

CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI

ERICH RAMOS BORGES
GABRIEL MARQUES SILVA
OTAVIO MEVES RIBEIRO
ROBERT RIVERA M DA SILVA
VINÍCIUS HENRIQUE SOUZA DE MELO
WESLEY SILVA SANTOS

**ESTUDO SOBRE REDE SEM FIO APLICADA NA GEOLOCALIZAÇÃO DE
AGENTES CIRCULANTES**

São Bernardo do Campo

2025

ERICH RAMOS BORGES
GABRIEL MARQUES SILVA
OTAVIO MEVES RIBEIRO
ROBERT RIVERA M DA SILVA
VINÍCIUS HENRIQUE SOUZA DE MELO
WESLEY SILVA SANTOS

**ESTUDO SOBRE REDE SEM FIO APLICADA NA GEOLOCALIZAÇÃO DE
AGENTES CIRCULANTES**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Centro Universitário FEI,
como parte dos requisitos necessários
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Elétrica. Orientado pelo Prof.
Dr. Marco Antônio Assis de Melo.

São Bernardo do Campo

2025

ERICH RAMOS BORGES
GABRIEL MARQUES SILVA
OTAVIO MEVES RIBEIRO
ROBERT RIVERA M DA SILVA
VINÍCIUS HENRIQUE SOUZA DE MELO
WESLEY SILVA SANTOS

**ESTUDO SOBRE REDE SEM FIO APLICADA NA GEOLOCALIZAÇÃO DE
AGENTES CIRCULANTES**

Trabalho de Conclusão de Curso,
apresentado ao Centro Universitário FEI,
como parte dos requisitos necessários
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Elétrica

Comissão julgadora

Orientador e presidente

Examinador (1)

Examinador (2)

São Bernardo do Campo

2025

AGRADECIMENTOS

Dedicamos este trabalho a todos os membros de nossa família, que nos acompanharam ao longo desta jornada, seja em presença física ou espiritual. Nossa gratidão também se estende aos amigos que, por diferentes motivos, não puderam concluir o curso conosco. A cada um de vocês, nosso reconhecimento e apreço por terem sido parte fundamental de nossa trajetória.

"Os verdadeiros amigos são como diamantes, pedras preciosas e raras. Falsos amigos são como folhas de outono, encontradas em toda parte."

Bruce Lee

RESUMO

A geolocalização desempenha um papel crucial em setores que demandam monitoramento em tempo real, especialmente em ambientes internos, onde tecnologias como o *GPS* enfrentam limitações significativas devido a barreiras físicas e interferências. Este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema de geolocalização baseado em Internet das coisas (*IoT*) para o Metrô de São Paulo, utilizando o microcontrolador ESP32-C6 em conjunto com redes Wi-Fi 6. Diferentemente de abordagens tradicionais que buscam coordenadas geográficas precisas, o sistema identifica zonas de proximidade em relação aos pontos de acesso Wi-Fi, com base em medições da intensidade de sinal (*RSSI*). Essa abordagem privilegia simplicidade, baixo custo e eficiência, sendo adequada às necessidades práticas de monitoramento interno.

A metodologia adotada incluiu etapas de mapeamento ambiental, coleta de dados, definição de zonas de teste e implementação de um sistema *Real-Time Location System (RTLS)*, com visualização em tempo real por meio de bibliotecas em *Python*. A aplicação considerou desafios técnicos, como interferências de sinal e escalabilidade em redes densas, além de aspectos éticos relacionados à privacidade de dados dos funcionários, em conformidade com as diretrizes da Lei Geral de Proteção de Dados (*LGPD*).

Palavras-chave: geolocalização. *IoT*. privacidade. *RSSI*. transporte público. Wi-Fi 6.

ABSTRACT

Geolocation plays a crucial role in sectors that require real-time monitoring, especially in indoor environments, where technologies such as GPS face significant limitations due to physical barriers and interference. This work proposes the development of a geolocation system based on Internet of Things (IoT) for the São Paulo Metro, using the ESP32-C6 microcontroller in conjunction with Wi-Fi 6 networks. Unlike traditional approaches that aim for precise geographic coordinates, the system identifies proximity zones relative to Wi-Fi access points, based on signal strength measurements (RSSI). This approach prioritizes simplicity, low cost, and efficiency, making it suitable for practical indoor monitoring applications.

The methodology included environmental mapping, data collection, definition of test zones, and the implementation of a Real-Time Location System (RTLS), with real-time visualization using Python libraries. The application considered technical challenges such as signal interference and scalability in dense networks, as well as ethical aspects related to employee data privacy, in compliance with Brazil's General Data Protection Law (LGPD).

Keywords: geolocation. IoT. privacy. RSSI. public transportation. Wi-Fi 6.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Dispositivos interconectados em aplicações de localização indoor	26
Figura 2 – Interface inicial do dashboard com mapa da Linha Ouro e status dos dispositivos conectados	28
Figura 3: Interface interativa desenvolvida em Streamlit com mapa da Linha Ouro, status de dispositivos conectados e categorização de agentes por função	30
Figura 4 - Fluxograma do Funcionamento do Projeto	35
Figura 5 - Algoritmo do Microcontrolador.....	36
Figura 6: Diagrama do ambiente de testes com simulação de APs, comunicação MQTT e visualização de dados	38
Figura 7 - Imagem Placa DevKitC-1 ESP-C6 N8	40
Figura 8 - Imagem Bateria Li-Ion 18650 3,7V 2600mAh 2C.....	40
Figura 9 - Carregador Duplo para Bateria Li-Ion 18650.....	41
Figura 10 - Carregador Bateria Lithium 1A com Proteção - USB C -TP4056.....	42
Figura 11 - Conversor step-up (boost) DC-DC – XL6009	43
Figura 12 - Interface desenvolvida através do Eclipse E3.....	44
Figura 13 - Interface principal do software com mapa da Linha Ouro, ícones de localização e painel de filtros.....	45
Figura 14 - Tela de agentes mais próximos ao local do incidente, com distâncias estimadas com base no sinal dos APs	45
Figura 15 - Interface gráfica em Dash, com o local de reportar um novo incidente, incidentes registrados, e mapa da linha do Metrô com a localização de dois dispositivos.	47
Figura 16 - Localização dos dispositivos sendo recebida pela aplicação Python através do MQTT	49
Figura 17 - Interface com dados de localização recebidos.....	50
Figura 18: Modelo lógico da estrutura do banco de dados.....	51
Figura 19: Hardware Projetado	52
Figura 20: Protótipo hardware	52
Figura 21: Protótipo em Protoboard Finalizado	53
Figura 22: Placa de Circuito Impresso	56
Figura 23: Placa de Circuito Impresso e componentes.....	56

Figura 24: Projeto da Case Através do Fusion360	57
Figura 25: Case Finalizado	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Grau de automação e responsabilidades operacionais no transporte metroferroviário	21
Tabela 2 - Lista de Materiais.....	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMQP – Advanced Message Queuing Protocol (Protocolo Avançado de Fila de Mensagens)

AOA – Angle of Arrival (Ângulo de Chegada)

AOD – Angle of Departure (Ângulo de Partida)

API – Application Programming Interface (Interface de Programação de Aplicações)

APs – Access Points (Pontos de Acesso)

BLE – Bluetooth Low Energy (Bluetooth de Baixo Consumo)

BLE Mesh – Bluetooth Low Energy Mesh Networking (Rede Mesh com Bluetooth de Baixo Consumo)

BSSID – Basic Service Set Identifier (Identificador de Conjunto de Serviço Básico)

CCO – Centro de Controle Operacional

CSS – Cascading Style Sheets (Folhas de Estilo em Cascata)

DF – Direction-Finding (Determinação de Direção)

ESP-IDF – Espressif IoT Development Framework (Framework de Desenvolvimento IoT da Espressif)

FEI – Fundação Educacional Inaciana Padre Saboia de Medeiros

GPIO – General-Purpose Input/Output (Entrada/Saída de Uso Geral)

GPS – Global Positioning System (Sistema de Posicionamento Global)

GUI – Graphical User Interface (Interface Gráfica de Usuário)

HTML – HyperText Markup Language (Linguagem de Marcação de Hipertexto)

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos)

IoT – Internet of Things (Internet das Coisas)

KNN – K-Nearest Neighbors (K-Vizinhos Mais Próximos)

LGPD – Lei Geral de Proteção de Dados

MAC – Media Access Control (Controle de Acesso ao Meio)

MIMO – Multiple Input Multiple Output (Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas)

MISO – Multiple Input Single Output (Múltiplas Entradas e Uma Saída)

MQTT – Message Queuing Telemetry Transport (Transporte de Telemetria com Enfileiramento de Mensagens)

MQTT Broker – Message Queuing Telemetry Transport Broker (Servidor Distribuidor MQTT)

MUSIC – Multiple Signal Classification (Classificação de Sinais Múltiplos)

NLOS – Non-Line of Sight (Sem Linha de Visada Direta)

OLED – Organic Light-Emitting Diode (Diodo Emissor de Luz Orgânico)

OPEX – Operational Expenditure (Despesas Operacionais)

PCB – Printed Circuit Board (Placa de Circuito Impresso)

PHY – Physical Layer (Camada Física)

PIMS – Plant Information Management System (Sistema de Gerenciamento de Informações da Planta)

QoS – Quality of Service (Qualidade de Serviço)

RISC-V – Reduced Instruction Set Computing – V (Computação com Conjunto Reduzido de Instruções – Versão V)

RSSI – Received Signal Strength Indicator (Indicador de Intensidade do Sinal Recebido)

RTLS – Real-Time Location System (Sistema de Localização em Tempo Real)

SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition (Supervisão e Aquisição de Dados)

SDK – Software Development Kit (Kit de Desenvolvimento de Software)

SRAM – Static Random Access Memory (Memória RAM Estática)

SSID – Service Set Identifier (Identificador de Conjunto de Serviço)

STA – Station Mode (Modo Estação)

TCC – Trabalho de Conclusão de Curso

TCP/IP – Transmission Control Protocol/Internet Protocol (Protocolo de Controle de Transmissão/Protocolo de Internet)

TDOA – Time Difference of Arrival (Diferença de Tempo de Chegada)

TLS – Transport Layer Security (Segurança da Camada de Transporte)

TOA – Time of Arrival (Tempo de Chegada)

USB-C – Universal Serial Bus Type-C (Barramento Universal do Tipo C)

UTO – Unattended Train Operation (Operação de Trem Não Tripulado)

VPNs – Virtual Private Network (Rede Virtual Privada)

WPA – Wi-Fi Protected Access (Acesso Wi-Fi Protegido)

WSN – Wireless Sensor Network (Rede de Sensores sem Fio)

Wi-Fi – Wireless Fidelity (Fidelidade Sem Fio)

PCB – Printed Circuit Board (Placa de Circuito Impresso)

LISTA DE SÍMBOLOS

dBm – Decibéis por miliwatt

μA – Microampère

MHz – Mega-hertz

MB – Megabyte

d – Distância

n – Expoente de percurso, variável conforme o ambiente

C – Constante que representa perdas adicionais, como atenuação por barreiras

P_t – Potência transmitida pelo ponto de acesso

$\text{Pr}(d)$ – Potência recebida no dispositivo

x, y – Coordenadas cartesianas

$(\hat{x}_k | k - 1)$ – Estado no instante k (posição e velocidade)

A – Matriz de transição de estado, que relaciona estados consecutivo

Δt – É o intervalo de tempo entre medições

B – Matriz de controle, que relaciona entradas externas (u_k) ao estado

u_k – Entrada de controle, como aceleração

C – Velocidade da luz

mAh – Miliampere-hora

V – Volts

C – Coulombs

GHz – Gigahertz

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 REVISÃO DA LITERATURA	13
2.1 CONCEITOS DE GEOLOCALIZAÇÃO	13
2.2 REDES WI-FI E GEOLOCALIZAÇÃO	14
2.2.1 Estrutura Básica de uma Rede Wi-Fi	14
2.2.2 Identificação de Acess Point	15
2.2.3 Influência do Ambiente na Localização	16
2.3 MODELOS MATEMÁTICOS E ESTATÍSTICOS EM GEOLOCALIZAÇÃO	17
2.3.1 Mapeamento do Ambiente	17
2.3.2 Coleta de Dados RSSI	18
2.4 PRIVACIDADE DO USUÁRIO DO SISTEMA	18
2.5 AUTOMAÇÃO NÍVEL GOA4 E SUA RELAÇÃO COM SISTEMAS DE GEOLOCALIZAÇÃO NO METRÔ	19
2.6 IOT E GEOLOCALIZAÇÃO	21
2.6.1 O Papel da Geolocalização em Sistemas IoT	22
2.6.1.2 Tecnologias para Geolocalização em Ambientes Internos	22
2.6.1.3 Aplicações de Geolocalização em Emergências	23
2.6.1.4 Desafios na Implementação de Geolocalização	23
2.7 ESP32 – C6: HARDWARE E FUNCIONALIDADES	24
2.7.1 Características Técnicas	24
2.7.2 Funções de Geolocalização do ESP32	25
2.7.3 Protocolos Suportados	26
2.8 SOFTWARES E TECNOLOGIAS AUXILIARES	27
2.8.1 Ferramentas e Bibliotecas do ESP32-C6 para WI-FI	29
2.8.2 Biblioteca Streamlit do Python	29
2.8.3 Biblioteca Dash do Python	31

2.8.4 Broker Mosquitto.....	31
2.8.4 Elipse Software.....	32
2.8.5 Sistema SCADA vs. PIMS	33
3 METODOLOGIA	34
3.1 ALGORITMO DO DISPOSITIVO.....	35
3.2 MQTT BROKER.....	36
3.3 ABORDAGEM UTILIZADA.....	36
3.4 AMBIENTES DE TESTE E REDES IOT.....	37
3.5 AMBIENTES DE TESTE E REDE.....	38
3.6 LISTA DE MATERIAIS	39
3.7 TESTES DO SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO DO SISTEMA IOT	43
3.7.1 Sistema de Monitoramento da Geolocalização	43
3.7.2 Testes do sistema para verificação de erros	48
3.7.3 Estrutura do Banco de Dados SQL.....	50
3.7.4 Protótipo do Dispositivo de Geolocalização.....	51
3.8 HARDWARE	53
3.8.1.1 ESTIMATIVA DE AUTONOMIA ENERGÉTICA	54
3.8.2 Montagem do hardware	55
CONCLUSÃO.....	58
REFERÊNCIAS.....	60
APÊNDICE A- REPOSITÓRIO DO PROJETO NO GITHUB.....	65

1 INTRODUÇÃO

A geolocalização tem se consolidado como uma tecnologia essencial em diversos setores da sociedade moderna, oferecendo soluções para rastreamento de ativos, monitoramento de pessoas, logística, segurança e automação de processos. A capacidade de identificar a localização de um dispositivo em tempo real possibilita uma série de aplicações críticas, tanto em ambientes externos quanto internos. Com o avanço das tecnologias de comunicação sem fio e a disseminação de dispositivos conectados, especialmente no contexto da Internet das Coisas (IoT), os sistemas de localização têm evoluído significativamente em termos de precisão, escalabilidade e viabilidade operacional (YANG et al., 2021).

Entretanto, a aplicação de geolocalização em ambientes internos – como edifícios, túneis e estações de metrô envolve desafios técnicos específicos relacionados à propagação de sinais em cenários complexos. A presença de barreiras físicas, como paredes e estruturas metálicas, a ocorrência de múltiplos caminhos de reflexão, a interferência eletromagnética entre dispositivos e a ausência de linha de visada direta com satélites tornam ineficazes soluções convencionais baseadas em GPS. Para contornar essas limitações, têm sido adotadas abordagens alternativas que utilizam redes sem fio, como Wi-Fi e Bluetooth Low Energy (BLE), associadas a algoritmos de estimação de posição. Esses sistemas normalmente se baseiam em indicadores como o Received Signal Strength Indicator (RSSI) para estimar a distância entre dispositivos e pontos de acesso, podendo ainda ser otimizados por meio de técnicas de aprendizado de máquina (PAULO, 2018; MANIKANDAN, 2023).

