

Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Departamento de Computação e Sistemas

Caracterização de gargalos em redes 802.11 em ambientes de alta densidade: estudo de caso em WLAN universitária.

Igor Carvalho Guimarães

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ORIENTAÇÃO:
Marlon Paolo Lima

COORIENTAÇÃO:
Plínio Roque de Almeida

Novembro, 2026
João Monlevade–MG

Igor Carvalho Guimarães

Caracterização de gargalos em redes 802.11 em ambientes de alta densidade: estudo de caso em WLAN universitária.

Orientador: Marlon Paolo Lima

Coorientador: Plínio Roque de Almeida

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Computação do Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas, da Universidade Federal de Ouro Preto, como requisito parcial para aprovação na Disciplina "Trabalho de Conclusão de Curso II".

Universidade Federal de Ouro Preto

João Monlevade

Novembro de 2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

G963c Guimarães, Igor Carvalho.
Caracterização de gargalos em redes 802.11 em ambientes de alta densidade [manuscrito]: estudo de caso em WLAN universitária. / Igor Carvalho Guimarães. - 2026.
99 f.

Orientador: Prof. Dr. Marlon Paolo Lima.
Coorientador: Plínio Roque de Almeira Pessoa.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Graduação em Engenharia de Computação .

1. Estatística matemática. 2. Redes de computadores. 3. Redes locais sem fio. 4. Sistemas de comunicação sem fio. 5. Telemetria. I. Lima, Marlon Paolo. II. Pessoa, Plínio Roque de Almeira. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 004.7

Bibliotecário(a) Responsável: Flavia Reis - CRB6/2431

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
INSTITUTO DE CIENCIAS EXATAS E APLICADAS
DEPARTAMENTO DE COMPUTACAO E SISTEMAS

FOLHA DE APROVAÇÃO

Igor Carvalho Guimarães

Caracterização de gargalos em redes 802.11 em ambientes de alta densidade: estudo de caso em WLAN universitária

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Computação da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel.

Aprovada em 10 de novembro de 2026

Membros da banca

Doutor - Marlon Paolo Lima - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Bacharel - Plínio Roque de Almeida Pessoa - Coorientador - (Universidade Federal de Ouro Preto)
Doutor - Theo Silva Lins (Universidade Federal de Ouro Preto)
Doutor - Filipe Nunes Ribeiro (Universidade Federal de Ouro Preto)

Marlon Paolo Lima, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 23/11/2026

Documento assinado eletronicamente por **Marlon Paolo Lima**, **PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 23/11/2026, às 10:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0 , informando o código verificador **1236349** e o código CRC **F8D7C2AA**.

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35402-163
Telefone: - www.ufop.br

Dedico esta conquista à minha família, cujo amor, paciência e apoio incondicional para que eu pudesse trilhar esta jornada. Dedico também a aqueles que não se encontram mais entre nós

Agradecimentos

Aos meus familiares, amigos e companheiros de jornada, Jayanne, Sandy, Lorena, Renata, Matheus, Helen, Jessica, Pedro, Maria Alice, Rafael Suzuki, Rafael Pires, Fernando Novais, Matheus Fernandes, Osmane, Rosângela e Weder, que de diversas formas me apoiaram, motivaram e incentivaram a concluir esta etapa acadêmica. Cada palavra de apoio, momentos de descontração e a constante torcida foram fundamentais para conclusão desta graduação. O meu muito obrigado a todos vocês.

"Qual é o ser humano que vai progredir se ele não recebe estímulo?"

— Silvio Santos

Resumo

Este trabalho apresenta uma análise comparativa do desempenho de redes Wi-Fi corporativas (Ruckus e UniFi) utilizando telemetria física e lógica. Com base em um dataset de monitoramento efetivo coletado em um campus universitário de alta densidade (abrangendo datas entre 23/06/2026 e 16/10/2026, totalizando 48 a 49 dias letivos monitorados), contendo mais de 1,3 milhão de registros (1.349.925 amostras limpas: 1.202.408 da Ruckus e 147.517 da UniFi), o estudo propõe um pipeline estruturado de limpeza, testes estatísticos de hipóteses e classificação heurística e não-supervisionada de gargalos. Testes de Mann-Whitney revelaram disparidades significativas ($p < 0,001$) entre as bandas de 2,4 GHz e 5 GHz, e taxas de retransmissão discrepantes entre os fabricantes (UniFi com 20,4% vs. Ruckus com 5,7% em média). A classificação de gargalos com limiar calibrado de mobilidade (> 15 transições diárias) indicou que os limitadores mais incidentes foram o congestionamento do meio (G2) e a baixa qualidade física de enlace (G1), enquanto a instabilidade de roaming (G4) afetou 15,3% das amostras na Ruckus e 6,6% na UniFi, e a limitação física de cabeamento (G5) permaneceu residual ($\leq 0,01\%$). O algoritmo K-Means foi utilizado para identificar perfis operacionais de access points, cuja qualidade de agrupamento foi avaliada pelas métricas de Silhueta e Davies-Bouldin. A pesquisa contribui com uma metodologia reprodutível para a caracterização de condições associadas a potenciais gargalos em redes sem fio corporativas.

Palavras-chave: Telemetria de Rede. Wi-Fi Corporativo. K-Means. Análise Estatística. Diagnóstico de Gargalos.

Abstract

This work presents a comparative performance analysis of enterprise Wi-Fi networks (Ruckus and UniFi) using physical and logical telemetry. Based on an empirical dataset comprising effective telemetry monitoring collected in a high-density university campus (spanning from 23/06/2026 to 16/10/2026, totaling 48 to 49 monitored academic days), containing over 1.3 million records (1,349,925 clean samples: 1,202,408 from Ruckus and 147,517 from UniFi), the study proposes a structured pipeline for data cleaning, statistical hypothesis testing, and heuristic and unsupervised bottleneck classification. Mann-Whitney tests revealed significant disparities ($p < 0.001$) between the 2.4 GHz and 5 GHz bands, and discrepant retransmission rates between manufacturers (UniFi with 20.4% vs. Ruckus with 5.7% on average). Bottleneck classification with a calibrated mobility threshold (> 15 daily transitions) indicated that the most prevalent limiting factors were channel medium congestion (G2) and weak physical link quality (G1), while roaming instability (G4) affected 15.3% of samples in Ruckus and 6.6% in UniFi, and physical cabling bottleneck (G5) remained residual ($\leq 0.01\%$). The K-Means algorithm was employed to identify operational profiles of access points, whose clustering quality was evaluated by Silhouette and Davies-Bouldin metrics. This research contributes a reproducible methodology for characterizing conditions associated with potential bottlenecks in enterprise wireless networks.

Keywords: Network Telemetry. Enterprise Wi-Fi. K-Means. Statistical Analysis. Bottleneck Diagnosis.

Lista de Figuras

Figura 1 – Distribuição acumulada das trocas diárias de AP por cliente 38
Figura 2 – Painel do Grafana para monitoramento de clientes conectados (Ruckus) 45
Figura 3 – Painel do Grafana para monitoramento de conexões de usuários (UniFi) 46
Figura 4 – Boxplot do sinal recebido (dBm) por fabricante 52
Figura 5 – Histograma do sinal recebido (dBm) 53
Figura 6 – Histograma de Canais 54
Figura 7 – Histograma Clientes por AP 55
Figura 8 – Boxplot Throughput por Banda 56
Figura 9 – Boxplot Retransmissões por Banda 56
Figura 10 – Boxplot Throughput por AP 57
Figura 11 – Heatmap de Clientes Únicos 58
Figura 12 – Matriz de Correlação Heatmap 60
Figura 13 – RSSI x Throughput 61
Figura 14 – RSSI x Retransmissões 62
Figura 15 – Retransmissões x Throughput 63
Figura 16 – Clientes x Throughput Agregado 64
Figura 17 – Clientes x Retransmissões AP 65
Figura 18 – Noise x Retransmissões 66
Figura 19 – Noise x RSSI 66
Figura 20 – Link Speed x Throughput 67
Figura 21 – Tempo de Sessão x Volume Ruckus 68
Figura 22 – Comparação de Bandas Ruckus 70
Figura 23 – Comparação de Fabricantes Geral 71
Figura 24 – Comparação de Fabricantes 2.4 GHz 72
Figura 25 – Clusterização Ruckus 82
Figura 26 – Clusterização UniFi 83
Figura 27 – Painéis do Grafana para histórico de desconexões e distribuição de clientes por AP (Ruckus) 94
Figura 28 – Painéis do Grafana para evolução temporal e distribuição espectral de rádios (Ruckus) 94
Figura 29 – Painéis do Grafana para throughput por frequência e diagnósticos operacionais (Ruckus) 95
Figura 30 – Painel do Grafana para consumo acumulado de tráfego por usuário (UniFi) 95

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Tabela Comparativa de Trabalhos Relacionados 28
Tabela 2 – Quantidade de Registros 46
Tabela 3 – Período Coberto pela Coleta 47
Tabela 4 – Dados Ausentes (Missing Values) 47
Tabela 5 – Equivalência de Métricas (Mapeamento Ruckus vs UniFi) 49
Tabela 6 – Tabela Geral de Estatísticas Descritivas 50
Tabela 7 – Tabela Consolidada de Coeficientes de Pearson (r_p) e Spearman (r_s) 59
Tabela 8 – Tabela Consolidada de Testes de Hipótese 69
Tabela 9 – Tabela Detalhada dos Testes de Hipótese 73
Tabela 10 – Tabela Geral de Ocorrência e Impacto de Gargalos 76
Tabela 11 – Rede Ruckus (APs MAC Simplificados) 76
Tabela 12 – Rede UniFi (APs Cadastrados) 76
Tabela 13 – Perfis de Rádios Ruckus 80
Tabela 14 – Perfis de Rádios UniFi 81
Tabela 15 – Mapeamento de OIDs SNMP Utilizados na Coleta Ruckus 97
Tabela 16 – Endpoints da API REST Utilizados na Coleta UniFi 98

Lista de abreviaturas e siglas

ACK	*Acknowledgement*
AP	*Access Point*
API	*Application Programming Interface*
BER	*Bit Error Rate*
BPSK	*Binary Phase Shift Keying*
CCQ	*Client Connection Quality*
CDF	*Cumulative Distribution Function*
CRC	*Cyclic Redundancy Check*
CSMA/CA	*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*
CSV	*Comma-Separated Values*
DBSCAN	*Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise*
DHCP	*Dynamic Host Configuration Protocol*
DIFS	*Distributed Coordination Function Interframe Space*
FEC	*Forward Error Correction*
HTTP	*Hypertext Transfer Protocol*
ICEA	Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
IEEE	*Institute of Electrical and Electronics Engineers*
IP	*Internet Protocol*
IS	Intensidade de Sinal
JSON	*JavaScript Object Notation*
LGPD	Lei Geral de Proteção de Dados
MAC	*Medium Access Control*
MCS	*Modulation and Coding Scheme*

MIB	*Management Information Base*
MIMO	*Multiple-Input Multiple-Output*
ML	*Machine Learning*
MU-MIMO	*Multi-User Multiple-Input Multiple-Output*
OFDMA	*Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*
OID	*Object Identifier*
PHY	*Physical Layer*
PLCP	*Physical Layer Convergence Procedure*
QAM	*Quadrature Amplitude Modulation*
QoS	*Quality of Service*
QPSK	*Quadrature Phase Shift Keying*
RADIUS	*Remote Authentication Dial-In User Service*
REST	*Representational State Transfer*
RF	Radiofrequência
RSSI	*Received Signal Strength Indicator*
RX	Recepção (*Reception*)
SIFS	*Short Interframe Space*
SNMP	*Simple Network Management Protocol*
SNR	*Signal-to-Noise Ratio*
SSID	*Service Set Identifier*
TCP	*Transmission Control Protocol*
TI	Tecnologia da Informação
TX	Transmissão (*Transmission*)
UAP	*UniFi Access Point*
UFOP	Universidade Federal de Ouro Preto
UTC	*Coordinated Universal Time*

VLAN	*Virtual Local Area Network*
WLAN	*Wireless Local Area Network*
WPA2	*Wi-Fi Protected Access 2*
WPA3	*Wi-Fi Protected Access 3*

Sumário

1 INTRODUÇÃO 18
1.1 Contextualização 18
1.2 Problema de Pesquisa 19
1.3 Objetivos 19
1.4 Justificativa 20
1.5 Organização do trabalho 20

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 22
2.1 Redes WLAN e o Padrão IEEE 802.11 22
2.2 Camadas PHY e MAC em Wi-Fi 22
2.3 Interferência e Eficiência Espectral 23
2.4 Métricas de Desempenho e Telemetria 24
2.5 Mecanismos de Gerência e Conceitos Avançados de RF 24
2.5.1 Distinção Conceitual: PHY Rate, Link Speed e Throughput 25
2.5.2 Compartilhamento do Meio Físico: Airtime 25
2.5.3 Utilização de Canal (Channel Utilization) 26
2.5.4 Roaming e Fenômenos de Associação: Sticky Client e Band Steering 26
2.6 Trabalhos Relacionados 27

3 METODOLOGIA 30
3.1 Limitação de Escopo e Validade dos Resultados 31
3.1.1 Comparabilidade entre as redes Ruckus e UniFi 31
3.2 Estratégia de Coleta de Dados 32
3.3 Construção e Alinhamento do Dataset 32
3.4 Pipeline de Processamento e Análise de Dados 33
3.5 Definição das Métricas de Análise 35
3.5.1 Modelagem e Justificativa dos Limiares de Gargalos (G1 a G5) 35
3.6 Estratégia de Análise Estatística 38
3.6.1 Coeficientes de Correlação de Pearson e Spearman 38
3.6.2 Pressupostos de Normalidade e Escolha de Testes Comparativos 39
3.6.3 Teste U de Mann-Whitney e Cálculo do Tamanho do Efeito 40
3.6.4 Agrupamento Não-Supervisionado (K-Means) 41
3.6.5 Justificativa de Escolha do Algoritmo de Clusterização 42
3.7 Hipóteses de Pesquisa 43

4 COLETA E TRATAMENTO DOS DADOS 44

4.1 Ferramentas e Infraestrutura de Rede . . . 44
4.1.1 Firewall (pfSense) . . . 44
4.1.2 Controladora Ruckus (SmartZone) . . . 44
4.1.3 Controladora UniFi (UniFi Controller) . . . 44
4.1.4 Plataforma de Visualização (Grafana) . . . 45
4.1.5 Scripts de Coleta Telemétrica . . . 46
4.2 Limpeza e Tratamento dos Dados . . . 46
4.3 Validação de Consistência dos Dados . . . 46
4.3.1 Quantidade de Registros . . . 46
4.3.2 Período Coberto pela Coleta . . . 47
4.3.3 Dados Ausentes (Missing Values) . . . 47
4.3.4 Tratamento de Valores Nulos . . . 48
4.3.5 Padronização das Unidades de Medida . . . 48
4.3.6 Equivalência de Métricas (Mapeamento Ruckus vs UniFi) . . . 49

