



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIA E SAÚDE - CAMPUS ARARANGUÁ  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

Ricardo Battaglin Neto

**Cálculo de Distância entre Dispositivos IoT Utilizando RSSI de Maneira  
Distribuída e em Tempo Real**

Araranguá  
2024

Ricardo Battaglin Neto

**Cálculo de Distância entre Dispositivos IoT Utilizando RSSI de Maneira  
Distribuída e em Tempo Real**

Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Graduação em Engenharia de Computação do Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde - Campus Araranguá da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Computação.

Orientador: Prof. Alison R. Panisson, Dr.

Coorientador: Prof. Roberto Vito R. Filho, Dr.

Araranguá  
2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.  
Dados inseridos pelo próprio autor.

Battaglin Neto, Ricardo  
Cálculo de Distância entre Dispositivos IoT Utilizando  
RSSI de Maneira Distribuída e em Tempo Real / Ricardo  
Battaglin Neto ; orientador, Alison Roberto Panisson,  
coorientador, Roberto Vito Rodrigues Filho, 2024.  
29 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá,  
Graduação em Engenharia de Computação, Araranguá, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia de Computação. 2. IoT. 3. Esp32. 4. RSSI.  
5. Real-Time. I. Roberto Panisson, Alison . II. Vito  
Rodrigues Filho, Roberto . III. Universidade Federal de  
Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Computação. IV.  
Título.

Ricardo Battaglin Neto

**Cálculo de Distância entre Dispositivos IoT Utilizando RSSI de Maneira  
Distribuída e em Tempo Real**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia de Computação” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia de Computação.

Araranguá, 02 de Julho de 2024.

---

Prof. Jim Lau, Dr.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Alison R. Panisson, Dr.  
Orientador

---

Prof. Roberto Vito R. Filho, Dr.  
Coorientador  
Universidade Federal De Santa Catarina

---

Prof. Fábio De La Rocha, Dr.  
Avaliador  
Universidade Federal De Santa Catarina

---

Prof. Jim Lau, Dr.  
Avaliador  
Universidade Federal De Santa Catarina

# Cálculo de Distância entre Dispositivos IoT Utilizando RSSI de Maneira Distribuída e em Tempo Real

Ricardo Battaglin Neto\*      Roberto Rodrigues-Filho†      Alison R. Panisson‡

2024, Julho

## Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a avaliação de um sistema de localização interna utilizando dispositivos ESP32 e a técnica de cálculo de distância baseada no RSSI (Received Signal Strength Indicator). A proposta visa proporcionar uma solução de baixo custo em tempo real para a localização interna, aproveitando a infraestrutura Wi-Fi existente. Experimentos foram realizados em diferentes ambientes internos, analisando a variabilidade dos valores de RSSI e sua influência na precisão do cálculo de distância. Os resultados demonstram que é possível obter uma precisão aceitável para 1 metro, destacando a importância de considerar as interferências presentes no ambiente. Este estudo contribui para o avanço das tecnologias de localização indoor, sugerindo a combinação de RSSI com outras tecnologias para aprimorar a precisão e a robustez das soluções.

**Palavras-chaves:** Localização Interna. Wi-Fi. RSSI.

---

\*ricardo.battaglin@gmail.com

†roberto.filho@ufsc.br

‡alison.panisson@ufsc.br

# Calculation of Distance Between IoT Devices Using RSSI in a Distributed and Real-Time Manner

Ricardo Battaglin Neto\*      Roberto Rodrigues-Filho†      Alison R. Panisson‡

2024, July

## Abstract

This paper presents the development and evaluation of an indoor localization system using ESP32 devices and the distance calculation technique based on RSSI (Received Signal Strength Indicator). The proposal aims to provide a low-cost solution for indoor localization by leveraging the existing Wi-Fi infrastructure. Experiments were conducted in various indoor environments, analyzing the variability of RSSI values and their impact on the accuracy of distance calculation. The results demonstrate that acceptable accuracy can be achieved for 1 meter distances, highlighting the importance of considering interferences present in the environment. This study contributes to the advancement of indoor localization technologies on IoT, suggesting the combination of RSSI with other technologies to enhance the accuracy and robustness of the solutions.

**Key-words:** Indoor Positioning. Wi-Fi. RSSI.

---

\*ricardo.battaglin@gmail.com

†roberto.filho@ufsc.br

‡alison.panisson@ufsc.br

# 1 Introdução

Diferente dos sistemas de posicionamento por satélite, como o GPS, que apresentam limitações em ambientes fechados, as técnicas de localização interna (*indoor location*) buscam oferecer soluções precisas e confiáveis dentro de edifícios. A união desta técnica com o conceito de diversos dispositivos embarcados comunicando seus dados em tempo real, a chamada internet das coisas (IoT), possibilitou diversas aplicações como a navegação interna em grandes complexos comerciais (KIM et al., 2024), o rastreamento de ativos em ambientes industriais (MARASOVIĆ; MAJIĆ; ŠKALIC, 2024) e o monitoramento de pacientes em hospitais (JOVAN et al., 2023).

Dado o cenário de *indoor location* em dispositivos IoT, nosso trabalho tem o objetivo explorar um método de cálculo de distância entre dispositivos IoT utilizando somente as interfaces e recursos presentes nos mesmos. O método de cálculo de distância entre dispositivos IoT pode ser empregado em diversas aplicações, principalmente na construção, logística e manufatura (CWIKLA et al., 2018), (LI et al., 2016).

Para a implementação do método de cálculo de distância, o dispositivo escolhido foi o ESP32, principalmente pela sua popularidade e disponibilidade. Para realizar as estimativas de distância foi utilizada uma técnica baseada no Indicador de Força de Sinal Recebido (em inglês, *Received Signal Strength Indicator*) (RSSI). Para isso, foram realizados experimentos em diferentes ambientes internos, analisando a variabilidade dos valores de RSSI e sua influência na precisão do cálculo de distância.

Este trabalho está organizado como segue. Na Seção 3 descrevemos a fundamentação teórica, incluindo conceitos e tecnologias utilizadas no desenvolvimento do trabalho. Na Seção 3.5 descrevemos trabalhos que nos inspiraram na abordagem proposta neste documento. Na Seção 5 descrevemos o método implementado, incluindo a configuração experimental utilizada. Na Seção 6 discutimos os experimentos realizados, que buscaram entender o comportamento das medidas de RSSI, bem como o resultado do cálculo de distância extraído do mesmo. Por fim, na Seção 7 concluímos o trabalho fazendo as colocações finais.

## 2 Metodologia

O principal objetivo do trabalho é explorar um método de *indoor location* em tempo real que utilize somente recursos nativos de uma plataforma IoT. Para isto, foi realizado uma pesquisa na literatura atual para entender as principais técnicas e soluções para realizar o objetivo do trabalho. Dentre as técnicas encontradas, foram filtradas aquelas de melhor aplicabilidade ao projeto, de acordo com os requisitos do mesmo. Após, o método foi implementado, testado e os resultados foram adquiridos e analisados. Os passos metodológicos são descritos a seguir:

- **Pesquisa na Literatura:** A pesquisa na literatura foi a primeira etapa do projeto e teve como objetivo coletar informações sobre os métodos existentes de cálculo de distância entre dispositivos IoT utilizando Wi-Fi. Foram consultadas bases de dados acadêmicas, artigos científicos, livros e outros recursos pertinentes à área de localização interna e sistemas embarcados.
- **Levantamento de Requisitos:** O levantamento de requisitos envolveu a definição das especificações técnicas e funcionais necessárias para o desenvolvimento do sistema

dado o principal objetivo estabelecido. Nesta fase, foram identificados os parâmetros essenciais para a implementação do projeto:

- O sistema deve ser implementado em dois dispositivos IoT.
  - Ambos os dispositivos devem ser capazes de calcular as suas distâncias separadamente e de forma independente.
  - Para o sistema ser em tempo real, é necessário que o cálculo de distância seja, preferencialmente, no próprio dispositivo, sem necessidade de comunicação com outros dispositivos.
  - Deve-se utilizar apenas as tecnologias disponíveis no dispositivo.
  - Os dados coletados devem ser em ambientes internos no maior alcance possível.
- **Escolha do Método:** Com base nos requisitos levantados, a etapa de escolha do método consistiu em explorar e avaliar diferentes técnicas e algoritmos para o cálculo de distância, utilizando as tecnologias já presentes nos dispositivos (Wi-Fi e Bluetooth). Foram analisadas várias abordagens considerando os requisitos levantados anteriormente. Após as considerações, optou-se por utilizar um método inspirado no trabalho de [Şeker et al. \(2024\)](#), o qual utiliza o RSSI do Wi-Fi para o cálculo de distância entre os dispositivos. O método foi então adaptado para uma abordagem em tempo real e totalmente distribuída.
  - **Desenvolvimento:** A fase de desenvolvimento incluiu a implementação do método proposto utilizando dispositivos ESP32. Foram realizadas as configurações necessárias para a comunicação via ESP-NOW e desenvolvidos os algoritmos de cálculo de distância baseados em RSSI. O código foi escrito e testado iterativamente, com ajustes sendo feitos conforme necessário para atender aos requisitos de precisão e desempenho estabelecidos. Além disso, foram integrados mecanismos de calibração para garantir a consistência das medições de RSSI.
  - **Testes:** Os testes foram realizados em diferentes ambientes internos, incluindo um laboratório e um ambiente doméstico, para avaliar a precisão do sistema em condições variadas. Foram coletados dados de RSSI em diferentes distâncias e analisada a variabilidade dos valores obtidos. Esta etapa foi fundamental para validar a eficácia dos algoritmos implementados e identificar possíveis melhorias.
  - **Análise dos Resultados:** Na análise dos resultados, foram comparadas as distâncias calculadas pelo método proposto com as distâncias reais para verificar a precisão do mesmo. Os resultados demonstraram que o sistema é capaz de calcular distâncias com uma precisão aceitável para intervalos de 1 metro. Além disso, foram analisadas as limitações da técnica de RSSI, como a influência de obstáculos e interferências no ambiente. Os resultados mostraram que o sistema pode ser integrado para detectar a proximidade dos dispositivos, podendo ser aplicado em logísticas como carga e descarga, contêineres, e também para dispositivos vestíveis para detectar proximidade e/ou interação (baseado no quanto tempo um objeto ficou perto do outro) com outros objetos inteligentes.