Neste contexto, este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema de localização indoor com foco na operação do Metrô de São Paulo, utilizando o microcontrolador ESP32-C6 como núcleo computacional. O objetivo é permitir o monitoramento da posição de funcionários dentro das instalações metroviárias, fornecendo informações de localização com base na zona de proximidade dos dispositivos em relação aos Access Points (APs) da rede Wi-Fi. Ao invés de estimar coordenadas exatas, a proposta se concentra em identificar em qual região ou zona o agente se encontra, o que é suficiente para fins operacionais e oferece uma abordagem mais simples, eficiente e economicamente viável.

A escolha do ESP32-C6 justifica-se por suas características técnicas avançadas, incluindo suporte a Wi-Fi 6, arquitetura RISC-V, baixo consumo energético e compatibilidade com protocolos modernos de comunicação, como MQTT. Além disso, sua capacidade de varredura ativa de redes permite a coleta periódica de dados de RSSI e BSSID, que são utilizados para inferir a localização aproximada. A infraestrutura existente da rede Wi-Fi do metrô pode ser aproveitada para o funcionamento do sistema, eliminando a necessidade de grandes investimentos em novas tecnologias.

Este trabalho está estruturado para apresentar, inicialmente, os fundamentos teóricos da geolocalização indoor e as limitações dos métodos convencionais. Em seguida, são descritas as tecnologias utilizadas, o projeto de hardware, a modelagem do sistema e os procedimentos de implementação. Por fim, são discutidos os resultados obtidos por meio de testes práticos, os desafios enfrentados durante o desenvolvimento e as possibilidades de aprimoramento e expansão da solução para outras aplicações em mobilidade urbana e logística operacional.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 CONCEITOS DE GEOLOCALIZAÇÃO

Os serviços baseados em localização desempenham um papel relevante nas pesquisas voltadas ao desenvolvimento de ferramentas para o controle de processos que exigem informações espaciais em tempo real. Segundo a revisão de literatura realizada por Yang et al. (2021), os estudos mais recentes têm proposto diversos esquemas e sistemas de posicionamento com o objetivo de viabilizar soluções eficientes em serviços baseados em localização.

Os sistemas de geolocalização podem ser classificados em duas grandes categorias: internos e externos. Essa distinção está associada às diferentes necessidades operacionais, sendo que suas aplicações se estendem desde ambientes comerciais e industriais até sistemas de transporte, como o metrô. No entanto, os sistemas internos apresentam maior complexidade técnica, especialmente no que se refere à obtenção de precisão adequada para ambientes fechados. De acordo com (YANG et al., 2021), essa limitação exige abordagens específicas para contornar os obstáculos típicos desses cenários.

O estudo conduzido por Sophia et al. (2021) reforça essa questão ao destacar que o *Global Positioning System* (GPS), embora altamente eficiente em ambientes externos, apresenta baixa eficácia em locais fechados, onde obstáculos físicos comprometem a propagação do sinal. Para mitigar essas deficiências, o estudo propôs a utilização da tecnologia *Bluetooth Low Energy* (BLE), implementando um sistema de localização com o microcontrolador ESP32-NodeMCU. O objetivo foi superar as restrições impostas à penetração do sinal GPS em estruturas sólidas, característica comum em espaços internos.

Atualmente, não há um consenso sobre qual tecnologia oferece o melhor desempenho para localização indoor. Contudo, os sistemas baseados em Wi-Fi apresentam ampla difusão e têm sido incentivados por sua capacidade de aproveitamento da infraestrutura já existente em ambientes públicos (MANIKANDAN, 2023). Nesse contexto, Manikandan (2023) avaliou a viabilidade de um protótipo baseado no módulo ESP8266, um dos mais utilizados em aplicações de *IoT*, aliado à técnica de *Received Signal Strength Indicator* (RSSI), para realizar leituras de sinal em ambientes fechados com o objetivo de determinar a posição de dispositivos.

Para que um sistema de localização indoor seja funcional e aplicável, Paulo (2018) destaca a importância de que ele seja preciso, de baixo custo, modular e facilmente replicável em diferentes ambientes. O autor ainda descreve diversas abordagens utilizadas nesse tipo de sistema, como *Time of Arrival* (TOA), *Time Difference of Arrival* (TDOA), *RSSI* e *Dead Reckoning*, além de métodos baseados em *Motion Fingerprint* e *Signal Fingerprint*, frequentemente associados a algoritmos de *machine learning*. Essas técnicas utilizam dados de Wi-Fi, *Bluetooth* e sensores embarcados, como acelerômetros, giroscópios e magnetômetros, para melhorar a precisão do rastreamento.

As soluções de localização interna podem ser divididas em dois grupos principais: com dispositivos e sem dispositivos. Nas soluções baseadas em dispositivos, o objeto ou indivíduo monitorado carrega um equipamento de comunicação, como um *smartphone* ou sensor dedicado, que se comunica com os *Access Points* (APs) distribuídos no ambiente. Essa abordagem é especialmente eficaz em cenários controlados, nos quais o dispositivo pode ser previamente fornecido ao usuário, garantindo maior precisão (PAULO, 2018).

Em contrapartida, soluções sem dispositivos são ideais para casos em que não é possível acoplar nenhum equipamento à pessoa ou objeto monitorado. Exemplos comuns incluem o rastreamento de idosos, proteção da fauna silvestre, detecção de intrusos e resposta a emergências. Nesses casos, a localização é realizada por meio da análise das alterações no padrão de propagação do sinal causadas pelo movimento no ambiente, dispensando a presença de sensores junto ao alvo monitorado (PAULO, 2018).

2.2 REDES WI-FI E GEOLOCALIZAÇÃO

2.2.1 Estrutura Básica de uma Rede Wi-Fi

As redes Wi-Fi operam com base na especificação do *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) 802.11, que define os parâmetros e protocolos necessários para uma comunicação sem fio eficiente. Em uma rede Wi-Fi estruturada, dispositivos como *laptops*, *smartphones* e *tablets* conectam-se a *Access Points* (APs), que funcionam como intermediários, transmitindo dados por meio de sinais de rádio para a rede cabeada. Os APs constituem elementos centrais da infraestrutura,

permitindo que múltiplos dispositivos acessem simultaneamente os serviços da rede (MOURA, 2007).

A troca de informações ocorre por meio da transmissão de pacotes de dados que seguem os protocolos definidos nas camadas *Physical Layer* (PHY) e *Media Access Control* (MAC), assegurando uma comunicação bidirecional eficiente e confiável entre os dispositivos e os APs. Essa comunicação utiliza dois identificadores fundamentais: o *Service Set Identifier* (SSID), responsável por nomear a rede de forma visível ao usuário, e o *Basic Service Set Identifier* (BSSID), que identifica unicamente cada AP com base em seu endereço MAC. Ambos são essenciais para a configuração, manutenção e autenticação da conexão (MOURA, 2007).

2.2.2 Identificação de Access Point

O *Basic Service Set Identifier* (BSSID) é um identificador único utilizado em redes Wi-Fi para representar um *Access Point* (AP). Derivado do endereço *Media Access Control* (MAC) do AP, esse identificador desempenha papel fundamental na comunicação em redes sem fio. De acordo com o padrão IEEE 802.11, o BSSID é essencial para a estruturação e manutenção da rede, pois permite que os dispositivos conectados reconheçam e interajam com um ponto de acesso específico, mesmo quando há múltiplos APs operando na mesma rede (MOURA, 2007).

A principal função do BSSID é garantir que um dispositivo se conecte ao AP apropriado, o qual é responsável pela distribuição dos sinais de rádio que viabilizam a comunicação entre os dispositivos móveis e a infraestrutura cabeada da rede. Cada AP transmite um sinal único, sendo o BSSID associado a esse sinal o elemento que permite localizar precisamente o ponto de acesso dentro de um determinado ambiente (MOURA, 2007).

Nos sistemas de localização em tempo real baseados em redes Wi-Fi, o BSSID assume um papel ainda mais relevante. Quando utilizado em conjunto com o *Received Signal Strength Indicator* (RSSI), torna-se possível estimar a posição de um dispositivo móvel por meio de técnicas como a triangulação.

O RSSI indica a intensidade do sinal recebido de cada AP e, ao ser correlacionado com a posição conhecida desses pontos de acesso, possibilita o cálculo da localização aproximada do dispositivo (MOURA, 2007). Essa abordagem é amplamente utilizada em ambientes internos, onde a aplicação de tecnologias como

o GPS é inviável devido à presença de barreiras físicas, como estruturas metálicas ou túneis realidade comum em sistemas de transporte público e instalações industriais.

A combinação entre BSSID e RSSI é explorada em diversas técnicas de geolocalização indoor, permitindo rastreamento de dispositivos com elevado grau de precisão. Os dados obtidos por esses parâmetros são utilizados em modelos de mapeamento espacial, viabilizando a navegação em ambientes com infraestrutura Wi-Fi densa e a localização eficiente de objetos ou pessoas. Assim, o BSSID passa a ser um elemento central não apenas para a comunicação de rede, mas também para sistemas de localização em tempo real (MOURA, 2007).

2.2.3 Influência do Ambiente na Localização

A RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) é uma das principais métricas utilizadas em sistemas de localização com base em Wi-Fi, sendo altamente sensível ao ambiente em que opera. Ambientes internos apresentam desafios relevantes para essa tecnologia, sobretudo pela presença de barreiras físicas que afetam a propagação do sinal. Segundo Moura (2007), diversos fatores impactam diretamente a precisão da medição da RSSI, como:

- **Paredes e divisórias:** Materiais como concreto e metal podem atenuar significativamente o sinal, criando incertezas nas leituras. Essa atenuação varia conforme a espessura e a composição do material; por exemplo, paredes de concreto ou metal podem reduzir o sinal em até 20 dBm, enquanto estruturas de vidro ou madeira geram perdas menores, mas ainda relevantes;
- **Mobiliário e presença humana:** Objetos diversos e corpos humanos absorvem ou dispersam os sinais de rádio, ocasionando variações de até 10 dBm na intensidade do sinal, comprometendo a confiabilidade da leitura;
- **Condições ambientais:** Umidade, temperatura e interferência eletromagnética de outros equipamentos eletrônicos também alteram a propagação do sinal. Experimentos demonstram que, mesmo em dispositivos estacionários, a RSSI pode variar até 15 dBm devido a essas influências externas.

Um fator crítico associado à propagação do sinal em ambientes fechados é a ocorrência de *Non-Line of Sight* (NLOS). Nessa condição, o sinal não percorre um caminho direto entre o ponto de acesso (AP) e o dispositivo receptor, sendo desviado por obstáculos físicos, o que gera múltiplos percursos e reflexões. Essa situação

dificulta a correlação entre a intensidade do sinal e a distância real ao AP, podendo ocasionar erros de localização de até 7 metros, dependendo da metodologia e da acurácia do sistema utilizado (MOURA, 2007).

2.3 MODELOS MATEMÁTICOS E ESTATÍSTICOS EM GEOLOCALIZAÇÃO

A geolocalização em ambientes internos impõe desafios adicionais devido à presença de barreiras físicas, superfícies reflexivas e interferências causadas por dispositivos eletrônicos. Nessas condições, a propagação do sinal geralmente ocorre em regime NLOS, em que o caminho direto entre o transmissor e o receptor é obstruído, resultando em múltiplos percursos devido à reflexão, difração e atenuação do sinal. Esse fenômeno compromete a acurácia das estimativas de localização e exige o uso de modelos matemáticos e estatísticos que considerem tais distorções para melhorar a confiabilidade dos sistemas de posicionamento (PAHLAVAN; LI; MAKELA, 2002).

2.3.1 Mapeamento do Ambiente

A etapa inicial do projeto consiste no mapeamento detalhado do ambiente de testes, conforme as diretrizes metodológicas propostas por Moura (2007). Esta fase é fundamental para garantir a confiabilidade das medições de sinal e a consistência dos modelos de localização aplicados.

O mapeamento envolve as seguintes atividades:

- Identificação dos pontos de acesso Wi-Fi disponíveis no ambiente;
- Análise das barreiras físicas, como paredes, divisórias, mobiliário e estruturas metálicas, que possam provocar atenuação, reflexão ou difração do sinal;
- Delimitação das zonas de teste, com a definição de coordenadas georreferenciadas específicas para a coleta de dados de intensidade de sinal.

Essas informações permitem configurar modelos de propagação mais aderentes à realidade do ambiente, ajustando variáveis como o expoente de perda de percurso (η) e as perdas adicionais (C), que representam as atenuações associadas a obstáculos físicos, conforme identificado durante a análise do espaço.

2.3.2 Coleta de Dados RSSI

A coleta de dados será realizada utilizando o ESP32-C6, que registra o RSSI nos pontos de teste delimitados. A distância (d) entre o ponto de acesso e o dispositivo é calculada utilizando a equação de perda de percurso em espaço livre:

$$d = 10^{\left(\frac{Pt - Pr(d) + C}{10 \cdot n}\right)} \quad (1)$$

Onde:

P_t : potência transmitida pelo ponto de acesso;

$Pr(d)$: potência recebida no dispositivo;

n : expoente de perda de percurso, variável conforme o ambiente;

C : constante que representa perdas adicionais, como atenuação por barreiras.

Exemplo teórico:

Se $P_t = -40 \text{ dBm}$, $Pr(d) = -80 \text{ dBm}$, $n = 2$ e $C = 3$, a distância estimada seria:

$$d = 10^{\left(\frac{-40 - (-80) + 3}{10 \cdot 2}\right)} = 141.25 \text{ metros.}$$

2.4 PRIVACIDADE DO USUÁRIO DO SISTEMA

A adoção de sistemas de rastreamento no ambiente metroviário suscita discussões importantes sobre o equilíbrio entre segurança operacional e privacidade individual. Em especial, o rastreamento de funcionários configura-se como uma medida sensível, devendo ser avaliada com cautela, sobretudo em sistemas tradicionais de transporte, nos quais há operadores embarcados. Nesses contextos, o monitoramento constante pode ser interpretado como uma violação da privacidade dos trabalhadores, o que dificulta sua aceitação ética e legal.

Entretanto, em linhas totalmente automatizadas, como aquelas classificadas no nível *Unattended Train Operation (UTO)*, a ausência de operadores a bordo transforma o rastreamento de pessoal em uma necessidade operacional. Nesse cenário, a geolocalização de agentes assume um papel estratégico para garantir a segurança dos usuários e a eficiência na resposta a situações emergenciais.

A segurança, portanto, prevalece sobre a privacidade em circunstâncias críticas, como falhas técnicas, eventos clínicos ou riscos à integridade física de passageiros e funcionários. O monitoramento em tempo real possibilita a rápida mobilização de equipes treinadas, reduzindo o tempo de resposta e contribuindo para o gerenciamento de ocorrências de maneira eficaz e coordenada.

Ainda assim, é fundamental que o rastreamento seja restrito aos profissionais cuja função demanda atuação direta em emergências. A implementação dessa medida deve seguir critérios bem definidos, com base em justificativas técnicas e operacionais que garantam o uso proporcional e legítimo da informação.

O sistema proposto, portanto, não deve ser interpretado como uma ferramenta de vigilância constante, mas sim como um recurso técnico voltado exclusivamente à segurança em contextos específicos. O respeito à privacidade dos funcionários deve ser assegurado mediante transparência nos procedimentos, consentimento quando aplicável e conformidade com a *Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais* (Lei n.º 13.709/2018). Dessa forma, é possível promover a segurança sem comprometer os direitos individuais dos profissionais envolvidos.