5 ANÁLISE DOS DADOS . . . 50
5.1 Estatística Descritiva . . . 50
5.1.1 Tabela Geral de Estatísticas Descritivas . . . 50
5.1.2 Principais Descobertas e Comparações . . . 50
5.2 Visualização dos Dados . . . 51
5.2.1 Intensidade do Sinal por Fabricante . . . 51
5.2.1.1 Boxplot de Sinal Físico por Fabricante . . . 51
5.2.1.2 Histograma de Densidade de Sinal . . . 52
5.2.2 Utilização de Canais por Fabricante . . . 53
5.2.3 Quantidade de Clientes Conectados por AP . . . 54
5.2.4 Análise de Desempenho e Qualidade de Enlace por Banda . . . 55
5.2.4.1 Throughput por Banda . . . 55
5.2.4.2 Retransmissões por Banda . . . 56
5.2.5 Distribuição de Throughput Agregado por AP . . . 57
5.2.6 Distribuição Temporal de Clientes Únicos no Campus . . . 58
5.3 Análise de Correlações . . . 59
5.3.1 Tabela Consolidada de Coeficientes de Pearson (r_p) e Spearman (r_s) . . . 59
5.3.2 Interpretação da Matriz de Correlação (Heatmap Geral) . . . 60
5.3.3 Discussão dos Gráficos de Dispersão e Regressão Linear . . . 61
5.3.3.1 Relação entre Intensidade de Sinal (RSSI) e Vazão (Throughput) . . . 61
5.3.3.2 Relação entre Intensidade de Sinal (RSSI) e Taxa de Retransmissão de Quadros . . . 62
5.3.3.3 Impacto das Retransmissões sobre a Vazão de Throughput do Cliente . . . 63
5.3.3.4 Relação entre Quantidade de Clientes e Vazão Agregada do Access Point . . . 63
5.3.3.5 Relação entre Densidade de Clientes e Taxa de Retransmissão Agregada do AP . . . 64
5.3.3.6 Influência do Ruído de Fundo (Noise) sobre as Retransmissões de Quadros . . . 65

5.3.3.7 Relação entre Ruído de Fundo (Noise) e Intensidade de Sinal (RSSI) 66
5.3.3.8 Influência da Velocidade de Modulação Física (Link Speed) sobre o Throughput de Transmissão 67
5.3.3.9 Relação entre Volume Total de Dados Trafegados e Tempo de Sessão do Cliente 67
5.4 Testes Estatísticos de Hipótese 68
5.4.1 Tabela Consolidada de Testes de Hipótese 69
5.4.2 Discussão Detalhada das Comparações 70
5.4.2.1 Comparação de Bandas (2,4 GHz vs 5 GHz) 70
5.4.2.1.1 Ruckus 70
5.4.2.2 Comparação de Fabricantes (Ruckus vs UniFi) 71
5.4.2.2.1 Geral 71
5.4.2.2.2 Comparações por Banda de 2,4 GHz (Isolado) 72
5.4.2.2.3 Comparações por Banda de 5 GHz (Isolado) 72
5.4.3 Tabela Detalhada dos Testes de Hipótese 72

6 CLASSIFICAÇÃO DOS GARGALOS 74
6.1 Classificação de Gargalos Baseada em Limiares 74
6.2 Agrupamento Operacional de Access Points (K-Means) 74
6.3 Classificação de Gargalos de Rede 75
6.3.1 Limiares de Decisão Estabelecidos 75
6.3.2 Tabela Geral de Ocorrência e Impacto de Gargalos 75
6.3.3 Análise de Desempenho e Carga por Access Point 76
6.3.3.1 Rede Ruckus (APs MAC Simplificados) 76
6.3.3.2 Rede UniFi (APs Cadastrados) 76
6.3.4 Análise de Distribuição e Frequência 77
6.3.5 Análise de Consequências e Hipóteses 77
6.3.5.1 Impacto no Throughput 77
6.3.5.2 Impacto nas Retransmissões 78
6.3.6 Clusterização e Perfil Operacional dos Access Points (K-Means) 79
6.3.6.1 Perfis de Rádios Ruckus 80
6.3.6.2 Perfis de Rádios UniFi 81
6.3.6.3 Gráficos de Dispersão dos Clusters de APs 82

7 RECOMENDAÇÕES E AÇÕES DE VERIFICAÇÃO 84
7.1 Mitigação de Cobertura Atenuada (G1) 84
7.2 Alívio de Congestionamento de Usuários (G2) 84
7.3 Otimização de Canais e Controle de Interferência (G3) 85
7.4 Estabilização de Roaming e Clientes Aderentes (G4) 85
7.5 Planejamento de Evolução de Cabeamento (G5) 86

8 CONCLUSÃO 87
8.1 Síntese dos Principais Resultados 87
8.2 Limitações do Trabalho 87
8.3 Propostas de Trabalhos Futuros 88

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 89

APÊNDICES 91

APÊNDICE A – REPOSITÓRIO DO PROJETO E CÓDIGOS DE SUPORTE 92
A.1 Acesso ao Repositório GitHub 92
A.2 Estrutura de Scripts de Processamento 92

APÊNDICE B – PAINÉIS DE MONITORAMENTO OPERACIONAL (GRAFANA) 94
B.1 Painéis do Ecossistema Ruckus Wireless 94
B.2 Painéis do Ecossistema Ubiquiti UniFi 95

ANEXOS 96

ANEXO A – TABELA DE *MIBS* SNMP RUCKUS WIRELESS . . 97

ANEXO B – ENDPOINTS DA API DO UNIFI CONTROLLER . . 98

1 Introdução

Nos últimos anos, a infraestrutura de redes locais sem fio (*Wireless Local Area Networks* – WLANs) tornou-se um recurso de utilidade essencial para o ecossistema das instituições de ensino superior. Em ambientes universitários, como nos *campi* da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), a rede Wi-Fi suporta uma vasta gama de atividades pedagógicas, administrativas e científicas. A demanda contínua por conectividade, impulsionada pela diversidade de dispositivos móveis dos usuários, impõe aos administradores de rede o desafio de monitorar e manter a qualidade do serviço oferecido. No Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas (ICEA), essa tarefa é feita sem uma política geral de Quality of Service (QoS): a única priorização configurada é a do acesso dos servidores da instituição (técnicos administrativos e docentes) à rede administrativa. Nesse cenário, o monitoramento do desempenho da rede sem fio torna-se uma das principais ferramentas para identificar e diagnosticar degradações.

Entretanto, diagnosticar anomalias e avaliar o desempenho em redes sem fio corporativas de grande porte é uma tarefa complexa. As WLANs acadêmicas frequentemente operam com equipamentos de múltiplos fabricantes, caracterizando ambientes de rede heterogêneos. A análise do comportamento físico desses canais requer o monitoramento constante de dados de telemetria, cuja extração e padronização impõem dificuldades metodológicas severas devido à disparidade de métricas e de frequências de amostragem oferecidas pelas controladoras de rede. Neste contexto, este trabalho investiga a integração e análise estatística de dados telemétricos das marcas Ruckus e UniFi na UFOP, visando classificar comportamentos operativos e gargalos de rede.

1.1 Contextualização

As redes corporativas contemporâneas operam sob o fenômeno da alta densidade de dispositivos. Ambientes acadêmicos representam cenários extremos desse perfil, onde centenas de usuários concorrem simultaneamente por recursos de radiofrequência (RF) em salas de aula, laboratórios e auditórios. A proliferação de dispositivos por usuário (como *smartphones*, *tablets* e *laptops*) sobrecarrega os Access Points (APs) e satura os canais físicos de transmissão. Nesses ambientes, os gargalos operacionais não se limitam apenas à atenuação do sinal eletromagnético, mas envolvem também a disputa pelo acesso ao meio, regulada pelo protocolo Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA), as interferências eletromagnéticas e as limitações da própria infraestrutura de cabeamento local (*backhaul*). A análise unificada de telemetria torna-se, assim, uma ferramenta importante para compreender o comportamento físico e operacional

desses sistemas.

1.2 Problema de Pesquisa

A heterogeneidade de hardwares e sistemas operacionais de gerência de rede representa um obstáculo para a manutenção preventiva e diagnóstico de problemas de conectividade. Enquanto a controladora Ruckus (utilizada na rede principal da UFOP) extrai dados consolidados que incluem a taxa física de retransmissão de pacotes diretamente do rádio, a controladora UniFi (empregada em áreas periféricas ou unidades de pesquisa) reporta a qualidade de enlace por meio de uma métrica estimada baseada no firmware denominada Client Connection Quality (CCQ). Além disso, os intervalos de coleta (*polling*) diferem significativamente, e inconsistências temporais relativas a fusos horários nos arquivos de registro (*logs*) dificultam correlações diretas.

Diante desse cenário, a ausência de um pipeline de dados unificado impede a classificação padronizada de gargalos. O administrador de rede carece de ferramentas metodológicas que permitam determinar se as quedas de desempenho percebidas pelos usuários decorrem de cobertura atenuada (sinal fraco), congestionamento físico do espectro (concorrência de meio por múltiplos clientes ativos) ou forte ruído e interferência eletromagnética (elevadas taxas de retransmissão sob baixa carga de tráfego). O problema central desta pesquisa consiste, portanto, em responder: de que forma a normalização de dados telemétricos e a aplicação de técnicas estatísticas e aprendizado de máquina podem unificar a caracterização operacional e a identificação/classificação de condições associadas a potenciais gargalos em uma infraestrutura Wi-Fi heterogênea?

1.3 Objetivos

O presente trabalho visa estabelecer um framework metodológico para o processamento unificado e a análise quantitativa de desempenho de redes sem fio.

O objetivo geral deste estudo consiste em desenvolver um pipeline sistemático de coleta, normalização, análise estatística e classificação de gargalos operacionais para redes corporativas Wi-Fi heterogêneas utilizando dados de telemetria nas dependências da UFOP.

Para atingir o objetivo geral, definem-se os seguintes objetivos específicos:

- Padronizar e normalizar bases de dados brutas de telemetria provenientes de fabricantes distintos (Ruckus e UniFi), realizando o alinhamento de fusos horários e de escalas temporais de coleta;

- Incorporar métricas analíticas avançadas na avaliação do desempenho da rede, especificamente computando o Índice de Equidade de Jain (*Jain's Fairness Index*) para mensurar o equilíbrio na distribuição da vazão (*throughput*) entre clientes concorrentes;
- Validar as hipóteses de comportamento físico das bandas de frequência (2,4 GHz e 5 GHz) e o impacto das condições de sinal sobre as taxas de retransmissão por meio de testes estatísticos de hipótese não-paramétricos;
- Classificar os gargalos operacionais dos pontos de acesso (*access points* – APs) a partir de limiares físicos e agrupamentos lógicos formados pelo algoritmo de aprendizado de máquina não-supervisionado *K-Means*.

1.4 Justificativa

A implementação de redes sem fio corporativas de grande escala representa investimentos financeiros expressivos para instituições públicas como a UFOP. Diagnosticar problemas baseando-se apenas em reclamações de usuários ou em painéis de gerência isolados induz a tomada de decisões de expansão de infraestrutura ineficientes (como instalar mais pontos de acesso em setores que sofrem de interferência eletromagnética co-canal, o que piora o cenário operacional).

Esta pesquisa justifica-se pela necessidade científica e operacional de formular um modelo determinístico e estatístico capaz de identificar evidências associadas a diferentes classes de gargalo. Ao classificar se a origem de um gargalo de rede é sinal físico fraco (G1), excesso de concorrência local (G2), poluição eletromagnética (G3), comportamento de roaming instável do cliente (G4) ou limitação física cabeada (G5), os administradores de tecnologia da informação conseguem direcionar recursos de otimização de espectro e aquisição de ativos com maior precisão e menor desperdício financeiro.

1.5 Organização do trabalho

O restante deste trabalho de conclusão está estruturado nos capítulos temáticos a seguir:

- O **Capítulo 2 (Fundamentação Teórica)** descreve os fundamentos físicos e lógicos das redes locais sem fio, o padrão IEEE 802.11, as métricas telemétricas e os trabalhos relacionados da literatura;
- O **Capítulo 3 (Metodologia)** detalha as estratégias de coleta de dados no campus, a modelagem matemática do Índice de Jain, os limiares heurísticos e o modelo de agrupamento operacional K-Means;

- O **Capítulo 4 (Coleta e Tratamento dos Dados)** expõe as ferramentas físicas e controladoras envolvidas na aquisição das informações, bem como a etapa de validação inicial e consistência dos datasets brutos;
- O **Capítulo 5 (Análise dos Dados)** agrupa a estatística descritiva, as visualizações de padrões temporais, o estudo de correlação cruzada e a validação formal dos testes estatísticos de hipóteses;
- O **Capítulo 6 (Classificação dos Gargalos)** reúne as regras heurísticas de decisão e os centróides operacionais K-Means, apresentando e discutindo os resultados da classificação automática dos APs;
- O **Capítulo 7 (Recomendações)** sugere intervenções técnicas de engenharia de rede baseadas nos problemas identificados no processamento;
- Por fim, o **Capítulo 8 (Conclusão)** resume os principais resultados, discute as limitações metodológicas e propõe temas de continuidade para trabalhos futuros.

2 Fundamentação Teórica

Este capítulo apresenta a base teórica e os conceitos fundamentais necessários para a compreensão e análise de desempenho de redes locais sem fio (*Wireless Local Area Networks* – WLANs). Abordam-se a evolução do padrão IEEE 802.11, o funcionamento físico e lógico das camadas PHY e MAC, os desafios operacionais de ambientes de alta densidade, e as métricas chaves de telemetria utilizadas para diagnóstico. Por fim, discute-se o posicionamento deste estudo em relação a trabalhos relacionados da literatura.

2.1 Redes WLAN e o Padrão IEEE 802.11

As redes WLAN baseiam-se na família de especificações técnicas do padrão internacional IEEE 802.11. Desde a sua primeira publicação em 1997, o padrão evoluiu significativamente para atender à crescente demanda por taxas de transmissão de dados elevadas e melhor eficiência espectral. As principais emendas comerciais incluem o 802.11b e 802.11g (operando na faixa de 2,4 GHz), o 802.11n (Wi-Fi 4, introduzindo multiplexação espacial MIMO e operando em ambas as faixas), o 802.11ac (Wi-Fi 5, operando exclusivamente em 5 GHz com canais mais largos e modulação superior), e o recente 802.11ax (Wi-Fi 6, que incorpora técnicas avançadas de acesso múltiplo como OFDMA).

2.2 Camadas PHY e MAC em Wi-Fi

O comportamento de uma rede Wi-Fi depende intimamente da coordenação entre as suas camadas Física (PHY) e de Controle de Acesso ao Meio (MAC):

- **Camada Física (PHY)**: Responsável pela modulação física dos bits em ondas de RF. A velocidade de ligação física (*Link Speed*) é definida pelo esquema de modulação e codificação (*Modulation and Coding Scheme* – MCS). Quanto mais densa a modulação, mais bits são transmitidos em cada símbolo e maior é a velocidade da ligação, mas também maior é a qualidade de sinal exigida para que o receptor consiga distingui-los. Assim, relações sinal-ruído (SNR) mais altas permitem o uso de modulações densas, como a 256-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) do 802.11ac, que transmite 8 bits por símbolo, enquanto atenuações severas levam o rádio a retroceder (*fallback*) para esquemas mais robustos e lentos, como BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) e QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*), que transmitem 1 e 2 bits por símbolo, respectivamente, reduzindo a capacidade do link (GAST, 2005). No ICEA, apenas os rádios de 5 GHz da Ruckus, por seguirem o padrão 802.11ac, podem

utilizar a 256-QAM; os APs UniFi, por serem 802.11n, limitam-se a modulações de até 64-QAM.

