



INSTITUTO FEDERAL GOIANO  
CAMPUS TRINDADE  
ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO

BRUNO SANTOS TAQUARI

SITE SURVEY PARA REDE WI-FI 802.11AC

Trindade

2025

BRUNO SANTOS TAQUARI

**SITE SURVEY PARA REDE WI-FI 802.11AC**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia da Computação, do Instituto Federal Goiano Campus Trindade, como parte da exigência para obtenção do título de Bacharel em Engenharia da Computação.

Orientador: Dr. Geovanne Pereira Furriel

Trindade

2025

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do  
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano - SIBi**

Santos Taquari, Bruno  
T175 SITE SURVEY PARA REDE WI-FI 802.11AC / Bruno Santos  
Taquari. Trindade 2025.  
61f. il.  
Orientador: Prof. Dr. Geovanne Pereira Furriel.  
Tcc (Bacharel) - Instituto Federal Goiano, curso de 0820303 -  
Bacharelado em Engenharia de Computação - Trindade (Campus  
Trindade).  
1. IEEE 802.11ac. 2. Wi-fi 5. 3. Site survey. 4. Mapa de calor. 5.  
Rede sem fio. I. Título.

# TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem resarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

## IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

- Tese (doutorado)       Artigo científico  
 Dissertação (mestrado)       Capítulo de livro  
 Monografia (especialização)       Livro  
 TCC (graduação)       Trabalho apresentado em evento

Produto técnico e educacional - Tipo: \_\_\_\_\_

Nome completo do autor:

Bruno Santos Taquari

Matrícula:

2021108203030046

Título do trabalho:

SITE SURVEY PARA REDE WI-FI 802.11AC

## RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial:  Não  Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 22 / 12 / 2025

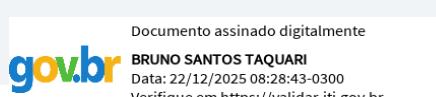
O documento está sujeito a registro de patente?  Sim  Não

O documento pode vir a ser publicado como livro?  Sim  Não

## DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.



Trindade

22 / 12 / 2025

Local

Data

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

\_\_\_\_\_

Assinatura do(a) orientador(a)

Documento assinado digitalmente

GEOVANNE PEREIRA FURRIEL

Data: 22/12/2025 08:35:09-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>



Ata nº 69/2025 - CE-TRI/GE-TRI/CMPTRI/IFGOIANO

### **ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO**

Aos **10** dias do mês de dezembro de 2025, às 18 horas e 00 minutos, reuniu-se a banca examinadora composta pelos docentes: Geovanne Pereira Furriel (orientador), Rodrigo de Sousa Gomide (membro), Luiz Alberto do Couto (membro), André Almeida Souza Coelho (membro), para examinar o Trabalho de Curso intitulado “Site Survey para Rede Wi-Fi 802.11ac” do estudante Bruno Santos Taquari, Matrícula nº 2021108203030046 do Curso de Bacharelado em Engenharia de Computação do IF Goiano – Campus Trindade. A palavra foi concedida ao estudante para a apresentação oral do TC, houve arguição do candidato pelos membros da banca examinadora. Após tal etapa, a banca examinadora decidiu pela APROVAÇÃO do estudante com nota 93. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata que segue assinada pelos membros da Banca Examinadora.

*(Assinado Eletronicamente)*

Geovanne Pereira Furriel

Orientador(a)

*(Assinado Eletronicamente)*

Rodrigo de Sousa Gomide

Membro

*(Assinado Eletronicamente)*

Luiz Alberto do Couto

Membro

*(Assinado Eletronicamente)*

André Almeida Souza Coelho

Membro

Documento assinado eletronicamente por:

- **Geovanne Pereira Furriel, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 18/12/2025 09:49:23.
- **Rodrigo de Sousa Gomide, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 18/12/2025 10:11:29.
- **Luiz Alberto do Couto, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 18/12/2025 10:13:35.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 18/12/2025. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

**Código Verificador:** 776148

**Código de Autenticação:** 76b8a6e41f



INSTITUTO FEDERAL GOIANO

Campus Trindade

Av. Wilton Monteiro da Rocha, S/N, Setor Cristina II, TRINDADE / GO, CEP 75389-269

(62) 3506-8000

*"O homem é assim o árbitro constante de sua própria sorte. Ele pode aliviar o seu suplício ou prolongá-lo indefinidamente. Sua felicidade ou sua desgraça dependem da sua vontade de fazer o bem."*

*ALLAN KARDEC, 1804 – 1869*  
*O Livro dos Espíritos, Questão 199 - Nota de Kardec.*

*Dedico este trabalho de conclusão de curso a todos que, de alguma forma, estiveram comigo nesta trajetória. De modo especial, a minha família, a meus amigos, a meus colegas de turma e ao corpo docente.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, a Deus, por ter abençoado e permitido a concretização desses cinco anos de curso e por ter me proporcionado, neste período, felicidade, prosperidade e uma significativa evolução moral. Agradeço, também, à minha família, que sempre me prestou todo o apoio e incentivo necessários, manifestando uma constante e intensa torcida pelo meu sucesso.

## **RESUMO**

O presente trabalho desenvolve uma ferramenta computacional de baixo custo para análise da cobertura de redes Wi-Fi baseadas no padrão IEEE 802.11ac em ambientes internos. A solução, implementada em Python e executada em um Raspberry Pi 5, permite importar plantas arquitetônicas em formato de imagem, definir escala, coletar medições de intensidade de sinal (RSSI) e gerar mapas de calor utilizando interpolação espacial. A metodologia integra fundamentos de propagação de ondas, modelos de perda de percurso e técnicas de visualização gráfica, possibilitando uma interpretação clara da distribuição do sinal. Um estudo de caso em ambiente residencial validou o sistema, evidenciando coerência entre os valores medidos e o comportamento esperado da propagação em 5 GHz. Os resultados demonstram que a ferramenta é funcional, acessível e eficaz como alternativa às soluções comerciais de *site survey*, oferecendo subsídios para o planejamento e diagnóstico de redes WLAN. Trabalhos futuros incluem aprimoramentos na interpolação, suporte a múltiplos APs e expansão para ambientes maiores.

Palavras-chave: IEEE 802.11ac. Wi-fi 5. Site survey. Mapa de calor. Rede sem fio.

## **ABSTRACT**

The present work develops a low-cost computational tool for analyzing Wi-Fi coverage in indoor environments based on the IEEE 802.11ac standard. The solution, implemented in Python and executed on a Raspberry Pi 5, enables importing architectural floor plans, defining scale, collecting signal strength measurements (RSSI), and generating heat maps through spatial interpolation. The methodology integrates concepts of wave propagation, path-loss models, and graphical visualization techniques, providing a clear representation of signal distribution. A case study conducted in a residential environment validated the system, demonstrating coherence between measured values and expected 5 GHz propagation behavior. The results show that the tool is functional, accessible, and effective as an alternative to commercial site-survey solutions, supporting WLAN planning and diagnostics. Future improvements include enhanced interpolation, multi-AP support, and scalability for larger environments.

Keywords: IEEE 802.11ac. Wi-fi 5. Site survey. Heatmap. Wireless network.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Wi-Fi	– Wireless Fidelity
WLAN	– Wireless Local Area Network
IEEE	– Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
AP	– Access Point
STA	– Station
QoS	– Quality of Service
MU-MIMO	– Multi-User Multiple-Input Multiple-Output
QAM	– Quadrature Amplitude Modulation
ODFM	– Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
DSSS	– Direct Sequence Spread Spectrum
SNR	– Signal-to-Noise Ratio
BER	– Bit Error Rate
LDPC	– Low-Density Parity-Check
BPSK	– Binary Phase Shift Keying
QPSK	– Quadrature Phase Shift Keying
FFT	– Fast Fourier Transform
IFFT	– Inverse Fast Fourier Transform
CP	– Cyclic Prefix
ISI	– Inter-Symbol Interference
CSI	– Channel State Information
IoT	– Internet of Things
SU-BF	– Single-User Beamforming
MU-BF	– Multi-User Beamforming
SU-MIMO	– Single-User Multiple-Input Multiple-Output
RAM	– Random Access Memory
GUI	– Graphical User Interface
GPIO	– General-Purpose Input/Output
PL	– Path Loss
RSSI	– Received Signal Strength Indicator
MCS	– Modulation and Coding Scheme
JSON	– JavaScript Object Notation

## LISTA DE SÍMBOLOS

dbm	–	decibel-miliwatt
GHz	–	Gigahertz
MHz	–	Megahertz
KHz	–	Kilohertz
Gbps	–	Gigabits por segundo
$d_{i,j}$	–	distância do ponto de acesso
$f_c$	–	Frequência
$W_{i,j}$	–	Número de paredes transpassados
$F_{i,j}$	–	Número de pisos transpassados
$P_{\text{dBm}}$	–	Potência em decibel-miliwatt (dbm)
$P_{\text{mW}}$	–	Potência em miliwatts
mW	–	miliwatt

# SUMÁRIO

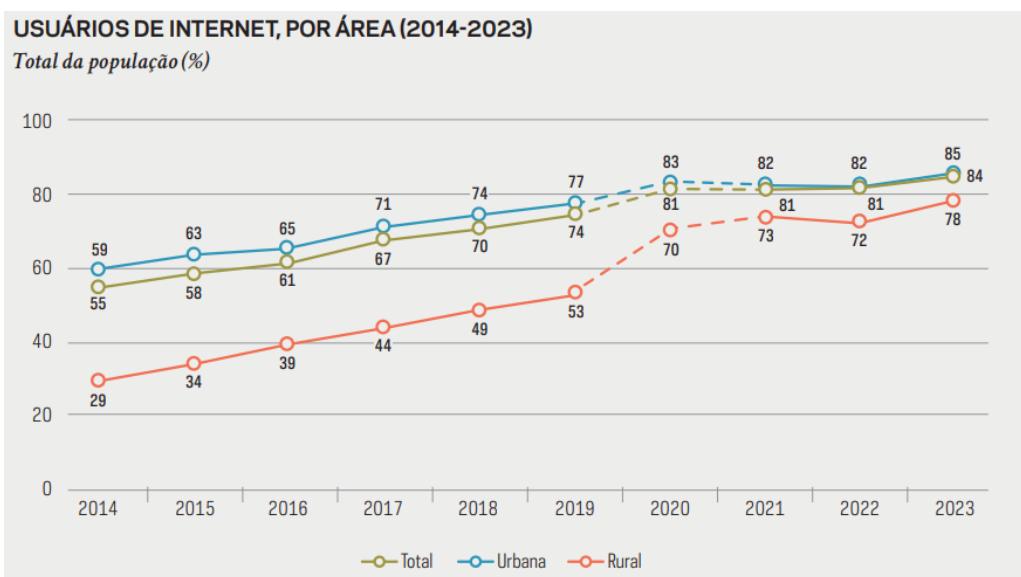
	<u>Pág.</u>
<b>1 Introdução . . . . .</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivos . . . . .	2
1.1.1 Objetivo Geral . . . . .	2
1.1.2 Objetivos Específicos . . . . .	3
1.2 Justificativa e Relevância . . . . .	4
1.3 Restrições e Limitações . . . . .	5
<b>2 Fundamentação Teórica . . . . .</b>	<b>7</b>
2.1 Redes Wi-Fi e Arquitetura WLAN . . . . .	7
2.2 Padrão IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5) . . . . .	7
2.3 Modulação 256-QAM . . . . .	8
2.4 Multiplexação OFDM . . . . .	10
2.5 Beamforming Explícito . . . . .	11
2.6 MU-MIMO . . . . .	11
2.7 Modelos de Perda de Percurso (Path Loss) . . . . .	13
2.8 Propagação de Sinal em Ambientes Internos . . . . .	14
2.9 Mapas de Calor e Interpolação Espacial . . . . .	15
<b>3 Metodologia . . . . .</b>	<b>16</b>
3.1 Tipo de Pesquisa . . . . .	16
3.2 Materiais e Equipamentos . . . . .	17
3.2.1 Hardware . . . . .	17
3.2.2 Software e Bibliotecas . . . . .	17
3.2.3 Ambiente de Teste . . . . .	18
3.3 Preparação da Planta Arquitetônica . . . . .	18
3.4 Coleta de Dados de Intensidade de Sinal (RSSI) . . . . .	19
3.5 Modelagem de Perda de Percurso e Tratamento dos Dados . . . . .	19
3.6 Interpolação e Geração do Mapa de Calor . . . . .	20
3.7 Estudo de Caso para Validação . . . . .	21
<b>4 Resultados . . . . .</b>	<b>22</b>
4.1 Desenvolvimento da Ferramenta . . . . .	22
4.1.1 Arquitetura Geral do Sistema . . . . .	22