2.5 AUTOMAÇÃO NÍVEL GOA4 E SUA RELAÇÃO COM SISTEMAS DE GEOLOCALIZAÇÃO NO METRÔ

A operação no modo *Unattended Train Operation (UTO)*, correspondente ao Grau de Automação 4 (*GoA4*), representa o estágio mais avançado da automação metroferroviária, caracterizado pela completa ausência de operadores a bordo. Essa configuração visa garantir máxima eficiência, redução de custos operacionais e elevação dos padrões de segurança, permitindo que todas as funções críticas — como partida, parada, aceleração, frenagem e resposta a falhas leves — sejam executadas automaticamente por sistemas computacionais centralizados (BORLONI; COPCHE; SANTOS, 2019).

A adoção do *GoA4* tem se mostrado especialmente vantajosa em linhas de alta demanda, como as existentes em grandes metrópoles, pois possibilita o aumento da frequência dos trens, maior flexibilidade operacional e redução de falhas humanas. Contudo, a ausência de operadores torna indispensável a implantação de soluções tecnológicas complementares, capazes de assegurar a segurança tanto dos passageiros quanto dos trabalhadores. Nesse cenário, os sistemas de geolocalização

em tempo real surgem como ferramentas fundamentais para manter uma supervisão eficaz das atividades operacionais.

Em sistemas *GoA4*, os trens são monitorados por um Centro de Controle Operacional (CCO), responsável por gerenciar remotamente todas as funções do sistema. Tecnologias de geolocalização são integradas a essa estrutura para permitir a identificação instantânea da posição de funcionários e ativos em áreas operacionais como túneis, plataformas, salas técnicas e via permanente assegurando que a equipe mais próxima e capacitada seja acionada em situações emergenciais.

De acordo com Borloni, Copche e Santos (2019), os sistemas *GoA4* requerem soluções de rastreamento que atendam a níveis elevados de integridade e disponibilidade, como os exigidos pela certificação de segurança *S/L 4*. A localização precisa dos colaboradores é um fator determinante para reduzir o tempo de resposta a falhas, otimizar rotinas de manutenção e permitir uma atuação imediata em ocorrências.

Além disso, conforme demonstrado por Kyriakidis, Happee e De Winter (2015), mesmo em sistemas altamente automatizados, as interações entre operadores humanos e a infraestrutura técnica continuam sendo elementos críticos. A capacidade de coordenar remotamente as ações de campo, com base em dados de geolocalização transmitidos ao CCO, contribui para manter os níveis exigidos de segurança e operacionalidade em contextos urbanos complexos como o sistema metropolitano.





Em termos de redundância e segurança, os sistemas no nível *GoA4* são projetados para cumprir os mais altos padrões de confiabilidade, incorporando redundância em componentes críticos e tecnologias como portas de plataforma para a proteção de passageiros e funcionários. Além disso, apresentam menor *Operational Expenditure (OPEX)* aproximadamente 10% inferior devido à eliminação de operadores embarcados, à otimização do uso de energia e à adoção de estratégias de manutenção preditiva. A flexibilidade operacional inerente a esse modelo permite ajustes ágeis frente a variações na demanda, como aumento de frequência em horários de pico ou resposta a interrupções inesperadas.

A automação em *GoA4* depende fortemente da integração de tecnologias avançadas, como sensores, redes de *IoT* e algoritmos de geolocalização. Esses recursos desempenham papel central no monitoramento e na gestão da localização

não apenas dos trens, mas também de agentes de campo e ativos críticos, sobretudo em emergências, manutenção e atendimento ao cliente (BORLONI; COPCHE; SANTOS, 2019).

Conforme relatado pela AEAMESP (2016), o Metrô de São Paulo já avalia a implementação de sistemas destinados à detecção de interferências na via, o que reforça a relevância da localização precisa de equipes de manutenção e operação. Ocorrências como falhas elétricas, presença de objetos na via ou emergências médicas exigem uma resposta ágil, e a alocação eficiente da equipe mais próxima pode ser decisiva para a contenção de incidentes e a preservação da segurança operacional.

Tabela 1 - Grau de automação e responsabilidades operacionais no transporte metroferroviário

Grau de Automação	Tipo de Operação do Trem	Partida do Trem	Parada do Trem	Fechamento das Portas	Operação em Caso de Interrupção
GoA1 	ATP com condutor	Condutor	Condutor	Condutor	Condutor
GoA2 	ATP e ATO* com condutor	Automática	Condutor	Condutor	Condutor
GoA3 	Sem condutor	Automática	Automática	Assistente de Trem	Assistente de Trem
GoA4 	UTO (Operação Totalmente Automática)	Automática	Automática	Automático	Automático

Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

2.6 IOT E GEOLOCALIZAÇÃO

A integração entre dispositivos *IoT* e sistemas de geolocalização no Metrô de São Paulo representa uma solução estratégica para aprimorar o desempenho das operações, aumentar a segurança e melhorar o atendimento ao público. Com o auxílio da geolocalização em tempo real, é possível estabelecer uma comunicação ágil entre os dispositivos conectados, facilitando a identificação rápida da localização de funcionários e permitindo sua mobilização para situações emergenciais.

Diante da dinâmica dos ambientes metroviários, onde tempo e precisão são fatores críticos, a adoção de sistemas que identifiquem com exatidão a posição dos

agentes operacionais contribui significativamente para o atendimento de ocorrências, otimização de recursos e aprimoramento da experiência dos usuários.

2.6.1 O Papel da Geolocalização em Sistemas IoT

Em sistemas IoT, a geolocalização vai além da simples obtenção de coordenadas geográficas. Ela permite monitorar dinamicamente a posição relativa de dispositivos e agentes, o que é fundamental para a resposta a ocorrências em tempo real e para a otimização de recursos em ambientes de alta complexidade.

A tecnologia Wi-Fi 6, amplamente difundida e compatível com a infraestrutura já existente no metrô, possibilita a identificação de zonas de cobertura com base na intensidade do sinal. Essa abordagem, empregada neste projeto, elimina a necessidade de sensores adicionais ou métodos de trilateração, reduzindo os custos e a complexidade de implantação.

Embora outras tecnologias, como o Bluetooth Low Energy (BLE), sejam aplicáveis a sistemas de localização indoor, sua utilização foi aqui limitada a fins comparativos. A escolha pela rede Wi-Fi se justifica pela robustez da cobertura, compatibilidade e simplicidade operacional, fatores essenciais em um ambiente de transporte público.

2.6.1.2 Tecnologias para Geolocalização em Ambientes Internos

A geolocalização indoor enfrenta obstáculos técnicos, como a atenuação de sinal e a presença de múltiplos caminhos de propagação, que dificultam a aplicação de sistemas baseados em GPS. Como alternativa, o uso de redes Wi-Fi com análise de RSSI tem se mostrado eficaz.

Neste trabalho, adotou-se um modelo baseado na comparação da intensidade de sinal (RSSI) de múltiplos pontos de acesso, utilizando o microcontrolador ESP32-C6. A lógica de associação ao ponto com sinal predominante e envio do BSSID do ponto de acesso de rede conectado demonstrou ser funcional para determinar a zona de atuação do agente em tempo real, sem a necessidade de algoritmos complexos.

Soluções híbridas que integram Wi-Fi e BLE são comuns em outros contextos, mas os resultados obtidos neste projeto indicam que a estrutura baseada exclusivamente em Wi-Fi 6 é suficiente para garantir precisão e estabilidade

necessárias, mantendo baixo consumo energético dos dispositivos e maior economia, uma vez que utiliza a infraestrutura já existente.

2.6.1.3 Aplicações de Geolocalização em Emergências

A identificação da localização de agentes em tempo real é essencial para a resposta rápida a eventos operacionais em sistemas de transporte público. O sistema desenvolvido neste trabalho possibilita, por meio da integração entre o microcontrolador ESP32-C6, redes Wi-Fi 6 e o protocolo MQTT, a detecção automática dos dispositivos mais próximos de uma ocorrência reportada, otimizando a alocação de recursos e a mobilização de agentes em campo.

Essa funcionalidade foi implementada no ambiente de testes e está descrita na seção 3.7.1, na qual se demonstram, com base em dados reais recebidos via MQTT, os painéis interativos desenvolvidos com as bibliotecas Dash e Streamlit. Tais dashboards permitem a visualização da posição dos agentes em tempo real sobre o mapa da linha metroviária e a identificação imediata do agente mais próximo de um incidente, conforme ilustrado na Figura 13.

Essa abordagem proporciona um suporte decisório mais ágil e assertivo ao Centro de Controle Operacional (CCO), contribuindo significativamente para o aumento da eficiência operacional, especialmente em emergências, falhas técnicas ou incidentes clínicos.

2.6.1.4 Desafios na Implementação de Geolocalização

A principal dificuldade na aplicação de geolocalização no ambiente metroviário está relacionada às barreiras físicas e à interferência do sinal em túneis e estações subterrâneas. No entanto, a adoção do Wi-Fi 6 e a escolha de um sistema baseado em RSSI permitiram uma comunicação estável e eficiente mesmo nesses cenários adversos.

Além disso, a questão da privacidade foi considerada desde a concepção do projeto. O sistema limita o rastreamento a emergências ou manutenção, e os dados transmitidos são protegidos por autenticação e criptografia, em conformidade com a Lei Geral de Proteção de Dados (LGPD). Assim, a segurança da informação e o respeito aos direitos dos funcionários são garantidos.

A solução proposta apresenta, portanto, uma arquitetura escalável, de baixo custo e compatível com a realidade técnica do transporte público. Sua aplicação prática permite ganhos reais em agilidade, segurança e eficiência operacional, sendo uma alternativa viável para modernização da gestão em tempo real de agentes de campo.

2.7 ESP32 – C6: HARDWARE E FUNCIONALIDADES

2.7.1 Características Técnicas

O ESP32-C6 é um microcontrolador de baixo consumo desenvolvido pela Espressif Systems, projetado para aplicações em Internet das coisas (IoT), com foco em conectividade sem fio de última geração e eficiência energética. Suas características o tornam especialmente apropriado para sistemas de localização em tempo real, como o proposto neste trabalho.

O chip integra conectividade Wi-Fi 6 (802.11ax), operando na faixa de 2,4 GHz, com compatibilidade retroativa com os padrões anteriores (Wi-Fi 4 – 802.11n e Wi-Fi 3 – 802.11g). A tecnologia Wi-Fi 6 oferece maior desempenho em ambientes com alta densidade de dispositivos, como estações de metrô, ao garantir comunicação mais confiável, menor latência e melhor aproveitamento energético — requisitos essenciais para aplicações embarcadas em redes intensivas (ESPRESSIF SYSTEMS, 2023).

Além disso, o ESP32-C6 possui núcleo de processamento baseado na arquitetura RISC-V, com largura de dados de 32 bits e frequência de até 160 MHz. A memória interna é composta por 320 KB de ROM e 512 KB de SRAM, com suporte a memória flash externa. O dispositivo disponibiliza até 30 GPIOs programáveis (a depender do encapsulamento), além de interfaces como ADCs de 12 bits, UART, SPI, I2C, I2S e PWM, bem como sensores embarcados, como o medidor de temperatura (ESPRESSIF SYSTEMS, 2023).

Outro diferencial é o suporte a modos de economia de energia, como *Light Sleep* e *Deep Sleep*, que permitem reduzir drasticamente o consumo de corrente durante períodos de inatividade. No modo *Deep Sleep*, por exemplo, o microcontrolador pode operar com corrente inferior a 10 μ A, o que o torna adequado para aplicações alimentadas por bateria, com baixa necessidade de manutenção (ESPRESSIF SYSTEMS, 2023).

A Figura 5 apresenta o modelo DevKitC-1 ESP32-C6 N8 utilizado neste projeto, evidenciando seu encapsulamento compacto e os principais componentes disponíveis para prototipagem.

Esses recursos tornam o ESP32-C6 uma base tecnológica robusta e eficiente para sistemas embarcados de geolocalização, possibilitando a coleta contínua de dados com confiabilidade e autonomia energética em ambientes operacionais complexos.

2.7.2 Funções de Geolocalização do ESP32

O ESP32-C6 possui um *Software Development Kit* (SDK), o Espressif IoT Development Framework (ESP-IDF), oferecem funcionalidades voltadas à implementação de sistemas de localização indoor.

Esses recursos permitem que o dispositivo obtenha informações relevantes para estimar sua posição em tempo real em ambientes internos, como:

Identificação de pontos de acesso (APs): o ESP32-C6 pode escanear redes Wi-Fi disponíveis e registrar informações como SSID, BSSID e Received Signal Strength Indicator (RSSI). A intensidade do sinal RSSI de cada ponto de acesso é utilizada para estimar a proximidade entre o dispositivo e os APs, permitindo inferência da localização aproximada sem necessidade de GPS (ESPRESSIF SYSTEMS, 2023).

Sincronização e coleta de dados via ESP-NOW: o protocolo ESP-NOW, integrado ao ESP32-C6, possibilita comunicação direta entre dispositivos, sincronizando sensores e coletando dados úteis para geolocalização. Essa funcionalidade é especialmente útil em aplicações com múltiplos sensores, como aquelas que demandam monitoramento distribuído em tempo real (ESPRESSIF SYSTEMS, 2023).

Modos de operação otimizados para geolocalização: o microcontrolador oferece suporte a modos de baixo consumo de energia, como *Light Sleep* e *Deep Sleep*, permitindo a realização de coletas periódicas de dados sem comprometer a autonomia dos dispositivos, característica essencial para aplicações alimentadas por bateria (ESPRESSIF SYSTEMS, 2023).

Figura 1 – Dispositivos interconectados em aplicações de localização indoor



Fonte: Os autores (2025)

2.7.3 Protocolos Suportados

O ESP32-C6 oferece suporte a múltiplos protocolos de comunicação sem fio, tornando-se uma plataforma altamente versátil para aplicações em Internet das Coisas (IoT), como sistemas de localização em tempo real, redes de sensores e automação residencial.

O protocolo IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6), operando na faixa de 2,4 GHz, proporciona maior eficiência na comunicação em ambientes com alta densidade de dispositivos conectados. Essa tecnologia oferece vantagens como menor latência, maior largura de banda e melhor aproveitamento energético características essenciais para aplicações embarcadas que operam com limitação de energia (ESPRESSIF SYSTEMS, 2023).

Além da conectividade Wi-Fi, o microcontrolador também suporta o protocolo proprietário *ESP-NOW*, desenvolvido pela Espressif. Esse protocolo permite comunicação direta entre dispositivos da mesma família, sem a necessidade de conexão a um ponto de acesso, viabilizando a troca de pacotes curtos com baixa latência. Embora não tenha sido utilizado neste projeto, o *ESP-NOW* é indicado para aplicações locais que exigem simplicidade e eficiência energética (ESPRESSIF SYSTEMS, 2023).

O ESP32-C6 também integra suporte ao padrão IEEE 802.15.4, que permite a implementação de tecnologias como *Zigbee 3.0* e *Thread*, amplamente adotadas em redes *mesh* de baixo consumo energético em ambientes industriais e residenciais. No entanto, tais tecnologias não foram empregadas neste trabalho, pois a proposta

concentrou-se na utilização da infraestrutura de rede Wi-Fi 6 já disponível no Metrô de São Paulo.

Dessa forma, a escolha pelo Wi-Fi 6 justifica-se pela compatibilidade com a rede existente, maior simplicidade de implantação e redução de custos, mantendo o desempenho necessário para a localização em tempo real de agentes operacionais.

