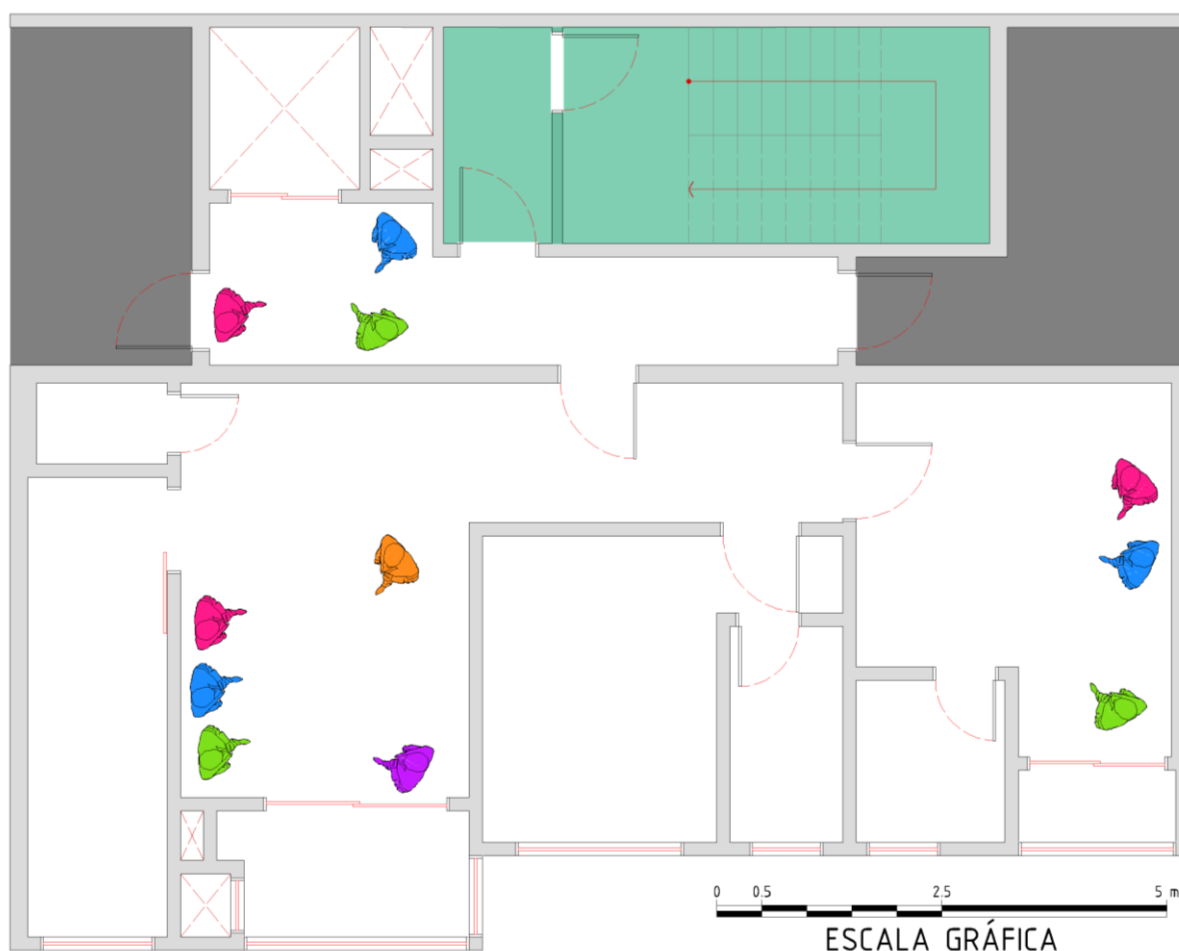


Figura 16 – Cenário Estático

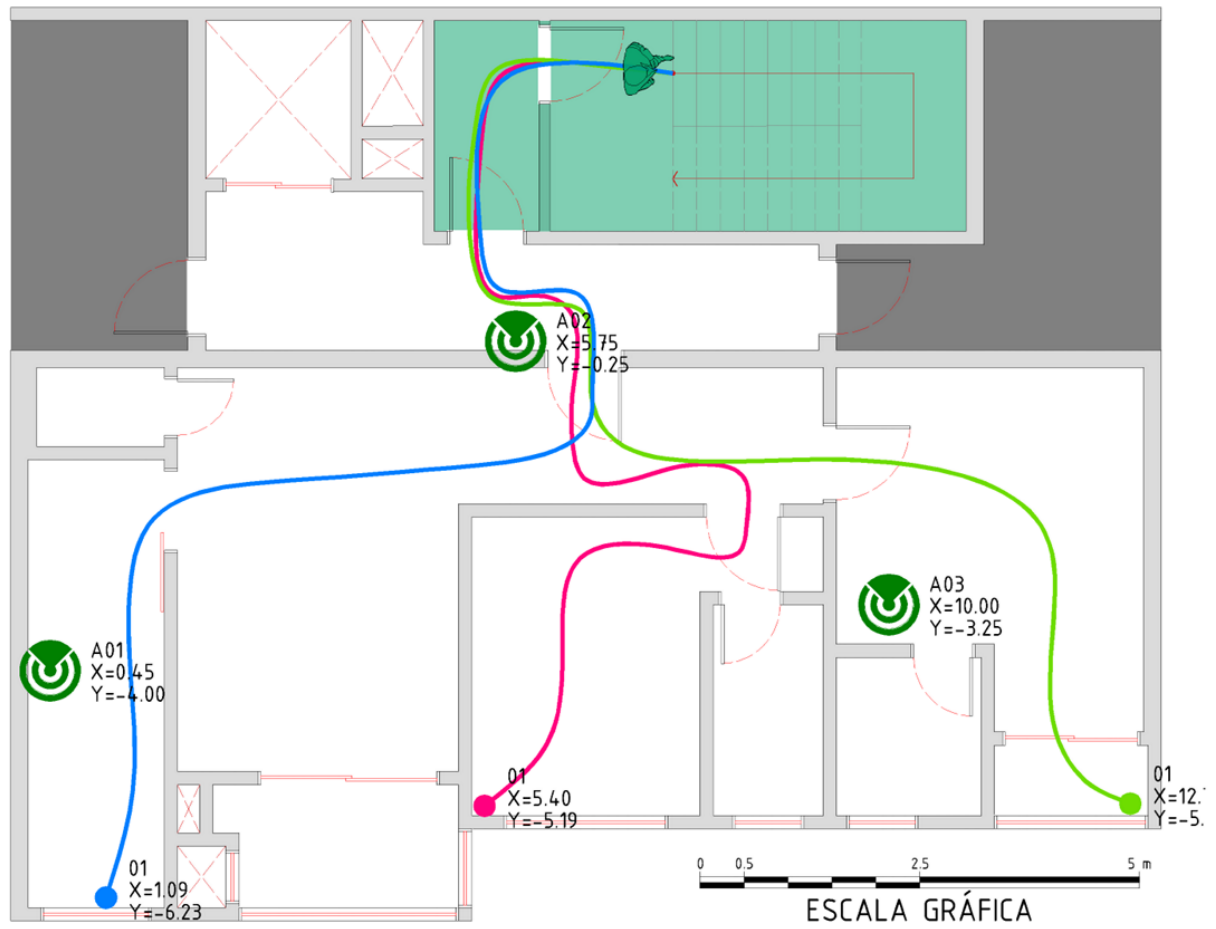


Figura 17 – Cenário Dinâmico

## 5 RESULTADOS

### 5.1 CENÁRIO ESTÁTICO

Nos testes estáticos, múltiplas *tags* BLE foram posicionadas em locais fixos e conhecidos, distribuídos em três ambientes: "sala de estar", "corredor do pavimento" e "quarto principal". O objetivo foi aferir a precisão pontual do sistema.

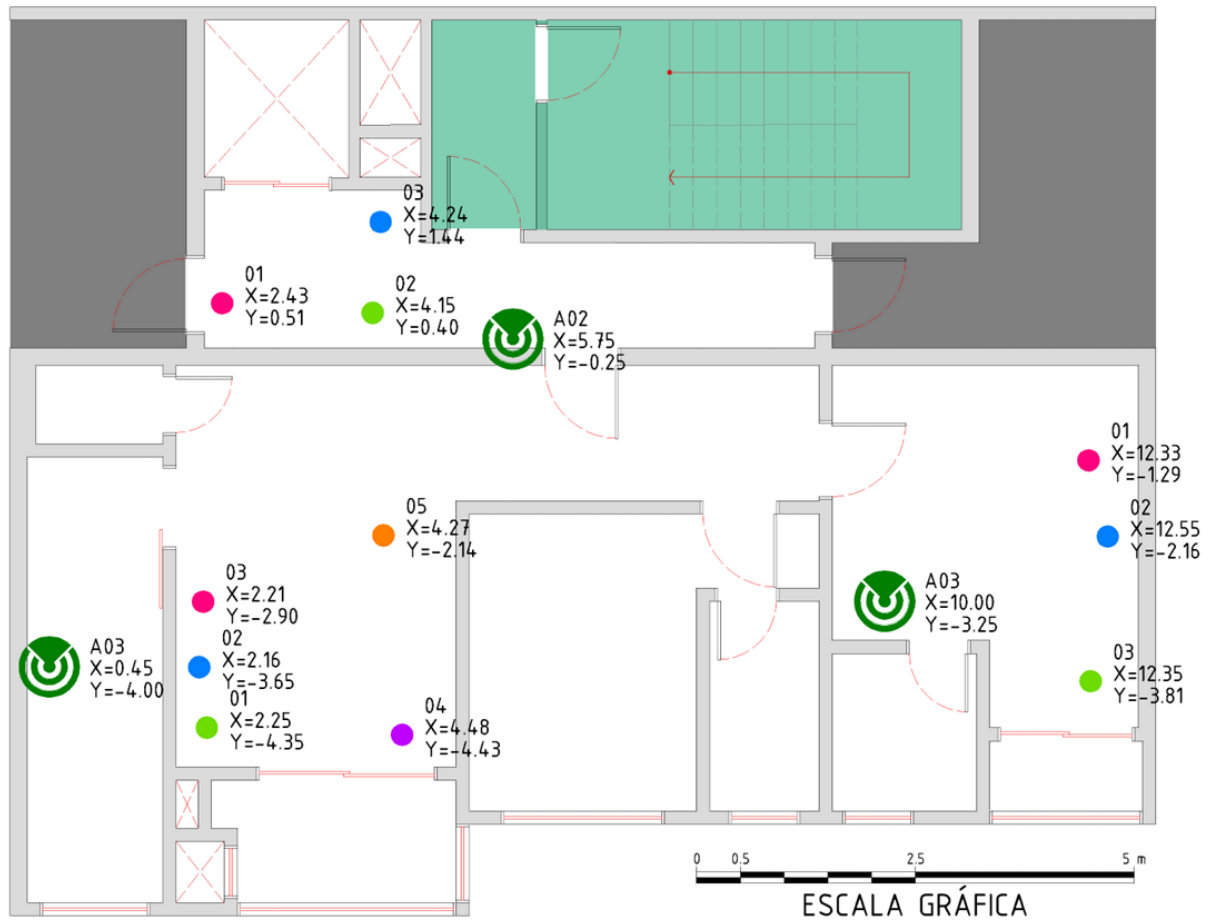


Figura 18 – Posição das antenas e *tags* no cenário estático.

Os dados das posições reais, os valores de intensidade do sinal recebido (RSSI) por antena, as coordenadas estimadas e erro de posição e a Distância Euclidiana (DE), estão consolidados nas Tabelas: Tabela 1,

Tabela 2 e Tabela 3.

Tabela 1 – Tabela com as informações coletadas das *Tags* no ambiente sala de estar.

| TAGs  | MAC ADDRESS       | X (m) | Y (m) | RSSI A1 | RSSI A2 | RSSI A3 | X est | Y est | Ex (%) | Ey (%) | DE (m) |
|-------|-------------------|-------|-------|---------|---------|---------|-------|-------|--------|--------|--------|
| Tag01 | C1:4A:7F:32:B8:91 | 2,25  | 4,35  | -76     | -84     | -88     | 2,13  | 3,57  | 3,57   | 5,54   | 0,79   |
| Tag02 | D3:8C:2E:09:FA:7D | 2,16  | 3,65  | -75     | -83     | -88     | 2,03  | 2,85  | 6,21   | 22,04  | 0,82   |
| Tag03 | A4:9B:01:E2:56:30 | 2,21  | 2,90  | -76     | -83     | -88     | 2,06  | 2,79  | 6,58   | 3,76   | 0,18   |
| Tag04 | B8:EF:AC:10:49:C2 | 4,48  | 4,43  | -82     | -83     | -86     | 3,99  | 3,94  | 10,83  | 11,13  | 0,69   |
| Tag05 | FA:73:DE:67:21:5B | 4,28  | 2,14  | -82     | -78     | -86     | 3,83  | 1,89  | 10,41  | 11,64  | 0,51   |

Tabela 2 – Tabela com as informações coletadas das *Tags* no ambiente circulação.

| TAGs  | MAC ADDRESS       | X (m) | Y (m) | RSSI A1 | RSSI A2 | RSSI A3 | X est | Y est | Ex (%) | Ey (%) | DE (m) |
|-------|-------------------|-------|-------|---------|---------|---------|-------|-------|--------|--------|--------|
| Tag01 | 53:D0:47:1F:BA:92 | 2,43  | -0,51 | -84     | -80     | -88     | 2,94  | -0,11 | 21,12  | 77,94  | 0,65   |
| Tag02 | 64:29:CF:83:14:7A | 4,15  | -0,40 | -85     | -74     | -87     | 3,93  | -0,59 | 5,41   | 47,39  | 0,29   |
| Tag03 | 82:FC:68:99:42:E1 | 4,24  | -1,44 | -86     | -77     | -88     | 3,58  | -1,84 | 15,65  | 27,86  | 0,78   |

Tabela 3 – Tabela com as informações coletadas das *Tags* no ambiente quarto principal

| TAGs  | MAC ADDRESS       | X (m) | Y (m) | RSSI A1 | RSSI A2 | RSSI A3 | X est | Y est | Ex (%) | Ey (%) | DE (m) |
|-------|-------------------|-------|-------|---------|---------|---------|-------|-------|--------|--------|--------|
| Tag01 | 9D:62:84:F3:AE:10 | 12,33 | 1,29  | -92     | -87     | -80     | 12,83 | 1,42  | 4,03   | 10,24  | 0,51   |
| Tag02 | E7:1A:BD:0C:77:8E | 12,55 | 2,16  | -92     | -87     | -78     | 13,04 | 1,73  | 3,93   | 19,94  | 0,66   |
| Tag03 | 7F:35:9C:AE:3D:6B | 12,35 | 3,81  | -92     | -88     | -78     | 13,20 | 3,68  | 6,85   | 3,53   | 0,86   |

A DE indica a menor distância entre o ponto da posição real ao ponto da posição estimada em um plano cartesiano. Este valor variou de um mínimo de 0,18 m (Tag03 na Sala) a um máximo de 0,86 m (Tag03 no Quarto). Esta variação pode ser atribuída a fatores como fontes de ruído, tais como, quadros elétricos, aparelhos eletrônicos, e a diferentes níveis de obstrução de sinal em cada cômodo.

## 5.2 CENÁRIO DINÂMICO

O cenário dinâmico foi projetado para avaliar a capacidade do sistema em rastrear um objeto em movimento. Neste cenário foi simulado a evacuação da residência de três diferentes Casos: Caso 01 (cozinha), Caso 02 (quarto do meio) e Caso 03 (quarto principal) conforme Figura 17.