- **Camada MAC**: Responsável pela coordenação do acesso ao canal físico, que utiliza o protocolo de contenção distributiva CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*). Como o meio sem fio é um canal compartilhado em *half-duplex*, apenas um rádio (AP ou cliente) pode transmitir por vez em um dado canal e espaço de cobertura. A concorrência excessiva gera colisões no ar, forçando a retransmissão de quadros físicos e reduzindo o tempo de canal útil disponível (*airtime*).

Cenários de alta densidade corporativos (como campi universitários) caracterizam-se pelo elevado número de dispositivos clientes associados a um único AP ou distribuídos em células geograficamente sobrepostas. Nessas condições, as limitações do protocolo CSMA/CA tornam-se críticas: a contenção pelo canal cresce de forma exponencial com o número de clientes ativos. O aumento no tempo de espera (*backoff*) e a ocorrência frequente de colisões eletromagnéticas degradam drasticamente o desempenho individual de vazão, mesmo que os clientes estejam fisicamente próximos da antena do ponto de acesso e com excelente nível de sinal recebido. Nesse contexto, a análise de grandes volumes de dados de rede (*big data*) e a avaliação da Qualidade de Experiência (*Quality of Experience* – QoE) tornam-se ferramentas fundamentais para identificar e mitigar degradações em tempo real (QAIYUM; AZIZ; JAAFAR, 2016).

2.3 Interferência e Eficiência Espectral

A operação de WLANs é limitada pela disponibilidade de espectro nas faixas não licenciadas de 2,4 GHz e 5 GHz:

- **Banda de 2,4 GHz**: Possui largura de banda estreita, disponibilizando apenas 3 canais mutuamente não sobrepostos (1, 6 e 11) na maior parte das regulações. Trata-se de uma banda saturada, sujeita a interferências de outras redes Wi-Fi vizinhas (interferência co-canal e de canal adjacente) e de dispositivos não-802.11 (fornos micro-ondas, telefones sem fio e Bluetooth), o que resulta em alta taxa de colisão de pacotes.
- **Banda de 5 GHz**: Oferece um espectro muito mais amplo, com dezenas de canais não sobrepostos e maior atenuação de propagação no espaço livre e através de obstáculos físicos. Esta rápida atenuação natural atua como uma vantagem no controle de interferências, pois restringe o alcance da cobertura de cada célula e, consequentemente, reduz a ocorrência de interferência co-canal entre células vizinhas. Contudo, exige maior densidade física de antenas para evitar zonas de sombra (vales de cobertura).

2.4 Métricas de Desempenho e Telemetria

O diagnóstico operativo baseia-se na extração ativa de parâmetros de telemetria das controladoras. As grandezas físicas cruciais incluem:

- **Intensidade de Sinal (RSSI/IS)**: Potência absoluta recebida pelo rádio (dBm). Valores acima de -65 dBm indicam excelente sinal, enquanto marcas abaixo de -75 dBm representam conectividade marginal.
- **Ruído de Fundo (Noise)**: Potência do ruído térmico e eletromagnético ambiental (dBm). Determina o piso limitante do SNR.
- **Retransmissões de Quadros**: Percentual de pacotes físicos que precisaram ser reenviados. Na Ruckus, ela é obtida diretamente dos contadores de quadros transmitidos e retransmitidos. A UniFi não disponibiliza esses contadores; em seu lugar, a controladora informa o índice *Client Connection Quality* (CCQ), em escala de 0 a 1000, que reflete a qualidade da conexão de cada cliente. Neste trabalho, a taxa de retransmissão da UniFi é estimada a partir desse índice como $100 - CCQ/10$, o que a torna uma medida indireta e não estritamente equivalente à da Ruckus (ver o detalhamento junto à Equação 5.1).
- **Throughput (Vazão)**: Taxa efetiva de dados transferidos medida nos contadores físicos da controladora (Mbps), dividida entre Downstream (TX) e Upstream (RX). Ressalta-se que este parâmetro difere do *goodput* (vazão de dados úteis entregues exclusivamente na camada de aplicação). A garantia e o provimento de qualidade de serviço (*Quality of Service* – QoS) em redes IP dependem de estratégias de controle de vazão e priorização de tráfego, como serviços diferenciados (DiffServ) (dos Santos, 2017). Na rede do ICEA, contudo, não há uma política de QoS aplicada de forma geral, apenas a priorização do acesso dos servidores da instituição (técnicos administrativos e docentes) à rede administrativa; por isso, este trabalho não avalia mecanismos de QoS, e sim o desempenho observado sem eles.

2.5 Mecanismos de Gerência e Conceitos Avançados de RF

A análise de desempenho em redes sem fio corporativas exige a compreensão de fenômenos dinâmicos que ocorrem nas camadas Física (PHY) e de Controle de Acesso ao Meio (MAC). Nesta seção, apresentam-se os conceitos chaves de radiofrequência e mecanismos de gerência de espectro que fundamentam as discussões empíricas deste trabalho.

2.5.1 Distinção Conceitual: PHY Rate, Link Speed e Throughput

Um dos pontos mais críticos no diagnóstico de redes locais sem fio é a diferenciação entre as taxas de dados medidas nas diversas camadas do modelo de referência. A velocidade física do enlace (*Link Speed* ou *PHY Rate*) representa a taxa nominal bruta de transmissão de bits negociada no ar entre o rádio do Access Point e a placa de rede do dispositivo cliente. Ela é determinada pelo Esquema de Modulação e Codificação (*Modulation and Coding Scheme* – MCS), que define o tipo de modulação digital (ex: BPSK, QPSK, QAM), a taxa de codificação para correção direta de erros (FEC), a largura do canal de rádio (ex: 20, 40 ou 80 MHz) e a quantidade de fluxos espaciais MIMO ativos.

Por outro lado, a vazão útil (*Throughput*) representa a taxa líquida de dados úteis transferida com sucesso e efetivamente entregue à camada de aplicação. O throughput é inerentemente inferior à velocidade física do enlace devido a múltiplos fatores de sobrecarga de protocolo (overhead):

- Cabeçalhos de controle e sincronismo das camadas física (PLCP) e de enlace (MAC 802.11);
- Tempos de guarda e espaçamentos obrigatórios entre quadros (como SIFS e DIFS) exigidos pelo protocolo CSMA/CA;
- A necessidade de retransmissões físicas para recuperar quadros aéreos corrompidos ou perdidos no canal;
- A ociosidade do próprio usuário, uma vez que a vazão útil medida reflete diretamente a demanda instantânea das aplicações de software ativas, operando muito abaixo do limite físico do canal na maior parte do tempo.

2.5.2 Compartilhamento do Meio Físico: Airtime

Como as transmissões de rádio Wi-Fi ocorrem em um canal compartilhado em regime *half-duplex*, apenas um dispositivo (AP ou cliente) pode transmitir em uma determinada área de cobertura por vez. O recurso físico mais escasso e valioso em uma rede sem fio é o tempo de uso do canal de rádio, comumente denominado tempo de ar (*Airtime*).

O protocolo CSMA/CA tradicional concede direitos de transmissão com base no número de pacotes a serem enviados. Sob esse modelo, clientes que operam com velocidades de enlace baixas (dispositivos de legado operando sob padrões antigos como 802.11b/g ou localizados nas bordas de cobertura atenuadas) demandam muito mais tempo de ar para transmitir a mesma quantidade de dados do que clientes rápidos situados próximos ao AP. Esse fenômeno pode degradar a vazão global do rádio, pois os clientes rápidos passam a aguardar a liberação do meio pelos clientes lentos.

2.5.3 Utilização de Canal (Channel Utilization)

A Utilização de Canal (*Channel Utilization*) mede a fração de tempo total em que a portadora física de RF é percebida como ocupada pelo rádio receptor do Access Point. Essa ocupação é dividida em três parcelas principais:

- **Tráfego do próprio AP**: Tempo gasto transmitindo dados para os seus clientes ou recebendo dados deles;
- **Tráfego co-canal**: Energia detectada proveniente de transmissões legítimas de outros APs ou clientes vizinhos operando no mesmo canal lógico de rádio;
- **Ruído de Interferência**: Energia eletromagnética detectada no canal que não pode ser decodificada como um quadro 802.11 válido (provocada por redes de vizinhos distantes ou fontes não-Wi-Fi).

Taxas de utilização de canal acima de 50% indicam tendência de saturação do espectro local, resultando em aumento drástico dos tempos de espera de contenção (*backoff*) e colisões aéreas de quadros (Cisco Systems, 2020; GAST, 2005).

2.5.4 Roaming e Fenômenos de Associação: Sticky Client e Band Steering

Em redes sem fio centralizadas, a transição contínua de dispositivos móveis entre as células de cobertura de diferentes Access Points é coordenada por regras de associação e roaming:

- **Sticky Client (Cliente Aderente)**: Ocorre quando um dispositivo móvel afasta-se de seu AP original e, apesar de haver um AP mais próximo com sinal excelente, o dispositivo insiste em manter a conexão com o AP distante e atenuado. Como a modulação decai com a distância, esse cliente "grudento"passa a transmitir sob taxas físicas extremamente baixas, consumindo uma parcela desproporcional de *airtime* e deteriorando a capacidade útil global de ambos os APs.
- **Direcionamento de Banda (Band Steering)**: Trata-se de uma técnica de gerência espectral aplicada pela controladora para otimizar o uso das bandas de frequência. Como a faixa de 2,4 GHz é historicamente congestionada e saturada, o *Band Steering* detecta se o cliente possui rádio de dupla banda (capaz de operar em 5 GHz) e responde ativamente apenas aos seus pedidos de associação em 5 GHz, forçando o dispositivo a migrar para a banda mais limpa e de maior capacidade.

2.6 Trabalhos Relacionados

A literatura científica apresenta diversas abordagens para a caracterização de carga de trabalho e diagnóstico de anomalias em redes locais sem fio institucionais. A nível internacional, estudos seminais como o de Schwab e Bunt (2004) introduziram abordagens pioneiras para caracterizar redes WLAN de campus universitários combinando dados de fluxos de pacotes com dados de autenticação de servidores RADIUS. Recentemente, o comportamento e a carga das redes de campus também foram avaliados sob condições extremas de demanda, como demonstrado por Favale et al. (2020) na análise do tráfego de rede e plataformas de *e-learning* durante a pandemia.

Com o avanço dos sistemas de gerenciamento e a necessidade de diagnósticos mais dinâmicos, abordagens baseadas em telemetria em tempo real e inteligência artificial ganharam destaque. O trabalho de Vassilakis, Heliotis e Markakis (2021) apresenta uma revisão abrangente sobre a coleta de dados de rádio em redes de campus e a aplicação de modelos de aprendizado de máquina supervisionados e não-supervisionados para o diagnóstico preditivo de anomalias de RF. Paralelamente, Alves, Lima e Silva (2022) propuseram um framework baseado em limiares e análise de retransmissões (*retries*) para caracterizar o impacto da interferência e do congestionamento sobre a vazão útil de redes WLAN de alta densidade, evidenciando como a análise de contadores físicos do rádio pode antecipar a degradação da experiência do usuário.

No cenário particular da UFOP, monografias e relatórios técnicos locais serviram de base histórica e motivadora para o monitoramento de tráfego e infraestrutura de rede sem fio no campus do ICEA:

- **Lage (2015)**: Em seu trabalho de conclusão de curso, Lage (2015) realizou uma análise passiva e caracterização do tráfego web da UFOP a partir de registros de logs HTTP obtidos nos gateways da instituição. O foco do estudo baseou-se na identificação de perfis de navegação, mapeamento de sessões de usuários, estatísticas de download e classificação dos domínios mais acessados. O autor utilizou scripts em Shell Script para a mineração dos logs brutos e o software Gnuplot para a representação das distribuições cumulativas de probabilidade (CDF). Trata-se de uma caracterização focada essencialmente na camada de aplicação e no comportamento de navegação;
- **Silva (2017)**: Posteriormente, Silva (2017) investigou a infraestrutura de rede sem fio institucional denominada "Minha UFOP Wifi", que operava sob a arquitetura de software livre (FreeRADIUS, Chillispot e SCIFI/OpenWRT). O autor desenvolveu um coletor em Python para monitorar incrementalmente a cada 5 minutos a base de dados de contabilidade (RADIUS Accounting). A partir desses registros, caracterizou a carga de trabalho de rede sem fio quantificando a evolução histórica do número

de usuários únicos, dispositivos ativos por usuário, tempo de duração das conexões e volume de tráfego de upload e download consumido ao longo de um mês de observação acadêmica. Complementando a caracterização de sessões, relatórios adicionais detalharam a arquitetura e testes preliminares do provimento de cobertura da rede (SILVA; LIMA; LINS, 2017);

- **dos Santos e Lima (2020)**: No próprio campus do ICEA, além dos estudos de sessões de autenticação, dos Santos e Lima (2020) conduziram relatórios técnicos focados na análise direta de desempenho e capacidade do sinal físico da rede sem fio local, mapeando a cobertura e a qualidade das conexões nas dependências do instituto.

Para melhor situar as contribuições deste estudo frente ao estado da arte, a Tabela 1 apresenta uma comparação estruturada das abordagens discutidas.

Tabela 1 – Tabela Comparativa de Trabalhos Relacionados

Trabalho	**Escopo de Coleta**	**Técnicas Utilizadas**	**Foco do Diagnóstico**
Schwab e Bunt (2004)	Logs de autenticação RADIUS e fluxos de pacotes IP	Estatística Descritiva e CDFs	Caracterização de sessões e tráfego acadêmico geral
Lage (2015)	Logs HTTP de gateways de borda	Shell Script e Gnuplot	Perfis de navegação na camada de aplicação
Silva (2017)	Logs de contabilidade RADIUS Accounting	Script Python	Estatísticas de conexão e volume de tráfego histórico
Favale et al. (2020)	Telemetria IP de roteadores e servidores	Análise de Séries Temporais	Impacto de e-learning durante a pandemia
Vassilakis, Heliotis e Markakis (2021)	Telemetria SNMP de APs e RF	Modelos de ML e Classificação	Diagnóstico de anomalias em tempo real de RF
Alves, Lima e Silva (2022)	Contadores de rádio, retries e SNR	Regras de decisão e limiares de rádio	Impacto de retransmissões na vazão prática
Este Trabalho	Telemetria heterogênea de APs (Ruckus e UniFi)	Heurísticas de decisão de QoS e agrupamento K-Means	Classificação e validação de gargalos físicos e lógicos (G1 a G5)

Fonte: Produzido pelos autores (2026).