### 3 Fundamentação Teórica

Nesta seção é apresentada a fundamentação teórica do trabalho. Inicialmente, é introduzido o conceito de sistemas embarcados e como eles fundamentam o conceito de IoT.

A partir disso, são fornecidas as principais informações em relação ao dispositivo ESP32 (SYSTEMS, 2023b) e sua utilização em conjunto com o protocolo de comunicação Wi-Fi. A partir disso, relacionamos nosso trabalho com diversos trabalhos sobre *indoor location* disponíveis na literatura atual, visando construir a arquitetura principal do projeto, que irá centrar o desenvolvimento do método proposto neste trabalho.

### 3.1 Sistemas Embarcados e IoT

Sistemas embarcados são sistemas computacionais especializados projetados para executar tarefas especializadas. Esses sistemas são frequentemente encontrados em uma ampla gama de aplicações, desde eletrônicos de consumo até máquinas industriais, e são caracterizados por seus recursos computacionais, projetados conforme necessidade, e pela comum necessidade de desempenho em tempo real (WHITE, 2024).

A Internet das Coisas (IoT) pode ser definida como um sistema de dispositivos de computação inter-relacionados, máquinas ou objetos com identificadores exclusivos e a capacidade de comunicar dados por uma rede ou pela Internet sem necessidade de intervenção humana. A IoT permite a conexão de qualquer objeto físico à Internet ou a uma rede local para coletar, compartilhar dados e realizar ações físicas baseadas nesses dados. Um produto IoT deve permitir a medição de fenômenos físicos, processamento de dados e interação com sistemas de backend para armazenamento e lógica de negócios (PARIHAR et al., 2019).

### 3.2 ESP32

O ESP32 é uma plataforma de microcontroladores desenvolvida pela *Espressif Systems*, amplamente utilizada em aplicações de IoT devido à sua capacidade de processamento, conectividade e eficiência energética. O ESP32 possui diversos módulos e recursos, incluindo *bluetooth*, suporte a criptografia, um *real-time clock (RTC)* interno, entre outros, conforme a Figura 1.

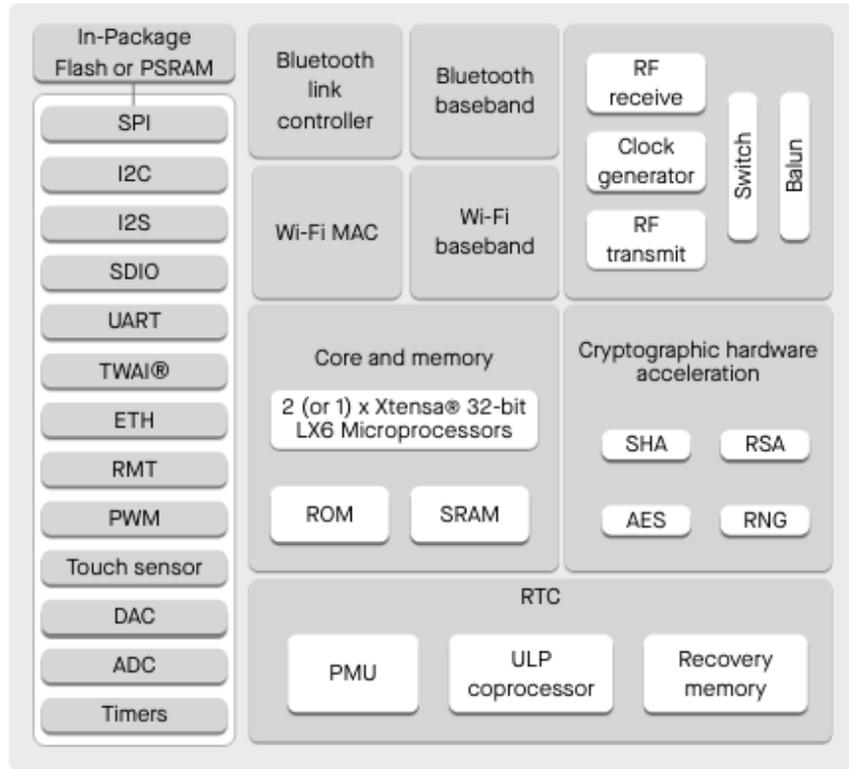
#### 3.2.1 Conectividade WiFi

O ESP32 é equipado com um módulo WiFi integrado que suporta os padrões IEEE 802.11 b/g/n. Este módulo oferece conectividade sem fio robusta e eficiente, sendo um componente essencial para aplicações IoT. As principais características incluem:

- **Frequência de Operação:** Funciona na faixa de 2.4 GHz, oferecendo um bom equilíbrio entre alcance e velocidade de transmissão.
- **Modos de Operação:** Suporta modos de estação (STA), ponto de acesso (AP) e modo dual (STA + AP), proporcionando flexibilidade nas configurações de rede.
- **Segurança:** Inclui suporte para protocolos de segurança WiFi, como WPA/WPA2, garantindo a proteção dos dados transmitidos.

Espressif fornece recursos básicos de hardware e software, dando suporte para desenvolvedores de aplicativos na implementação de suas ideias utilizando o hardware da série ESP32. O framework de desenvolvimento de software da Espressif é destinado ao desenvolvimento de aplicações para a IoT com Wi-Fi, *Bluetooth*, gerenciamento de energia e várias outras funcionalidades do sistema (SYSTEMS, 2023b).

Figura 1 – Diagrama de blocos do system-on-a-chip (SoC) do Esp-32.



Fonte: [Systems \(2023a\)](#).

Uma das principais características do ESP é a existência do framework Wi-Fi ESP-NOW. Sua principal funcionalidade para os experimentos conduzidos neste trabalho é a possibilidade de realizar *broadcasts* no Wi-Fi, o que permite o envio de mensagens para todos os dispositivos que estão na mesma faixa de transmissão, permitindo assim, realizar aplicações descentralizadas ([SYSTEMS, 2023b](#))

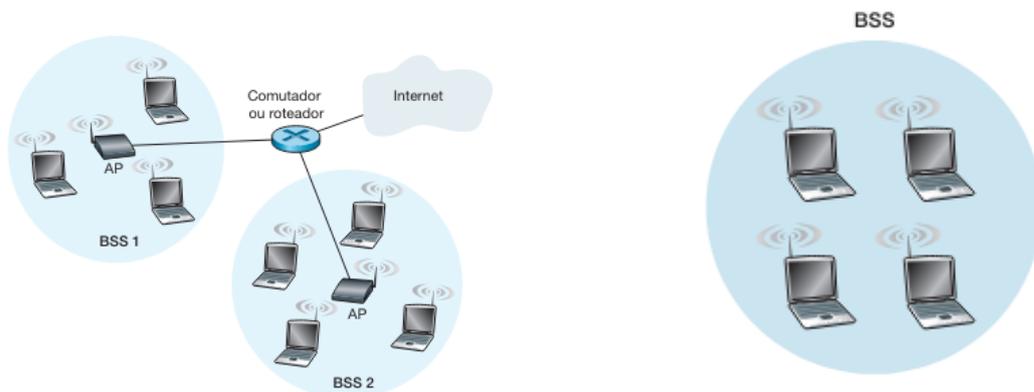
### 3.3 LAN sem fio IEEE 802.11

Segundo ([KUROSE; ROSS, 2013](#)), as redes são sistemas que permitem a comunicação de informação entre dispositivos (chamados de **nós** de uma rede). Protocolos são um conjunto de regras para que essa comunicação aconteça, no caso do Wi-Fi, vão de faixas de frequências definidas, até ordem dos bits e cabeçalhos das mensagens.

Uma rede sem fio, também conhecida como rede *wireless*, é uma rede de computadores que utiliza ondas de rádio ou infravermelho para transmitir dados entre dispositivos, em vez de usar fios ou cabos. A tecnologia sem fio permite a conexão de dispositivos móveis, como laptops, smartphones e tablets, a uma rede de computadores, bem como a conexão de dispositivos de rede, como impressoras e scanners, sem a necessidade de cabos ([KUROSE; ROSS, 2013](#)).

Dentre tais redes, o protocolo mais utilizado é o LAN sem fio IEEE 802.11, ou Wi-Fi. Para o Wi-fi, existem duas principais arquiteturas, o modo de infraestrutura, e o modo *ad-hoc*. Ambos os modos possuem configurações básicas de serviço (BSS - *Basic Service Set*), que são elementos básicos para que o serviço de rede seja realizado, conforme a Figura 2.

Figura 2 – Exemplos de Redes WiFi Estruturada e AdHoc.



(a) BSS Rede WiFi Estruturada: Necessita de um dispositivo e um ponto de acesso.

(b) BSS Rede WiFi AdHoc: Necessita de mais de um dispositivo.

Fonte: Kurose e Ross (2013).