4.1.2	Fluxo de Funcionamento . . . . .	23
4.1.3	Lógica de Funcionamento . . . . .	23
4.1.4	Fluxograma do Procedimento do Software . . . . .	30
4.2	Estudo de caso . . . . .	32
4.3	Discussão dos Resultados . . . . .	34
4.4	Impacto e Contribuições do Estudo . . . . .	34
<b>5</b>	<b>Conclusão . . . . .</b>	<b>39</b>
5.1	Atendimento aos Objetivos . . . . .	39
5.2	Contribuições do Trabalho . . . . .	40
5.3	Limitações . . . . .	40
5.4	Trabalhos Futuros . . . . .	41
5.5	Considerações Finais . . . . .	42
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS . . . . .</b>		<b>43</b>

## 1 Introdução

O avanço das tecnologias de comunicação sem fio tem ampliado de forma significativa sua aplicação em ambientes corporativos e residenciais. Entre essas tecnologias, o Wi-Fi destaca-se como uma das soluções de maior adoção mundial para redes locais sem fio (WLAN). No Brasil, o Centro Regional de Estudos para o Desenvolvimento da Sociedade da Informação (Cetic.br) acompanha essa tendência por meio de pesquisas anuais. O relatório TIC Domicílios 2023 indica que aproximadamente 90% dos domicílios conectados possuem rede Wi-Fi, evidenciando a forte presença dessa tecnologia no país (CETIC.BR, 2024).

**Figura 1.1** Acesso à internet nos domicílios brasileiros (2014 a 2023)



Fonte: (CETIC.BR, 2024)

Esse crescimento intensifica a demanda por projetos de redes WLAN que assegurem ampla cobertura, alta disponibilidade e confiabilidade. Entretanto, a variabilidade de propagação do sinal em ambientes internos, associada a obstáculos físicos, reflexões e interferências, torna complexa a tarefa de estimar com precisão a intensidade do sinal em diferentes pontos do ambiente. Ferramentas especializadas de *site survey* são amplamente utilizadas para apoiar o planejamento e a validação de redes sem fio, porém, em sua maioria, são soluções proprietárias de alto custo, exigindo licenças pagas e, muitas vezes, equipamentos específicos.

Neste contexto, o padrão Wi-Fi 5 (IEEE 802.11ac) assume papel central. Publicado

em 2013, o IEEE 802.11ac define especificações para redes WLAN de alta velocidade e confiabilidade, operando predominantemente na faixa de 5 GHz e incorporando técnicas como modulação 256-QAM, OFDM, MU-MIMO e *beamforming*, entre outras melhorias em relação a padrões anteriores (IEEE, 1997). Por se tratar de um padrão amplamente difundido no mercado, sua adoção como referência neste trabalho garante aderência às tecnologias presentes em roteadores e pontos de acesso modernos.

Apesar disso, observa-se uma lacuna na disponibilidade de ferramentas acessíveis, de baixo custo, que permitam a técnicos e profissionais de redes realizar levantamentos de campo (*site surveys*) com apoio de modelos de propagação e visualização gráfica da cobertura do sinal. A inexistência ou indisponibilidade dessas ferramentas, sobretudo em contextos com restrições orçamentárias, dificulta a análise detalhada da cobertura e pode comprometer a eficiência e a qualidade do serviço prestado ao usuário final.

Este trabalho insere-se nesse cenário ao propor o desenvolvimento de uma ferramenta computacional de baixo custo, implementada em Python e executada em uma plataforma Raspberry Pi 5, capaz de coletar dados de intensidade de sinal (RSSI em dBm) de redes Wi-Fi 5, relacioná-los a uma planta arquitetônica em formato de imagem e gerar mapas de calor que representem a distribuição espacial da potência do sinal. Dessa forma, busca-se oferecer uma alternativa prática, portátil e financeiramente viável às soluções comerciais de *site survey*, mantendo aderência aos conceitos de modelagem de propagação de sinal apresentados na literatura.

## 1.1 Objetivos

Esta seção apresenta o objetivo geral e os objetivos específicos deste Trabalho de Conclusão de Curso.

### 1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma ferramenta computacional de baixo custo, com interface gráfica, capaz de realizar medições da intensidade do sinal de redes Wi-Fi 5 (IEEE 802.11ac) em diferentes pontos de uma área delimitada, permitindo a importação de plantas arquitetônicas em formato de imagem, o processamento dos dados coletados e a geração de mapas de calor sobrepostos a essas plantas, de modo a facilitar a análise da cobertura do sinal em ambientes internos.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

Para alcançar o objetivo geral, estabelecem-se os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver um software com interface gráfica intuitiva para inserção dos dados necessários à realização das medições, incluindo seleção da planta, definição de escala e configuração do ambiente;
- Permitir a importação de plantas arquitetônicas no formato de imagem (png, jpg, jpeg, gif e bmp), de forma a abranger diferentes fontes e formatos disponíveis;
- Implementar um mecanismo para definição de um sistema de coordenadas baseado na escala da planta importada, garantindo maior precisão na associação entre as medições de intensidade de sinal e a representação espacial do ambiente;
- Permitir a marcação manual dos pontos de medição da intensidade do sinal Wi-Fi sobre a planta arquitetônica, registrando suas coordenadas no sistema de referência definido;
- Desenvolver um mecanismo para a coleta e o armazenamento dos dados de intensidade de sinal em dBm nos pontos definidos, utilizando uma placa de rede Wi-Fi compatível com o padrão IEEE 802.11ac integrado à plataforma Raspberry Pi 5;
- Processar os dados coletados, aplicando técnicas de interpolação e análise espacial, bem como modelos de perda de percurso adequados a ambientes internos, para geração de um mapa de calor representativo da cobertura do sinal Wi-Fi;
- Sobrepor o mapa de calor gerado à imagem da planta arquitetônica, possibilitando uma visualização clara e contextualizada da cobertura do sinal, incluindo a apresentação de uma legenda de intensidade em dBm;
- Realizar um estudo de caso em ambiente interno real, utilizando a ferramenta desenvolvida para avaliar a viabilidade prática da solução proposta e ilustrar seu uso em um cenário residencial.

## 1.2 Justificativa e Relevância

As redes WLAN baseadas no protocolo IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5) apresentam ampla aplicação em ambientes corporativos e residenciais, configurando-se como tecnologia consolidada e amplamente disponível no mercado. No entanto, a distribuição e a cobertura do sinal nesses ambientes continuam representando um desafio significativo, em virtude da natureza das ondas eletromagnéticas e das interferências causadas por obstáculos físicos, materiais de construção, mobiliário e presença de outros dispositivos.

Ferramentas comerciais de *site survey* oferecem recursos avançados para planejamento e validação de redes sem fio, porém, em geral, apresentam custos elevados de licenciamento, exigem equipamentos específicos e, muitas vezes, demandam conhecimento prévio de plataformas proprietárias. Esse cenário limita o acesso de técnicos de redes, pequenas empresas e instituições com orçamento reduzido a metodologias sistemáticas de análise de cobertura, restringindo o diagnóstico detalhado de áreas com baixa intensidade de sinal e dificultando decisões bem fundamentadas sobre a realocação de pontos de acesso ou expansão da infraestrutura.

O desenvolvimento da ferramenta proposta busca atender a essa demanda, oferecendo uma solução computacional de baixo custo, baseada em hardware acessível (Raspberry Pi 5) e em software de código aberto. Ao permitir a importação de plantas em formato de imagem, a definição de escala, a marcação de pontos de medição e a geração de mapas de calor com base em modelos de propagação, a ferramenta aproxima conceitos teóricos de propagação de ondas, como perda de percurso e atenuação em ambientes internos, da prática de projeto de redes Wi-Fi.

Do ponto de vista técnico, a relevância do estudo reside na ampliação do acesso a metodologias de *site survey*, possibilitando que profissionais de redes realizem levantamentos de campo mais estruturados, mesmo em contextos com restrições orçamentárias. Sob a perspectiva acadêmica, o trabalho contribui ao explorar a aplicação prática do padrão IEEE 802.11ac em cenários reais, integrando medição de RSSI, modelagem de Path Loss e geração de mapas de calor, com código-fonte aberto passível de reutilização e extensão por outros pesquisadores.

Além disso, há uma contribuição social associada à democratização de ferramentas de análise de redes sem fio. Ao disponibilizar uma solução acessível e replicável, este trabalho potencializa o uso de redes WLAN com melhor cobertura e desempenho em ambientes que, de outra forma, poderiam permanecer subatendidos, favorecendo

a qualidade de acesso à informação e a continuidade de serviços que dependem da conectividade Wi-Fi.

### 1.3 Restrições e Limitações

Como todo trabalho acadêmico, este estudo apresenta restrições e limitações que devem ser explicitadas, a fim de contextualizar adequadamente os resultados obtidos e orientar sua interpretação.

Em primeiro lugar, o escopo do trabalho não contempla uma descrição exaustiva da arquitetura interna e da lógica de programação do software desenvolvido. Embora sejam apresentados, em capítulos posteriores, a estrutura geral da aplicação, o fluxograma de funcionamento e trechos representativos de código, o foco principal da pesquisa recai sobre a concepção da ferramenta, a metodologia de coleta de dados e a geração de mapas de calor, e não sobre uma análise aprofundada de engenharia de *software*.

Além disso, a avaliação de cobertura restringe-se à medição da intensidade do sinal em dBm (RSSI) desconsiderando as medidas de ruído do ambiente, atenuação por paredes/pisos e a análise do espectro eletromagnético. Ao basear apenas na coleta do RSSI as tecnologias de Beamforming explícito e MU-MIMO a ferramenta desenvolvida desconsidera a variabilidade temporal introduzida por estas tecnologias, uma vez que o diagrama de radiação se adequa em tempo real.

No que tange à coleta de dados e modelagem do sinal, este trabalho apresenta limitações inerentes à natureza da propagação de rádio em ambientes internos (indoor). O fenômeno de desvanecimento em pequena escala (small-scale fading), provocado pela interferência de múltiplos caminhos (multipath), manifesta-se de forma acentuada nesses cenários.

O uso do chip Wi-Fi integrado da Raspberry Pi 5 introduz incertezas instrumentais que devem ser consideradas na análise dos dados. A antena utilizada, por ser um componente de dimensões reduzidas integrado à PCB (cerâmica ou impressa), apresenta um diagrama de radiação irregular, distanciando-se do comportamento de uma antena onidirecional ideal.

Configurações específicas de pontos de acesso, tais como políticas de controle de acesso, regras de *firewall*, limitação de largura de banda por usuário, parâmetros de Qualidade de Serviço (QoS) e mecanismos de agendamento de tráfego, não são abordadas. Apesar de impactarem diretamente a experiência do usuário, esses as-

pectos extrapolam o foco deste estudo, voltado à análise da potência do sinal e à representação espacial da cobertura.

Os testes experimentais são conduzidos em um ambiente interno específico, utilizando uma planta residencial como estudo de caso. Esse recorte limita a generalização dos resultados para outros tipos de edificações ou cenários operacionais, como ambientes industriais, campi universitários ou grandes escritórios de múltiplos pavimentos. Além disso, fatores práticos como disponibilidade de tempo, acesso a diferentes tipos de pontos de acesso e variações de materiais de construção influenciam o conjunto de medições realizadas.

Por fim, embora sejam utilizados modelos de perda de percurso presentes na literatura para ambientes internos na faixa de 5 GHz, não é objetivo deste trabalho realizar uma análise comparativa aprofundada entre diferentes modelos de propagação nem proceder à calibração dos parâmetros para múltiplos tipos de construção. A aplicação dos modelos adota valores típicos de atenuação para cenários residencial e corporativo, servindo como aproximação para apoiar a geração dos mapas de calor.