2.8 SOFTWARES E TECNOLOGIAS AUXILIARES

A implementação do sistema de geolocalização proposto neste trabalho contou com o suporte de plataformas e bibliotecas especializadas, utilizadas para o desenvolvimento embarcado, a comunicação entre dispositivos e a visualização em tempo real dos dados. Essas ferramentas foram escolhidas com base na compatibilidade com o microcontrolador ESP32-C6, no licenciamento de código aberto e na capacidade de operar em ambientes de alta densidade de dispositivos, como o Metrô de São Paulo.

O *Espressif IoT Development Framework* (ESP-IDF) foi a principal plataforma utilizada no desenvolvimento embarcado. Trata-se do *framework* oficial da Espressif Systems, voltado para programação de microcontroladores da série ESP32. Ele permite controle direto das interfaces de comunicação sem fio, como Wi-Fi, e fornece suporte nativo para leitura de parâmetros essenciais à geolocalização, como o *Received Signal Strength Indicator* (RSSI) e o *Basic Service Set Identifier* (BSSID). Essas funcionalidades viabilizaram a coleta precisa dos dados de sinal utilizados no sistema.

A distribuição do ESP-IDF sob licença Apache 2.0 permite uso irrestrito em ambientes acadêmicos e industriais, favorecendo a construção de soluções personalizadas sem custos de licenciamento. No contexto da Fundação Educacional Inaciana Padre Sabóia de Medeiros (FEI), essa característica possibilitou maior autonomia técnica no desenvolvimento do protótipo, além de reforçar a viabilidade da proposta em aplicações reais.

A comunicação entre os dispositivos ESP32-C6 e o sistema de supervisão foi realizada por meio do protocolo *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT), amplamente utilizado em aplicações de IoT devido à sua leveza, escalabilidade e suporte a atualizações frequentes. O envio de dados como RSSI, BSSID e carga da

bateria foi feito por meio de tópicos específicos em um *broker*, permitindo o tratamento e a visualização dessas informações em tempo real.

Para a construção da interface visual de acompanhamento da localização dos agentes, foram utilizadas as bibliotecas *Streamlit* e *Dash*, ambas baseadas em Python. A primeira foi utilizada na prototipação da aplicação, dada sua simplicidade na criação de interfaces web a partir de scripts lineares. Já a biblioteca *Dash* foi escolhida para a versão final, devido ao seu desempenho superior na atualização dinâmica de dados e à integração estável com o protocolo MQTT.

A interface final apresenta um painel com o mapa da Linha Ouro, a contagem total de dispositivos conectados e desconectados, além de um gráfico com o número de atuações registradas por mês, como ilustrado na Figura 2. Essa visualização permite ao centro de controle identificar rapidamente falhas operacionais, monitorar a cobertura da rede e acompanhar o histórico de atuação dos agentes.

A junção dessas tecnologias resultou em uma solução robusta, modular e responsiva, capaz de operar com confiabilidade em ambientes internos complexos, como estações e túneis metroviários. Além disso, a escolha por ferramentas de código aberto e amplamente utilizadas no setor reforça a possibilidade de expansão futura do sistema, tanto em escala quanto em funcionalidades.

Figura 2 – Interface inicial do dashboard com mapa da Linha Ouro e status dos dispositivos



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

2.8.1 Ferramentas e Bibliotecas do ESP32-C6 para Wi-Fi

Para as aplicações com Wi-Fi, o ESP32-C6 oferece uma *Application Programming Interface* (API). As APIs fornecem interfaces para que funções ou recursos específicos de um software possam ser acessados sem que o programador precise entender os detalhes internos de como esses recursos são implementados, permitindo, por exemplo, seu uso nos modos estação (*Station*) ou ponto de acesso (*Access Point*).

Além disso, a plataforma oferece funções para escanear redes Wi-Fi, conectar-se a essas redes e obter informações detalhadas sobre os pontos de acesso disponíveis. Para este estudo, duas funcionalidades cruciais são a leitura do RSSI e a identificação de BSSIDs, que são frequentemente utilizadas em aplicações de localização interna.

A função que mais será utilizada ao decorrer deste trabalho é a `esp_wifi_scan`, empregada para iniciar a varredura de redes Wi-Fi. Após a varredura, ao utilizar a função `esp_wifi_scan_get_ap_records`, é possível obter os registros das redes escaneadas, incluindo o BSSID e o RSSI, que serão utilizados posteriormente no código para estimar a proximidade entre dispositivos.

Essas informações são essenciais para determinar a intensidade do sinal de cada ponto de acesso e identificar as redes à medida que os dispositivos se movem pelo ambiente. As implementações dessas funções podem ser consultadas no código-fonte disponível no repositório oficial do projeto, acessível em: https://github.com/Gabriel-M-S/Projeto_Geolocalizacao_Metro.

2.8.2 Biblioteca Streamlit do Python

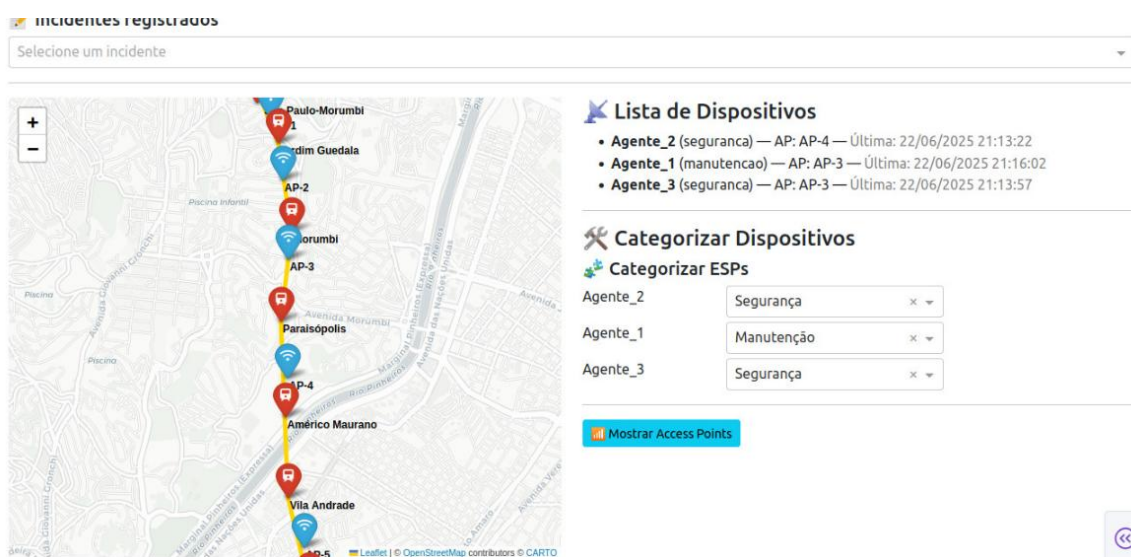
O Streamlit é um *framework open source* desenvolvido em Python, projetado para a criação rápida e eficiente de aplicações web interativas, com foco em ciência de dados, aprendizado de máquina e visualização de informações. Diferentemente de *frameworks* tradicionais como Flask ou Django, que exigem uma separação clara entre as camadas de *frontend*, *backend* e roteamento, o Streamlit permite que interfaces gráficas sejam construídas diretamente a partir de scripts Python, dispensando o uso de HTML, CSS ou JavaScript.

No contexto do desenvolvimento do *dashboard* de monitoramento da Linha Ouro do Metrô de São Paulo, o Streamlit foi utilizado para exibir de forma interativa o mapa das estações, a localização aproximada dos funcionários e o status de conectividade dos dispositivos com os pontos de acesso. A interface também permite categorizar agentes por função (como segurança ou manutenção), registrar incidentes e filtrar visualmente os dispositivos conforme necessidade operacional, como ilustrado na Figura 3.

Essa visualização dinâmica contribuiu para o acompanhamento em tempo real dos eventos operacionais, com simplicidade e acessibilidade em ambiente web. A integração com os dados recebidos via protocolo MQTT foi realizada de forma eficiente, permitindo que os painéis fossem atualizados continuamente conforme novas informações fossem publicadas.

A escolha do Streamlit como base para o sistema se justifica, principalmente, por sua facilidade de uso e flexibilidade. Com poucos comandos, foi possível construir *dashboards*, exibir gráficos, tabelas, mapas e adicionar componentes interativos como botões, *sliders*, caixas de seleção, entre outros. O fluxo de trabalho é intuitivo: o programador escreve o código em Python, e o Streamlit renderiza automaticamente os elementos visuais no navegador. Essa abordagem contribuiu para uma prototipação ágil e eficaz da aplicação proposta neste trabalho.

Figura 3: Interface interativa desenvolvida em Streamlit com mapa da Linha Ouro, status de dispositivos conectados e categorização de agentes por função



Fonte:

Elaborado pelos autores (2025)

2.8.3 Biblioteca Dash do Python

O Dash é uma biblioteca do Python desenvolvida pela empresa Plotly que permite a criação de aplicações web interativas e altamente customizáveis. Sendo uma alternativa robusta aos frameworks mais complexos como Django e Flask. O frontend e o backend são programados diretamente com a linguagem Python, não sendo necessário conhecimentos em HTML, CSS e JavaScript.

No contexto do trabalho, se mostrou uma alternativa viável para a construção do sistema de monitoramento da localização dos dispositivos na linha do Metrô, pois possibilita a integração com bases de dados e atualizações em tempo real, além da criação de layouts personalizados e adição de botões, dropdowns, sliders para interação com o usuário.

2.8.4 Broker Mosquitto

O *broker* Mosquitto foi utilizado neste trabalho como elemento central na comunicação entre os dispositivos ESP32-C6 e os sistemas de supervisão e visualização. Trata-se de uma implementação leve e eficiente do protocolo MQTT, desenvolvida pela Eclipse Foundation, amplamente empregada em aplicações de IoT por sua escalabilidade, baixa latência e compatibilidade com diferentes plataformas (ECLIPSE, 2023).

No contexto do sistema proposto, o Mosquitto atua como intermediador na troca de mensagens entre os dispositivos de campo e os painéis desenvolvidos com as bibliotecas Streamlit e Dash. Ele recebe e distribui dados como RSSI, BSSID e o nível da bateria dos dispositivos, por meio de tópicos MQTT publicados em tempo real. Essa estrutura possibilitou uma comunicação assíncrona e responsiva, essencial para aplicações que exigem monitoramento contínuo, como ambientes metroviários (INPIXON, 2023).

Durante os testes realizados, o *broker* foi configurado em rede local, o que garantiu uma operação segura e independente de conexão com a internet. Essa configuração reduz a latência, elimina a dependência de infraestrutura externa e contribui para o aumento da segurança dos dados trafegados. Além disso, o Mosquitto suporta autenticação e criptografia por meio do protocolo TLS, assegurando

conformidade com a Lei Geral de Proteção de Dados (LGPD), conforme orientações de VIEIRA (2020) e PINHEIRO JUNIOR; CAVALHEIRO (2020).

A robustez da solução foi evidenciada pela estabilidade na recepção e publicação de mensagens MQTT, sem perda de pacotes significativos mesmo em cenários simulados de alta densidade de dispositivos. Sua integração com os *dashboards* desenvolvidos também demonstrou facilidade de uso e compatibilidade com bibliotecas modernas em Python (STREAMLIT, 2023; DASH, 2023), consolidando o Mosquitto como um componente estratégico na arquitetura geral do sistema.

2.8.4 Elipse Software

O *Elipse EPM* é uma plataforma classificada como *Plant Information Management System (PIMS)*, amplamente utilizada para análise, gerenciamento e visualização de dados industriais em tempo real. Reconhecida por sua eficiência, flexibilidade e escalabilidade, a solução é aplicada em diversos setores — como energia, transporte, manufatura e automação industrial — e já integra o ecossistema tecnológico do Metrô de São Paulo, sendo empregada em suas operações para coleta e análise de dados operacionais (ELIPSE SOFTWARE, 2023).

No contexto deste Trabalho de Conclusão de Curso, o *Elipse EPM* foi analisado como uma plataforma estratégica para futura integração com o sistema de geolocalização desenvolvido com o ESP32-C6. A plataforma oferece uma interface robusta e personalizável para monitoramento em tempo real, sendo potencialmente adequada para a análise dos dados de *Received Signal Strength Indicator (RSSI)* obtidos durante os testes realizados em ambiente simulado, com base na infraestrutura metroviária.

Sua utilização futura poderia permitir centralizar e visualizar os dados de geolocalização com precisão, gerar relatórios gráficos, detectar padrões de movimentação dos funcionários e implementar análises preditivas voltadas à segurança operacional. Com a integração ao *Elipse EPM*, o sistema poderia evoluir de uma solução de localização local para um recurso amplamente gerenciável em ambientes SCADA e PIMS já utilizados institucionalmente.

Além disso, o *Elipse EPM* permite integração com bancos de dados relacionais, sistemas externos e plataformas de inteligência artificial. Essas funcionalidades

proporcionariam uma infraestrutura ideal para o crescimento do projeto, permitindo que os dados captados pelos dispositivos IoT sejam historicamente armazenados e analisados por operadores relevantes. Alarmes automatizados, painéis personalizados e manutenção preditiva baseada em dados históricos são algumas das aplicações possíveis em uma eventual fase futura.

Assim, o uso do *Elipse EPM* representa uma possibilidade concreta e coerente com os sistemas já adotados pelo Metrô de São Paulo, agregando valor ao projeto pela compatibilidade técnica e pela capacidade de escalar a solução para níveis corporativos de análise e controle.

2.8.5 Sistema SCADA vs. PIMS

A escolha do PIMS, como o *Elipse EPM*, para o monitoramento do sistema de geolocalização em tempo real dos funcionários no metrô, em vez de um Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA), como o *Elipse E3*, é justificada pelas necessidades analíticas e preditivas do projeto. Enquanto um sistema SCADA é voltado para controle e monitoramento de missão crítica, como em subestações elétricas ou sistemas de bombeamento, ele não é a solução mais adequada para ambientes onde a análise avançada e a manipulação de dados são essenciais.

O PIMS, como o *Elipse EPM*, permite não apenas visualizar a localização dos funcionários em tempo real, mas também realizar análises, cálculos, personalizar relatórios e adaptar a visualização dos dados às necessidades específicas do projeto. Isso faz com que seja a ferramenta ideal para um analista de operação ou manutenção, que precisa extrair insights valiosos a partir dos dados coletados. Além disso, a capacidade de integrar informações de diversos sensores e fontes torna o PIMS indispensável para uma abordagem mais preditiva e estratégica.

Enquanto o SCADA, como o *Elipse E3*, é ideal para funções de controle imediato, ele limita a manipulação de dados em tempo real e se restringe às telas e relatórios predefinidos. Por outro lado, o PIMS oferece flexibilidade para análises avançadas e adaptação contínua, sendo mais adequado para otimizar processos operacionais e de manutenção no ambiente do metrô.

Portanto, o PIMS, com sua capacidade analítica superior e integração avançada, é a solução mais apropriada para o projeto proposto, possibilitando não apenas a segurança e eficiência operacional em tempo real, mas também análises

preditivas e otimização estratégica, aspectos essenciais para o sucesso do sistema de geolocalização no metrô.

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho baseia-se no desenvolvimento e validação de um sistema de localização de agentes operacionais por meio da infraestrutura de rede Wi-Fi 6 já existente no ambiente do Metrô de São Paulo. O projeto foi estruturado em três frentes principais: desenvolvimento embarcado, comunicação entre dispositivos e interface supervisória.

Para a coleta de dados, foram utilizados dispositivos embarcados baseados no microcontrolador ESP32-C6, configurados para realizar varreduras periódicas das redes Wi-Fi disponíveis. Esses dispositivos identificam o ponto de acesso (*Access Point* – AP) com o sinal mais forte, registram o valor de intensidade do sinal (*Received Signal Strength Indicator* – RSSI) e o identificador do AP (*Basic Service Set Identifier* – BSSID). Essas informações, acompanhadas de um identificador único do dispositivo, são publicadas em um tópico MQTT hospedado em um *broker* Mosquitto instalado em uma máquina com sistema operacional Linux.

