

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

LUCAS RODRIGUES AMARAL

**MÉTODO DE ANÁLISE PASSIVO E ESPECTRAL PARA REDES SEM FIO
PREDIAIS**

Alegrete

2025

LUCAS RODRIGUES AMARAL

**MÉTODO DE ANÁLISE PASSIVO E ESPECTRAL PARA REDES SEM FIO
PREDIAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. Bruno B. Vizzotto

**Alegrete
2025**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

A485m Amaral, Lucas Rodrigues

Método de análise passivo e espectral para redes sem fio
prediais / Lucas Rodrigues Amaral.

96 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade
Federal do Pampa, ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES, 2025.

"Orientação: Bruno Boessio Vizzotto".

1. Interferências. 2. Desvanecimentos. 3. Interpolação. 4.
Analisadores de espectro. I. Título.

LUCAS RODRIGUES AMARAL

**MÉTODO DE ANÁLISE PASSIVO E ESPECTRAL PARA REDES SEM FIO
PREDIAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Telecomunicações.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 12 de Dezembro de 2025.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Bruno Boessio Vizzotto
Orientador

Prof. Dr. Mauro Fonseca Rodrigues
UNIPAMPA

Prof. Dr. Cristian Muller
UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **CRISTIAN MULLER, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 16/12/2025, às 17:37, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **MAURO FONSECA RODRIGUES, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 17/12/2025, às 10:05, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **BRUNO BOESSIO VIZZOTTO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 17/12/2025, às 10:49, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1930177** e o código CRC **CAF3228E**.

Dedico este trabalho a mim mesmo,
gaúcho de Alegrete!

AGRADECIMENTO

Agradeço imensamente à Santíssima Trindade (Deus, Jesus Cristo e Espírito Santo) por permitir que este reles mortal chegasse até aqui, pois agora sou Engenheiro de Telecomunicações.

Agradeço aos meus pais Irineu de Souza Amaral e Nara Verlaine Mendes Rodrigues pelo apoio, esforço, paciência e amor.

Agradeço aos meus avós João Amaral e Jurema de Souza Amaral pelo carinho e amor.

Agradeço à Lariani Cristine Pereira Borges pelo companheirismo, conversas e pelos doces e salgados que compartilhou comigo.

Agradeço aos meus amigos Gerardo Cachina Gaetjens e Magdalena Mbuy Miko Mikue pela amizade, conversas, risadas, companheirismo e apoio.

Agradeço aos meus professores e amigos Mauro Fonseca Rodrigues e Bruno Boessio Vizzotto pelos conselhos, conversas, apoios e oportunidades de bolsas e viagens durante a minha vida acadêmica na Unipampa.

Agradeço ao Laboratório de Óptica e Comunicações (LAOC) ao qual fui membro, pelas oportunidades concedidas e pelo ótimo ambiente de trabalho e estudo.

“Eu sei que não vou morrer
Porque de mim vai ficar
O mundo que eu construí
O meu Rio Grande, o meu lar
Campeando as próprias origens
Qualquer guri vai achar”.

Os Fagundes

“As almas de todos os homens são
imortais, mas as almas dos homens justos
são imortais e divinas”.

Sócrates

RESUMO

O crescimento das redes sem fio em ambientes institucionais demanda metodologias confiáveis para avaliação de cobertura e qualidade do sinal Wi-Fi, no qual majoritariamente as metodologias utilizadas no diagnóstico de redes sem fio se baseiam no uso de ferramentas em software instaladas em dispositivos eletrônicos como celulares, tablets, notebooks e desktops para processar os dados coletados e exportar o relatório com informações da rede. Essas ferramentas utilizam o poder computacional dos hardwares destes dispositivos para realizar o processamento dos dados, no entanto, os meios e processos utilizados pelas ferramentas geralmente são abstraídos dos usuários devido a critérios de segurança das empresas, porém acaba inibindo-os de verificarem se as métricas utilizadas são confiáveis ou se é necessário reajustá-las. Portanto este trabalho propõe e aplica um método de análise passivo e espectral para redes sem fio prediais com o uso de analisadores de espectro, tendo como estudo de caso os blocos de prédio A6 e A7 que possuem a nomenclatura A3 no campus Alegrete da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA). Neste método são utilizados os analisadores de espectro FSH3 e N1996A conectados a duas antenas omnidirecionais do tipo monopolo de um quarto de onda ($\lambda/4$), cujas faixas de operação são: 2,4 GHz e 5 GHz. A rede sem fio do prédio A3 foi mapeada para a coleta dos dados do *Received Signal Strength Indicator* (RSSI), com estes dados sendo importados ao software QGIS para a realização da interpolação pelo método de Krigagem Ordinária e posterior geração dos mapas de calor referentes a cobertura da rede Wi-Fi. Após a análise dos mapas de calor, foram propostas mudanças na estrutura física e lógica da rede sem fio para garantir o bom desempenho da mesma.

Palavras-Chave: Interferências; Desvanecimentos; Interpolação; Analisadores de espectro.

ABSTRACT

The growth of wireless networks in institutional environments demands reliable methodologies for evaluating Wi-Fi coverage and signal quality. Most methodologies used in wireless network diagnostics rely on software tools installed on electronic devices such as cell phones, tablets, laptops, and desktops to process collected data and export reports with network information. These tools utilize the computational power of these devices' hardware to process the data; however, the means and processes used by these tools are generally hidden from users due to company security criteria, ultimately preventing them from verifying the reliability of the metrics or the need for adjustments. Therefore, this work proposes and applies a passive and spectral analysis method for building wireless networks using spectrum analyzers, with the case study being building blocks A6 and A7, designated A3, on the Alegrete campus of the Federal University of Pampa (UNIPAMPA). This method utilizes FSH3 and N1996A spectrum analyzers connected to two quarter-wave ($\lambda/4$) omnidirectional monopole antennas, operating in the 2.4 GHz and 5 GHz bands. The wireless network of building A3 was mapped to collect Received Signal Strength Indicator (RSSI) data. This data was then imported into QGIS software for interpolation using the Ordinary Kriging method, followed by the generation of heatmaps showing Wi-Fi network coverage. After analyzing the heatmaps, changes to the physical and logical structure of the wireless network were proposed to ensure its optimal performance.

Keywords: Interferences; Fades; Interpolation; Spectrum analyzers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — Rede Ad-hoc.....	21
Figura 2 — Rede BSS.....	23
Figura 3 — Rede ESS.....	24
Figura 4 — Rede MBSS.....	25
Figura 5 — Misturador de bits.....	27
Figura 6 — FDM e OFDM.....	28
Figura 7 — MU-MIMO.....	29
Figura 8 — Lado esquerdo (Beamforming / direcional), lado direito (Omnidirecional).....	29
Figura 9 — Constelação do 64-QAM.....	30
Figura 10 — Constelação da DQPSK.....	31
Figura 11 — Interferência Co-canal.....	33
Figura 12 — Interferência de Canal Adjacente.....	34
Figura 13 — Interferência de Radiofrequência.....	35
Figura 14 — Multipath.....	36
Figura 15 — Path Loss.....	37
Figura 16 — Shadowing.....	38
Figura 17 — Semivariograma experimental.....	39
Figura 18 — Antena 2,4 GHz (esquerda) e Antena 5 GHz (direita).....	45
Figura 19 — Projeto arquitetônico do pavimento térreo.....	47
Figura 20 — Projeto arquitetônico do segundo pavimento.....	47
Figura 21 — Captura de tela do software WIFI Analyzer and Surveyor.....	50
Figura 22 — Diagrama de bloco do processo de amostragem.....	53
Figura 23 — Setup do FSH3.....	56
Figura 24 — Setup do N1996A.....	57
Figura 25 — FSH3: Canais ativos do Wi-Fi 2,4 GHz.....	59
Figura 26 — N1996A: Canais ativos do Wi-Fi 5 GHz.....	62
Figura 27 — Paleta de cores no QGIS.....	69
Figura 28 — Canal 1 pavimento térreo.....	71
Figura 29 — Canal 6 pavimento térreo.....	72
Figura 30 — Canal 11 pavimento térreo.....	73
Figura 31 — Canal 1 segundo pavimento.....	75
Figura 32 — Canal 6 segundo pavimento.....	76
Figura 33 — Canal 11 segundo pavimento.....	77
Figura 34 — Canais 1, 6 e 11 pavimento térreo.....	78
Figura 35 — Canais 1, 6 e 11 segundo pavimento.....	80
Figura 36 — Canais 100, 116, 132 e 134 pavimento térreo.....	81
Figura 37 — Canais 100, 116, 132 e 134 segundo pavimento.....	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Evolução do Wi-Fi.....	26
Tabela 2 — Parâmetros dimensionais dos conectores.....	44
Tabela 3 — Especificações técnicas dos APs.....	48
Tabela 4 — Especificações do analisador FSH3.....	51
Tabela 5 — Especificações do analisador N1996A.....	52
Tabela 6 — Localização dos APs e identificação dos canais habilitados.....	63
Tabela 7 — Configuração da paleta de cores.....	69

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers Incorporated</i>
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>
AP	<i>Access Point</i>
RSSI	<i>Received Signal Strength Indication</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
RF	<i>Radio Frequency</i>
WPA2	<i>Wi-Fi Protected Access 2</i>
WPA3	<i>Wi-Fi Protected Access 3</i>
SSID	<i>Service Set Identifier</i>
BSSID	<i>Basic Service Set Identifier</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
IBSS	<i>Independent Basic Service Set</i>
BSS	<i>Basic Service Set</i>
BSA	<i>Basic Service Area</i>
AID	<i>Association ID</i>
RIP	<i>Routing Information Protocol</i>
OSPF	<i>Open Shortest Path First</i>
BGP	<i>Border Gateway Protocol</i>
EIGRP	<i>Enhanced Interior Gateway Routing Protocol</i>
ESS	<i>Extended Service Set</i>
WDS	<i>Wireless Distribution System</i>
DS	<i>Distribution System</i>
VLAN	<i>Virtual Local Area Network</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
WAN	<i>Wide Area Network</i>
dB	<i>Decibel</i>
dBm	<i>Decibel-milliwatts</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
N	<i>Neill</i>
SMA	<i>SubMiniature version A</i>
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with/Collision Avoidance</i>

SU-MIMO	<i>Single User - Multiple Input, Multiple Output</i>
MU-MIMO	<i>Multi User - Multiple Input, Multiple Output</i>
DSSS	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>
FHSS	<i>Frequency Hopping Spread Spectrum</i>
CCK	<i>Complementary Code Keying</i>
FDM	<i>Frequency Division Multiplexing</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
PSK	<i>Phase Shift Keying</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
MPSK	<i>M-ary Phase Shift Keying</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
DQPSK	<i>Differential Quadrature Phase Shift Keying</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
ISI	<i>Intersymbol Interference</i>
CCI	<i>Co-Channel Interference</i>
ACI	<i>Adjacent Channel Interference</i>
SIR	<i>Signal to Interference Ratio</i>
RBW	<i>Resolution Bandwidth</i>
VBW	<i>Video Bandwidth</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Justificativa.....	18
1.2	Objetivos.....	19
1.2.1	Objetivo geral.....	19
1.2.2	Objetivos específicos.....	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	Topologias de redes sem fio.....	20
2.1.1	Independent Basic Service Set (IBSS).....	20
2.1.2	Basic Service Set (BSS).....	22
2.1.3	Extended Service Set (ESS).....	23
2.1.4	Mesh Basic Service Set (MBSS).....	24
2.2	O Protocolo Wi-Fi 802.11.....	25
2.2.1	Técnicas de multiplexação e modulação.....	26
2.3	Interferências eletromagnéticas.....	31
2.3.1	Interferência Co-Canal (CCI).....	32
2.3.2	Interferência de Canal Adjacente (ACI).....	33
2.3.3	Interferência de Radiofrequência (RFI).....	34
2.4	Desvanecimentos.....	35
2.4.1	Desvanecimento em pequena escala.....	36
2.4.2	Desvanecimento em grande escala.....	37
2.5	Interpolação por Krigagem Ordinária.....	38
2.6	Estado da Arte.....	41
3	METODOLOGIA	44
3.1	Antenas.....	44
3.2	Infraestrutura e instrumentação.....	46
3.3	Montagem dos setups e configuração dos analisadores.....	55
3.4	Configuração dos softwares AutoCAD e QGIS.....	65
4	RESULTADOS	70
4.1	Mapas de calor.....	70
4.2	Discussão dos resultados.....	83
4.3	Propostas de soluções.....	86
5	CONCLUSÃO	88
	REFERÊNCIAS	89
	APÊNDICES	93

1 INTRODUÇÃO

A internet é composta por um conjunto de redes interconectadas com topologias físicas e lógicas distintas, integrando dispositivos heterogêneos e diferentes meios de comunicação. Para garantir a interoperabilidade entre equipamentos de fabricantes diversos, organizações como o *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) e a *Wi-Fi Alliance* definem protocolos, certificam dispositivos e atualizam padrões tecnológicos (FOROUZAN, 2009). Entre os protocolos mais difundidos estão o IEEE 802.3 (Ethernet) que especifica meios cabeados e o IEEE 802.11 (Wi-Fi) que especifica faixas de frequência do meio sem fio (HAMMOUMI, 2013).

A adoção de redes sem fio tornou-se essencial em ambientes prediais oferecendo fácil escalabilidade e economia de equipamentos em comparação à infraestrutura cabeada, sendo essencial em locais com grande número de usuários ou restrições físicas para instalação de cabos. Para que a rede sem fio opere adequadamente é necessário seguir etapas de projeto bem delineadas, pois a instalação mal projetada dos equipamentos geram falhas na cobertura devido à interferências eletromagnéticas e desvanecimentos.

O planejamento de uma rede sem fio envolve mapeamento do ambiente, estimativa de densidade de usuários, seleção do provedor de internet, aquisição de equipamentos, cabos e licenças de software essenciais, implantação da infraestrutura cabeada (com exceção de redes *Ad-hoc*) e sem fio, definição de topologias física e lógica e, testes de validação de desempenho. Esta última etapa é crucial, pois é nela que se verifica a qualidade da cobertura e a existência de interferências eletromagnéticas ou zonas de sombra (PRESCHER, 2009). A análise da rede sem fio em geral é aplicada sobre parâmetros como o *Received Signal Strength Indication* (RSSI) que mostra a potência do sinal; a *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) que expressa a relação entre o sinal e o ruído; a *bandwidth* (BW) que mostra a faixa espectral do canal; e o *Throughput* que revela a taxa de transferência de dados em *downlink* e *uplink* da rede.

São utilizadas ferramentas de análise de rede e analisadores de espectro, entre as principais ferramentas existentes temos o *SolarWinds Network Performance Monitor*, *NetSpot*, *InSSIDer*, *Acrylic Wi-Fi*, *Wireshark*, entre outros (DNSSTUFF, 2023). Esses softwares possuem diversas funcionalidades que vão desde a análise

dos parâmetros citados anteriormente à amostragem dos endereços MAC e IP dos dispositivos, amostragem dos protocolos de criptografia, estimativa do tempo de latência e *jitter*, entre outros.

Após a coleta de dados da rede sem fio por meio das aferições, os softwares geram relatórios e gráficos que contêm as informações dos parâmetros de forma detalhada, além também de gerarem mapas de calor (*heatmaps*) que expressam de forma visual a cobertura da rede sem fio na região, pelo qual esses mapas são úteis para identificar áreas com cobertura forte, fraca ou inexistente. A eficiência do processamento dos dados depende do poder computacional do hardware do dispositivo no qual o software irá transformar dados em informações para exportar o diagnóstico da rede, e também da sensibilidade da antena que aplica a limitação de potência mínima detectável.

Os analisadores de espectro são equipamentos projetados para processar sinais eletromagnéticos propagados no espaço livre ou por via cabeada, no domínio da frequência, do tempo, do código, da modulação, entre outros. Estes equipamentos possuem uma vasta gama de funcionalidades disponíveis em seu software embarcado e contam com um hardware de elevado poder computacional para o processamento dos dados (LIEBL, 2013). Por outro lado, os analisadores têm custo elevado e exigem maior preparo técnico do usuário para configurar o equipamento e analisar as informações obtidas por ele. Isso ocorre porque, diferentemente das ferramentas de análise espectral que abstraem o processo de configuração de comandos, bastando ao usuário apenas clicar no botão iniciar e aguardar o fim da execução do software que irá organizar as informações em planilhas e gráficos, em um analisador de espectro além de configurar os comandos conforme as especificações do manual do equipamento, o usuário precisa ter conhecimento prévio dos conceitos teóricos do domínio ao qual o sinal será amostrado.

Portanto neste trabalho será realizado um estudo de caso da rede Wi-Fi dos blocos de prédio A6 e A7 do campus Alegrete da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA) com a utilização dos analisadores de espectro FSH3 e N1996A para a coleta de dados do indicador de intensidade do sinal recebido, do inglês *Received Signal Strength Indicator* (RSSI), da rede sem fio. A coleta de dados será realizada por aferições na rede sem fio com o uso de duas antenas a serem construídas, estas antenas devem ser do tipo monopolo de um quarto de onda ($\lambda/4$) e devem operar nas faixas de frequência do Wi-Fi 2,4 GHz e 5 GHz. Posteriormente estes dados serão

aplicados ao método de interpolação por Krigagem Ordinária no software QGIS para a criação do *raster* de interpolação formado por dados amostrados e dados preditos, ou seja, dados não amostrados que formarão o mapa de calor que representa a cobertura da rede sem fio do prédio A3 composto pelos blocos A6 e A7. Após a análise dos mapas de calor, serão propostos ajustes na infraestrutura física e lógica da rede sem fio para os problemas encontrados na cobertura devido à interferências eletromagnéticas e desvanecimentos.

Em linhas gerais, este trabalho está organizado da seguinte forma: o Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica que contém os conceitos teóricos essenciais para a formulação do trabalho; o Capítulo 3 apresenta a metodologia desenvolvida e utilizada; o Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos e a discussão de propostas de soluções; e o Capítulo 5 traz as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

1.1 Justificativa

A crescente utilização de redes Wi-Fi em conjunto com outros protocolos de comunicação sem fio ampliou a necessidade de diagnósticos recorrentes e confiáveis de desempenho e cobertura da rede. Como a maior parte dos trabalhos de análise de redes Wi-Fi encontrados na literatura utiliza ferramentas de análise espectral (SANTOS, 2021; ROCHA *et al.*, 2020; ATAÍDES *et al.*, 2023), com cada trabalho possuindo uma metodologia própria de mapeamento da rede. O processo de extração da informação a partir dos dados coletados da rede geralmente é abstraído pelas ferramentas, dessa forma o usuário muitas vezes não possui acesso às métricas utilizadas por elas e também desconhece o método de interpolação de dados utilizado para gerar o mapa de calor da cobertura da rede Wi-Fi. Neste contexto, torna-se relevante desenvolver e aplicar uma metodologia padronizada, cujo processo de extração de informação para a geração do mapa de calor possa ser acompanhado em todas as etapas e o seu método possa ser ajustável para garantir que o mapa de calor gerado representa a cobertura real da rede.

1.2 Objetivos

Nesta seção encontra-se o objetivo geral do trabalho, o qual delineou a criação do tema e o direcionamento do trabalho como um todo, assim como também consta os objetivos específicos.

1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver e aplicar um método padronizado de análise passivo e espectral para avaliar a cobertura e o desempenho das redes Wi-Fi 2,4 GHz e 5 GHz dos blocos de prédio A6 e A7 que possuem a nomenclatura de A3, do campus Alegrete da UNIPAMPA.

1.2.2 Objetivos específicos

- Construção de duas antenas omnidirecionais do tipo monopolo de um quarto de onda ($\lambda/4$) que operem nas faixas de 2,4 GHz e 5 GHz.
- Aplicação do método de interpolação por Krigagem Ordinária.
- Geração do mapa de calor do parâmetro *Received Signal Strength Indicator* (RSSI).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica e o estado da arte necessários para o desenvolvimento da metodologia proposta. São abordados conceitos sobre topologias de redes sem fio, tecnologias do protocolo 802.11, interferências eletromagnéticas, desvanecimentos, conceitos do método de Krigagem e por fim, o estado da arte.

2.1 Topologias de redes sem fio

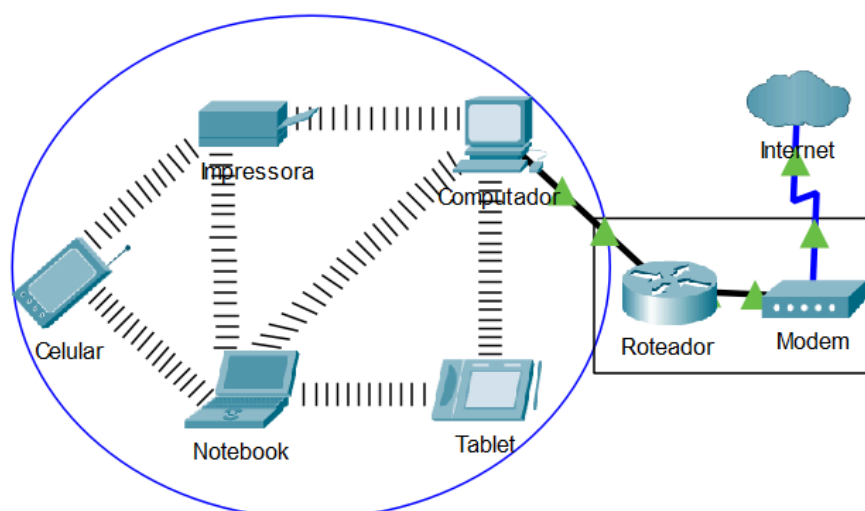
A topologia de rede refere-se ao arranjo dos dispositivos que a compõem e à forma como estes se comunicam. Ela é classicamente dividida em dois domínios: a arquitetura física, que representa a disposição espacial dos dispositivos na rede, e a arquitetura lógica, que define o modo como os dispositivos realizam o tráfego de dados (PANSANATO, 2016). No contexto das redes sem fio, as principais topologias incluem *Independent Basic Service Set* (IBSS), *Basic Service Set* (BSS), *Extended Service Set* (ESS), *Wireless Distribution System* (WDS) e *Mesh Basic Service Set* (MBSS).

2.1.1 *Independent Basic Service Set* (IBSS)

As redes sem fio são classificadas em dois tipos, a infraestruturada e a não infraestruturada também conhecida como *Ad-hoc*, nesta rede não é utilizado um controlador central como *Access Point* (AP) ou roteador sem fio para intermediar a comunicação entre os dispositivos, pois os próprios dispositivos da rede se comunicam entre si de forma que todos os dispositivos agem como cliente e como servidor (LOBATO; TAVARES, 2003). Essa rede possui uma alta escalabilidade para expansão devido a sua praticidade na instalação de novos dispositivos e seus protocolos de encaminhamento garantem que na rede existam diversos caminhos para fazer os dados trafegarem, com este encaminhamento de dados podendo ser direto, denominado como *single-hop* onde um dispositivo encaminha dados diretamente para outro dispositivo, ou podendo ser indireto, denominado como *multi-hop* onde os dados trafegam de dispositivo em dispositivo até chegarem ao destinatário.

Este tipo de rede normalmente é utilizada em ambientes de difícil instalação de uma infraestrutura ou quando o objetivo é criar redes isoladas, por essa razão estas redes são empregadas em operações militares, veículos não tripulados e redes de sensores (CARVALHO, 2016). Os protocolos de encaminhamento em redes *ad-hoc* são divididos em três categorias principais: *Proactive*, *Reactive* e *Hybrid*. Como o processo de encaminhamento de dados é realizado por meio do roteamento no qual são utilizados os endereços *Internet Protocol* (IP) associados aos endereços *Media Access Control* (MAC) dos dispositivos, os protocolos da categoria *Proactive* enviam periodicamente dados de controle para descobrir os endereços IP dos dispositivos na rede e manter as tabelas de roteamento atualizadas, esse processo é chamado de *flooding*, os principais protocolos são OLSR, CTP e DSDV. Os protocolos da categoria *Reactive* enviam dados de controle apenas quando é necessário estabelecer a rota para a transferência de dados, os principais protocolos são AODV e DSR. Os protocolos da categoria *Hybrid* como o próprio nome já diz, executam algumas funções de ambos os protocolos das categorias citadas anteriormente, estes protocolos realizam inicialmente o processo de *flooding* para atualizar os endereços IP e após este processo ficam aguardando o início de comunicação entre os dispositivos para realizar o processo de *flooding* novamente, os principais protocolos são ZRP e TORA (CARVALHO, 2016). Um exemplo de rede *Ad-hoc* pode ser visualizado na Figura 1.

Figura 1 — Rede Ad-hoc.



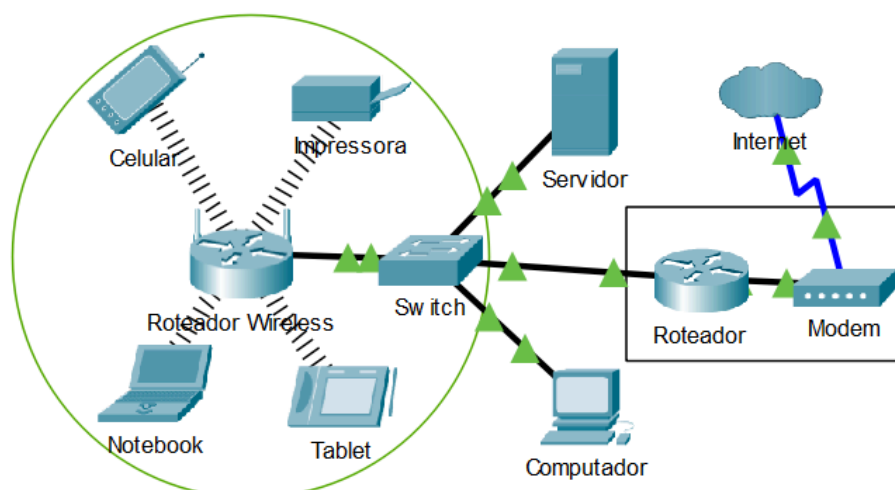
Fonte: O próprio autor.