Foram inseridos no piso da residência marcações do trajeto que a *tag* fez do ponto do ambiente até a área de relativa segurança (caixa da escada demarcada na cor verde). O percurso foi cronometrado de forma que a cada 5 segundos a *tag* fosse lida no ponto real demarcado. Isso se fez necessário para verificar os ciclos de leitura das antenas e o tempo de transmissão para o serviço em nuvem. A Figura 19 apresenta os pontos e percurso do Caso 01, onde a *tag* 01 (*Mac Address*: C1:4A:7F:32:B8:91) deslocou-se da cozinha da residência até área de relativa segurança do pavimento da edificação.

A Tabela 4 apresenta os valores lidos durante o teste.

Tabela 4 – Valores do Caso 01, *tag* 01 (*Mac Address*: C1:4A:7F:32:B8:91)

| <b>TIMESTAMP</b>    | <b>X<br/>(m)</b> | <b>Y<br/>(m)</b> | <b>RSSI<br/>A1</b> | <b>RSSI<br/>A2</b> | <b>RSSI<br/>A3</b> | <b>X<br/>est</b> | <b>Y<br/>est</b> | <b>Ex<br/>(%)</b> | <b>Ey<br/>(%)</b> | <b>DE<br/>(m)</b> |
|---------------------|------------------|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 2025-05-12 14:30:45 | 1,09             | 6,23             | -77                | -87                | -89                | 1,51             | 5,89             | 38,19             | 5,15              | 0,54              |
| 2025-05-13 14:30:50 | 1,40             | 4,88             | -72                | -86                | -89                | 1,22             | 4,57             | 12,62             | 6,39              | 0,36              |
| 2025-05-14 14:30:55 | 1,49             | 2,12             | -76                | -83                | -89                | 1,16             | 2,21             | 21,93             | 4,06              | 0,34              |
| 2025-05-15 14:31:00 | 2,68             | 1,53             | -80                | -81                | -88                | 3,12             | 1,80             | 16,31             | 17,90             | 0,52              |
| 2025-05-16 14:31:05 | 4,06             | 1,42             | -83                | -76                | -85                | 4,48             | 1,95             | 10,41             | 37,27             | 0,68              |
| 2025-05-17 14:31:10 | 5,45             | 1,30             | -86                | -71                | -84                | 5,77             | 0,76             | 5,85              | 41,78             | 0,63              |
| 2025-05-18 14:31:15 | 6,62             | 0,72             | -87                | -70                | -83                | 6,56             | 0,46             | 0,97              | 36,10             | 0,27              |
| 2025-05-19 14:31:20 | 6,48             | -0,63            | -87                | -71                | -85                | 5,87             | -0,47            | 9,39              | 25,01             | 0,63              |
| 2025-05-20 14:31:25 | 5,37             | -1,09            | -87                | -73                | -87                | 4,79             | -1,90            | 10,78             | 74,45             | 1,00              |
| 2025-05-21 14:31:30 | 5,33             | -2,48            | -88                | -79                | -87                | 5,47             | -1,88            | 2,67              | 24,37             | 0,62              |
| 2025-05-22 14:31:35 | 6,28             | -3,27            | -89                | -81                | -88                | 5,53             | -3,35            | 11,90             | 2,43              | 0,75              |
| 2025-05-23 14:31:40 | 7,54             | -3,15            | -90                | -81                | -87                | 7,27             | -3,64            | 3,64              | 15,62             | 0,56              |

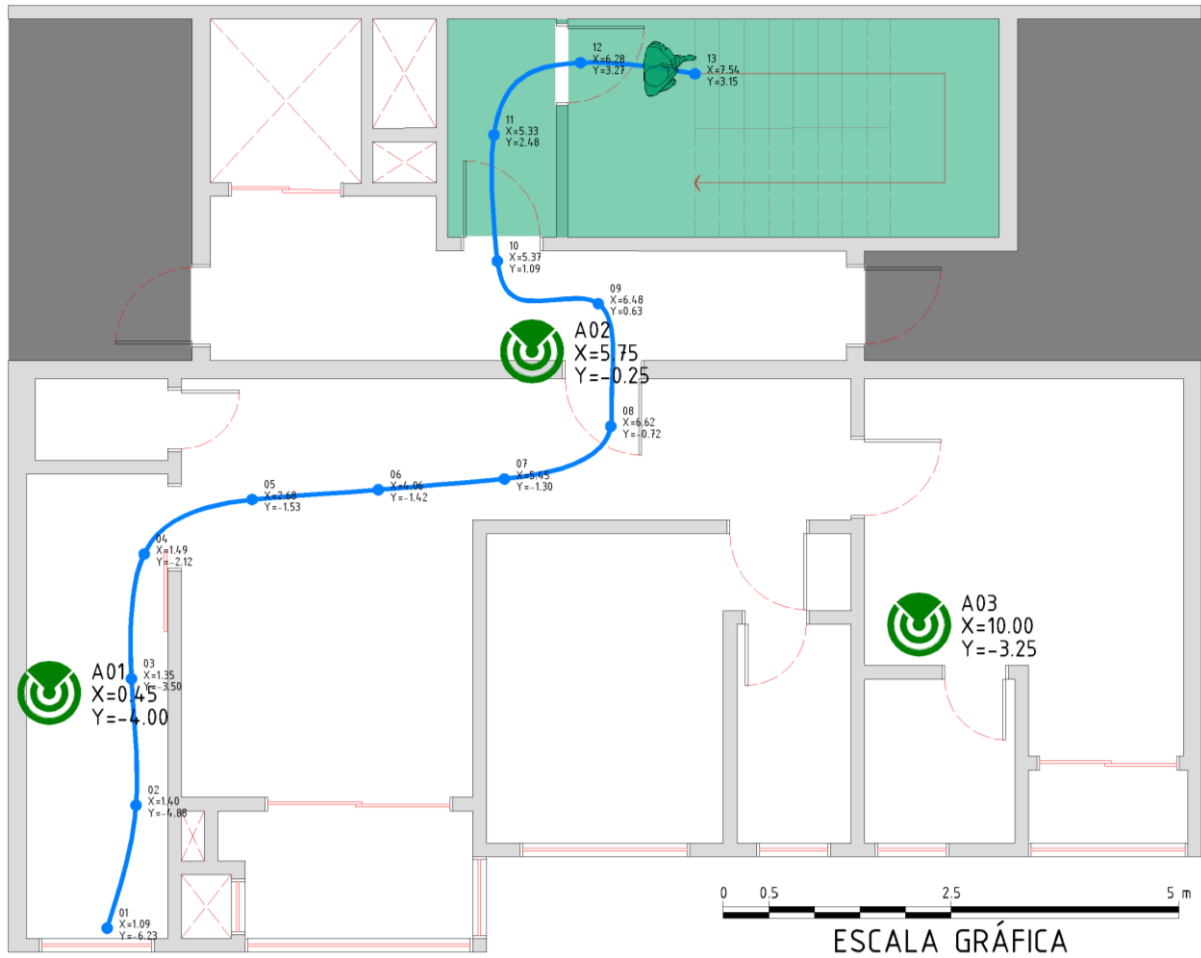


Figura 19 – trajeto da Tag 01 da cozinha até a área de relativa segurança.

A análise demonstra a capacidade do sistema de rastreamento em tempo real. O erro de localização (DE) durante o percurso variou de 0,27 m a um máximo de 1,00 m. Nota-se que, mesmo com a complexidade inerente ao rastreamento de um alvo móvel (que introduz variações rápidas de RSSI), o sistema manteve a precisão da localização próxima ou igual a um metro. A flutuação no erro (ex. o pico de 1,00 m às 14:31:25) sugere pontos de interferência do sinal na trajetória, o que é consistente com os desafios de ambientes internos.

## 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

### 6.1 CONCLUSÕES

A pesquisa partiu do problema de que os planos de evacuação tradicionais, sendo estáticos, são insuficientes em cenários de emergência dinâmicos, podendo direcionar ocupantes para rotas inseguras.

A pergunta de pesquisa que norteou este estudo foi: “Como um método de gestão de evacuação de emergência, baseado em IoT, pode auxiliar nas evacuações em edifícios?”. Para responder a esta questão, o objetivo geral foi desenvolver e demonstrar a viabilidade técnica de um modelo baseado em tecnologia de comunicação sem fio para localizar e monitorar indivíduos em tempo real durante emergências.

Foi projetado, montado e validado um sistema de hardware completo, composto por Antenas e um Gateway, baseados no microcontrolador ESP32. Este hardware demonstrou ser robusto e de baixo custo, utilizando comunicação em rede *Mesh* para resiliência e Wi-Fi para conectividade com a nuvem.

Foi desenvolvida uma arquitetura de aplicação. Isso incluiu o software embarcado em C++ para os dispositivos físicos e uma camada completa de processamento e aplicação em nuvem usando *TypeScript*. Esta camada de aplicação implementa algoritmos, como o Filtro de Kalman para suavização de ruído RSSI e a Trilateração para o cálculo de posição.

Os resultados empíricos desta pesquisa, tanto em um cenário estático quanto dinâmicos em um cenário dinâmico, fornecem uma validação preliminar da arquitetura de sistema proposto. Foi demonstrada a capacidade de localizar alvos fixos com precisão de 0,18 m a 0,86 m e de rastrear alvos móveis com uma precisão majoritariamente contida em um metro, entre 0,27 m e 1,00 m.

Esses resultados comprovam a viabilidade técnica e operacional da arquitetura proposta, confirmando que um sistema de localização baseado em BLE pode fornecer dados de posicionamento em tempo real com precisão suficiente para apoiar a gestão de crises em edificações.

O sistema proposto, baseado em IoT, pode auxiliar diretamente as equipes de resgate ao fornecer consciência situacional, permitindo que os gestores de emergência visualizem a localização de ocupantes e socorristas e possam tomar as melhores decisões com o apoio desse tipo de tecnologia.

## 6.2 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Esta pesquisa esteve focada na comprovação do problema de pesquisa. Questões como segurança e privacidade dos dados coletados, redundâncias em sistema de comunicação, tempo de funcionamento, perda de sinal e capacidades de conexões simultâneas dos equipamentos construídos, não fazem parte do escopo deste trabalho. Também não foi apresentado a socorristas a interface do sistema.

Essas limitações são reconhecidas como importantes e devem ser investigadas em trabalhos subsequentes.

## 6.3 TRABALHOS FUTUROS

O estudo apresentado neste trabalho, utilizou um número limitado de antenas e *tags*. Pesquisas futuras devem avaliar o desempenho do sistema sob estresse, aumentando o número de antenas na rede *mesh* e o número de *tags* (usuários) sendo rastreadas simultaneamente em múltiplos andares.

Aplicar o sistema em um treinamento simulado, coletando informações de feedback dos socorristas, avaliando questões de usabilidade da interface e seu uso no gerenciamento do resgate, é uma excelente continuação do trabalho, demonstrando as vantagens do sistema em uma situação real e os desafios que os usuários enfrentariam ao utilizar uma nova ferramenta em situação de estresse.

Sugere-se, um trabalho com enfoque na integração do sistema evacuação com Gêmeos Digitais em BIM. A junção de informações de sensoriamento do sistema de gestão de evacuação com as informações do modelo BIM, auxiliará na avaliação dinâmica e possíveis simulação de cenários de emergência, semelhante ao proposto por Lin et al. (2025b).

Outros trabalhos podem focar em elevar a precisão da localização e mitigar erros em ambientes desafiadores. É necessário refinar a localização através da fusão de dados coletados e da aplicação de algoritmos de Aprendizado de Máquina, como apresentados no trabalho de Tatsch, (2018).

Avaliar a resiliência da infraestrutura de comunicação, realizando ensaios de resistência a chamadas ou simulação de desconexões de nós da rede para ver a integridade da coleta e envio dos dados, será importante para garantir o funcionamento do sistema de gestão de evacuação em situação real. O uso de tecnologias como LoRa ou Zigbee, deve ser explorado por seu maior

alcance e capacidade de penetração de obstáculos, aumentando a resiliência em cenários de desastre (Manuel; Faied; Krishnan, 2022).

Questões sobre segurança e privacidade dos dados coletados, devem ser estudadas, devido à natureza sensível do uso da ferramenta para monitoramento de indivíduos fora do escopo de resgate.

Por fim, a investigação sobre o comportamento humano em emergências deve ser aprofundada, visando mitigar a imprevisibilidade observada em desastres. O uso de ambientes de Realidade Virtual, combinado com o *Biofeedback*, apresentado no trabalho de Brombilla (2023), acarretam em ferramentas importantes para avaliação das reações psicofisiológicas em ambientes controlados.

## 7 BIBLIOGRAFIA

ALMATARED, Manea *et al.* Digital-Twin-Based Fire Safety Management Framework for Smart Buildings. **Buildings**, v. 14, n. 1, p. 4, jan. 2024.

AL-NABHAN, Najla; AL-ABOODY, Nadia; ALIM AL ISLAM, A. B. M. A hybrid IoT-based approach for emergency evacuation. **Computer Networks**, v. 155, p. 87–97, 22 maio 2019.

ÁLVARO, Marcos Delgado *et al.* GUIDE2FR: A smart monitoring platform with a digital twin of a firefighter training tower for emergency scenarios. **Internet of Things**, v. 34, p. 101768, 1 nov. 2025.

ATENCIO, Joshua R.; SIRAJ, Md Sadman; TSIROPOULOU, Eirini Eleni. EVACUSCAPE: Internet of Things-enabled emergency evacuation based on matching theory. **Internet of Things**, v. 31, p. 101581, 1 maio 2025.

BASTOS, Arivan S.; VIEIRA, Vaninha; APOLINÁRIO, Antonio L. Indoor location systems in emergency scenarios - A Survey. *In: SBSI 2015 - PROCEEDINGS OF THE ANNUAL CONFERENCE ON BRAZILIAN SYMPOSIUM ON INFORMATION SYSTEMS, INFORMATION SYSTEMS: A COMPUTER SOCIO-TECHNICAL PERSPECTIVE. SBSI - Proc. Annu. Conf. Braz. Symp. Inf. Syst., Inf. Syst.: Comput. Soc.-Tech. Perspect.* Association for Computing Machinery, Inc, 2015.

BI, Huibo; GELENBE, Erol. A Survey of Algorithms and Systems for Evacuating People in Confined Spaces. **Electronics**, v. 8, n. 6, p. 711, jun. 2019.

BIANCHI, Valentina; CIAMPOLINI, Paolo; DE MUNARI, Ilaria. RSSI-Based Indoor Localization and Identification for ZigBee Wireless Sensor Networks in Smart Homes. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 68, n. 2, p. 566–575, fev. 2019.

BLUMENTHAL, Jan *et al.* Weighted Centroid Localization in Zigbee-based Sensor Networks. *In: 2007 IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INTELLIGENT SIGNAL PROCESSING. 2007 IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing.* out. 2007. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/4447528>>. Acesso em: 13 out. 2025

BROMBILLA, Douglas de Castro. **A Influência Dos Atributos Arquitetônicos Na Tomada De Decisão Em Situação De Emergência: Avaliação Sob O Ponto De Vista Do Indivíduo.** Tese de Doutorado Pós-Arq—Florianópolis SC: Universidade Federal de Santa Catarina, 2023.