Embora as pesquisas de caracterização e os relatórios locais tenham contribuído significativamente para a gerência da rede do campus, elas apresentam limitações que este trabalho visa preencher. O estudo de Lage (2015) limitou-se ao tráfego de aplicação web em redes cabeadas e sem fio, sem distinguir o comportamento de rádio das conexões. Por sua vez, a caracterização de Silva (2017) baseou-se exclusivamente em logs de contabilidade administrativa do RADIUS, que registram apenas as médias e totais de sessões de conexão após o seu encerramento. Tais dados inviabilizam o diagnóstico fino do estado do rádio em tempo real e não refletem o comportamento físico do canal eletromagnético.

O diferencial do presente trabalho em relação às pesquisas locais anteriores e à literatura corporativa geral reside nos seguintes pontos:

1. **Heterogeneidade de Fabricantes**: O pipeline desenvolvido é capaz de unificar e correlacionar telemetrias de fabricantes distintos (Ruckus e UniFi) com métricas

e frequências de amostragem discrepantes, o que não foi abordado nos estudos anteriores;

2. **Análise Multicamadas (Física e MAC)**: Em vez de se limitar a volumes de dados ou logs de autenticação, este estudo investiga parâmetros de tempo de execução como sinal físico recebido (*Signal*/RSSI), ruído de fundo (*Noise*), retransmissões de quadros eletromagnéticos e CCQ;

3. **Classificação de Gargalos Inteligente**: O framework propõe a formulação de um classificador por limiares determinísticos de QoS para identificar condições associadas a potenciais gargalos (sinal fraco G1, saturação de clientes G2, interferência G3, roaming excessivo G4 ou limitação cabeada G5), validando e agrupando os rádios sem intervenção manual por meio do algoritmo de agrupamento não-supervisionado *K-Means*.

3 Metodologia

Este capítulo apresenta a abordagem metodológica adotada para a modelagem, a estruturação e o pipeline de análise estatística de dados de telemetria das redes sem fio. Descreve-se o ambiente de estudo, as estratégias empregadas para coleta e alinhamento temporal, a modelagem da equidade de compartilhamento pelo Índice de Jain, bem como as técnicas quantitativas de inferência e agrupamento utilizadas.

O estudo foi conduzido utilizando dados experimentais coletados na infraestrutura de rede corporativa sem fio ativa do ICEA. O ambiente de coleta abrange setores administrativos, bibliotecas e salas de aula de múltiplos blocos acadêmicos do campus. Essa infraestrutura caracteriza-se pela coexistência de equipamentos de dois fabricantes principais, totalizando 43 pontos de acesso catalogados ao longo das duas fases de monitoramento (operando com aproximadamente 40 APs simultâneos ativos em regime contínuo):

- A rede corporativa principal é baseada em 24 pontos de acesso da marca Ruckus Wireless, modelo ZoneFlex R600 (suportando MIMO 3x3:3 e o padrão 802.11ac Wave 1), gerenciados centralizadamente por uma controladora SmartZone rodando a versão de firmware v5.2. Esta infraestrutura atende aos prédios do campus com maior fluxo acadêmico, cobrindo áreas caracterizadas por alta densidade e concentração de alunos, como salas de aula, auditórios e a biblioteca. O rádio em 2,4 GHz é configurado com largura de canal fixa de 20 MHz e o rádio em 5 GHz opera com largura de canal de 40 MHz;
- Laboratórios de pesquisa, salas de professores e setores administrativos utilizam 19 pontos de acesso da marca Ubiquiti UniFi. Essa infraestrutura é composta majoritariamente por modelos legados da marca, como o UniFi AP (UAP) clássico (identificado internamente nos logs telemétricos sob a especificação de hardware *BZ2*, operando apenas na banda de 2,4 GHz sob o padrão 802.11n com MIMO 2x2:2) e dispositivos PicoStation M2 HP convertidos para o ecossistema UniFi (identificados internamente sob a especificação de hardware *p2N*, operando em 2,4 GHz e padrão 802.11n), gerenciados por um servidor UniFi Controller rodando a versão de software v7.3.

Do ponto de vista do *backhaul* cabeado, cumpre destacar o perfil das interfaces físicas de rede dos equipamentos: enquanto os APs Ruckus ZoneFlex R600 possuem interfaces de rede físicas compatíveis com Gigabit Ethernet (10/100/1000 Mbps) nativas, os modelos UniFi observados (UAP clássico e PicoStation M2) são limitados de fábrica por

hardware a portas de 100 Mbps (Fast Ethernet). Adicionalmente, os switches de acesso instalados nos racks do campus operam com portas físicas limitadas a 100 Mbps (Fast Ethernet). Assim, o uplink cabeado de ambas as redes sem fio sob análise é restringido ao mesmo limite físico de 100 Mbps, embora no caso da Ruckus isso seja provocado pela infraestrutura de switches da UFOP e, na UniFi, pela limitação nativa do hardware legado.

Essa coexistência de plataformas distintas no mesmo espaço físico-acadêmico constitui um ambiente ideal para o desenvolvimento de um pipeline analítico de comparação heterogênea.

3.1 Limitação de Escopo e Validade dos Resultados

As conclusões e discussões empíricas apresentadas nesta pesquisa baseiam-se estritamente no cenário físico e no conjunto de dados telemétricos observados durante o período de coleta na infraestrutura ativa do ICEA. A coleta foi realizada entre 23/06/2026 e 16/10/2026, totalizando 48 dias com registros na Ruckus e 49 na UniFi (Tabela 3) e cerca de 1,35 milhão de registros de telemetria após a limpeza. Por limitações de tempo para a conclusão deste trabalho, não foi possível estender a coleta a um semestre letivo completo. Ainda assim, o volume de dados obtido é considerável e o período abrange tanto a fase final do semestre letivo quanto o retorno das atividades após o recesso intersemestral (Figura 11), momentos que, em geral, concentram maior movimento no campus, com picos de mais de 600 clientes simultâneos. Dessa forma, as discussões fornecem indicações sobre o comportamento da rede sem fio sob carga real de usuários, mas refletem os padrões específicos desse período e não devem ser generalizadas de forma irrestrita para outras épocas do ano letivo ou para outras instalações das marcas estudadas.

3.1.1 Comparabilidade entre as redes Ruckus e UniFi

Outra limitação importante diz respeito à comparação entre as duas redes. Embora ambas ofereçam o mesmo serviço, as diferenças entre elas vão além da marca dos equipamentos, o que torna a comparação direta semelhante a comparar grandezas de naturezas distintas:

- **Geração e recursos do hardware**: os APs Ruckus R600 seguem o padrão 802.11ac, operam em 2,4 e 5 GHz com MIMO 3x3:3, possuem antenas adaptativas (BeamFlex+) e portas Gigabit Ethernet; os APs UniFi observados são modelos legados 802.11n, restritos à banda de 2,4 GHz e com portas Fast Ethernet;
- **Ambientes e perfis de usuários**: a rede Ruckus atende principalmente salas de aula, auditórios e a biblioteca, com predominância de estudantes, enquanto a UniFi atende laboratórios, salas de professores e setores administrativos, com predominância

de servidores. Diferenças de densidade, mobilidade e tipo de uso dos dispositivos podem influenciar os resultados;

- **Escala**: a rede Ruckus conta com 24 APs e cerca de 1,2 milhão de registros, contra 19 APs e cerca de 147 mil registros na UniFi;
- **Forma de obtenção das métricas**: throughput, retransmissões, RSSI e ruído são obtidos de maneira diferente em cada controladora (Seção 3.5), de modo que valores com o mesmo nome não são estritamente equivalentes.

Por esses motivos, as comparações entre Ruckus e UniFi apresentadas neste trabalho devem ser lidas como uma descrição do comportamento de duas redes distintas do mesmo campus, e não como uma avaliação de qual fabricante apresenta melhor desempenho. As diferenças observadas tendem a refletir a combinação desses fatores, e não apenas a marca dos equipamentos.

3.2 Estratégia de Coleta de Dados

A aquisição dos logs telemétricos de telemetria baseia-se em duas estratégias complementares de monitoramento:

- **Monitoramento Ativo (Polling)**: As controladoras centrais são consultadas de forma cíclica e automatizada por scripts coletores ativos. Para o ecossistema Ruckus, a extração de dados é realizada utilizando consultas SNMP (*Simple Network Management Protocol*) diretamente nos rádios. No ecossistema UniFi, as requisições de coleta são direcionadas periodicamente à API REST HTTP do UniFi Controller;
- **Monitoramento Passivo (Syslog)**: No caso da rede Ruckus, a coleta SNMP é enriquecida pela captura de mensagens de log Syslog encaminhadas em tempo real pelos APs sempre que ocorrem eventos de associação, desassociação ou transições de clientes (*roaming*), permitindo rastrear o comportamento dinâmico dos usuários.

3.3 Construção e Alinhamento do Dataset

Os dados telemétricos coletados brutos apresentam incompatibilidades severas de nomenclatura e estampas temporais. Para a construção de um dataset consolidado e comparável, implementou-se um pipeline de tratamento contendo as seguintes operações:

1. **Normalização de Timezones**: As estampas de tempo brutos da controladora UniFi são reportadas em UTC (fuso zero), enquanto o Ruckus registra dados no

horário local. O pipeline converte e unifica todos os registros para o fuso local oficial de Brasília (UTC-3), permitindo correlações temporais diretas de carga diária;

2. **Compatibilização de Identificadores**: O pipeline realiza o mapeamento dos nomes físicos dos APs de cada fabricante. Para o Ruckus, os longos endereços MAC são simplificados no formato `RK-XXXX` (onde `XXXX` são os caracteres finais do MAC) para melhorar a legibilidade visual; os APs UniFi são indexados pelos seus nomes cadastrados na gerência (ex: `Guarita Entrada`, `Lab Redes`);

3. **Mascaramento de Clientes**: Os endereços MAC dos clientes são anonimizados gerando hashes criptográficos unidirecionais, preservando a privacidade dos usuários em conformidade com as diretrizes da LGPD, mas mantendo a capacidade de identificar individualmente conexões repetidas do mesmo dispositivo.

3.4 Pipeline de Processamento e Análise de Dados

Para estruturar a transição dos registros brutos capturados até a geração dos resultados científicos finais, desenhou-se um pipeline de processamento e análise sequencial. O pipeline é executado a partir de scripts automatizados em Python, organizados nas seguintes etapas lógicas:

1. **Coleta de Dados Telemétricos (Sensores e Servidores)**:
   - **Rede Ruckus**: Consultas SNMP ocorrem ciclicamente a cada 5 minutos a partir de um servidor coletor dedicado, extraindo de cada rádio ativo as métricas definidas nas MIBs (*Management Information Base*), estruturas que descrevem os objetos de gerência disponíveis em cada equipamento. Simultaneamente, as controladoras SmartZone gravam em base de dados local as mensagens Syslog emitidas em tempo real pelos APs para registrar transições de conexões e eventos de associação;
   - **Rede UniFi**: Requisições REST HTTP são disparadas a cada 5 minutos direcionadas à API do servidor UniFi Controller, extraindo o estado detalhado dos APs cadastrados e seus clientes ativos associados.

2. **Consolidação dos Arquivos de Log (`unify_logs.py`)**: Os arquivos diários em formato CSV extraídos de forma separada pelos servidores coletores de ambos os fabricantes são varridos, limpos em suas marcações de data iniciais e unificados em arquivos únicos consolidados de monitoramento de produção (gerando os logs históricos agregados).

3. **Diagnóstico de Qualidade e Integridade (`dataset_validator.py`)**: Os registros históricos são submetidos a uma triagem de consistência. São medidos os

intervalos de amostragem temporal para identificar possíveis quedas ou interrupções físicas de coleta nos servidores e quantificada a proporção de registros ausentes (*missing data*) por variável.

4. **Padronização, Limpeza e Anonimização (`data_standardizer.py`)**: Nesta etapa, o dataset consolidado é refinado por meio das seguintes operações:

   - Remoção de instâncias corrompidas ou com identificadores físicos (MAC do AP ou Cliente) nulos;
   - Conversão e unificação de escalas físicas (sinal recebido convertido e normalizado para dBm, throughput estimado convertido incrementalmente para Mbps);
   - Anonimização criptográfica de privacidade dos MACs de clientes via algoritmo SHA-256, gerando hashes unidirecionais em conformidade com as diretrizes da LGPD;
   - Mapeamento lógico de identificadores, convertendo MACs de gerência do Ruckus para etiquetas legíveis simplificadas (`RK-XXXX`) e associando os APs UniFi aos seus respectivos nomes físicos cadastrados.

   Ao final desta fase, os datasets finais padronizados são persistidos em disco.

5. **Estatística Descritiva e Visualização de Dados (`descriptive_analyzer.py` e `visualizador_dados.py`)**: Os dados limpos são processados para gerar as distribuições agregadas, calculando as médias, medianas, desvios padrão e quartis de todas as grandezas. São gerados os histogramas de frequência, boxplots de variáveis físicas por banda e os mapas de calor de distribuição temporal de clientes únicos.

6. **Análise de Correlação e Testes de Hipótese (`analisador_correlacoes.py` e `analisador_testes.py`)**:

   - São computados os coeficientes lineares (Pearson) e monotônicos (Spearman) cruzados entre todas as variáveis físicas;
   - Aplica-se amostragem aleatória uniforme de 5.000 pontos nos datasets para executar o teste de normalidade de Shapiro-Wilk;
   - Diante da rejeição de normalidade, executa-se o teste não-paramétrico de Mann-Whitney para validação formal das hipóteses comparativas de throughput e sinal de rádio entre fabricantes e bandas de frequência, seguido do cálculo do tamanho de efeito.

7. **Classificação Heurística de Gargalos e Clusterização (`classificador_gargalos.py`)**:

   - Cada linha telemétrica é avaliada sob os limiares de decisão de gargalo estabelecidos (G1 a G5) para quantificar as ocorrências;

- O algoritmo de clusterização não supervisionada K-Means é treinado para os *Access Points* ($K = 4$), segmentando-os em grupos operacionais baseados em carga e qualidade de RF, e exportando as figuras finais de diagnóstico.