2.1.2 *Basic Service Set (BSS)*

A rede infraestruturada *Basic Service Set (BSS)* é formada pela união do protocolo Wi-Fi 802.11 com o protocolo Ethernet 802.3, sendo a configuração de rede sem fio comumente utilizada em residências e pequenas empresas, assim formando uma WLAN. O funcionamento desta rede necessita apenas de um AP ou roteador sem fio conectado à rede ethernet (ATAÍDES, 2023). Nessa rede os dispositivos não se comunicam entre si diretamente, para que haja a comunicação é preciso que os dispositivos estejam dentro da cobertura do AP denominada de *Basic Service Area (BSA)*, assim os dispositivos realizam a varredura procurando redes sem fio disponíveis no ambiente e ao encontrarem o nome da rede sem fio *Service Set Identifier (SSID)* realizam a requisição de autorização ao AP por meio dos protocolos de segurança como o WPA3 para acesso à rede. Caso haja autorização, o AP cria endereços IP associados aos endereços MAC dos dispositivos para posteriormente fazer o encaminhamento de pacotes de dados por meio dos protocolos de roteamento. Assim como os dispositivos terminais da rede possuem endereço MAC, os APs possuem o *Basic Service Set Identifier (BSSID)* que é exclusivo em cada AP (BALBI, 2012).

Cada dispositivo que se conecta à rede recebe uma numeração chamada de *Association ID (AID)* que é utilizada pelo AP para limitar o número de dispositivos conectados na rede, esta limitação serve para garantir um bom desempenho da rede. Os dispositivos trocam mensagens entre si por intermédio do AP que utiliza protocolos de roteamento que encaminham os pacotes de dados maximizando a velocidade de tráfego e evitando a perda de pacotes. Entre os protocolos de roteamento utilizados por APs tem-se RIP, OSPF, BGP, EIGRP, entre outros (BALBI, 2012). A Figura 2 apresenta um exemplo de rede BSS.

Figura 2 — Rede BSS.



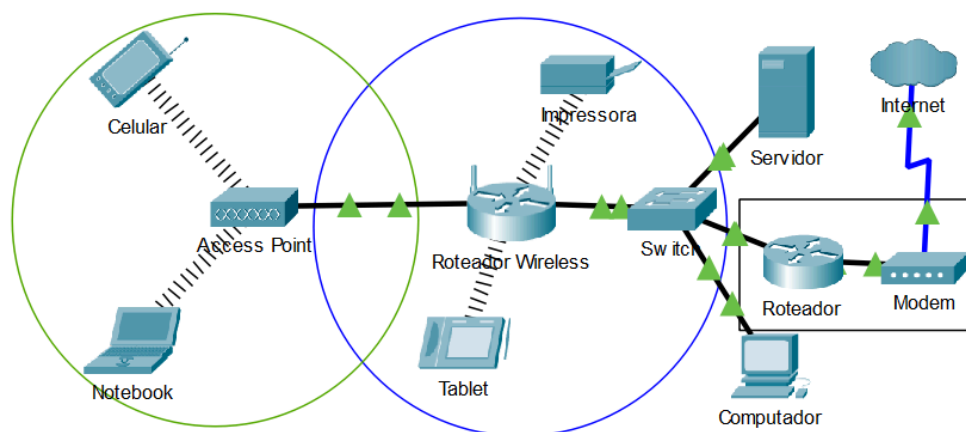
Fonte: O próprio autor.

2.1.3 *Extended Service Set (ESS)*

Para abranger a cobertura da rede sem fio em ambientes maiores como administrativo, educacional, comercial e industrial, pode-se interligar as redes BSS formando o *Extended Service Set (ESS)* (CAMPOS, 2007). Como uma BSS possui um único AP, ao conectar-se os APs por meio cabeado utilizando o *Distribution System (DS)* pode-se criar uma rede ESS com o conjunto de BSAs formando a cobertura *Extended Service Area (ESA)* que terá um nome exclusivo de rede SSID, porém com cada AP possuindo seu próprio BSSID e utilizando um canal diferente para evitar interferência co-canal (CCI).

Os dispositivos móveis ao se deslocarem pelo ambiente realizam reassociações com os APs conforme a intensidade do sinal Wi-Fi captado, assim garantindo uma conexão constante com a rede, este processo é denominado de *roaming* (BALBI, 2012). O DS permite a comunicação entre APs utilizando protocolos de comunicação para gerenciar o tráfego de dados dos usuários, assim como é responsável por notificar o AP de destino sobre o processo de *roaming* para posteriormente realizar a atualização da tabela de endereços para roteamento. Na Figura 3 encontra-se um exemplo de rede ESS.

Figura 3 — Rede ESS.



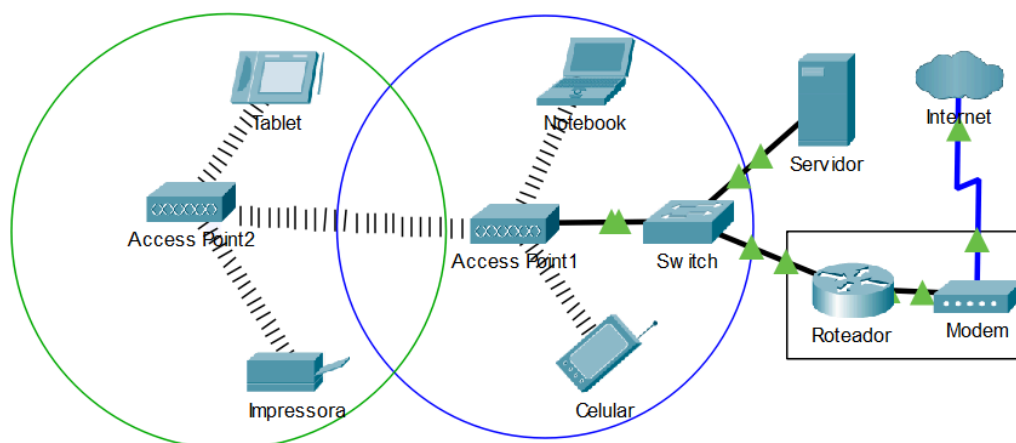
Fonte: O próprio autor.

2.1.4 Mesh Basic Service Set (MBSS)

Como o ESS utiliza o protocolo 802.3 Ethernet para interligar os APs, a sua dependência de cabos o limita em determinados ambientes, para solucionar esta limitação foi desenvolvido o *Wireless Distribution System* (WDS) que permite a interligação dos APs por meio de links sem fio onde os dados entre os APs trafegam. Enquanto que no ESS cada um dos APs opera em canais diferentes, no WDS os APs operam no mesmo canal para receber e transmitir dados atuando como repetidores de sinais (HIERTZ, 2007).

O WDS possui limitações quanto a quantidade de APs na rede e de protocolos de roteamento mais eficientes fazendo com que o padrão 802.11s denominado de *Mesh Basic Service Set* (MBSS) seja mais popular em redes maiores, com sua estrutura sendo composta pelo *Mesh Portal Point* (MPP) que interliga a rede mesh à rede de internet, *Mesh Points* (MPs) que expandem a rede servindo como repetidores de sinais que recebem e transmitem os dados, e por fim tem-se os *Mesh Access Points* (MPAs) que permitem o acesso dos dispositivos dos usuários à rede (HIERTZ, 2007). O nome da rede em malha é especificado pelo “*Mesh ID*” em vez do SSID, com esta rede tendo como principal protocolo de roteamento o *Hybrid Wireless Mesh protocol* (HWMP) que possui semelhança aos protocolos de roteamento da categoria *Hybrid* da rede *Ad-hoc*, pois combina características dos protocolos das categorias *Proactive* e *Reactive* (BARI; ANWAR; MASUD, 2012). Um exemplo de rede MBSS é apresentado na Figura 4.

Figura 4 — Rede MBSS.



Fonte: O próprio autor.

2.2 O Protocolo Wi-Fi 802.11

Lançado pelo IEEE em 1997, o protocolo 802.11 define as diretrizes para o projeto e uso das redes sem fio que ao longo dos anos evoluíram num ritmo crescente complementando e até mesmo substituindo a rede cabeada em determinadas aplicações (FOROUZAN, 2009). Como existe uma variedade de fabricantes de tecnologia sem fio, é necessário haver uma organização que mantenha a interoperabilidade dos dispositivos realizando testes de verificação técnica para a posterior certificação dos dispositivos que operam conforme as diretrizes do protocolo 802.11, sendo esta uma das tarefas realizada pela organização sem fins lucrativos *Wi-Fi Alliance* fundada em 1999 por um conjunto de empresas, a *Wi-Fi Alliance* inicialmente possuía o nome de *Wireless Ethernet Compatibility Alliance* (WECA) até que em 2002 o seu nome foi mudado para o atual.

O protocolo 802.11 passou por diversas atualizações ao longo dos anos, permitindo que os APs utilizem tecnologias avançadas de modulação para garantir a integridade dos sinais e multiplexação para melhorar a eficiência espectral. Além disso, foram incorporadas novas funcionalidades para otimizar o controle do tráfego de pacotes e sua criptografia, bem como o gerenciamento dinâmico da potência de transmissão e da faixa de frequência de operação. A Tabela 1 apresenta a evolução do Wi-Fi limitando-se às principais atualizações ao longo dos anos.

Tabela 1 — Evolução do Wi-Fi.

Ano	Ger.	Padrão	Freq. (GHz)	Tecnologia	Multiplexação	Modulação	Taxa (bps)
1997	Wi-Fi 0	802.11	2.4	SISO	DSSS, FHSS	DQPSK	2M
1999	Wi-Fi 1	802.11b	2.4	SISO	DSSS & CCK	DQPSK	11M
1999	Wi-Fi 2	802.11a	5	SISO	OFDM	64-QAM	54M
2003	Wi-Fi 3	802.11g	2.4	SISO	DSSS, OFDM	64-QAM	54M
2009	Wi-Fi 4	802.11n	2.4 / 5	MIMO / Beamforming	OFDM	64-QAM	600M
2013	Wi-Fi 5	802.11ac	5	MU-MIMO	OFDM	256-QAM	6.9G
2021	Wi-Fi 6	802.11ax	2.4 / 5 / 6	BSS Coloring	OFDMA	1024-QAM	9.6G
2024	Wi-Fi 7	802.11be	2.4 / 5 / 6	MLO	OFDMA	4096-QAM	-

Fonte: Dados retirados de (MEANEY, 2024; IEEE, 2023; ZHOU, 2024).

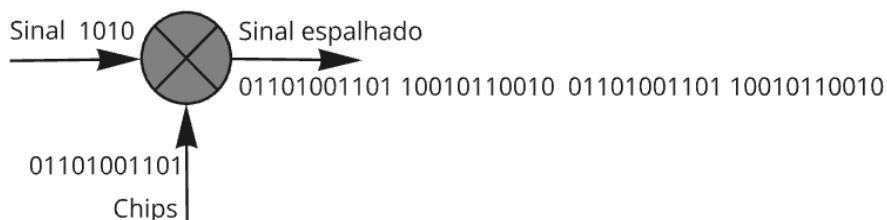
2.2.1 Técnicas de multiplexação e modulação

Na técnica *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS) o sinal digital representado por pulsos (1s) e na ausência de pulsos (0s) é misturado com um código chamado de sequência de Barker que consiste em uma sequência pseudo randômica de no mínimo 11 bits gerados pelo gerador de códigos, esta sequência de bits é chamada de *chip* e ao ser misturada com cada um dos bits do sinal garante uma largura de banda elevada e um sinal menos sensível a ruídos causadores de erros de bits (LATHI; DING, 2012). O DSSS envia o sinal misturado e criptografado pelo meio de comunicação onde o receptor realiza a demodulação do sinal misturando-o com a mesma sequência de bits utilizada para modular o sinal no transmissor.

No protocolo Wi-Fi 802.11b a sequência de Barker foi substituída pelo *Complementary Code Keying* (CCK) que possui 64 sequências de 8 bits que serão misturadas aos bits do sinal para elevar sua largura de banda e aumentar sua criptografia. A diferença entre o código de Barker e o CCK, está no fato do CCK realizar a mistura de suas sequências de bits com mais de 1 bit do sinal, diferentemente do código de Barker que mistura cada sequência de seus bits com

apenas 1 bit do sinal. Para demultiplexar o sinal no receptor, utiliza-se o mesmo código que foi aplicado ao sinal no processo de multiplexação (LATHI; DING, 2012). A Figura 5 apresenta de forma simplificada o processo de mistura.

Figura 5 — Misturador de bits.

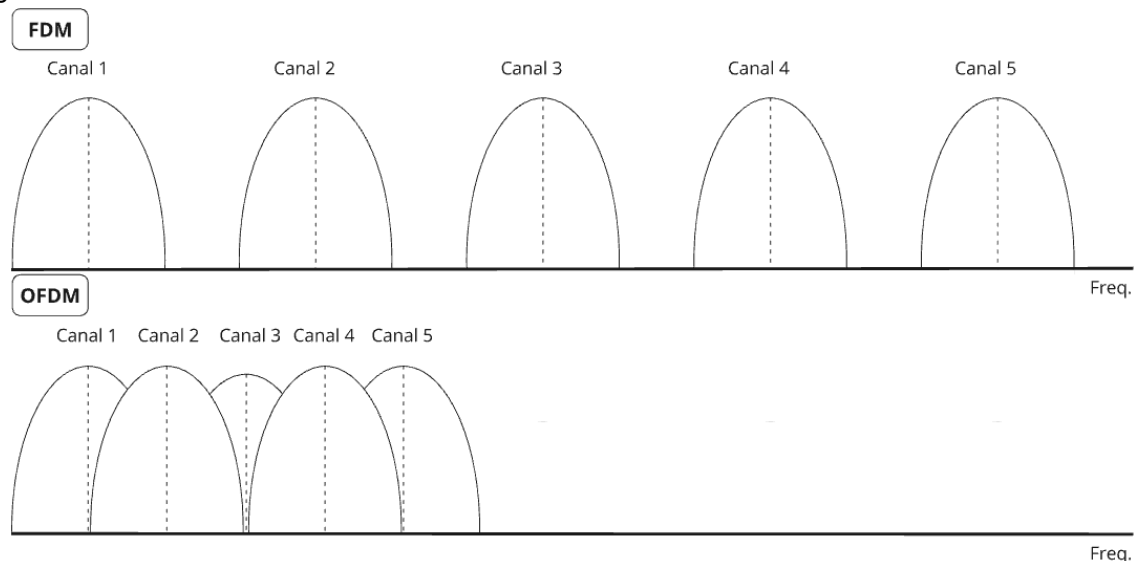


Fonte: O próprio autor.

O *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) é uma evolução do *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) e do *Frequency Division Multiplexing* (FDM), enquanto que no FDM a largura de banda do canal é dividida em sub canais para transportar vários sinais simultaneamente, com cada um desses sub canais sendo separados por uma faixa de frequência denominada de *guard band* para garantir que não haja sobreposição entre eles, o OFDM realiza um processo semelhante, porém dividindo a largura de banda em subportadoras ortogonais, ou seja, em frequências separadas entre si sem a utilização da *guard band*, essa técnica garante que o sinal seja resistente a *intersymbol interference* (ISI).

A grande diferença entre o OFDM e o OFDMA é que no OFDMA foi acrescentado a funcionalidade de divisão dessas subportadoras ortogonais para acesso de múltiplos dispositivos simultaneamente (HAYKIN; MOHER, 2011). A Figura 6 apresenta a diferença básica entre FDM e o OFDM.

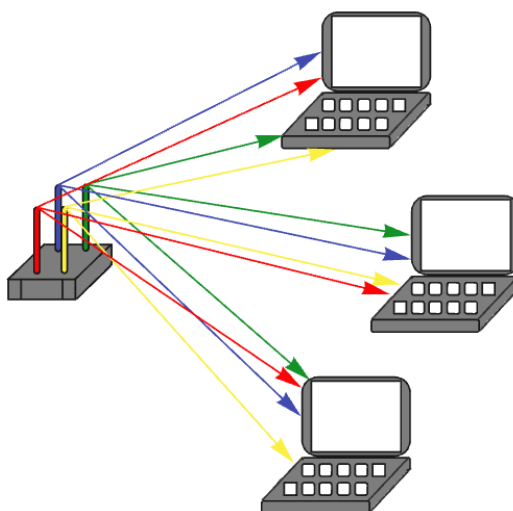
Figura 6 — FDM e OFDM.



Fonte: O próprio autor.

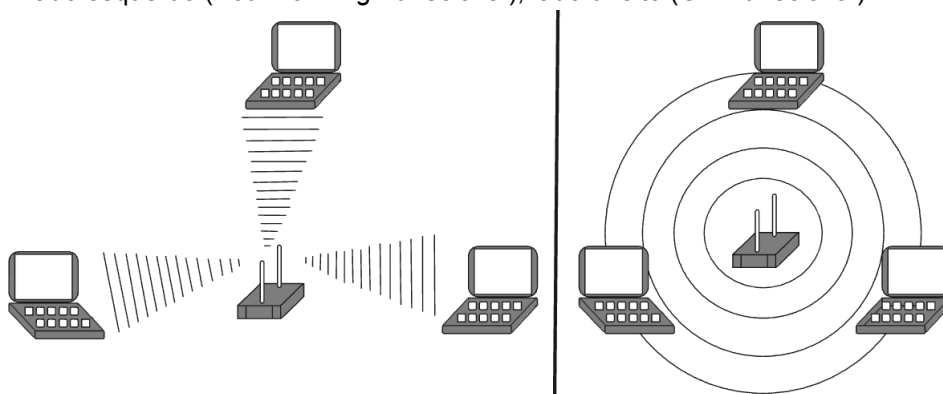
Quando um AP utiliza a tecnologia *Single User-Multiple Input, Multiple Output* (SU-MIMO) todas as suas antenas transmitem e recebem dados durante a comunicação, quando um dispositivo conecta-se à rede ele consegue realizar *downlink* e *uplink* em altas velocidades pois todas as antenas do AP estão priorizando esta conexão, no entanto quando há vários dispositivos na rede o AP focaliza a transmissão e recepção em suas antenas para um dispositivo por vez gerando um pequeno atraso na comunicação, imperceptível, mas existente (HAYKIN; MOHER, 2011). Para solucionar as limitações do SU-MIMO foi desenvolvido o *Multiple User-Multiple Input, Multiple Output* (MU-MIMO) no qual as antenas do AP transmitem e recebem dados de todos os dispositivos da rede simultaneamente garantindo altas taxas de transferência de dados (ZHOU, 2024). A Figura 7 demonstra a operação que um AP realiza utilizando o MU-MIMO.

Figura 7 — MU-MIMO.



Fonte: O próprio autor.

A tecnologia *beamforming* é frequentemente empregada em conjunto com o MU-MIMO, o *beamforming* permite que os pontos de acesso (APs) focalizem a energia do sinal eletromagnético em direção aos dispositivos da rede. Isso é realizado pela irradiação de múltiplas ondas que, através de interferência construtiva em uma direção específica e interferência destrutiva em outras, direcionam o sinal de maneira análoga a um feixe de *laser*. Consequentemente, a propagação do sinal deixa de ser omnidirecional e torna-se direcional, o que proporciona o aumento da distância de cobertura em regiões específicas (ZHOU, 2024). A Figura 8 ilustra o princípio de operação do *beamforming*.

Figura 8 — Lado esquerdo (*Beamforming* / direcional), lado direito (Omnidirecional).

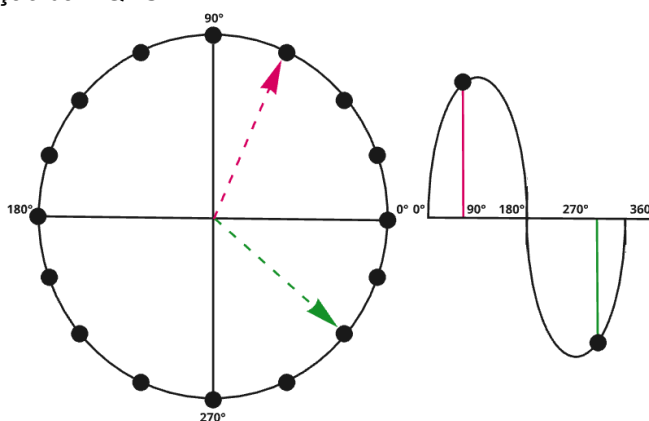
Fonte: O próprio autor.

A Modulação *Quadrature amplitude modulation* (QAM) é amplamente utilizada nas comunicações sem fio, pois permite que vários sinais propaguem-se no meio

recepção destes símbolos, pois a distância angular entre as 16 fases é menor (LATHI; DING, 2012).

Outra forma de melhorar a eficiência espectral para garantir altas taxas de transmissão e reduzir a probabilidade de erros na recepção é a modulação *Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK) em que os símbolos são representados em pontos separados ortogonalmente em uma constelação muito semelhante a constelação da QAM, porém no caso da QPSK os pontos possuem a mesma distância em relação ao eixo central, pois nessa modulação não são utilizadas as amplitudes dos sinais, apenas as fases. As modulações de fase citadas até agora utilizam o valor da fase contida no símbolo, necessitando que o receptor possua sincronismo com o transmissor para evitar o erro de deslocamento de fase, para resolver este problema foi desenvolvida a modulação *Differential Quadrature Phase-Shift Keying* (DQPSK) em que a fase de cada símbolo é subtraída com a fase do símbolo anterior gerando uma fase resultante, ou seja, um símbolo resultante que será enviado pelo meio de comunicação (BOUMAIZ *et al.*, 2018). A Figura 10 apresenta a constelação da DQPSK.

Figura 10 — Constelação da DQPSK.



Fonte: O próprio autor.

2.3 Interferências eletromagnéticas

O espectro eletromagnético é um recurso compartilhado entre diversos sistemas de comunicação, como redes Wi-Fi, Bluetooth, dispositivos IoT, micro-ondas e inúmeras outras tecnologias que utilizam ondas de rádio para a comunicação. À medida que o espectro eletromagnético fica mais congestionado, torna-se cada vez mais complexo evitar que as ondas eletromagnéticas se

sobreponham, produzindo interferências destrutivas, interferências construtivas ou recepção de sinais indesejados pelos dispositivos (HAYKIN; MOHER, 2011). Essas interferências reduzem a qualidade da comunicação sem fio, provocando perda de pacotes, aumento no tempo de retransmissão, queda de taxa de dados e instabilidade de conexão.

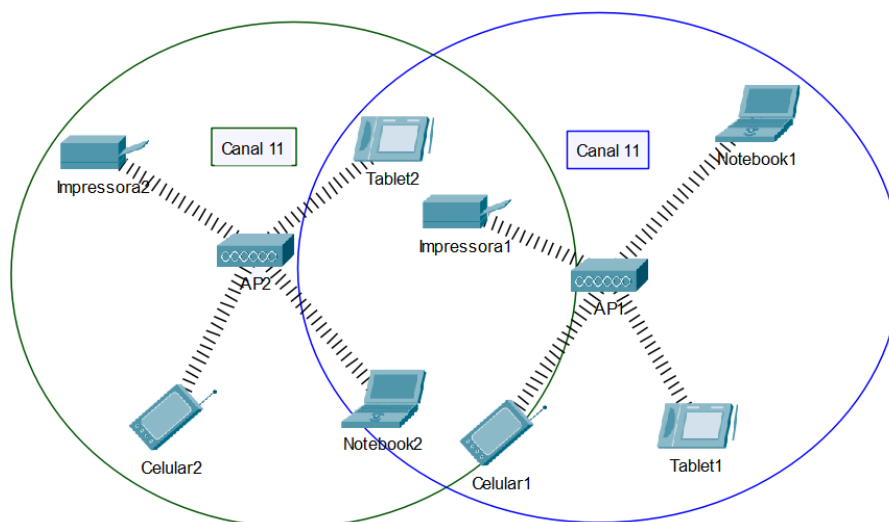
2.3.1 Interferência Co-Canal (CCI)

A *Co-Channel Interference* (CCI) ocorre quando dois ou mais APs próximos operam exatamente no mesmo canal e utilizam técnicas de modulação semelhantes. Nesse cenário, as células de cobertura BSAs se sobrepõem e os APs competem pelo mesmo espaço espectral gerando interferências destrutivas que degradam o sinal e causam aumento no tempo de acesso ao meio *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* (CSMA/CA). Para avaliar a severidade dessa interferência, utiliza-se a métrica *Signal-to-Interference Ratio* (SIR), que relaciona a potência do sinal desejado com a potência dos sinais interferentes, essa métrica é importante pois considera os demais sinais como sinais interferentes gerados por outros dispositivos e não apenas como ruído. Um valor baixo de SIR indica degradação das condições de recepção e elevação da taxa de erro (CARRILLO, 2011). As principais medidas aplicadas para a mitigação deste tipo de interferência são:

- Aumento da distância entre os APs com o mesmo canal habilitado.
- Redução da potência transmitida, para que o alcance da BSA seja reduzido.
- Redistribuição dos canais utilizados entre APs próximos.

A Figura 11 apresenta dois APs com canais iguais, gerando interferência Co-canal.

Figura 11 — Interferência Co-canal.



Fonte: O próprio autor.

2.3.2 Interferência de Canal Adjacente (ACI)

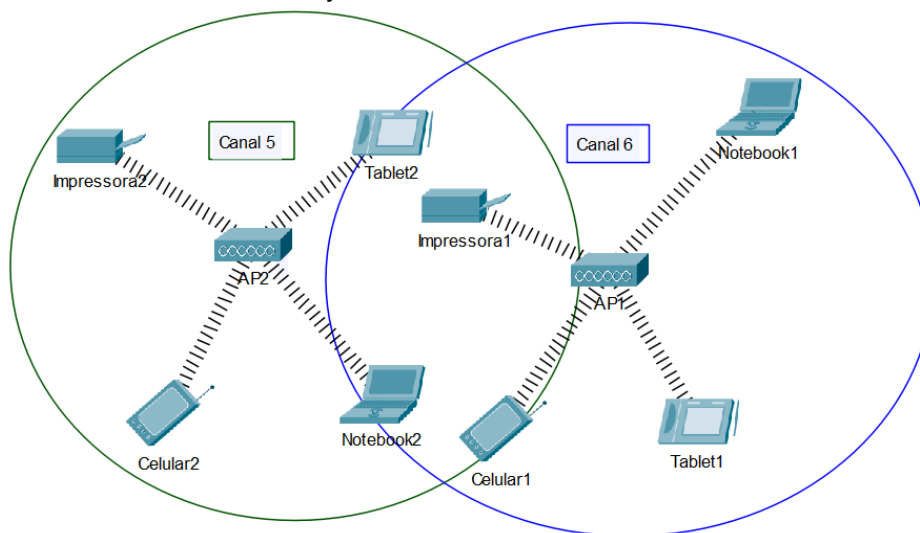
A *Adjacent Channel Interference* ACI ocorre quando dois ou mais APs próximos operam em canais parcialmente sobrepostos ou adjacentes, nessa situação, mesmo que os APs não utilizem exatamente o mesmo canal, parte da largura de banda do canal usado por um AP invade parte da largura de banda do canal do outro AP e vice versa, causando aumento do ruído e perda de dados.