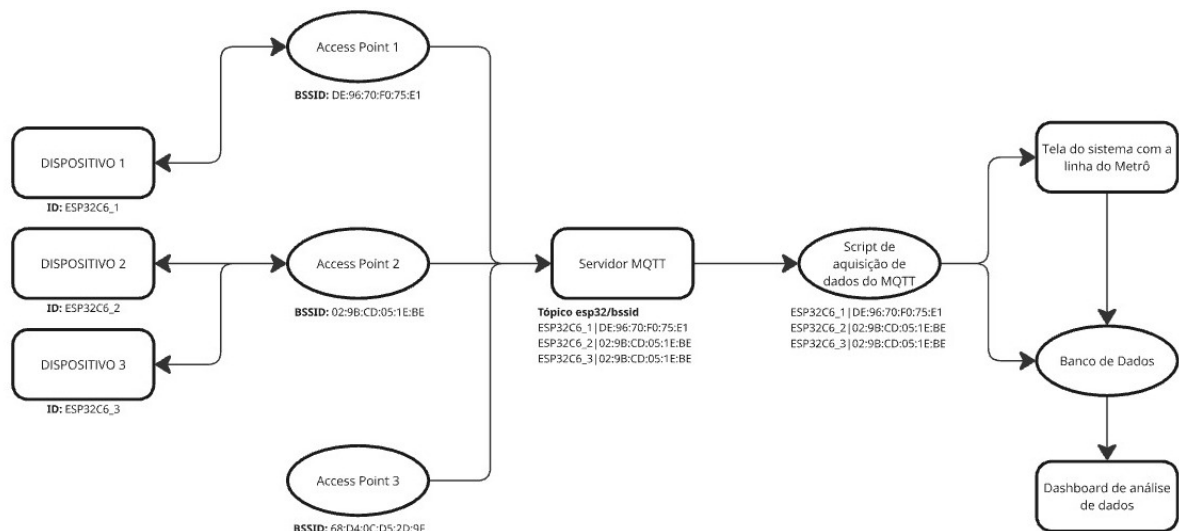
A aplicação supervisória, desenvolvida em Python com as bibliotecas Streamlit e Dash, é executada na mesma máquina que hospeda o *broker*. Ela se inscreve no tópico “esp32/bssid” para receber em tempo real os dados dos dispositivos. Com base em um mapeamento prévio das localizações associadas aos BSSIDs, o sistema estima a posição de cada dispositivo e exibe essas informações visualmente em um mapa representativo da linha do metrô.

Além da visualização contínua, a aplicação permite o registro de incidentes por parte de usuários e a seleção de ocorrências para tratativa. Quando um incidente é selecionado, o sistema realiza a análise das localizações dos dispositivos conectados e destaca, no mapa, o agente mais próximo da ocorrência. Esse fluxo visa apoiar a tomada de decisão operacional de forma ágil e fundamentada.

Os dados gerados durante a operação do sistema — incluindo o histórico de incidentes e de localizações são armazenados em um banco de dados SQL. Esse banco alimenta um *dashboard* analítico voltado à avaliação posterior de desempenho, cobertura e padrões operacionais, contribuindo para futuras melhorias nos processos da organização.

Todas as etapas de desenvolvimento foram conduzidas pelos autores, desde a prototipação até os testes em bancada, que incluíram simulações de falha de conexão Wi-Fi, variações de intensidade de sinal e envio contínuo de dados via MQTT. O sistema apresentou estabilidade de comunicação, baixa latência e autonomia energética adequada para operação prolongada, validando sua viabilidade para aplicação em ambientes operacionais críticos, como o metrô. Todos os componentes do sistemas foram disponibilizados no repositório do projeto (ver APÊNDICE A).

Figura 4 - Fluxograma do Funcionamento do Projeto



Fonte: Os autores (2025)

3.1 ALGORITMO DO DISPOSITIVO

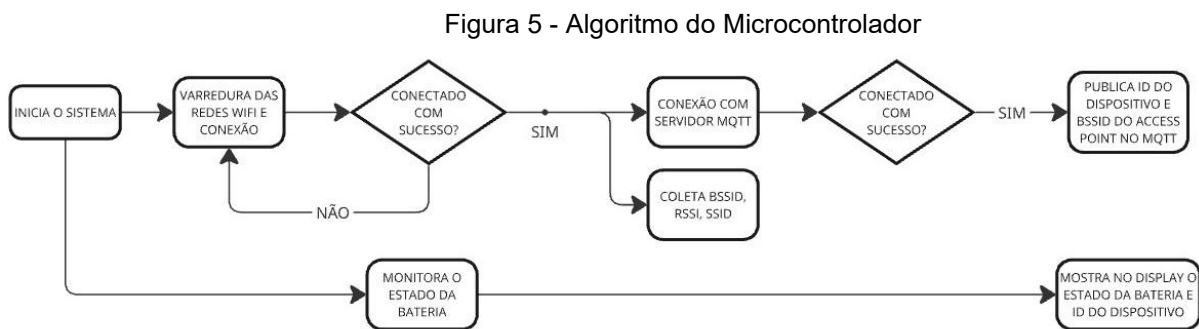
O funcionamento do sistema inicia-se com a ativação dos módulos de hardware e software necessários, incluindo a interface Wi-Fi e o suporte ao protocolo MQTT. O dispositivo então tenta estabelecer conexão com a rede Wifi e ao servidor MQTT. Caso a conexão não seja bem-sucedida, o algoritmo implementa um mecanismo de tentativas, assegurando a resiliência do sistema (SOPHIA et al., 2021).

Uma vez conectado à rede Wi-Fi do Metrô, com o intuito de coletar parâmetros fundamentais, como o identificador BSSID, que é atrelado ao ID configurado no dispositivo para envio ao servidor MQTT.

Além da coleta de sinal, o sistema realiza monitoramento contínuo do estado da bateria do dispositivo, função essencial para aplicações *IoT* que operam em cenários sem fonte de alimentação constante. Esse monitoramento possibilita ações de alerta ao usuário quando a carga atinge níveis críticos.

O algoritmo foi projetado para operar em ciclos de 10 segundos, equilibrando a frequência de atualização com o consumo energético. Essa periodicidade assegura a atualização contínua das informações sem comprometer a autonomia do equipamento.

O fluxograma do funcionamento da programação do dispositivo se encontra abaixo:



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

3.2 MQTT BROKER

O Mosquitto MQTT foi instalado e configurado de forma a corresponder aos parâmetros necessários no ESP32-C6, como IP e porta utilizados. Dessa forma a comunicação entre o servidor MQTT, dispositivos e aplicações podem ocorrer sem problemas, desde que estejam todos na mesma rede.

3.3 ABORDAGEM UTILIZADA

Neste projeto, o objetivo principal é identificar a localização do dispositivo utilizando os pontos de acesso Wi-Fi. A proposta não visa determinar a localização de forma precisa, mas sim fornecer uma localização relativa funcional, adequada às

operações internas do sistema metroviário. Assim, foram adotadas as seguintes diretrizes:

- Trilateração não será utilizada: não há necessidade de estimar posições cartesianas com base em múltiplas distâncias. O sistema identifica apenas ponto de acesso Wi-Fi no qual o dispositivo do funcionário está conectado;
- SCADA não será utilizado na presente fase: apesar de sua ampla aplicação industrial, o sistema supervisório SCADA foi substituído por uma abordagem mais leve, baseado em código aberto. No entanto, sua implementação futura é considerada viável e foi levada em consideração.

3.4 AMBIENTES DE TESTE E REDES IOT

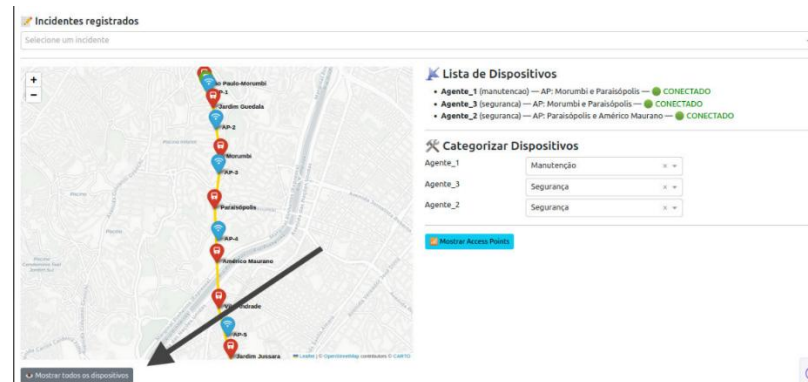
A necessidade de uma rede confiável torna-se ainda mais crítica em ambientes urbanos complexos como o metrô, onde obstáculos físicos — como estruturas metálicas, paredes e variações de profundidade — afetam significativamente a propagação do sinal. Esses desafios exigem soluções técnicas que garantam cobertura estável e desempenho consistente da rede, de forma que o sistema IoT opere com precisão e baixa latência, mesmo diante das limitações impostas pela infraestrutura existente (MOURA, 2007; GONÇALVES, 2021).

Para validar a efetividade da solução proposta, foram conduzidos testes preliminares em ambiente controlado. Utilizou-se uma estrutura composta por roteadores e repetidores configurados para simular os pontos de acesso (APs) da rede Wi-Fi 6 do Metrô de São Paulo. Esses dispositivos foram configurados para operar em uma mesma sub-rede local, reproduzindo a topologia e a segmentação esperada em campo.

Os dispositivos ESP32-C6 foram conectados a essa rede simulada e comunicaram-se com um servidor Linux local, no qual o *broker* Mosquitto foi instalado para realizar o roteamento das mensagens MQTT. A partir disso, os dados foram processados e visualizados em tempo real por meio das interfaces desenvolvidas em Streamlit e Dash.

A Figura 5 apresenta a estrutura geral do ambiente de testes, ilustrando o fluxo de comunicação entre os pontos de acesso simulados, os dispositivos de localização, o *broker* MQTT e os painéis de visualização.

Figura 6: Diagrama do ambiente de testes com simulação de APs, comunicação MQTT e visualização de dados



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

3.5 AMBIENTES DE TESTE E REDE

A primeira etapa da montagem da rede de teste envolveu a escolha e configuração dos equipamentos utilizados para simular o ambiente metroviário. Foram utilizados dois roteadores TP-Link Archer C6 (Dual Band, compatíveis com IEEE 802.11ac) e dois repetidores TP-Link RE200, ambos operando na frequência de 2,4 GHz para garantir compatibilidade com os módulos ESP32-C6 empregados no sistema.

Os roteadores e repetidores foram configurados no modo ponto de acesso (AP), cada um com SSID distinto, representando diferentes zonas de cobertura da rede Wi-Fi, como se estivessem posicionados nas estações da Linha Ouro. Essa estrutura permitiu simular a movimentação dos agentes por diferentes áreas com sinal variável, semelhante ao que ocorreria no ambiente operacional real.

Os ESP32-C6 foram programados para escanear as redes disponíveis e identificar os APs com base no BSSID e intensidade do sinal (RSSI). Essas informações foram processadas para inferir a zona de localização aproximada do dispositivo, conforme a lógica proposta neste projeto. A comunicação dos dados foi realizada via protocolo MQTT com o uso de um *broker* local, permitindo a transmissão em tempo real para os dashboards desenvolvidos.

Essa configuração de rede possibilitou a validação funcional do sistema em ambiente controlado, fornecendo uma base confiável para o monitoramento da precisão e estabilidade da solução proposta.

3.6 LISTA DE MATERIAIS

Para o desenvolvimento do dispositivo de geolocalização IoT que será utilizado pelos agentes circulantes do metrô de São Paulo, foram utilizados os materiais descritos na tabela abaixo.

Tabela 2 - Lista de Materiais

Material	Quantidade	Valor Unitário (R\$)	Valor Total (R\$)
Bateria Li-Ion 18650 3,7V 2600mAh	4	39,90	159,6
Carregador Duplo para Bateria Li-Ion 18650	2	35,00	70,00
Suporte para 2 Baterias Li-Ion 18650	2	10,50	21,00
Placa DevKitC-1 ESP32-C6 N8	2	78,00	156,00
Display OLED 128x32 Px - 0.91" - 4 Pin - Azul	2	19,90	39,80
Protoboard 830 Pontos	1	13,30	13,30
Kit Jumper Macho Macho - 65 pçs	1	8,90	8,90
Kit Jumper Fêmea Fêmea - 40 pçs - 20cm	1	8,40	8,40
Kit Jumper Macho Fêmea - 40 pçs - 20cm	1	8,40	8,40
Carregador Bateria Lithium 1A com Proteção - USB C -TP4056	4	4,50	18,00
Placa de Circuito Impresso	2	50,00	100,00
Conversor step-up (boost) DC-DC – XL6009	2	13,50	27,00
Preço Total	R\$ 627,70		

Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

DevKitC-1 ESP2-C6 N8: A placa é baseada no microcontrolador ESP32-C6, sendo projetada para aplicações em sistemas embarcados com conectividade sem fio. Possui suporte a Wi-Fi 6 (802.11ax), o que possibilita a comunicação com alta eficiência e baixo consumo de energia, fatores essenciais para sistemas de geolocalização em tempo real. Conta com 8 MB de memória Flash, SRAM integrada e porta USB Type-C, sendo ideal para projetos compactos e ambientes com alta densidade de dispositivos conectados (ESPRESSIF SYSTEMS, 2023).

Figura 7 - Imagem Placa DevKitC-1 ESP-C6 N8



Fonte: ESPRESSIF 2023

Bateria Li-Ion 18650 3,7V 2600mAh: A bateria recarregável do tipo 18650 é amplamente utilizada por sua alta densidade energética, confiabilidade e capacidade de fornecer corrente contínua por longos períodos. Com tensão nominal de 3,7 V e capacidade de 2600mAh, ela garante autonomia para dispositivos embarcados que operam em campo sem fonte de energia externa.

Figura 8 - Imagem Bateria Li-Ion 18650 3,7V 2600mAh 2C



Fonte: BATERIA Li-Ion 18650 3,7V 2600mAh 2C. 2024.

Carregador Duplo para Bateria Li-Ion 18650: Este carregador permite o reabastecimento simultâneo de até duas baterias 18650, sendo um componente essencial para garantir a disponibilidade de energia nos ciclos de operação contínua do dispositivo. A recarga eficiente e segura das baterias é vital para garantir o desempenho consistente do sistema.

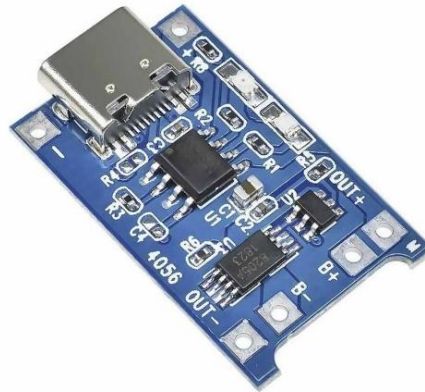
Figura 9 - Carregador Duplo para Bateria Li-Ion 18650



Fonte: Carregador duplo para bateria Li-Ion 18650.

Carregador Bateria Lithium 1A com Proteção - USB C - TP4056: Módulo eletrônico para recarga de baterias Li-Ion via porta USB-C. Conta com circuito de proteção contra sobrecarga, sobrecorrente e curto-circuito, sendo responsável por garantir a segurança do sistema de alimentação do dispositivo de geolocalização.