3.5 Definição das Métricas de Análise

As métricas de telemetria física foram consolidadas e parametrizadas. Dentre elas, destaca-se a modelagem de throughput e do equilíbrio na distribuição dos recursos físicos:

- **Cálculo de Throughput**: A vazão do cliente em megabits por segundo (Mbps) é obtida de forma distinta em cada fabricante, conforme os dados disponibilizados por cada controladora. Na Ruckus, a tabela SNMP de clientes informa o volume total de bytes trafegados (*tx_bytes* e *rx_bytes*) e o tempo de associação do cliente (*uptime*); a vazão é calculada dividindo o volume pelo tempo de associação, o que corresponde ao **throughput médio do cliente desde a sua conexão**. Na UniFi, a API da controladora já fornece a taxa de transferência do cliente em bytes por segundo (*tx_bytes_r* e *rx_bytes_r*), que é apenas convertida para Mbps e corresponde à **taxa medida pela controladora no momento da coleta**. Em nenhum dos casos a métrica representa a vazão de pico do cliente. Como as duas definições não são equivalentes (a da Ruckus suaviza as variações ao longo de toda a sessão, enquanto a da UniFi é pontual), as comparações de throughput entre os fabricantes devem ser interpretadas com essa ressalva;
- **Índice de Equidade de Jain (*Jain's Fairness Index*)**: Para avaliar o equilíbrio na distribuição da capacidade do rádio entre múltiplos dispositivos que compartilham concorrentemente o canal de RF de um AP, implementou-se o cálculo do Índice de Jain (J). Para um instante t com n clientes ativos compartilhando o meio físico, o índice é definido pela Equação 3.1:

$$J(x_1, x_2, \ldots, x_n) = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} x_i\right)^2}{n \sum_{i=1}^{n} x_i^2} \tag{3.1}$$

onde $n \geq 2$ representa o número de dispositivos ativos e x_i é a taxa de throughput individual obtida pelo cliente i (Mbps). O índice varia estritamente no intervalo $[1/n, 1.0]$. Um valor de $J = 1.0$ representa equidade perfeita, enquanto valores próximos de $1/n$ sinalizam monopolização do canal de RF por poucos clientes (*airtime starvation*).

3.5.1 Modelagem e Justificativa dos Limiares de Gargalos (G1 a G5)

Para classificar e quantificar os fatores de perda de desempenho de forma automatizada no pipeline de dados, implementou-se um classificador heurístico baseado em limiares

de decisão definidos na literatura de redes de computadores e nas diretrizes técnicas de fabricantes líderes do setor (como Cisco, Apple e Ruckus Wireless):

1. **G1 – Baixa Qualidade de Enlace (Sinal recebido < -75 dBm)**: O limiar físico de -75 dBm representa a transição crítica de cobertura para níveis marginais ou instáveis em redes 802.11 corporativas, conforme diretrizes de planejamento de RF da Cisco Systems (Cisco Systems, 2020). Acima de -70 dBm, obtém-se tipicamente uma relação sinal-ruído (SNR) estável para modulações de alto throughput. Abaixo de -75 dBm, a atenuação do sinal no ar reduz o SNR para patamares críticos (próximos de 10 a 15 dB). Esta degradação física eleva de forma exponencial a taxa de erro de bit (BER), forçando os rádios a usarem esquemas de modulação de baixa velocidade (como BPSK ou QPSK). Sob o protocolo 802.11 (GAST, 2005), quadros corrompidos falham na validação de CRC (*Cyclic Redundancy Check*) e demandam retransmissão pelo transmissor diante da ausência de confirmação de recebimento (ACK), gerando picos na taxa de retransmissão de quadros.

2. **G2 – Congestionamento do Meio Físico (Clientes por AP ≥ 15)**: O padrão Wi-Fi baseia-se no protocolo de acesso ao meio CSMA/CA (GAST, 2005), no qual os dispositivos realizam escuta de canal e aguardam tempos aleatórios de recuo (*backoff*) para evitar colisões. À medida que a quantidade de clientes concorrentes associados ao mesmo rádio físico cresce, a probabilidade de colisões aéreas simultâneas escala exponencialmente, conforme modelado matematicamente por Bianchi (BIANCHI, 2000). O limiar de ≥ 15 clientes conectados e ativos simultaneamente no mesmo AP é adotado como ponto de transição onde o tempo de canal livre (*airtime*) começa a ser disputado, gerando latência e perda de capacidade útil global do rádio.

3. **G3 – Interferência / SNR Ruim (Ruído > -90 dBm OU SNR < 20 dB com sinal ≥ -75 dBm)**: A decodificação lógica de modulações de alta taxa de transferência (como QAM-64 ou superior) exige um SNR mínimo saudável (geralmente ≥ 20 dB) (GAST, 2005). Mesmo que o sinal físico bruto seja considerado forte (sinal ≥ -75 dBm), a presença de ruído de fundo elevado (ruído > -90 dBm) gerado por interferências de co-canal ou fontes não-Wi-Fi (como Bluetooth, fornos de micro-ondas e telefones sem fio operando na banda comum de 2,4 GHz) corrompe a recepção lógica, inviabilizando modulações rápidas e provocando retransmissões frequentes.

4. **G4 – Instabilidade de Roaming (Mudança de AP > 15 vezes no intervalo diário)**: O trânsito excessivo de um mesmo dispositivo cliente entre diferentes Access Points em um curto período (efeito conhecido na literatura como *ping-pong effect*) (GAST, 2005) costuma ser desencadeado por instabilidades locais de cobertura ou sombreamento de RF. Para distinguir a mobilidade habitual dos usuários pelo

campus de uma possível instabilidade de RF, estabeleceu-se o limiar de > 15 transições diárias, que, na Ruckus, corresponde aproximadamente ao percentil 95 da distribuição de trocas diárias por cliente (Figura 1). Como cada transição de AP exige procedimentos de desassociação, re-autenticação WPA2/WPA3 e atualizações de tabelas de roteamento na controladora, o tráfego de dados útil do usuário é interrompido temporariamente a cada troca de rádio, o que tende a reduzir a vazão média obtida.

5. **G5 – Gargalo Cabeado (Throughput agregado do AP ≥ 90 Mbps)**: Os pontos de acesso mais antigos ou conectados a switches de legado possuem portas de uplink cabeado do tipo Fast Ethernet, cujo limite de transmissão física nominal é limitado a 100 Mbps. Descontando-se os cabeçalhos de controle das camadas de rede e transporte (TCP/IP), a taxa de throughput agregado útil máxima e real de dados situa-se em torno de 90 a 95 Mbps. Quando o tráfego somado de todos os clientes sem fio atinge o patamar de ≥ 90 Mbps, a interface física cabeada de uplink entra em saturação de cabo, impedindo que os clientes consumam mais banda mesmo que o enlace sem fio de rádio possua capacidade aérea excedente.

Para caracterizar o limiar do G4, calculou-se, após a coleta, o número de trocas de AP de cada cliente em cada dia de monitoramento, totalizando 49.762 clientes-dia na Ruckus e 16.012 na UniFi. A Figura 1 apresenta a distribuição acumulada (Cumulative Distribution Function (CDF)) desses valores. Na Ruckus, a mediana foi de 3 trocas diárias e o percentil 95 foi de 16, de modo que 5,1% dos clientes-dia superaram o limiar de 15 trocas. Na UniFi, a mediana foi de 1 troca diária e o percentil 95 foi de 6, com apenas 0,6% dos clientes-dia acima do limiar. Esses resultados sugerem que o limiar adotado isola uma pequena parcela de casos atípicos, sem abranger a mobilidade habitual dos usuários. Ressalta-se que essa análise foi realizada para caracterizar o limiar a partir dos dados coletados, e não para redefini-lo.

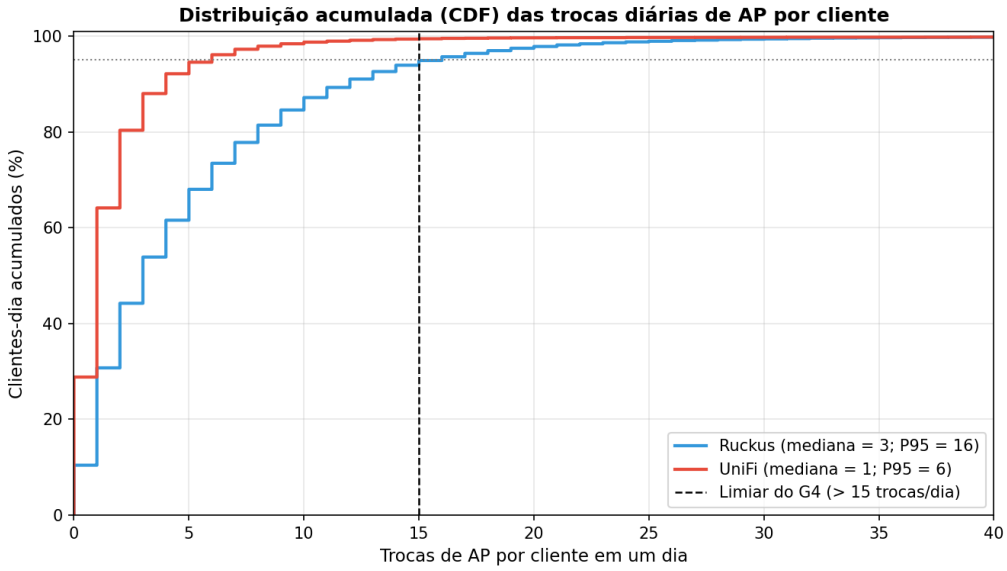


Figura 1 – Distribuição acumulada das trocas diárias de AP por cliente

Fonte: Produzido pelos autores (2026).

3.6 Estratégia de Análise Estatística

O pipeline de análise quantitativa da pesquisa está estruturado sobre métodos de inferência estatística indutiva e análise exploratória multivariada. O objetivo é assegurar o rigor científico na validação das hipóteses de rede e fundamentar de forma estatística o comportamento operacional dos Access Points de ambos os fabricantes.

3.6.1 Coeficientes de Correlação de Pearson e Spearman

Para mensurar a força e o sentido da associação entre os parâmetros de radiofrequência e vazão de tráfego dos clientes, aplicaram-se dois tipos distintos de coeficientes de correlação:

1. **Coeficiente de Correlação Linear de Pearson (r_p)**: Avalia a força de uma relação linear entre duas variáveis contínuas X e Y. A estatística é dada pela Equação 3.2:

$$r_p = \frac{\sum_{i=1}^{N}(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^{N}(Y_i - \bar{Y})^2}} \tag{3.2}$$

O coeficiente de Pearson pressupõe a existência de linearidade, variáveis intervalares contínuas e distribuição normal conjunta das variáveis. Como desvantagem principal, o coeficiente de Pearson apresenta alta sensibilidade a pontos atípicos (*outliers*), os quais podem distorcer o coeficiente mesmo sob a vigência de dependência monotônica não-linear.

2. **Coeficiente de Correlação de Postos de Spearman (r_s)**: Trata-se de uma métrica não-paramétrica que mede a intensidade e o sentido de uma relação monotônica (crescente ou decrescente, não necessariamente linear) entre duas variáveis. A formulação é baseada nos postos (*ranks*) de ordenação dos dados, conforme definido pela Equação 3.3:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^{N} d_i^2}{N(N^2 - 1)} \tag{3.3}$$

onde $d_i = \text{rg}(X_i) - \text{rg}(Y_i)$ representa a diferença entre os postos das observações pareadas de X e Y. O coeficiente de Spearman é robusto na presença de valores atípicos e não exige o pressuposto de normalidade dos dados, sendo a métrica ideal para caracterizar grandezas telemétricas com distribuições altamente assimétricas ou relações limitadas por limites operacionais físicos (como a relação exponencial do sinal de rádio e o throughput).

Ambos os coeficientes variam de $-1,00$ (correlação negativa perfeita) a $+1,00$ (correlação positiva perfeita); o valor zero indica ausência de associação linear (Pearson) ou monotônica (Spearman). A significância estatística de cada coeficiente é avaliada ao nível de $p < 0,05$. Para qualificar a intensidade dos coeficientes calculados, adota-se a classificação usual da literatura estatística (como Akoglu e Mukaka):

- $|r| \geq 0,80$: correlação muito forte;
- $0,60 \leq |r| < 0,80$: correlação forte;
- $0,40 \leq |r| < 0,60$: correlação moderada;
- $0,20 \leq |r| < 0,40$: correlação fraca;
- $|r| < 0,20$: correlação muito fraca ou desprezível.

3.6.2 Pressupostos de Normalidade e Escolha de Testes Comparativos

Antes de aplicar qualquer inferência comparativa entre as médias e distribuições de throughput e sinal físico das sub-redes ou bandas de frequência, faz-se necessário testar o pressuposto de gaussianidade dos dados:

- **Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk**: Avalia a hipótese nula (H_0) de que uma amostra provém de uma população normalmente distribuída. O teste calcula a estatística W por meio da Equação 3.4:

$$W = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} a_i X_{(i)}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}(X_i - \bar{X})^2} \tag{3.4}$$

onde $X_{(i)}$ é o i-ésimo menor valor ordenado da amostra e os pesos a_i derivam da covariância de estatísticas de ordem normais. Adotou-se o nível de significância de $\alpha = 0,05$. Caso o p-valor obtido seja menor que α, a hipótese nula de normalidade é formalmente rejeitada. Dado o tamanho amostral massivo desta pesquisa ($N >$ 1.300.000, totalizando 1.349.925 registros limpos), o teste de Shapiro-Wilk foi aplicado a subamostras aleatórias uniformes representativas de 5.000 observações (conforme limites computacionais da modelagem de Shapiro-Wilk).

Caso a premissa de normalidade dos dados fosse sustentada, o teste paramétrico **Teste t de Welch** (uma variante do teste t de Student para duas amostras independentes com variâncias populacionais desiguais) seria utilizado para comparar as médias. A estatística t de Welch é definida por:

$$t = \frac{\bar{X}_A - \bar{X}_B}{\sqrt{\frac{s_A^2}{n_A} + \frac{s_B^2}{n_B}}} \tag{3.5}$$

onde $\bar{X}$, s e n são a média amostral, desvio padrão amostral e tamanho da amostra dos grupos A e B. A aplicação desse teste paramétrico, contudo, é invalidada quando as amostras violam gravemente os pressupostos de normalidade. Grandezas de rede Wi-Fi como throughput e retransmissões exibem forte assimetria à direita (com alta concentração de registros nulos de ociosidade) e múltiplos picos localizados, tornando os testes paramétricos propensos a erros graves de inferência.

3.6.3 Teste U de Mann-Whitney e Cálculo do Tamanho do Efeito

Diante da constatação da não-normalidade generalizada das grandezas telemétricas, a alternativa correta e robusta é a adoção de testes não-paramétricos de postos independentes:

- **Teste U de Mann-Whitney (ou Wilcoxon Rank-Sum)**: Utilizado para comparar se as distribuições de dois grupos independentes diferem significativamente. O teste ordena de forma unificada os dados de ambos os grupos e calcula a estatística de postos para cada grupo (U_A e U_B), conforme as Equações 3.6 e 3.7:

$$U_A = n_A n_B + \frac{n_A(n_A + 1)}{2} - R_A \tag{3.6}$$

$$U_B = n_A n_B + \frac{n_B(n_B+1)}{2} - R_B \tag{3.7}$$

onde n_A e n_B representam o tamanho amostral de cada grupo e R_A e R_B representam a soma dos postos atribuídos a cada observação correspondente. A estatística de teste final é definida pelo menor valor entre os postos ($U = \min(U_A, U_B)$). O teste avalia se a probabilidade de uma amostra retirada aleatoriamente de um grupo ser maior do que uma amostra retirada do outro grupo é igual a $0,5$ (hipótese nula de igualdade distribucional).

Em pesquisas aplicadas que envolvem dados de tráfego massivos (como o dataset de monitoramento contínuo deste estudo com centenas de milhares de linhas), o poder estatístico dos testes inferenciais aproxima-se de $1,0$. Nessas circunstâncias, diferenças numéricas insignificantes na prática (por exemplo, uma diferença infinitesimal no throughput ou RSSI médio) resultam inevitavelmente em p-valores menores do que $0,001$, induzindo a erros de interpretação sobre a relevância prática dos achados.