Devido às limitações de seletividade dos filtros de RF dos receptores, sinais indesejados com frequências próximas à frequência de recepção desejada acabam entrando na banda de passagem quando deveriam ser rejeitados, desta maneira, estes sinais adjacentes junto com o sinal desejado são amplificados pelo *Low Noise Amplifier* (LNA) presente no AP, que devido a sua não linearidade gera distorção harmônica e intermodulação, criando assim sinais com frequências harmônicas das frequências dos sinais de entrada e novos sinais resultantes das combinações dos sinais de entrada, acarretando no fenômeno chamado de intermodulação (HAYKIN; MOHER, 2011). As principais medidas aplicadas para a mitigação deste tipo de interferência são:

- Utilização da faixa de 5 GHz ou 6 GHz ao invés da faixa de 2,4 GHz.
- Utilização da tecnologia *Beamforming* para que o feixe seja diretivo.
- Redistribuição dos canais utilizados entre APs próximos.

A Figura 12 apresenta o ambiente onde pode ocorrer interferência de Canal adjacente.

Figura 12 — Interferência de Canal Adjacente.



Fonte: O próprio autor.

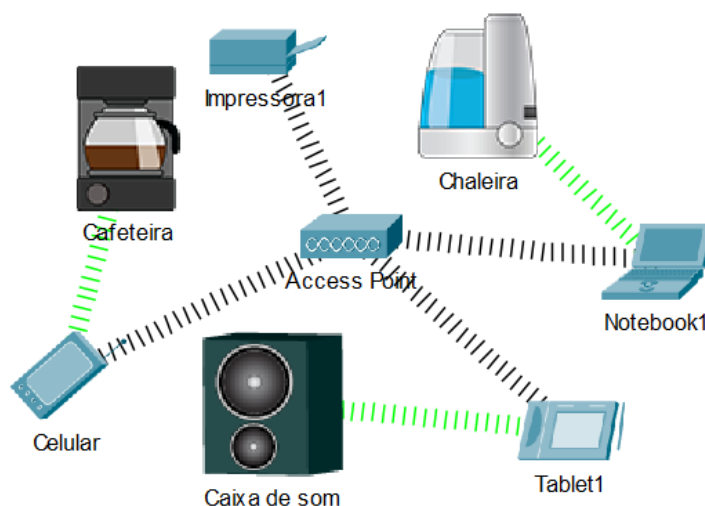
2.3.3 Interferência de Radiofrequência (RFI)

Além da interferência causada por APs que utilizam o mesmo canal CCI ou canais adjacentes ACI, existem as interferências causadas por dispositivos que operam na mesma faixa de frequência do Wi-Fi, mas que utilizam protocolos diferentes. O protocolo Bluetooth 802.15.1, o forno de micro-ondas e diversos dispositivos da *Internet of Things* (IoT) como câmeras e sensores de automação, que em geral utilizam a faixa ISM de 2,4 GHz (SIQUEIRA, 2006) degradam a comunicação, pois o espectro de 2,4 GHz fica sobrecarregado com sinais de potências e formatos distintos, devido aos esquemas de modulações e multiplexações utilizados (SIQUEIRA, 2006). A faixa de 2,4 GHz é comumente utilizada por protocolos de comunicação devido a sua propriedade de atravessar paredes e materiais (ACOSTA; HELGER, 2014). As principais medidas aplicadas para a mitigação deste tipo de interferência são:

- Utilização da faixa de 5 GHz ou 6 GHz ao invés da faixa de 2,4 GHz.
- Afastamento dos APs de dispositivos que utilizam outros protocolos de comunicação sem fio.

A Figura 13 apresenta dispositivos operando com protocolos de comunicação sem fio.

Figura 13 — Interferência de Radiofrequência.



Fonte: O próprio autor.

2.4 Desvanecimentos

Quando um sinal é propagado pelo transmissor, ele possui uma amplitude, uma frequência e uma fase que, em um cenário ideal, deveriam se manter constantes até chegar no receptor. Contudo, no ambiente real essas características são alteradas durante a propagação devido às propriedades físicas do meio (PINHEIRO, 2012). Essa alteração sofrida pelo sinal é denominada *Fading*, no qual pode ser classificada como:

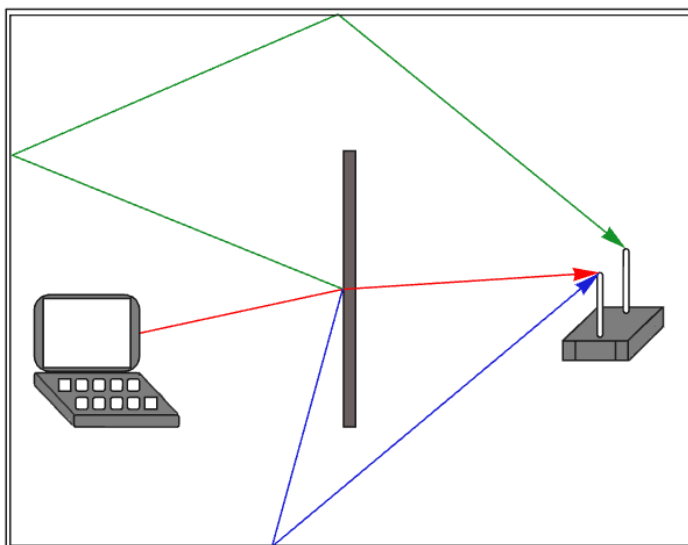
- *Large-scale fading*: Corresponde a atenuação do sinal ao longo da distância (*path loss*) e do sombreamento (*shadowing*) causado por obstáculos de grandes dimensões.
- *Small-scale fading*: Corresponde às variações rápidas da intensidade do sinal devido ao multipercurso (*multipath*) e aos efeitos do movimento entre transmissor, receptor ou objetos refletivos, que provocam espalhamento doppler (*doppler spread*).

2.4.1 Desvanecimento em pequena escala

O princípio de Huygens diz que quando uma onda encontra um obstáculo, fenda ou borda, cada ponto atingido pela onda passa a irradiar novas ondas. A combinação dessas ondas explica fenômenos como difração, reflexão, refração e a própria propagação das ondas no espaço.

Multipath é o fenômeno em que um mesmo sinal transmitido chega ao receptor por vários caminhos diferentes devido a reflexões, difrações e refrações no ambiente. Cada percurso possui um atraso distinto e faz com que o receptor receba diversas versões do sinal, com amplitudes, fases e até pequenas variações de frequência diferentes. Essa soma de componentes pode causar *Intersymbol Interferences* (ISIs) e aumento na *Bit Error Rate* (BER) devido a dispersão temporal (MATHUR, 2005). A Figura 14 ilustra esse fenômeno.

Figura 14 — *Multipath*.



Fonte: O próprio autor.

O *doppler shift* e o *doppler spread* são fenômenos que ocorrem devido ao movimento dos dispositivos em redes de comunicação sem fio. O *doppler shift* é a mudança de frequência observada em um único caminho de propagação quando há movimento relativo entre transmissor e receptor. É um efeito simples: se o receptor se aproxima, a frequência percebida aumenta; se se afasta, diminui.

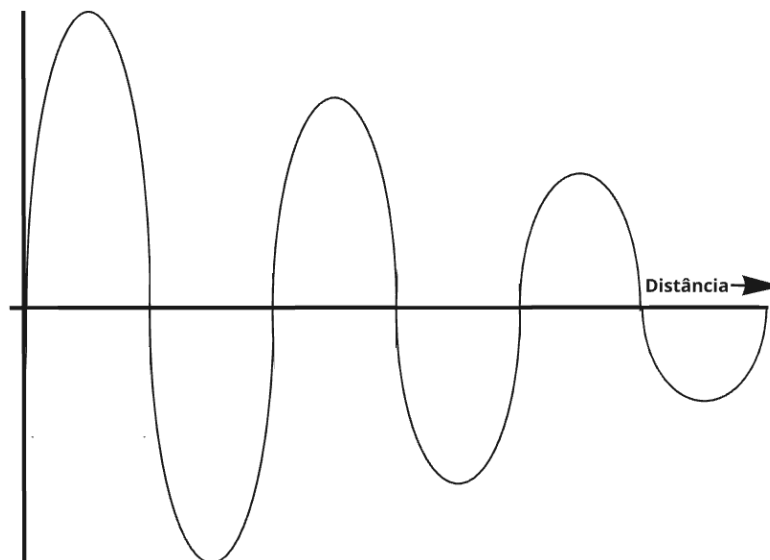
Já o *doppler spread* é um fenômeno muito mais complexo, que aparece em ambientes de multipercurso, onde o sinal chega por diversas trajetórias diferentes,

cada uma com um ângulo de chegada distinto e, portanto, com um *doppler shift* próprio. Como cada componente do multipercurso sofre uma mudança de frequência diferente, o receptor não recebe apenas uma frequência deslocada, mas sim um conjunto de frequências espalhadas ao redor da frequência original. Essa “largura” gerada pelas várias contribuições *doppler* é chamada de *doppler spread*, no qual provoca interferências entre as subportadoras e degrada a sincronização entre transmissor e receptor (KHALILI, 2020).

2.4.2 Desvanecimento em grande escala

À medida que o sinal se propaga por longas distâncias, sua amplitude sofre atenuação tanto em ambientes abertos quanto em cenários com obstáculos. Esse fenômeno é denominado *Path Loss*. A atenuação ocorre porque, ao interagir com objetos e partículas no ambiente, o sinal pode refratar, refletir ou difratar, perdendo energia a cada interação devido a absorção. Por esse motivo, receptores distantes precisam apresentar alta sensibilidade para detectar sinais com baixa potência (ZHU; WANG; HONG, 2014). A Figura 15 apresenta esse efeito.

Figura 15 — *Path Loss*.

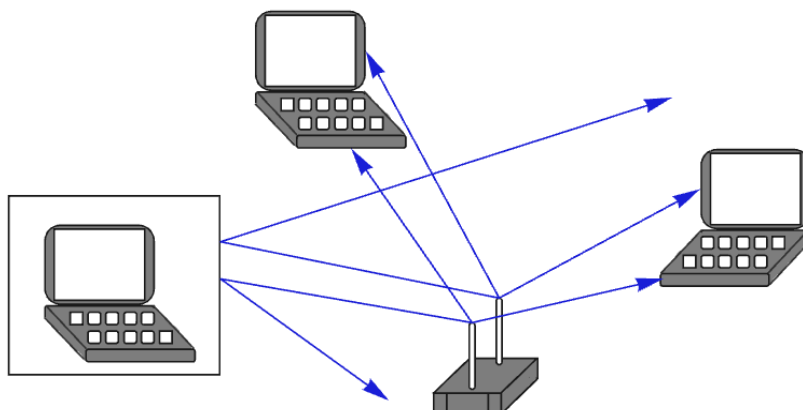


Fonte: O próprio autor.

Para proporcionar cobertura em uma determinada área, antenas omnidirecionais irradiam o sinal uniformemente ao redor do ponto de acesso, entretanto, obstáculos físicos densos podem bloquear ou absorver a maior parte da

energia transmitida, criando regiões sem cobertura denominadas *Shadowing*. Nessas regiões de sombra, o sinal é significativamente atenuado devido à reflexão completa ou à dissipação de energia durante a refração, resultando em áreas de baixa potência ou *dead zones* (HANDAYANI; MUBAROKAH; HENDRANTORO, 2015). A Figura 16 exemplifica essa situação.

Figura 16 — *Shadowing*.



Fonte: O próprio autor.

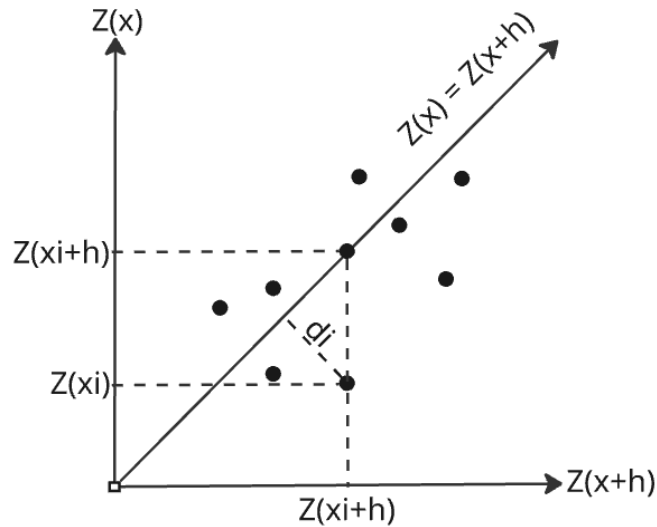
2.5 Interpolação por Krigagem Ordinária

A Geoestatística é uma área da estatística que utiliza o conceito de variáveis regionalizadas para medir a variância espacial das amostras. Seu objetivo principal é modelar a dependência espacial e estimar valores em locais não amostrados (TAKAFUJI, 2020).

Entre os métodos de interpolação presentes na geoestatística, tem-se o método de interpolação por Krigagem Ordinária, no qual este método de interpolação por regressão é conhecido por ser o melhor estimador linear não enviesado, do inglês, *best linear unbiased estimator* (B.L.U.E.). O conceito de regressão está relacionado a mensuração da relação entre variáveis amostradas e variáveis não amostradas.

O semivariograma experimental é a ferramenta central da geoestatística para quantificar a semivariância, ou seja, o grau de dispersão dos valores amostrados $Z(x)$ separados por uma distância h (TAKAFUJI, 2020). O semivariograma experimental pode ser visualizado na Figura 17.

Figura 17 — Semivariograma experimental.



Fonte: Adaptado de (CAMARGO, 1998).

A semivariância é definida como a metade da amplitude quadrática média das diferenças entre os valores da variável regionalizada $Z(x)$ separados por um vetor de distância h . Matematicamente o semivariograma é definido pela equação (1) (CAMARGO, 1998).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \cdot \sum_{i=1}^{n(h)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \quad (1)$$

A função de covariância é uma medida que indica o quão correlacionado está um ponto em relação aos pontos vizinhos com valores amostrados, portanto quanto menor a distância entre os pontos, mais correlacionados estarão (TAKAFUJI, 2020). A equação (2) apresenta a função de covariância em sua forma matricial.

$$\begin{bmatrix} C(x_1 - x_1) & C(x_1 - x_2) & \dots & C(x_1 - x_n) & 1 \\ C(x_2 - x_1) & C(x_2 - x_2) & \dots & C(x_2 - x_n) & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ C(x_n - x_1) & C(x_n - x_2) & \dots & C(x_n - x_n) & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ -\mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C(x_0 - x_1) \\ C(x_0 - x_2) \\ \vdots \\ C(x_0 - x_n) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

A estimação de valores não amostrados é realizada por meio da equação (3) onde $Z^*(x_j)$ é o valor não amostrado Z na posição j a ser estimado com base nos n valores amostrados $Z(x_i)$, em que λ_i são as ponderações a serem aplicadas em cada um dos valores amostrados Z na posição i (XAVIER; CECÍLIO, 2010). Os valores das ponderações são construídos conforme a distância entre os valores amostrados e o valor a ser estimado, sendo que o somatório de todas as ponderações deve possuir valor unitário conforme impõe o multiplicador de Lagrange (μ).

$$Z^*(x_j) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot Z(x_i) \quad (3)$$

Quando a distância h é aumentada, a dependência espacial entre os pontos amostrados diminui (TAKAFUJI, 2020). O alcance denotado pela variável “ a ”, é a distância a partir da qual o valor do semivariograma $\gamma(h)$ se torna constante, ou seja, os valores amostrais são considerados espacialmente independentes porque não há mais correlação entre eles. O patamar é expresso por $C_0 + C$, onde C_0 é o efeito pepita que representa o valor da semivariância na origem ($h = 0$), e C é a covariância espacial. A equação (4) define o patamar como sendo a semivariância total do processo.

$$\sigma^2 = \gamma(h \geq a) = \text{Var}[Z(X)] \quad (4)$$

O semivariograma experimental é preciso quando o *grid* é regular, ou seja, quando o valor da distância h é um múltiplo inteiro da menor distância entre pontos. Contudo, na maioria dos casos o *grid* não será regular, desta maneira é necessário escolher um modelo teórico de semivariograma para garantir que o $\gamma(h)$ seja uma função contínua de h . Esta escolha normalmente se baseia na análise do comportamento do semivariograma experimental para pequenos valores de h (XAVIER; CECÍLIO, 2010). O modelo esférico foi escolhido pois na origem o seu traçado se ajusta melhor a distribuição de pontos amostrados durante as aferições realizadas no prédio acadêmico A3. As funções do modelo esférico são apresentadas na equação (5).

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C \left[\frac{3|h|}{2a} - \frac{1}{2} \left(\frac{|h|}{a} \right)^3 \right] & \text{sc } h < a \\ C_0 + C & \text{sc } h \geq a \end{cases} \quad (5)$$

Por fim, a função de covariância $C(h)$ na equação (2) é definida em função do semivariograma $\gamma(h)$ e da semivariância total do processo (o patamar), conforme a equação (6).

$$C(h) = \sigma^2 - \gamma(h) \quad (6)$$

2.6 Estado da Arte

No trabalho (DE SANTOS, 2021) foi realizado um estudo de caso nos prédios administrativo e acadêmico da UNIPAMPA no campus Alegrete, onde a autora realizou a avaliação da qualidade da rede sem fio após a realização de um questionário que mostrou o descontentamento dos usuários com a rede, assim sendo, a autora fez um levantamento sobre a metodologia utilizada pela equipe técnica em conjunto com os relatórios do software *Cisco Prime* utilizado pela equipe técnica para fazer a instalação dos APs. Este software utiliza o projeto arquitetônico dos pavimentos e o tipo de material que constitui as paredes para realizar sua análise. Após ser realizada as aferições do sinal Wi-Fi, é sugerido pelo software as localizações geográficas para a instalação dos APs, assim como o valor das potências a serem emitidas e os canais que devem ser habilitados em cada AP.

Após o estudo da rede e das métricas utilizadas pelos técnicos, foi realizado o mapeamento da rede utilizando o software *WIFI Analyzer* instalado no notebook da autora, este software utiliza os projetos arquitetônicos do prédio para apresentar o *heatmap* referente à intensidade do sinal Wi-Fi em cada região. A quantidade de pontos de aferição do Wi-Fi em cada sala e corredor foi realizada conforme a sua dimensão, posteriormente é plotado o mapa de calor mostrando a qualidade da cobertura do sinal em cada região do prédio.

Com os dados de RSSI obtidos pelo software, a autora listou os problemas na rede como: falta de APs, APs posicionados verticalmente sendo que seus diagramas de irradiação exigem que a instalação destes seja na horizontal, interferências

co-canal entre os APs do prédio, interferências de canal adjacente por APs instalados no prédio e por APs de prédios vizinhos, zonas de sombreamento, entre outros.

Foi também pontuado pela autora, a desatualização do projeto arquitetônico disponibilizado a ela pela equipe técnica, pois o projeto utilizado representa a estrutura antiga do prédio, sendo que o prédio passou por manutenções e possui portas, janelas e paredes que podem afetar o desempenho da rede.

Como soluções são sugeridas pela autora mudar a posição dos APs seguindo as recomendações oferecidas pelo software *Cisco Prime*, instalar os APs na horizontal conforme é indicado pelo *datasheet* dos equipamentos, instalar APs com potência reduzida em salas de aula para prover internet ao grande fluxo de dispositivos conectados mantendo a taxa de tráfego de dados alta com SNR elevada e sem interferir nos sinais de outros APs devido a sua operação em baixa potência, aumentar a quantidade de APs no prédio e por fim, é sugerido a mudança de canais em alguns APs para evitar a interferência co-canal existente. A autora também sugeriu como trabalho futuro a utilização de um analisador de espectro portátil para realizar as aferições do sinal com maior precisão.

ROCHA (2020) apresenta uma avaliação da rede sem fio da reitoria da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA) por meio de uma ferramenta de análise fundamentada no modelo de propagação de *Motley-Keenan*. O estudo emprega o *PyLayers*, um simulador de código aberto estruturado em *Python* que permite o aperfeiçoamento de seus algoritmos. A ferramenta possibilita a realização de varreduras nas frequências de 2,4 GHz e 5 GHz, fornecendo dados precisos para a análise da infraestrutura de rede.

Os autores iniciaram o seu estudo importando o projeto arquitetônico da reitoria da UFRA ao software *PyLayers*, definindo as dimensões das paredes, salas, janelas e portas, assim como o tipo de material usado nas estruturas, foi inserido também no software a localização dos APs e as informações referentes às potências configuradas em cada roteador.

Foram realizadas aferições em cada sala e corredor, substituindo-se a localização dos roteadores e seus respectivos canais após cada bateria de simulação, de modo a obter o melhor cenário de desempenho da rede em termos de cobertura e velocidade de tráfego de dados.

- Na 1° bateria de simulação, três roteadores foram posicionados no prédio, com um deles sendo posicionado próximo ao auditório, outro no hall de entrada do prédio e o restante foi posicionado no corredor horizontal. Foram captadas taxas de 24 Mbps, 19 Mbps e 12 Mbps.
- Na 2° bateria, os três roteadores foram reposicionados, com um ficando dentro do auditório, um no corredor vertical e o último ficando na sala ao lado do hall de entrada. Foram captadas taxas de 24 Mbps, 22 Mbps, 20 Mbps e 12 Mbps.
- Na 3° bateria foram utilizados dois roteadores para diminuir as interferências observadas quando havia em funcionamento três roteadores. O primeiro foi posicionado no corredor próximo ao auditório e o segundo foi posicionado no hall de entrada. Foram captadas taxas de 25,5 Mbps e 23 Mbps.

De acordo com os critérios estipulados pelos autores, foi escolhida a configuração de roteadores da 2° bateria, tendo em vista que esta configuração é a que apresenta uma cobertura de sinal mais abrangente, garantindo que todas as salas, mesmo as mais distantes, possuam conectividade de Wi-Fi. Após os testes foi concluído que o desempenho da rede está relacionado a quantidade de roteadores, a localização de cada roteador, a potência de operação e os canais utilizados por cada roteador.

3 METODOLOGIA

A metodologia desenvolvida e implementada é apresentada nesta seção, onde são descritos os processos de construção das antenas omnidirecionais, os parâmetros a serem configurados nos analisadores de espectro FSH3 e N1996A, as configurações aplicadas aos softwares AutoCAD e QGIS e os parâmetros ajustados no *plugin* SMART-MAP, responsável pela interpolação dos dados.

3.1 Antenas

A metodologia iniciou-se com o projeto e a simulação das antenas monopolo de um quarto de onda ($\lambda/4$) utilizando o software Ansys HFSS. Este modelo de antena é fundamentalmente constituído por um condutor central e um plano terra (GND). Para a construção física, foram empregados conectores fêmea dos tipos N e SMA, já o plano terra é formado por uma placa de alumínio quadrada de espessura 1 mm e comprimento 200 mm. As dimensões dos conectores foram obtidas em seus respectivos *datasheets*. Os parâmetros dimensionais dos conectores utilizados são apresentados na Tabela 2.

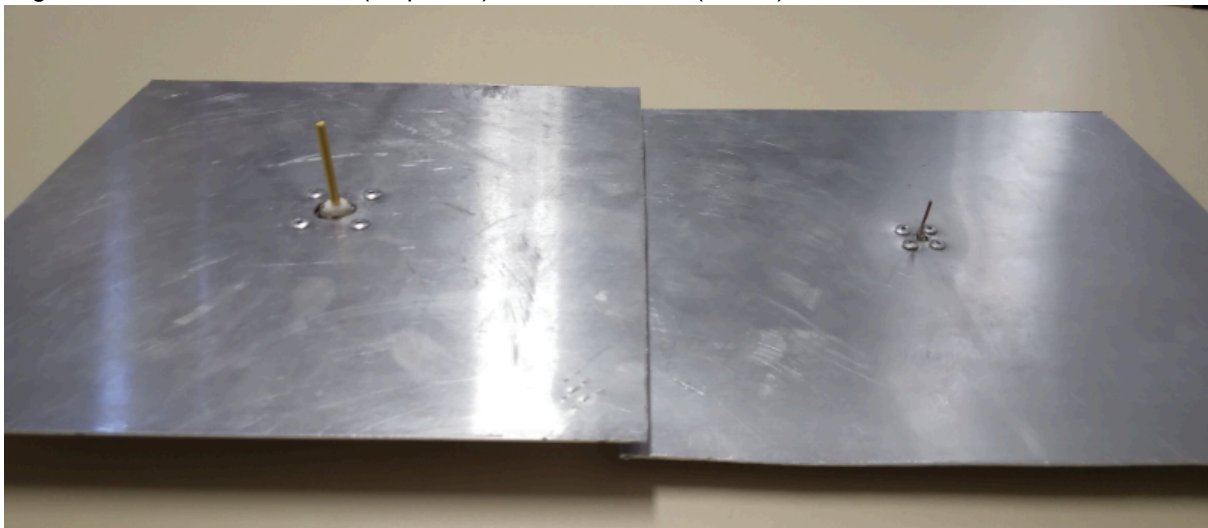
Tabela 2 — Parâmetros dimensionais dos conectores.

Parâmetros	Conector N	Conector SMA
Código	CF-147	3003
Impedância característica	50 Ω	50 Ω
Comprimento do condutor	40 mm	5,10 mm
Diâmetro do condutor	3,05 mm	1,20 mm
Comprimento da base quadrada	25,40 mm	12,70 mm
Espessura da base quadrada	1 mm	1 mm
Diâmetro do conector	8,6 mm	4,6 mm
Diâmetro do dielétrico	8,05 mm	4,1 mm
Diâmetro dos 4 furos	3,30 mm	2,60 mm

Fonte: Retirado de (KLC, 2013).