Apesar dessas limitações, a ferramenta desenvolvida cumpre o propósito de demonstrar a viabilidade do uso de uma plataforma de baixo custo e de software de código aberto para realização de *site surveys* em redes Wi-Fi 5, fornecendo subsídios práticos e visuais para o planejamento e a análise de cobertura em ambientes internos.

## 2 Fundamentação Teórica

Este capítulo apresenta os conceitos fundamentais necessários para a compreensão do desenvolvimento proposto neste trabalho. São discutidos aspectos essenciais das redes Wi-Fi, as características do padrão IEEE 802.11ac, os princípios de medição de intensidade de sinal (RSSI), bem como os modelos de propagação adotados para estimar o comportamento das ondas eletromagnéticas em ambientes internos. Por fim, exploram-se técnicas de geração de mapas de calor, empregadas na representação espacial da cobertura do sinal.

### 2.1 Redes Wi-Fi e Arquitetura WLAN

As redes locais sem fio (WLAN) baseadas na família de padrões IEEE 802.11 constituem a principal tecnologia de acesso sem fio utilizada em ambientes domésticos e corporativos. Essas redes permitem a interconexão de dispositivos por meio de ondas eletromagnéticas, eliminando a necessidade de cabeamento físico e oferecendo maior flexibilidade de mobilidade ao usuário ([RAPPAPORT, 2002](#)).

Os componentes fundamentais de uma WLAN incluem:

- **Ponto de Acesso (Access Point – AP)**: dispositivo responsável pela emissão, recepção e gerenciamento dos quadros IEEE 802.11.
- **Estações (STAs)**: dispositivos clientes, como notebooks, smartphones e sensores.
- **Meio de transmissão**: ondas de rádio operando em 2,4 GHz ou 5 GHz.

A cobertura espacial e o desempenho da rede dependem da potência de transmissão, características de propagação, modulação e multiplexação empregadas, largura de canal e condições do ambiente.

### 2.2 Padrão IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5)

O padrão IEEE 802.11ac, também conhecido como Wi-Fi 5, foi lançado em 2013 como evolução do IEEE 802.11n. Suas principais características incluem ([IEEE, 2017](#)):

- Operação predominante na faixa de 5 GHz;
- Larguras de canal de 20, 40, 80 e 160 MHz;

- Modulação de alta ordem (256-QAM);
- Multiplexação OFDM;
- Tecnologia MU-MIMO (*Multi-User Multiple-Input Multiple-Output*);
- Técnicas de *beamforming*, que direcionam a energia para as estações associadas, melhorando a confiabilidade do enlace;
- Taxas de transmissão superiores a 1 Gbps, dependendo da configuração do AP e das condições do ambiente.

### 2.3 Modulação 256-QAM

O 802.11ac adota a modulação 256-QAM com elevada eficiência espectral se comparada as modulações 64-QAM, 16-QAM, BPSK e QPSK. São empregados 256 símbolos, permitindo a transmissão de 8 bits por símbolo ( $2^8$ ), o que resulta em grandes taxas de transferência de dados (IEEE, 2013). Essa capacidade é alcançada pela combinação de variações na amplitude e na fase da onda portadora, formando uma constelação de 256 pontos no plano cartesiano, onde cada ponto representa um estado único da portadora (PROAKIS J. G.; SALEHI, 2008).

No entanto, a maior densidade de símbolos na constelação torna a QAM-256 mais suscetível a interferências, exigindo um requisito de SNR superior em comparação com a QAM-64 para a mesma taxa de erro de bit alvo (IEEE, 2013). A proximidade entre os pontos da constelação exige receptores com maior resolução de quantização do sinal recebido na demodulação, além de sistemas de equalização adaptativa para compensar distorções no canal de transmissão (DEEN H. K.; ABD, 2024).

Para mitigar os efeitos de ruídos e interferências, a QAM-256 é frequentemente combinada com codificação de canal e técnicas de diversidade, como sistemas MU-MIMO, amplamente utilizados em redes de dados modernas (PROAKIS J. G.; SALEHI, 2008). O padrão IEEE 802.11ac adota o sistema MU-MIMO para otimizar a transferência de dados no sentido de downlink. Além disso, utiliza técnicas avançadas de codificação de canal, como o código de verificação de paridade de baixa densidade (LDPC), a fim de melhorar a confiabilidade da transmissão e aumentar a eficiência na detecção e correção de erros (IEEE, 2013).

A imagem abaixo é um exemplo de modulação QAM utilizando 16 símbolos (QAM-16) que conseguem representar 4 bits por sinalização. Cada ponto da constelação representa um estado da onda portadora em grau/fase e em amplitude. Os graus

são medidos em relação ao eixo X e a amplitude em relação a distância do ponto (0;0) do plano cartesiano.

### 16-QAM Constellation

Symbol Transmitted	Carrier Phase	Carrier Amplitude
0000	225°	0.33
0001	255°	0.75
0010	195°	0.75
0011	225°	1.0
0100	135°	0.33
0101	105°	0.75
0110	165°	0.75
0111	135°	1.0
1000	315°	0.33
1001	285°	0.75
1010	345°	0.75
1011	315°	1.0
1100	45°	0.33
1101	75°	0.75
1110	15°	0.75
1111	45°	1.0

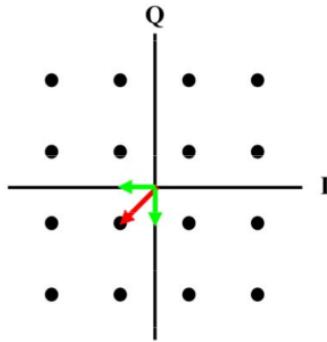


Figura 2.1 (PATEL, 2015)

A representação da quadratura da modulação QAM-256 foi aferida e registrada por Hasan k. Al Deen e Haider J. Abd durante o desenvolvimento de um artigo analisando a utilização dessa modulação em fibra óptica (DEEN H. K.; ABD, 2024).

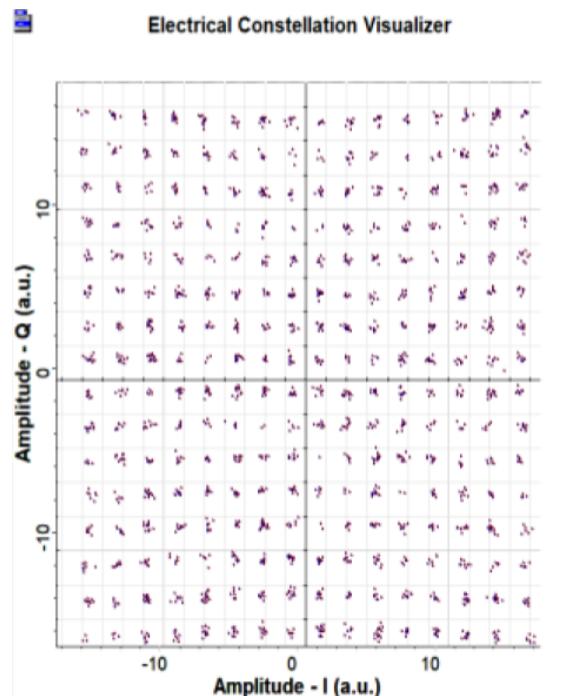


Figura 2.2 Constelação elétrica visual - Fonte: (DEEN H. K.; ABD, 2024)

## 2.4 Multiplexação OFDM

A Multiplexação por Divisão de Frequência Ortogonal é uma técnica de modulação amplamente utilizada em sistemas de comunicação sem fio de alta velocidade. Essa técnica permite a transmissão eficiente de dados por meio da divisão do canal em múltiplas subportadoras ortogonais, reduzindo significativamente a interferência entre sinais adjacentes.

O funcionamento do OFDM baseia-se nos seguintes princípios fundamentais ([PRA-SAD, 2004](#)):

- Divisão do espectro: O canal de frequência (por exemplo, 20 MHz, 40 MHz, 80 MHz ou 160 MHz) é subdividido em várias subportadoras com espaçamento fixo de 312,5 kHz. Cada subportadora transporta uma parte dos dados totais, permitindo uma transmissão paralela e eficiente;
- Ortogonalidade: As subportadoras são espaçadas de forma que o pico espectral de uma coincide com os pontos nulos das demais. Essa ortogonalidade elimina a interferência entre subportadoras (Inter-Carrier Interference – ICI), mesmo quando há sobreposição espectral;
- Modulação independente: Cada subportadora pode ser modulada de forma independente, utilizando esquemas como QPSK, 16-QAM, 64-QAM ou 256-QAM. Isso permite adaptar a modulação conforme a qualidade do canal, otimizando a taxa de transmissão e a robustez do sinal;
- Transformada Rápida de Fourier (FFT/IFFT): O OFDM utiliza a Transformada Rápida de Fourier (FFT) no receptor e sua inversa (IFFT) no transmissor para converter os sinais entre os domínios do tempo e da frequência de maneira computacionalmente eficiente;
- Prefixo cíclico (Cyclic Prefix - CP): Para mitigar os efeitos de interferência entre símbolos (Inter-Symbol Interference – ISI) causados por múltiplos caminhos de propagação (multipath), adiciona-se um prefixo cíclico a cada símbolo OFDM. Esse prefixo garante a integridade da ortogonalidade mesmo na presença de ecos e atrasos no canal.

O uso do OFDM oferece vantagens como maior eficiência espectral, robustez contra interferência e atenuação seletiva no canal se comparado ao DS-SS, sendo por isso uma escolha dominante em tecnologias de comunicação modernas.

## 2.5 Beamforming Explícito

O beamforming é uma tecnologia avançada de transmissão sem fio que utiliza múltiplas antenas para moldar o padrão de radiação do sinal, direcionando a energia de forma mais precisa para os dispositivos receptores. Seu principal objetivo é aumentar a relação sinal-ruído (SNR, Signal-to-Noise Ratio), minimizar interferências e, consequentemente, melhorar a taxa de transferência de dados e a qualidade do sinal (IEEE, 2013).

Embora seja uma funcionalidade opcional, o beamforming é fortemente recomendado em cenários que utilizam MU-MIMO (Multi-User Multiple Input Multiple Output), pois potencializa os benefícios dessa técnica ao permitir uma comunicação simultânea e mais eficiente com vários dispositivos.

O funcionamento do beamforming, conforme definido no padrão IEEE 802.11ac, é baseado em um esquema de laço fechado (closed-loop), no qual o transmissor — geralmente um ponto de acesso — utiliza informações sobre o estado do canal (CSI, Channel State Information), fornecidas pelos dispositivos receptores, como smartphones, computadores e dispositivos IoT. Com esses dados, o transmissor consegue ajustar dinamicamente a fase e amplitude dos sinais emitidos por suas antenas, direcionando-os de maneira mais eficaz ao destino pretendido.

O padrão 802.11ac especifica dois tipos principais de beamforming:

- Single-User Beamforming (SU-BF): O sinal é direcionado para um único dispositivo, otimizando a qualidade da recepção individual.
- Multi-User Beamforming (MU-BF): Permite a transmissão simultânea para múltiplos dispositivos, reduzindo interferências entre eles e aumentando a eficiência do canal.

Essa abordagem representa um avanço significativo em redes Wi-Fi, especialmente em ambientes com alta densidade de dispositivos conectados, proporcionando uma experiência de conexão mais estável e veloz se comparado aos padrões anteriores como o Wi-Fi 4.