Para contornar o efeito do tamanho amostral sobre o p-valor, utilizou-se a estatística do **Tamanho do Efeito (*Effect Size*)**. A magnitude de efeito do teste de Mann-Whitney é quantificada pela correlação bisserial de postos (*rank-biserial correlation* r), derivada da estatística padronizada normalizada Z do teste de hipótese, conforme denotado na Equação 3.8:

$$r = \frac{|Z|}{\sqrt{N}} \tag{3.8}$$

onde N representa o número total de amostras dos dois grupos agregados ($N = n_A + n_B$). Os coeficientes resultantes são classificados segundo a classificação de Cohen para interpretação de relevância prática de rede:

- $|r| \geq 0,1$: tamanho de efeito pequeno (pouco impacto prático no dia a dia da rede);
- $|r| \geq 0,3$: tamanho de efeito médio (relevância operacional perceptível);
- $|r| \geq 0,5$: tamanho de efeito grande (impacto prático dominante na infraestrutura).

3.6.4 Agrupamento Não-Supervisionado (K-Means)

Para mapear de forma objetiva o perfil operacional dos rádios sem vieses de limiares de decisão manuais, implementou-se a clusterização via algoritmo *K-Means* com $K = 4$ grupos para classificar os APs no espaço métrico multidimensional das variáveis consolidada do rádio j:

$$X_j = \{C_j, T_j, S_j, R_j\} \tag{3.9}$$

onde:

- C_j representa a média de dispositivos clientes conectados simultaneamente ao rádio j;
- T_j representa a média de vazão agregada (*throughput*) do rádio j, mensurada em Mbps;
- S_j representa a média da intensidade de sinal física recebida (*IS*) no rádio j, medida em dBm;
- R_j representa a média da taxa de retransmissão de quadros de dados físicos no rádio j, expressa em percentual.

3.6.5 Justificativa de Escolha do Algoritmo de Clusterização

A escolha do algoritmo *K-Means* em detrimento de outras técnicas clássicas de aprendizado de máquina não-supervisionado, como o agrupamento espacial baseado em densidade (DBSCAN) ou o agrupamento hierárquico aglomerativo, foi baseada na interpretabilidade dos resultados e na adequação à forma dos dados analisados:

1. **Interpretabilidade e Uso Operacional (K-Means vs. Hierárquico)**: O agrupamento tem como unidade de análise os pontos de acesso, o que resulta em apenas algumas dezenas de pontos, cada um descrito pelas médias de suas métricas no período (Equação 3.9). Com esse volume, o custo computacional não é um fator limitante, e o agrupamento hierárquico aglomerativo também seria viável. A escolha do *K-Means* considerou outros aspectos. Primeiro, cada grupo formado é representado por um centróide, que corresponde ao perfil médio dos APs daquele grupo e pode ser interpretado diretamente em termos de clientes, throughput, sinal e retransmissões, como nos perfis apresentados no Capítulo 6. Segundo, o número de grupos pode ser escolhido por critérios objetivos amplamente usados com esse algoritmo, como o Método do Cotovelo e os índices de Silhueta e de Davies-Bouldin. Terceiro, um AP novo, ou um AP cujas médias mudem ao longo do tempo, pode ser associado ao centróide mais próximo sem que seja necessário refazer todo o agrupamento, o que tende a facilitar o uso do modelo no monitoramento contínuo da rede. A comparação com os resultados de um agrupamento hierárquico permanece como possibilidade para trabalhos futuros.
2. **Adequação à Forma dos Dados (K-Means vs. DBSCAN)**: O DBSCAN forma grupos a partir da densidade de pontos: um ponto pertence a um grupo quando

há pelo menos um número mínimo de vizinhos (*minPts*) a uma distância menor que um raio ϵ, e os pontos que não atendem a essa condição são marcados como ruído e ficam sem grupo. Sua principal vantagem é dispensar a definição prévia do número de grupos (K). Neste trabalho, porém, cada ponto a ser agrupado é um AP, descrito pelas médias de clientes, throughput, sinal e retransmissões no período de coleta (Equação 3.9), o que resulta em apenas algumas dezenas de pontos, distribuídos de forma irregular: alguns APs ficam bem afastados dos demais, com carga ou retransmissão muito acima da média. Como o DBSCAN usa um único raio ϵ para todo o conjunto, ele tem dificuldade com densidades tão diferentes. Um raio pequeno tende a marcar justamente esses APs atípicos, que são os de maior interesse para o diagnóstico, como ruído, deixando-os sem perfil; um raio grande tende a reunir quase todos os APs em um único grupo. O *K-Means*, por sua vez, atribui todo AP ao centróide mais próximo, garantindo que cada rádio receba um perfil operacional, e o número de grupos pode ser escolhido de forma objetiva pelo Método do Cotovelo e pelos índices de Silhueta e de Davies-Bouldin (Seção 6.3.6).

3.7 Hipóteses de Pesquisa

A investigação do comportamento de rádio das marcas Ruckus e UniFi é orientada pelas seguintes hipóteses de rede física:

- **Hipótese 1 (H_1)**: Dispositivos operando na banda de 5 GHz alcançam taxas de throughput significativamente maiores do que os conectados na banda de 2,4 GHz, devido à maior largura de canal e menor poluição do espectro;
- **Hipótese 2 (H_2)**: Conexões com intensidade física de sinal degradada (sinal inferior a -75 dBm) resultam em taxas de retransmissão significativamente maiores do que conexões operando com sinal saudável;
- **Hipótese 3 (H_3)**: Setores com maior densidade de clientes ativos conectados simultaneamente apresentam menor equidade de compartilhamento (Índice de Jain reduzido) devido à contenção de canal do protocolo MAC CSMA/CA.

4 Coleta e Tratamento dos Dados

Este capítulo descreve os aspectos operacionais da arquitetura tecnológica de redes do campus, detalhando as ferramentas e dispositivos que dão suporte à infraestrutura. Adicionalmente, expõe-se o processo de consistência inicial, limpeza e higienização das bases de dados brutas de telemetria por meio da importação do relatório de validação.

4.1 Ferramentas e Infraestrutura de Rede

A infraestrutura sob monitoramento é suportada por um conjunto integrado de ferramentas de gerência, segurança e controle operacional.

4.1.1 Firewall (pfSense)

O pfSense atua como o *gateway* principal de borda e servidor de firewall da rede local. Ele é encarregado de realizar o roteamento inter-VLAN, gerenciar servidores DHCP para a distribuição dinâmica de endereços IPs aos dispositivos sem fio, controlar políticas de segurança lógica por meio de tabelas de firewall e atuar como concentrador de tráfego, servindo como o ponto central para monitorar as taxas volumétricas globais direcionadas à Internet.

4.1.2 Controladora Ruckus (SmartZone)

A controladora física Ruckus SmartZone gerencia centralizadamente os Access Points Ruckus distribuídos nos prédios acadêmicos do campus. Ela coordena dinamicamente a potência de transmissão, a seleção de canais de RF e as chaves de criptografia WPA2-Enterprise das redes sem fio institucionais. A SmartZone expõe as estatísticas operacionais dos rádios via SNMP e atua como servidora Syslog, despachando logs detalhados de transições de conexão de clientes.

4.1.3 Controladora UniFi (UniFi Controller)

A controladora baseada em software UniFi Controller é instalada localmente no servidor de gerência para monitorar os rádios Ubiquiti das unidades de pesquisa e escritórios administrativos específicos. O UniFi Controller gerencia as configurações dos APs UniFi e disponibiliza os parâmetros físicos de rádio de cada cliente (como sinal RSSI e CCQ) por meio de um serviço HTTP API local estruturado em formato JSON.

4.1.4 Plataforma de Visualização (Grafana)

O Grafana foi empregado neste trabalho como plataforma de visualização das métricas coletadas. Os painéis desenvolvidos consomem as séries temporais geradas pelos coletores e exibem, por exemplo, a quantidade de usuários ativos por setor, o consumo agregado de largura de banda e a disponibilidade dos rádios, e foram usados principalmente para acompanhar a coleta e verificar a consistência dos dados durante o período de monitoramento. Na prática, o uso do Grafana pela equipe de TI do ICEA é mínimo, de modo que esses painéis devem ser entendidos como uma ferramenta de apoio a esta pesquisa, e não como parte da rotina de gerência da rede. A incorporação desses painéis à rotina de monitoramento do campus é uma possibilidade de continuidade deste trabalho.

Para ilustrar o monitoramento operacional da infraestrutura, a plataforma Grafana foi integrada aos coletores de telemetria, permitindo o acompanhamento em tempo real das conexões ativas e a saúde do espectro. A Figura 2 ilustra o painel principal de monitoramento de clientes no ecossistema Ruckus, enquanto a Figura 3 apresenta o acompanhamento correspondente na rede UniFi. Os demais painéis operacionais desenvolvidos (incluindo gráficos de desconexões, tráfego por frequência e diagnósticos detalhados por rádio) encontram-se reunidos no Apêndice B.

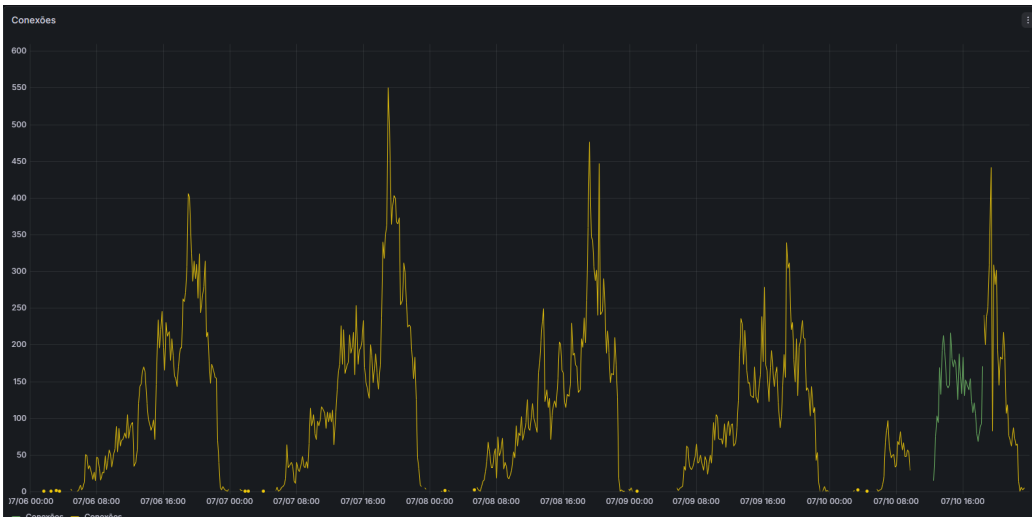


Figura 2 – Painel do Grafana para monitoramento de clientes conectados (Ruckus)

Fonte: Produzido pelos autores (2026).

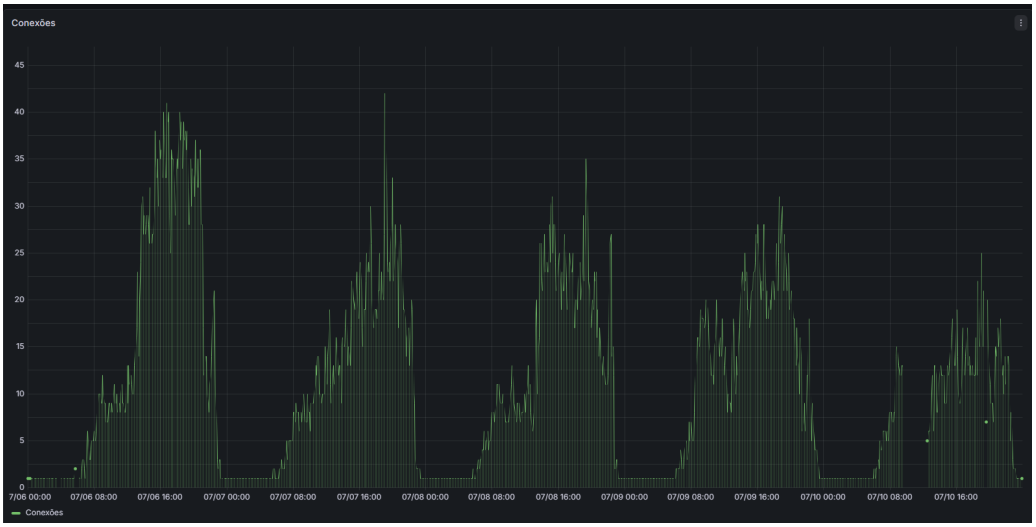


Figura 3 – Painel do Grafana para monitoramento de conexões de usuários (UniFi)

Fonte: Produzido pelos autores (2026).

4.1.5 Scripts de Coleta Telemétrica

Os scripts coletores ativos foram codificados em linguagem Python e agendados para execução periódica no servidor de gerência. Os coletores utilizam a biblioteca `pysnmp` para interrogar periodicamente as OIDs da Ruckus Wireless e requisições HTTP autenticadas via biblioteca `requests` para consumir dados em JSON da API UniFi, gravando os logs brutos estruturados diariamente em disco.

4.2 Limpeza e Tratamento dos Dados

A higienização inicial das informações e a consolidação do conjunto de dados limpo é essencial para eliminar ruídos de polling repetido e valores nulos de conexões inconsistentes. A validação empírica dos dados consolidados é apresentada e discutida a seguir.

4.3 Validação de Consistência dos Dados

4.3.1 Quantidade de Registros

A tabela abaixo resume a quantidade de registros encontrados nos logs de telemetria antes e depois do processo de deduplicação (remoção de duplicados exatos).

Tabela 2 – Quantidade de Registros

Fabricante	Registros Originais	Registros Duplicados Removidos	Registros Limpos	% de Redundância
Ruckus	1.232.364	29.956	1.202.408	2,43%
UniFi	147.517	0	147.517	0,00%

Fonte: Produzido pelos autores.

Nota: Registros duplicados ocorrem por sobreposição em polling repetido do coletor. A remoção evita viés nas análises estatísticas.

4.3.2 Período Coberto pela Coleta

Tabela 3 – Período Coberto pela Coleta

Fabricante	Data/Hora Inicial (Min)	Data/Hora Final (Max)	Duração Efetiva
Ruckus	23/06/2026 00:00	16/10/2026 23:55	48 dias com logs
UniFi	23/06/2026 00:02	16/10/2026 22:50	49 dias com logs

Fonte: Produzido pelos autores.

Nota: Ambos os datasets cobrem o mesmo período temporal (de 23/06/2026 00:00 a 16/10/2026 23:55, totalizando 48 dias com registros de log efetivamente monitorados), garantindo sobreposição temporal das amostras.