Figura 10 - Carregador Bateria Lithium 1A com Proteção - USB C -TP4056



Fonte: Carregador Bateria Lithium 1A com Proteção – USB C – TP4056

Módulo Regulador de Tensão Step Up XL6009: O conversor step-up (boost) XL6009 é um módulo DC-DC capaz de elevar tensões de entrada entre 3,5 V e 32 V para saídas ajustáveis de até 35 V, com corrente de saída de até 2 A. Ele oferece alta eficiência, ajuste por trimpot e proteção contra sobreaquecimento, sendo amplamente utilizado em sistemas alimentados por baterias Li-ion.

No contexto deste projeto, o módulo XL6009 foi utilizado para elevar a tensão fornecida pela bateria Li-Ion 18650 (3,7 V) para os 5 V necessários ao funcionamento estável do microcontrolador ESP32-C6 e de seus periféricos. Essa etapa é essencial para garantir que a alimentação seja suficiente mesmo quando a carga da bateria começa a diminuir, evitando instabilidades no sistema. Sem esse conversor, a tensão direta da bateria poderia ficar abaixo do valor mínimo exigido pelo circuito, comprometendo a operação dos dispositivos.

Figura 11 - Conversor step-up (boost) DC-DC – XL6009



Fonte: step-up-xl6009

3.7 TESTES DO SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO DO SISTEMA IOT

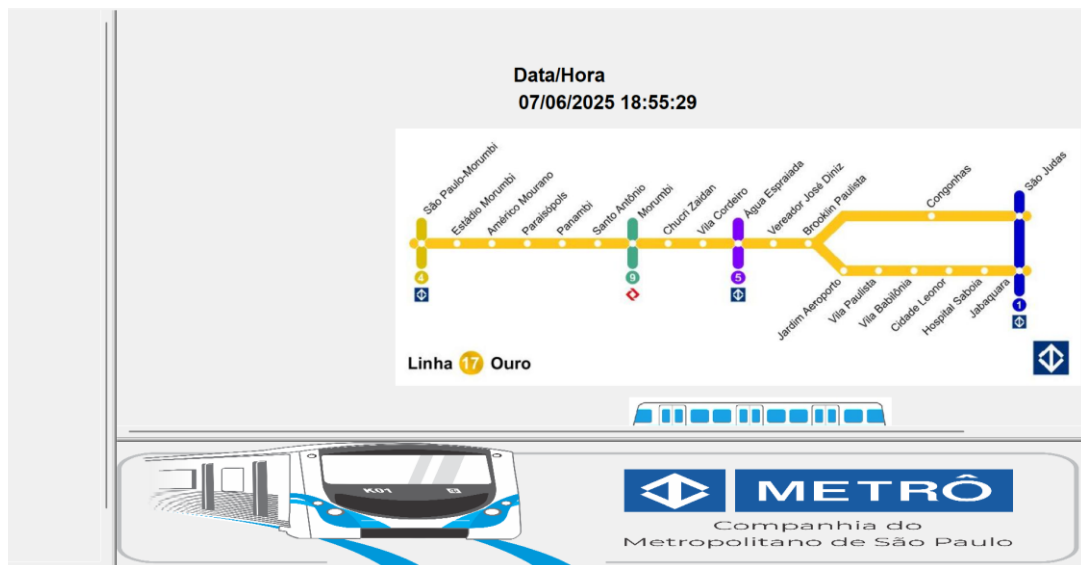
3.7.1 Sistema de Monitoramento da Geolocalização

A imagem apresentada na Figura 12 refere-se à primeira tentativa de desenvolvimento de uma interface de acompanhamento do sistema de geolocalização, baseada na visualização da Linha 17–Ouro do Metrô de São Paulo. Essa interface foi projetada para funcionar em ambiente SCADA, com o objetivo de integrar o sistema de localização ao painel institucional já utilizado pelo Metrô.

No entanto, após reuniões com os responsáveis técnicos da companhia, optou-se por não seguir com essa abordagem na versão final do projeto, em função da necessidade de ferramentas mais flexíveis e desvinculadas da arquitetura SCADA tradicional. Ainda assim, essa alternativa permitiu validar, em ambiente de simulação, a viabilidade de integração dos dados de geolocalização com variáveis SCADA, por meio da configuração de variáveis representativas de posição, conectividade e intensidade de sinal (RSSI). Foi possível simular a atualização dessas variáveis em tempo real, utilizando um ambiente supervisorio de testes, o que demonstrou a compatibilidade funcional, embora com limitações quanto à escalabilidade e à liberdade de personalização da interface.

Essa etapa de experimentação contribuiu para a validação técnica do conceito de supervisão e fundamentou a escolha por soluções mais abertas e ágeis para o protótipo final.

Figura 12 - Interface desenvolvida através do Elipse E3.

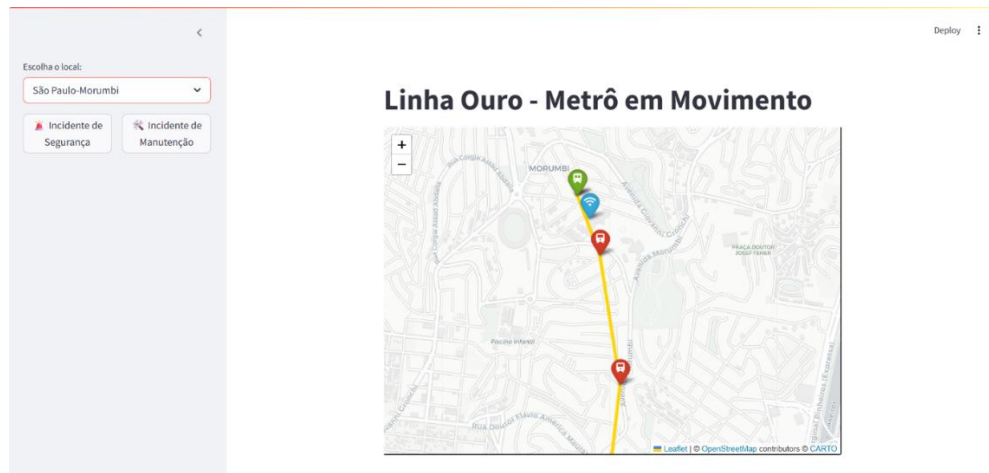


Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Com o objetivo de desenvolver um sistema simplificado para o acompanhamento do mapa de localizações do metrô, utilizou-se a interface fornecida pela biblioteca *Streamlit*, da linguagem Python. Por meio da integração com a API do *OpenStreetMap* e utilizando as coordenadas conhecidas da Linha 17–Ouro do Metrô de São Paulo, foi testada a justaposição de diferentes ícones informativos: ícones verdes representam os trens em deslocamento; ícones vermelhos indicam as estações; e ícones azuis sinalizam os *Access Points* (APs) disponíveis em cada ponto.

Além disso, foi implementado um painel lateral com filtros interativos, permitindo ao usuário selecionar uma estação específica e a categoria do incidente (segurança ou manutenção). Essa interface inicial pode ser visualizada na Figura 13, que apresenta o painel principal com o mapa da linha, os ícones temáticos e as opções de categorização.

Figura 13 - Interface principal do software com mapa da Linha Ouro, ícones de localização e painel de filtros.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Para complementar a solução, foi adicionada uma funcionalidade de ordenação de APs com base na distância estimada até o local selecionado. A interface processa os dados de sinal (RSSI) e exibe, em ordem crescente, os pontos de acesso mais próximos do local do incidente, facilitando a alocação eficiente de recursos para resposta rápida. A Figura 14 apresenta essa listagem com as distâncias estimadas, simuladas com base na intensidade do sinal.

Essa abordagem permite maior agilidade nas decisões operacionais, com atualizações automáticas e organização visual clara, promovendo eficiência no acompanhamento de ocorrências em tempo real.

Figura 14 - Tela de agentes mais próximos ao local do incidente, com distâncias estimadas com base no sinal dos APs



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Toda a interface em Streamlit foi desenvolvida de forma simulada, com os dados de localização dos dispositivos de forma fixa. Ao realizar a integração com o servidor MQTT e os dispositivos reais realizando a subida dos dados, o ambiente desenvolvido apresentou instabilidades e não se comportou da forma desejada. Não realizou as atualizações das posições dos dispositivos em tempo real e não calculou as distâncias.

Para contornar essa limitação de atualização e coleta de dados, foi usado a biblioteca Dash, da linguagem Python, com o objetivo de exibir em tempo real a localização dos dispositivos ESP32 conectados via protocolo MQTT. A aplicação permite ao usuário reportar incidentes por estação, como exemplificado na estação Morumbi, além de registrar automaticamente o horário da ocorrência e destacar o dispositivo mais próximo do ponto reportado ao ser selecionado na tela um dos incidentes em aberto, o código fonte da aplicação está disponibilizado no repositório do projeto (ver APÊNDICE A).

O sistema utiliza um mapa interativo para representar graficamente os dispositivos, estações e tipos de evento com diferentes ícones. O trem foi simulado no sistema e se movimenta periodicamente entre as estações, sendo também uma das opções de local para ser escolhida como opção para se reportar um novo incidente.

Na Figura 15, é apresentada a interface gráfica desenvolvida em linguagem Python, por meio da biblioteca Dash, responsável por exibir em tempo real os dados de geolocalização dos dispositivos ESP32-C6 conectados. Essa interface foi projetada para uso do operador do sistema, permitindo o acompanhamento da posição estimada dos agentes circulantes, bem como o gerenciamento de ocorrências. A seguir, detalham-se os principais elementos visuais que compõem a interface.

O mapa central representa o trajeto da linha do Metrô, sendo cada estação mapeada posicionada com base em suas respectivas coordenadas geográficas. Essas estações são identificadas por marcadores circulares estáticos, os quais são associados aos BSSIDs dos pontos de acesso da rede Wi-Fi disponíveis no ambiente.

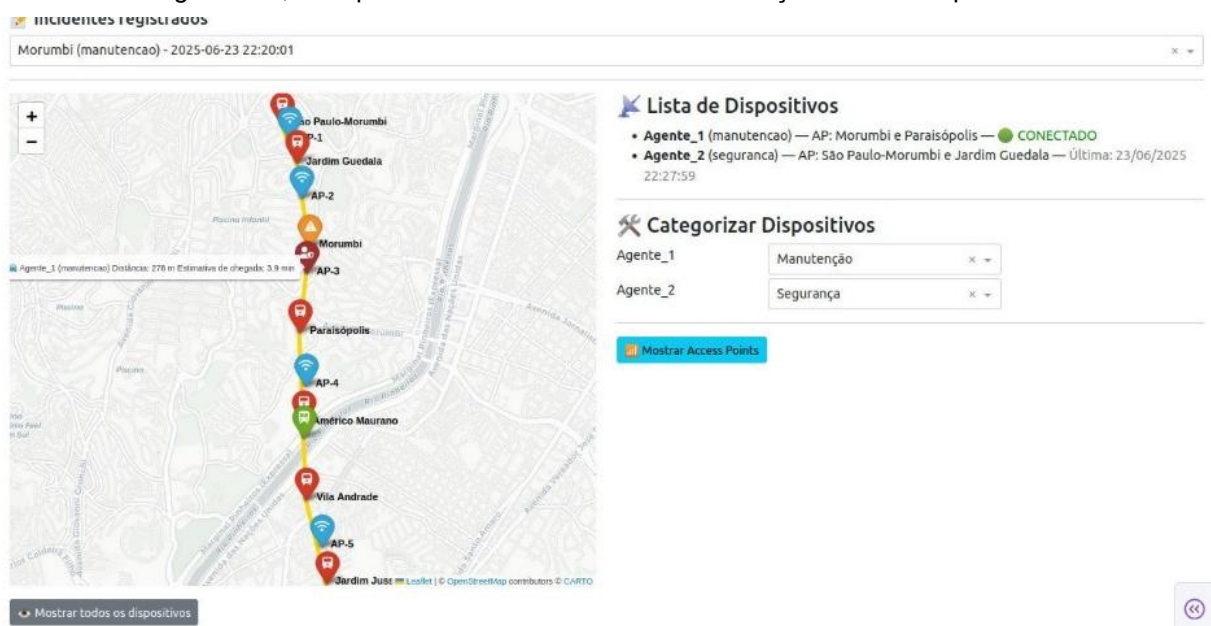
Os dispositivos ESP32-C6 conectados e em operação são representados por marcadores móveis posicionados sobre o mapa, identificados por seus respectivos nomes atribuídos na variável `client_id` no código-fonte. Esses marcadores apresentam cores distintas de acordo com a categoria do agente designada — por exemplo,

segurança ou manutenção —, configuração essa realizada por meio da interface do próprio dashboard.

O operador pode, a qualquer momento, acionar o botão "Novo Incidente" localizado na interface, permitindo o registro de uma ocorrência em determinada estação. Uma vez registrado, o incidente é representado graficamente por um ícone de alerta no mapa. A lógica de cálculo implementada no backend do sistema determina automaticamente qual agente está mais próximo do local da ocorrência, com base nos dados de BSSID recebidos, fornecendo uma indicação precisa de qual dispositivo (e consequentemente qual agente) deve ser acionado.

Adicionalmente, a interface conta com menus de controle que permitem a seleção de categorias, filtragem de visualização e atualização dos dados em tempo real, promovendo maior eficiência na gestão operacional e tomada de decisão por parte do operador.

Figura 15 - Interface gráfica em Dash, com o local de reportar um novo incidente, incidentes registrados, e mapa da linha do Metrô com a localização de dois dispositivos.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

A legenda apresentada na interface do dashboard tem como objetivo facilitar a interpretação visual dos elementos mapeados no sistema de geolocalização. Cada ícone representa um componente específico da operação: o símbolo de ponto de acesso Wi-Fi (ícone azul com ondas) indica os locais onde os dispositivos ESP32-C6 realizam a varredura de sinal; o ícone vermelho com a figura de uma pessoa simboliza os agentes em campo, ou seja, os dispositivos móveis vinculados a operadores; já o ícone de alerta amarelo representa incidentes registrados pelo operador, sinalizando a estação onde ocorreu uma anomalia; por fim, o ícone verde com o desenho de um trem representa a estação do metrô em si, destacando sua localização fixa no trajeto. Essa legenda permite que o operador compreenda rapidamente a distribuição dos agentes, dos Access Points e dos eventos ao longo da linha, promovendo decisões ágeis e embasadas.

Figura 16 – Legenda do Painel de Acompanhamento



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

3.7.2 Testes do sistema para verificação de erros

Durante a etapa de testes, foi realizada a verificação da comunicação entre os dispositivos ESP32-C6 e os pontos de acesso (Access Points) por meio do protocolo MQTT.

Os testes evidenciaram que o ESP32-C6 foi capaz de identificar e se conectar aos Access Points disponíveis, retornando as informações de endereço MAC do ponto de acesso ao qual o dispositivo estava conectado no momento da transmissão. A comunicação ocorreu de forma estável e contínua, com múltiplos dispositivos

(identificados como ESP32C6_1 e ESP32C6_2) alternando a conexão entre diferentes Access Points, o que comprova a eficácia da implementação e a correta integração do hardware com a rede sem fio configurada para o ambiente de testes.