O modelo OSI (Open Systems Interconnection) é uma estrutura de referência essencial no campo das redes de computadores, desenvolvido pela ISO (International Organization for Standardization) para padronizar a comunicação entre sistemas de diferentes fabricantes. O modelo é composto por sete camadas distintas, conforma a Tabela 1. Cada camada desempenha funções específicas e interage com as camadas adjacentes, facilitando a transmissão de dados de um dispositivo a outro através de uma rede.

Tabela 1 – Camadas do modelo OSI e suas funções.

Camada	Função
Física	Transmissão de bits brutos através do meio físico
Enlace de Dados	Transferência livre de erros entre dois nós adjacentes
Rede	Roteamento de pacotes entre nós
Transporte	Entrega confiável e ordenada de dados
Sessão	Controle de diálogo entre aplicações
Apresentação	Tradução entre formatos de dados da rede e da aplicação
Aplicação	Serviços de rede para aplicações do usuário final

Fonte: O Autor.

O protocolo Wi-Fi situa-se diretamente na camada física, onde ocorre a transmissão e recebimento dos bits brutos pelo meio. Para isso, ele utiliza diversas técnicas para garantir que sua função seja executada (KUROSE; ROSS, 2013). Devido ao fato de serem utilizadas ondas eletromagnéticas, o envio destes dados estão sujeitos a diversas interferências e instabilidades, gerando assim, um enfraquecimento do sinal que é enviado até o seu recebimento.

Diversas unidades de medidas foram criadas para medir a intensidade do sinal das ondas de rádio frequência (RF) no protocolo 802.11, como: mW, dBm, RSSI e porcentagem (BARDWELL, 2004). No ESP, a unidade de medida utilizada é o dBm (SYSTEMS, 2023b).

Uma característica sobre o dBm é sua relação com a potência, embora potência negativa não exista fisicamente. Devido à natureza logarítmica, valores menores que 1 mW são representados como números negativos em dBm. Essa representação é amplamente

utilizada em telecomunicações e redes sem fio para descrever com precisão a potência de sinais, facilitando a comparação e análise de níveis de potência, conforme a figura 3 demonstra:

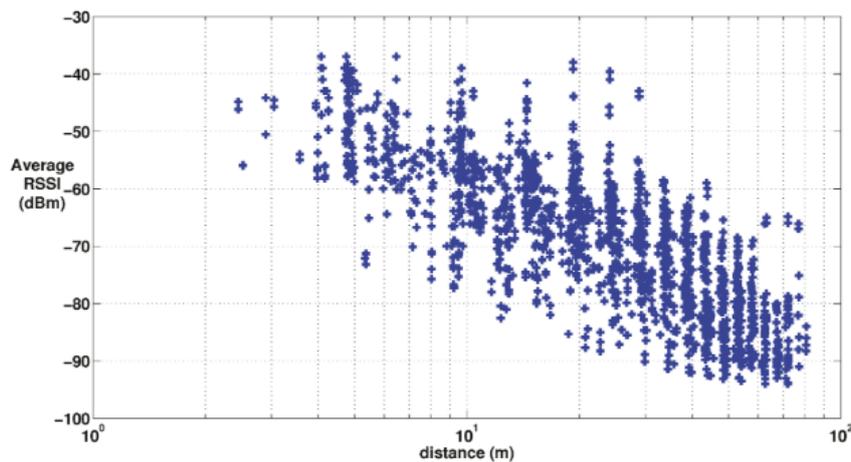
Figura 3 – Relação dos valores de potência com dBm.

1 mW	$\log 1 = 0$ ( $10^0=1$ )	0 dBm = 1mW
.5 mW	$\log .5 = -0.3010$ ( $10^{-0.3010} = .5$ )	-3.01 dBm = .5 mW
.25 mW	$\log .25 = -0.602$ ( $10^{-0.602}=.25$ )	-6.02 dBm = .25 mW
.13 mW	$\log .13 = -0.886$ ( $10^{-0.886}=.13$ )	-8.86 dBm = .13 mW

Fonte: Bardwell (2004).

Os valores de RSSI são medidos em dBm e, podem variar de -30 até -100, sendo obtidos dados em torno de -40 e -85 em ambientes internos a um prédio. Esta variação de RSSI pode estar relacionada a distância, mas não necessariamente. A Figura 4 demonstra que o valor de RSSI para uma distância pode variar em uma ampla faixa de valores, se devendo principalmente, a interferências eletromagnéticas e obstáculos (VANHEEL et al., 2011).

Figura 4 – Dados de RSSI obtidos ao longo de 10m.



Fonte: Vanheel et al. (2011).

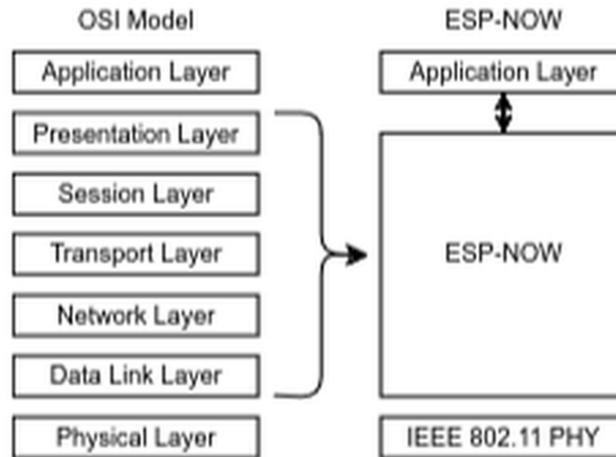
Estes modelos hierárquicos (OSI, TCP/IP) não apenas padronizam a comunicação entre as camadas, mas também simplificam o desenvolvimento e implantação de infraestruturas de redes de comunicação. Neste trabalho, não muito diferentes, estabeleceremos um “protocolo” de comunicação bastante simples, que interage com algumas dessas camadas, onde o foco será na camada de aplicação para a extração semântica.

### 3.3.1 ESP-NOW

O *ESP-NOW* é um protocolo de comunicação sem fio proprietário desenvolvido pela Espressif, este protocolo permite a transmissão de dados entre dispositivos sem a necessidade de uma rede Wi-Fi tradicional, tornando-o ideal para aplicações de baixo consumo de energia e comunicação ponto a ponto. O ESP-NOW é amplamente utilizado devido à sua baixa latência, alta eficiência energética e simplicidade de configuração. Aplicações típicas incluem redes de sensores, sistemas de automação residencial, controle remoto de dispositivos e comunicação entre microcontroladores em projetos de Internet das

Coisas (IoT) (SYSTEMS, 2023b). Como demonstrado na Figura 5, a pilha de protocolos ESP-NOW pode ser comparada ao modelo OSI tradicional:

Figura 5 – A pilha do modelo OSI tradicional comparado ao protocolo ESP-NOW.



Fonte: Urazayev et al. (2023)

No modelo OSI tradicional, a comunicação requer a configuração de uma conexão prévia para garantir que o canal de transmissão esteja disponível e livre de interferências, o que envolve processos de *handshaking* e verificação de erros. Em contraste, o ESP-NOW permite uma comunicação direta em modo ad hoc, onde os dispositivos podem trocar dados imediatamente após a configuração inicial. Esta abordagem reduz significativamente a complexidade e o tempo de latência, além de minimizar o consumo de energia, tornando o ESP-NOW ideal para aplicações de IoT que demandam comunicações rápidas e eficientes com dispositivos de baixo consumo energético.

### 3.4 Indoor Location em Dispositivos IOT

A *indoor location* refere-se à tecnologia utilizada para determinar a posição de pessoas ou objetos dentro de edifícios. Essas técnicas são utilizadas devido ao fato que sistemas de posicionamento por satélite, como o GPS, não funcionam adequadamente nesses ambientes devido à obstrução dos sinais nesses locais. Tecnologia de *indoor location* tem sido utilizadas para o desenvolvimento de diversas aplicações, incluindo navegação internas em grandes complexos comerciais (KIM et al., 2024), rastreamento de ativos em ambientes industriais (MARASOVIĆ; MAJIĆ; ŠKALIC, 2024), monitoramento de pacientes em hospitais (JOVAN et al., 2023), etc.

### 3.5 Técnicas de Extração de Variáveis de Rede em Dispositivos IoT Utilizando Wi-Fi

Dentre os diferentes tipos de estratégias para a extração de informações de distância entre dispositivos, o uso de Wi-Fi é amplamente empregado, principalmente para localização interna devido à onipresença deste protocolo e à capacidade de medir a intensidade do sinal. Como o RSSI é uma medida da potência do sinal recebida por um dispositivo, a intensidade do sinal diminui com a distância, permitindo a estimativa da posição relativa de um dispositivo com base na força do sinal recebido (VANHEEL et al., 2011).

A disponibilidade de infraestrutura é uma das principais vantagens, já que a maioria dos edifícios já possui redes Wi-Fi instaladas, reduzindo a necessidade de hardware

adicional. Além disso, a utilização de redes Wi-Fi existentes e dispositivos comuns torna essa abordagem relativamente barata. Em ambientes controlados, a técnica de RSSI talvez possa oferecer uma precisão aceitável para muitas aplicações.

No entanto, há desvantagens a serem consideradas. O sinal Wi-Fi pode ser afetado por interferências de outros dispositivos eletrônicos e pela presença de obstáculos físicos como paredes e móveis. Em ambientes internos, os sinais Wi-Fi podem refletir em superfícies, criando caminhos múltiplos que dificultam a estimativa precisa da distância (ASAAD; MAGHDID, 2024).