CALLISTO DE DONATO, Massimo *et al.* SAFE: An ICT platform for supporting monitoring, localization and rescue operations in case of earthquake. **Internet of Things**, v. 27, p. 101273, 1 out. 2024.

CHEEMA, Zain. **Accurate Indoor Localization Using Mobile Devices and Bluetooth Low Energy.** London: University of Hull, 2020.

CHEN, Xiu-Shan; LIU, Chi-Chang; WU, I.-Chen. A BIM-based visualization and warning system for fire rescue. **Advanced Engineering Informatics**, v. 37, p. 42–53, 1 ago. 2018.

CHEN, Yi-Jao; LAI, Yong-Shan; LIN, Yen-Han. BIM-based augmented reality inspection and maintenance of fire safety equipment. **Automation in Construction**, v. 110, p. 103041, 1 fev. 2020.

CHEN, Ying-Yueh *et al.* The adoption of fire safety management for upgrading the fire safety level of existing hotel buildings. **Building and Environment**, v. 51, p. 311–319, 1 maio 2012.

CHENG, Min-Yuan *et al.* BIM integrated smart monitoring technique for building fire prevention and disaster relief. **Automation in Construction**, v. 84, p. 14–30, 1 dez. 2017.

COSTIN, Aaron M.; TEIZER, Jochen. Fusing passive RFID and BIM for increased accuracy in indoor localization. **Visualization in Engineering**, v. 3, n. 1, p. 17, 22 dez. 2015.

CREA/RS. **Análise do Sinistro na Boate Kiss, em Santa Maria, RS**. Porto Alegre, RS: Conselho Regional de Engenharia e Agronomia do Rio Grande do Sul, 2013.

DAMAŠEVIČIUS, Robertas; BACANIN, Nebojsa; MISRA, Sanjay. From Sensors to Safety: Internet of Emergency Services (IoES) for Emergency Response and Disaster Management. **Journal of Sensor and Actuator Networks**, v. 12, n. 3, p. 41, jun. 2023.

DENG, Hui *et al.* An ontology-based approach to dynamic indoor fire emergency evacuation path planning with BIM integration. **Journal of Building Engineering**, v. 106, p. 112562, 15 jul. 2025.

DING, Yifei; ZHANG, Yuxin; HUANG, Xinyan. Intelligent emergency digital twin system for monitoring building fire evacuation. **Journal of Building Engineering**, v. 77, p. 107416, 15 out. 2023.

DUGDALE, Julie; MOGHADDAM, Mahyar T.; MUCCINI, Henry. Agent-based Simulation for IoT Facilitated Building Evacuation. *In*: 2019 INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES FOR DISASTER MANAGEMENT (ICT-DM). **2019 International Conference on Information and Communication Technologies for Disaster Management (ICT-DM)**. dez. 2019. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9032909/>>. Acesso em: 30 set. 2025

ELSAYED, Pakinam; MOSTAFA, Hassan; MARZOUK, Mohamed. BIM based framework for building evacuation using Bluetooth Low Energy and crowd simulation. **Journal of Building Engineering**, v. 70, p. 106409, 1 jul. 2023.

FARAGHER, Ramsey; HARLE, Robert. Location Fingerprinting With Bluetooth Low Energy Beacons. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 33, n. 11, p. 2418–2428, nov. 2015.

FARID, Zahid; NORDIN, Rosdiadee; ISMAIL, Mahamod. Recent Advances in Wireless Indoor Localization Techniques and System. **Journal of Computer Networks and Communications**, v. 2013, n. 1, p. 185138, 2013.

HAN, Litao *et al.* A real-time intelligent monitoring method for indoor evacuee distribution based on deep learning and spatial division. **Journal of Building Engineering**, v. 92, p. 109764, 1 set. 2024.

HITIMANA, Eric *et al.* Implementation of IoT Framework with Data Analysis Using Deep Learning Methods for Occupancy Prediction in a Building. **Future Internet**, v. 13, n. 3, p. 67, mar. 2021.

HU, Jinxing *et al.* Intelligent fire information system based on 3D GIS. **Virtual Reality & Intelligent Hardware**, v. 5, n. 2, p. 93–109, 1 abr. 2023.

- KALMAN, R. E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. **Journal of Basic Engineering**, v. 82, n. 1, p. 35–45, 1 mar. 1960.
- KIM, Kyungki *et al.* Feasibility of LoRa for Smart Home Indoor Localization. **Applied Sciences**, v. 11, n. 1, p. 415, jan. 2021.
- KOBES, Margrethe *et al.* Building safety and human behaviour in fire: A literature review. **Fire Safety Journal**, v. 45, n. 1, p. 1–11, 1 jan. 2010.
- LI, Nan *et al.* A BIM centered indoor localization algorithm to support building fire emergency response operations. **Automation in Construction**, v. 42, p. 78–89, 1 jun. 2014.
- LIN, Chun-Yen *et al.* Active Disaster Response System for a Smart Building. **Sensors**, v. 14, n. 9, p. 17451–17470, set. 2014.
- LIN, Fangzhou *et al.* Efficient visual inspection of fire safety equipment in buildings. **Automation in Construction**, v. 171, p. 105970, 1 mar. 2025a.
- LIN, Jia-Rui *et al.* Digital twin of buildings and occupants for emergency evacuation: Framework, technologies, applications and trends. **Advanced Engineering Informatics**, v. 66, p. 103419, 1 jul. 2025b.
- MANUEL, Melvin P.; FAIED, Mariam; KRISHNAN, Mohan. A Novel LoRa LPWAN-Based Communication Architecture for Search & Rescue Missions. **IEEE Access**, v. 10, p. 57596–57607, 2022.
- NASER, M. Z.; KODUR, V. K. R. Cognitive infrastructure - a modern concept for resilient performance under extreme events. **Automation in Construction**, v. 90, p. 253–264, 1 jun. 2018.
- NFPA. **The NFPA Standard on Evacuation, Sheltering, and Re-entry**. Disponível em: <<https://www.nfpa.org/product/nfpa-1616-standard/p1616code>>. Acesso em: 10 out. 2025.
- NILSSON, Daniel; JOHANSSON, Anders. Social influence during the initial phase of a fire evacuation—Analysis of evacuation experiments in a cinema theatre. **Fire Safety Journal**, v. 44, n. 1, p. 71–79, 1 jan. 2009.
- PARK, Sangmin *et al.* Design and Implementation of a Smart IoT Based Building and Town Disaster Management System in Smart City Infrastructure. **Applied Sciences**, v. 8, n. 11, p. 2239, nov. 2018.
- PATTNAIK, Sushant Kumar *et al.* Future Wireless Communication Technology towards 6G IoT: An Application-Based Analysis of IoT in Real-Time Location Monitoring of Employees Inside Underground Mines by Using BLE. **Sensors**, v. 22, n. 9, p. 3438, jan. 2022.
- RENZLER, Tobias *et al.* Improving the efficiency and responsiveness of smart objects using adaptive BLE device discovery. In: : SMARTOBJECTS '18. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 25 jun. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1145/3213299.3213306>>. Acesso em: 10 out. 2025
- SAINI, Kanika; KALRA, Sheetal; SOOD, Sandeep K. Disaster emergency response framework for smart buildings. **Future Generation Computer Systems**, v. 131, p. 106–120, 1 jun. 2022.

SAINI, Munish; SENGUPTA, Eshan; THAKUR, Suraj. Artificial intelligence assisted IoT-fog based framework for emergency fire response in smart buildings. **Cluster Computing**, v. 27, n. 6, p. 7915–7938, 2024.

SANJAY, K.; LIBINA, M. Clogging-Free and Shortest-Safe Path Evacuation System Using IoT Devices. *In*: 2023 EIGHTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SCIENCE TECHNOLOGY ENGINEERING AND MATHEMATICS (ICONSTEM). **2023 Eighth International Conference on Science Technology Engineering and Mathematics (ICONSTEM)**. abr. 2023. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/10142774/>>. Acesso em: 30 set. 2025

SIMÕES, José Miguel Ferreira. **Building Evacuation System**. Mestrado em Engenharia de Redes e Sistemas Informáticos—Porto, Portugal: Universidade do Porto, 2023.

TATSCH, Daniel Trevisan. **Localização indoor utilizando Bluetooth Low Energy e aprendizado de máquina**. São José - SC: INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA, 2018.

WANG, Chun *et al.* A Dynamic Escape Route Planning Method for Indoor Multi-floor Buildings Based on Real-time Fire Situation Awareness. *In*: 2020 IEEE 26TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON PARALLEL AND DISTRIBUTED SYSTEMS (ICPADS). **2020 IEEE 26th International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS)**. dez. 2020. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9359163/>>. Acesso em: 30 set. 2025

WEHBE, Rania; SHAHROUR, Isam. A BIM-Based Smart System for Fire Evacuation. **Future Internet**, v. 13, n. 9, p. 221, set. 2021.

WU, Hao; WU, Xiaojian; TIAN, Guohui. Indoor robot localization based on single RFID tag. **Artificial Life and Robotics**, v. 23, n. 3, p. 373–379, 1 set. 2018.

XIE, Weikang *et al.* AIoT-powered building digital twin for smart firefighting and super real-time fire forecast. **Advanced Engineering Informatics**, v. 65, p. 103117, 1 maio 2025.

ZHANG, Jinyue *et al.* A Framework for an Intelligent and Personalized Fire Evacuation Management System. **Sensors**, v. 19, n. 14, p. 3128, jan. 2019.

ZHANG, Tianhang *et al.* Building Artificial-Intelligence Digital Fire (AID-Fire) system: A real-scale demonstration. **Journal of Building Engineering**, v. 62, p. 105363, 15 dez. 2022.

ZOU, Han *et al.* Device-free occupancy detection and crowd counting in smart buildings with WiFi-enabled IoT. **Energy and Buildings**, v. 174, p. 309–322, 1 set. 2018.

## APÊNDICE A REVISÃO DE ESCOPO DA LITERATURA

Com intuito de gerar uma memória dos passos realizados durante a revisão da literatura, optou-se realizar a pesquisa através de uma revisão de escopo, por se tratar de uma pesquisa que visa identificar e mapear sistematicamente a amplitude de evidências disponíveis em um determinado tópico, campo, conceito ou problema, dentro ou em contextos específicos, independentemente da fonte.

Utilizando a pergunta de pesquisa é possível criar uma estratégia de busca por palavras chaves, após identificar a População, Conceito e Contexto da pesquisa (uso de acrônimo P. C. C.).

A pergunta de pesquisa é:

*“Como um método de gestão de evacuação de emergência, baseado em IoT, pode auxiliar nas evacuações em edifícios?”*

Deste modo, a possível resposta para os acrônimos será:

**População:** Ocupantes, vítimas e socorristas;

**Conceito:** Gestão de evacuação de emergência baseado em IoT;

**Contexto:** Evacuação de edifícios.

Agora com a resposta do anagrama podemos escolher os termos que mais se adequa a nossa pesquisa. Assim, os termos escolhidos para estratégia de busca para a População são:

- “ocupantes de edifícios” ou “residentes” ou “vítimas” ou “bombeiros” ou “equipe de resgate”;

Para o Conceito, os termos para estratégia de busca são:

- “Internet das Coisas” ou “posicionamento interno” ou “rastreamento em tempo real” ou “gestão de emergência” ou “gestão de desastres” ou suporte aos bombeiros” ou “suporte ao resgate”;

Já para o Contexto, os termos para pesquisa foram:

- “Evacuação” ou “Evacuação de edificações” ou Evacuação Interna” ou “Evacuação de Emergência”.

Com os termos definidos, foi realizada a pesquisa avançada do *IEEE Xplore* utilizando a seguinte sequência de consulta:

((“Building occupants” OR “residents” OR “victims” OR “firefighters” OR “rescue teams”) AND ("Internet of Things" OR "real-time tracking" OR "indoor positioning") AND ("emergency management" OR "disaster management" OR "firefighter support" OR "rescue support" OR "smart Building") AND (evacuat\* OR "building evacuation" OR "indoor evacuation" OR "emergency evacuation"))).

Ao realizar a pesquisa, obteve-se 16 artigos.

No repositório MDPI, não é possível realizar a pesquisa da mesma forma que no IEEE Xplore. Então, foi criado algumas consultas dos termos para expandir a pesquisa. A tabela XXXX exemplifica estas consultas.

| consultas                                                                                 | Número de artigos encontrados: |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| "Internet of Things" AND "emergency management" AND "Building evacuation" AND "Occupants" | 12                             |
| "Internet of Things" AND "Building evacuation" AND "emergency management"                 | 22                             |
| "real-time tracking" AND "indoor evacuation" AND "disaster management"                    | 2                              |
| "indoor positioning" AND "firefighter support" AND "emergency evacuation"                 | 2                              |
| " Internet of Things " AND "rescue teams" AND "emergency evacuation"                      | 15                             |
| "disaster management" AND "Internet of Things" AND "building evacuation"                  | 18                             |

Após verificar as duplicatas na pesquisa, restou 42 artigos.

A estratégia de consulta na base de repositório Scopus, utilizou a seguinte string:

TITLE-ABS-KEY(  
 ("Building occupants" OR residents OR victims OR firefighters OR "rescue teams")  
 AND  
 ("Internet of Things" OR "real-time tracking" OR "indoor positioning")  
 AND  
 ("emergency management" OR "disaster management" OR "firefighter support" OR "rescue support" OR "smart building")

AND  
 (evacuat\* OR "building evacuation" OR "indoor evacuation" OR "emergency evacuation")  
 )

Foram encontrados 7 documentos com esta consulta.

Por fim, usando Science Direct, foram realizadas as seguintes consultas na base:

| consultas                                                                                                                                                                                   | Número de artigos encontrados: |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| ("Internet of Things" OR "IoT") AND<br>("evacuation" OR "building evacuation")<br>AND ("emergency management" OR<br>"disaster management") AND ("occupants"<br>OR firefighters)             | 164                            |
| ("real-time tracking" OR "indoor<br>positioning") AND<br>("evacuation" OR "indoor evacuation")<br>AND<br>("rescue support" OR "firefighter support")<br>AND ("residents" OR "rescue teams") | 39                             |
| ("smart building" OR "building evacuation")<br>AND ("Internet of Things" OR IoT) AND<br>("emergency evacuation" OR evacuation)<br>AND ("victims" OR occupants)                              | 152                            |
| ("evacuation" OR "emergency evacuation")<br>AND ("IoT" OR "indoor positioning")<br>AND ("rescue teams" OR firefighters)<br>AND ("disaster management" OR<br>"emergency management")         | 158                            |

Realizando a verificação de duplicatas, ficaram 282 ao todo artigos.

Foram obtidos no total nessa etapa de pesquisa 347 artigos. A partir da leitura dos resumos e verificação de palavras chaves, foram selecionados 81 artigos. para uma leitura aprofundada. Em conjunto com a literatura obtida em pesquisas na internet ou outros periódicos (literatura cinzenta) foram utilizados 49 artigos ao todo no trabalho.

## APÊNDICE B MONTAGEM DO HARDWARE

Com o diagrama em blocos definido, o esquema elétrico (Figura 20) foi desenvolvido para detalhar as conexões elétricas entre os componentes, funcionando como um roteiro para a construção do protótipo. Esse documento especificou os pinos do ESP32 conectados ao LED, ao *buzzer*, ao botão e ao divisor de tensão, além das conexões com a bateria e o conversor AC/DC.