## 2.6 MU-MIMO

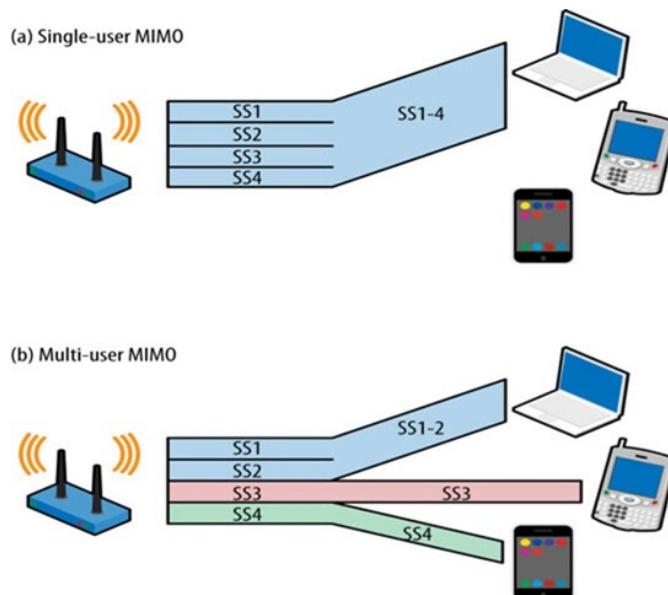
A implementação de múltiplos usuários, múltiplas entradas e múltiplas saídas no downlink permite que um ponto de acesso transmita dados para diversos dispositi-

vos simultaneamente. Essa funcionalidade resulta em um aumento significativo na capacidade da rede WLAN, melhor aproveitamento do espectro eletromagnético disponível e uma experiência aprimorada para o usuário, especialmente em ambientes com alta densidade de dispositivos.

Essa tecnologia tornou-se viável graças à multiplexação espacial, na qual o ponto de acesso utiliza múltiplas antenas para criar fluxos de dados independentes destinados a cada usuário (SPENCER, 2004). Além disso, o uso de beamforming explícito — abordado na Seção 2.5 — também é fundamental para seu funcionamento.

O princípio de operação do MU-MIMO baseia-se no feedback do canal, no qual os dispositivos clientes fornecem ao ponto de acesso informações sobre o estado do canal (Channel State Information, ou CSI). Com base nesse feedback, o AP consegue ajustar dinamicamente a formação dos feixes de transmissão (SPENCER, 2004). No padrão 802.11ac, esse processo é realizado por meio de uma técnica chamada sounding, onde o ponto de acesso envia pacotes de sondagem para estimar as condições do canal (IEEE, 2013). Em seguida, os usuários são agrupados com base na compatibilidade de seus canais, o que maximiza a eficiência da transmissão.

A imagem a seguir ilustra a diferença entre as abordagens de múltiplos usuários (MU-MIMO) e de um único usuário (SU-MIMO).



**Figura 2.3** Representação SU-MIMO e MU-MIMO. Fonte: <https://pplware.sapo.pt/tutoriais/networking/mu-mimo-o-seu-router-ja-suporta-esta-tecnologia/>

## 2.7 Modelos de Perda de Percurso (Path Loss)

Em redes de área local sem fio (WLAN), a potência do sinal de rádio captada por um dispositivo receptor é quantificada pelo RSSI (Received Signal Strength Indicator) (IEEE, 2013). O valor do RSSI é universalmente expresso em decibéis-milwatts (dBm) (DEBNATH, 2025). Essa unidade logarítmica é vantajosa por ser uma medida de potência padronizada, definida e universalmente aceita, facilitando a comparação e análise de desempenho entre diferentes sistemas, equipamentos, ambientes e variações inesperadas.

O RSSI é normalmente apresentado em dBm, unidade logarítmica definida por:

$$P_{\text{dBm}} = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P_{\text{mW}}}{1 \text{ mW}} \right). \quad (2.1)$$

Valores de RSSI mais próximos de 0 dBm indicam sinais mais fortes, enquanto valores mais negativos indicam sinais fracos. Em aplicações práticas:

- -30 dBm: excelente sinal;
- -60 dBm: sinal estável;
- -80 dBm: limite para comunicação confiável;
- abaixo de -90 dBm: sinal insuficiente para associação estável.

O RSSI é influenciado por fatores como potência transmitida, distância ao AP, reflexões, absorção e interferência de outros dispositivos.

Em levantamentos de campo (site surveys) de redes sem fio, a medição da potência do sinal em cada centímetro do ambiente é inviável, resultando em uma quantidade impraticável de dados e exigindo um tempo de execução excessivo. Uma solução prática e eficiente é utilizar um conjunto limitado de pontos de medição reais e, em seguida, projetar a perda de potência para as áreas adjacentes. Essa projeção de atenuação do sinal é determinada pela perda de percurso (Path Loss) por metro.

Para estimar a potência do sinal Wi-Fi em função da distância, utilizam-se modelos de perda de percurso amplamente descritos na literatura. O modelo log-distância, apropriado para ambientes internos, pode ser expresso por (RAPPAPORT, 2002; ITU, ):

$$PL(d) = PL(d_0) + 10 \cdot n \cdot \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma, \quad (2.2)$$

onde:

- $PL(d)$  é a perda de percurso em dB;
- $d_0$  é a distância de referência (tipicamente 1 m);
- $n$  é o expoente de perda de percurso, dependente do ambiente;
- $X_\sigma$  representa o desvanecimento log-normal.

A Tabela 2.1 apresenta valores típicos do expoente  $n$  para diferentes ambientes internos.

**Tabela 2.1** Valores típicos do expoente de perda de percurso em ambientes internos ([RAPPAPORT, 2002](#)).

Ambiente	Expoente $n$
Residencial com poucas paredes	2,0 – 2,5
Residencial com múltiplos cômodos	2,5 – 3,5
Ambiente corporativo	2,7 – 3,5
Ambientes densos/industriais	3,0 – 4,5

Esses modelos fornecem suporte matemático para a estimativa da intensidade do sinal, sendo utilizados como base teórica para a geração dos mapas de calor apresentados neste trabalho.

## 2.8 Propagação de Sinal em Ambientes Internos

As ondas eletromagnéticas utilizadas pelo Wi-Fi sofrem múltiplos fenômenos físicos ao se propagarem em ambientes internos, incluindo:

- **Atenuação por distância:** perda natural da intensidade do sinal ao se afastar da fonte.
- **Absorção:** materiais como concreto, drywall, madeira e vidro reduzem a potência do sinal.

- **Reflexão, difração e espalhamento:** causam variações espaciais na intensidade do campo recebido.
- **Fading multipercuso:** combinação de caminhos distintos que podem reforçar ou cancelar o sinal.

A intensidade do sinal em ambientes internos apresenta flutuações de pequena escala (small-scale fading) significativas, o que justifica a utilização de medições em múltiplos pontos e o uso de modelos de propagação.

## 2.9 Mapas de Calor e Interpolação Espacial

Mapas de calor (heatmaps) são representações visuais que evidenciam a variação espacial de um parâmetro em uma região. No contexto de redes Wi-Fi, esses mapas possibilitam identificar áreas de maior e menor intensidade de sinal, auxiliando na determinação de posicionamento adequado de pontos de acesso e no planejamento de cobertura.

A construção de um mapa de calor requer a interpolação dos valores medidos em pontos discretos da planta. No presente trabalho, entretanto, a interpolação utilizada é aquela disponibilizada pela função griddata da biblioteca SciPy, especificamente o método linear, complementado pelo método nearest quando necessário ([VIRTANEN et al., 2020](#)).

A interpolação linear implementada por griddata emprega uma triangulação de Delaunay para dividir o domínio em triângulos e, dentro de cada triângulo, estima os valores por meio de um modelo plano linear. Trata-se de um método cientificamente fundamentado em geometria computacional e análise numérica, amplamente utilizado para interpolação sobre conjuntos irregulares de pontos ([DELAUNAY, 1934](#)).

Caso a triangulação não consiga prever um valor para uma determinada região (por exemplo, em pontos fora do casco convexo das medições), utiliza-se automaticamente o método Nearest Neighbor, que atribui a cada ponto do mapa o valor do ponto amostrado mais próximo. Embora menos suave, este método garante que toda a superfície seja preenchida ([VIRTANEN et al., 2020](#)).

A superfície contínua resultante dessa interpolação é sobreposta à planta arquitetônica, originando um mapa de calor que facilita a interpretação visual da distribuição espacial do RSSI obtido experimentalmente.

### 3 Metodologia

Este capítulo apresenta a metodologia empregada no desenvolvimento da ferramenta computacional proposta, bem como os procedimentos adotados para a coleta de dados, o tratamento das informações e a geração dos mapas de calor de intensidade de sinal Wi-Fi. A metodologia foi estruturada de forma a garantir reproduzibilidade do processo, coerência com os fundamentos teóricos discutidos no Capítulo 2 e alinhamento com os objetivos estabelecidos no Capítulo 1.

O fluxo metodológico geral compreende: (i) definição do tipo de pesquisa; (ii) seleção e configuração dos materiais e ferramentas; (iii) preparação da planta arquitetônica; (iv) coleta de intensidade de sinal (RSSI) em pontos definidos do ambiente; (v) processamento dos dados coletados; (vi) aplicação de métodos de interpolação; (vii) geração do mapa de calor; e (viii) estudo de caso para validação prática.

#### 3.1 Tipo de Pesquisa

A pesquisa caracteriza-se como aplicada, pois objetiva desenvolver uma solução prática para um problema real de engenharia: a análise de cobertura de redes Wi-Fi em ambientes internos. Adota uma abordagem predominantemente experimental, uma vez que depende da coleta de dados reais de intensidade de sinal e de sua representação espacial.

Do ponto de vista metodológico, o trabalho combina:

- **Pesquisa exploratória**, ao investigar as características da propagação de sinal Wi-Fi em ambientes internos;
- **Pesquisa descritiva**, ao registrar e representar graficamente a intensidade do sinal em diferentes pontos do ambiente;
- **Pesquisa de desenvolvimento tecnológico**, pela criação de uma ferramenta computacional funcional.

A metodologia adotada assegura coerência entre a fundamentação teórica apresentada no Capítulo 2, especialmente no que concerne aos princípios da propagação de ondas eletromagnéticas, intensidade de sinal em dBm e uso de modelos de perda de percurso.

### 3.2 Materiais e Equipamentos

Para a implementação da ferramenta e execução do estudo de caso, foram utilizados os materiais e equipamentos descritos a seguir.

#### 3.2.1 Hardware

- **Raspberry Pi 5:** plataforma computacional principal, responsável pela execução do software desenvolvido, pela coleta dos valores de RSSI e coletar medições da intensidade do sinal.
- **Cartão microSD (32 GB)** para armazenamento do sistema operacional e dos dados coletados.
- **Botão e fios elétricos diversos** para realizar as medições de RSSI manualmente.
- **Notebook ou computador pessoal:** utilizado apenas na fase de desenvolvimento e testes preliminares do código.

#### 3.2.2 Software e Bibliotecas

O desenvolvimento do software foi realizado em Python, utilizando a IDE Thonny e as seguintes bibliotecas:

- **tkinter:** Para criação da interface gráfica, incluindo janelas, botões, canvas para exibição de imagens e diálogos de entrada de dados;
- **PIL (Pillow):** Para manipulação de imagens, como carregamento, redimensionamento, zoom e sobreposição de grids e pontos de medição;
- **math:** Para cálculos matemáticos básicos, como distâncias entre pontos;
- **subprocess:** Para execução de comandos do sistema operacional, especificamente para obter a intensidade do sinal Wi-Fi via ferramenta iwconfig;
- **json:** Para salvar e carregar dados de medições em formato JSON, garantindo portabilidade e fácil edição;
- **numpy:** Para manipulação de arrays numéricos, como coordenadas de pontos e grids para interpolação;

- **os e sys:** Para gerenciamento de caminhos de arquivos, verificação de existência de arquivos e controle de execução;
- **matplotlib:** Para geração de gráficos e do heatmap, incluindo color maps personalizados para representação de intensidade de sinal;
- **scipy:** Submódulos como interpolate (para griddata em interpolação), spatial.distance (para cálculos de distância) e optimize (para minimização de erros no modelo de propagação via método Nelder-Mead);
- **RPi.GPIO (opcional):** Para integração com hardware Raspberry Pi, permitindo acionamento de medições via botão GPIO. Se não disponível, o software ignora essa funcionalidade sem erros;

Além disso, foi utilizado o sistema operacional Raspberry Pi OS.

### 3.2.3 Ambiente de Teste

O ambiente selecionado para o estudo de caso consiste em uma residência com múltiplos cômodos, paredes de alvenaria e portas internas. A planta arquitetônica foi fornecida em formato de imagem (PNG), permitindo sua importação direta pelo software.

Esse tipo de ambiente se alinha aos expoentes de perda de percurso discutidos no Capítulo 2 (Tabela 2.1), variando entre 2,5 e 3,5, conforme literatura para ambientes residenciais com obstáculos.