Figura 17 - Localização dos dispositivos sendo recebida pela aplicação Python através do MQTT



```
PROBLEMS  OUTPUT  DEBUG CONSOLE  TERMINAL  PORTS
< MQTT RECEBIDO: ESP32C6_1|02:9B:CD:05:1E:BE
< MQTT RECEBIDO: ESP32C6_2|68:D4:0C:D5:2D:9F
< MQTT RECEBIDO: ESP32C6_2|68:D4:0C:D5:2D:9F
< MQTT RECEBIDO: ESP32C6_1|02:9B:CD:05:1E:BE
< MQTT RECEBIDO: ESP32C6_1|02:9B:CD:05:1E:BE
< MQTT RECEBIDO: ESP32C6_1|02:9B:CD:05:1E:BE
< MQTT RECEBIDO: ESP32C6_2|68:D4:0C:D5:2D:9F
< MQTT RECEBIDO: ESP32C6_2|68:D4:0C:D5:2D:9F
< MQTT RECEBIDO: ESP32C6_2|68:D4:0C:D5:2D:9F
< MQTT RECEBIDO: ESP32C6_1|02:9B:CD:05:1E:BE
< MQTT RECEBIDO: ESP32C6_1|02:9B:CD:05:1E:BE
```

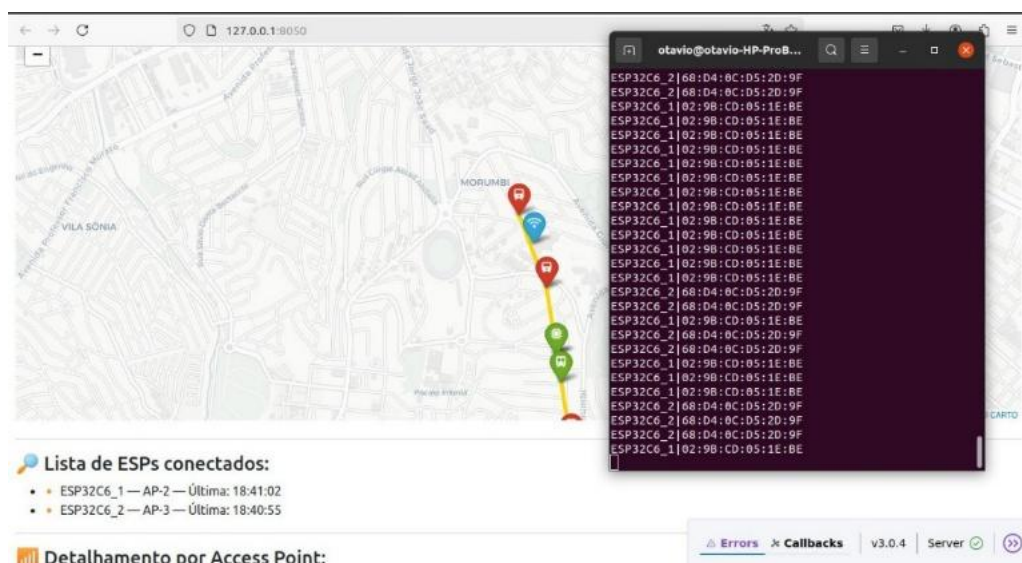
Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Na etapa de testes de comunicação e integração com a interface desenvolvida em Dash, foi possível validar em tempo real a troca de dados entre os dispositivos ESP32-C6 e o sistema de monitoramento via protocolo MQTT. A Figura 18 demonstra dois pontos principais: à esquerda, a interface gráfica exibe a localização dos Access Points no mapa, com atualização contínua da lista de dispositivos conectados (ESP32C6_1 e ESP32C6_2), bem como a última hora de recepção de dados.

À direita, o terminal registra as mensagens recebidas do broker, identificando os dispositivos e os respectivos endereços MAC dos Access Points aos quais estavam conectados. Essa integração permitiu visualizar de forma sincronizada os dados

enviados pelos dispositivos e recebidos pela interface, garantindo a confiabilidade da comunicação entre o hardware e o sistema de visualização. O teste comprova que a aplicação é capaz de monitorar múltiplos dispositivos simultaneamente e de exibir as informações com precisão em ambiente dinâmico e instantaneamente.

Figura 18 - Interface com dados de localização recebidos



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

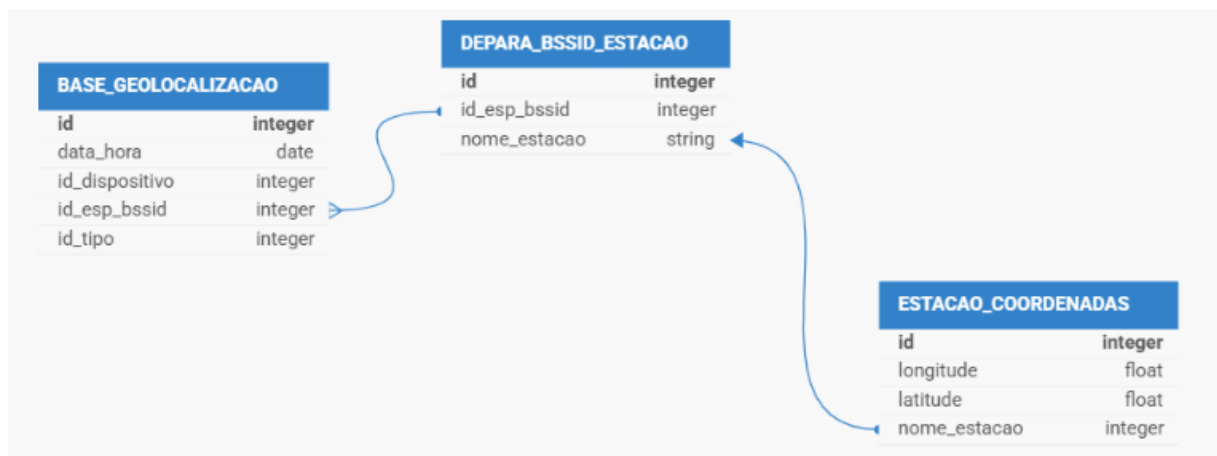
3.7.3 Estrutura do Banco de Dados SQL

Com o objetivo de armazenar, consultar e analisar os dados de geolocalização dos dispositivos ESP32-C6 conectados à rede Wi-Fi do Metrô de São Paulo, foi projetado e implementado um banco de dados relacional em SQL. Esse banco serve como componente fundamental para o funcionamento da aplicação supervisória, garantindo a persistência dos dados recebidos via protocolo MQTT.

O banco de dados é composto por três tabelas principais: uma dedicada aos registros de localização (com data, hora, identificador do dispositivo e BSSID), outra com o mapeamento entre BSSID e estação correspondente, e uma terceira contendo as coordenadas (latitude e longitude) de cada estação. Essas tabelas permitem a construção de consultas que identificam, por exemplo, o agente mais próximo de um incidente reportado. O script de criação do banco de dados relacional está disponibilizado no repositório do projeto (ver APÊNDICE A).

A Figura 19 apresenta o modelo lógico da estrutura do banco de dados desenvolvido.

Figura 19: Modelo lógico da estrutura do banco de dados.

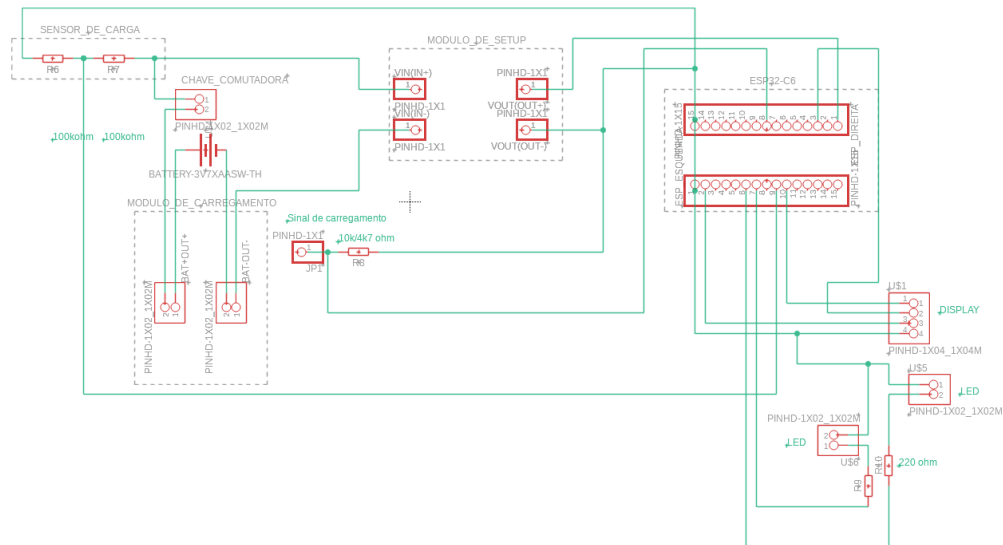


Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

3.7.4 Protótipo do Dispositivo de Geolocalização

Desenvolveu-se o diagrama elétrico apresentado na Figura 20 por meio do AutoDesk Fusion 360 para representar o sistema elétrico do hardware e realizar os testes do protótipo. O arquivo de projeto está disponibilizado no repositório do projeto (ver APÊNDICE A).

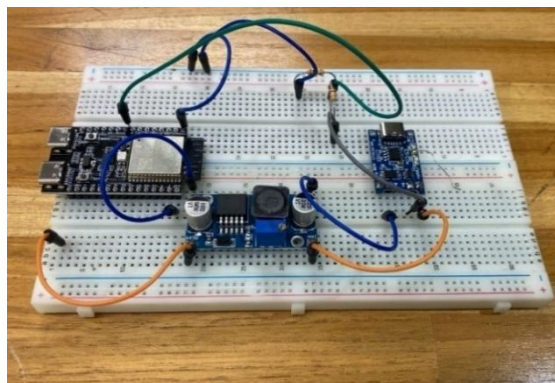
Figura 20: Hardware Projetado



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Após a definição e obtenção dos componentes necessários para a solução, foi elaborado o teste de alimentação do ESP32-C6 (Figura 21), conectado ao módulo de carga e acoplado ao módulo de Setup, com o objetivo de determinar o nível da bateria e viabilizar a indicação dessa informação durante o uso do dispositivo e proteção dele em seu uso.

Figura 21: Protótipo hardware

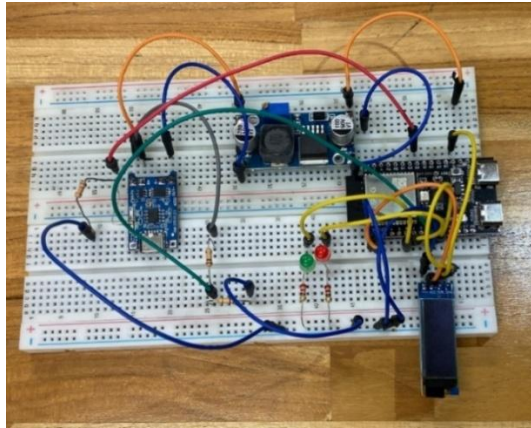


Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

No circuito montado na protoboard, foi implementada a prototipação do sistema completo, que servirá como solução para a problemática levantada. Esse sistema inclui o esquema de montagem do protótipo e teste de carga, conforme discutido

anteriormente, e, adicionalmente, componentes de interatividade externa, como o display OLED e dois LEDs, destinados à comunicação visual com o agente circulante.

Figura 22: Protótipo em Protoboard Finalizado



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

3.8 HARDWARE

O hardware desenvolvido neste projeto foi concebido para garantir operação contínua em ambientes operacionais como o metrô, com ênfase em autonomia energética, confiabilidade na comunicação e sinalização visual ao usuário. O sistema é baseado no microcontrolador ESP32-C6, compatível com o padrão Wi-Fi 6, conforme descrito nos tópicos anteriores.

A alimentação do dispositivo é fornecida por duas baterias recarregáveis do tipo Li-Ion 18650, com tensão nominal de 3,7 V, acopladas a um suporte com chave liga/desliga. O circuito de recarga utiliza o módulo TP4056 com porta USB-C, que inclui proteção contra sobrecarga e sobrecorrente. Um sistema de monitoramento de tensão foi implementado, permitindo a leitura da carga da bateria por meio de pino analógico, com envio periódico dos dados ao painel supervisor via protocolo MQTT.

Para permitir o funcionamento do sistema tanto com baterias quanto com alimentação direta via USB, foi integrado um conversor DC-DC Step-Up com saída variável ajustável entre 4,75 V e 5,4 V, garantindo alimentação estável ao conjunto.

O dispositivo inclui também dois LEDs indicadores e um display OLED de 0,91" (128x32 px), utilizados para sinalizar o status de operação, conectividade e nível de carga. O encapsulamento foi projetado com aberturas específicas para os LEDs,

display e porta USB-C, além de possibilitar a fixação do equipamento ao uniforme dos agentes.

O protótipo foi submetido a testes em bancada, contemplando simulações de perda e restabelecimento de conexão Wi-Fi, bem como o envio contínuo de dados via MQTT. Os resultados demonstraram estabilidade na comunicação, operação ininterrupta e autonomia energética estimada em aproximadamente 11 horas com uma única carga, confirmando a viabilidade da solução em cenários operacionais reais, como o ambiente metroviário.

3.8.1.1 ESTIMATIVA DE AUTONOMIA ENERGÉTICA

A autonomia do sistema foi estimada com base na capacidade nominal da bateria Li-Ion 18650 utilizada (2600 mAh), considerando diferentes modos de operação disponíveis no microcontrolador ESP32-C6 e o perfil real de uso do sistema. Para todos os cálculos, adotou-se uma eficiência de 85%, representando perdas nos conversores de tensão e nos periféricos.

Segundo a Espressif (2024b), o ESP32-C6 oferece os seguintes modos de operação com diferentes níveis de consumo:

- Modo ativo com Wi-Fi transmitindo: ~ 200–250 mA
- Modo *Modem Sleep*: ~ 15–30 mA
- Modo *Light Sleep* com conectividade Wi-Fi: ~ 5–7 mA
- Modo *Deep Sleep* (RTC ativado): ~ 10 μ A
- Modo de desligamento total (*Power Off*): <1 μ A

No contexto do sistema proposto, que envia dados sob demanda e permanece inativo na maior parte do tempo, o modo padrão de operação é o *Light Sleep*. Esse modo mantém a conectividade via Wi-Fi com consumo extremamente reduzido, atendendo aos requisitos da LGPD por evitar transmissão constante de dados pessoais.

Aplicando a fórmula:

$$Autonomia(h) = \frac{Capacidade\ da\ bateria\ mAh \times Eficiência}{Consumo\ médio\ (mA)}$$

Modo Padrão:

$$Autonomia(h) = \frac{2600 * 0.85}{200} = 11.05 \text{ horas}$$

Pior caso:

$$Autonomia(h) = \frac{2600 * 0.85}{250} = 8.84 \text{ horas}$$

Modo otimizado (Light Sleep)

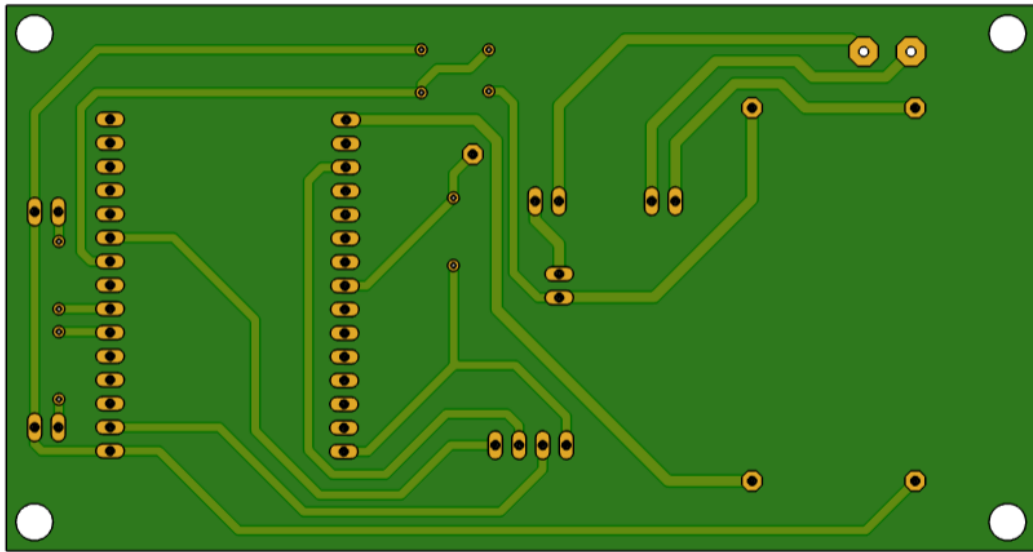
$$Autonomia(h) = \frac{2600 * 0.85}{6} = 368,33 \text{ horas}$$

Essas estimativas foram calculadas com base nos valores típicos de consumo fornecidos pela fabricante Espressif para o microcontrolador ESP32-C6, disponíveis no seu manual de gerenciamento de energia e folha de dados técnica (ESPRESSIF SYSTEMS, 2024a; 2024b).