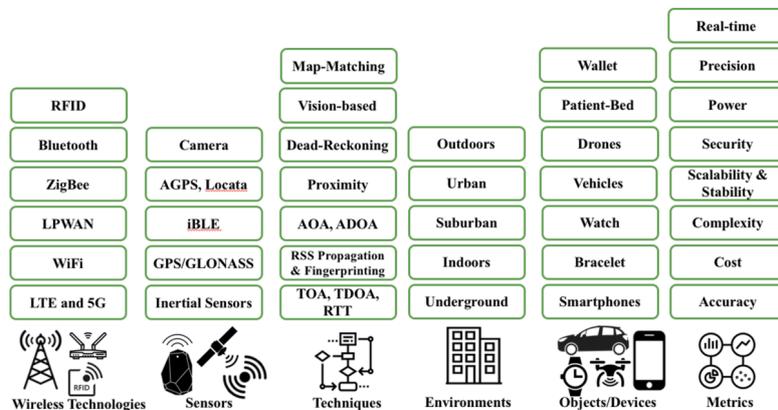
Existem vários métodos baseados em RSSI para estimar localização. O posicionamento baseado em distância estima a distância entre o dispositivo alvo e pontos de acesso conhecidos com base na intensidade do sinal, baseados na fórmula de cálculo de RSSI para distância 1. Esta técnica pode usar modelos de perda de propagação para calcular a distância. Outro método é o *fingerprinting*, que envolve a criação de um mapa de intensidades de sinal em diferentes pontos do ambiente. Durante a operação, o sistema compara as leituras de RSSI atuais com o mapa de *fingerprints* para estimar a localização (ASAAD; MAGHDID, 2024).

Sendo Wi-Fi o protocolo sem fio mais utilizado em dispositivos IoT, a tecnologia de menor custo para o cálculo de distância entre os dispositivos será aquela que utiliza a própria interface de rede dos dispositivos utilizados. Seguindo essas observações, alinhadas com o objetivo desse trabalho, decidimos utilizar técnicas de localização que utilizem este protocolo, fazendo uso das interfaces dos próprios dispositivos utilizados na composição de aplicações.

## 4 Trabalhos Relacionados

Diversos estudos têm contribuído para o avanço de tecnologia de *indoor location*. Por exemplo, (ASAAD; MAGHDID, 2024) realizou uma pesquisa de técnicas e tecnologias mais recentes para *indoor location* entre dispositivos IoT. Seu levantamento é relevante para diferenciar o termo tecnologias, que se referem a inserção de novos componentes físicos, e as técnicas, que se referem aos algoritmos que podem ser implementados, não necessariamente partindo de novas tecnologias, conforme ilustrado pela Figura 6:

Figura 6 – Diagrama de tecnologias e técnicas para localização indoor em IOT.

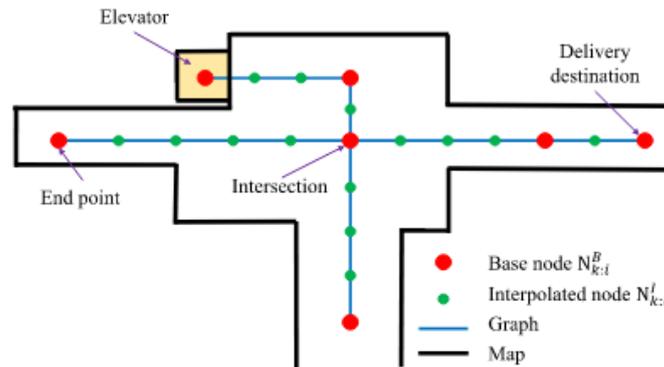


Fonte: Asaad e Maghdid (2024)

Um projeto recente foi o desenvolvido por Kim et al. (2024), onde é realizado um

mapeamento interno para um robô de entregas. Para realizar a sua tarefa, foi necessária a criação de um mapa detalhado do ambiente, para assim, o robô ser capaz de gerar uma rota otimizada para cada tarefa de entrega, evitando obstáculos e minimizando o tempo de viagem, conforme demonstrado na Figura 7.

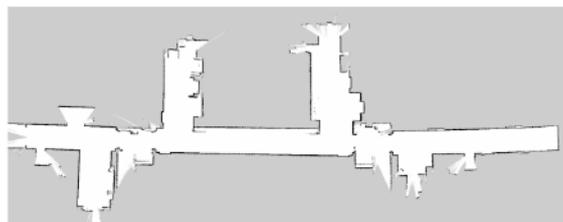
Figura 7 – Exemplo de planejamento e mapeamento de rota do robô de entrega.



Fonte: Kim et al. (2024).

Outro exemplo de navegação interna é o estudo realizado por Fan et al. (2017), que aborda um método preciso para mapeamento 3D de edifícios multifuncionais baseado em fusão de sensores. A abordagem combina sensores de alcance a laser, câmeras e outras tecnologias para criar mapas tridimensionais detalhados de edifícios de múltiplos andares. Os testes mostraram que o sistema é capaz de gerar mapas precisos e detalhados, que podem ser utilizados para navegação interna, gestão de ativos e resposta a emergências em grandes complexos comerciais.

Figura 8 – Mapeamento interno de um prédio utilizando uma fusão de sensores.

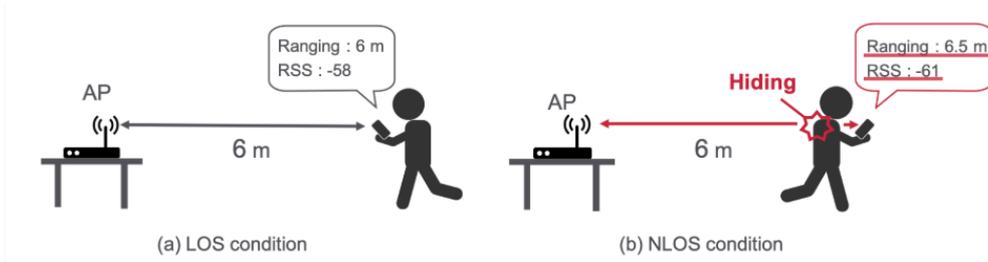


Fonte: Fan et al. (2017).

Dos trabalhos utilizando tecnologias Wi-fi, Ninh et al. (2020) apresenta um método estatístico aleatório para posicionamento interno usando usando uma base de *Fingerprinting* WiFi. O método proposto mostrou um erro máximo de posicionamento de 0.71 metros, sendo uma redução no erro de posicionamento, em uma sala de extensão de 5 metros. Em outra abordagem, Yang, Tsubouchi e Nakamae (2024) utiliza as diferenças no comportamento do sinal WiFi em condições de linha de visão (LOS) e não linha de visão (NLOS) para estimar a orientação de dispositivos, alcançando uma precisão de 90% sem a necessidade de sensores especializados, combinando técnicas, como por exemplo, o RTT (*Round-Trip Time*, tempo de envio e recebimento da mensagem).

Também, Jovan et al. (2023) combina dados de RSSI e acelerômetro para monitorar a localização e os movimentos de pacientes com doença de Parkinson em ambientes

Figura 9 – Inferências LOS e NLOS.



Fonte: Yang, Tsubouchi e Nakamae (2024).

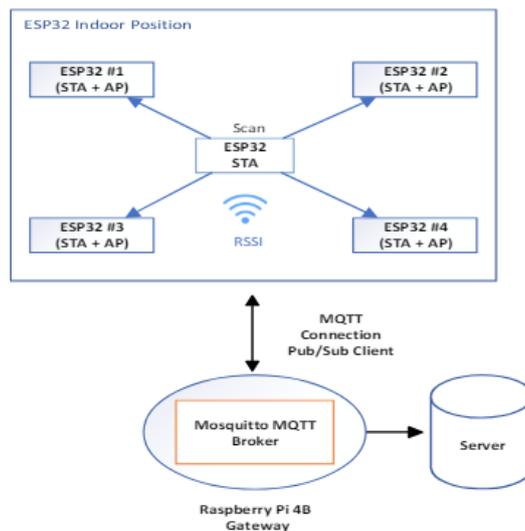
internos. Essa abordagem multimodal permitiu uma monitorização precisa em tempo real, demonstrando a eficácia do sistema na gestão de doenças crônicas. Por último, Yoon, Jung e Kim (2024) propôs o uso de redes neurais profundas para criar perfis de RSSI, melhorando significativamente a precisão da localização em ambientes internos complexos.

Já no contexto de IoT, e medição de distância utilizando Wi-Fi, o trabalho de Şeker et al. (2024) investiga o uso do RSSI para o rastreamento físico de dispositivos ESP32, empregando uma fórmula para calcular a distância dos dispositivos com base na força do sinal recebido. Apesar das interferências e obstáculos presentes no ambiente, o método mostrou um erro médio de posicionamento de apenas 0.512 metros, embora seu trabalho tenha apresentado cálculo de distâncias de até 2,30m.

## 5 Método de Cálculo de Distância Baseados no RSSI

Para o desenvolvimento do sistema de cálculo de distância em tempo real, nos baseamos na aplicação desenvolvida por (ŞEKER et al., 2024). A técnica proposta pelo autor consiste em diversos dispositivos ESP32 se comunicando em uma rede local, enviando dados para um servidor, onde o processamento e análise dos dados são realizados, conforme a Figura 10.

Figura 10 – Relação dos principais componentes da arquitetura de captação de dados.



Fonte: Şeker et al. (2024).