O esquema foi projetado para garantir compatibilidade elétrica e minimizar interferências, especialmente importantes para a comunicação BLE, que opera em radiofrequência. Essa etapa assegurou que o circuito pudesse ser replicado com precisão na montagem em protoboard.

A montagem em protoboard (Figura 21) marcou a transição para a construção física do hardware, permitindo a implementação do circuito de forma flexível para testes iniciais. Componentes PTH (pinos passantes) foram utilizados para facilitar ajustes, conectando o ESP32, o LED, o *buzzer*, o botão, o regulador de tensão e os elementos de alimentação. Essa etapa foi crucial para verificar a viabilidade do projeto, permitindo modificações rápidas antes da consolidação em uma placa de prototipagem. A protoboard proporcionou um ambiente prático para testar a detecção de sinais BLE e a interação com os periféricos.

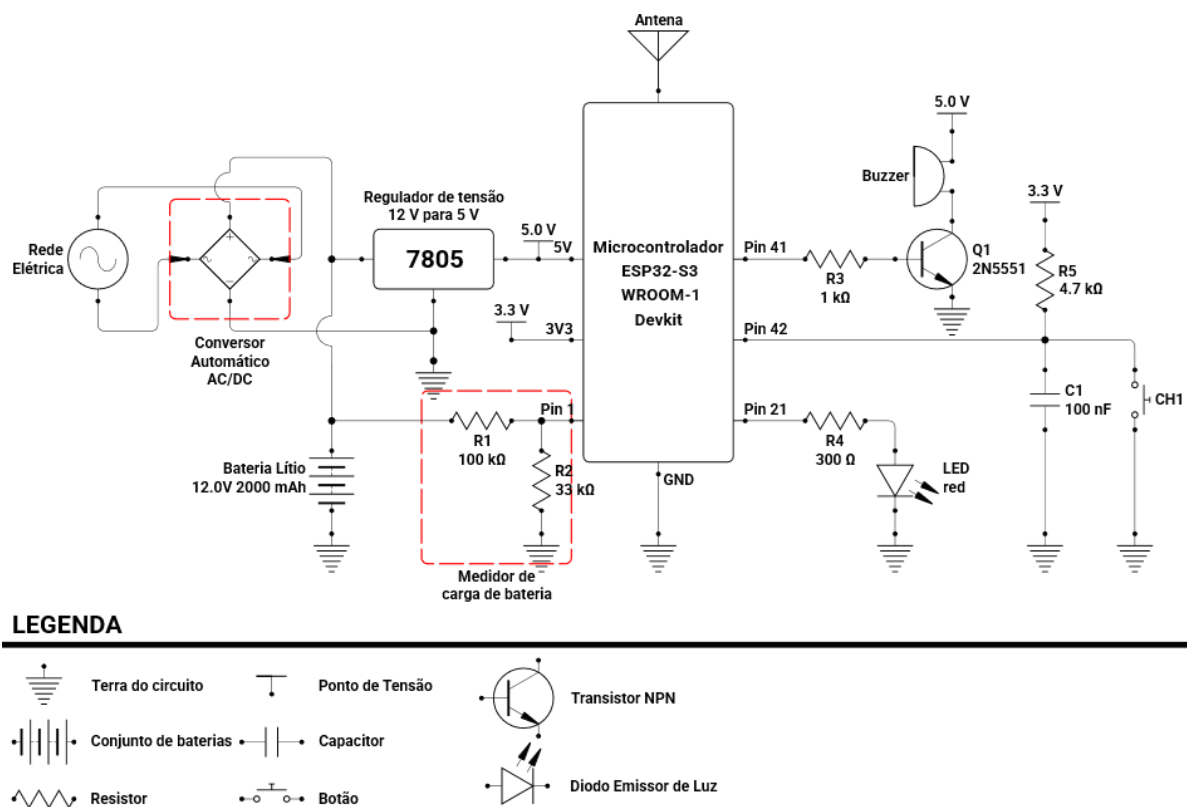


Figura 20 – Esquema elétrico do circuito.

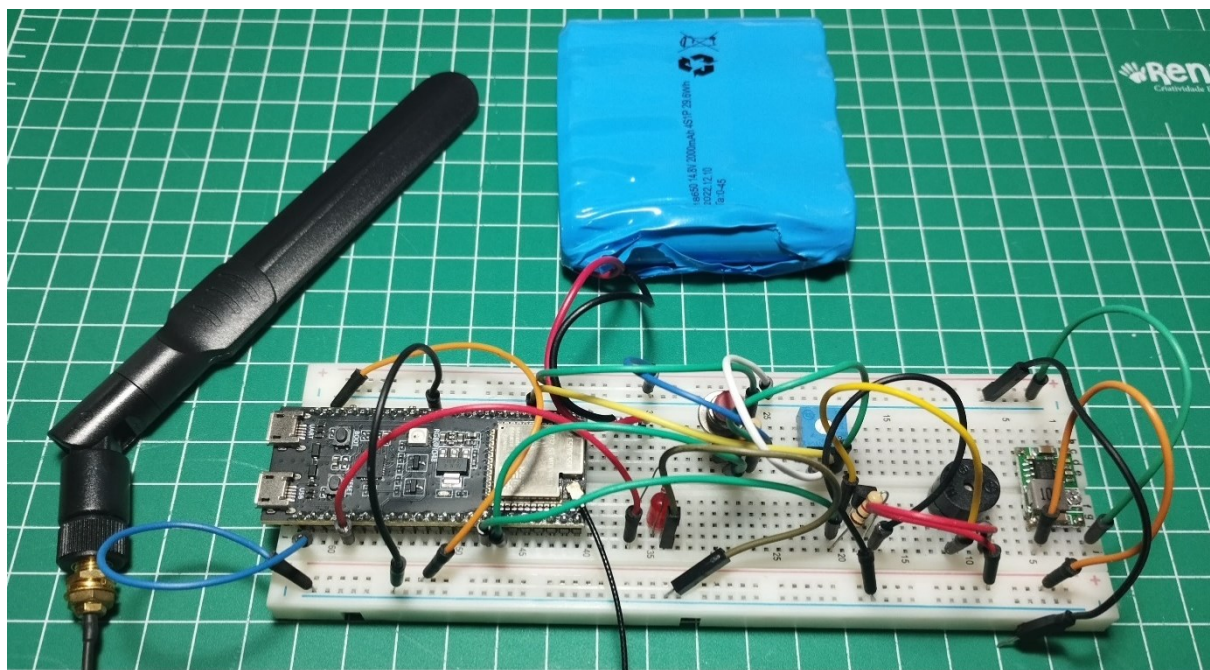


Figura 21 – Montagem dos componentes no protoboard.

A validação do circuito foi realizada para confirmar o funcionamento correto do circuito. Utilizando a IDE Arduino para programar o firmware, um teste inicial verificou a funcionalidade do botão, que, ao pressionado, acionava o LED e o *buzzer*, simulando a indicação de um dispositivo BLE detectado. Para o circuito de medição de tensão, foi utilizado uma resistência variável, do tipo *trimpot*. O *trimpot* foi alimentado pela mesma tensão de alimentação do ESP32, de 3,3Volts, e o terminal central amostra a saída de tensão da divisão resistiva, variando a tensão de 0 a 3,3volts. Essa tensão variável é medida pelo ESP32 e convertida pelo bloco ADC (*Analog to Digital Converter*), em uma escala numérica de 0 a 4095. Esse processo assegurou que o circuito estava pronto para testes mais complexos.

Após a validação, os componentes foram transferidos da protoboard para placas de prototipagem (Figura 22), consolidando o circuito em uma estrutura adequada para testes prolongados. Essa etapa envolveu a soldagem componentes.

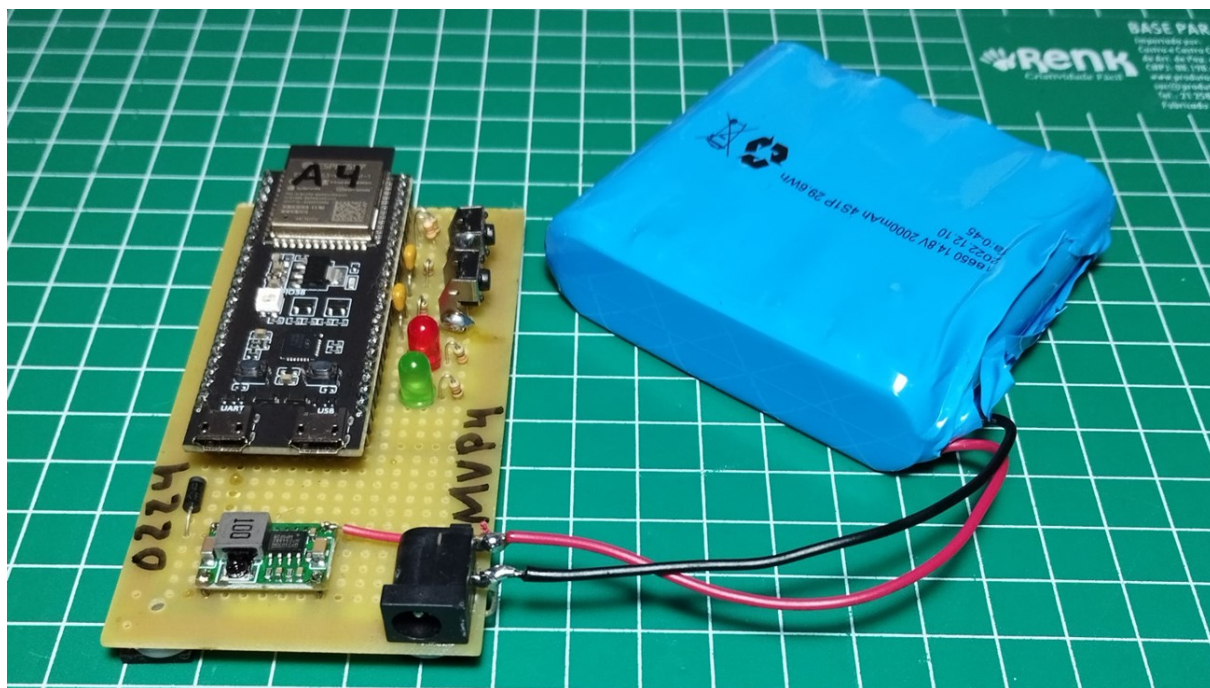


Figura 22 – Montagem do circuito na placa de prototipagem

A montagem em placas de prototipagem preparou o equipamento para operar em cenários reais de monitoramento, mantendo a funcionalidade do escaneamento BLE e da transmissão de dados.

Por fim, foi inserido num gabinete de plástico ABS, os componentes da placa de prototipagem, bateria e fonte de alimentação.



Figura 23 – Componentes instalados no gabinete de ABS.

## APÊNDICE C      DETALHES DO SOFTWARE DA ANTENA

O ponto de partida para elaborar o código foi compreender quais as funcionalidades que o sistema necessita para realizar sua demanda. Apresenta-se quais as principais funções do código:

- Comunicação entre dispositivos via rede Wi-Fi *Mesh*;
- Detecção de dispositivos BLE;
- Sincronização com os equipamentos na rede;
- Configuração dinâmica da antena através do Gateway;
- Gerenciamento de recursos;
- Resiliência de conexão.

O microcontrolador ESP32-S3 possui a capacidade de suportar Wi-Fi e BLE simultaneamente, então a biblioteca *<sup>1</sup>painlessMesh* foi selecionada para simplificar a construção do código de uma rede Wi-Fi *mesh* e ainda dar suporte a rede Wi-Fi local. As bibliotecas BLE utilizadas oferecem os recursos necessários para detectar dispositivos próximos.

Uma rede *mesh* é um tipo de rede de comunicação em que vários dispositivos, chamados de nós, se conectam entre si de forma distribuída, formando uma malha. Cada nó pode enviar e receber dados, além de repassar informações para outros nós, criando múltiplos caminhos para o tráfego de dados e aumentando a robustez e a cobertura da rede.

Isso permite que os nós se conectem automaticamente e rerroteiem mensagens em caso de falhas.

A biblioteca *Preferences* foi incorporada para armazenar configurações em memória não volátil, garantindo que parâmetros como nome e senha da rede *mesh* e o tempo de escaneamento fossem mantidos mesmo após reinicializações. O sistema também precisa sincronizar seu relógio interno com o gateway para garantir que o registro do momento da leitura, ou *timestamp*, seja o tempo real. Ainda um mecanismo de autenticação básico foi desenvolvido, utilizando uma chave estática, para proteger o acesso aos dados e configurações do sistema por terceiros.

---

<sup>1</sup> Biblioteca em linguagem de programação é um conjunto de códigos prontos, geralmente funções, rotinas ou classes, que podem ser reutilizados em diferentes programas. O principal objetivo de uma biblioteca é evitar que programadores precisem “reinventar a roda”, facilitando o desenvolvimento, a padronização e a manutenção de softwares.

Logo na inicialização, o código carrega as configurações salvas, configura o nome da antena, inicializa os componentes BLE e *mesh*, e envia uma mensagem de *handshake* ao gateway. Em seguida, aguarda a sincronização do tempo via mensagem TIME. Esse processo garante que os dados escaneados sejam registrados com marcações temporais precisas. Após essa sincronização, o sistema começa a escanear dispositivos BLE próximos, extraindo seu nome, endereço MAC e o indicador de intensidade do sinal recebido ou RSSI, (ver exemplo na figura Figura 24) que são formados e armazenados em um buffer circular. O uso de um buffer em forma de fila limita o consumo de memória e garante que os dados possam ser enviados em lotes, mesmo se houver atrasos na comunicação com o gateway.

**Exemplo de mensagem transmitida pela antena ao gateway:**

```

“123456|Antena3|24:0A:C4:12:34:56|2025-
051214:30:45|tag01|A4:C1:38:78:90:AB|60;tag02|
B8:D7:AF:12:34:CD|-70;tag03|C0:EE:FB:56:78:EF|-65”
Mesma imagem interpretada pelo banco de dados em formato.
JSON
{
  "nodeId": 123456,
  "antennaName": "Antena3",
  "antennaMac": "24:0A:C4:12:34:56",
  "timestamp": "2025-05-12 14:30:45",
  "devices": [
    {"name": "tag01", "mac": "A4:C1:38:78:90:AB",
     "rssi": -60},
    {"name": "tag02", "mac": "B8:D7:AF:12:34:CD",
     "rssi": -70},
    {"name": "tag03", "mac": "C0:EE:FB:56:78:EF",
     "rssi": -65}
  ]
}

```

Figura 24 – Exemplo de mensagem transmitida pela antena ao gateway.

O sistema também é capaz de responder a comandos de configuração remota enviados pela rede *mesh*. Quando uma mensagem CONFIG é recebida, ela passa por uma verificação de chave para garantir autenticidade. Se a chave for válida, o sistema interpreta o comando e aplica a nova configuração dinamicamente. Algumas configurações, como nome da antena ou nome da rede, exigem a reinicialização dos componentes de rede e BLE, o que é feito de forma transparente. Essa funcionalidade torna o sistema altamente flexível, permitindo alterações em campo sem a necessidade de reprogramação física.

Para complementar a confiabilidade do sistema, há um mecanismo automático de reconexão. Se a antena perder conexão com o gateway, ela inicia uma tentativa de reestabelecer

a comunicação, enviando novamente o *handshake*<sup>2</sup> e aguardando nova sincronização. Enquanto isso, continua coletando dados e mantendo-os em fila. A comunicação é retomada automaticamente assim que a conexão é restabelecida.