## 3.3 Preparação da Planta Arquitetônica

A ferramenta permite a importação de plantas nos formatos PNG, JPG, JPEG, GIF ou BMP. Após a importação, o usuário define dois pontos de referência sobre a planta e insere a distância real entre eles, permitindo ao software calcular a escala e estabelecer um sistema de coordenadas métricas.

Etapas realizadas:

- a) Importação da planta via interface gráfica.
- b) Seleção de dois pontos conhecidos (por exemplo, extremidades de uma parede).
- c) Inserção da distância real correspondente.

- d) Cálculo automático da escala e associação da malha de coordenadas ao sistema real do ambiente.

Esse procedimento é fundamental para a coerência entre as medições físicas e a representação espacial do mapa de calor.

### 3.4 Coleta de Dados de Intensidade de Sinal (RSSI)

A coleta da intensidade do sinal Wi-Fi é realizada diretamente pelo Raspberry Pi 5, utilizando a placa de rede Wi-Fi configurado para operar na faixa de 5 GHz. O procedimento executado pelo software baseou-se em comandos do sistema operacional para obtenção dos valores de RSSI em dBm.

As etapas de coleta incluem:

- a) Marcação manual do ponto na interface gráfica;
- b) Locomoção do Raspberry Pi 5 até um ponto da planta onde se deseja realizar a medição;
- c) Apertar o botão integrado na Raspberry Pi 5
- d) Execução do comando `iwconfig` (ou equivalente), obtendo o valor de RSSI;
- e) Registro automático do par  $(x, y, RSSI)$  no banco de dados interno do software.

Para reduzir variações instantâneas, cada medição foi realizada múltiplas vezes e a média dos valores de RSSI foi utilizada.

### 3.5 Modelagem de Perda de Percurso e Tratamento dos Dados

Com os valores de intensidade obtidos, procede-se ao modelo de propagação discutido no Capítulo 2. Embora o software não implemente uma calibração completa dos parâmetros do modelo log-distância, os valores medidos servem como entrada para a geração da superfície interpolada.

A perda de percurso teórica é descrita por:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10 \cdot n \cdot \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right), \quad (3.1)$$

conforme apresentado na fundamentação teórica.

A partir das coordenadas dos pontos e dos valores de RSSI, cria-se uma malha espacial representando todo o ambiente. Essa malha servirá de base para o processo de interpolação.

### 3.6 Interpolação e Geração do Mapa de Calor

Para a construção do mapa de calor, empregou-se o método de interpolação *linear* disponibilizado pela função `griddata` da biblioteca SciPy. Esse método utiliza uma triangulação de Delaunay para dividir o conjunto de pontos medidos em uma malha de triângulos, sobre a qual a interpolação é realizada de forma linear. Essa abordagem apresenta boa precisão para conjuntos irregulares de pontos e mantém baixo custo computacional, sendo adequada para ambientes internos.

Considerando um triângulo da triangulação formado pelos vértices  $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$ , com valores medidos de RSSI correspondentes  $RSSI_1$ ,  $RSSI_2$  e  $RSSI_3$ , a intensidade estimada em um ponto arbitrário  $(x, y)$  pertencente a esse triângulo é dada por:

$$RSSI(x, y) = \lambda_1 RSSI_1 + \lambda_2 RSSI_2 + \lambda_3 RSSI_3, \quad (3.2)$$

onde  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  e  $\lambda_3$  são os coeficientes barycênicos associados ao ponto  $(x, y)$ , satisfazendo:

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1, \quad \lambda_i \geq 0.$$

Esses coeficientes representam a contribuição geométrica de cada vértice para o valor interpolado, garantindo uma superfície contínua em todo o domínio. Para regiões externas ao casco convexo da triangulação, a função `griddata` adota automaticamente o método *nearest neighbor*, atribuindo ao ponto o valor do ponto medido mais próximo.

Após a etapa de interpolação:

- a) a superfície contínua é normalizada;
- b) aplica-se um gradiente de cores (de  $-30$  dBm a  $-90$  dBm);
- c) a superfície interpolada é sobreposta à planta arquitetônica;

- d) insere-se uma barra de escala indicando as faixas de intensidade.

O resultado final é um mapa de calor suavizado e coerente com a planta importada, permitindo análise visual detalhada da cobertura do sinal Wi-Fi no ambiente.

### **3.7 Estudo de Caso para Validação**

Para validar o funcionamento da ferramenta, realizou-se um estudo de caso em uma residência real. O procedimento seguiu as etapas:

- a) Importação da planta do ambiente de teste;
- b) Definição de escala métrica;
- c) Seleção de múltiplos pontos distribuídos nos cômodos;
- d) Coleta dos valores de RSSI em cada ponto;
- e) Geração do mapa de calor correspondente;
- f) Análise visual da cobertura do sinal.

A validação consistiu em verificar se:

- as regiões com sinal fraco (-80 dBm ou inferior) correspondiam a áreas afastadas do roteador ou isoladas por paredes densas;
- regiões com sinal forte permaneciam coerentes com a distância e características do ambiente;
- as zonas de transição estavam de acordo com o comportamento típico do sinal discutido na literatura.

Os resultados obtidos são apresentados e discutidos no Capítulo 4.

## 4 Resultados

Este capítulo apresenta o desenvolvimento da ferramenta computacional proposta, o funcionamento interno do sistema, bem como os resultados obtidos a partir de um estudo de caso conduzido em um ambiente real. A organização segue diretamente a metodologia descrita no Capítulo 3, garantindo coerência entre objetivos, procedimentos e resultados experimentais.

### 4.1 Desenvolvimento da Ferramenta

O desenvolvimento da ferramenta consistiu na criação de uma aplicação em Python, com interface gráfica, capaz de importar plantas arquitetônicas, permitir a definição de escala, registrar pontos de medição de intensidade de sinal Wi-Fi e gerar mapas de calor por meio de métodos de interpolação. O software foi projetado para ser executado no Raspberry Pi 5, dispositivo escolhido por aliar baixo custo, portabilidade e desempenho adequado para as tarefas envolvidas.

#### 4.1.1 Arquitetura Geral do Sistema

A ferramenta foi estruturada em cinco módulos principais:

- a) **Módulo de Interface Gráfica:** desenvolvido com `Tkinter`, responsável pelas telas de interação, carregamento da planta e marcação dos pontos de medição.
- b) **Módulo de Manipulação de Imagens:** implementado com a biblioteca `Pillow`, permitindo redimensionar, exibir e sobrepor elementos gráficos à planta importada.
- c) **Módulo de Aquisição de Dados:** utiliza comandos do sistema operacional, executados via `subprocess`, para obter valores de RSSI em dBm.
- d) **Módulo de Processamento e Interpolação:** responsável pelo cálculo da malha espacial e pela aplicação do algoritmo IDW para geração da superfície contínua do sinal.
- e) **Módulo de Visualização:** utiliza a biblioteca `Matplotlib` para gerar o mapa de calor e sobrepor à planta arquitetônica.

Essa modularidade facilita a manutenção da aplicação e permite futuras extensões,

como suporte a outros modelos de propagação, métodos de interpolação mais avançados ou exportação de dados para análise externa.

#### 4.1.2 Fluxo de Funcionamento

O funcionamento da ferramenta segue o fluxo apresentado a seguir:

- a) Importação da planta arquitetônica.
- b) Definição da escala com dois pontos de referência.
- c) Seleção dos locais onde serão realizadas as medições.
- d) Coleta da intensidade do sinal via placa de rede Wi-Fi 802.11ac.
- e) Registro automático das coordenadas e do valor de RSSI.
- f) Processamento da malha espacial e aplicação da interpolação.
- g) Geração do mapa de calor e sobreposição sobre a planta.
- h) Salvamento dos resultados para análise posterior.

Esse fluxo segue diretamente as etapas descritas na metodologia e assegura que a representação gráfica obtida seja baseada nas medições reais executadas no ambiente de teste.

#### 4.1.3 Lógica de Funcionamento

O software segue uma abordagem modular, centrada em uma classe principal **App** que herda de **tk.Tk** para gerenciar a janela principal. A lógica é dividida em etapas sequenciais, com eventos disparados por interações do usuário (cliques, botões) ou hardware (GPIO). A seguir, uma descrição passo a passo da lógica principal, com trechos de código relevantes para ilustrar a implementação:

##### a) Inicialização e Interface Principal:

Ao executar, o software cria uma janela principal com menu de arquivo (novo levantamento, salvar, abrir, sair) e um frame para ferramentas laterais (escala, pontos de medição, modelo de propagação, iniciar medição, finalizar). Se o suporte a GPIO estiver disponível (ex.: em Raspberry Pi), configura um pino de entrada para detectar pressionamento de botão.

Exemplo de código para inicialização e configuração de GPIO:

```
1 class App(tk.Tk):
2     def __init__(self):
3         super().__init__()
4         self.title("WI-FI 802.11 AC SITE SURVEY")
5         self.geometry("800x600")
6         # ... (outras inicializações)
7         self.setup_gpio()
8
9     def setup_gpio(self):
10        global GPIO_SUPPORT
11        if not GPIO_SUPPORT:
12            return
13        try:
14            GPIO.setmode(GPIO.BCM)
15            GPIO.setup(self.BUTTON_PIN_2, GPIO.IN,
16                       pull_up_down=GPIO.PUD_DOWN)
17            GPIO.add_event_detect(self.BUTTON_PIN_2,
18                                  GPIO.RISING, callback=self gpio_callback,
19                                  bouncetime=300)
20        except:
21            GPIO_SUPPORT = False
```

b) Carregamento de Imagem:

O usuário seleciona uma imagem de planta baixa (formatos: PNG, JPG, etc.). A imagem é exibida em um canvas com suporte a zoom (roda do mouse), pan (arrastar com botão direito) e redimensionamento automático para caber na janela. Coordenadas são mapeadas entre pixels da imagem original e coordenadas no canvas (considerando zoom).

Exemplo de código para exibição da imagem no canvas:

```
1 def show_image_in_frame(self, filepath,
2                         reset_points=True):
3     self.img_original = Image.open(filepath)
```

```

3     self.current_image_path = filepath
4     # ... (reset de variaveis)
5     self.resize_image_to_fit()
6
7 def resize_image_to_fit(self):
8     if self.img_original:
9         canvas_width = self.canvas.winfo_width()
10        canvas_height = self.canvas.winfo_height()
11        img_width, img_height = self.img_original.size
12        new_width = int(img_width * self.zoom_level)
13        new_height = int(img_height * self.zoom_level)
14        self.current_img =
15            self.img_original.resize((new_width,
16                new_height), Image.LANCZOS)
16        self.img_tk =
17            ImageTk.PhotoImage(self.current_img)
18        self.canvas.create_image(0, 0, anchor="nw",
19            image=self.img_tk, tags="current_image")

```

### c) Definição de Escala:

Ativada via botão "Definir Escala". O usuário clica em dois pontos na imagem para desenhar uma linha. Um diálogo solicita a distância real em metros. A escala (fator pixels por metro) é calculada pela distância real dividida pela distância em pixels. Uma grade é desenhada sobre a imagem (linhas a cada 1 metro, ajustadas ao zoom), usando Pillow para sobreposição transparente.

Exemplo de código para cálculo da escala:

```

1 def on_ok_scale(self, entry, dialog):
2     try:
3         real_distance =
4             float(entry.get().replace(",","."))
5         if real_distance > 0:
6             x1_orig, y1_orig =
7                 self.points_original_coords[0]

```

```

6     x2_orig, y2_orig =
7         self.points_original_coords[1]
8     pixel_distance = math.dist((x1_orig,
9         y1_orig), (x2_orig, y2_orig))
10    self.scale_factor = real_distance /
11        pixel_distance
12    self.grid_drawn = True
13    self.draw_grid()
14
15 except:
16     messagebox.showerror("Erro de Escala",
17         "Distancia real invalida.")

```

#### d) Seleção de Modelo de Propagação:

O usuário escolhe entre "Residencial"(n=3) ou "Empresarial"(n=3.5), baseado em taxas de atenuação típicas para path loss (PL) em ambientes internos (RAPAPORT, 2002). Essa escolha afeta o cálculo no *heatmap*.