Os valores de RSSI coletados por um dispositivo em modo estação são então enviados para um nó principal que se comunicava com servidor, os valores de RSSI e as distâncias reais dos dispositivos de referência são armazenados e então processados utilizando a equação (1).

$$RSSI\text{-to-distance} = 10^{\left(\frac{\text{Potência Medida} - \text{RSSI}}{10 \times n}\right)} \quad (1)$$

A fórmula da equação (1), faz uso das seguintes variáveis:

- **Potência Medida:** Media de 50 valores de RSSI medidos a uma distância de 1 metro.
- **RSSI:** Indicador da força do sinal recebido.
- **n:** Fator de propagação que varia entre 2 e 4, dependendo do ambiente.

O fator de propagação  $n$  varia de acordo com o ambiente e é influenciado por diversos fatores, como a presença de obstáculos (paredes, móveis, pessoas), o material das paredes, e outros tipos de interferências. Para determinar o valor adequado de  $n$ , os autores realizaram uma série de experimentos empíricos, e optaram por utilizar  $n = 4$ .

Após a coleta de dados, a distância calculada pelo algoritmo é então comparada com a distância real armazenada no servidor, determinando assim a taxa de erro. A comparação das distâncias e a determinação da taxa de erro, avaliando a precisão do método de cálculo de distância. Através desse processo, o estudo demonstrou que a técnica de cálculo de distância baseada em RSSI pode ser utilizada para monitorar e verificar a posição dos dispositivos em uma rede interna, em distâncias de até 2,50m.

## 5.1 Descrição do Experimento

Seguindo a linha de pesquisa apresentada por Şeker et al. (2024), descrito detalhadamente na Seção 5, propomos uma abordagem para localização *indoor* em tempo real em dispositivos ESP32 em uma rede *ad-hoc*.

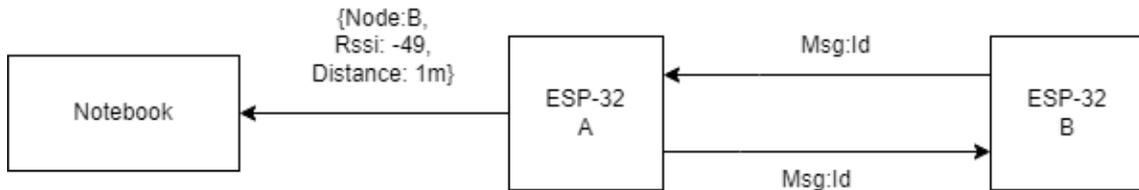
Com o objetivo de desenvolver métodos de cálculo de distância entre dispositivos IoT de baixo custo, decidimos explorar as técnicas que fazem uso das tecnologias já presentes nesses dispositivos. Dentre as diversas técnicas possíveis, a técnica de RSSI foi escolhida devido à sua ampla disponibilidade de materiais, e facilidade de implementação, reduzindo assim o grau de incerteza no projeto.

A partir da decisão pelo cálculo de distância por RSSI, explorou-se o comportamento dessa técnica em uma composição descentralizada e em tempo real do sistema. Apesar da ampla disponibilidade na literatura, conforme a Seção 3.5, foi percebida a falta de uma abordagem em tempo real e descentralizada. A maioria dos artigos encontrados utilizam bases de dados e concentram os cálculos e inferências em nodos centralizadas (YOON; JUNG; KIM, 2024; VANHEEL et al., 2011; ŞEKER et al., 2024), o que pode gerar variações e imprecisões na utilização desta abordagem em tempo real.

Para o cálculo em tempo real, é necessário implementar um método que seja executado diretamente no próprio dispositivo ESP32, ou seja, é necessário realizar o cálculo das medidas internamente, sem a dependência de outros dispositivos centralizadores, mantendo a essência de sistemas totalmente distribuídos, sem ponto central de comunicação.

O diagrama da Figura 11 ilustra uma possível configuração do sistema, onde dois dispositivos ESP32 se comunicam diretamente, realizando o cálculo de distância entre eles, e um notebook é utilizado apenas para monitorar o sistema, podendo também representar uma camada de aplicação que faz uso das distâncias calculadas pelos dispositivos IoT.

Figura 11 – Comunicação dos dispositivos ESP-32 para a aplicação de localização indoor.



Fonte: O Autor.

Para isso, desenvolvemos um sistema de localização interno utilizando o ESP32 e a técnica de cálculo de distância baseada no RSSI implementada no próprio dispositivo. Para isso, foi criada uma biblioteca em C++ chamada de *localizador*, responsável pela aquisição, processamento dos dados de RSSI, utilização do EspNow e cálculo das distâncias em tempo real.

Para implementar a comunicação de dispositivos, a biblioteca QuickEspNow foi utilizada, a qual pode ser caracterizada como um *wrapper*, que pode ser definido como um facilitador de utilização das funções nativas do ESP-NOW. A biblioteca QuickEspNow abstrai muitos dos detalhes complexos do framework ESP-NOW. Mais detalhes da biblioteca podem ser encontrados na sua documentação oficial disponível em (MAG, 2023).

Dentro da biblioteca, dois principais recursos para o cálculo de distância em tempo real foram utilizados: funções de *callback*, e o modo de envio de mensagens chamado de *broadcast*. O modo *broadcast*, ao ser configurado em determinada faixa de frequência da biblioteca, possibilita que todos os dispositivos que estejam configurados, receberão a sua mensagem, sem a necessidade de estabelecer uma conexão, comum em protocolos Wi-Fi (KUROSE; ROSS, 2013).

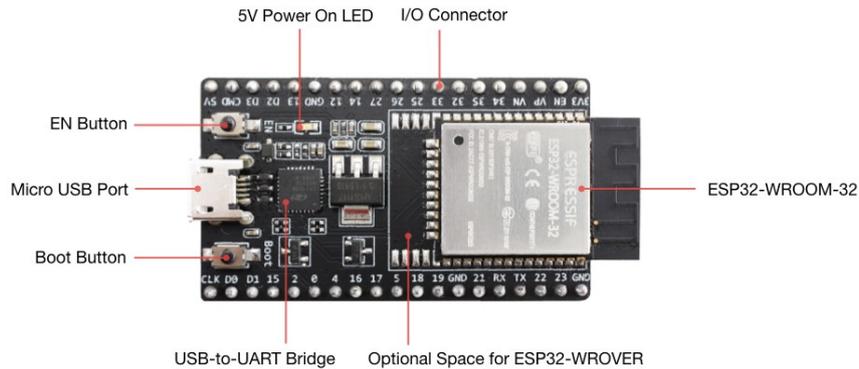
As mensagens, ao serem recebidas, ativam uma função de **callback**. Funções de *callback* são funções que são ativadas quando um determinado evento ocorre, neste caso, utilizou-se o método `quickEspNow.onDataRcvd()`. Portanto, a partir do momento que o dispositivo receber uma mensagem, ele irá iniciar todo o processamento dos dados para o cálculo da distância.

## 5.2 Implementação

Os dispositivos utilizados no projeto foram as placas de desenvolvimento ESP-WROOM-32 DevKitV1. Ela é projetada para facilitar o desenvolvimento e possui recursos integrados como Wi-Fi, Bluetooth e uma variedade de interfaces de entrada e saída. A placa inclui um conector USB integrado para programação e depuração, o que permitiu agilidade na compilação do código, e também o monitoramento dos valores gerados pelo dispositivo. A Figura 12 demonstra um esquemático do dispositivo utilizado.

A configuração experimental foi composta por 2 dispositivos distribuídos, que trocam mensagens entre si em modo de *broadcast*, como demonstrado na Figura 13. Importante ressaltar que o computador pessoal envolvido presente na Figura 13 é somente

Figura 12 – ESP-WROOM-32 DevKitV1

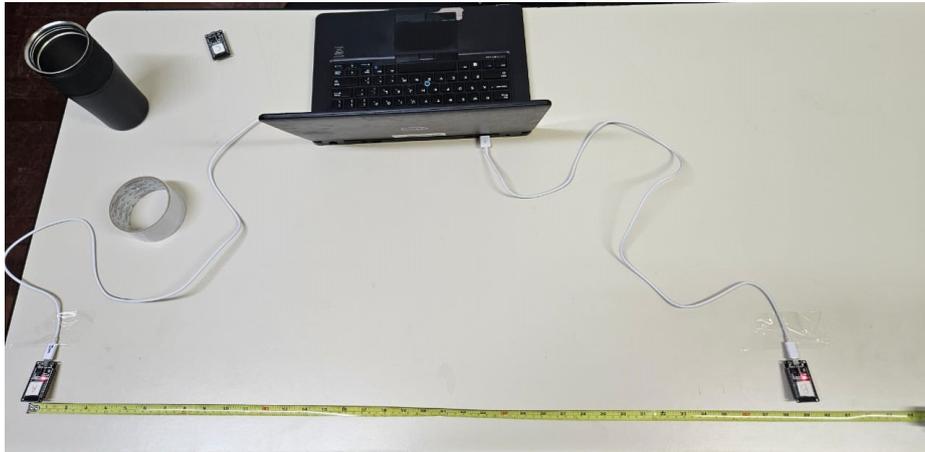


Fonte: [Systems \(2023b\)](#)

utilizado para alimentar e monitor os dispositivos, permitindo realizar os testes sobre o método, observando-se os valores de distância calculados pelos dispositivos.

A implementação do código no ESP32 está no repositório do GitHub, onde o código inclui não somente a instanciação do objeto Localizador, mas também o código utilizado para realizar o experimento. Detalhes sobre a implementação podem ser encontrados no link <sup>1</sup>.

Figura 13 – Configuração Experimental.



Fonte: O Autor.