A Figura 25 ilustra o fluxo operacional do sistema para melhor clareza dos processos da antena.

---

<sup>2</sup> *Handshake* em redes de computadores é um processo para estabelecer e sincronizar a comunicação entre dois ou mais dispositivos ou sistemas autônomos. Este procedimento garante que ambos os lados estejam prontos para trocar dados de forma confiável e coordenada antes que a transmissão real comece.

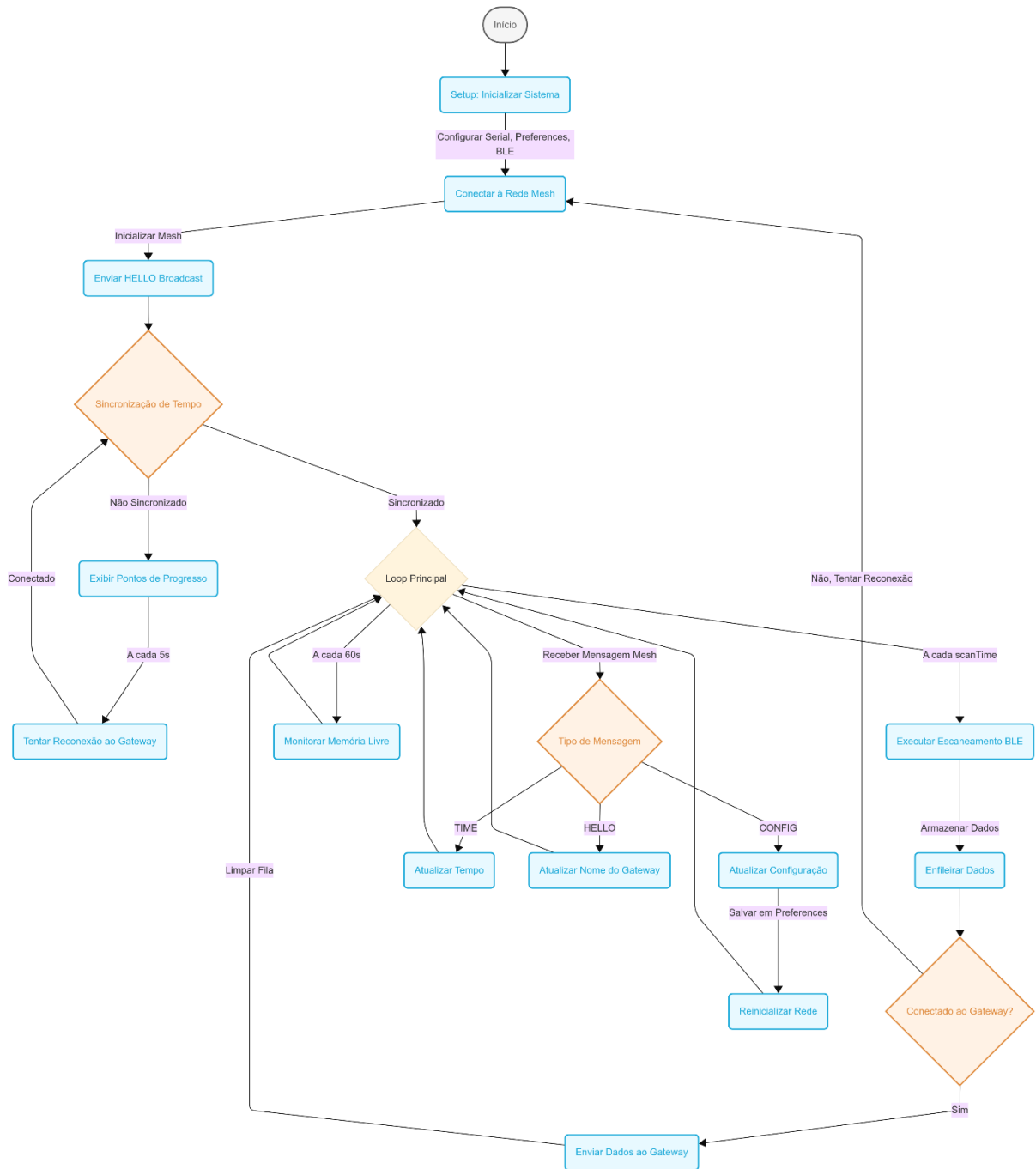


Figura 25 – Fluxograma do código embarcado para antena.

## APÊNDICE D      DETALHES DO SOFTWARE DO GATEWAY

O desenvolvimento deste código na linguagem C++ teve como objetivo criar um gateway utilizando o hardware construído na primeira etapa do projeto. da mesma forma com desenvolvimento do código da antena, foi realizada uma análise dos principais tópicos que demonstram as funcionalidades do gateway:

- Gerenciamento da Rede *Mesh*;
- Comunicação com a Internet;
- Obtenção do Tempo e Sincronização dos nós da rede;
- Configuração dinâmica dos nós;
- Comunicação com o Servidor;
- Gerenciamento de recursos;
- Resiliência de conexão.

O gateway é o nó principal da rede, fazendo monitoramento das antenas enviando configurações de forma remota. Ele ainda, se comunica através da *Internet* a um servidor remoto via HTTPS para enviar os dados.

No ambiente de desenvolvimento Arduino IDE, utilizei a biblioteca *painlessMesh* para criação da rede Wi-Fi *mesh* entre os dispositivos ESP32, *WiFiClientSecure* e *HTTPClient* para realizar comunicações seguras com o servidor, e *Preferences* para armazenamento persistente de configurações críticas como o nome e senha das redes. A inclusão do *time.h* permitindo a sincronização de horário via NTP<sup>3</sup>.

Para obter o horário em tempo real, foi criado uma rotina onde, o gateway se conecta ao *pool.ntp.org* para configurar o tempo da rede *mesh*. Assim, implementou-se a função onde o gateway envia para os nós conectados o horário atual.

Para manter a comunicação entre os nós pelo gateway foi criada a função para processar as mensagens recebidas dos nós da rede. Essa função recebe as mensagens de inicialização das antenas (mensagem HELLO), verificação do status da configuração (mensagem CONFIG\_OK ou CONFIG\_ERROR) e os envios dos dados coletados (mensagem no formato *nodeId|antennaName|macAddress|...*), permitindo uma comunicação bidirecional entre os dispositivos.

Para configurar os nós da rede em tempo real sem a necessidade de compilação do código em cada equipamento, desenvolveu-se a função com validação de chave, permitindo

---

<sup>3</sup> NTP: Network Time Protocol ou Protocolo de Tempo para redes. É o padrão internacional que permite a sincronização dos relógios dos dispositivos de uma rede à partir de referências de tempo confiáveis.

alterar o nome do equipamento, nome e senha da rede Wi-Fi *mesh*, nome e senha da rede Wi-Fi entre outros parâmetros. Essa alteração de configuração é salva na classe *Preferences* dos dispositivos.

Para armazenar os dados coletados, foi atribuído um buffer, sendo de fila que salva os dados por um certo período até o envio para o servidor, isso se dá, caso o gateway não tenha conexão estabelecida com o servidor, mantendo as últimas leituras até que se reestabeleça a conexão. Também foi criado uma rotina de manutenção desse buffer para controlar os recursos do equipamento limpando os dados enviados da fila para não o sobrecarregar.

A construção do código para envio dos dados armazenados para o servidor, exigiu um controle maior das operações do gateway. A função desenvolvida verifica a conexão com a internet, envia dados via HTTPS, prepara a reposição POST e analisa a resposta do servidor. Caso o código de resposta do envio seja HTTP 200 (OK!), indica que os dados foram recebidos pelo servidor, a partir daí, o loop recomeça para enviar novas mensagens recebidas pelas antenas. Se retornar um código de falha, como HTTP 400 (Bad Request), HTTP 500 (Internal Server Error), HTTP 503 (Service Unavailable), a função, busca verificar a conexão com a internet e consequentemente com o servidor. Uma mensagem de depuração é disparada para indicar o erro na operação, e os dados recebidos pelos nós são armazenados no buffer e o ciclo de manutenção apaga mensagens antigas.

Para monitorar o funcionamento do gateway, foram criado uma função de exibição de informação pelo monitor serial do equipamento, onde consigo através de comando verificar os equipamentos conectados no gateway, os dados transmitidos para o gateway por cada nó, e estado de envio de cada mensagem além de logs de depuração.

A Figura 26 apresenta o fluxograma do código embarcado para o gateway.

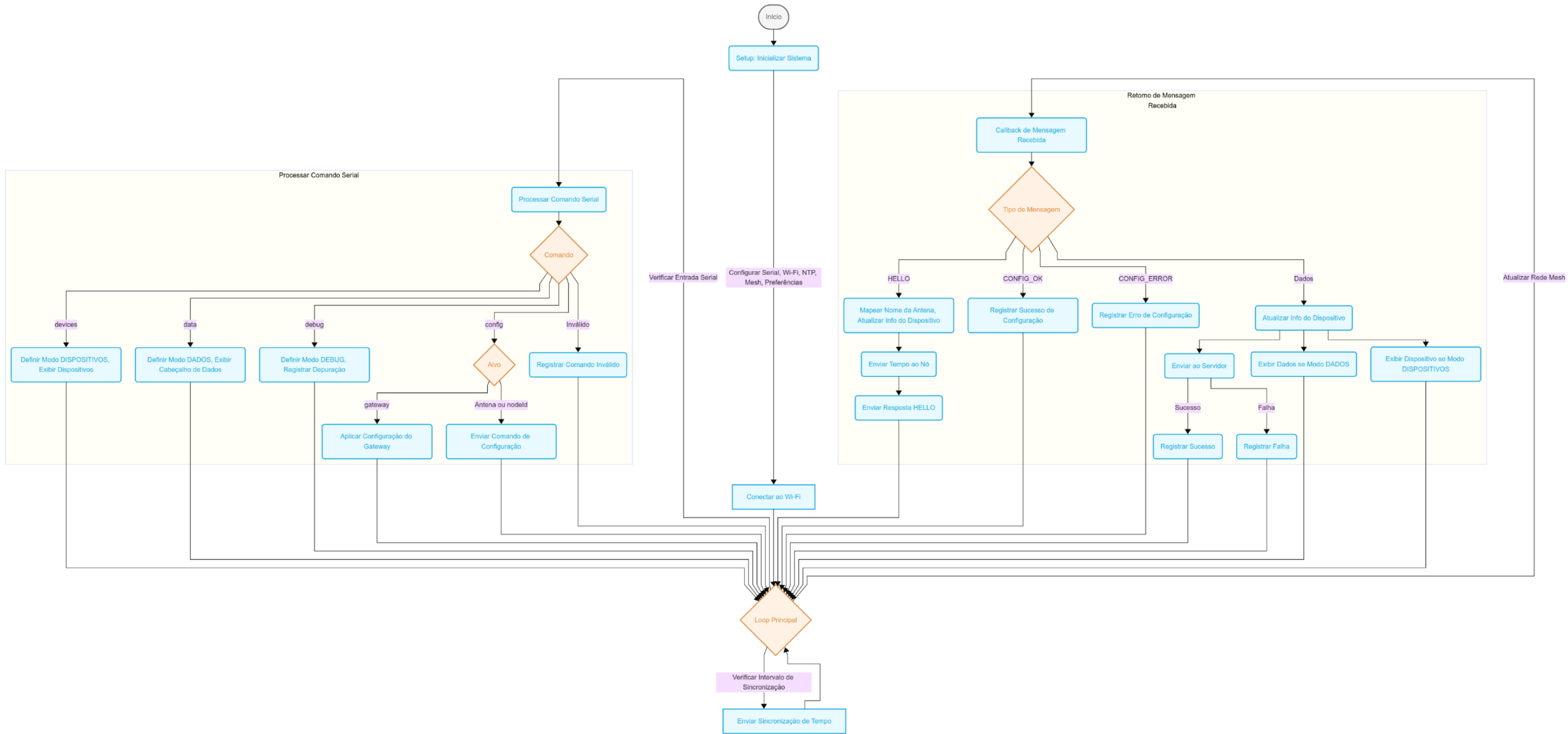


Figura 26 – Fluxograma do código embarcado do gateway

## APÊNDICE E      DETALHES DO DESENVOLVIMENTO DO SERVIÇO EM NUVEM

Após a elaboração dos códigos em C++ para a antena e gateway foi necessário criar um ambiente onde os dados coletados sejam processados. O desenvolvimento de sistemas de posicionamento em tempo real (RTLS, do inglês *Real-Time Location System*) é o cerne para criação de aplicações como rastreamento de ativos, logística e navegação em ambientes internos.

Esta parte do trabalho apresenta a metodologia empregada na construção de um serviço de posicionamento baseado em sinais Bluetooth, utilizando o indicador de intensidade de sinal recebido (RSSI) para estimar a posição de tags por meio de técnica de trilateração. A solução foi projetada utilizando *TypeScript*<sup>4</sup>, *MongoDB*<sup>5</sup> e injeção de dependências.

A seguir, descreve-se o processo de desenvolvimento, detalhando cada etapa do serviço na ordem sequencial necessária para obter a posição das tags, as funções dos serviços envolvidos e suas interações

### E.1      VISÃO GERAL DO DESENVOLVIMENTO

Buscou-se uma abordagem orientada em camadas para elaboração dos serviços, com separação de responsabilidades de cada parte do código, e estruturada em etapas sequenciais que culminam no cálculo da posição das *tags*.

O processo inicia-se com a recepção de leituras brutas de RSSI, provenientes das antenas BLE que detectam sinais emitidos por *tags*. Essas leituras passam por validação, padronização, filtragem, armazenamento e, finalmente, cálculo de posicionamento.

Apresenta-se a sequência das etapas necessárias para obter a posição das *tags*, com destaque para os serviços envolvidos:

---

<sup>4</sup> TypeScript é uma linguagem de programação desenvolvida para tornar o desenvolvimento em JavaScript mais seguro, produtivo e escalável. É um superset (superconjunto) de JavaScript que adiciona tipagem estática opcional e recursos avançados, facilitando a criação e manutenção de aplicações grandes e complexas.

<sup>5</sup> MongoDB é um banco de dados, amplamente utilizado para armazenar e gerenciar grandes volumes de dados de forma flexível e escalável. Ele se destaca por ser orientado a documentos, permitindo alta performance, fácil expansão e simplicidade no uso, especialmente em aplicações web e sistemas que exigem agilidade e adaptação rápida.

- **Recepção e validação das leituras:** O processo começa no *Adapter*<sup>6</sup> (adaptador), que recebe leituras em diferentes formatos e as padroniza em um objeto tipado<sup>7</sup>. A validação é realizada serviço garantindo que os dados atendam aos esquemas definidos antes de prosseguir.
- **Orquestração do processamento:** As leituras validadas são enviadas ao caso de uso, que coordena as etapas subsequentes, interagindo com os serviços especializados para processar cada leitura.
- **Suavização do RSSI com filtro de Kalman:** Cada leitura é processada, que invoca o serviço para aplicar um filtro de Kalman, suavizando o RSSI e mitigando ruídos causados por interferências ambientais.
- **Salvamento das leituras:** Após a filtragem, o serviço salva as leituras (com os dados filtrados) no banco MongoDB, utilizando o repositório correspondente.
- **Atualização das antenas:** Para cada leitura, o serviço atualiza o cadastro da antena correspondente, registrando a data da última leitura ou inserindo uma nova antena não registrada.
- **Coordenação do posicionamento:** O serviço verifica a necessidade de atualizar a posição da tag e, se necessário, coordena a obtenção de leituras e antenas para o cálculo de posicionamento.
- **Trilateração:** O serviço converte o RSSI (bruto ou filtrado) em distâncias e realiza a trilateração, calculando as coordenadas X e Y da tag por meio de resolução de sistemas lineares.
- **Salvamento da Posição e Histórico:** Finalmente, o serviço salva a posição calculada e insere um registro no histórico de posicionamento da tag.