A configuração final das antenas projetadas e simuladas pode ser visualizada na Figura 18.

Figura 18 — Antena 2,4 GHz (esquerda) e Antena 5 GHz (direita).



Fonte: O próprio autor.

O comprimento do condutor da antena monopolo de um quarto de onda ($\lambda/4$) é determinado em função do comprimento de onda λ , o qual segue a relação fundamental entre a velocidade de propagação da onda eletromagnética no espaço e a frequência. O cálculo do comprimento de onda no vácuo é definido pela equação (7):

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (7)$$

Para $f = 2,4$ GHz, o comprimento de onda calculado é $\lambda = 125$ mm, e para $f = 5,49$ GHz, o comprimento de onda é $\lambda = 54,64$ mm. Uma vez que os condutores das antenas monopolo são dimensionados para terem o seu comprimento igual a $\lambda/4$, foram realizados os ajustes necessários, resultando nos seguintes comprimentos: $\lambda/4 = 31,25$ mm para $f = 2,4$ GHz e $\lambda/4 = 13,66$ mm para $f = 5,49$ GHz. Considerando que a rede Wi-Fi de 5 GHz abrange a faixa de 5,15 GHz a 5,8 GHz, tornou-se imperativo projetar uma antena que apresentasse uma perda de retorno (*return loss* – RL) aceitável em toda a faixa de frequência de interesse. Desse modo, pela média aritmética a frequência de projeto central foi estabelecida em 5,49 GHz. O conector SMA fêmea de código 3003 (KLC, 2013) possui um

condutor de comprimento 5,10 mm, então foi necessário soldar um fio de cobre de diâmetro 0,9 mm e comprimento de 15 mm para atender aos requisitos de ressonância na faixa desejada.

Com o intuito de ajustar a frequência de ressonância das antenas, ambas foram conectadas a analisadores de rede. O procedimento consistiu na análise da perda de retorno e na subsequente redução do comprimento dos condutores até que fosse obtido um ajuste que apresentasse uma perda de retorno aceitável na faixa de operação pretendida. Após sucessivas iterações, foram obtidos os seguintes resultados:

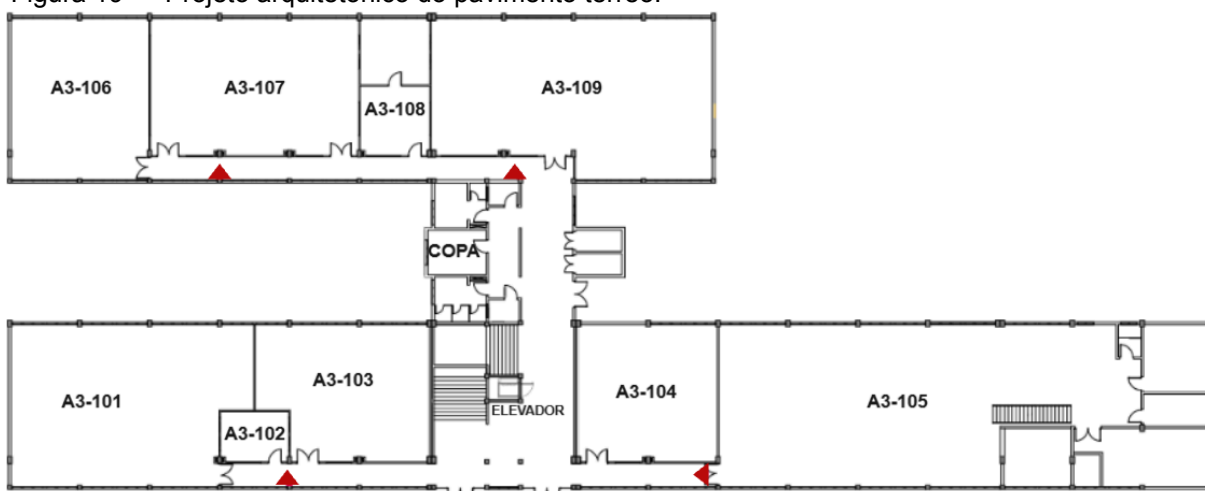
- A antena de 2,4 GHz atingiu o comprimento de 29,1 mm no condutor, resultando em uma perda de retorno de -16,87 dB na frequência de projeto.
- A antena de 5,49 GHz alcançou o comprimento de 13,5 mm no condutor, resultando em uma perda de retorno de -20,89 dB na frequência de projeto.

As curvas de perda de retorno (S_{11}) obtidas em cada antena são ilustradas nos APÊNDICES A e B. O APÊNDICE A apresenta a curva obtida pelo analisador de rede *Agilent Technologies E5061B ENA Series Network Analyzer* (antena de 2,4 GHz), e o APÊNDICE B contém a curva obtida pelo analisador de rede *Keysight ENA Network Analyzer E5080B* (antena de 5,49 GHz).

3.2 Infraestrutura e instrumentação

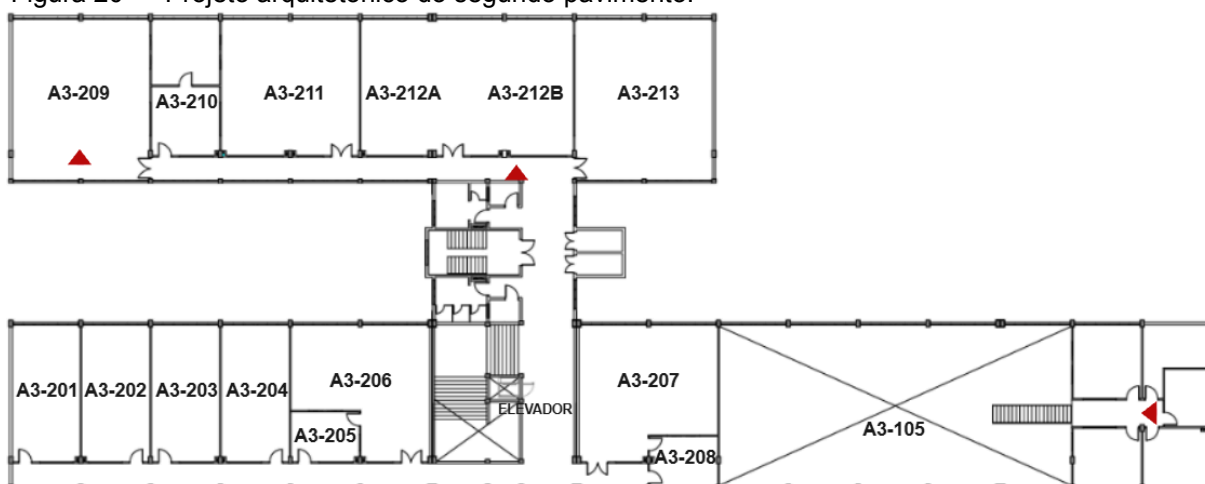
O prédio acadêmico, que abriga os laboratórios dos cursos de Engenharia de Telecomunicações, Engenharia Elétrica e Engenharia Civil, é composto por dois pavimentos, totalizando uma área de $3.243,00 \text{ m}^2$. O pavimento térreo (primeiro andar) possui uma área de $1.475,00 \text{ m}^2$, enquanto o segundo pavimento (segundo andar) possui $1.768,00 \text{ m}^2$. No campus Alegrete, o prédio composto pelos blocos A6 e A7 é designado pela nomenclatura A3 presente na numeração das salas. O projeto arquitetônico de ambos os pavimentos é detalhado nas Figuras 19 e 20.

Figura 19 — Projeto arquitetônico do pavimento térreo.



Fonte: Retirado de (UNIPAMPA, 2025)

Figura 20 — Projeto arquitetônico do segundo pavimento.



Fonte: Retirado de (UNIPAMPA, 2025)

A rede sem fio do prédio acadêmico A3 utiliza a topologia de rede sem fio ESS, com um total de sete pontos de acesso (APs) distribuídos da seguinte maneira: quatro APs estão localizados no primeiro andar e três no segundo andar, com ambos os sete estando dispostos na vertical e não dispostos na horizontal, fixado no teto e com a face ativa voltada para baixo como determina o seu diagrama de irradiação (CISCO, 2021). A disposição espacial desses dispositivos nos pavimentos está detalhada nas Figuras 19 e 20, onde são representados por triângulos vermelhos. Todos os APs são fabricados pela empresa *Cisco Systems*, abrangendo os modelos das séries AIR-AP1832i-Z-K9, AIR-AP2802i-Z-K9 e AIR-CAP2602I-T-K9. Estes modelos são compatíveis com os protocolos IEEE 802.11b/a/g/n/ac e possuem funcionalidade *dual-band*, operando simultaneamente nas faixas de 2,4 GHz e 5 GHz. Algumas das especificações técnicas dos APs obtidas diretamente no

website da Cisco Systems, encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 — Especificações técnicas dos APs.

AIR-AP2802i-Z-K9	AIR-AP1832i-Z-K9	AIR-CAP2602I-T-K9
4x4 MIMO	3x3 MIMO	3X4 MIMO
Taxa máxima de 4680 Mbps (160 MHz)	Taxa máxima de 867 Mbps (80 MHz)	Taxa máxima de 450 Mbps (40 MHz)
<i>Beamforming</i>	<i>Beamforming</i>	<i>Beamforming</i>
2,4 GHz 802.11b/g: 3 canais de 20 MHz	2,4 GHz 802.11b/g: 3 canais de 20 MHz	2,4 GHz 802.11b/g: 3 canais de 20 MHz
802.11n: 3 canais de 20 MHz	802.11n: 3 canais de 20 MHz ou 1 canal de 40 MHz	802.11n: 3 canais de 20 MHz
5 GHz 802.11a: 25 canais de 20 MHz	5 GHz 802.11a: 25 canais de 20 MHz	5GHz 802.11a: 21 canais de 20 MHz
802.11n: 25 canais de 20 MHz ou 12 canais de 40 MHz	802.11n: 25 canais de 20 MHz ou 12 canais de 40 MHz	802.11n: 21 canais de 20 MHz ou 9 canais de 40 MHz
802.11ac: 21 canais de 20 MHz, 12 canais de 40 MHz, 6 canais de 80 MHz ou 2 canais de 160 MHz	802.11ac: 21 canais de 20 MHz, 12 canais de 40 MHz ou 6 canais de 80 MHz	
Máxima potência de Transmissão 2,4 GHz: 22 dBm	Máxima potência de Transmissão 2,4 GHz: 22 dBm	Máxima potência de Transmissão 2,4 GHz: 22 dBm
5 GHz: 23 dBm	5 GHz: 23 dBm	5 GHz: 23 dBm
Sensibilidade de recepção 2,4 GHz 802.11b: -101 dBm 802.11g: -91 dBm 802.11a: -91 dBm 802.11n: -91 dBm	Sensibilidade de recepção 2,4 GHz 802.11b: -101 dBm 802.11g: -96 dBm 802.11a: -96 dBm 802.11n: -96 dBm	Sensibilidade de recepção 2,4 GHz 802.11b: -100 dBm 802.11g: -91 dBm 802.11a: -92 dBm 802.11n: -91 dBm
5 GHz 802.11a: -93 dBm 802.11n: -93 dBm 802.11ac: -93 dBm	5 GHz 802.11a: -96 dBm 802.11n: -96 dBm 802.11ac: -89 dBm	5 GHz 802.11a: -92 dBm 802.11n: -91 dBm

Fonte: Retirado de (CISCO, 2021; CISCO, 2014).

Os APs utilizam tecnologias avançadas para otimizar a comunicação. A funcionalidade *dual-band* permite a operação simultânea nas faixas de 2,4 GHz e 5 GHz, garantindo a conectividade de dispositivos legados. As tecnologias MIMO e *Beamforming* são implementadas para maximizar a taxa de dados (*throughput*) para múltiplos usuários e estender o alcance da rede. Os dispositivos das séries AIR-AP1832i-Z-K9 e AIR-AP2802i-Z-K9 operam primariamente sob o protocolo IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5) que emprega modulações como a QAM-256 e a multiplexação OFDM, enquanto que os APs da série AIR-CAP2602I-T-K9 operam primeiramente

sob o protocolo IEEE 802.11n (Wi-Fi 4) que emprega modulações como a QAM-64 e a multiplexação OFDM.

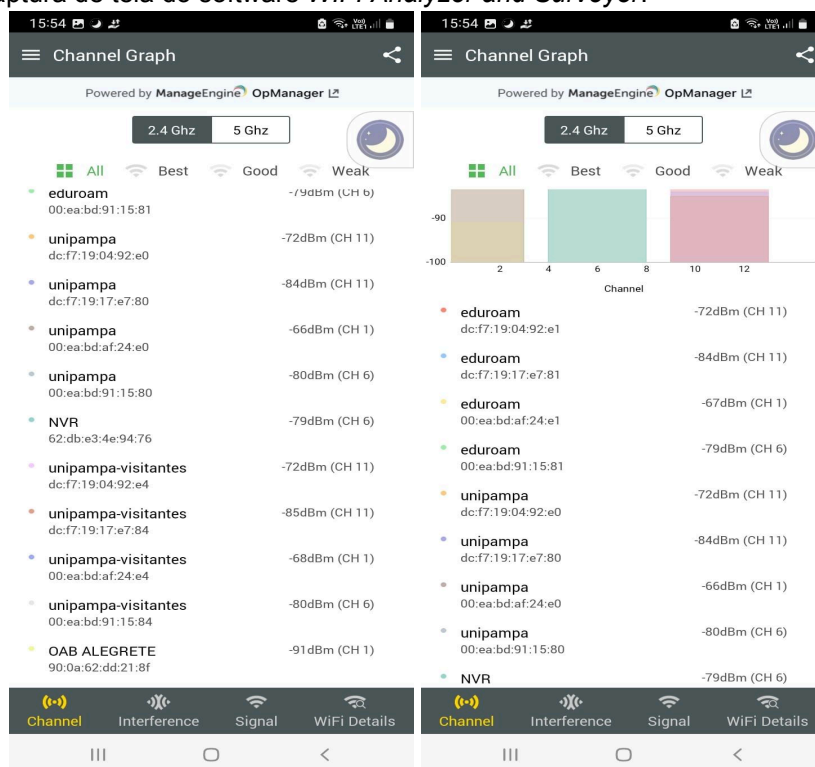
Em resposta às condições da *Signal-to-Noise Ratio* (SNR), os APs aplicam o método de *Adaptive Coding and Modulation* (ACM), ajustando dinamicamente a modulação e a taxa de codificação dos *Error Correction Codes* (ECCs) para assegurar a comunicação.

Os APs são centralmente controlados por um *Virtual Wireless LAN Controller* (vWLC), o qual dinamiza o controle e a análise de desempenho, eliminando a necessidade de atribuição manual e individual de configurações aos APs. Diferentemente do *Wireless LAN Controller* (WLC), que requer um hardware dedicado, o vWLC pode ser executado em plataformas genéricas como computadores desktops ou notebooks para gerenciar a rede sem fio. O gerenciamento abrange a configuração de parâmetros cruciais, como: potência de transmissão, canais ativos, quantidade de SSIDs por canal, largura de banda e tipo de autenticação, entre outros (CISCO, 2015).

A comunicação entre os APs e o vWLC é estabelecida por meio do protocolo *Control And Provisioning of Wireless Access Points* (CAPWAP), que cria um túnel para o tráfego de dados de controle. Além da compatibilidade com o vWLC, os APs oferecem suporte ao módulo *Cisco FlexConnect*. Este módulo permite que os APs realizem a autenticação de usuários e o controle de tráfego de dados de forma local, sem a necessidade de encaminhar esses dados ao vWLC em caso de falha ou inoperabilidade do controlador. Dessa forma, a rede sem fio mantém-se funcional, garantindo o acesso aos usuários, embora a utilização do módulo *FlexConnect* exija licenciamento específico (CISCO, 2015).

Uma análise inicial do espectro da rede Wi-Fi foi conduzida utilizando um *smartphone* modelo *Galaxy A02S* fabricado pela *Samsung*, o qual possui compatibilidade com os protocolos IEEE 802.11b/g/n da faixa de 2,4 GHz. Essa análise foi realizada por meio do aplicativo *Wi-Fi Analyzer and Surveyor*, disponível para *download* na Play Store.

O resultado da análise está detalhado na Figura 21, onde é possível observar que os três canais não sobrepostos da faixa de 2,4 GHz estão sendo integralmente utilizados pelos APs no prédio. Não foi possível realizar a análise da faixa de 5 GHz, visto que o *smartphone* não dispõe de antena compatível para essa banda.

Figura 21 — Captura de tela do software *WiFi Analyzer and Surveyor*.

Fonte: O próprio autor.

Como pode ser observado na Figura 21 a rede do prédio está configurada de tal maneira que cada um dos 7 APs disponha de três SSIDs em cada canal habilitado por meio do uso da tecnologia *Virtual Access Point* (VAP) que permite que um AP físico disponha de múltiplos SSIDs e que cada um destes SSIDs seja associado a um BSSID virtual cujo endereço deriva do endereço BSSID do AP físico (ABOBA, 2003). Algumas informações podem ser retiradas da Figura 21 e vão corroborar para a análise da rede Wi-Fi do prédio acadêmico, começando pelo AP com endereço físico BSSID dc:f7:19:04:92:ex que possui o canal 11 habilitado e detectável na região, este AP possui três SSIDs disponíveis, o SSID “eduroam” com endereço virtual BSSID dc:f7:19:04:92:e1, o SSID “unipampa” com endereço virtual BSSID dc:f7:19:04:92:e0 e o SSID “unipampa-visitantes” com endereço virtual BSSID dc:f7:19:04:92:e4.

É tecnicamente recomendado (KITTAPPA, 2016) que um único AP não utilize mais de três SSIDs simultaneamente para evitar a sobrecarga de uso da taxa de dados de gerenciamento e aumento do *airtime* gerado pelo excesso de quadros de gerenciamento, o que prejudica o desempenho da rede em termos de taxa de dados disponíveis e tempo de resposta do AP. Essa sobrecarga ocorre porque cada VAP transmite regularmente *beacon frames* para a detecção da rede pelos dispositivos,

recebe *probe requests* com informações dos dispositivos, envia *probe responses* com informações do AP, recebe e processa pedidos de associação ou reassociação, realiza o gerenciamento de autenticação dos dispositivos, entre outros quadros de gerenciamento.

Os *beacon frames* constituem a maior fonte dessa sobrecarga, uma vez que são transmitidos por padrão a cada 102,4 ms a taxas de 1 Mbps em 2,4 GHz e 6 Mbps em 5 GHz, no entanto, esse tempo pode ser ajustado pelo administrador da rede Wi-Fi (ABOBA, 2003). Os VAPs são associados à VLANs da rede cabeada e a sua divisão lógica de recursos no meio sem fio é realizada pelo tempo de ocupação do canal. Dessa forma, cada VAP transmite e recebe quadros de gerenciamento e quadros de dados durante o período alocado de uso do canal.

Os modelos de analisadores de espectro empregados nas medições neste trabalho são o FSH3, fabricado pela empresa *Rohde & Schwarz*, e o N1996A fabricado pela empresa *Keysight*. As especificações de cada analisador podem ser visualizadas nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 4 — Especificações do analisador FSH3.

Faixa de frequência	100 kHz a 3 GHz
<i>Sweep time</i>	Span = 0 Hz 1 ms a 100 s span > 0 Hz 20 ms a 1000 s
<i>Resolution bandwidth</i> (RBW)	100 Hz a 1 MHz
<i>Video bandwidth</i> (VBW)	10 Hz to 1 MHz
Nível de referência	-80 dBm a 20 dBm
Nível do ruído do equipamento (DANL)	≤ -114 dBm
Máxima potência recebida	30 dBm
Impedância de entrada	50 Ω / 75 Ω
Entrada e saída RF	N
Detectores	SAMPLE, MAX/MIN PEAK, AUTO PEAK e RMS

Fonte: Retirado de (ROHDE&SCHWARZ, 2017).

Tabela 5 — Especificações do analisador N1996A.

Faixa de frequência	100 kHz a 6 GHz
Sweep time	Span = 0 Hz ≥ 120 ms span ≤ 100 MHz ≥ 300 ms span = 3 GHz ≥ 1 s
Resolution bandwidth (RBW)	10 Hz a 5 MHz
Video bandwidth (VBW)	1 Hz to 50 MHz
Nível de referência	-90 dBm a 33 dBm
Nível do ruído do equipamento (DANL)	≤ -130 dBm
Máxima potência recebida	33 dBm
Impedância de entrada	50 Ω
Entrada e saída RF	N
Detectores	PEAK, NEGATIVE PEAK, AUTO PEAK e AVERAGE

Fonte: Retirado de (KEYSIGHT, 2011).

Os parâmetros essenciais que devem ser corretamente ajustados nos analisadores são: *Resolution Bandwidth* (RBW), *Video Bandwidth* (VBW), *Sweep time* (SWEEP), POINTS e DETECTOR. Estes parâmetros estão estritamente vinculados, portanto quando se altera um deles os demais são ajustados instantaneamente de forma automática pelo próprio analisador.

O parâmetro RBW ajusta um filtro passa-banda que aplica um nível de seletividade em frequência ao SPAN definido, no qual, quanto menor for o valor em Hz aplicado à RBW, mais sinais adjacentes poderão ser discretizados durante a varredura do SPAN. Também permite que sinais com amplitude próxima ao ruído *Display Average Noise Level* (DANL) sejam amostrados, contudo quanto menor for o valor definido em RBW, mais tempo para realizar a varredura do SPAN o filtro precisará, resultando no aumento do valor do *sweep time* (ROHDE&SCHWARZ, 2017).

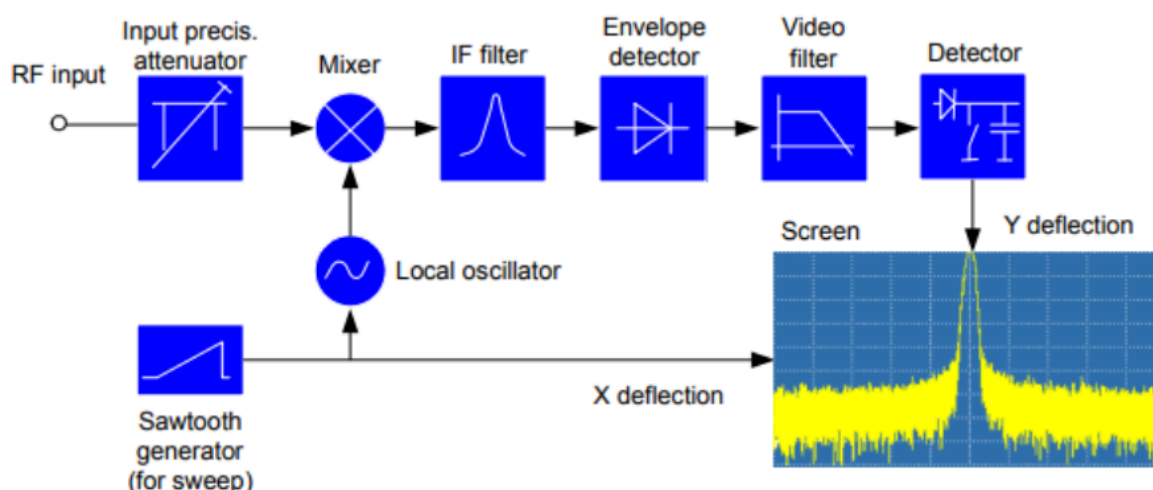
O DANL é o ruído interno do equipamento, é este o ruído que limita a capacidade do analisador de detectar sinais de baixa amplitude, pois qualquer sinal inferior ao DANL não pode ser detectado.

O parâmetro VBW ajusta um filtro passa-baixa que aplica níveis de suavização ao traçado do sinal, esta suavização é realizada pelo detector de envelope que remove os ruídos presentes no sinal. Assim como no caso do RBW, quanto menor for o valor definido em VBW, mais tempo para realizar a varredura do SPAN o filtro precisará.

O parâmetro SWEEP ajusta o *sweep time*, ou seja, o tempo de varredura do SPAN definido.

O parâmetro POINTS está vinculado ao SWEEP, no qual indica a quantidade de pixels que serão utilizados dentro do SPAN para representar o sinal no ecrã do analisador (ROHDE&SCHWARZ, 2017). A Figura 22 apresenta o diagrama de bloco do processo executado pelo analisador de espectro FSH3.

Figura 22 — Diagrama de bloco do processo de amostragem.



Fonte: Retirado de (ROHDE&SCHWARZ, 2017)

O SPAN pode ser configurado manualmente pelo operador, mas também automaticamente por meio do ajuste do comando CHANNEL BW, pois o analisador define o valor do SPAN como sendo 5 vezes maior que a largura do canal definida. Recomenda-se (ROHDE&SCHWARZ, 2017) definir o valor de RBW como sendo 1% a 4% do valor da largura do canal definido em CHANNEL BW, assim como o valor de VBW deve ser 3 vezes maior que o valor de RBW para evitar a compressão dos picos do sinal pelo filtro durante a exibição no ecrã.

O analisador FSH3 possui ao todo 301 pixels, ou seja, 301 pontos para representar os sinais em seu ecrã. Cada pixel comporta uma pequena faixa de frequência determinada pelo SPAN conforme a relação $\text{SPAN}/301$. Já o analisador

N1996A possui um ajuste dinâmico do número de pixels utilizados para a representação dos sinais por meio do comando POINTS, onde pode-se definir até 1024 pixels (KEYSIGHT, 2011).

O parâmetro DETECTOR define a métrica utilizada pelo analisador para coletar amostras do espectro eletromagnético que formaram o traçado do sinal no ecrã do analisador.

- Detectores disponíveis no FSH3:
 - AUTO PEAK: Seleciona a maior amostra e a menor amostra.
 - MAX PEAK: Seleciona a maior amostra.
 - MIN PEAK: Seleciona a menor amostra.
 - SAMPLE: Seleciona qualquer amostra.
 - RMS: Retira a raiz do valor quadrático médio (RMS) das amostras.
- Detectores disponíveis no N1996A:
 - AUTO PEAK: Seleciona a maior amostra e a menor amostra.
 - PEAK: Seleciona a maior amostra.
 - NEGATIVE PEAK: Seleciona a menor amostra.
 - SAMPLE: Seleciona qualquer amostra.
 - AVERAGE: Retira a média das amostras.