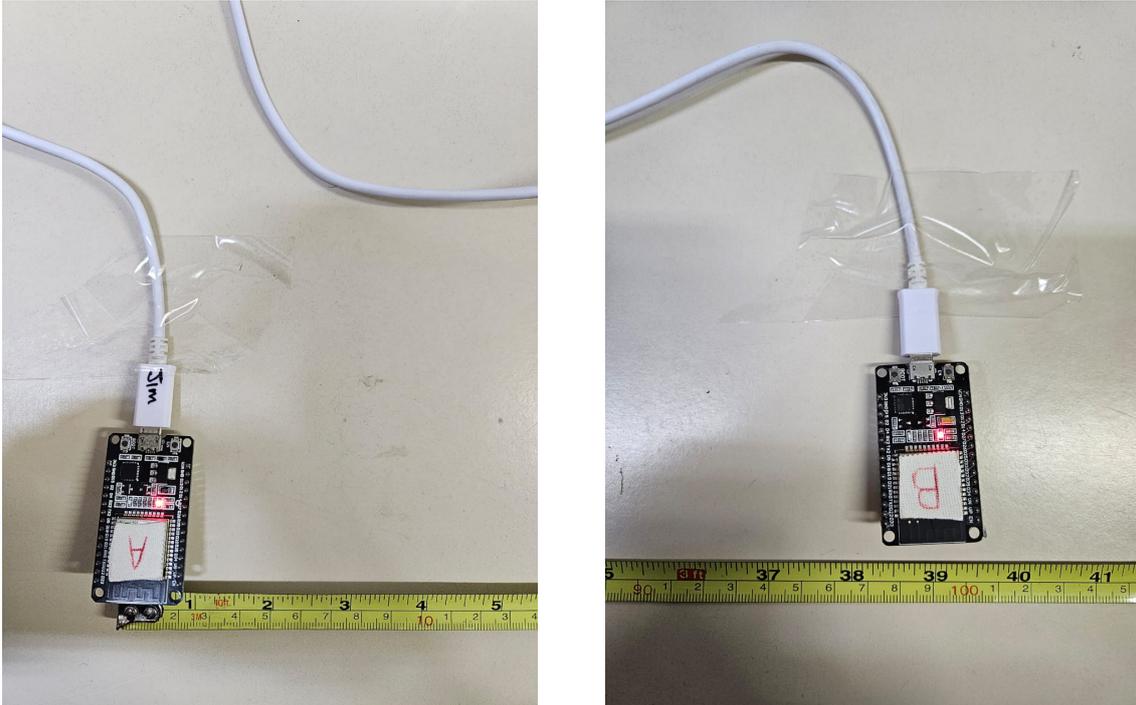
Além disso, foram realizadas experimentos com os dispositivos posicionados em diferentes distâncias, as quais eram estabelecidas através de uma medição manual utilizando uma fita métrica, conforme mostrado na Figura 14. As distâncias utilizadas neste estudo foram entre 1 e 5 metros, variando de 1 em 1 metro. Na Figura 14 é apresentado a configuração para experimentação na medida de 1 metro.

### 5.3 Descrição do Algoritmo Implementado no Localizador

O algoritmo implementado no *Localizador* utiliza a comunicação sem fio via ESP-NOW para calcular a distância entre dispositivos ESP32 com base nos valores de RSSI

<sup>1</sup> <https://github.com/rycbatt/tcc/tree/main/codigo/ESP32/>

Figura 14 – Imagem aproximada da configuração experimental para 1 metro.



Fonte: O Autor.

(*Received Signal Strength Indicator*). A seguir, descrevemos detalhadamente cada etapa do algoritmo.

1. **Recepção de Dados via Callback do QuickEspNow:** A função de *callback dataReceived* do QuickEspNow é responsável por receber mensagens de outros dispositivos ESP32. Quando uma mensagem é recebida, a função extrai o conteúdo da mensagem e o endereço MAC do dispositivo remetente.
2. **Identificação da Mensagem:** Verifica-se se a mensagem recebida contém somente um caractere maiúsculo. Se for o caso, interpreta-se a mensagem como proveniente de um nó que deve ter sua distância calculada. O caractere maiúsculo é usado como um identificador único (ID) do nó.
3. **Verificação de Calibração:** Com o ID e o endereço MAC do nó, verifica-se na memória flash do ESP32 se o nó já foi calibrado anteriormente. Essa verificação é feita buscando as amostras de RSSI salvas para o nó específico.
4. **Cálculo da Distância:** Utiliza-se a equação (1) baseada no valor de RSSI medido a 1 metro de distância (*measuredPower*), o valor atual de RSSI e um fator de propagação (*n*).
5. **Início da Calibração:** Se o nó não estiver calibrado, inicia-se o processo de calibração. Durante a calibração, são coletados 50 amostras de RSSI contendo o ID, o MAC, o valor de RSSI e a distância. Essas amostras são coletadas a uma distância previamente informada, por exemplo, 1 metro.

6. **Armazenamento das Amostras:** Após coletar 50 amostras do mesmo dispositivo para a mesma distância, as amostras são salvas na memória flash do ESP32, e o dispositivo é considerado calibrado.

## 6 Resultados

Nos primeiros experimentos, foi analisado o comportamento do sinal de RSSI em 2 ambientes internos diferentes, um ambiente doméstico e um ambiente de laboratório de pesquisa. O laboratório possui horários de alta e baixa ocupação, que também foram analisados. Também foram analisadas as diferenças de sinais entre dispositivos ESP32 distintos.

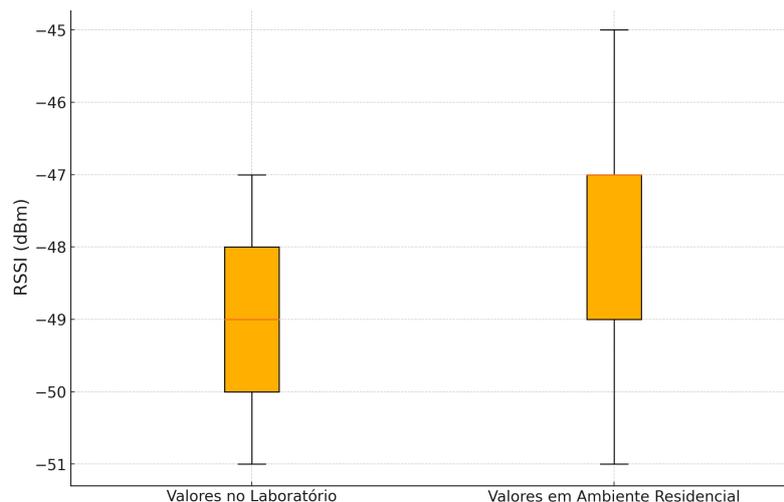
Dada a variação de sinais de RSSI para diferentes dispositivos, utilizamos somente dois dispositivos ESP32 para os experimentos de distâncias: 1,2,3,4 e 5 metros no laboratório, em ambos, horários de pouca ocupação e alta ocupação do prédio. Demonstrando suas principais diferenças e pontos em comum.

Com os valores de RSSI obtidos no laboratório com pouca ocupação, os dispositivos são calibrados, e após a calibragem são obtidos dados de RSSI em 1,2,3,4 e 5 metros e então realizados os cálculos de distância em tempo real a partir da equação (1).

### 6.1 Dados Obtidos em Ambientes Internos

Os dados foram coletados em dois cenários: um ambiente doméstico com poucos dispositivos Wi-Fi (um apartamento de 200  $m^2$ ) e um laboratório com muitos dispositivos Wi-Fi (Um laboratório de pesquisa dentro da universidade). O primeiro cenário, foi utilizado para verificar o comportamento dos valores de RSSI em diferentes ambientes. Nesse cenário, foram obtidas 50 amostras, dos mesmos dispositivos ESP32, nós A e B, em dois ambientes: laboratório e residência. A Figura 15 ilustra os valores coletados em quartis.

Figura 15 – Valores de RSSI das mensagens enviadas pelo nó B, recebidas pelo nó A, para 1 metro de distância.



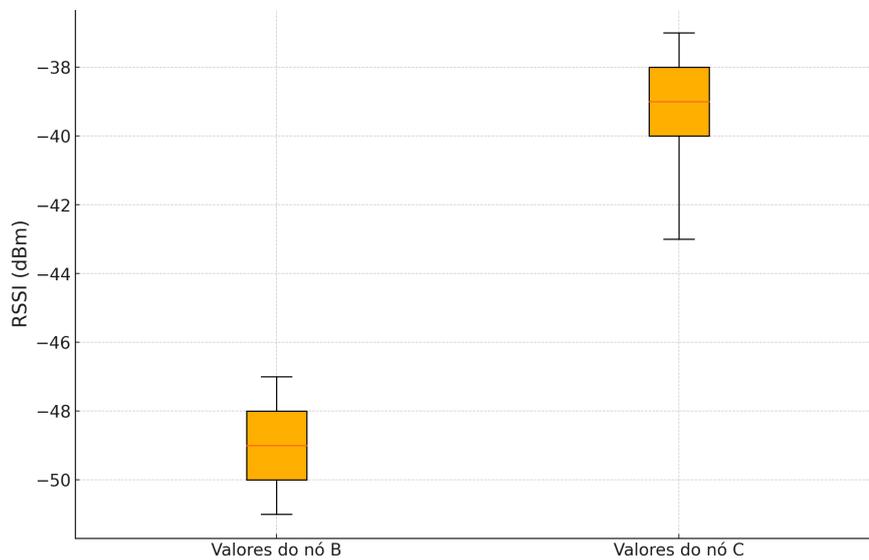
Fonte: O Autor.