O sistema utiliza um contêiner<sup>8</sup> de injeção de dependências para gerenciar as interações entre os serviços, com escopos para repositórios e utilitários e para serviços e casos de uso, garantindo modularidade e eficiência ao projeto. A Figura 27 apresenta o fluxo dos serviços elaborados.

---

<sup>6</sup> Adapter em programação é um padrão de projeto estrutural que permite que objetos com interfaces incompatíveis trabalhem juntas, atuando como um tradutor entre elas. O Adapter encapsula uma classe para alterar sua interface ou funcionalidade, facilitando a integração e reutilização de componentes de software.

<sup>7</sup> Objeto tipado é um conceito em programação orientada a objetos, onde cada objeto possui um tipo definido que especifica quais operações, métodos ou mensagens ele pode receber. O tipo de um objeto determina seu comportamento e as interações permitidas com outros objetos, garantindo maior segurança e previsibilidade no código.

<sup>8</sup> Contêiner em programação é uma tecnologia que permite empacotar um aplicativo junto com todas as suas dependências, bibliotecas e configurações, garantindo que ele rode de forma consistente em diferentes ambientes. Containers são leves, isolados e facilitam o desenvolvimento, implantação e portabilidade de aplicações.

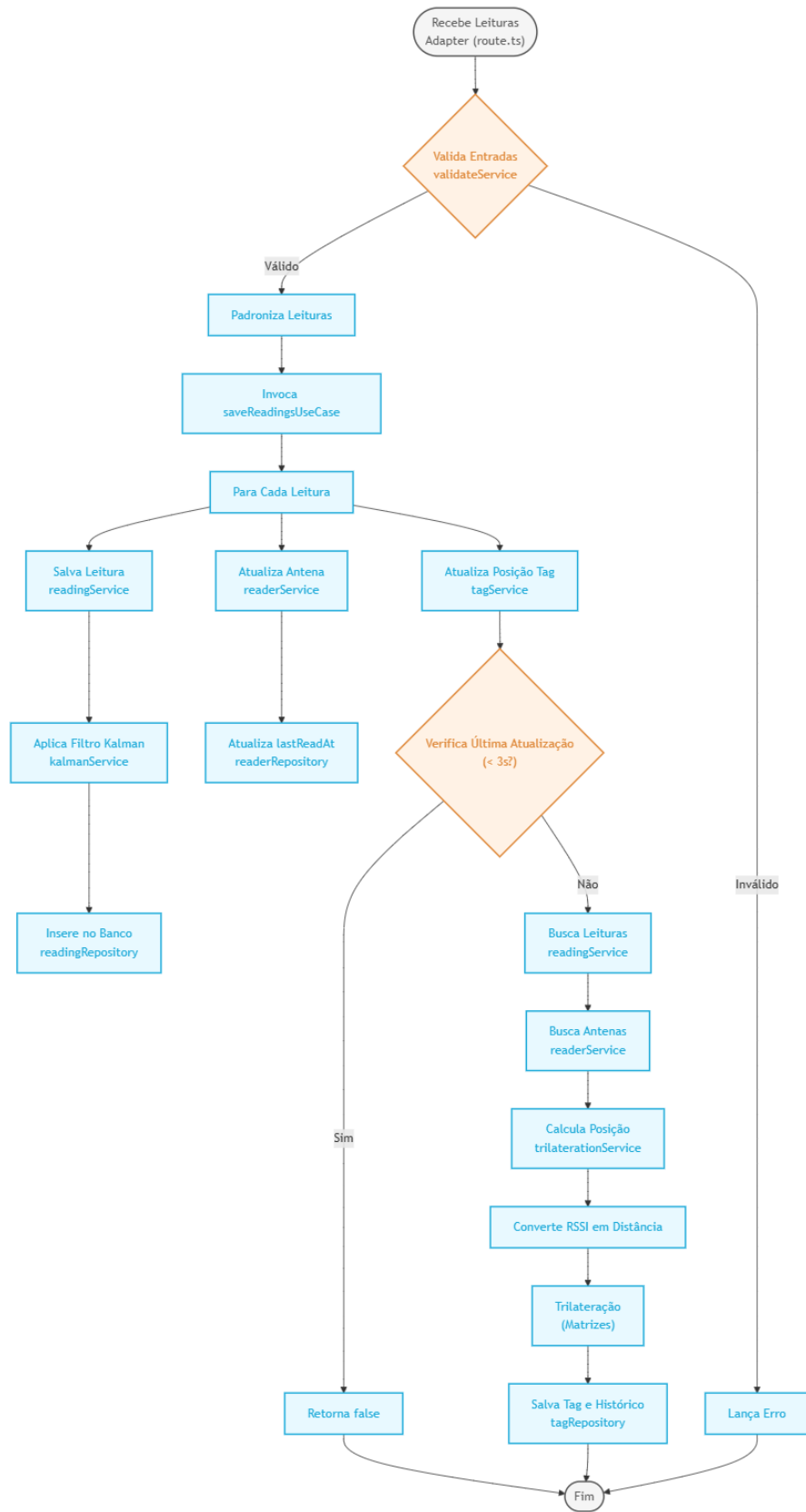


Figura 27 – Fluxograma Geral dos Serviços

## E.2 VALIDAÇÃO DAS LEITURAS

O **validateService** (*validateService.ts*) é o primeiro serviço acionado, garantindo a integridade dos dados de entrada. Utilizando a biblioteca Yup <sup>9</sup> com mensagens em português (via *yup-locale-pt*), valida objetos como leituras, tags e antenas, conforme esquemas definidos. Em caso de erro, lança uma exceção **ParseError** com detalhes estruturados. No contexto do *Adapter*, o serviço valida as leituras recebidas, assegurando que campos como **tagReference**, **readerReference** e **rsi** estejam corretos antes de prosseguir.

A interação do serviço é: o *Adapter* invoca o método *parse* do **validateService**, que retorna um objeto validado ou lança um erro, bloqueando o processamento se os dados forem inválidos.

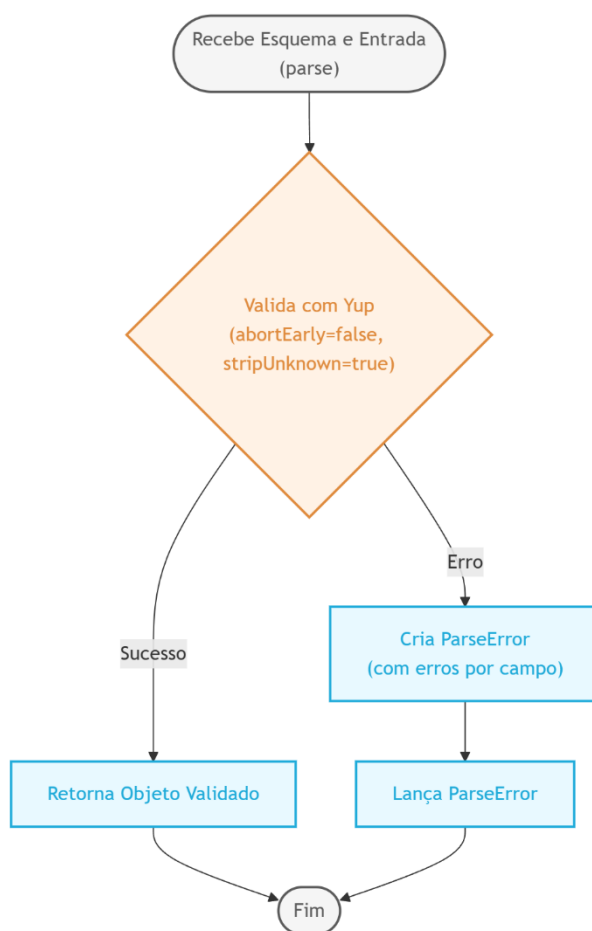


Figura 28 – fluxograma do serviço de validação das leituras

<sup>9</sup> Yup é uma ferramenta JavaScript usada para validar dados, especialmente em formulários, seguindo um esquema de validação definido pelo desenvolvedor.

### E.3 ORQUESTRAÇÃO DO PROCESSAMENTO

O caso de uso *saveReadingsUseCase* (save-readings-use-cases.ts) recebe o *array* de leituras validadas e coordena as etapas subsequentes. Ele itera sobre cada leitura, delegando tarefas aos serviços *readingService*, *readerService* e *tagService*, e retorna *Promises* dos comandos executados, garantindo processamento assíncrono eficiente.

Interação: o *Adapter* invoca o *saveReadingsUseCase*, que atua como um orquestrador, chamando os serviços na ordem apropriada e agregando os resultados.

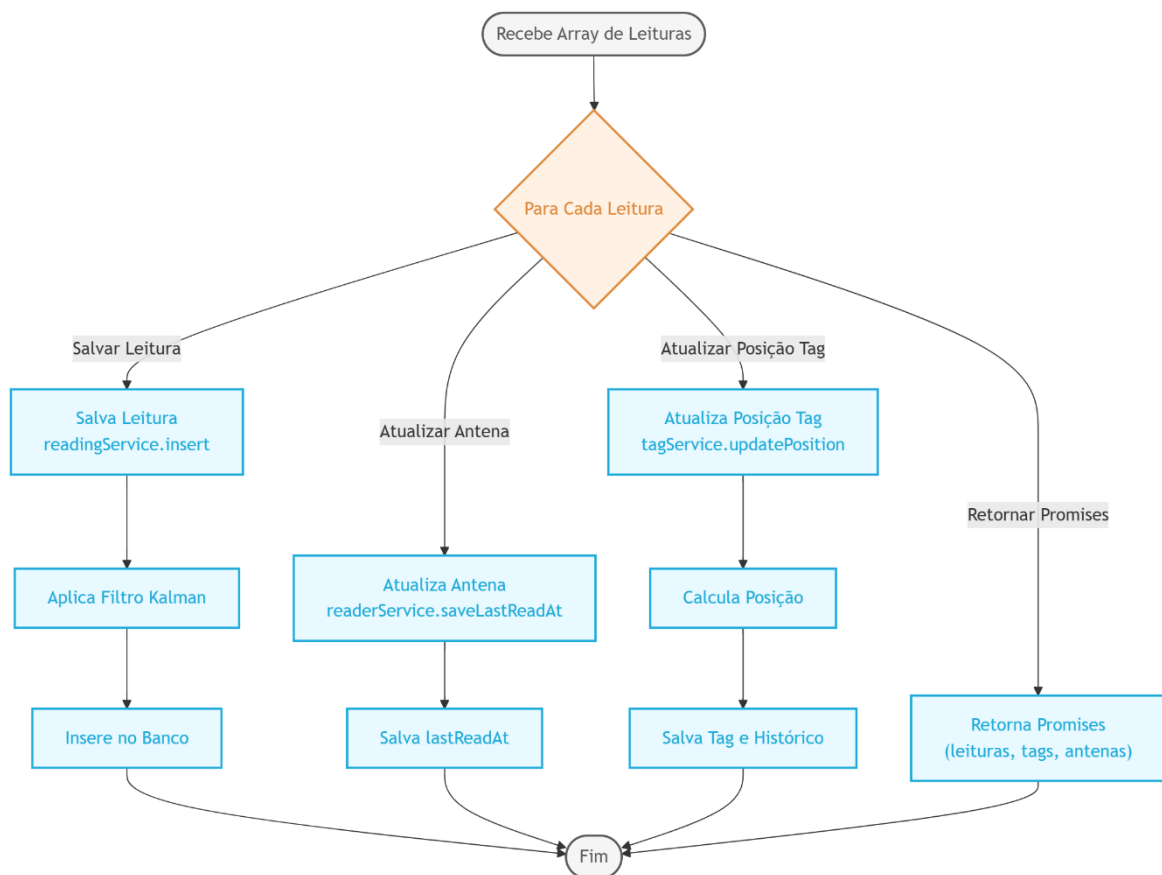


Figura 29 – fluxograma do serviço de orquestração do processamento

### E.4 SUAVIZAÇÃO DO RSSI (FILTRO DE KALMAN)

O filtro de Kalman, proposto por Rudolf e. Kalman em 1960, é um algoritmo recursivo utilizado para estimar o estado de um sistema dinâmico linear a partir de medições ruidosas e incompletas. Amplamente utilizado nas áreas de engenharia de controle, robótica, navegação e processamento de sinais. O filtro de Kalman combina modelos matemáticos do sistema com dados observacionais, oferecendo uma estimativa ótima no sentido de mínimos quadrados para sistemas lineares com ruído gaussiano (Kalman, 1960).

A formulação do filtro de Kalman para o um sistema dinâmico linear multidimensional é descrito pelas seguintes equações:

Equação de Estado – Modelo de Processo

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_k + w_k \quad (E.1)$$

Equação de Observação – Modelo de Medição

$$z_k = Hx_k + v_k \quad (E.2)$$

Onde:

- $x_k$  é o vetor de estado no instante k;
- $A$  é a matriz de transição de estado;
- $B$  é a matriz de controle;
- $u_k$  é o vetor de entrada de controle;
- $w_k \sim \mathcal{N}(0, R)$  é o ruído do processo;
- $z_k$  é o vetor de medição;
- $H$  é a matriz de observação;
- $v_k \sim \mathcal{N}(0, R)$  é o ruído de medição.

O algoritmo funciona em duas etapas, a previsão e a atualização. A interação procede na seguinte ordem:

- Estimativa do estado:

$$\hat{x}_{k|k-1} = A\hat{x}_{k-1|k-1} + Bu_k + w_k \quad (E.3)$$

- Estimativa da covariância do erro:

$$P_{k|k-1} = AP_{k-1|k-1}A^T + Q \quad (E.4)$$

- Cálculo do ganho de Kalman:

$$K_k = P_{k-1|k-1}H^T(HP_{k-1|k-1}H^T + R)^{-1} \quad (E.5)$$

- Correção do estado:

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k(z_k - H\hat{x}_{k|k-1}) \quad (E.6)$$

- Correção da covariância:

$$P_{k|k} = (I - K_kH)P_{k-1|k-1} \quad (E.7)$$

Em muitos casos práticos, como no tratamento de sinais de sensores simples, como força de sinal RSSI de dispositivos BLE, é possível simplificar a formulação do filtro de Kalman para o caso unidimensional. Nesta versão, consideram-se as seguintes hipóteses:

- O estado  $x$  e a medição  $z$  são escalares.
- $A = 1, H = 1, B = 0$ .
- O sistema não possui entrada de controle.
- As variâncias de ruído  $Q$  e  $R$  são constantes e conhecidas.