4.3.3 Dados Ausentes (Missing Values)

O percentual de dados nulos ou ausentes para cada variável após a limpeza:

Tabela 4 – Dados Ausentes (Missing Values)

Coluna Padronizada	% Nulos Ruckus	% Nulos UniFi	Tipo de Dado
`timestamp`	0,00%	0,00%	Datetime
`AP`	0,00%	0,00%	Categórico
`cliente (MAC)`	0,00%	0,00%	Categórico
`RSSI`	10,02%	0,00%	Numérico
`signal`	10,02%	0,00%	Numérico
`noise`	10,02%	0,00%	Numérico
`canal`	0,00%	0,00%	Categórico
`throughput_tx_mbps`	0,00%	0,00%	Numérico
`throughput_rx_mbps`	0,00%	0,00%	Numérico
`link_speed_tx_mbps`	7,12%	0,00%	Numérico
`link_speed_rx_mbps`	100,00%	0,00%	Numérico
`retransmissoes_pct`	0,00%	0,00%	Numérico
`volume_tx_mb`	0,00%	0,00%	Numérico
`volume_rx_mb`	0,00%	0,00%	Numérico
`padrão`	0,00%	0,00%	Categórico

Fonte: Produzido pelos autores.

4.3.4 Tratamento de Valores Nulos

Durante a coleta, alguns registros de log chegaram incompletos: ocasionalmente, campos de uma consulta vinham vazios ou com valores padrão que não correspondem a uma medição real, como sinal igual a 0 ou a −100 dBm na Ruckus. Esses casos foram tratados da seguinte forma no pipeline de padronização:

- **Registros sem horário**: registros sem a marcação de tempo (*timestamp*) foram descartados, pois não podem ser posicionados na série temporal.
- **Sinal, RSSI e ruído na Ruckus**: quando o sinal vinha vazio, igual a 0 ou menor ou igual a −100 dBm, esses três campos foram marcados como ausentes (`NaN`), em vez de se descartar o registro inteiro. Esses casos correspondem aos 10,02% de valores nulos dessas colunas na Tabela 4. Os registros afetados continuam sendo usados nas análises que não dependem do sinal, como throughput e retransmissões, e são ignorados apenas nos cálculos que envolvem sinal ou ruído.
- **Contadores de tráfego e de retransmissão**: quando os campos de bytes, pacotes ou retransmissões (Ruckus), ou de taxa de transferência e CCQ (UniFi), vinham vazios, o pipeline os considerou iguais a zero. Por esse motivo, essas colunas aparecem com 0% de valores nulos na Tabela 4. Essa escolha pode subestimar levemente o throughput e as retransmissões nos registros afetados, já que um campo vazio passa a ser interpretado como ausência de tráfego.
- **Link Speed na Ruckus**: a taxa física de TX (`link_speed_tx_mbps`) é extraída do campo `throughput_rate` e foi marcada como ausente quando esse campo vinha vazio, zerado ou fora da faixa válida (7,12% dos registros). A taxa de RX (`link_speed_rx_mbps`) não é informada pela controladora SmartZone e, por isso, aparece como ausente em todos os registros.
- **UniFi**: após a padronização, não foram registrados valores ausentes nas métricas de sinal e ruído.

4.3.5 Padronização das Unidades de Medida

As colunas foram padronizadas da seguinte forma:

1. **Sinal e Ruído**: Potência medida em **dBm**.
2. **RSSI**: na Ruckus, corresponde ao próprio sinal recebido, medido em **dBm**; na UniFi, é um índice de SNR, medido em **dB**.
3. **Throughput**: Convertido em **Mbps** (Megabits por segundo) para Downstream (`tx`) e Upstream (`rx`).

4. **Volume de Dados**: Convertido em **MB** (Megabytes) acumulados por cliente no período de observação.

5. **Retransmissões**: Medidas em porcentagem (%) de pacotes retransmitidos.

6. **Link Speed**: Modulação de velocidade física convertida em **Mbps**.

4.3.6 Equivalência de Métricas (Mapeamento Ruckus vs UniFi)

A tabela abaixo mostra a relação entre os campos extraídos de cada fabricante que representam as mesmas grandezas físicas:

Tabela 5 – Equivalência de Métricas (Mapeamento Ruckus vs UniFi)

Grandeza Física	Métrica Ruckus (Raw)	Métrica UniFi (Raw)	Coluna Padronizada Final
Potência do Sinal	`signal_rssi`	`signal`	`signal` (dBm)
RSSI	`signal_rssi` (igual ao sinal, dBm)	`rssi` (índice de SNR, dB)	`RSSI`
Throughput Downstream	`tx_bytes / uptime`	`tx_bytes_r * 8`	`throughput_tx_mbps`
Throughput Upstream	`rx_bytes / uptime`	`rx_bytes_r * 8`	`throughput_rx_mbps`
Retransmissões	`tx_retries / (tx_pkts + tx_retries)`	`100 - (ccq / 10)`	`retransmissoes_pct`
Volume Trafegado	`tx_bytes`, `rx_bytes`	`tx_bytes_r` *`uptime`*, `rx_bytes_r` `uptime`	`volume_tx_mb`, `volume_rx_mb`
Modulação de Velocidade	`throughput_rate`	`tx_rate`, `rx_rate`	`link_speed_tx_mbps`, `link_speed_rx_mbps`

Fonte: Produzido pelos autores.

5 Análise dos Dados

Este capítulo apresenta a exploração detalhada dos dados telemétricos normalizados dos ambientes Ruckus e UniFi. A análise subdivide-se em quatro seções principais: primeiramente, expõe-se a estatística descritiva geral das grandezas físicas da rede; a seguir, analisam-se os padrões temporais e comportamentais diários por meio de visualizações de dados; em terceiro lugar, investigam-se as correlações lineares e monotônicas cruzadas entre métricas; por fim, realizam-se os testes estatísticos formais para validação das hipóteses físicas estabelecidas.

5.1 Estatística Descritiva

5.1.1 Tabela Geral de Estatísticas Descritivas

Tabela 6 – Tabela Geral de Estatísticas Descritivas

Fabricante	Parâmetro Analisado	Registros	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Q1 (25%)	Mediana (Q2)	Q3 (75%)	Máximo
Ruckus	Sinal (signal) [dBm]	1081944	-74,1351	10,1577	-99,0000	-81,0000	-75,0000	-68,0000	-20,0000
UniFi	Sinal (signal) [dBm]	147517	-64,3942	12,8708	-93,0000	-74,0000	-64,0000	-55,0000	-18,0000
Ruckus	RSSI / SNR [dB]	1081944	-74,1351	10,1577	-99,0000	-81,0000	-75,0000	-68,0000	-20,0000
UniFi	RSSI / SNR [dB]	147517	31,4604	12,7792	3,0000	22,0000	32,0000	41,0000	74,0000
Ruckus	Throughput Total [Mbps]	1202408	0,4582	1,3327	0,0000	0,0289	0,1176	0,4594	105,8838
UniFi	Throughput Total [Mbps]	147517	0,2740	1,4758	0,0000	0,0000	0,0004	0,0262	212,6838
Ruckus	Throughput Down (TX) [Mbps]	1202408	0,0352	0,3111	0,0000	0,0029	0,0103	0,0270	81,6900
UniFi	Throughput Down (TX) [Mbps]	147517	0,2417	1,3882	0,0000	0,0000	0,0001	0,0133	209,7159
Ruckus	Throughput Up (RX) [Mbps]	1202408	0,4230	1,2694	0,0000	0,0243	0,0997	0,4148	104,8381
UniFi	Throughput Up (RX) [Mbps]	147517	0,0323	0,3415	0,0000	0,0000	0,0003	0,0099	34,0952
Ruckus	Retransmissões [%]	1202408	5,6972	16,1439	0,0000	0,0000	0,0000	1,3737	100,0000
UniFi	Retransmissões [%]	147517	20,3753	24,2971	0,0000	2,5000	11,5000	28,0000	99,6000
Ruckus	Volume Total [MB]	1202408	167,3222	492,8256	0,0000	3,4827	29,9903	146,6557	41775,9000
UniFi	Volume Total [MB]	147517	146,0112	1006,9212	0,0000	0,0000	0,1634	8,0396	67076,5301
Ruckus	Volume Down (TX) [MB]	1202408	13,5677	125,4035	0,0000	0,3440	2,3163	8,6623	18019,0245
UniFi	Volume Down (TX) [MB]	147517	129,2615	932,3470	0,0000	0,0000	0,0438	4,0994	64993,8583
Ruckus	Volume Up (RX) [MB]	1202408	153,7545	461,1750	0,0000	2,8641	25,8701	132,0909	41555,3949
UniFi	Volume Up (RX) [MB]	147517	16,7496	219,9003	0,0000	0,0000	0,0965	2,8044	22473,7324
Ruckus	Link Speed Down (TX) [Mbps]	1116836	147,0460	217,3131	0,0010	12,4710	58,3770	184,4172	1299,9320
UniFi	Link Speed Down (TX) [Mbps]	147517	73,9327	45,0658	0,0000	49,9270	72,2220	117,0000	144,4440
Ruckus	Link Speed Up (RX) [Mbps]	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
UniFi	Link Speed Up (RX) [Mbps]	147517	15,9361	24,9904	0,0000	1,0000	6,0000	24,0000	144,2180
Ruckus	Índice de Equidade de Jain	13297	0,3224	0,2074	0,0148	0,1876	0,2602	0,3866	1,0000
UniFi	Índice de Equidade de Jain	7171	0,1950	0,1749	0,0200	0,0905	0,1340	0,2196	1,0000

Fonte: Produzido pelos autores.

5.1.2 Principais Descobertas e Comparações

1. **Intensidade do Sinal (Signal)**:
   - O sinal físico real (em dBm) pode ser comparado diretamente.
   - Valores medianos e quartis mostram a cobertura de sinal observada para os clientes conectados de cada fabricante.
2. **Throughput vs Volume**:

- **Throughput** representa, na Ruckus, a vazão média do cliente desde a sua conexão e, na UniFi, a taxa reportada pela controladora no momento da coleta, conforme a Seção 3.5 (Mbps).
- **Volume** representa a transferência acumulada total no período de conexão dos clientes (MB).
- Note que a UniFi tem menor número de amostras, mas o comportamento estatístico da taxa de transferência e do volume calculado segue uma escala e distribuição coerentes com os dados de produção do Ruckus.

3. **Qualidade de Enlace e Retransmissões**:
   - A taxa de retransmissões do Ruckus é derivada da proporção de pacotes TX de retransmissão sobre o total de tentativas.
   - A taxa de retransmissões da UniFi é estimada a partir da métrica CCQ (Client Connection Quality), sendo `100 - CCQ/10`.
4. **Link Speed**:
   - A velocidade física negociada no download (TX Link Speed) está disponível para ambos os fabricantes (extraída de `throughput_rate` no Ruckus e de `tx_rate` na UniFi). A velocidade física de upload (RX) é exclusiva da UniFi.
   - O Ruckus negocia taxas físicas médias significativamente maiores devido ao suporte a múltiplos canais em 5 GHz e MIMO 3x3:3.
5. **Índice de Equidade da Rede (Jain's Fairness Index)**:
   - Calculado conforme a Equação 3.1 (Seção 3.5), apenas nos instantes com pelo menos 2 clientes ativos no mesmo rádio.
   - Os valores observados são baixos nos dois fabricantes (média de 0,322 e mediana de 0,260 no Ruckus; média de 0,195 e mediana de 0,134 na UniFi), sugerindo que, em boa parte do tempo, poucos clientes tendem a concentrar a maior parte da vazão do rádio. A comparação estatística entre os fabricantes é apresentada na Seção 5.4.

5.2 Visualização dos Dados

5.2.1 Intensidade do Sinal por Fabricante

5.2.1.1 Boxplot de Sinal Físico por Fabricante

O boxplot de sinal físico por fabricante apresenta a distribuição e os quartis da potência recebida (dBm) para ambas as infraestruturas.

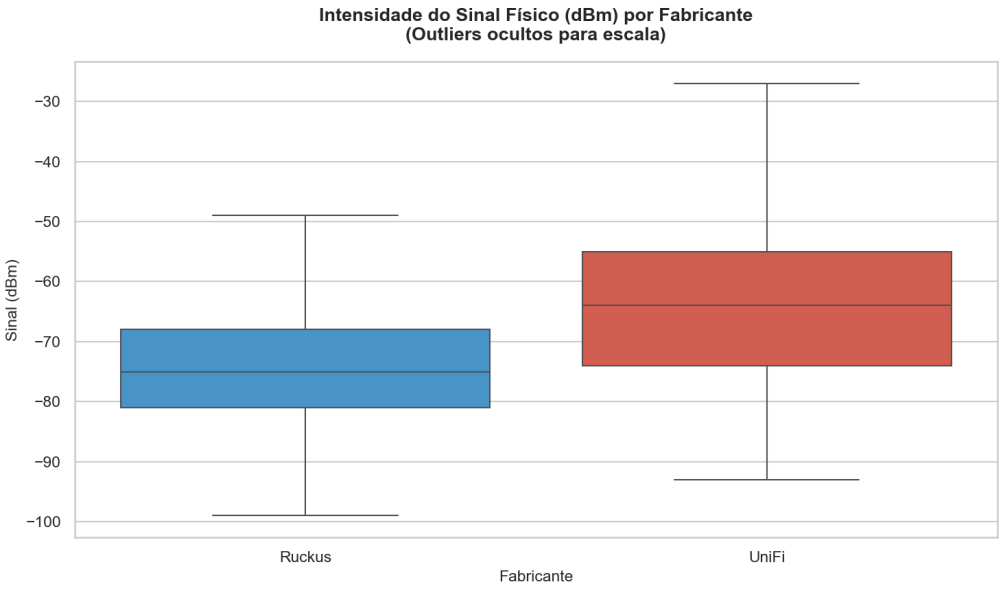


Figura 4 – Boxplot do sinal recebido (dBm) por fabricante

- **Ruckus**: Média de `-74.14 dBm`, Mediana `-75.00 dBm`.
- **UniFi**: Média de `-64.39 dBm`, Mediana `-64.00 dBm`.
- Os resultados sugerem uma cobertura de sinal física coerente para os clientes de ambas as marcas no cenário analisado, com a maioria das amostras se situando em uma faixa saudável de RF.

5.2.1.2 Histograma de Densidade de Sinal

O histograma apresenta a densidade de ocorrência de potência de sinal nos logs coletados.