Nas medições apresentadas pela Figura 15, os dispositivos foram posicionados a distância de 1 metro. Mesmo com uma distância igual para ambos os ambientes, podemos

notar uma variação dos valores de RSSI medidos. As variações ocorrem mesmo para os valores da média, onde a média dos valores de RSSI no Laboratório foram menores do que no ambiente doméstico, indicando um enfraquecimento do sinal provavelmente causado pelas possíveis interferências de ondas eletromagnéticas presentes no local, devido à maior quantidade de dispositivos no ambiente. Estas medidas indicam que os dispositivos ESP32 deveriam ser recalibrados todas as vezes em que trocarem de ambiente.

No segundo cenário, avaliamos a variação dos valores de RSSI entre dispositivos ESP32 em um mesmo ambiente, com o objetivo de entender se os valores de RSSI também são dependentes de dispositivos. O cenário experimental foi composto pelos nós B e C enviando mensagens para o nó A, na distância de 1 metro, no ambiente de laboratório. O resultado das medições de RSSI para esse experimento são apresentados na Figura 16.

Figura 16 – Comparação dos valores de RSSI dos nós B e C, recebidos no nó A, em laboratório, para 1 metro de distância



Fonte: O Autor.

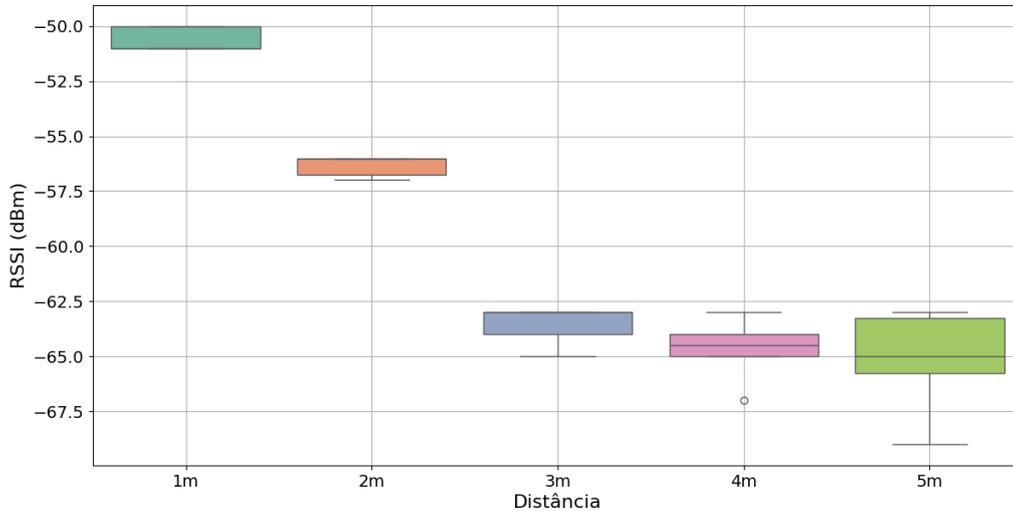
Como pode ser observado nos resultados apresentados na Figura 16, há uma grande variabilidade nos valores de RSSI para diferentes ESP32. Esta variabilidade pode originar de diferentes configurações do driver de Wi-Fi dos dispositivos, ou até mesmo danos físicos ou desgaste apresentados pelos mesmos (ambos os dispositivos utilizados não são novos).

No terceiro experimento, explorou-se a variação dos valores de RSSI ao longo de diferentes distâncias. Nesse experimento, posicionou-se o nó B em diferentes distâncias do laboratório, realizando a medição de RSSI a partir do nó A, no ambiente de laboratório, obtendo-se uma coleta de valores para as diferentes distâncias. Os dados coletados nesse experimento são apresentados na Figura 17.

Analisando os resultados apresentados na Figura 17, pode-se observar que seria possível uma classificação de valores para distâncias entre 1 e 2 metros. Entretanto, a partir da faixa de distância de 3 metros, a amplitude dos valores de RSSI se torna bastante parecida, e a média de valores fica situada praticamente na mesma localidade.

Considerando a possibilidade de interferências, outro experimento foi realizado, executando-se as medições no ambiente de laboratório, em outro horário do dia, com o laboratório vazio e menos pessoas na universidade como um todo. A expectativa dessa

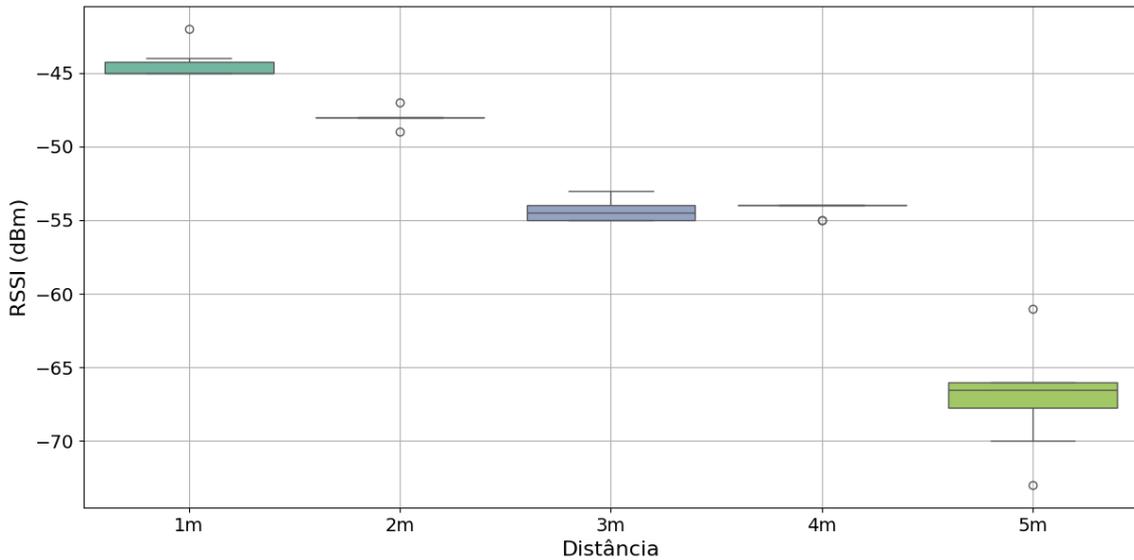
Figura 17 – Valores de RSSI do nó A ao B medidos a diferentes distâncias, no laboratório ocupado



Fonte: O Autor.

experimentação foi analisar o comportamento dos valores de RSSI em um ambiente com menos interferência eletromagnética. Os resultados das coletas realizadas para esse experimento são apresentadas na Figura 18. É notável a mudança dos valores observados, gerando menos variabilidade para as diferentes distâncias, porém mantendo sobreposição dos valores observados, com uma clara distinção apenas até os 2m de distância.

Figura 18 – Valores de RSSI do nó A ao B medidos a diferentes distâncias, no laboratório vazio



Fonte: O Autor.

A partir dos experimentos realizados com medições de RSSI, iniciou-se a análise do comportamento do método para o cálculo de distância. Primeiramente optou-se por implementar o algoritmo apresentado por (ŞEKER et al., 2024). Onde a distância é calculada de acordo com a fórmula apresentada pela equação (1).

Nessa equação, o fator de propagação  $n$  é algo que deve ser avaliado a partir das medidas experimentais, de acordo com cada ambiente. Para isso explorou-se os valores de  $n = 2$  e  $n = 4$ , sendo 4 o valor indicado pelo autor. Os resultados dessa análise são apresentados na Tabela 2, considerando uma distância entre dispositivos de 1 metro.

Tabela 2 – Valores médios em metros para  $n = 2$  e  $n = 4$ .

Valores em metros para $n = 2$	Valores em metros para $n = 4$
1.16	1.21
0.82	1.36
0.92	1.08
0.73	0.96
0.82	0.96
0.73	1.02
0.58	1.02
0.65	1.02
0.65	1.02
0.73	1.08
<b>Média</b>	<b>Média</b>
0.779	1.073

Fonte: O Autor.

Importante salientar que os valores coletados para cada configuração de  $n$  da equação (1) podem variar de acordo com a interferência no ambiente, por isso o valor de  $n$  foi calculado no mesmo dia e nas mesmas condições de ambiente (ocupação de espaço e horários) dos demais experimentos. A partir dos valores obtidos, pode-se inferir que para as condições usuais do ambiente experimental de laboratório, o valor de  $n = 4$  é o mais adequado, confirmando as observações dos autores em (ŞEKER et al., 2024), e portanto foi utilizado no restante das avaliações realizadas.

Após a definição do valor de  $n = 4$ , realizou-se experimentações em relação ao cálculo de distâncias. No estudo de caso realizado, uma mensagem em um nó B já calibrado (com 10 amostras de uma distância de um metro armazenadas na memória) é enviada para um segundo nó A. Ao receber a mensagem, calcula-se diretamente a distância com o algoritmo descrito. Para uma análise abrangente, os experimentos foram realizados em 5 distâncias diferentes, de 1 à 5 metros, com variação de 1 metro. As Tabelas 3, 4 e 5 apresentam os resultados para as distâncias de 1, 2, e 3 metros respectivamente.

Tabela 3 – Resultados obtidos a 1 Metro

<b>RSSI</b>	<b>Distância</b>	<b>Erro</b>
-51 dBm	1.00 m	0.00 m
-50 dBm	0.94 m	0.06 m
-50 dBm	0.94 m	0.06 m
-51 dBm	1.00 m	0.00 m
-51 dBm	1.00 m	0.00 m
-51 dBm	1.00 m	0.00 m
-51 dBm	1.00 m	0.00 m
-50 dBm	0.94 m	0.06 m
-50 dBm	0.94 m	0.06 m
-51 dBm	1.00 m	0.00 m

Fonte: O Autor.