3.8.2 Montagem do hardware

Após a validação dos testes realizados em protoboard, foi desenvolvida a concepção da Placa de Circuito Impresso (PCB) utilizando o software Autodesk Fusion 360, o arquivo foi disponibilizado no repositório do projeto (ver APÊNDICE A). A figura a seguir apresenta a versão projetada do circuito, consolidando a organização física dos componentes e as conexões elétricas do sistema.

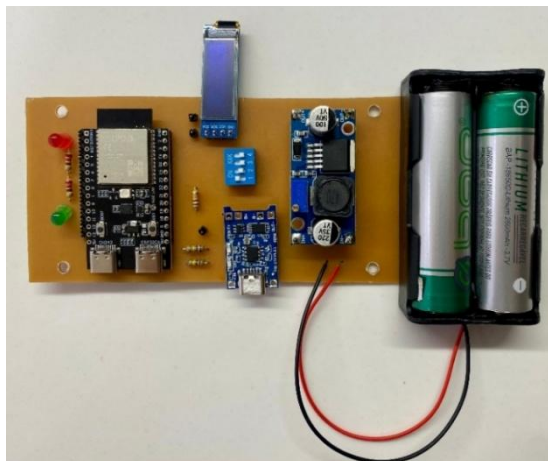
Figura 23: Placa de Circuito Impresso



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Com o projeto da PCB finalizada através do software Fusion 360, procedeu-se à fabricação da placa. Em seguida, foi realizada a soldagem dos componentes eletrônicos diretamente sobre a superfície da placa, conforme apresentado na imagem a seguir.

Figura 24: Placa de Circuito Impresso e componentes

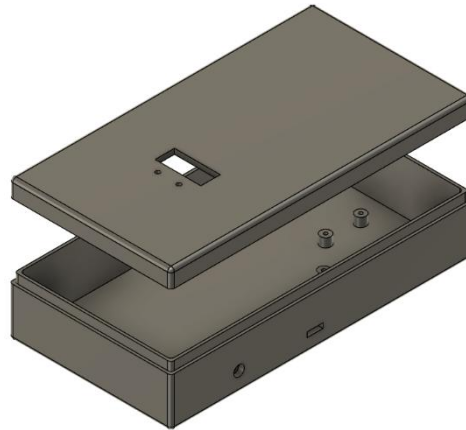


Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Com a PCB montada e os componentes devidamente soldados, foi realizada a modelagem de superfície do suporte físico da placa utilizando o software Autodesk Fusion 360, arquivo disponibilizado no repositório do projeto (ver APÊNDICE A). A

imagem a seguir ilustra o modelo tridimensional desenvolvido para acomodar e proteger a estrutura do circuito.

Figura 25: Projeto da Case Através do Fusion360



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Posteriormente, efetuou-se a impressão do suporte modelado por meio de uma impressora 3D como mostrado na figura 25 abaixo. Em seguida, realizou-se a montagem do protótipo final, integrando a Placa de Circuito Impresso (PCB), o suporte impresso e o módulo de carregamento duplo.

Figura 26: Case Finalizado



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

CONCLUSÃO

O desenvolvimento deste trabalho resultou em uma solução funcional e eficiente de geolocalização indoor voltada ao ambiente metroviário, explorando tecnologias emergentes da Internet das Coisas (IoT). O uso do microcontrolador ESP32-C6, aliado a pontos de acesso Wi-Fi, demonstrou ser uma abordagem tecnicamente viável para a identificação de zonas de proximidade em tempo real, com baixo custo e fácil implementação características essenciais em ambientes como o Metrô de São Paulo.

Foram conduzidas etapas completas de mapeamento, testes e implementação de dashboards interativos. Os resultados comprovaram a eficácia do sistema, com destaque para a biblioteca Dash, que apresentou melhor desempenho na integração com o protocolo MQTT, garantindo estabilidade e responsividade na visualização dos dados.

Este trabalho diferencia-se por apresentar uma abordagem simplificada e replicável, que aproveita infraestrutura já existente, tornando-se especialmente relevante para sistemas públicos que demandam soluções acessíveis, escaláveis e de rápida implantação. Além de ter sido considerado e testado a utilização dos sistemas reais do Metrô, como o Elipse E3, sendo possível a futura implementação nesse sistema.

A aplicação prática mostrou-se promissora em situações que exigem resposta imediata a emergências ou falhas operacionais, demonstrando aos operadores qual é o funcionário mais próximo do incidente reportado, sendo esse o problema principal levantado inicialmente. Além disso, o uso do MQTT e a conformidade com a LGPD reforçam o compromisso com segurança e privacidade dos dados.

Conclui-se que a arquitetura desenvolvida atende aos requisitos técnicos e operacionais propostos e encontra-se em estágio apto para validação em ambiente real. Para consolidar seus benefícios, recomenda-se a integração com plataformas industriais como SCADA/PIMS e a realização de testes em escala piloto no sistema metroviário com os softwares oficiais.

Com isso, este trabalho não apenas propõe uma solução funcional, mas contribui para a transformação digital da operação metroviária, com foco em segurança, agilidade e inovação sustentável.

REFERÊNCIAS

- SOPHIA, S. et al.** Bluetooth Low Energy based Indoor Positioning System using ESP32. In: *2021 Third International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA)*, 2021.
- MANIKANDAN et al.** ESP-8266-based indoor localization system. In: *2023 Intelligent Computing and Control for Engineering and Business Systems (ICCEBS)*. Anais [...]. IEEE, 2023.
- PAULO, S.** *Indoor location system: Human tracking application in a ship maneuvering simulator*. Disponível em:
<https://bdta.abcd.usp.br/directbitstream/3d75e98c-4fb6-4fa3-86cd-1bba0d874014/Humberto%20Sasaki%20e%20Rodrigo%20Suguiura%20-monografia.pdf>. Acesso em: 24 out. 2024.
- MOURA, André Iasi.** *WBSL: um sistema de localização de dispositivos móveis em redes Wi-fi*. São Paulo: A. I. Moura, 2007.
- ABREU, Rafael Fernando Pereira.** *Localização Indoor em Ambientes Inteligentes*. Universidade do Minho, 2014. Disponível em:
https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/37255/1/eeum_di_dissertacao_pg20978.pdf. Acesso em: 24 nov. 2024.
- BAI, Lu; KHORSHED, Maurice D.; AL-MAHMOOD, Rafiqul I.; AL-SUMAITI, Ahmed S.** Indoor Localization Using Trilateration and Location Fingerprinting Methods. In: *Machine Learning for Indoor Localization and Navigation*, 2023. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-26712-3_4. Acesso em: 24 nov. 2024.
- YANG, T.; CABANI, A.; CHAFOUK, H.** A survey of recent indoor localization scenarios and methodologies. *Sensors*, Basel, v. 21, n. 23, p. 8086, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/23/8086>. Acesso em: 24 nov. 2024.

MANIKANDAN, P. Improved Indoor Localization with Machine Learning Techniques for IoT Applications. *arXiv preprint arXiv:2402.11433*, 2024. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2402.11433>. Acesso em: 24 nov. 2024.

RECK, Marcelo Sala. *Beacons BLE – Bluetooth Low Energy: Design e Análise de um Sistema de Localização Indoor*. Universidade de Caxias do Sul, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ucs.br/xmlui/bitstream/handle/11338/2455/TCC%20Marcelo%20Sala%20Reck.pdf>. Acesso em: 24 nov. 2024.

GUL, F. A. I.; TUDOSE, D.; URCANU, T. A versatile IoT development board for environmental sensing and biometric applications. In: *ROEDUNET CONFERENCE: NETWORKING IN EDUCATION AND RESEARCH (ROEDUNET)*, 23., 2024, Bucharest. Proceedings [...]. Bucharest: IEEE, 2024. p. 1–6.

BARRAL VALES, V. et al. Fine time measurement for the internet of things: A practical approach using ESP32. *IEEE Internet of Things Journal*, v. 9, n. 19, 2022, p. 18305–18318.

SAAD, E.; ELHOSSEINI, M.; HAIKAL, A. Y. Recent achievements in sensor localization algorithms. *Alexandria Engineering Journal*, v. 57, n. 4, p. 4219–4228, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.11.008>. Acesso em: 24 nov. 2024.

GUNHARDSON, E. *Indoor positioning using angle of departure information*. Linköping University, Department of Science and Technology, 2015.

O'KEEFE, B. *Finding location with time of arrival and time difference of arrival techniques*. ECE Senior Capstone Project, 2017. Disponível em: https://sites.tufts.edu/eeseniordesignhandbook/files/2017/05/FireBrick_OKeefe_F1.pdf. Acesso em: 24 nov. 2024.

CAIAFA, J. *Automação, comunicação e vigilância no metrô de São Paulo*. 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/gal/a/8w8rFKtBPqQg4d6fk6Zmndy/>. Acesso em: 24 nov. 2024.

METRÔ DE SÃO PAULO. *Indicadores de mobilidade urbana na RMSP a partir da pesquisa OD-Metrô.* 2020. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/cm/a/CQZs4RBzJkRWDrXXb9SBg3H/>. Acesso em: 24 nov. 2024.

PINHEIRO JUNIOR, J. A.; CAVALHEIRO, A. L. Cidades inteligentes: insights e contribuições das pesquisas brasileiras. *Urbe - Revista Brasileira de Gestão Urbana*, v. 13, n. 2, p. 201–217, 2020. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/urbe/a/3LscvBK8vN86Q3fyFvzx7Fw/>. Acesso em: 24 nov. 2024.

GONÇALVES, L. *Arquitetura da infraestrutura e mobilidade urbana: uma análise sobre projeto, espaço urbano e metrô de São Paulo.* Tese (Doutorado) –

Universidade de São Paulo, 2021. Disponível em:

<https://www.academia.edu/43816310/>. Acesso em: 24 nov. 2024.

VIEIRA, M. M. *Internet das Coisas: da Teoria à Prática.* 2020. Disponível em:

<https://homepages.dcc.ufmg.br/~mmvieira/cc/papers/internet-das-coisas.pdf>. Acesso em: 24 nov. 2024.

GARCIA, P. S. R.; KLEINSCHMIDT, J. H. *Tecnologias Emergentes de Conectividade na IoT: Estudo de Redes LPWAN.* Sociedade Brasileira de Telecomunicações, 2017. Disponível em:

<https://www.sbrt.org.br/sbrt2017/anais/1570361881.pdf>. Acesso em: 24 nov. 2024.

ISODA, M. K. de T.; MORI, K. K. *O metrô nas periferias da Região Metropolitana de São Paulo.* 2020. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/003089416>. Acesso em: 24 nov. 2024.

BORLONI, R. N.; COPCHE, F.; SANTOS, M. A. P. Inovação, integração e automação de uma linha de metrô utilizando cenários operacionais. In: *SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA*, 25., 2019, São Paulo. Anais [...]. São Paulo: AEAMESP, 2019. Disponível em:

<https://www.aeamesp.org.br/biblioteca/stm/17smtf110916pl0901.pdf>. Acesso em: 24 nov. 2024.

ESPRESSIF SYSTEMS. *ESP32-C6-DevKitC-1 Development Board*. 2023.

Disponível em: <https://br.mouser.com/new/espressif/espressif-esp32-c6-devkitc-1-board/>. Acesso em: 1 dez. 2024.

BATERIA Li-Ion 18650 3,7V 2500mAh 2C. 2024. Disponível em:

<http://surl.li/medvxd>. Acesso em: 1 dez. 2024.

IP67 CASE FOR PYSENSE/PYTRACK. Disponível em: <http://surl.li/qyuwjw>. Acesso em: 8 maio 2025.

ESPRESSIF SYSTEMS. *ESP32-C6 Datasheet*. 2023. Disponível em:

https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-c6_datasheet_en.pdf. Acesso em: 18 maio 2025.

IEEE. *Smart city integration: how IoT is reducing emergency response times and saving lives*. IEEE Public Safety, 2023. Disponível em:

<https://publicsafety.ieee.org/topics/smart-city-integration-how-iot-is-reducing-emergency-response-times-and-saving-lives/>. Acesso em: 18 maio 2025.

INPIXON. *Bluetooth Low Energy (BLE) for indoor positioning*. 2023. Disponível em:

<https://www.inpixon.com/technology/standards/bluetooth-low-energy>. Acesso em: 18 maio 2025.

KYRIAKIDIS, M.; HAPPEE, R.; DE WINTER, J. C. F. Public opinion on automated driving: results of an international questionnaire among 5000 respondents.

Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, v. 32, p. 127–140, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trf.2015.04.014>. Acesso em: 18 maio 2025.

OASIS. *MQTT Version 5.0*. OASIS Standard, 2019. Disponível em:

<https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/mqtt-v5.0.html>. Acesso em: 18 maio 2025.

ELIPSE SOFTWARE. *Elipse E3 supervisiona Linha 4-Amarela do Metrô de São*

Paulo. 2023. Disponível em: <https://www.elipse.com.br/elipse-e3-supervisiona-linha-4-amarela-do-metro-de-sao-paulo/>. Acesso em: 18 maio 2025.

STREAMLIT. *Streamlit Docs*. Disponível em: <https://docs.streamlit.io>. Acesso em: 18 maio 2025.

CURTO-CIRCUITO. *Carregador Bateria Lithium 1A com Proteção – USB C – TP4056*. Disponível em: <https://curtocircuito.com.br/carregador-bateria-lithium-1a-com-protecao-usb-c-tp4056.html>. Acesso em: 19 maio 2025.

ELETROGATE. *Suporte para 2 baterias 18650 com chave on/off*. Disponível em: <https://www.eletrogate.com/suporte-para-2-baterias-18650-com-chave-onoff>. Acesso em: 19 maio 2025.

DASH. *Dash user guide*. 2023. Disponível em: <https://dash.plotly.com/introduction>. Acesso em: 5 jun. 2025.

ECLIPSE. *Eclipse Mosquitto - An open source MQTT broker*. 2023. Disponível em: <https://mosquitto.org>. Acesso em: 5 jun. 2025.

INPIXON. *Indoor Intelligence for Real-Time Location Systems*. 2023. Disponível em: <https://www.inpixon.com>. Acesso em: 5 jun. 2025.

PINHEIRO JUNIOR, E. P.; CAVALHEIRO, G. D. *Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais: Comentada artigo por artigo*. São Paulo: Revista dos Tribunais, 2020.

STREAMLIT. *Streamlit documentation*. 2023. Disponível em: <https://docs.streamlit.io>. Acesso em: 5 jun. 2025.

VIEIRA, D. M. *Privacidade e proteção de dados pessoais na era digital*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2020.

STEP-UP-XL6009 Disponível em: <https://www.easytronics.com.br/step-up-xl6009>. Acesso em: 8 de jun. 2025.

Rio de Janeiro: Elsevier, 2020.

APÊNDICE A- REPOSITÓRIO DO PROJETO NO GITHUB

O repositório com os códigos-fonte do sistema de geolocalização, scripts de criação do banco de dados, algoritmos dos dispositivos e demais arquivos relacionados ao projeto está disponível em:

Silva, Gabriel M. Projeto de Geolocalização no Metrô de São Paulo. Repositório GitHub, 2025. Disponível em: https://github.com/Gabriel-M-S/Projeto_Geolocalizacao_Metro. Acesso em: 23 jun. 2025.