Neste contexto, as equações se tornam:

$$\text{Previsão:} \quad P_k = P_{k-1} + Q \quad (E.8)$$

$$\text{Atualização:} \quad K_k = \frac{P_k}{P_k + R} \quad (E.9)$$

$$x_k = x_{k-1} + K_k(z_k - x_{k-1}) \quad (E.10)$$

$$P_k = (1 - K_k)P_k \quad (E.11)$$

Os elementos da versão unidimensional do filtro de Kalman possuem significados específicos e operam de maneira a seguir:

- $x_k$ : estimativa do estado no instante  $k$ , representando o valor suavizado.
- $z_k$ : medição observado no instante  $k$ , com ruído.
- $P_k$ : variância da estimativa; expressa a incerteza associada ao valor estimado  $x_k$ .
- $Q$ : variância do processo; indica o quanto o sistema pode variar entre as iterações. Um valor mais alto torna o filtro mais sensível a mudanças rápidas.
- $R$ : variância do ruído de medição; representa o grau de incerteza das observações. Um valor maior de  $R$  reduz a influência da medição na estimativa.
- $K_k$ : ganho de Kalman; atua como um peso entre a estimativa anterior e a nova medição. Quando  $K_k$  está próximo de 1, o filtro dá mais importância à medição. Quando está próximo de 0, a predição tem mais peso.

O uso deste algoritmo é particularmente eficiente em aplicações com restrições de recursos computacionais, como dispositivos embarcados, sistemas em tempo real e sensores de baixo custo.

No contexto deste sistema de monitoramento, o estado é o valor do RSSI, e o filtro suaviza flutuações causadas por interferências ambientais. O serviço considera a leitura anterior (se disponível, dentro de 30 minutos) para calcular o RSSI filtrado, a covariância de erro e o ganho de Kalman, retornando um objeto *ReadingKalmanData*.

O *kalmanService* (kalmanService.ts) é invocado pelo *readingService* para suavizar o RSSI de cada leitura.

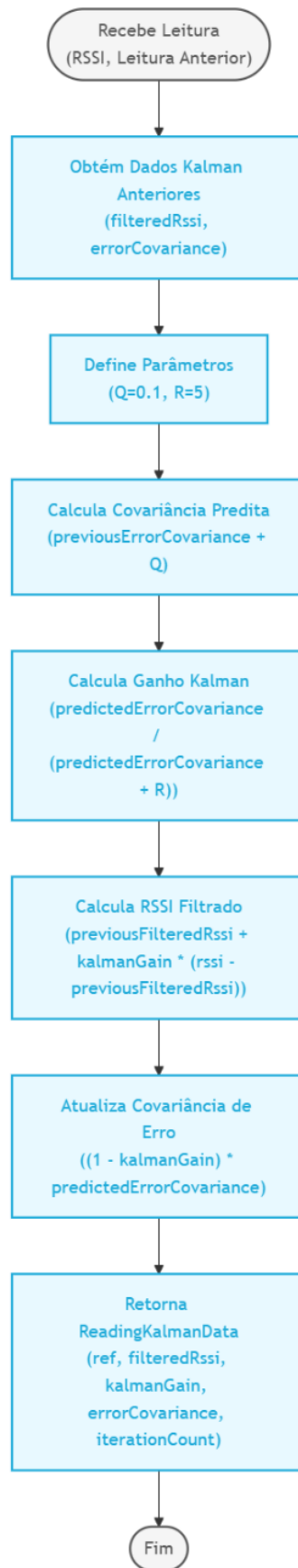


Figura 30 – Fluxograma do serviço do filtro de Kalman.

## E.5 SALVAMENTO DAS LEITURAS

O **readingService** (readingService.ts) gerencia o armazenamento das leituras. Para cada leitura, válida a entrada (usando o **validateService**), busca a leitura anterior (mesma *tag* e antena, dentro de 30 minutos) e aplica o filtro de Kalman. A leitura, com seus dados filtrados, é salva no banco MongoDB via **readingRepository**. O serviço também fornece métodos para buscar as últimas leituras (dentro de 30 segundos), usados posteriormente pelo **tagService**.

O **saveReadingsUseCase** chama o método **insert** do **readingService**, que interage com o **kalmanService** para filtragem e com o **readingRepository** para persistência.

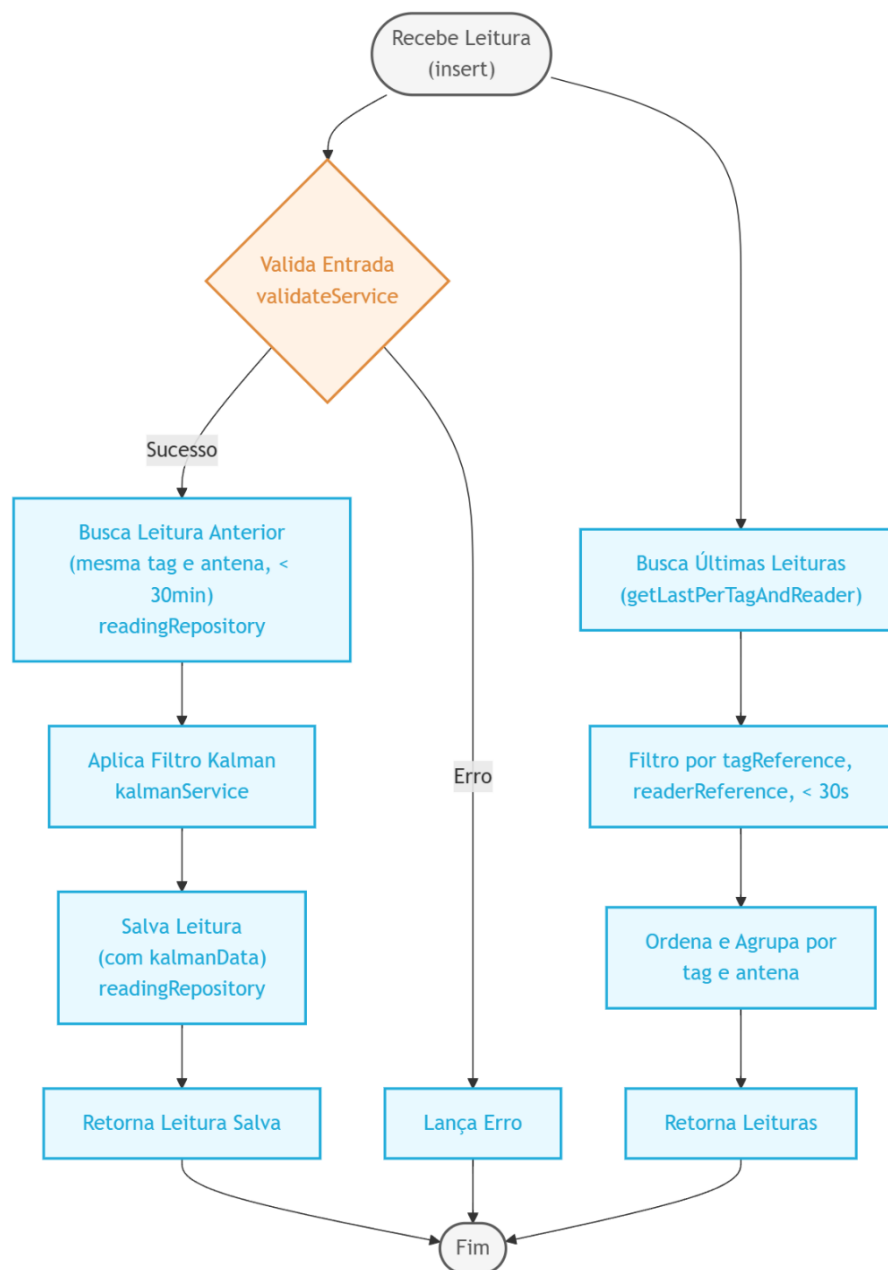


Figura 31 fluxograma do serviço de salvamento das leituras.

## E.6 ATUALIZAÇÃO DAS ANTENAS

O **readerService** (readerService.ts) atualiza o cadastro das antenas para cada leitura processada. Ele verifica se a antena está registrada; se sim, atualiza o campo *lastReadAt* com a data atual; caso contrário, insere uma nova antena não registrada no banco, permitindo sua configuração futura.

O **saveReadingsUseCase** invoca o método *saveLastReadAt* do **readerService**, que interage com os repositórios *readerRepository* e *unregisteredReaderRepository*.

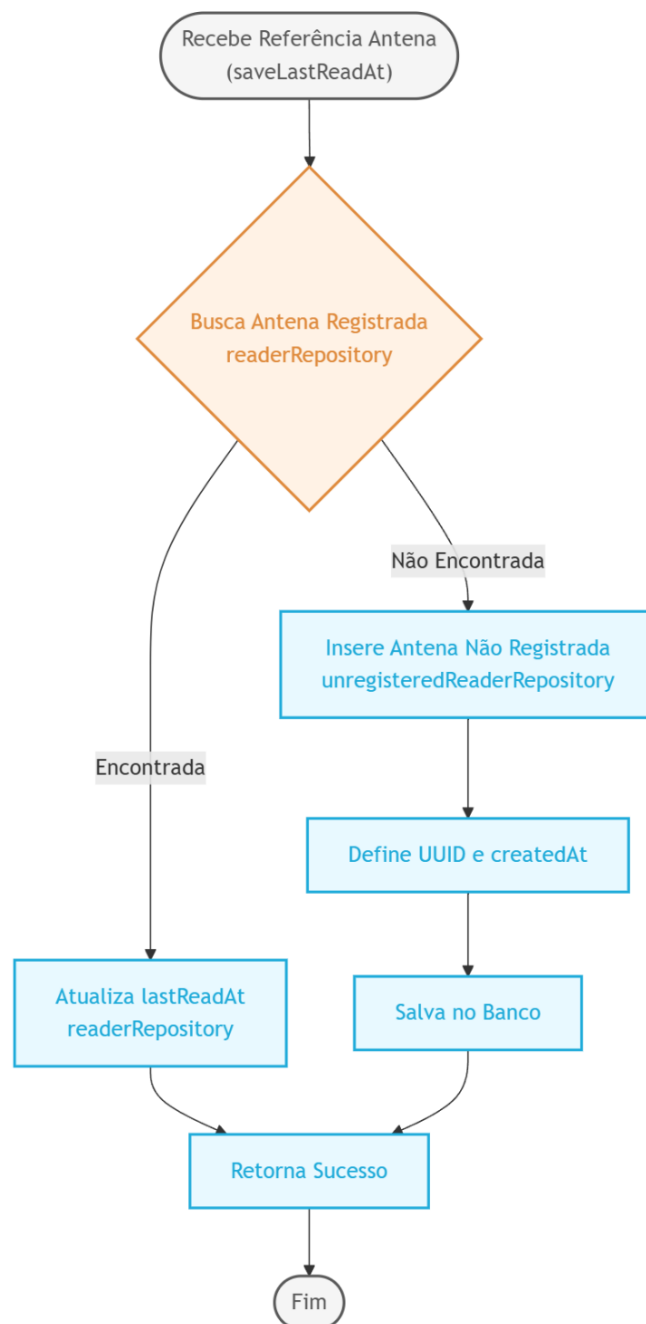


Figura 32 – Fluxograma do serviço de atualização das antenas.

## E.7 COORDENAÇÃO DO POSICIONAMENTO

O **tagService** (tagService.ts) gerencia a atualização da posição das tags. Para cada leitura, verifica se a última atualização da *tag* ocorreu há menos de 3 segundos, evitando processamentos redundantes. Se necessário, busca as últimas leituras (via **readingService**), e invoca o *trilaterationService* para calcular a nova posição.

O **saveReadingUseCase** chama o método *updatePosition* do **tagService**, que coordena a obtenção de dados e delega o cálculo ao **trilaterationService**.

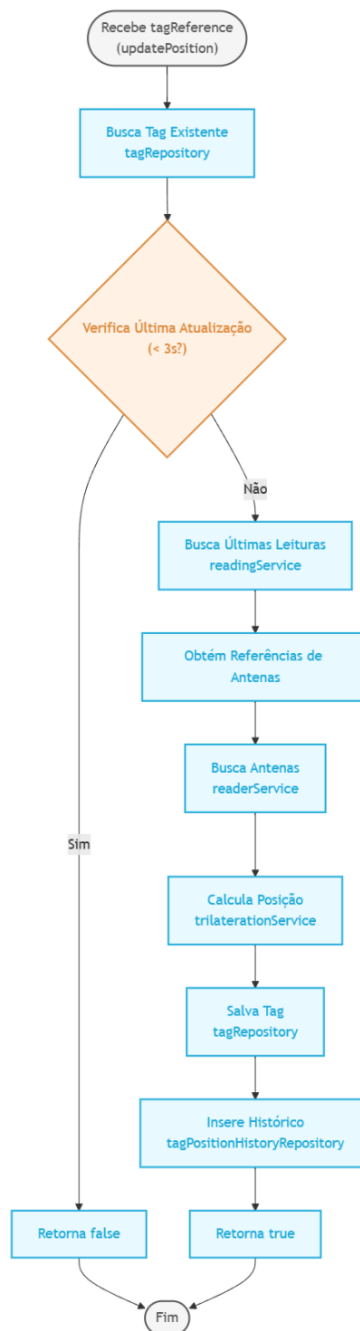


Figura 33 – Fluxograma do serviço de coordenação de posicionamento.

## E.8 CÁLCULO DA POSIÇÃO POR TRILATERAÇÃO

Sistemas de localização têm se tornado fundamentais em diversas aplicações, como navegação veicular, rastreamento de ativos, agricultura de precisão e Internet das Coisas (IoT). Diversas técnicas são empregadas para determinar a posição de um objeto ou dispositivo em um espaço, podendo ser classificadas de acordo com o tipo de informação utilizada: ângulos, distâncias, tempo ou sinais de campo eletromagnético.

Entre as principais técnicas de posicionamento, destacam-se:

- Triangulação, que utiliza ângulos entre linhas de visão de pontos de referência;
- Trilateração, baseada em distâncias conhecidas até pontos com coordenadas fixas;
- *Fingerprinting*, que compara características de sinais com um banco de dados de posições conhecidas;
- *Dead Reckoning*, que estima posição com base em movimento anterior e orientação;
- Métodos baseados em tempo, como ToA (Time of Arrival) e TDoA (Time Difference of Arrival).

Neste contexto, a trilateração é um método utilizado devido à sua simplicidade geométrica e aplicabilidade tanto em ambientes abertos quanto confinados, como em sistemas GPS e posicionamento indoor.