Exemplo de código para seleção do modelo:

```

1 def select_pl_model(self, model):
2     self.pl_model_selection.set(model)
3     messagebox.showinfo("Modelo Selecionado",
4         f"Modelo de Atenuacao definido para: {model}")

```

#### e) Definição dos Pontos de Medição:

Ativada via botão "Pontos de Medição". O usuário informa o número de pontos e clica na imagem para posicioná-los. Os pontos são armazenados em coordenadas originais (não afetadas por zoom) e exibidos com números e círculos coloridos (azul: pendente; vermelho: atual; verde: medido).

Exemplo de código para colocação de pontos:

```

1 def on_click_place_measurement_point(self, event):
2     if self.num_measurement_points_to_place > 0:

```

```

3     x_canvas = self.canvas.canvasx(event.x)
4     y_canvas = self.canvas.canvasy(event.y)
5     x_original = x_canvas / self.zoom_level
6     y_original = y_canvas / self.zoom_level
7     self.measurement_points.append((x_original,
8         y_original))
9     self.num_measurement_points_to_place -= 1
10    self.redraw_measurement_points()

```

#### f) Processo de Medição:

Iniciado via botão "Iniciar Medição" ou trigger GPIO (se disponível). Uma contagem regressiva de 5 segundos é exibida antes de capturar o sinal via **subprocess (iwconfig wlan0 para obter dBm)**. Se o sinal não for detectado, usa um valor default (-50 dBm) para testes. Resultados são salvos em uma lista (x, y, signal\_dbm) e o ponto atual avança. Diálogos de sucesso são mostrados.

Exemplo de código para captura de sinal:

```

1 def get_wifi_signal_strength(self, interface="wlan0"):
2     try:
3         result = subprocess.check_output(["iwconfig",
4             interface],
5             stderr=subprocess.STDOUT).decode()
6         for line in result.split("\n"):
7             if "Signal level" in line or "Signal
8                 level=" in line:
9                 parts = line.strip().split("Signal
10                level=")
11                if len(parts) > 1:
12                    signal_dbm = parts[1].split(
13                        "")[0]
14                    try:
15                        return
16                            int(signal_dbm.replace("dBm",
17                                "")).strip()
18                    except:
19

```

```

12     try:
13         return
14         int(float(signal_dbm))
15     except:
16         return None
17
18     except:
19         return None
20
21     return None

```

### g) Salvamento e Geração de Heatmap:

Ao finalizar, salva dados em JSON (imagem, escala, resultados, modelo). Gera *heatmap*: Usa otimização (minimize) para estimar a posição do ponto medido e potência propagada com base no modelo PL:  $\mathbf{PL} = \mathbf{P} - 10\log_{10}(d)$ . Se a otimização falhar, usa-se a interpolação (griddata linear/nearest).

Cria-se o mapa de cor personalizado (vermelho fraco a verde forte para dBm de -90 a 0) sobreposto à imagem original, salvando como PNG. O cálculo utilizado para fazer essa plotagem foi retirado do artigo "The TMB path loss model for 5 GHz indoor WiFi scenarios: On the empirical relationship between RSSI, MCS, and spatial streams" e foi simplificado, adaptando o modelo log-distance básico sem o termo linear de atenuação por paredes para uma aproximação razoável em cenários indoor.

Exemplo de código para otimização do modelo PL:

```

1 def error(params, points, values, n, pixel_to_meter):
2     x_ap, y_ap, P = params
3     d = np.sqrt((points[:, 0] - x_ap)**2 + (points[:, 1] - y_ap)**2) * pixel_to_meter
4     d = np.maximum(d, 0.001)
5     predicted = P - 10 * n * np.log10(d)
6     return np.sum((predicted - values)**2)
7
8 initial_guess = [np.mean(x), np.mean(y),
9 np.mean(values)]
res = minimize(error, initial_guess, args=(points,

```

```

    values, attenuation_rate, pixel_to_meter),
    method='Nelder-Mead')

```

Para o cálculo de propagação ao redor de cada ponto medido, o software aplica o modelo de path loss (PL) log-distance simplificado, estimando o sinal em todos os pixels da grade com base na posição otimizada do ponto de medição. Após otimizar os parâmetros (posição do ponto e potência), o sinal predito Z para cada ponto na grade é calculado como  $Z = P - 10 * n * \log_{10}(d)$ , onde  $d$  é a distância em metros (ajustada pela escala) do pixel ao ponto medido, e  $n$  é o fator de atenuação (4.5 para residencial ou 3.5 para empresarial). Isso propaga o sinal ao redor dos pontos medidos, criando uma estimativa contínua de intensidade em toda a área. Se a otimização falhar (ex.: dados insuficientes), recorre à interpolação linear ou nearest-neighbor via *griddata* para preencher a grade diretamente a partir dos valores medidos nos pontos. Exemplo de código para o cálculo de propagação na grade:

```

1 if res.success:
2     x_ap, y_ap, P = res.x
3     d_grid = np.sqrt((grid_x - x_ap)**2 + (grid_y -
4         y_ap)**2) * pixel_to_meter
5     d_grid = np.maximum(d_grid, 0.001)
6     Z = P - 10 * attenuation_rate * np.log10(d_grid)
7 else:
8     Z = griddata(points, values, (grid_x, grid_y),
9                 method='linear', rescale=True)
10    if np.all(np.isnan(Z)):
11        Z = griddata(points, values, (grid_x,
12                        grid_y), method='nearest', rescale=True)

```

#### h) Abertura de Levantamentos Existentes:

Carrega JSON, restaura pontos, escala e medições, permitindo continuação ou visualização.

Exemplo de código para carregamento de JSON:

```

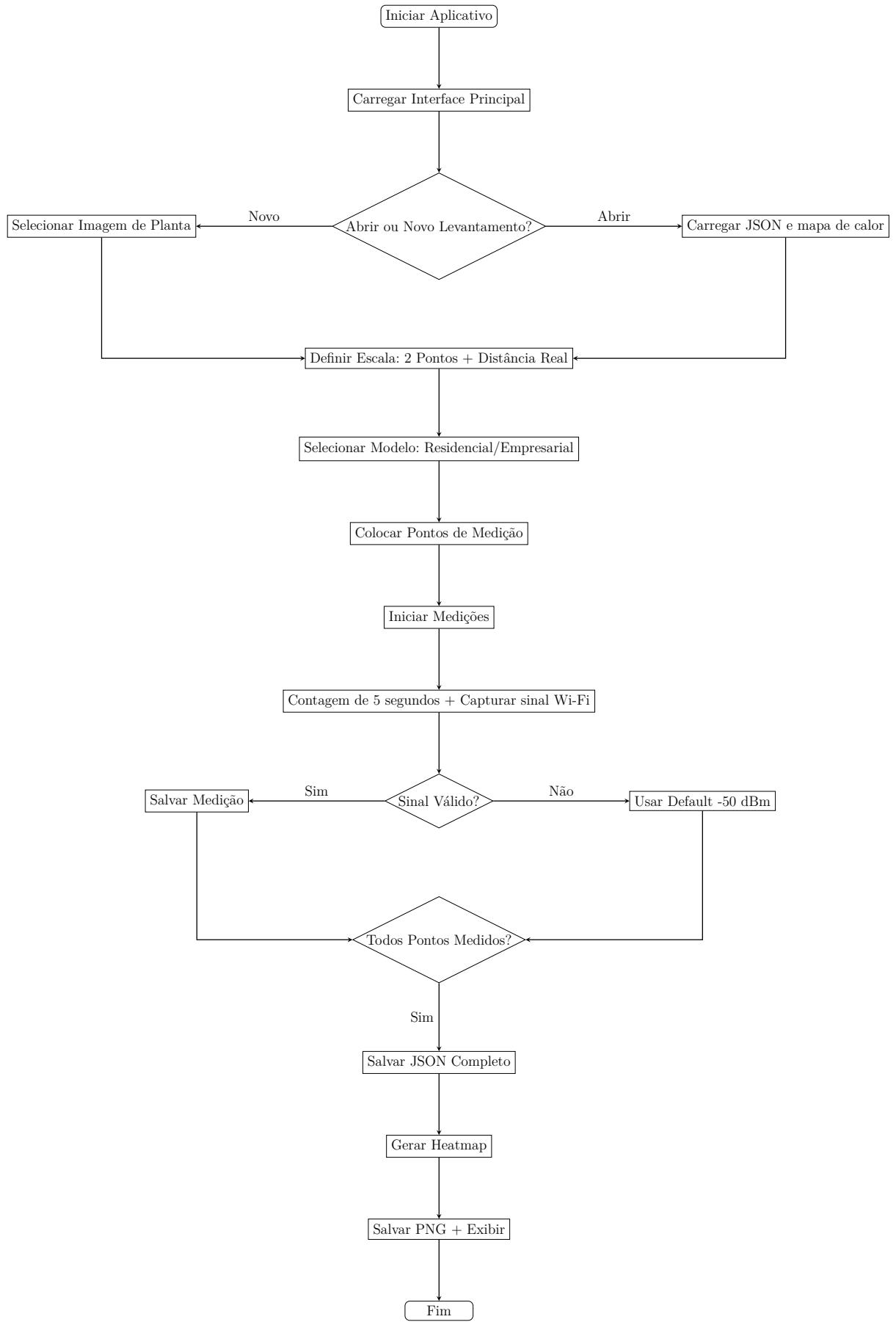
1 def open_survey(self):
2     file_path = filedialog.askopenfilename(...)
3     if not file_path:
4         return
5     try:
6         with open(file_path, 'r', encoding='utf-8'):
7             as f:
8                 data = json.load(f)
9                 self.current_image_path =
10                    data.get("image_path")
11                 self.scale_factor = data.get("scale_factor")
12                 self.pl_model_selection.set(data.get("pl_model
13                    _selection", "Nenhum"))
14                 self.measurement_results =
15                    data.get("measurement_results", [])
16                 self.measurement_points = [(res["x"],
17                     res["y"]) for res in
18                     self.measurement_results]
19 # ... (exibicao e redraw)
20 except:
21     messagebox.showerror("Erro", f"Erro ao
22         carregar o arquivo: {e}")

```

Erros são tratados com diálogos (ex.: medições insuficientes para *heatmap*). O foco é na precisão espacial (usando escala) e na modelagem física do sinal, integrando hardware para automação em campo.

#### 4.1.4 Fluxograma do Procedimento do Software

A seguir, apresenta-se um fluxograma simplificado que representa o fluxo lógico principal da execução do software desenvolvido. O diagrama inicia com o "Iniciar Aplicativo", que representa a inicialização da aplicação, passando pela carga da interface principal e pela decisão inicial de abrir um levantamento existente ou iniciar um novo. Em caso de novo levantamento, prossegue para a seleção da imagem da planta baixa; para abertura, carrega os dados de um arquivo JSON previamente salvo, incluindo imagem, escala, pontos de medição e resultados. Ambas as ramificações convergem para a definição da escala, onde o software calcula o fator de conversão de pixels para metros reais baseado em pontos marcados e distância informada.



O código completo está disponível para download pelo link <https://github.com/brunoStaquari/TCC-Bruno-Santos-Taquari>.

## 4.2 Estudo de caso

Para iniciar a medição do sinal no software foram executados as seguintes ações dentro do software desenvolvido:

- **Preparação da Imagem de Referência:** Importação da planta baixa residencial a ser utilizada como base do modelo espacial;
- **Calibração da Escala:** Definição da escala real do ambiente por meio da demarcação de uma linha sobre uma parede com medida conhecida, permitindo ao software estabelecer o sistema de coordenadas em unidades reais; conhecida para que o software crie o sistema de coordenadas reais;
- **Planejamento dos Pontos de Medição:** Determinação da quantidade e localização exata dos pontos onde as medições de intensidade de sinal seriam executadas;
- **Definição do Contexto Ambiental:** Classificação do ambiente como residencial (ou comercial) para a posterior determinação do nível de ruído médio característico daquele espaço.
- **Coleta *In Loco* dos Dados:** Deslocamento do equipamento de medição até os pontos predefinidos. A aquisição de cada amostra era iniciada manualmente através de um botão acoplado à Raspberry Pi, precedida por um intervalo de estabilização de 5 segundos;
- **Geração do JSON e Mapa de Calor:** Finalizada a medição no último ponto, era gerado o mapa de calor e um arquivo no formato JSON contendo: o tipo de ambiente especificado, as coordenadas georreferenciadas dos pontos, os valores de intensidade de sinal medidos em dBm e o fator de escala aplicado;

O arquivo gerado no formato JSON representa a consolidação estruturada dos dados experimentais coletados, servindo como output primário do sistema de medição. Este arquivo encapsula metadados cruciais, como o **image\_path** (local da planta base) e o **scale\_factor**, que permite a conversão das coordenadas espaciais do plano 2D para unidades reais. Além disso, ele registra a seleção do modelo de perda de

percurso, identificada pela chave **pl\_model\_selection** como "Residencial", informação fundamental para a posterior validação teórica do estudo.