Para uma distância de 1 metro, conforme observado na Tabela 3, pode-se notar uma faixa pequena de erro em todas as distâncias calculadas, resultado esperado, alinhados com as observações e resultados apresentados por Şeker et al. (2024). Com uma baixa variação, obteve-se valores de erros bastante pequenos.

Tabela 4 – Resultados obtidos a 2 Metros

<b>RSSI</b>	<b>Distância</b>	<b>Erro</b>
-56 dBm	1.33 m	0.67 m
-57 dBm	1.41 m	0.59 m
-56 dBm	1.33 m	0.67 m
-57 dBm	1.41 m	0.59 m
-56 dBm	1.33 m	0.67 m
-56 dBm	1.33 m	0.67 m
-56 dBm	1.33 m	0.67 m
-56 dBm	1.33 m	0.67 m
-57 dBm	1.41 m	0.59 m
-56 dBm	1.33 m	0.67 m

Fonte: O Autor.

Para uma distância de 2 metros, conforme observado na Tabela 4, os resultados são menos precisos. A menor precisão para valores superiores a 2 metros foi pouco destacada nos resultados apresentados por (ŞEKER et al., 2024), autor original do algoritmo utilizado, onde apenas duas medidas com distâncias superiores a 2 metros foram demonstradas. Nos valores de erro apresentados na Tabela 4, temos uma precisão de apenas 60%.

Tabela 5 – Resultados obtidos a 3 Metros

RSSI	Distância	Erro
-65 dBm	2.23 m	0.77 m
-64 dBm	2.11 m	0.89 m
-63 dBm	1.99 m	1.01 m
-63 dBm	1.99 m	1.01 m
-63 dBm	1.99 m	1.01 m
-63 dBm	1.99 m	1.01 m
-63 dBm	1.99 m	1.01 m
-63 dBm	1.99 m	1.01 m
-64 dBm	2.11 m	0.89 m
-64 dBm	2.11 m	0.89 m
-63 dBm	1.99 m	1.01 m

Fonte: O Autor.

Para uma distância de 3 metros, conforme observado na Tabela 5, a precisão é reduzida para menos de 50%. Para outras faixas de distâncias superiores a 3 metros, as medidas obtidas pelo algoritmo são similares as apresentadas na Tabela 5, não sendo possível distinguir as distâncias reais através dos valores obtidos. Esse resultado era esperado, considerando análise realizada sobre os valores de RSSI, os quais se mantêm na mesma faixa de valores, conforme foi apresentado nas Figuras 17 e 18.

O detalhamento do código, imagens e dados utilizados estão disponíveis em formato *open source* em repositório do GitHub<sup>2</sup>.

## 7 Conclusão

Esse trabalho investigou a extração de medidas de distância entre dispositivos ESP32, de forma totalmente distribuída e em tempo real, utilizando RSSI. A extração de medidas de distância entre dispositivos bastante acessíveis, de baixo custo, possibilitam o desenvolvimento de uma série de aplicações em diversas áreas.

Na proposta apresentada neste trabalho, mostra-se que é possível utilizar uma configuração em tempo real para o cálculo da distância de dispositivos Wi-Fi. Nossos experimentos e resultados mostram uma boa precisão para o cálculo de distância entre dispositivos ESP32 em uma distância de 1 metro.

Além disso, embora os resultados mostram uma precisão inferior para distâncias superiores, as medidas retornadas estão fora do intervalo de medidas para 1 metro. Essa observação possibilita, por exemplo, o uso dessa tecnologia para implementação de automações industriais que requerem um entendimento de que 2 objetos estão a uma distância próxima de 1 metro (ou inferior), como aplicações de logística.

O estudo apresentado também explorou a sensibilidade de variação de RSSI para diferentes ambientes e diferentes dispositivos que possuem a mesma configuração de hardware e software. Abre-se portanto um questionamento sobre como realizar medições com dispositivos que apesar de serem do mesmo modelo, podem possuir discrepâncias significativas nos seus valores de RSSI.

<sup>2</sup> <https://github.com/rycbatt/tcc/tree/main>

Existe espaço para futuros trabalhos que foquem na otimização dos algoritmos para dispositivos já conhecidos, uma vez que a variação de RSSI para até 3 metros aparenta ser distinguível, e assim seria possível calculá-la com mais precisão. Entretanto, os resultados se limitam a dispositivos não calibrados, uma vez que a variação de RSSI se mostrou bastante alta até mesmo para dispositivos de mesmo modelo, sendo necessária uma investigação mais aprofundada nas possíveis causas destes comportamentos que, uma vez mapeados, podem ser utilizados em novas formulações de cálculo de distância.

## Referências

- ASAAD, S. M.; MAGHDID, H. S. A comprehensive review of indoor/outdoor localization solutions in iot era: Research challenges and future perspectives. *IEEE Access*, 2024. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128622001918>>. Citado na página [14].
- BARDWELL, J. The truth about 802.11 signal and noise metrics. Connect802 Corporation, 2004. Copyright 2004 - Connect802 Corporation. Turnkey Wi-Fi Wireless Networking. Virtual Site Survey Services. Disponível em: <<https://d2cpnw0u24fjm4.cloudfront.net/wp-content/uploads/RSSI-Signal-to-Noise-Ratio.pdf>>. Citado (2) vezes nas páginas [11 e 12].
- CWIKLA, G. et al. The initial considerations and tests on the use of real time locating system in manufacturing processes improvement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, v. 400, n. 4, p. 042013, aug 2018. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/400/4/042013>>. Citado na página [7].
- FAN, Z. et al. 3d mapping of multi-floor buildings based on sensor fusion. In: *2017 International Conference on Sensor Technology and Applications (SENSORCOMM)*. [s.n.], 2017. p. 34–39. Disponível em: <<https://imagelab.stu.edu.cn/upload/files/3D%20mapping%20of%20multi-floor%20buildings%20based%20on%20sensor%20fusion.pdf>>. Citado na página [15].
- JOVAN, F. et al. Multimodal indoor localisation in parkinson’s disease for detecting medication use: Observational pilot study in a free-living setting. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, v. 7, n. 3, p. 1–26, August 2023. Disponível em: <<https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/3580305.3599872>>. Citado (3) vezes nas páginas [7, 13 e 15].
- KIM, T. et al. Development of an indoor delivery mobile robot for a multi-floor environment. *IEEE Access*, 2024. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10478744/>>. Citado (4) vezes nas páginas [7, 13, 14 e 15].
- KUROSE, J. F.; ROSS, K. W. *Computer Networking: A Top-Down Approach*. 6. ed. [S.l.]: Pearson, 2013. Citado (3) vezes nas páginas [10, 11 e 18].
- LI, H. et al. Real-time locating systems applications in construction. *Automation in Construction*, v. 63, p. 37–47, 2016. ISSN 0926-5805. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580515002411>>. Citado na página [7].
- MAG, G. *QuickEspNow*. 2023. Accessed: 2023-06-06. Disponível em: <<https://github.com/gmag11/QuickESPNow>>. Citado na página [18].
- MARASOVIĆ, I.; MAJIĆ, G.; ŠKALIC, I. Indoor localization of industrial iot devices and applications based on recurrent neural networks. *Journal of Communications and Networks*, 2024. Disponível em: <<https://hrcak.srce.hr/file/455449>>. Citado (2) vezes nas páginas [7 e 13].

NINH, D. B. et al. An effective random statistical method for indoor positioning system using wifi fingerprinting. *Future Generation Computer Systems*, v. 109, p. 238–248, 2020. Citado na página [15].

PARIHAR, Y. S. et al. Internet of things and nodemcu. *journal of emerging technologies and innovative research*, v. 6, n. 6, p. 1085, 2019. Citado na página [9].

SYSTEMS, E. *ESP32 Series Datasheet*. 2023. Accessed: 2023-06-06. Disponível em: <[https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf)>. Citado na página [10].

SYSTEMS, E. *Espressif Official Website*. 2023. <<https://www.espressif.com>>. Acessado em: 07 05, 2024. Citado (5) vezes nas páginas [9, 10, 11, 13 e 19].

URAZAYEV, D. et al. *Indoor Performance Evaluation of ESP-NOW*. 2023. <[https://www.researchgate.net/publication/369626626\\_Indoor\\_Performance\\_Evaluation\\_of\\_ESP-NOW](https://www.researchgate.net/publication/369626626_Indoor_Performance_Evaluation_of_ESP-NOW)>. Citado na página [13].

VANHEEL, F. et al. Automated linear regression tools improve rssi wsn localization in indoor environments. *SpringerOpen*, 2011. Disponível em: <<https://jwcn-urasipjournals.springeropen.com/articles/10.1186/1687-1499-2011-38>>. Citado (3) vezes nas páginas [12, 13 e 17].

WHITE, E. *Making embedded systems*. [S.l.]: "O'Reilly Media, Inc.", 2024. Citado na página [9].

YANG, J.; TSUBOUCHI, K.; NAKAMAE, S. Orientation estimation using differences in wifi signal behavior in los and nlos cases. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2024. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10502827/>>. Citado (2) vezes nas páginas [15 e 16].

YOON, N.; JUNG, W.; KIM, H. Deeprssi: Generative model for fingerprint-based localization. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2024. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/10526268>>. Citado (2) vezes nas páginas [16 e 17].

ŞEKER Özlem et al. Physical tracking of esp32 iot devices with rssi based indoor position calculation. *Journal of Millimeterwave Communication, Optimization and Modelling*, v. 4, n. 1, p. 13–16, 2024. Citado (6) vezes nas páginas [8, 16, 17, 23, 24 e 25].