A trilateração em duas dimensões consiste em determinar a posição de um ponto no plano com base nas distâncias conhecidas de três pontos de referências fixos, cujas coordenadas são previamente conhecidas. A base do método é a distância euclidiana, que relaciona dois pontos  $P(x, y)$  e  $A(x_i, y_i)$  por:

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 = d_i^2 \quad (E.12)$$

Dado um conjunto de três pontos de referência  $A(x_1, y_1)$ ,  $B(x_2, y_2)$ , e  $C(x_3, y_3)$ , e suas respectivas distâncias ao ponto  $P(x, y)$ , as equações que modelam o problema são:

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = d_1^2 \quad (E.13)$$

$$(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = d_2^2 \quad (E.14)$$

$$(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 = d_3^2 \quad (E.15)$$

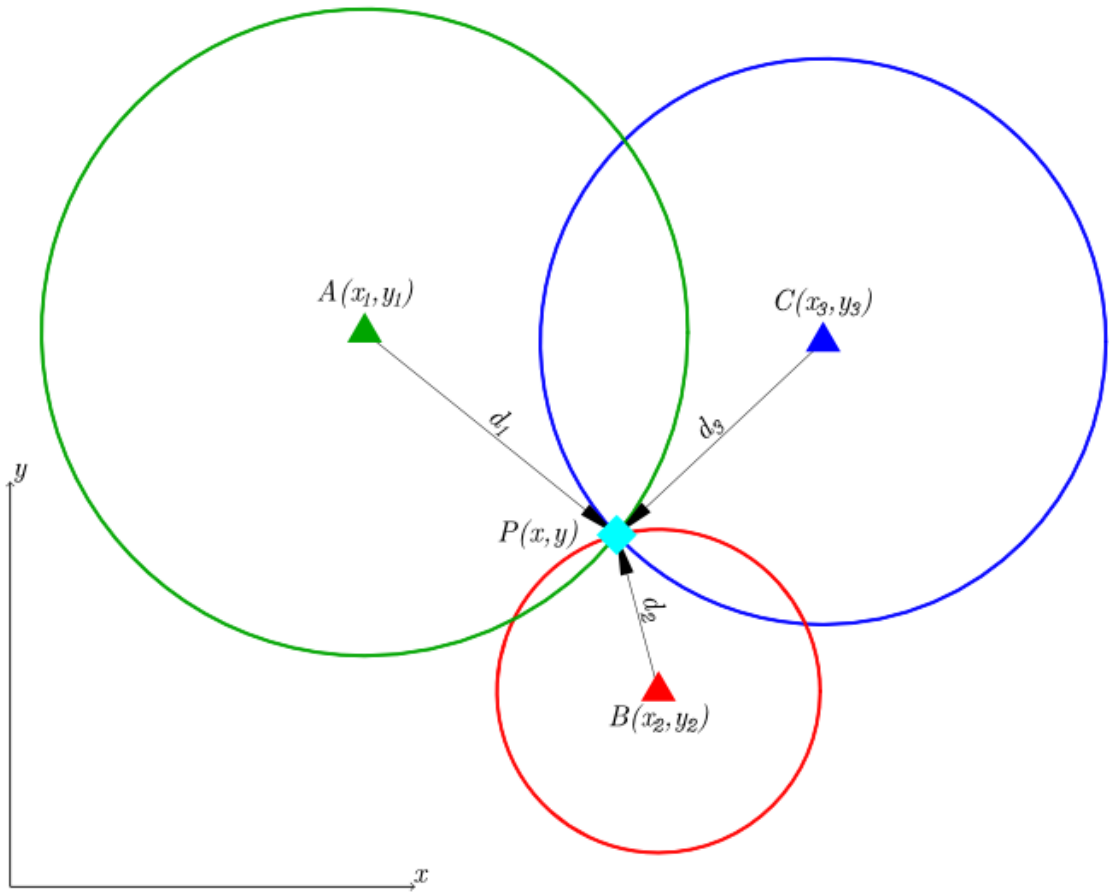


Figura 34 – representação geométrica da trilateração.

Para eliminar os termos quadráticos  $x^2$  e  $y^2$ , subtrai-se a equação (E.14) e (E.15). O resultado é um sistema linear com duas equações e duas incógnitas:

$$(x_2 - x_1)x + (y_2 - y_1)y = \frac{1}{2}[d_1^2 - d_2^2 - x_1^2 + x_2^2 - y_1^2 + y_2^2] \quad (E.16)$$

$$(x_3 - x_1)x + (y_3 - y_1)y = \frac{1}{2}[d_1^2 - d_3^2 - x_1^2 + x_3^2 - y_1^2 + y_3^2] \quad (E.17)$$

Estas equações podem ser escritas na forma matricial:

$$A \times p = b$$

Onde:

$$A = \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 \end{bmatrix}, p = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}, b = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} d_1^2 - d_2^2 - x_1^2 + x_2^2 - y_1^2 + y_2^2 \\ d_1^2 - d_3^2 - x_1^2 + x_3^2 - y_1^2 + y_3^2 \end{bmatrix}$$

A solução é obtida por:

$$p = A^{-1} \times b \quad (E.18)$$

Desde que  $A$  seja invertível, ou seja, os pontos de referência não sejam colineares.

Em sistemas de localização indoor utilizam trilateração com base na estimativa de distância via sinais de rádio, como BLE ou Wi-Fi. A distância é frequentemente inferida a partir do valor de RSSI (*Received Signal Strength Indicator*), utilizando modelos de propagação como:

$$d = 10^{\frac{(RSSI_0 - RSSI)}{10n}} \quad (E.19)$$

Onde:

- *RSSI*: valor da leitura
- *RSSI<sub>0</sub>*: valor de referência a 1 metro.
- *n*: expoente de perda de trajeto.

A perda de trajeto são perdas de propagação causadas pela radiação expansão natural do sinal de rádio, como a absorção quando o sinal atravessa meios não transparentes, a difração quando parte do sinal de rádio é obstruída por um objeto opaco, e a dispersão quando as dimensões dos objetos são menores que o comprimento de onda (RAZALI, HABAEBI, *et al.*, 2017). A Tabela 5 apresenta valores típicos de acordo para diferentes ambientes.

Tabela 5 – Expoentes de perda de trajeto para diferentes ambientes.

Fonte: (RAZALI, HABAEBI, *et al.*, 2017)

| Ambiente                             | Expoente de Perda de trajeto |
|--------------------------------------|------------------------------|
| Espaços abertos                      | 2,0                          |
| Área urbana                          | 2,7 – 3,5                    |
| Área Suburbana                       | 3 – 5,0                      |
| Ambiente interno com linha de visada | 1,6 – 1,8                    |
| Espaços internos com obstrução       | 4,0 – 6,0                    |
| Espaços industriais                  | 2,0 – 3,0                    |

Com a teoria definida, o *trilaterationService* (*trilaterationService.ts*) realiza o cálculo de posicionamento. O serviço converte o RSSI (bruto ou filtrado) em distâncias, organiza as distâncias e posições das antenas em matrizes e resolve o sistema linear usando as bibliotecas *mathjs* e *lodash*, retornando as coordenadas X/Y da tag.

O *tagService* passa as leituras e antenas ao método *getPositionedTag* do *trilaterationService*, que retorna à posição bruta e filtrada.

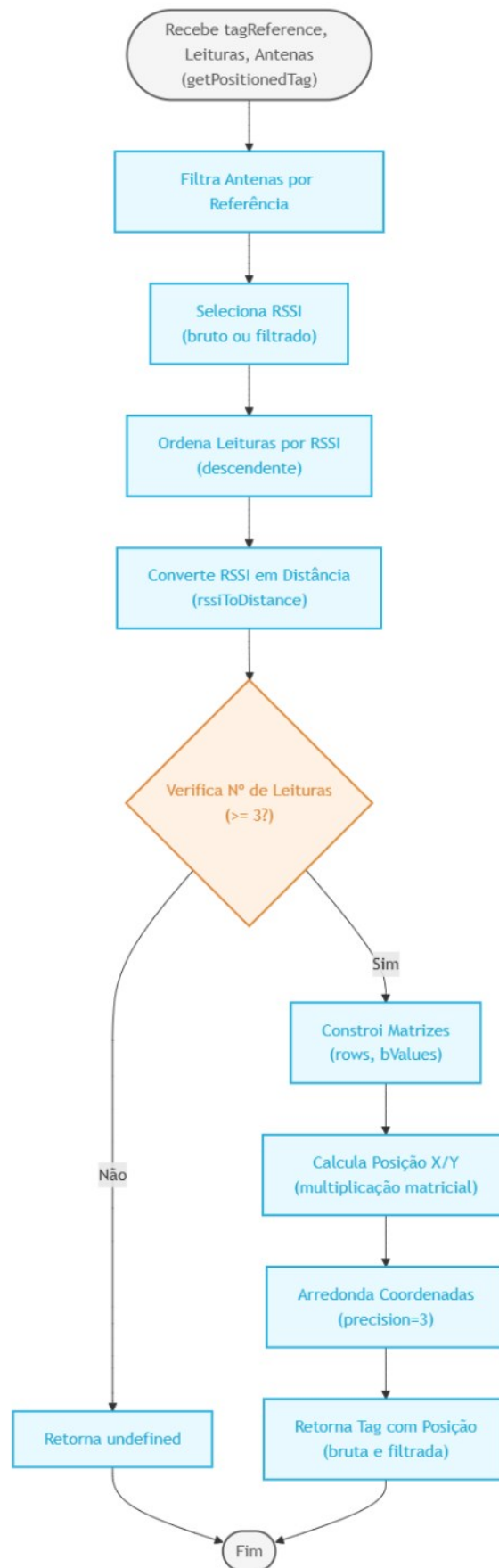


Figura 35 – Fluxograma do serviço de trilateração.

## E.9 SALVAMENTO DA POSIÇÃO E HISTÓRICO

Após o cálculo, o **tagService** salva a posição da *tag* (atualizando o objeto *Tag*) e insere um registro no histórico de posicionamento, utilizando os repositórios **tagRepository** e **tagPositionHistoryRepository**.

O **tagService** conclui o processo, interagindo com os repositórios para persistência, após receber a posição do **trilaterationService**.

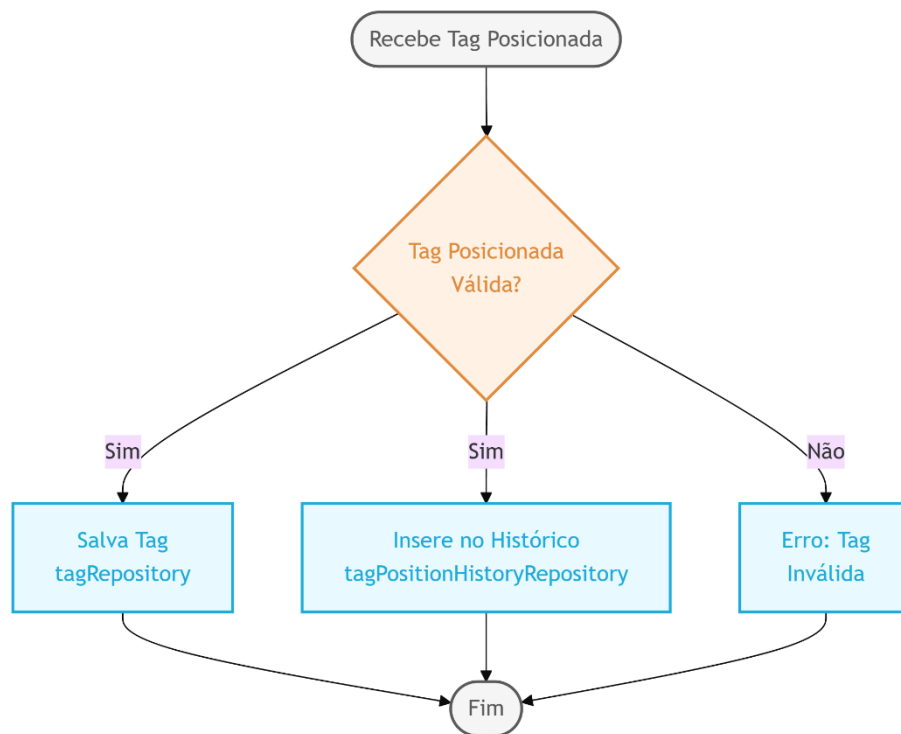


Figura 36 – fluxograma do serviço de salvamento da posição e histórico.

## E.10 INTERAÇÃO ENTRE OS SERVIÇOS

A interação entre os serviços segue a sequência descrita, mediada pelo contêiner de injeção de dependências (container.ts).

O Adapter inicia o processo, passando as leituras ao **saveReadingsUseCase**, que orquestra as chamadas aos serviços na ordem: **validateService** (validação), **readingService** (filtragem e salvamento, com **kalmanService**), **readerService** (atualização de antenas) e **tagService** (posicionamento, com **trilaterationService**).

O contêiner garante que cada serviço receba suas dependências corretamente, promovendo coesão e facilitando a manutenção.

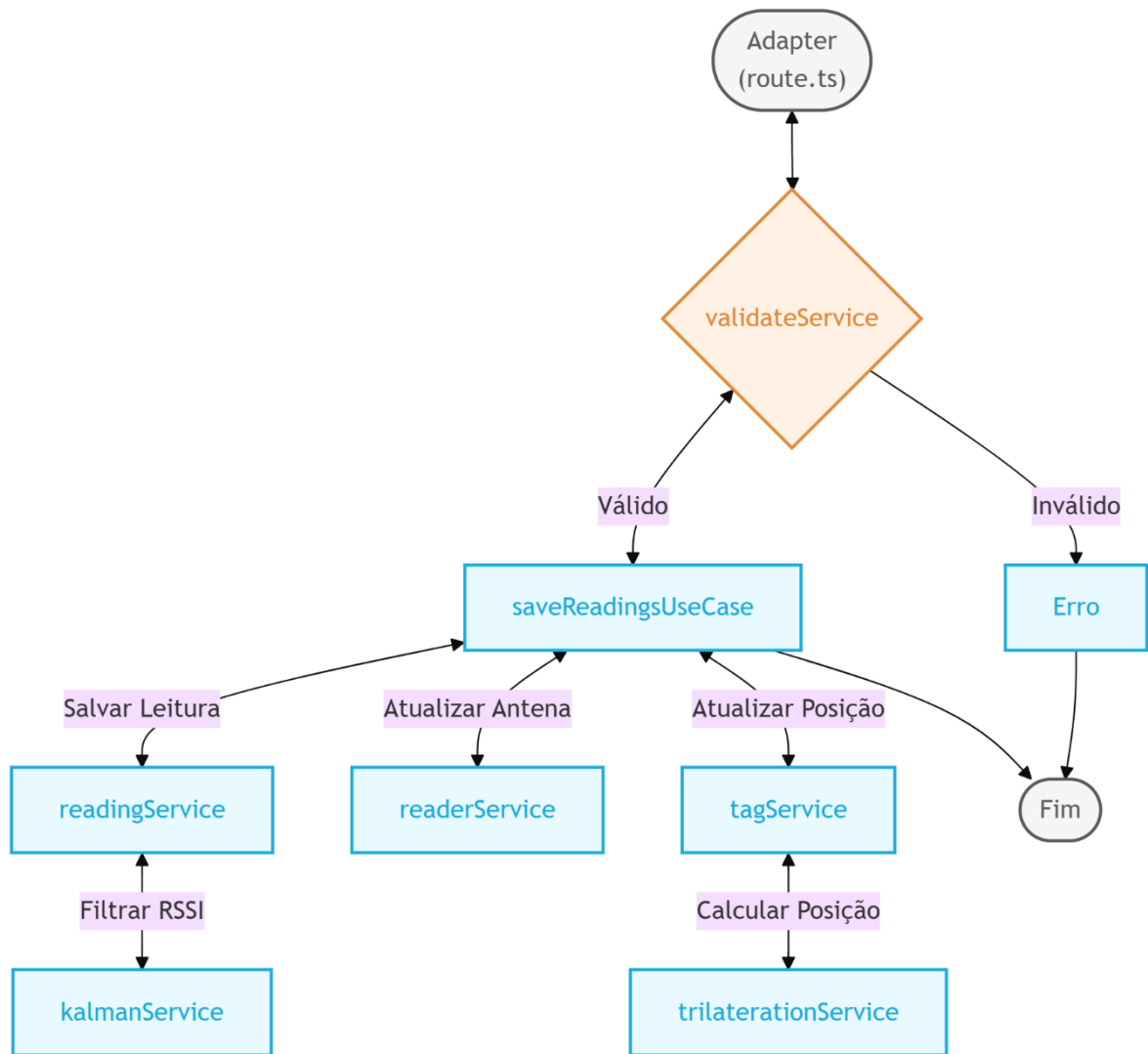


Figura 37 – Fluxograma da interação entre os serviços.