A seção principal, **measurement\_results**, é um array que lista individualmente cada ponto de medição. Cada elemento desse array contém o identificador sequencial point, as coordenadas **x** e **y** (em pixels da imagem) e o valor fundamental da coleta, o **signal\_dbm**, que indica a intensidade do sinal capturado em dBm. Essa estrutura de chave-valor permite uma rastreabilidade completa, vinculando cada medição de sinal à sua localização exata no espaço físico mapeado pela planta baixa.

As **Figuras 4.2 e 4.4** apresentam os resultados centrais da etapa de coleta e processamento de dados, ilustrando a transição do ambiente físico para sua representação digital e modelada. As imagens à esquerda mostram as plantas baixas originais do imóvel, capturadas e importadas pelo software para servirem de base geométrica e de referência de escala, conforme detalhado na metodologia. As imagens à direita, por sua vez, exibem os **Mapas de Calor (Heatmap)** da intensidade do sinal Wi-Fi, gerado após a interpolação dos dados medidos, sobrepondo o modelo de propagação selecionado (Modelo Residencial,  $n = 4, 5$ ).

Os mapas de calor gerados oferecem uma visualização immediata da distribuição da intensidade do sinal (dBm) em toda a área de estudo. As cores "frias" (verde, amarelo) indicam as áreas com **maior intensidade de sinal** (valores mais próximos de 0 dBm), enquanto as cores "quentes" (laranja, vermelho) representam as zonas com **maior atenuação** (valores mais negativos, próximos a -90dBm). Esta representação é crucial para identificar áreas de sombra e verificar a cobertura efetiva da rede, auxiliando na alocação ideal de repetidores ou pontos de acesso adicionais.

É perceptível, na análise da distribuição de cores, que as áreas próximas ao centro da residência, como a Sala, o Hall e a Suíte, apresentam a maior intensidade de sinal, variando entre -36dBm e -40dBm. À medida que o raio de medição se afasta do centro ou encontra obstáculos físicos (paredes internas, portas), o sinal degrada consistentemente. Exemplos claros de atenuação significativa são observados nas extremidades da planta, como no Patéo de Serviço (com medições em torno de -85dBm) e na Garagem.

Essa correlação visual entre a arquitetura da planta baixa e a intensidade do sinal valida a influência da distância na propagação do sinal eletromagnético, princípio fundamental do modelo de perda de percurso (Path Loss) adotado. Os dados coletados, transformados em um mapa de calor, não apenas comprovam a funcionalidade

do software em georreferenciar e visualizar resultados, mas também estabelecem a base empírica para a comparação com os resultados teóricos de modelos de propagação.

#### 4.3 Discussão dos Resultados

Os resultados obtidos demonstram que:

- a) A ferramenta foi capaz de coletar dados reais de intensidade de sinal em dBm, com estabilidade e precisão adequadas para a aplicação.
- b) A interpolação representou corretamente a variação espacial do RSSI, mantendo boa suavidade da superfície e coerência física.
- c) A sobreposição do mapa de calor à planta arquitetônica permitiu interpretação clara da cobertura, atendendo plenamente ao objetivo geral do trabalho.
- d) As zonas de sinal fraco identificadas correspondem a regiões esperadas segundo o modelo teórico, confirmando a validade do procedimento.
- e) A aplicação prática demonstrou a viabilidade da solução como alternativa de baixo custo às ferramentas comerciais de *site survey*.

Assim, a metodologia adotada mostrou-se eficaz e os resultados confirmam que a ferramenta atende ao propósito para o qual foi desenvolvida.

#### 4.4 Impacto e Contribuições do Estudo

O desenvolvimento da ferramenta proposta trará as seguintes contribuições:

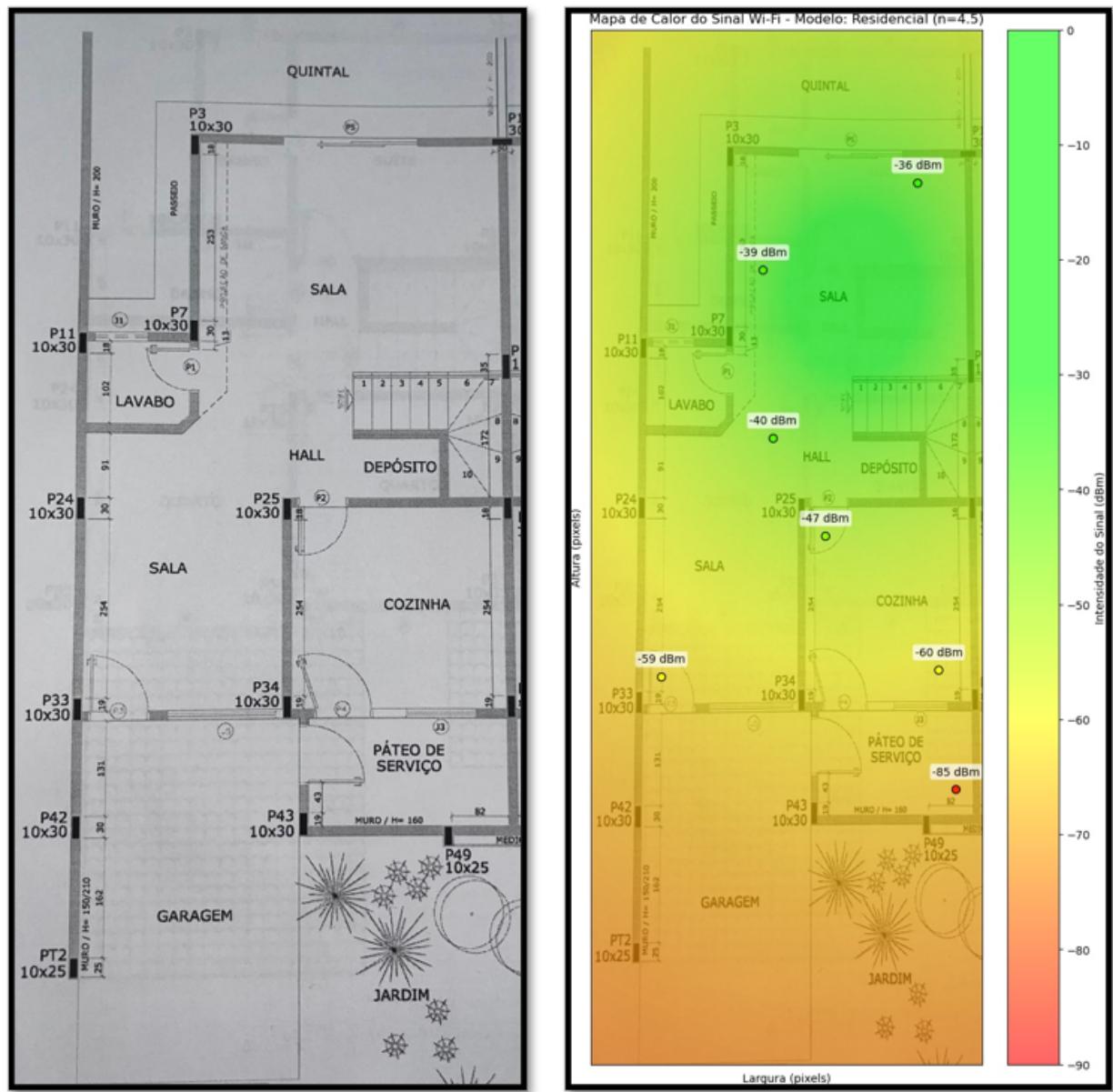
- **Contribuição tecnológica:** A ferramenta oferecerá uma solução de baixo custo para análise de cobertura de redes Wi-Fi, utilizando hardware acessível (Raspberry Pi 5) e software de código aberto. Isso permitirá que técnicos de redes e pequenas empresas realizem site surveys sem depender de soluções comerciais de alto custo;
- **Contribuição acadêmica:** O estudo contribuirá para a literatura sobre análise de redes sem fio, fornecendo uma abordagem prática para a aplicação do padrão IEEE 802.11ac em cenários reais. A disponibilização do

```

1  {
2      "image_path": "/home/bruno/Desktop/TCC/Planta Terreo.jpeg",
3      "scale_factor": 0.01270433485348598,
4      "measurement_results": [
5          {
6              "point": 1,
7              "x": 266.20000000000005,
8              "y": 297.66,
9              "signal_dbm": -39
10         },
11         {
12             "point": 2,
13             "x": 505.7800000000003,
14             "y": 189.9700000000003,
15             "signal_dbm": -36
16         },
17         {
18             "point": 3,
19             "x": 281.93,
20             "y": 505.7800000000003,
21             "signal_dbm": -40
22         },
23         {
24             "point": 4,
25             "x": 565.07,
26             "y": 940.1700000000001,
27             "signal_dbm": -85
28         },
29     ],
30     {
31         "point": 5,
32         "x": 538.45,
33         "y": 792.5500000000001,
34         "signal_dbm": -60
35     },
36     {
37         "point": 6,
38         "x": 363.0000000000006,
39         "y": 626.7800000000001,
40         "signal_dbm": -47
41     },
42     {
43         "point": 7,
44         "x": 108.9,
45         "y": 801.0200000000001,
46         "signal_dbm": -59
47     },
48     "pl_model_selection": "Residencial"
49 }