Para a medição de sinais modulados digitalmente, o detector mais adequado é o *Root Mean Square* (RMS) (ROHDE&SCHWARZ, 2017). Isso se justifica pelo fato de que os sinais digitais apresentam envelopes complexos com variações significativas de amplitude e fase, no qual o processamento das amostras pelo valor RMS é o que retorna a potência real do sinal. No entanto, o detector RMS está disponível apenas no analisador FSH3, pois o modelo N1996A não possui o módulo correspondente devido a restrições de licenciamento. Diante dessa limitação, a estratégia adotada foi realizar as aferições com o detector PEAK em vez do AVERAGE.

O detector AVERAGE calcula a média das amostras em escala linear para posteriormente aplicar o logaritmo, dessa forma o valor de intensidade resultante tende a ser inferior à intensidade real do sinal. Por outro lado, o detector PEAK, mesmo que possa superestimar ligeiramente o valor do sinal devido a picos e oscilações inerentes à modulação digital, proporciona um resultado que se aproxima de forma mais fidedigna à potência instantânea do sinal, sendo, portanto, mais

adequado para este trabalho.

Os sinais do Wi-Fi são intermitentes, semelhantes a pulsos de pequena largura espectral e de curta duração, estes pulsos ocorrem dentro da largura de banda do canal ativo. Isto se deve pelas especificações impostas pelo protocolo 802.11, onde os sinais elétricos passam por sistemas de modulação e multiplexação que alteram o seu formato para posteriormente serem irradiados pelas antenas como ondas eletromagnéticas. Como os sinais de Wi-Fi são intermitentes, deve-se habilitar modos de traçado para que a visualização dos mesmos, seja possível a olho nu, para isso os analisadores FSH3 e N1996A dispõem de três modos de traçado, são eles: MAX HOLD, MIN HOLD e o CLEAR WRITE.

O modo MAX HOLD retém o nível máximo de cada amostra presente no traçado, incrementando o traçado a cada varredura realizada para formar a imagem do sinal analisado, de maneira análoga o modo MIN HOLD retém o nível mínimo de cada amostra presente no traçado, já o modo CLEAR WRITE como o próprio nome indica, a cada varredura realizada o traçado é limpo, sendo este, o modo padrão dos analisadores de espectro.

3.3 Montagem dos *setups* e configuração dos analisadores

Para realizar as aferições, foi necessário desenvolver um *setup* que se adequasse ao modelo de analisador de espectro utilizado e pudesse ser utilizado em todas as salas do prédio, dessa forma, entre os critérios definidos para que a coleta de dados fosse realizada de maneira eficiente, tem-se: a antena omnidirecional deve estar sempre posicionada na vertical durante o momento de gravação dos dados no analisador; nenhum material pode estar em contato com o condutor ou o plano terra da antena; a antena deve estar distanciada o suficiente do operador, para que o mesmo não interfira nas amostras espectrais coletadas; o *setup* não pode ser modificado após o início do mapeamento da rede; o mesmo tempo de coleta de dados deve ser utilizado para todas as aferições.

As dimensões e o peso dos analisadores de espectro foram considerados, estas informações foram retiradas dos seus respectivos *datasheets* (ROHDE&SCHWARZ, 2017; KEYSIGHT, 2011). O analisador FSH3 possui dimensão (W x H x D) de 170 mm x 120 mm x 270 mm e peso igual a 2,5 kg, já o analisador N1996A possui dimensão (W x H x D) de 223 mm x 481 mm x 248 mm e peso de

7,5 kg. Foi decidido que o analisador FSH3 seria transportado sem o auxílio de um veículo de transporte, enquanto que o analisador N1996A devido a sua dimensão e peso necessitaria de um veículo de transporte compacto para trafegar pelas salas e corredores livremente.

O *setup* montado com o analisador FSH3 pode ser visualizado na Figura 23 e seus elementos são descritos abaixo:

- Antena monopolo de um quarto de onda ($\lambda/4$) que opera na faixa de 2,4 GHz.
- Adaptador N Macho x N Macho.
- Extensão elétrica de 100 metros.

Figura 23 — *Setup* do FSH3.



Fonte: O próprio autor.

O *setup* montado com o analisador N1996A pode ser visualizado na Figura 24 e seus elementos são descritos abaixo:

- Antena monopolo de um quarto de onda ($\lambda/4$) que opera na faixa de 5 GHz.
- Adaptador N Macho x N Macho.
- Extensão elétrica de 100 metros.
- Veículo de transporte de cargas leves.
- Caixote de madeira.
- Adaptador N Fêmea x SMA Macho.

Figura 24 — Setup do N1996A.



Fonte: O próprio autor.

Em conformidade com as recomendações dos manuais técnicos dos analisadores, os parâmetros essenciais de medição foram devidamente configurados. Estes incluem RBW, VBW, SWEEP, POINTS, DETECTOR, SPAN, entre outros.

Inicialmente, os analisadores foram configurados para varrer toda a faixa espectral do Wi-Fi 2,4 GHz e do Wi-Fi 5 GHz para encontrar todos os canais ativos nos APs do prédio acadêmico. Para o analisador FSH3, o SPAN foi definido em 100 MHz, cobrindo de 2,4 GHz (START FREQ) a 2,5 GHz (STOP FREQ). A varredura realizada permitiu a visualização dos três canais não sobrepostos pertencentes à faixa de 2,4 GHz do Wi-Fi, estes são: o Canal 1 (2,412 GHz), o Canal 6 (2,437 GHz) e o Canal 11 (2,462 GHz), sendo que os três operam com uma largura de banda de 20 MHz. Na Figura 25 podem ser visualizados os canais ativos captados na proximidade de um AP, o seu canal e canais de outros APs.

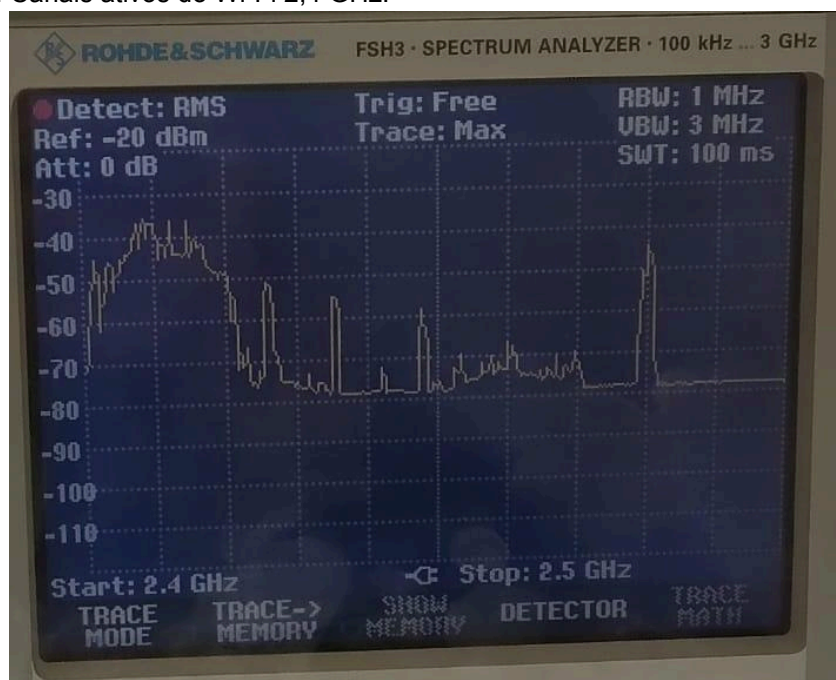
O analisador FSH3 apresenta limitações na exportação de dados, visto que carece de entrada USB para *pendrive* e do módulo licenciado para exportação via cabo óptico. Assim, foi necessário recorrer à captura fotográfica de seu ecrã

utilizando o *smartphone Samsung Galaxy A02S*.

A sequência de configuração implementada no analisador de espectro FSH3 é detalhada a seguir:

- **FREQ**
 - START FREQ: 2,4 GHz
 - STOP FREQ: 2,5 GHz
 - SPAN: 100 MHz
 - CENTER FREQ: 2,45 GHz
 - CF STEPSIZE: 10 MHz
- **AMPT**
 - REF LEVEL: -20 dBm
 - RANGE: 10 dB/DIV
 - UNIT: dBm
 - REF OFFSET: 0,0 dB
 - RF INPUT: 50 Ω
- **BW**
 - MANUAL RES BW: 1 MHz
 - MANUAL VIDEO BW: 3 MHz
- **SWEEP**
 - MANUAL SWPTIME: 100 ms
 - CONT SWEEP
- **TRACE**
 - TRACE MODE
 - MAX HOLD
 - DETECTOR
 - RMS

Figura 25 — FSH3: Canais ativos do Wi-Fi 2,4 GHz.



Fonte: O próprio autor.

Optou-se por utilizar o modo CHANNEL POWER do analisador FSH3 em vez do modo ANALYZER padrão. O modo CHANNEL POWER permite otimizar a coleta de dados do indicador RSSI, pois ao fixar a largura de banda do canal CHANNEL BW em 20 MHz, basta apenas alterar o valor do parâmetro CENTER FREQ, eliminando a necessidade de configurar o START FREQ e o STOP FREQ manualmente para cada canal.

Para evitar a redundância nas aferições da faixa de 2,4 GHz, o analisador N1996A não foi empregado na coleta de dados desta rede, uma vez que ele foi reservado para a análise da rede Wi-Fi 5 GHz. A sequência de comandos utilizada na configuração do analisador FSH3 para a coleta de dados é apresentada a seguir.

- MEAS
 - MEASURE
 - CHANNEL POWER
- AMPT
 - REF LEVEL: -20 dBm
 - RANGE: 10 dB/DIV
 - UNIT: dBm
 - REF OFFSET: 0,0 dB
 - RF INPUT: 50 Ω
- MEAS
 - CHANNEL BW: 20 MHz
- SPAN
 - AUTO SPAN: 24 MHz
- BW
 - MANUAL RES BW: 300 KHz
 - MANUAL VIDEO BW: 1 MHz
- SWEEP
 - MANUAL SWPTIME: 200 ms
- FREQ
 - CENTER FREQ:
 - 2,412 GHz (Canal 1)
 - 2,437 GHz (Canal 6)
 - 2,462 GHz (Canal 11)
- TRACE
 - DETECTOR
 - RMS
- MEAS
 - POWER DISPLAY
 - PWR DISP ON
 - CLR/WRITE
 - MAX HOLD

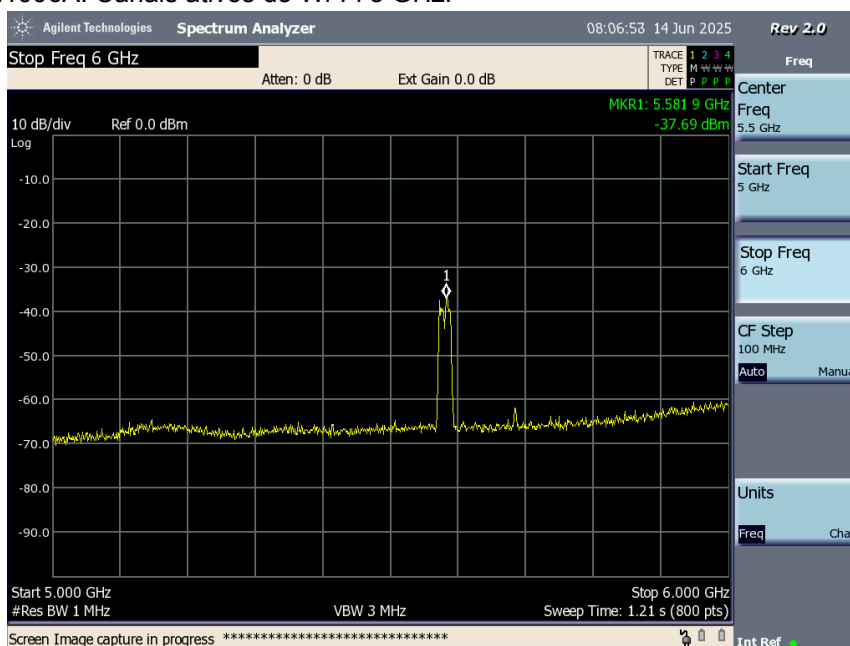
Para a análise da rede Wi-Fi 5 GHz o analisador N1996A foi empregado, esta faixa espectral segundo o domínio regulatório do Brasil (CISCO, 2018) permite a

utilização de até 21 canais com largura de banda de 20 MHz, 10 canais de 40 MHz, 5 canais de 80 MHz ou 2 canais de 160 MHz. Como os APs são gerenciados pelo vWLC e qualquer canal dentro de toda a faixa de 5 GHz pode ser utilizado, foi imperativo configurar o analisador de espectro com uma ampla faixa de varredura. Desse modo, o SPAN foi definido como 1 GHz, abrangendo o espectro entre as frequências de 5 GHz e 6 GHz. O analisador N1996A dispõe de entrada USB e pode exportar tanto as capturas de seu ecrã quanto os dados brutos em formato CSV, a Figura 26 mostra a faixa de SPAN de 1 GHz usada para encontrar o canal ativo de um AP aleatório.

A sequência de comandos empregada no analisador N1996A para essa varredura é apresentada a seguir.

- **FREQ CHANNEL:**
 - START FREQ: 5 GHz
 - STOP FREQ: 6 GHz
 - SPAN: 1 GHz
 - CENTER FREQ: 5,5 GHz
 - CF STEP: 100 MHz
- **AMPTD Y SCALE:**
 - REF LEVEL: 0,0 dBm
 - ELEC ATTEN: 0 dB
 - SCALE/DIV: 10 dB
 - AUTO RANGE: OFF
 - EXT GAIN: OFF
- **TRACE/DETECTOR:**
 - MAX HOLD
 - DETECTOR: PEAK
- **BW:**
 - RBW: 1 MHz
 - VBW:RBW: 3
 - VBW: 3 MHz
- **SWEEP/CONTROL:**
 - SWEEP TIME: 1,21 s
 - POINTS: 800

Figura 26 — N1996A: Canais ativos do Wi-Fi 5 GHz.



Fonte: O próprio autor.

As aferições iniciais foram conduzidas na proximidade dos APs durante dois dias consecutivos e em horários distintos. Diferente do esperado, notou-se atividade em apenas uma faixa do espectro eletromagnético, e não uma seleção dinâmica de canais. Para identificar o canal, o START FREQ e o STOP FREQ do analisador N1996A foram ajustados para diminuir o SPAN. Este procedimento permitiu a identificação da largura de banda e da numeração do canal utilizado em cada AP, no qual após 2 dias de aferições não houve troca de canais ou de largura de banda. Concluiu-se, assim, que os APs operam em canais fixos, majoritariamente de largura de 20 MHz, com apenas um AP utilizando um canal de largura de 40 MHz. A localização dos APs no prédio acadêmico e os canais utilizados da rede Wi-Fi 5 GHz estão sumarizados na Tabela 6.

Tabela 6 — Localização dos APs e identificação dos canais habilitados.

Localização do AP no prédio	Canal	Banda (MHz)
2° Andar / Em frente a A3-213	116	20
2° Andar / Dentro da A3-209	134	40
2° Andar / Parte superior da A3-105	116	20
1° Andar / Em frente a A3-105	100	20
1° Andar / Em frente a A3-102	132	20
1° Andar / Em frente a A3-109	100	20
1° Andar / Em frente a A3-107	116	20

Fonte: Retirado de (EKAHAU, 2022).

Dada a constatação de que os canais e suas respectivas larguras de banda estão fixados nos APs, tornou-se desnecessário manter o SPAN de varredura do analisador N1996A em 1 GHz para detectar os canais ativos. Com base nas larguras de banda conhecidas dos quatro canais ativos na rede, faixas de varredura específicas foram criadas para cada canal. O modo CHANNEL POWER não foi utilizado; em vez disso, foram inseridas as frequências de START e STOP no analisador. Essa abordagem garantiu que o SPAN fosse levemente superior a 20 MHz ou 40 MHz e estivesse centrado na frequência central do canal do AP mais próximo para captar a máxima potência na região. A sequência de comandos empregada durante as aferições com o analisador N1996A é detalhada a seguir.

- **FREQ CHANNEL:**
 - **START FREQ:**
 - Freq < 5,49 GHz (Canal 100)
 - Freq < 5,57 GHz (Canal 116)
 - Freq < 5,65 GHz (Canal 132)
 - Freq < 5,65 GHz (Canal 134)
 - **STOP FREQ:**
 - Freq > 5,51 GHz (Canal 100)
 - Freq > 5,59 GHz (Canal 116)
 - Freq > 5,67 GHz (Canal 132)
 - Freq > 5,69 GHz (Canal 134)
 - **SPAN:**
 - BW > 20 MHz (Canal 100)

- BW > 20 MHz (Canal 116)
 - BW > 20 MHz (Canal 132)
 - BW > 40 MHz (Canal 134)
- CENTER FREQ:
 - F ≈ 5,50 GHz (Canal 100)
 - F ≈ 5,58 GHz (Canal 116)
 - F ≈ 5,66 GHz (Canal 132)
 - F ≈ 5,67 GHz (Canal 134)
- CF STEP:
 - 2 MHz (Canal 100)
 - 2 MHz (Canal 116)
 - 2 MHz (Canal 132)
 - 4 MHz (Canal 134)
- AMPTD Y SCALE:
 - REF LEVEL: 0,0 dBm
 - ELEC ATTEN: 0 dB
 - SCALE/DIV: 10 dB
 - AUTO RANGE: OFF
 - EXT GAIN: OFF
- TRACE/DETECTOR:
 - MAX HOLD
 - DETECTOR: PEAK
- BW:
 - RBW: 510 kHz
 - VBW:RBW: 3
 - VBW: 1,5 MHz
- SWEEP/CONTROL:
 - SWEEP TIME: 500 ms
 - POINTS: 401

3.4 Configuração dos softwares AutoCAD e QGIS

Foi elaborado um plano de aferições no qual definiu-se a quantidade de aferições por sala, os pontos geográficos de coleta de dados e o tempo de varredura necessário para a coleta de amostras do RSSI. Para garantir a organização e facilitar a extração das coordenadas geográficas dos locais de medição, os pontos de aferição foram demarcados no projeto arquitetônico do prédio, previamente importado para o software AutoCAD. A distribuição da quantidade de pontos de aferições por pavimento, conforme a rede Wi-Fi em análise, é apresentada a seguir.

- Rede Wi-Fi 2,4 GHz
 - Pavimento Térreo: 74 pontos de aferições.
 - Segundo Pavimento: 126 pontos de aferições.
- Rede Wi-Fi 5 GHz
 - Pavimento Térreo: 50 pontos de aferições.
 - Segundo Pavimento: 55 pontos de aferições.

A quantidade de pontos de aferição foi estabelecida em um compromisso entre a precisão da interpolação que exige o máximo número possível de pontos e a limitação temporal imposta pelo curto prazo disponível para a coleta de dados por motivos pessoais do autor. Com base nessas condições, o tempo de coleta de dados por varredura foi fixado em 7s. Esse tempo garante a coleta de um número significativo de amostras do sinal pelo analisador, ao mesmo tempo em que viabiliza a aferição de todos os pontos demarcados no prazo estabelecido.

Os pontos de aferição demarcados no projeto arquitetônico no AutoCAD, possuem coordenadas X e Y. Tais coordenadas são de suma importância para a interpolação espacial, visto que as amostras devem ser georreferenciáveis e conter o parâmetro a ser interpolado (a intensidade do sinal Wi-Fi, dada em dBm).

Visto que o AutoCAD não oferece ferramentas nativas para interpolação de dados, a etapa seguinte consiste em desenvolver códigos ou utilizar softwares especializados para realizar a interpolação. Independentemente da escolha, a primeira ação a ser realizada é a de extração das coordenadas X e Y dos pontos demarcados no AutoCAD. Para tal, deve-se utilizar o comando EXTRACAODADOS do AutoCAD, cuja sequência de procedimentos é apresentada a seguir.

- EXTRACAODADOS
 - Deixar marcado: Criar uma nova extração de dados
 - Clicar em Avançar
 - Selecionar o arquivo do projeto arquitetônico em DWG ou DXF
 - Na aba: Desenhos/Conjunto de folhas
 - Deixar marcado: Incluir o desenho atual
 - Clicar em Avançar
 - Selecione: Exibir somente não blocos
 - Selecione o objeto: Círculo
 - Filtre por categoria: Geometria
 - Selecione: Centro X e Centro Y
 - Clique em Avançar
 - Na aba: Saída de dados para arquivo externo
 - Escolha: Formato TXT ou Formato CSV
 - Clique em Concluir

Após finalizado o comando, será gerado um arquivo de duas colunas (no formato TXT ou CSV) contendo as coordenadas X e Y de todos os pontos. Em seguida, deve-se adicionar manualmente a cada ponto o valor de intensidade do sinal coletado pelos analisadores de espectro. Este procedimento resulta em uma matriz de dados $N \times 3$, onde N corresponde ao número total de pontos de aferição e 3 corresponde ao número de colunas. A matriz é estruturada com três colunas: a primeira para as coordenadas X, a segunda para as coordenadas Y e a terceira para o indicador RSSI. O conteúdo dos quatro arquivos TXT são apresentados no APÊNDICE C, APÊNDICE D, APÊNDICE E e APÊNDICE F.

Para assegurar a correta importação dos dados pelo software QGIS, é imprescindível que a primeira linha da matriz contenha os títulos das colunas, como, por exemplo: X, Y e RSSI. A ausência desses cabeçalhos pode resultar em perda de dados, visto que o QGIS interpreta a primeira linha como título.

Para a etapa de interpolação e análise, foi empregado o QGIS, um Sistema de Informações Geográficas (SIG) de software livre amplamente utilizado em Geoprocessamento por oferecer funcionalidades como a visualização, edição e análise de dados georreferenciados, além de suportar a instalação de *plugins* que expandem significativamente seu escopo (QGIS, 2025).

O *plugin* SMART-MAP foi desenvolvido por um consórcio de pesquisadores brasileiros (IFSUDESTEMG, UFU e UFV), ele estende as funcionalidades do QGIS ao adicionar recursos avançados, como a interpolação geoestatística por Krigagem e algoritmos de Aprendizado de Máquina (ML) (WILLAM *et al.*, 2023).

Para realizar a interpolação por Krigagem é necessário primeiro importar os dados e o projeto arquitetônico de referência para o ambiente do QGIS, conforme a sequência de passos a seguir..

- Camada
 - Adicionar camada
 - Adicionar camada de texto delimitado
 - Nome do arquivo: Seleciona o arquivo TXT
 - Formato do arquivo: Marca a opção divisão de colunas por vírgulas
 - Definição de geometria
 - Campo X: Seleciona a coluna de coordenadas X do arquivo
 - Campo Y: Seleciona a coluna de coordenadas Y do arquivo
 - Campo Z: Seleciona a coluna de RSSI do arquivo
 - Geometria SRC: EPSG: 31982 – SIRGAS 2000 / UTM zone 22S
 - Clique em Adicionar

Em seguida, os dois projetos arquitetônicos dos pavimentos devem ser importados. O objetivo é utilizar esses projetos como camadas de referência para a delimitação precisa do *raster* de interpolação. A sequência de passos para a importação e georreferenciamento dos projetos arquitetônicos é detalhada a seguir.

- Projeto
 - Importar/Exportar
 - Importar camadas de DWG/DXF
 - Selecionar o arquivo DWG ou DXF
 - Definir quais camadas serão importadas
 - Clique em Ok

Após georreferenciar os projetos arquitetônicos e os pontos de aferição no sistema Universal Transverse Mercator (UTM) pelo código do Brasil EPSG:31982 (SIRGAS 2000 / UTM zone 22S), é necessário delimitar a área do *raster* de

interpolação para abranger somente a área dos projetos arquitetônicos (QGIS, 2025).

Ao executar o *plugin* SMART-MAP será aberto uma nova janela com quatro abas destinadas à importação dos pontos e a configuração dos parâmetros de interpolação.

- A aba "Dados", é utilizada para importar os pontos de aferição presentes no QGIS.
- A aba "Grid", é utilizada para ajustar o *raster* de interpolação pelo ajuste do tamanho dos *pixels* e da extensão do *raster* formada pelos eixos (X Min, Y Min, X Max e Y Max) do polígono de contorno. O tamanho dos *pixels* influencia diretamente o tempo de interpolação e a suavidade do mapa de calor, dessa maneira para este trabalho, o tamanho dos *pixels* foi definido como 300 mm.
 - Extensão do *raster* para o pavimento térreo:
 - X Min: -134171,4676660016120877
 - Y Min: -94792,1791063858763664
 - X Max: -47881,4676661099001649
 - Y Max: -59775,1791063858763664
 - Extensão do *raster* para o segundo pavimento:
 - X Min: -23989,000
 - Y Min: -94608,000
 - X Max: 62864,000
 - Y Max: -59400,0004
- Na aba "Interpolação" é realizado o ajuste do semivariograma pelos parâmetros.
 - Distância Máxima: Distância limite para o cálculo de dependência espacial.
 - Distância (h): Espaçamento entre pares de pontos.
 - Modelo de interpolação: Krigagem Ordinária.
 - Efeito pepita (Co): Valor da semivariância na origem ($h = 0$).
 - Patamar (Co + C): Valor da semivariância total do processo.
 - Alcance (A): Distância onde o semivariograma atinge o patamar.
 - Root Mean Square Error (RMSE): Qualidade da predição, no qual RMSE baixo indica melhor predição e RMSE alto indica má predição.

- Coeficiente de Determinação (R^2): Mostra a qualidade do ajuste do semivariograma aos pontos amostrados, no qual R^2 próximo a 1 indica bom ajuste e próximo a 0 indica mau ajuste.
- Vizinhos: Número de pontos amostrados usados para estimar um ponto não amostrado.
- Raio: Raio de busca para selecionar pontos vizinhos.