```

**Figura 4.1** JSON medição térreo. Fonte: Autoral



**Figura 4.2** Foto da planta e mapa de calor após medição pavimento térreo. Fonte: Autoral

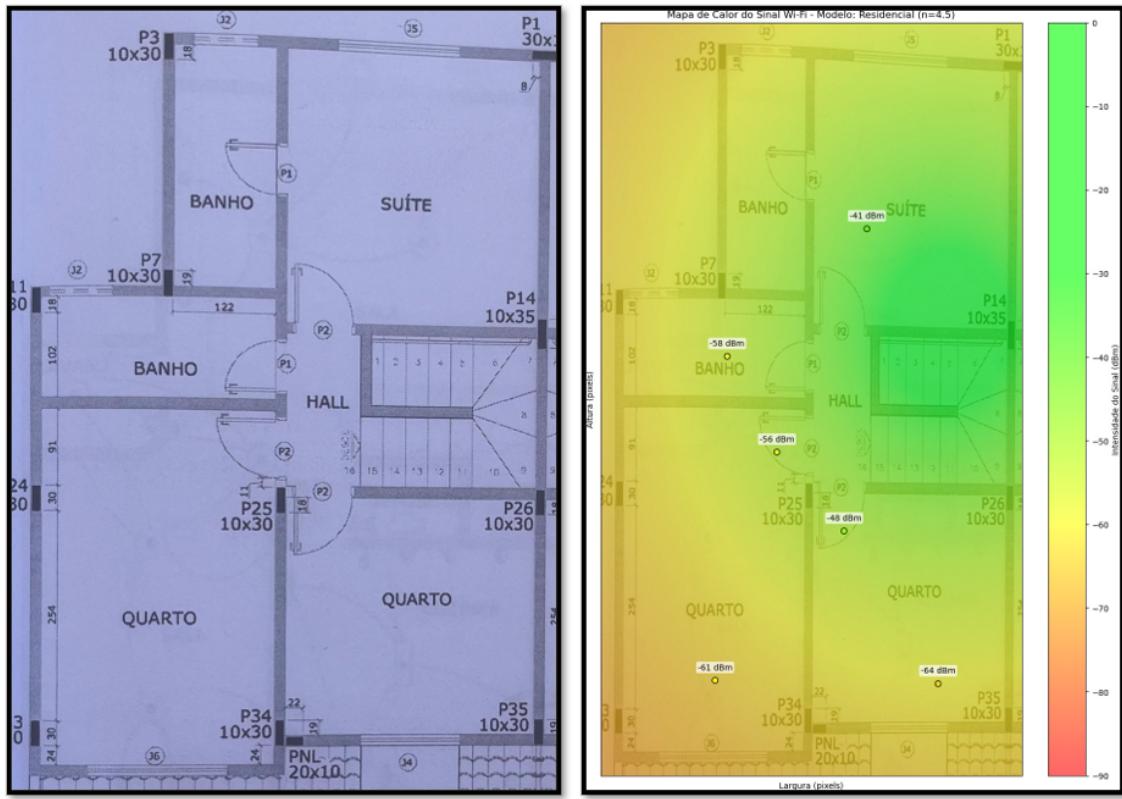
```

1  {
2      "image_path": "/home/bruno/Desktop/TCC/Planta 2 andar.jpeg",
3      "scale_factor": 0.0071733685908618285,
4      "measurement_results": [
5          {
6              "point": 1,
7              "x": 242.51492001935026,
8              "y": 1118.4217487951212,
9              "signal_dbm": -61
10         },
11         {
12             "point": 2,
13             "x": 373.7582885004104,
14             "y": 730.3978767641607,
15             "signal_dbm": -56
16         },
17         {
18             "point": 3,
19             "x": 516.4141238059105,
20             "y": 864.4943619513309,
21             "signal_dbm": -48
22         },
23         {
24             "point": 4,
25             "x": 716.1322932336108,
26             "y": 1124.1279822073411,
27             "signal_dbm": -64
28         },
29         {
30             "point": 5,
31             "x": 268.1929703743403,
32             "y": 567.7702245158906,
33             "signal_dbm": -58
34         },
35         {
36             "point": 6,
37             "x": 564.9171078097805,
38             "y": 350.93335485153034,
39             "signal_dbm": -41
40         }
41     ],
42     "pl_model_selection": "Residencial"
43 }

```

**Figura 4.3** JSON medição 2º pavimento. Fonte: Autoral

código-fonte em formato aberto incentivará a personalização e evolução da ferramenta por outros pesquisadores;



**Figura 4.4** Foto da planta e mapa de calor após medição 2º pavimento. Fonte: Autoral

- **Contribuição prática:** A ferramenta auxiliará na otimização da implantação de redes Wi-Fi em ambientes residenciais e corporativos, identificando áreas com baixa cobertura e sugerindo ajustes na posicionamento de pontos de acesso. Isso resultará em redes mais eficientes e confiáveis, melhorando a experiência do usuário final;
- **Contribuição social:** Ao promover uma solução acessível, o estudo ampliará o acesso a ferramentas de análise de redes para profissionais com recursos limitados, especialmente em contextos de pequenas empresas ou instituições com orçamento restrito.

## 5 Conclusão

Este Trabalho de Conclusão de Curso teve como objetivo desenvolver uma ferramenta computacional de baixo custo, executada em um Raspberry Pi 5, capaz de realizar medições da intensidade do sinal Wi-Fi em ambientes internos, associar essas medições a uma planta arquitetônica em formato de imagem e gerar mapas de calor da cobertura, auxiliando na análise de redes WLAN baseadas no padrão IEEE 802.11ac.

O problema de pesquisa, apresentado no Capítulo 1, destacou a carência de soluções acessíveis para a realização de *site surveys* em redes Wi-Fi, principalmente devido ao alto custo de ferramentas comerciais. Como resposta a essa lacuna, o sistema desenvolvido neste trabalho buscou integrar conceitos de propagação de ondas, modelos de perda de percurso, leitura de intensidade de sinal (RSSI) e interpolação espacial em uma solução portátil e financeiramente viável.

### 5.1 Atendimento aos Objetivos

Os objetivos específicos definidos no início do trabalho foram plenamente alcançados:

- Desenvolveu-se uma interface gráfica intuitiva, permitindo a importação da planta arquitetônica, a definição da escala e a marcação dos pontos de medição.
- Implementou-se um mecanismo funcional para a coleta de valores de RSSI em dBm, utilizando uma placa de rede Wi-Fi compatível com IEEE 802.11ac conectado ao Raspberry Pi 5.
- Realizou-se o registro automático dos dados de cada ponto, associando coordenadas da planta e intensidade de sinal.
- Aplicou-se interpolação espacial, utilizando o método linear com triangulação de Delaunay, para gerar uma superfície contínua de intensidade de sinal sobre o ambiente estudado.
- Desenvolveu-se um mapa de calor sobreposto à planta arquitetônica, representando de forma visual a distribuição da cobertura Wi-Fi.
- Conduziu-se um estudo de caso em ambiente interno real, validando a funcionalidade do sistema proposto.

A ferramenta demonstrou ser eficaz na identificação de regiões de forte e fraca cobertura, apresentando resultados coerentes com os modelos teóricos de propagação discutidos no Capítulo 2. O software atendeu às diretrizes metodológicas estabelecidas no Capítulo 3 e produziu resultados consistentes com o comportamento esperado do sinal Wi-Fi em ambientes internos.

## 5.2 Contribuições do Trabalho

Este trabalho contribui de forma significativa para o campo da análise de redes sem fio em ambientes internos por meio de:

- uma solução de baixo custo baseada em hardware amplamente acessível;
- um software de código aberto, modular e passível de aprimoramentos;
- uma interface gráfica simples, adequada para uso por técnicos, estudantes e profissionais;
- uma metodologia de coleta e análise alinhada a princípios teóricos consolidados;
- a democratização de ferramentas de *site survey* para ambientes com limitações orçamentárias.

Assim, o sistema proposto amplia o acesso a ferramentas de diagnóstico de cobertura Wi-Fi, contribuindo tanto para o contexto acadêmico quanto para aplicações práticas em ambientes residenciais e corporativos.

## 5.3 Limitações

Apesar dos resultados satisfatórios, algumas limitações foram identificadas:

- O modelo de interpolação adotado não considera fenômenos avançados de propagação, como multipercurso profundo e variações abruptas de ambiente.
- A coleta de dados está limitada ao hardware específico utilizado (placa de rede integrada), podendo variar conforme o chipset.
- A validação foi conduzida em apenas um tipo de ambiente (residencial), o que restringe a generalização dos resultados para edifícios corporativos ou industriais.

- O software não incorpora modelos avançados de propagação com parâmetros calibrados para diferentes tipos de materiais de construção.

Essas limitações, no entanto, não comprometem a relevância do trabalho, mas indicam caminhos promissores para aprimoramentos futuros.

#### 5.4 Trabalhos Futuros

Com base no desenvolvimento realizado e nas limitações identificadas, sugerem-se as seguintes direções para trabalhos futuros:

- **Implementar novos métodos de interpolação**, como *Kriging* ou redes neurais, para melhorar a precisão da superfície estimada e capturar variações complexas do ambiente.
- **Incorporar modelos de propagação mais avançados**, como ITU-R P.1238 ou COST 231, permitindo parametrização por tipo de material e pavimento.
- **Adicionar suporte a múltiplos pontos de acesso (APs)** para análise comparativa e planejamento de cobertura total de ambientes maiores.
- **Criar um módulo de otimização de posicionamento de APs**, sugerindo reposicionamentos automáticos com base no mapa gerado.
- **Desenvolver versão multiplataforma**, incluindo execução em notebooks, tablets ou smartphones.
- **Adicionar exportação de relatórios automáticos**, contendo planta, mapa de calor, tabelas de medições e análises integradas.
- **Aprimorar a interface gráfica**, adicionando ferramentas de seleção, zoom, camadas e modos avançados de visualização.
- **Integrar medições automatizadas**, utilizando robôs móveis, carrinhos autônomos ou rotas guiadas.
- **Validar o sistema em ambientes corporativos**, industriais ou campi universitários, com múltiplas barreiras físicas e características desafiadoras.
- **Desenvolver uma versão embarcada em case portátil**, tornando a solução um instrumento técnico completo de *site survey*.

Essas perspectivas de continuidade ampliam o impacto da solução desenvolvida, possibilitando que o sistema evolua para uma ferramenta robusta, escalável e capaz de competir com opções comerciais tradicionais.

### **5.5 Considerações Finais**

O trabalho desenvolvido alcançou seu objetivo principal ao apresentar uma solução funcional, alinhada aos princípios teóricos de propagação de ondas e adequada às necessidades práticas de análise de cobertura Wi-Fi em ambientes internos. A ferramenta demonstra que é possível realizar *site surveys* com baixo custo e boa confiabilidade, utilizando tecnologias acessíveis e de código aberto.

Além de contribuir para o avanço técnico no contexto das redes sem fio, o projeto reforça a importância da integração entre teoria e prática no âmbito da Engenharia da Computação, fornecendo uma alternativa viável para profissionais e instituições que necessitam de uma ferramenta eficiente para o diagnóstico e planejamento de redes Wi-Fi.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CETIC.BR, C. **TIC Domicílios 2023: Pesquisa sobre o uso das tecnologias de informação e comunicação nos domicílios brasileiros.** CGI.br, 2024. Disponível em: <[https://cetic.br/media/docs/publicacoes/2/20241104102822/tic\\_domiciliros\\_2023\\_livro\\_eletronico.pdf](https://cetic.br/media/docs/publicacoes/2/20241104102822/tic_domiciliros_2023_livro_eletronico.pdf)>. 1

IEEE, I. **IEEE Standard for Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications.** [S.l.], 1997. 1-445 p. (IEEE Std 802.11-1997). Doi: 10.1109/IEEESTD.1997.85951. 2

RAPPAPORT, T. S. **Wireless Communications: Principles and Practice.** Second. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002. ISBN 0130422320. 7, 13, 14, 26

IEEE, I. Standard, **IEEE Standard for Information Technology – Telecommunications and Information Exchange Between Systems – Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications.** Piscataway, NJ: IEEE, 2017. 7

\_\_\_\_\_. **IEEE Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems—Local and metropolitan area networks—Specific requirements—Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications—Amendment 4: Enhancements for Very High Throughput for Operation in Bands below 6 GHz.** [S.l.], 2013. 1-425 p. (IEEE Std 802.11ac(TM)-2013). Doi: 10.1109/IEEESTD.2013.7797535. 8, 11, 12, 13

PROAKIS J. G.; SALEHI, M. **Digital Communications.** [S.l.]: McGraw-Hill, 2008. 8

DEEN H. K.; ABD, H. J. A. Demonstration of 256 qam 10 gbps signal transmission over 570 km fiber-based ng radio over fiber system. **Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications**, v. 23, n. 3, p. 18–39, 2024. 8, 9

PATEL, V. 256 qam (802.11ac). 2015. 9

PRASAD, R. **OFDM for Wireless Communications Systems.** Boston: Artech House, 2004. v. 2. 10

SPENCER, Q. H. **Transmission Strategies for Wireless Multi-User, Multiple-Input, Multiple-Output Communication Channels.** Tese (Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e de Computação)) — Brigham Young University, Provo, UT, 2004. Disponível em: <https://scholarsarchive.byu.edu/etd/8>. Acesso em: 24 nov. 2025. 12

DEBNATH, S. e. a. Performance investigation of various estimationmodels for received-signal strength andlink-speed predictions of the 802.11ac wlans. **International Journal of Wireless and Microwave Technologies**, v. 15, n. 1, p. 18–39, 2025. 13

ITU, I. **Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range from 300 MHz to 450 GHz**. Geneva, Switzerland. (P Series, P.1238). Current version (e.g., P.1238-13). 13

VIRTANEN, P.; GOMMERS, R.; OLIPHANT, T. E.; AL. et. Scipy 1.0: Fundamental algorithms for scientific computing in python. **Nature Methods**, v. 17, p. 261–272, 2020. SciPy library, including the griddata interpolation method. Disponível em: <<https://scipy.org/>>. 15

DELAUNAY, B. Sur la sphère vide. **Bulletin de l'Académie des Sciences de l'URSS**, v. 6, p. 793–800, 1934. Fundamental reference for Delaunay triangulation, base of the linear interpolation used em griddata. 15