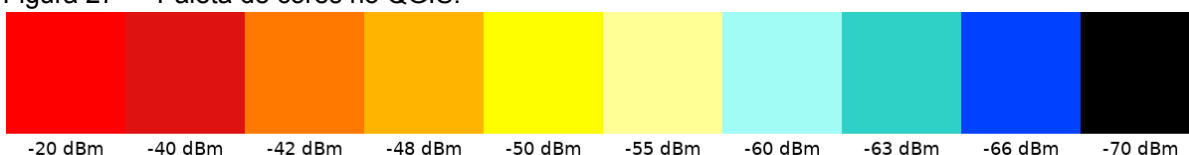
Após a interpolação a camada *raster* é gerada, mas pode apresentar-se sem coloração ou com uma paleta de cores desalinhada com a representação da intensidade do sinal Wi-Fi. Desta forma, torna-se necessário ajustar a paleta de cores manualmente para que a visualização do mapa de calor seja condizente com os dados. O QGIS utiliza o modelo RGBA (*Red, Green, Blue and Alpha*) para aplicar a coloração às camadas *raster* interpoladas. Para a correta representação da intensidade do sinal, a paleta de cores foi configurada através do ajuste manual, associando um valor quantitativo (RSSI) a uma cor específica, com base no modelo RGBA. A configuração da paleta de cores é apresentada na Tabela 7 e sua coloração é apresentada na Figura 27:

Tabela 7 — Configuração da paleta de cores.

Valor (dBm)	Código RGBA
-20	rgba(255, 0, 0, 1.00)
-40	rgba(223, 18, 18, 1.00)
-42	rgba(255, 120, 0, 1.00)
-48	rgba(255, 180, 0, 1.00)
-50	rgba(255, 254, 0, 1.00)
-55	rgba(255, 255, 150, 1.00)
-60	rgba(160, 252, 244, 1.00)
-63	rgba(47, 209, 198, 1.00)
-66	rgba(0, 65, 255, 1.00)
-70	rgba(0, 0, 0, 1.00)

Fonte: O próprio autor.

Figura 27 — Paleta de cores no QGIS.



Fonte: O próprio autor.

4 RESULTADOS

Dando-se início as aferições no prédio acadêmico, o primeiro analisador a ser utilizado foi o FSH3 por ser portátil, posteriormente foi utilizado o analisador N1996A. As aferições na rede Wi-Fi 2,4 GHz e 5 GHz foram realizadas conforme a metodologia já descrita anteriormente, sendo novamente apresentada logo abaixo:

- A quantidade de pontos de aferições deve ser o suficiente para que a interpolação gere mapas de calor fidedignos à cobertura real da rede sem fio.
- A varredura em cada ponto de aferição deve ser realizada pelo tempo de 7s.
- A antena deve sempre estar alinhada verticalmente.
- O GND e o condutor das antenas não podem estar em contato com nenhum material.
- Após o início das aferições para cada rede Wi-Fi o *setup* não poderá ser modificado.

Após a importação dos arquivos TXT contendo as coordenadas X, Y e os valores de intensidade do sinal RSSI das redes Wi-Fi 2,4 GHz e 5 GHz ao software QGIS, foram realizados os ajustes necessários nos parâmetros de interpolação do *plugin* SMART-MAP. Concluídas as configurações, o interpolador foi executado, gerando uma camada *raster*, porém como o *raster* inicial apresenta uma coloração desalinhada, a paleta de cores é ajustada imediatamente após a interpolação. Este ajuste garante que a coloração do *raster* esteja condizente para que o mapa de calor gerado seja visualmente interpretável.

4.1 Mapas de calor

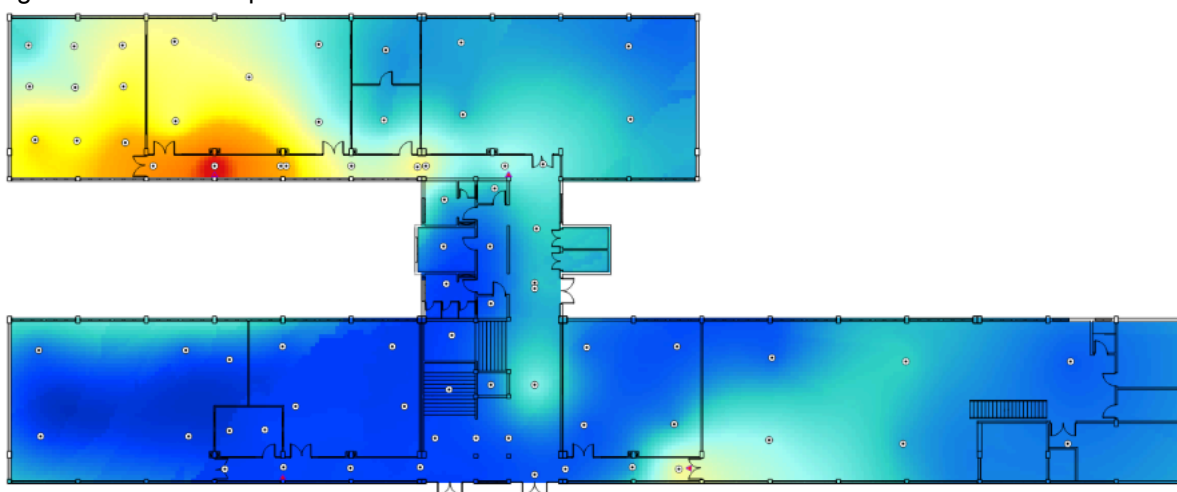
Os parâmetros usados na interpolação e os mapas de calor gerados conforme a paleta de cores da Figura 27 são apresentados logo abaixo:

A configuração dos parâmetros ajustados para a interpolação dos dados de intensidade do sinal da rede Wi-Fi 2,4 GHz somente para o canal 1 no pavimento térreo são apresentados:

- Distância Máxima: 48826,802
- Distância (h): 4347,518
- Modelo: Esférico

- Co: 6,280
- Co + C: 50,350
- A: 21525,514
- RMSE: 1554,758
- R^2 : 0,468
- Vizinhos: 20
- Raio: 81378,004

Figura 28 — Canal 1 pavimento térreo.



Fonte: O próprio autor.

Pode ser observado na Figura 28 o mapa de calor gerado somente com os dados de potência coletados do canal 1, no qual pode-se observar que há apenas um AP operando com este canal habilitado no pavimento térreo.

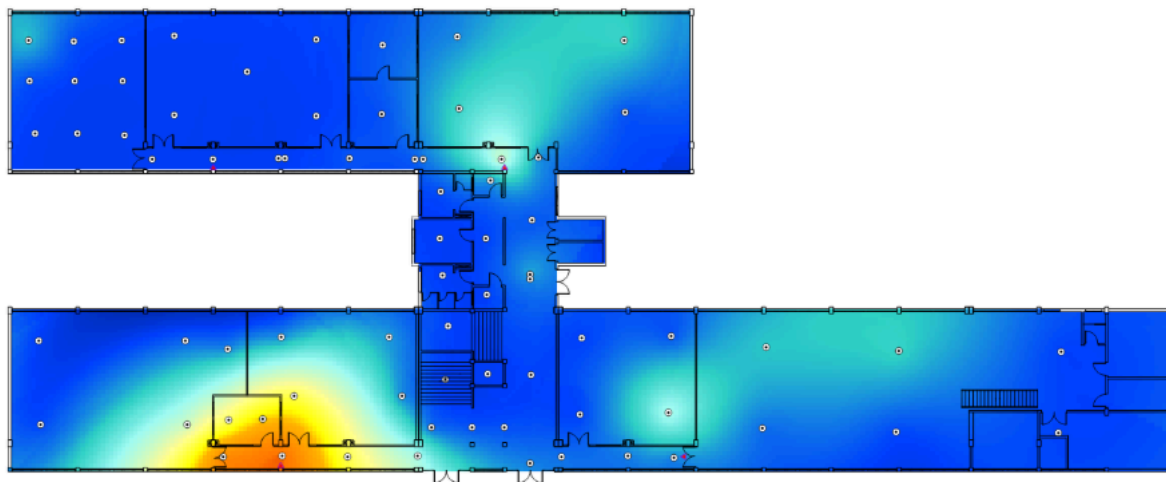
O AP instalado em frente a sala A3-107 ilumina com maior potência as salas A3-106 do Laboratório de Processamento de Energia e Controle (LAPEC), A3-107 do Laboratório de eletrônica e o corredor que as interliga, enquanto as demais regiões do pavimento térreo recebem baixa iluminação da cobertura deste AP.

É possível observar uma iluminação parcial nas salas A3-104 do Laboratório de Metalografia, Tratamentos Térmicos e Ensaio mecânicos, A3-105 (parte inferior) do Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção (LEMAC) e no corredor que as interliga. O AP que gera esta iluminação está localizado na parte superior da sala A3-105, que também possui o canal 1 habilitado conforme pode ser visto na Figura 31.

A configuração dos parâmetros ajustados para a interpolação dos dados de intensidade do sinal da rede Wi-Fi 2,4 GHz somente para o canal 6 no pavimento térreo são apresentados:

- Distância Máxima: 48826,802
- Distância (h): 4347,518
- Modelo: Esférico
- Co: 2,165
- Co + C: 26,923
- A: 20156,719
- RMSE: 1538,749
- R^2 : 0,207
- Vizinhos: 20
- Raio: 81378,004

Figura 29 — Canal 6 pavimento térreo.



Fonte: O próprio autor.

Na Figura 29 o mapa de calor foi gerado somente com os dados de potência coletados do canal 6, no qual pode-se observar que há somente um AP operando com este canal habilitado no pavimento térreo.

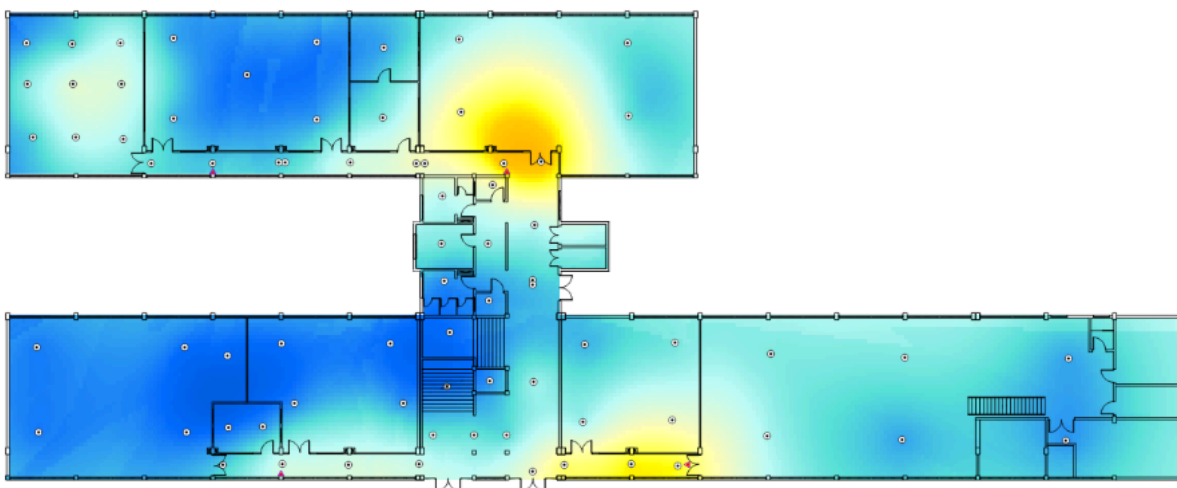
O AP instalado em frente a sala A3-102 ilumina com maior potência as salas A3-101 do Laboratório de Solos e Pavimentação (LASP), A3-102 dos técnicos, A3-103 do Laboratório de Irrigação e Hidráulica e o corredor que as interliga, enquanto as demais regiões do pavimento térreo recebem baixa iluminação da cobertura deste AP.

É possível observar que as salas A3-109 do Laboratório de Sistema de Energia e Automação, A3-108 dos técnicos e o corredor que as interliga recebem iluminação parcial, esta iluminação é gerada por um roteador instalado dentro da sala A3-212B no segundo pavimento que possui o canal 6 habilitado conforme mostrado na Figura 32. Seu SSID é NVR conforme mostrado na Figura 21.

A configuração dos parâmetros ajustados para a interpolação dos dados de intensidade do sinal da rede Wi-Fi 2,4 GHz somente para o canal 11 no pavimento térreo são apresentados:

- Distância Máxima: 48826,802
- Distância (h): 4347,518
- Modelo: Esférico
- Co: 7,676
- Co + C: 35,266
- A: 11812,811
- RMSE: 112,164
- R^2 : 0,673
- Vizinhos: 20
- Raio: 81378,004

Figura 30 — Canal 11 pavimento térreo.



Fonte: O próprio autor.

Pode ser observado na Figura 30 o mapa de calor gerado somente com os dados de potência coletados do canal 11, no qual observa-se que dois APs estão operando com este canal habilitado no pavimento térreo.

O AP instalado em frente a sala A3-109 ilumina com maior potência as salas A3-109 do Laboratório de Sistema de Energia e Automação, A3-108 dos técnicos e o corredor que as interliga.

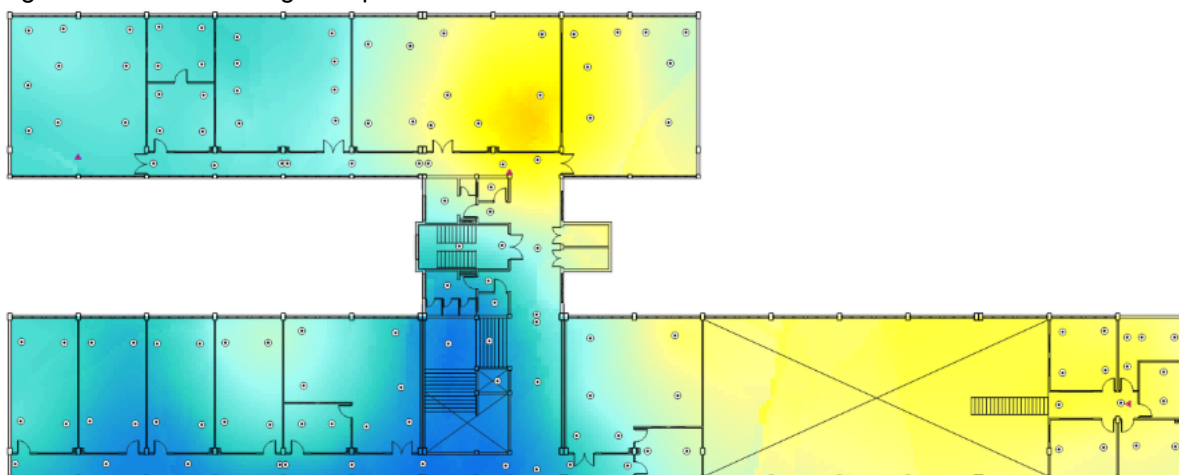
O AP instalado em frente a sala A3-105 ilumina com maior potência as salas A3-104 do Laboratório de Metalografia, Tratamentos Térmicos e Ensaio mecânicos, A3-105 (parte inferior) do Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção (LEMAC) e o corredor que as interliga.

É possível observar que a sala A3-106 do Laboratório de Processamento de Energia e Controle (LAPEC) está bem iluminada mesmo que o AP instalado próximo a ela não esteja operando com o canal 11 habilitado, isso ocorre porque esta sala acaba recebendo uma parcela da iluminação emitida pelo AP instalado dentro da sala A3-209 do segundo pavimento, pois este AP opera com o canal 11 habilitado e sua largura de banda é de 40 MHz.

A configuração dos parâmetros ajustados para a interpolação dos dados de intensidade do sinal da rede Wi-Fi 2,4 GHz somente para o canal 1 no segundo pavimento são apresentados:

- Distância Máxima: 53503,768
- Distância (h): 3246,721
- Modelo: Esférico
- Co: 21,405
- Co + C: 55,899
- A: 52944,792
- RMSE: 475,111
- R^2 : 0,797
- Vizinhos: 20
- Raio: 89172,947

Figura 31 — Canal 1 segundo pavimento.



Fonte: O próprio autor.

Na Figura 31 pode ser observado o mapa de calor gerado somente com os dados de potência coletados do canal 1 no segundo pavimento, no qual há dois APs distribuídos no segundo pavimento que operam com o canal 1 habilitado.

O AP instalado em frente a sala A3-212A ilumina com maior potência as salas A3-212B do Laboratório do Grupo de Energia e Sistemas Elétricos de Potência (GESEP), A3-212A do Laboratório de Exploração Integrada de Recursos Energéticos (EIRE), A3-213 do Laboratório do Grupo de Arquitetura de Computadores e Microeletrônica (GAMA) e o corredor que as interliga.

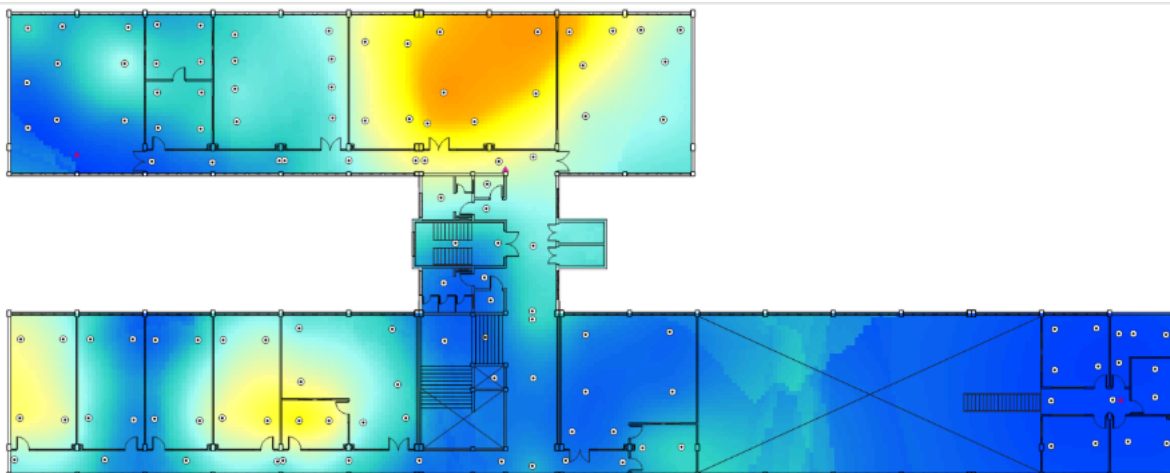
O AP instalado na parte superior da sala A3-105 do Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção (LEMAC) ilumina com maior potência toda a sala A3-105, tanto a sua parte inferior no pavimento térreo, quanto a sua parte superior no segundo pavimento pela ausência de paredes em boa parte da sala A3-105.

A configuração dos parâmetros ajustados para a interpolação dos dados de intensidade do sinal da rede Wi-Fi 2,4 GHz somente para o canal 6 no segundo pavimento são apresentados:

- Distância Máxima: 53503,768
- Distância (h): 3246,721
- Modelo: Esférico
- Co: 15,443
- Co + C: 51,334
- A: 20555,914
- RMSE: 1979,818

- R^2 : 0,387
- Vizinhos: 20
- Raio: 89172,947

Figura 32 — Canal 6 segundo pavimento.



Fonte: O próprio autor.

Na Figura 32 pode ser visualizado o mapa de calor gerado somente com dados de potência do canal 6 do segundo pavimento, onde pode-se observar que não há AP operando com o canal 6 habilitado. Isso pode ser observado pelas colorações laranja e amarela do mapa de calor que não estão concentradas ao redor de um AP do segundo pavimento, mas sim dentro das salas.

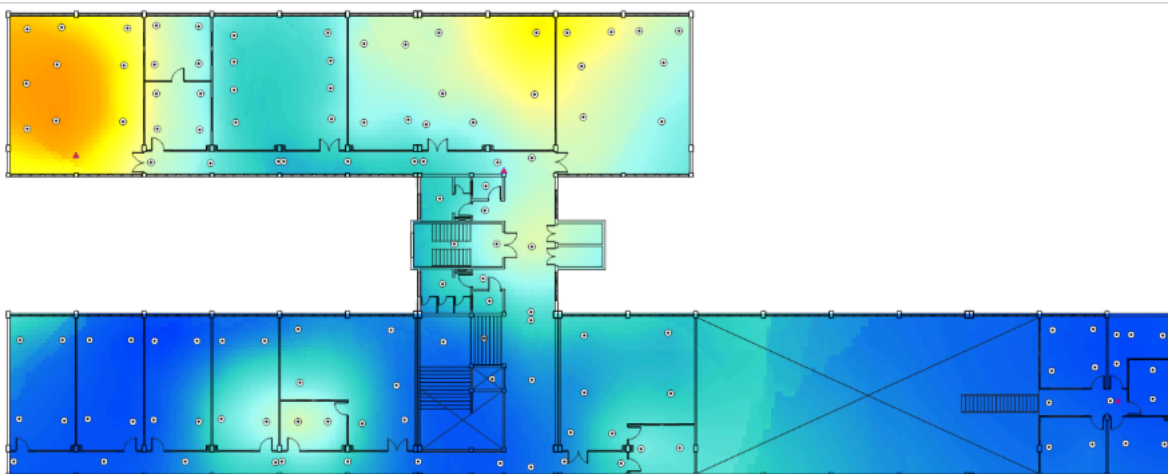
As salas A3-212B do laboratório do Grupo de Energia e Sistemas Elétricos de Potência (GESEP), A3-212A do laboratório de Exploração Integrada de Recursos Energéticos (EIRE), A3-213 do laboratório do Grupo de Arquitetura de Computadores e Microeletrônica (GAMA) e o corredor que as interliga, são iluminadas por um roteador instalado dentro da sala A3-212B que possui o canal 6 habilitado, seu SSID é NVR como indicado na Figura 21.

As salas A3-201 do Laboratório de Recursos Hídricos Aplicados e Sistemas Agrícolas (RHSA), A3-202 do Laboratório de Óptica e Comunicações (LAOC), A3-203 do Laboratório de Geoprocessamento e Topografia (GEOTOPO), A3-204 do Laboratório do Grupo de Pesquisa em Tecnologia da Construção (GPTeC), A3-205 dos técnicos, A3-206 do Laboratório de Física e o corredor que as interliga, são iluminadas pelo AP instalado em frente a sala A3-102 no pavimento térreo que possui o canal 6 habilitado como mostra a Figura 29.

A configuração dos parâmetros ajustados para a interpolação dos dados de intensidade do sinal da rede Wi-Fi 2,4 GHz somente para o canal 11 no segundo pavimento são apresentados:

- Distância Máxima: 53503,768
- Distância (h): 3246,721
- Modelo: Esférico
- Co: 19,121
- Co + C: 52,649
- A: 28029,077
- RMSE: 499,187
- R^2 : 0,740
- Vizinhos: 20
- Raio: 89172,947

Figura 33 — Canal 11 segundo pavimento.



Fonte: O próprio autor.

Na Figura 33 pode ser visualizado o mapa de calor gerado somente com dados de potência do canal 11 no segundo pavimento, no qual pode-se observar que somente um AP opera com o canal 11 habilitado

O AP instalado dentro da sala A3-209 ilumina com maior potência a própria sala A3-209 do Laboratório de Eletromagnetismo, Micro-Ondas e Antenas (LEMA) e a sala A3-210 dos técnicos, assim como uma parte da sala A3-211 do Laboratório de Telecomunicações e do corredor que interliga estas salas.

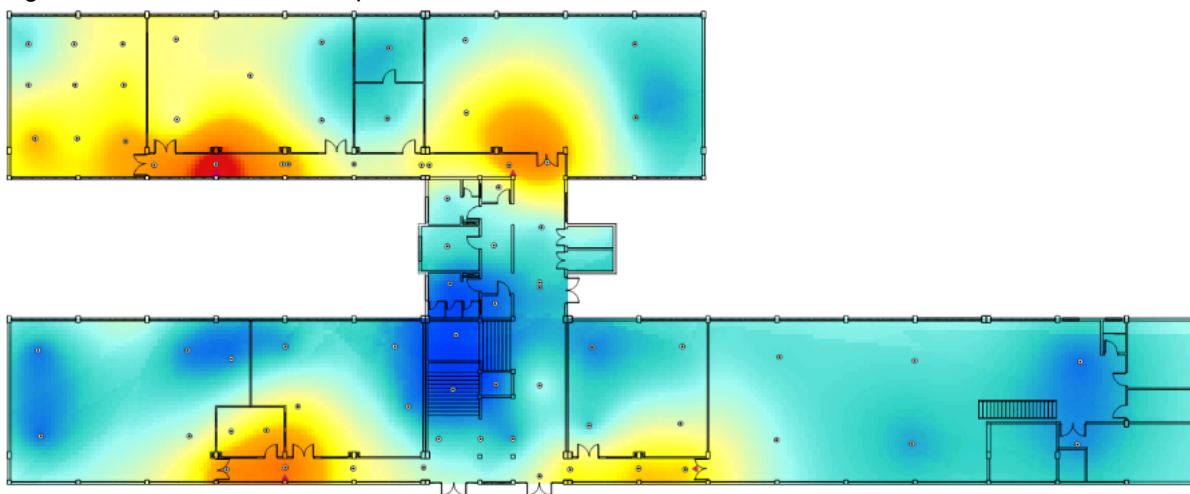
É possível observar que há salas que são iluminadas sem a presença de um

AP operando com o canal 11 habilitado na proximidade, como é o caso das salas A3-212B do Laboratório do Grupo de Energia e Sistemas Elétricos de Potência (GESEP), A3-212A do Laboratório de Exploração Integrada de Recursos Energéticos (EIRE), A3-213 do Laboratório do Grupo de Arquitetura de Computadores e Microeletrônica (GAMA) e o corredor que interliga estas salas. Estas salas e este corredor são iluminados pelo AP instalado em frente a sala A3-109 no pavimento térreo que opera com o canal 11 habilitado como mostrado na Figura 30.

A configuração dos parâmetros ajustados para a interpolação dos dados de intensidade do sinal da rede Wi-Fi 2,4 GHz para os canais 1, 6 e 11 no pavimento térreo são apresentados:

- Distância Máxima: 48826,802
- Distância (h): 4347,518
- Modelo: Esférico
- Co: 6,849
- Co + C: 57,124
- A: 11443,468
- RMSE: 3369,834
- R^2 : 0,176
- Vizinhos: 20
- Raio: 81378,004

Figura 34 — Canais 1, 6 e 11 pavimento térreo.



Fonte: O próprio autor.

Na Figura 34 é apresentado o mapa de calor gerado com os dados de potência dos três canais da rede Wi-Fi 2,4 GHz habilitados nos APs do pavimento térreo, onde pode-se visualizar as salas que são mais bem iluminadas pelos APs e as regiões de baixa iluminação no pavimento térreo.

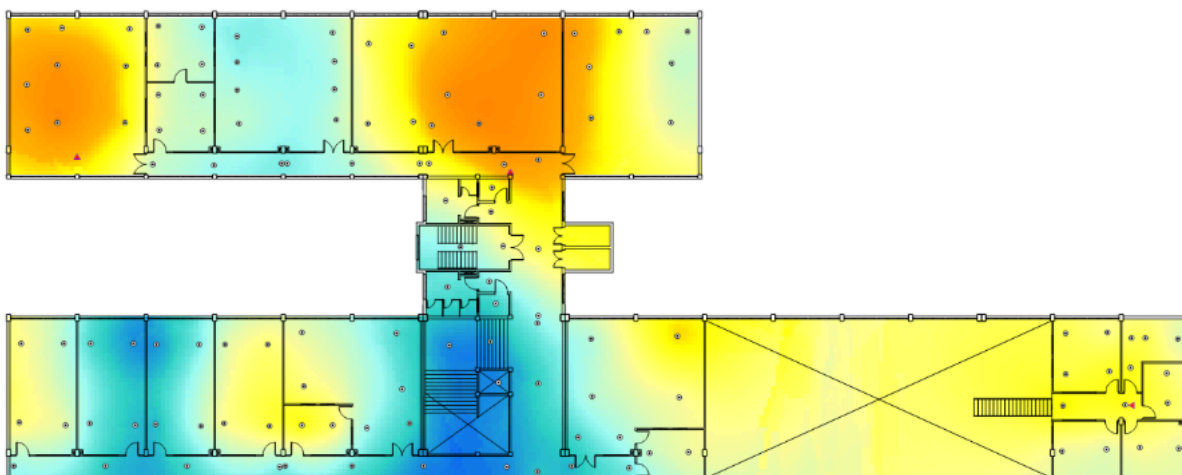
É possível observar que a distribuição dos quatro APs no pavimento térreo foi realizada de forma a permitir uma boa iluminação dos laboratórios de pesquisa e ensino, devido a estas salas normalmente receberem um fluxo elevado de discentes e docentes em comparação com as demais regiões do prédio. As localizações dos APs no pavimento térreo com os respectivos canais habilitados são descritas a seguir:

- AP em frente a sala A3-105: Canal 11
- AP em frente a sala A3-102: Canal 6
- AP em frente a sala A3-109: Canal 11
- AP em frente a sala A3-107: Canal 1

A configuração dos parâmetros ajustados para a interpolação dos dados de intensidade do sinal da rede Wi-Fi 2,4 GHz para os canais 1, 6 e 11 no segundo pavimento são apresentados:

- Distância Máxima: 53503,768
- Distância (h): 3246,721
- Modelo: Esférico
- Co: 25,735
- Co + C: 67,608
- A: 17695,053
- RMSE: 316,093
- R^2 : 0,822
- Vizinhos: 20
- Raio: 89172,947

Figura 35 — Canais 1, 6 e 11 segundo pavimento.



Fonte: O próprio autor.

Na Figura 35 é apresentado o mapa de calor gerado com os dados de potência dos três canais da rede Wi-Fi 2,4 GHz habilitados nos APs do segundo pavimento, onde pode-se observar que além da iluminação que os três APs do pavimento superior oferecem, há salas que são bem iluminadas pelos APs do pavimento térreo como é o caso das salas A3-201, A3-202, A3-203, A3-204, A3-205 e A3-206. As localizações dos APs e do roteador no segundo pavimento com os respectivos canais habilitados são descritas a seguir:

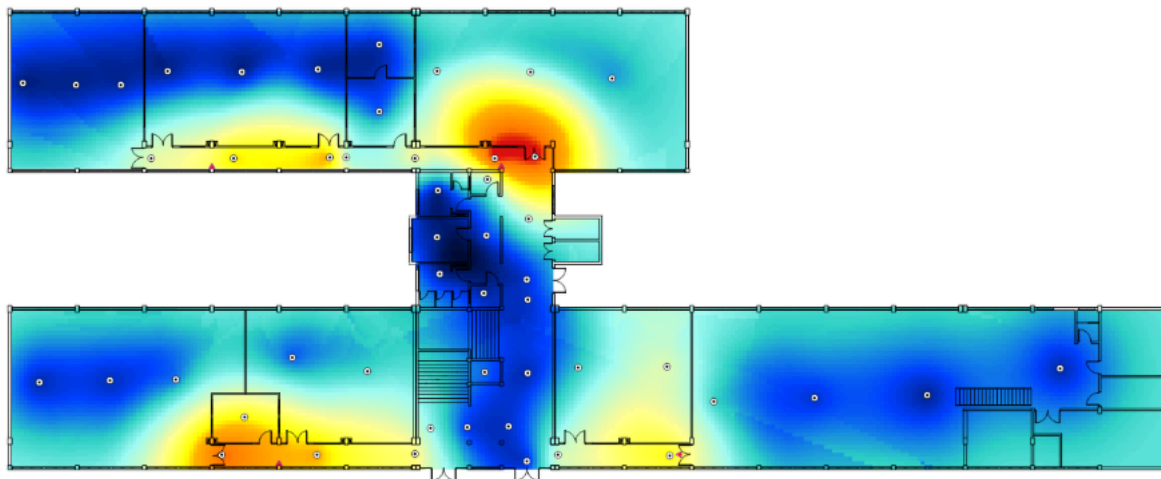
- AP em frente a sala A3-213: Canal 1
- AP dentro da sala A3-209: Canal 11
- AP na parte superior da sala A3-105: Canal 1
- Roteador dentro da sala A3-212B: Canal 6

A configuração dos parâmetros ajustados para a interpolação dos dados de intensidade do sinal da rede Wi-Fi 5 GHz para os canais 100, 116, 132 e 134 no pavimento térreo é apresentada:

- Distância Máxima: 47966,196
- Distância (h): 5219,214
- Modelo: Esférico
- Co: 0,000
- Co + C: 67,021
- A: 9401,578
- RMSE: 498,159

- R^2 : 0,501
- Vizinhos: 20
- Raio: 79943,660

Figura 36 — Canais 100, 116, 132 e 134 pavimento térreo.



Fonte: O próprio autor

Na Figura 36 é apresentado o mapa de calor gerado com os dados de potência dos canais 100, 116, 132 e 134 da rede Wi-Fi 5 GHz no pavimento térreo. Pode-se observar a diferença entre o mapa de calor gerado para a rede Wi-Fi 2,4 GHz do pavimento térreo na Figura 34 e o mapa de calor gerado para a rede Wi-Fi 5 GHz apresentado na Figura 36, no qual a cobertura oferecida pela rede Wi-Fi 5 GHz possui menos alcance que a cobertura da rede Wi-Fi 2,4 GHz, indo de acordo com os conceitos de eletromagnetismo sobre a relação do comprimento de onda com a distância.

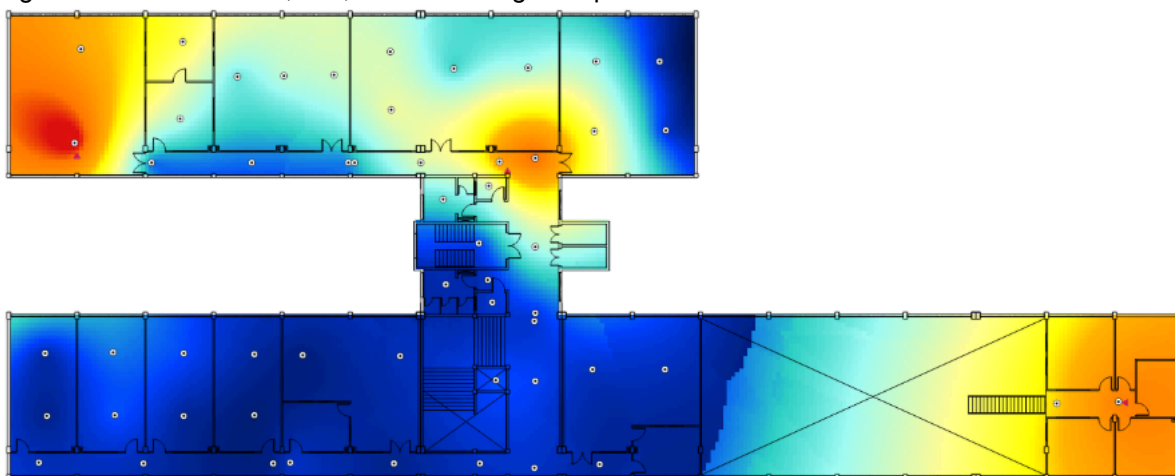
Também pode ser observado que as regiões mais afastadas dos APs são denotadas com um tom mais escuro demonstrando que a potência que chega nessas regiões é baixa ou muito baixa. As localizações dos APs no pavimento térreo com os respectivos canais habilitados são descritas a seguir:

- AP em frente a sala A3-105: Canal 100
- AP em frente a sala A3-102: Canal 132
- AP em frente a sala A3-109: Canal 100
- AP em frente a sala A3-107: Canal 116

A configuração dos parâmetros ajustados para a interpolação dos dados de intensidade do sinal da rede Wi-Fi 5 GHz para os canais 100, 116, 132 e 134 no segundo pavimento é apresentada:

- Distância Máxima: 48159,079
- Distância (h): 4981,534
- Modelo: Esférico
- Co: 2,958
- Co + C: 103,977
- A: 46300,950
- RMSE: 3131,981
- R^2 : 0,741
- Vizinhos: 20
- Raio: 80265,132

Figura 37 — Canais 100, 116, 132 e 134 segundo pavimento.



Fonte: O próprio autor.

A Figura 37 apresenta o mapa de calor gerado com os dados de potência dos canais 100, 116, 132 e 134 no segundo pavimento, no qual é possível observar que as salas A3-201, A3-202, A3-203, A3-204, A3-205, A3-206, A3-207 e A3-208 recebem baixa iluminação da rede Wi-Fi 5 GHz, bem diferente do mapa de calor da rede Wi-Fi 2,4 GHz apresentado na Figura 35, em decorrência da dificuldade das ondas eletromagnéticas com comprimentos de onda pequenos ultrapassarem barreiras físicas como paredes, assim como a falta de um quarto AP nesta região do segundo pavimento. As localizações dos APs no segundo pavimento com os

respectivos canais habilitados são descritas a seguir:

- AP em frente a sala A3-213: Canal 116
- AP dentro da sala A3-209: Canal 134
- AP na parte superior da sala A3-105: Canal 116

4.2 Discussão dos resultados

Após concluídas as interpolações e gerado os mapas de calor das redes Wi-Fi 2,4 GHz e 5 GHz do prédio acadêmico, evidencia-se que a alocação de canais habilitados nos APs está organizada de tal forma que minimiza interferências co-canais, pois os APs em cada pavimento estão bem distanciados uns dos outros, dessa forma a região próxima a cada um deles não é afetada significativamente por este tipo de interferência. Também é possível observar que os quatro APs localizados no bloco de prédio A7, em que dois estão no pavimento térreo e os outros dois estão logo acima no segundo pavimento com uma distância vertical pequena, ambos os quatro operam com canais não sobrepostos como pode ser observado a seguir:

- Rede Wi-Fi 2,4 GHz (Bloco A7)
 - Pavimento térreo
 - AP em frente a sala A3-109: Canal 11
 - AP em frente a sala A3-107: Canal 1
 - Segundo pavimento
 - AP em frente a sala A3-213: Canal 1
 - AP dentro da sala A3-209: Canal 11
 - Roteador dentro da sala A3-212B: Canal 6
- Rede Wi-Fi 5 GHz (Bloco A7)
 - Pavimento térreo
 - AP em frente a sala A3-109: Canal 100
 - AP em frente a sala A3-107: Canal 116
 - Segundo pavimento
 - AP em frente a sala A3-213: Canal 116
 - AP dentro da sala A3-209: Canal 134

Mesmo que o sinal Wi-Fi da rede do prédio da OAB/RS acabe iluminando a sala A3-106 com o canal 1 conforme mostrado na Figura 21 e o AP instalado em frente a sala A3-107 conforme mostrado na Figura 28 esteja operando com o canal 1 habilitado, a sua potência de iluminação é significativamente maior que o sinal da rede da OAB, mitigando assim os problemas causados pela interferência co-canal nesta área, pois os dispositivos são configurados para darem preferência aos sinais de maior potência, além também de identificarem o endereço BSSID da rede ao qual estão conectados.

Em relação à interferência de canal adjacente, esse tipo de interferência também não afeta a rede significativamente, pois os canais estão bem espaçados e respeitam as bandas de guarda, onde a rede Wi-Fi 2,4 GHz opera com os canais não sobrepostos 1, 6 e 11 com larguras de banda de 20 MHz, enquanto que a rede Wi-Fi 5 GHz opera com os canais não sobrepostos 100, 116, 132 e 134 que possuem larguras de banda de 20 MHz (Canais 100, 116 e 132) e 40 MHz (Canal 134). O AP instalado dentro da sala A3-209 que possui o canal 134 de 40 MHz habilitado está distanciado do AP instalado em frente a sala A3-102 que possui o canal 132 habilitado de 20 MHz.

As interferências eletromagnéticas causadas por dispositivos que operam na mesma faixa do Wi-Fi não são tão significativas, pois não foi detectado no prédio acadêmico dispositivos de *internet of things* (IoT) em operação. Dessa forma os possíveis maiores causadores desse tipo de interferência são os dispositivos fones de ouvido, *mouses* e teclados sem fio que utilizam o protocolo IEEE 802.15.1 *bluetooth* APÊNDICE G, no qual a comunicação é realizada por meio da mudança contínua de frequência, *Frequency-Hopping Spread Spectrum* (FHSS) que gera interferências por curto período de tempo em cada frequência da faixa de 2,4 GHz. Como o fluxo de alunos no prédio acadêmico é baixo e a rede de 5 GHz está totalmente operante, este tipo de interferência acaba por ser mitigada, pois caso o espectro da rede Wi-Fi 2,4 GHz ficasse sobrecarregado repentinamente os dispositivos celulares, notebooks e tablets podem se conectar à rede Wi-Fi 5 GHz, desde que possuam antenas compatíveis com esta faixa espectral.

Como no prédio acadêmico há um equipamento micro-ondas na Copa do pavimento térreo, foi realizado um teste para verificar se este equipamento gera interferências eletromagnéticas significativas durante o seu funcionamento, e o resultado desse teste encontra-se no APÊNDICE H que mostra a captura do ecrã do

analisador N1996A configurado para analisar toda a faixa espectral da rede Wi-Fi 2,4 GHz. É possível verificar que os sinais emitidos pelo micro-ondas ocorrem próximos a frequência do canal 11 (2,462 GHz) e com elevada potência. Conforme mostrado na Figura 30 pode-se observar que o AP instalado em frente a sala A3-109 opera com o canal 11 habilitado e que ele está próximo a Copa, dessa forma a interferência eletromagnética produzida pelo micro-ondas durante o seu funcionamento degrada a comunicação dos dispositivos que estejam na proximidade da Copa e conectados à rede Wi-Fi 2,4 GHz pelo canal 11, impossibilitando transferência de dados, seja por *upload* ou *download*.

É evidente o fenômeno do desvanecimento em grande escala mostrado nos mapas de calor, pois próximo aos APs a intensidade do sinal é elevada conforme pode-se notar pela iluminação com coloração laranja/amarela, porém conforme afasta-se dos APs a iluminação adota uma coloração verde/azul. Este efeito é causado pela perda de percurso, do inglês *path loss*. Conforme os sinais emitidos por cada AP percorrem os pavimentos atravessando paredes por meio da refração, suas energias são reduzidas devido a absorção pelo material e pela dispersão das ondas no ambiente. Dessa maneira, regiões como a Copa, banheiros, elevador, escadas e os corredores centrais recebem baixa iluminação de ambas as redes Wi-Fi, sendo mais crítico quando analisa-se a rede de 5 GHz. No segundo pavimento, conforme mostrado na Figura 37, as salas A3-201, A3-202, A3-203, A3-204, A3-205, A3-206, A3-207 e A3-208 recebem baixa iluminação da rede de 5 GHz devido a ausência de um AP na região.

Conforme pode ser observado nas Figuras 34, 35, 36 e 37, o elevador apresenta uma região de sombreamento porque os sinais são severamente atenuados, isso se deve pelo elevador ser composto de material condutor, formando uma espécie de Gaiola de Faraday que inibe a entrada de ondas eletromagnéticas ou as atenua drasticamente. Também pode ser observado nos mapas de calor, que o sinal percorre uma distância maior ao longo dos corredores do que ao ultrapassar paredes, isso se deve por causa das múltiplas reflexões dos sinais nas paredes, fazendo com que os corredores atuem como dutos onde os sinais de multipercursos trafegam até perderem energia por causa da distância e das reflexões.

Durante a comunicação entre os dispositivos móveis e os APs, fenômenos como o *doppler spread* podem ocorrer devido aos usuários se locomoverem pelo prédio, contudo, dentre os efeitos de desvanecimentos citados, o fenômeno de

doppler spread não é visível em mapas de calor, sendo necessário empregar técnicas específicas para mensurar o quanto este fenômeno degrada a comunicação.

Em relação ao tempo de *airtime* total e ao uso da taxa de dados para quadros de gerenciamento. Como cada canal possui os SSIDs (eduroam, unipampa e unipampa-visitantes) e os APs são *dual-band*, então cada AP possui ao todo seis VAPs, com três VAPs estando na banda de 2,4 GHz e três VAPs na banda de 5 GHz. Como as recomendações indicam que o número de VAPs não deve superar seis na mesma banda, então a rede foi bem estruturada logicamente para que não haja sobrecarga significativa da taxa de dados com dados de gerenciamento ao invés de dados com informações.

4.3 Propostas de soluções

Conforme os resultados das interpolações por Krigagem que geraram os mapas de calor de ambas as redes Wi-Fi nos dois pavimentos do prédio A3, os quais foram essenciais para que fosse realizado um diagnóstico da rede, foram propostas soluções para melhorar a cobertura da rede e o seu desempenho.

A primeira modificação a ser realizada deve ser na infraestrutura da rede por meio da correção da disposição dos APs, pois eles devem ser instalados na horizontal, fixado no teto e com a face ativa voltada para baixo como é especificado em seu *datasheet* (CISCO, 2021). Contudo, atualmente eles estão dispostos na vertical e sua cobertura não é ampla de forma omnidirecional, gerando assim áreas com baixa iluminação no pavimento onde se encontram localmente, enquanto iluminam áreas indevidas no outro pavimento.

A segunda modificação a ser realizada deve ser na infraestrutura da rede pelo acréscimo de um AP no bloco A6 para iluminar as salas A3-201, A3-202, A3-203, A3-204, A3-205 e A3-206 do segundo pavimento, pois como apresentado nos mapas de calor, especificamente no mapa de calor da rede Wi-Fi 5 GHz na Figura 37, estas salas recebem baixa iluminação por causa da ausência de um AP nesta região, sendo assim aconselhável instalar um AP em frente a sala A3-204 para oferecer cobertura Wi-Fi 2,4 GHz e 5 GHz. Os canais habilitados em cada rede deste novo AP podem ser fixos como os demais APs do prédio, sendo aconselhável que possuam a seguinte configuração para evitar a ocorrência das interferências

co-canal e de canal adjacente:

- AP da marca CISCO, das séries AIR-AP1832i-Z-K9, AIR-AP2802i-Z-K9 ou AIR-CAP2602I-T-K9.
- Canal 1 de largura (20 MHz) para a rede Wi-Fi 2,4 GHz
- Canal 116 de largura (20 MHz) para a rede Wi-Fi 5 GHz

A terceira modificação a ser realizada deve ser na parte lógica da rede Wi-Fi 2,4 GHz pela troca de canais de dois APs instalados no bloco A7, para que a interferência eletromagnética causada pelo micro-ondas durante a sua execução seja mitigada e não degrade a comunicação de dispositivos próximos à Copa de forma significativa. É aconselhável que o roteador com canal 6 habilitado cujo SSID é NVR seja removido, pois não pertence a rede da UNIPAMPA e como não é controlado pelo vWLC acaba limitando a escolha de canais na região, estando disponíveis apenas os canais 1 e 11. Portanto, segue as seguintes alterações:

- Pavimento térreo
 - AP em frente a sala A3-109
 - Canal atual: 11
 - Canal ajustado: 1
- Segundo pavimento
 - AP em frente a sala A3-212B
 - Canal atual: 1
 - Canal ajustado: 11

5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o desenvolvimento e a aplicação de um método de análise passivo e espectral para redes sem fio prediais com o uso de analisadores de espectro, tendo como estudo de caso o prédio acadêmico A3 do campus Alegrete da UNIPAMPA. A proposta metodológica buscou garantir a transparência de todos os processos envolvendo a geração de um mapa de calor, desde a maneira com que foi realizada a coleta de dados até o processamento destes dados pelos analisadores e pelos softwares utilizados. Foi necessário utilizar o software QGIS e seu *plugin* SMART-MAP para realizar a interpolação de dados, pois conforme a equação (2) da matriz de covariância seria humanamente inviável realizar os cálculos de forma analítica, contudo as principais equações da interpolação por Krigagem Ordinária foram apresentadas no corpo deste documento, assim como a análise a ser feita por meio do semivariograma.

Os mapas de calor foram essenciais para a análise da cobertura das redes Wi-Fi 2,4 GHz e 5 GHz e o diagnóstico do desempenho em relação às possíveis causas de degradação do sinal como interferências eletromagnéticas e desvanecimentos. Também foram propostas correções à infraestrutura física e lógica da rede como a mudança na disposição dos APs para a horizontal como especifica os diagramas de irradiação presentes em seus *datasheets*, o acréscimo de um AP para iluminar as salas dos laboratórios do bloco A6 do prédio e a mudança de canal do AP próximo à Copa pois possui um equipamento micro-ondas que, quando em execução gera interferência eletromagnética mais significativa ao canal 11 (2,462 GHz).

A metodologia proposta pode ser replicada ou otimizada conforme o ambiente em análise, pois as métricas utilizadas foram expostas para a validação da sua eficiência e precisão em gerar mapas de calor que representem a cobertura real da rede analisada. Como perspectivas futuras, recomenda-se aplicar a metodologia em diferentes tipos de ambientes como indústrias e hospitais, assim como não somente analisar o indicador RSSI, mas também realizar a análise da relação sinal-ruído SNR.

REFERÊNCIAS

- [1] ACOSTA, Helger A. Avaliação da interferência de redes sem fio Wi-Fi e Bluetooth sobre uma rede BACNET/IEEE 802.15.4, 2014.
- [2] ABOBA Bernard. Virtual access points. IEEE Contribution 11-03-154r1. Disponível em:<<http://www.drizzle.com/~aboba/IEEE/11-03-154r1-l-Virtual-Access-Points.doc>>. Acesso em: 19 de Outubro de 2025.
- [3] ATAÍDES, Kemilly B. *et al.* Estudo de desempenho de antenas para cobertura de Wi-Fi em ambientes fechados. 2023.
- [4] BALBI, Helga D. Estudo e implementação de controlador central para pontos de acesso IEEE 802.11 de baixo custo, 2012.
- [5] BARI, S. M. S.; ANWAR, Farhat; MASUD, M. H. Performance study of hybrid Wireless Mesh Protocol (HWMP) for IEEE 802.11s WLAN mesh networks. In: International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE). IEEE, 2012. p. 712-716.
- [6] BOUMAIZ, M. *et al.* Performance analysis of DQPSK and DBPSK modulation schemes for a scheduled access phase based Wireless Body Area Network, 2018.
- [7] CAMARGO, Eduardo Celso Gerbi. Geoestatística: Fundamentos e aplicações, 1998.
- [8] CAMPOS, Maxli B. Redes sem fio 802.11 em malha (mesh networks): uma alternativa para projetos de redes sem fio em regiões metropolitanas, 2007.
- [9] CARRILLO, Carlos D. A.. Avaliação de desempenho de esquemas de modulação e codificação na presença de interferência de co-canal, 2011.
- [10] CISCO. Cisco Aironet 1830 Series Access Points Data Sheet. 2021. Disponível em:<<https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/aironet-1830-series-access-points/datasheet-c78-735582.html>>. Acesso em: 24 de Novembro de 2024.
- [11] CISCO. Cisco Aironet 2800 Series Access Points Data Sheet. 2021. Disponível em:<<https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/aironet-2800-series-access-points/datasheet-c78-736497.html>>. Acesso em: 24 de Novembro de 2024.
- [12] CISCO. Cisco Aironet 2600 Series Access Points Data Sheet. 2014. Disponível em:<https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/aironet-2600-series/data_sheet_c78-709514.html>. Acesso em: 24 de Novembro de 2024.
- [13] CISCO. Wireless LAN Compliance Lookup. 2018. Disponível em:<<https://www.cisco.com/c/dam/assets/prod/wireless/wireless-compliance-tool/index.html>>. Acesso

em: 24 de Novembro de 2024.

[14] CISCO. Virtual Wireless LAN Controller Deployment Guide 8.2. 2015. Disponível em: <https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/wireless/technology/mesh/8-2/b_Virtual_Wireless_LAN_Controller_Deployment_Guide_8-2.html>. Acesso em: 04 de Setembro de 2025.

[15] ROCHA, Lidia G. S. et al. Avaliação de desempenho da cobertura e capacidade de uma rede sem fio IEEE 802.11ac. Brazilian Journal of Development, v. 6, n. 5, p. 31160-31172, 2020.

[16] CARVALHO, Fábio R. A. Rede ad hoc com priorização de tráfego, 2016.

[17] SIQUEIRA, Thiago S. Bluetooth – Características, protocolos e funcionamento, 2006.

[18] DNSSTUFF. Best Wi-Fi Analyzer Tools – Free and Paid. 2023. Disponível em: <https://www.dnsstuff.com/wifi-analyzer-software>. Acesso em: 7 ago. 2024.

[19] MEANEY, David F. The Evolution of Wi-Fi Technologies: Wi-Fi 7 (802.11be), 2024. Disponível em:

<https://ecsxtal.com/news-resources/the-evolution-of-wi-fi-technologies-wi-fi-7-802-11be/>. Acesso em: 22 out. 2024.

[20] FOROUZAN, Behrouz A. Comunicação de dados e redes de computadores. Porto Alegre: AMGH Editora, 2009.

[21] FOROUZAN, Behrouz A.; MOSHARRAF, Firouz. Redes de computadores: uma abordagem top-down. Porto Alegre: AMGH Editora, 2013.

[22] HAMMOUMI, Mohammed. Estudio de los protocolos de acceso al medio IEEE802.3 e IEEE802.11 y sus aplicaciones en el ámbito docente. 2013.

[23] HANDAYANI, Puji; MUBAROKAH, Lina; HENDRANTORO, Gamantyo. Pathloss and shadowing characteristics in indoor environment at 2.4 GHz band. In: International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA). IEEE, 2015. p. 423-428.

[24] HAYKIN, Simon; MOHER, Michael. Sistemas de Comunicação. 5. ed. Porto Alegre: Bookman Editora, 2011.

[25] HIERTZ, Guido R. et al. Principles of IEEE 802.11s. In: 16th International Conference on Computer Communications and Networks. IEEE, 2007. p. 1002-1007. IEEE STANDARDS ASSOCIATION. The Evolution of Wi-Fi Technology and Standards, 2023.

[26] KEYSIGHT. Measurement Guide and Programming Examples. 2011. Disponível

- em: <https://www.keysight.com/br/pt/product/N1996A/keysight-csa-spectrum-analyzer.html>. Acesso em: 15 nov. 2024.
- [27] KITTAPPA, Thenu. Virtual Access Points - Performance Impacts in an 802.11 environment and Alternative. Disponível em: < <http://community.arubanetworks.com/aruba/attachments/aruba/115/1358/1/AppNote.MultipleBSSIDs.pdf>>. Acesso em: 17 de Outubro de 2025.
- [28] KHALILI, Abdullah et al. Wi-Fi sensing: applications and challenges. The Journal of Engineering, v. 2020, n. 3, p. 87-97, 2020.
- [29] KLC, conectores. Família de produtos. Disponível em: <<https://www.klc.ind.br/2013/index.php>>. Acesso em: 20 de Maio de 2025.
- [30] KUROSE, James F.; ROSS, Keith W. Redes de Computadores e a Internet: uma abordagem top-down. Trad. 2006.
- [31] LATHI, B. P.; DING, Zhi. Sistemas de Comunicações Analógicos e Digitais Modernos. 4. ed. Editora LCT, 2012.
- [32] LIEBL, DETLEV. Measuring with modern spectrum analysers. ROHDE & SCHWARZ, 2013. Disponível em: <https://www.rohde-schwarz.com/us/applications/measuring-with-modern-spectrum-analyzers-educational-note_230850-36424.html>. Acesso em: 07 de Agosto de 2024.
- [33] LOBATO, Michel R.; TAVARES, Rafael K. Efeito da mobilidade em métricas de qualidade de serviços para redes Bluetooth, 2003.
- [34] MATHUR, Suhas. Small scale fading in radio propagation. Lecture Notes for Wireless Communication Technologies, Department of Electrical Engineering, Rutgers University, Spring, 2005.
- [35] QGIS. Uma breve introdução ao SIG. 2025. Disponível em: <https://docs.qgis.org/3.40/pt_BR/docs/gentle_gis_introduction/index.html>. Acesso em: 30 de Setembro de 2025.
- [36] PANSANATO, Luciano T. E. Redes Locais de Computadores, 2016.
- [37] PINHEIRO, Júlio César M. Caracterização de canais sem fio em ambientes generalizados de desvanecimento, 2012.
- [38] PRESCHER, Cesar Henrique. Estudo e projeto para o provimento seguro de uma infra-estrutura de rede sem fio 802.11. 2009.
- [39] ROHDE SCHWARZ. DENISOWSKI, Paul. Compreender a operação básica do analisador de espectro. 2022. Disponível em: <https://www.rohde-schwarz.com/br/produtos/teste-e-medicao/essentials-test-equipme>

nt/spectrum-analyzers/compreender-operacao-basica-de-analisadores-de-espectro_256005.html. Acesso em: 7 ago. 2024.

[40] DE SANTOS, Marina Farias. Estudo de caso: Avaliação da rede 802.11 nos prédios administrativo e acadêmico da Unipampa Alegrete. 2021.

[41] TAKAFUJI, Eduardo H. M. Simulação geoestatística espaçotemporal com deriva externa temporal local, 2020.

[42] UNIPAMPA. Pró-Reitoria de Planejamento, Administração e Infraestrutura (PROPLADI). Disponível em:<<https://sites.unipampa.edu.br/propladi/>>. Acesso em: 15 de Outubro de 2024.

[43] WILLAM, Gustavo et al. SMART-MAP: Plugin QGIS para interpolação utilizando Krigagem Ordinária e Machine Learning, 2023.

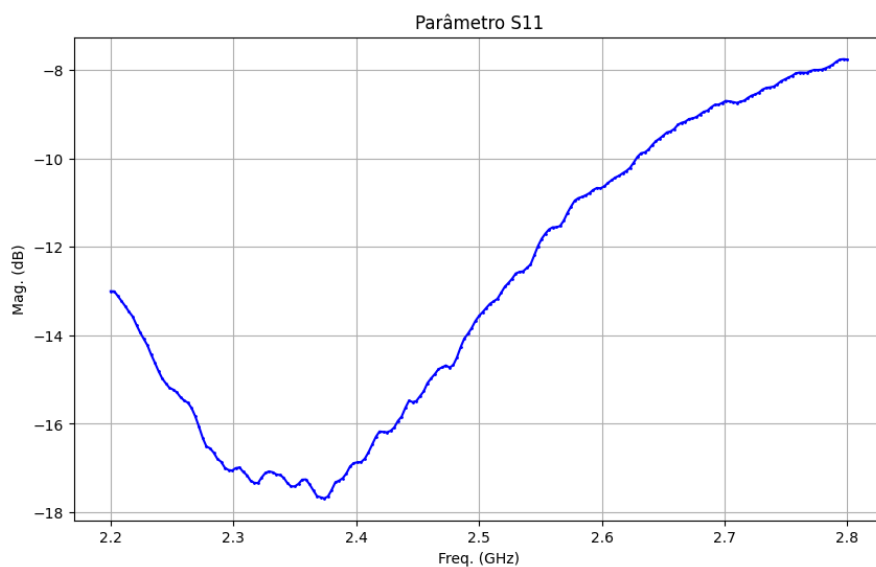
[44] XAVIER Alexandre C.; CECÍLIO Roberto A. MÓDULOS EM MATLAB PARA INTERPOLAÇÃO ESPACIAL PELO MÉTODO DE KRIGAGEM ORDINÁRIA E DO INVERSO DA DISTÂNCIA, 2010.

[45] ZHOU, Xia. Wi-Fi 7, 2024. Disponível em: <https://support.huawei.com/enterprise/it/doc/EDOC1100331426>. Acesso em: 22 out. 2024.

[46] ZHU, Jin; WANG, Haiming; HONG, Wei. Large-scale fading characteristics of indoor channel at 45-GHz band. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, v. 14, p. 735-738, 2014.

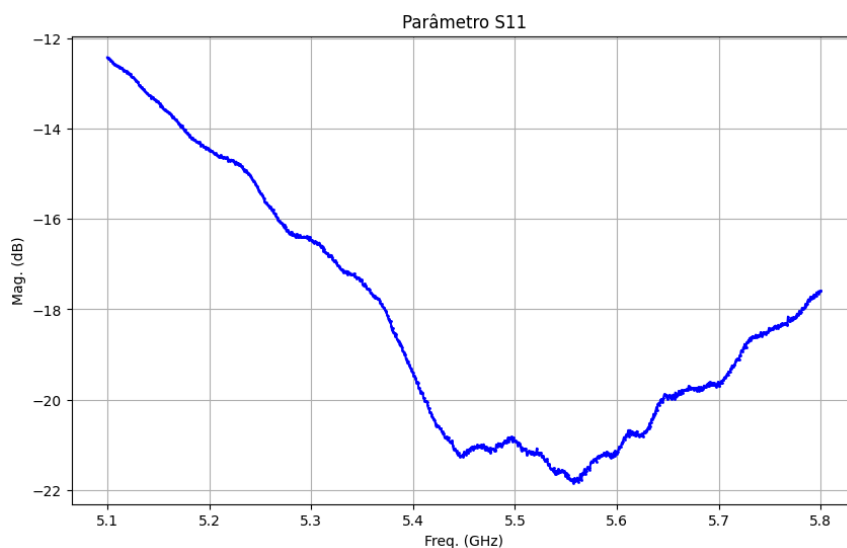
APÊNDICES

APÊNDICE A — Curva da perda de retorno obtida pelo analisador de rede *Agilent Technologies E5061B ENA Series Network Analyzer*.



Fonte: O próprio autor.

APÊNDICE B — Curva da perda de retorno obtida pelo analisador de rede *Keysight ENA Network Analyzer E5080B*.



Fonte: O próprio autor.

APÊNDICE C — FSH3: PAVIMENTO TÉRREO CORD. X, CORD. Y, RSSI (1, 6, 11).

-132639.2, -62107.1, -62.53 -97751.3, -70870.4, -41.92 -97506, -90695.2, -65.35
 -129284.6, -62141.6, -55.88 -98509.7, -72471.9, -59.41 -101873.3, -87143.3, -65.88
 -125757.1, -62107.1, -54.42 -102227.2, -73302.1, -62.27 -101672.9, -83192.5, -65.84
 -132588.8, -65075.6, -57.08 -102261, -76731.7, -61.25 -98760.2, -86771.1, -65.87
 -129234.2, -65110.2, -54.63 -102078.2, -79446.8, -65.93 -95587.6, -79752, -64.19
 -125706.7, -65075.6, -50.01 -98818.1, -80887, -65.49 -95566, -86821.5, -57.48
 -132152.5, -68977, -46.32 -98868.9, -76726.6, -60.72 -95579.2, -93360.5, -55.45
 -129068.3, -68998.6, -51.85 -95002.4, -70719.6, -41.17 -93327.4, -92905, -48.63
 -125552.8, -69149.4, -46.37 -95451.9, -75406.6, -61.98 -88418.6, -92811, -47.80
 -121913.4, -61783.5, -54.36 -95581, -79386.9, -61.89 -85020.9, -92931.7, -47.69
 -111400.2, -62025.3, -61.70 -131896.8, -84278.3, -66.01 -91785.1, -84081.9, -64.99
 -116518.5, -64408.5, -54.71 -121095.5, -84278.3, -65.12 -85204.3, -83983.8, -62.50
 -121878.8, -67586.2, -57.57 -131751.9, -90503.1, -66.08 -91959, -89727.9, -64.70
 -111400.2, -67664.2, -60.27 -120950.6, -90503.1, -58.28 -85378.2, -89629.8, -56.40
 -106472.3, -62420.6, -64.04 -117934.6, -84920.3, -65.09 -78204.8, -84798.4, -61.94
 -106596.4, -67537.6, -63.19 -117903.1, -90142.6, -54.29 -78422.5, -90797.9, -59.72
 -100957.9, -61845.2, -60.81 -115344.1, -90089, -48.54 -68392.9, -85063.2, -61.87
 -88689.2, -62134.4, -62.34 -114017.7, -84017.7, -65.05 -68610.5, -91062.7, -64.24
 -100858.9, -67134.1, -51.43 -106037.1, -84017.7, -63.89 -56383.6, -85101, -65.43
 -88590.2, -67423.3, -63.76 -113076.2, -88386, -51.45 -56601.3, -91100.5, -64.73
 -123511.9, -70878.7, -43.51 -105095.6, -88386, -64.92
 -119025.5, -70864.7, -33.91 -118274.3, -92904.5, -41.58
 -114194.6, -70842.7, -47.84 -113960.8, -92780.8, -39.82
 -113752.6, -70845.9, -44.46 -109069.6, -92863.3, -53.22
 -108990.4, -70829, -56.33 -103951.4, -92780.8, -56.89
 -104140.3, -70893.6, -51.28 -102895.8, -90695.2, -62.89
 -103543.1, -70881.5, -51.82 -99873.3, -90695.2, -62.27

Fonte: O próprio autor.

APÊNDICE D — FSH3: SEGUNDO PAVIMENTO CORD. X, CORD. Y, RSSI (1, 6, 11).

-22395.7, -61132.3, -48.85 2390.1, -67921.6, -51.35 12205.5, -76861.1, -52.14 -223.1, -89896.3, -45.02 53178.5, -83167.1, -51.16
 -22477.1, -65115.9, -46.13 5650.7, -67782.5, -54.36 9094.7, -76895, -63.85 2292.6, -90054.6, -62.79 53146.9, -86165.2, -57.65
 -22391, -68434.7, -50.55 6987, -68063.2, -43.53 11212, -79407.3, -62.50 4426.7, -83213.2, -63.01 56212, -83103.9, -60.91
 -19872.4, -60996.9, -51.71 10482.7, -67940.4, -40.96 8195.8, -79790.6, -60.02 4839.8, -87235.5, -61.20 56338.4, -85944.3, -50.71
 -20209.6, -63708.9, -40.32 7912.5, -61348, -50.87 11638.4, -81059.5, -65.61 5424.9, -89745.2, -62.43 52934.9, -88483.7, -39.25
 -20252.2, -67852.9, -37.55 15145.5, -61392.9, -40.79 14769.2, -70553.7, -45.39 -23388.7, -92810.5, -65.71 57461.9, -88376.1, -45.48
 -14988.5, -61051.1, -49.79 8182, -65835, -40.48 14773.8, -77049.4, -48.46 -16712.3, -92802.4, -65.49 52901.6, -91752, -60.35
 -15271.4, -63736, -44.63 14965.8, -65879.9, -47.11 14751, -81887.2, -58.64 -10779.8, -92822.1, -65.56 56145.6, -91588.2, -62.70
 -15314.1, -67880, -41.75 17425.2, -61370.3, -43.97 -22900.6, -83917.3, -53.56 -4064.9, -92880.2, -65.64 57925.7, -83537, -53.35
 -12899.2, -60861.4, -58.85 20670.8, -61285, -48.16 -22985.3, -89692.7, -48.29 -3621.7, -92845.6, -65.49 57908, -85674.6, -47.51
 -9724.7, -60915.6, -61.32 22692.2, -61256.6, -57.94 -19786.9, -83938.5, -56.20 1218.2, -92844.4, -65.36 58970.4, -83553.9, -46.31
 -12980.6, -63706.8, -57.66 25653.2, -61256.6, -57.36 -19659.8, -89861.9, -46.61 6414.1, -92812.2, -65.84 61331.5, -83587.9, -63.36
 -9724.7, -63598.4, -54.52 18478.6, -63815.7, -49.20 -17827.7, -83930.1, -65.87 12494.3, -92935.6, -65.84 60541, -86107.3, -55.21
 -12899.2, -65820.5, -61.04 24514.3, -63559.8, -61.06 -17912.4, -89705.4, -65.08 11896.3, -86764.1, -65.85 60561.7, -88219.4, -50.69
 -9616.2, -65847.6, -61.01 18621, -67540.7, -47.17 -14714, -83951.2, -65.92 14727.7, -82444.1, -60.99 58547.9, -91475.3, -53.37
 -12845, -68422, -59.82 24400.5, -67853.5, -58.86 -14586.9, -89874.7, -63.32 14785.8, -86814, -62.86 61421, -91572, -58.60
 -9670.4, -68503.3, -53.33 -13303.4, -70880.7, -62.77 -13003.6, -83992.4, -66.54 14720.1, -93219.1, -60.54 8282.7, -84039.3, -65.84
 -7162.5, -61582.3, -61.96 -8853.7, -70950.9, -61.99 -13088.3, -89767.8, -66.70 17187, -92868, -65.96 11260.7, -83806.9, -65.57
 -7157.6, -63510.9, -62.47 -3917.1, -70840.2, -62.00 -9889.9, -84013.6, -66.57 21357.9, -92948.9, -65.72
 -7157.6, -65539.4, -58.02 -3530.1, -70846, -62.91 -9762.8, -89937.1, -56.12 18646.2, -83593.8, -63.45
 -7046.3, -67946.2, -54.86 1218.4, -70846, -60.94 -8033, -83965.7, -51.67 18676.4, -87785.8, -54.48
 -233.8, -61337.1, -61.47 6139, -70832.3, -50.54 -8117.7, -89741.1, -49.93 17649.8, -90711.1, -63.95
 -65.3, -63401.9, -61.57 6799.8, -70823.2, -52.87 -4919.3, -83986.9, -50.44 20729.7, -90741.2, -59.16
 -65.3, -65430.4, -61.96 12264.7, -70887.8, -38.67 -4792.2, -89910.4, -47.65 24866.4, -83412.9, -41.36
 38, -67693.8, -57.63 11391.3, -72580.1, -55.31 -2457.6, -83110.1, -57.31 25017.4, -87815.9, -58.76
 2445.9, -62132.3, -48.08 11324.4, -74376.4, -55.43 -2319.9, -87063.6, -59.87 22862.9, -91888.8, -54.06
 5511.3, -62243.6, -48.74 8000.6, -73569.9, -57.64 -2447.5, -89885.1, -39.77 25725.4, -91843, -53.73

Fonte: O próprio autor.

APÊNDICE E — N1996A: PAVIMENTO TÉRREO CORD. X, CORD. Y, RSSI (100, 116, 132, 134).

-133087.8, -65337.1, -68.22 -126596.7, -87395.3, -67.06
 -129104.8, -65412.6, -67.84 -121701.8, -87289, -65.00
 -125752.1, -65437.8, -67.63 -116584.1, -90089, -50.13
 -122275.3, -64453.4, -67.91 -113012.9, -85644.6, -65.41
 -116773.8, -64478.4, -67.97 -107491.9, -86665.8, -62.42
 -111147.2, -64278.6, -67.81 -118274.3, -92904.5, -41.11
 -106559.7, -62420.6, -67.00 -111210.5, -92863.3, -47.36
 -106591.9, -67391.3, -65.56 -103951.4, -92780.8, -53.81
 -102293.2, -64431.4, -60.86 -102793.4, -90929.2, -60.02
 -95342.3, -64479.3, -59.17 -100039.6, -90868.7, -66.38
 -89302.2, -64958.1, -64.06 -96976, -90799.8, -66.81
 -123511.9, -70878.7, -56.08 -98760.2, -86771.1, -65.16
 -117407.1, -70870.7, -49.39 -95558.6, -81356.6, -66.91
 -110280.3, -70842.7, -47.61 -95566, -86821.5, -67.38
 -109005, -70848.4, -59.06 -95579.2, -93360.5, -66.91
 -103889.3, -70893.6, -55.02 -93327.4, -92905, -57.30
 -98025.6, -70860.2, -39.05 -85020.9, -92931.7, -50.64
 -98509.7, -72471.9, -59.59 -91779.1, -86412.1, -62.98
 -102227.2, -73302.1, -67.94 -85198.2, -86314, -56.58
 -102261, -76731.7, -67.75 -81694.2, -88910.1, -62.72
 -98637.6, -76604.3, -66.06 -74233.7, -88656.4, -66.81
 -102078.2, -79446.8, -67.94 -65870.7, -88432.2, -67.78
 -98818.1, -80887, -67.56 -55990.1, -86477.9, -67.41
 -95002.4, -70719.6, -38.88
 -95451.9, -75406.6, -58.70
 -95581, -79905.3, -66.81
 -131864.1, -87501.6, -67.37

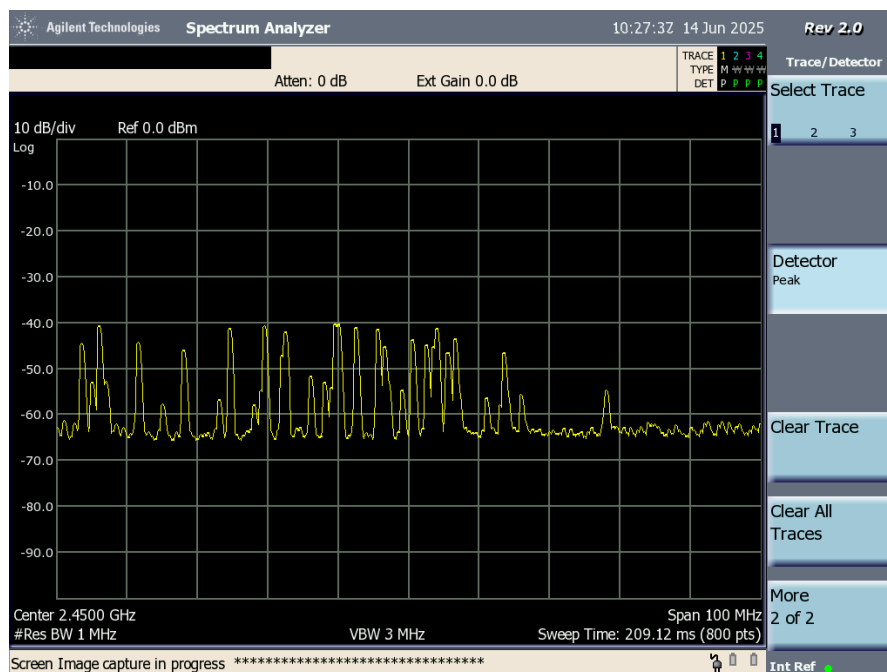
Fonte: O próprio autor.

APÊNDICE F — N1996A: SEGUNDO PAVIMENTO CORD. X, CORD. Y, RSSI (100, 116, 132, 134).

-18540, -62565.2, -47.27 14769.2, -70553.7, -38.88 57461.9, -88376.1, -42.31
 -18947.5, -69397.6, -35.69 14773.8, -77049.4, -58.70
 -11062.3, -62030, -51.97 14751.0, -81887.2, -66.81
 -11257.5, -67679.4, -57.92 -21151.9, -84842, -68.19
 -7068.1, -64546.6, -62.20 -21006.8, -89382.4, -68.03
 -3649.4, -64498.2, -57.81 -16170.6, -84745.4, -64.59
 52.1, -64440.4, -57.69 -16025.5, -89334.1, -65.22
 4162.4, -62748.9, -56.66 -10995.9, -84793.7, -65.66
 4209.7, -66972.8, -54.88 -10995.9, -89382.4, -67.81
 8796.3, -63995.8, -63.92 -5821.2, -84890.3, -67.56
 14241.7, -63922, -60.00 -5821.2, -89334.1, -68.28
 19194.7, -63467, -59.66 -2266.1, -84932.3, -68.16
 19064.5, -68546.4, -52.66 4900.3, -85005.5, -67.06
 23870.4, -63466.9, -67.78 -21611.9, -92810.5, -67.03
 24322.3, -68531.9, -67.59 -13949.4, -92847.3, -67.28
 -13303.4, -70880.7, -67.19 -4401.0, -92849.9, -68.34
 -6021.1, -70833.1, -64.97 -3190.8, -92840.1, -66.31
 1054.6, -70846, -65.66 4393.4, -92859.8, -67.97
 1560.6, -70846, -63.47 10695.7, -92882.6, -66.99
 6406.5, -70832.3, -55.58 14727.7, -82444.1, -66.81
 12144.1, -70823.2, -43.63 14785.8, -86814, -65.84
 11391.3, -72580.1, -59.25 14720.1, -93219.1, -66.81
 8000.6, -73569.9, -62.38 11896.3, -86764.1, -65.44
 10659.9, -76772.6, -66.91 19506.1, -92929.6, -67.69
 11326.8, -79421.0, -67.34 18963.7, -86007.6, -67.13
 8195.8, -79790.6, -67.09 24277.7, -86007.6, -67.06
 11638.4, -81059.5, -66.50 52934.9, -88483.7, -49.23

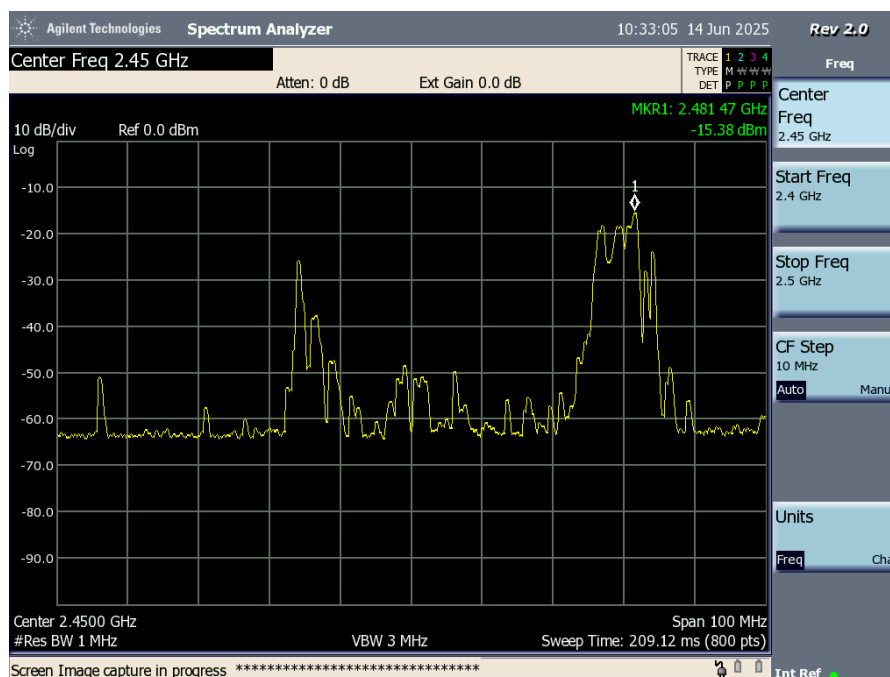
Fonte: O próprio autor.

APÊNDICE G — N1996A: Interferência eletromagnética causada pelo Bluetooth.



Fonte: O próprio autor.

APÊNDICE H — N1996A: Interferência eletromagnética causada pelo Micro-ondas.



Fonte: O próprio autor.