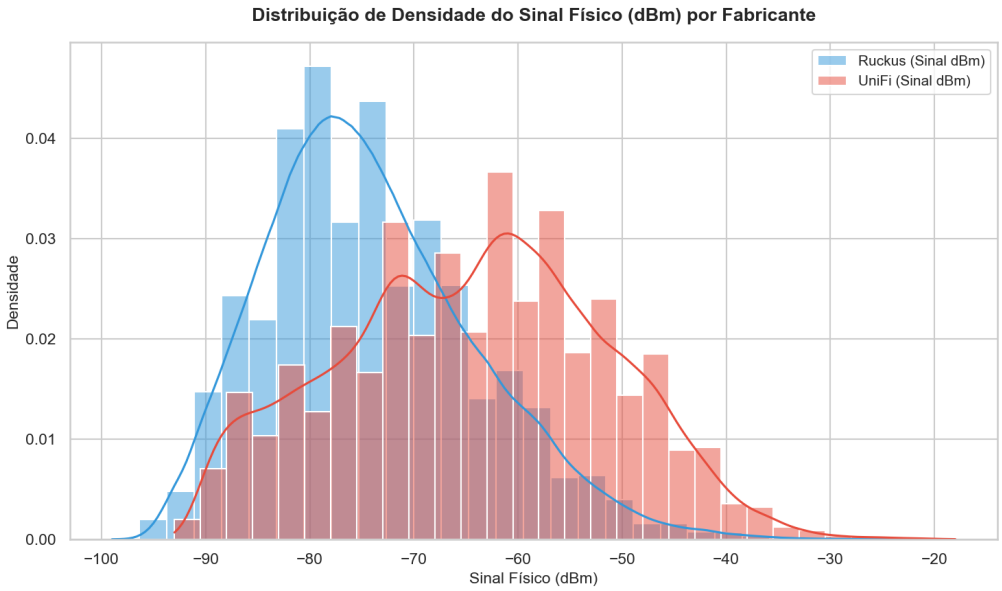


Figura 5 – Histograma do sinal recebido (dBm)

- O gráfico mostra que, na população observada, os clientes UniFi apresentaram uma distribuição de sinal com menor variabilidade (concentrada em torno de -67 dBm), enquanto a Ruckus apresenta maior amplitude e dispersão das conexões ao longo do dia.
- Uma possível explicação para essa diferença está no perfil de uso de cada rede. A UniFi atende laboratórios, salas de professores e setores administrativos, onde predominam servidores que tendem a permanecer em posições fixas, como mesas de trabalho, a distâncias relativamente constantes do AP. A Ruckus atende salas de aula, auditórios e a biblioteca, onde os estudantes se deslocam com maior frequência e se conectam a partir de posições variadas, o que tende a ampliar a dispersão do sinal (Seção 3.1).

5.2.2 Utilização de Canais por Fabricante

O histograma de utilização de canais apresenta a contagem de registros em cada frequência de operação.

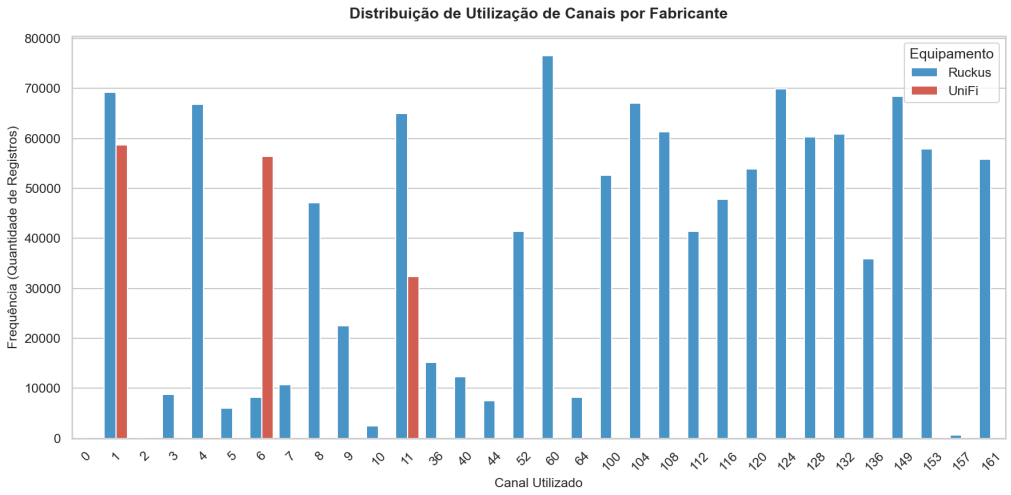


Figura 6 – Histograma de Canais

- **2,4 GHz**: Nos dados coletados, a UniFi concentra o tráfego nos canais não sobrepostos `1`, `6` e `11`, de acordo com as boas práticas de planejamento de RF. A Ruckus, por outro lado, distribui seus registros por quase todos os canais de `1` a `11`, com maior volume nos canais `1`, `4`, `8` e `11` e uso residual do canal `6`. Como os canais intermediários (por exemplo, `4` e `8`) se sobrepõem parcialmente aos canais `1`, `6` e `11`, essa distribuição não segue o plano de três canais não sobrepostos e pode favorecer a interferência de canal adjacente entre APs vizinhos, possivelmente em decorrência da seleção dinâmica de canais da controladora.
- **5 GHz**: A Ruckus apresenta uma alocação de espectro mais ampla e distribuída (como canais `36`, `52`, `60`, `104`, `112`, `120`, `128`, `149`), o que reduz interferência co-canal em células adjacentes.

5.2.3 Quantidade de Clientes Conectados por AP

Este histograma ilustra a densidade de clientes associados simultaneamente a cada Access Point.

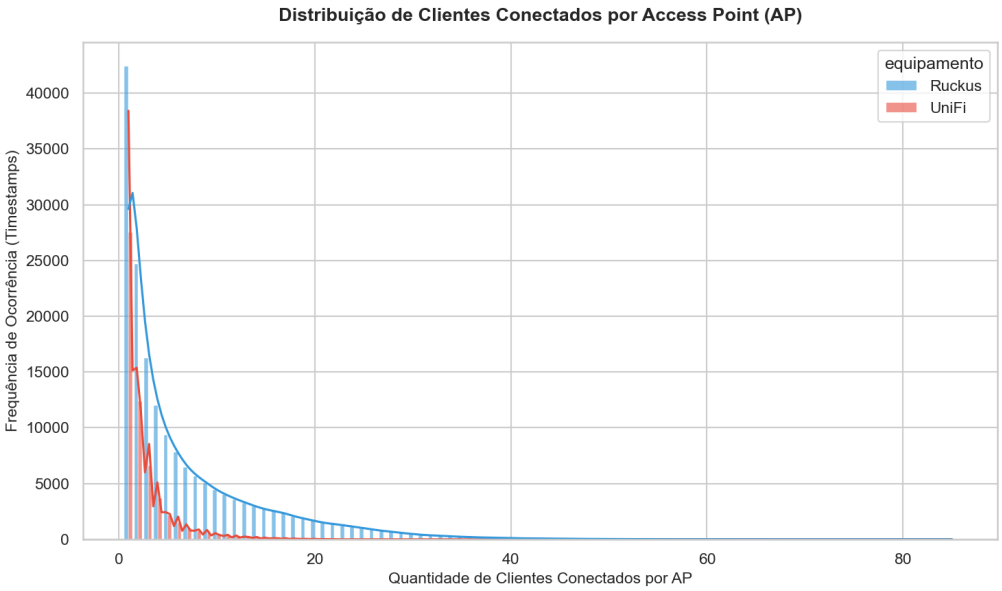


Figura 7 – Histograma Clientes por AP

- **UniFi**: Exibe perfil de baixa carga (maior parte dos registros possui entre 1 e 5 clientes simultâneos por rádio).
- **Ruckus**: Apresenta registros com cargas substancialmente maiores de clientes simultâneos, o que reflete o fato de esses equipamentos estarem implantados nas áreas de maior circulação e densidade de alunos do campus (salas de aula, auditórios e biblioteca).

5.2.4 Análise de Desempenho e Qualidade de Enlace por Banda

5.2.4.1 Throughput por Banda

O boxplot compara o consumo de throughput entre as bandas de 2,4 GHz e 5 GHz.

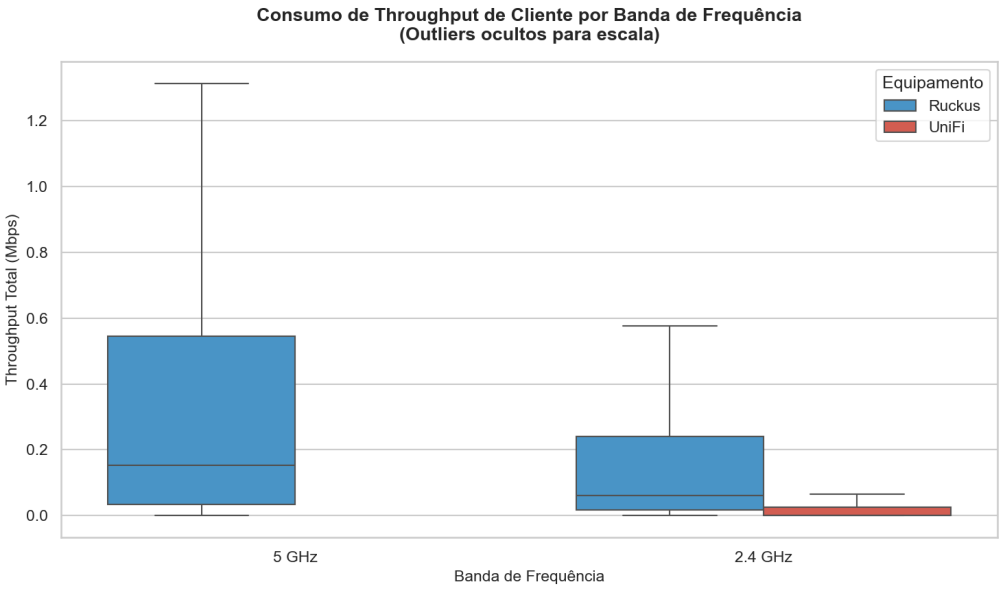


Figura 8 – Boxplot Throughput por Banda

- Como esperado teoricamente no ambiente Ruckus (único fabricante com registros na banda de 5 GHz na telemetria coletada), a faixa de **5 GHz** oferece vazão física superior, superando a banda de **2,4 GHz** que possui limitações de largura de canal e maior concorrência de meio.

5.2.4.2 Retransmissões por Banda

O boxplot compara a ocorrência de retransmissões físicas ou estimadas.

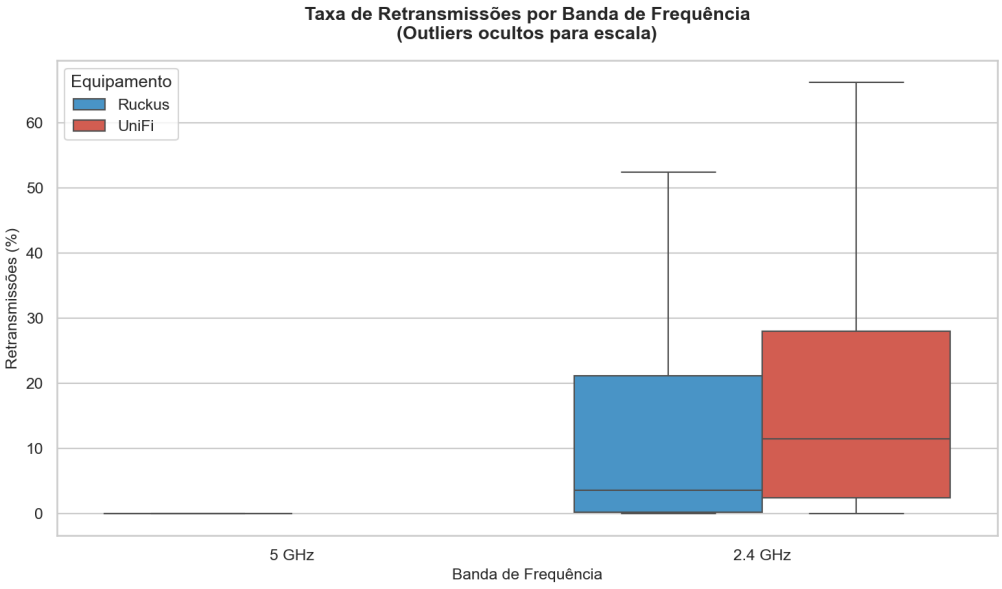


Figura 9 – Boxplot Retransmissões por Banda

- A banda de **2,4 GHz** exibe taxas médias superiores de retransmissão, decorrentes do maior congestionamento espectral e das colisões de quadros provocadas pela contenção CSMA/CA no reduzido número de canais não-sobrepostos disponíveis.

5.2.5 Distribuição de Throughput Agregado por AP

Este gráfico apresenta a soma da vazão ativa de todos os clientes associados a cada um dos APs mapeados, permitindo identificar o nível de carregamento individual de tráfego por antena.

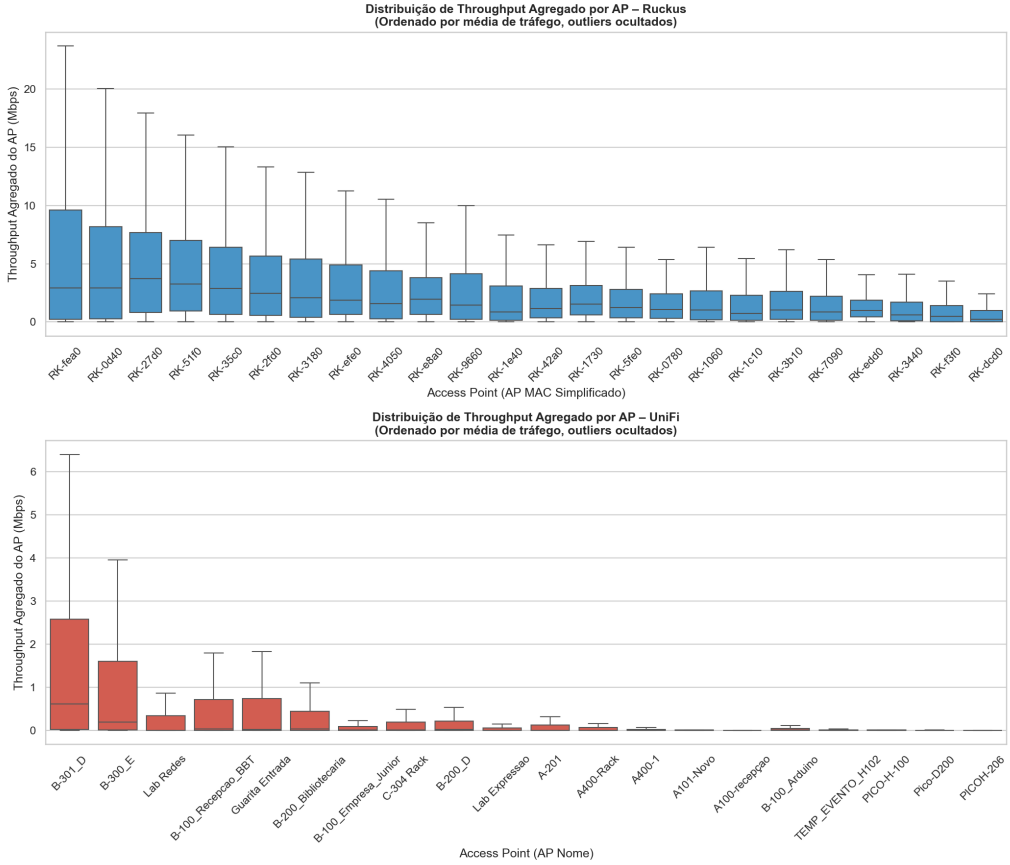


Figura 10 – Boxplot Throughput por AP

- **Ruckus (AP MAC Simplificado)**: Apresenta maior amplitude e níveis superiores de vazão somada (vários APs superando médias de 5 a 10 Mbps de tráfego agregado ativo, com picos de consumo expressivos). Para melhor visualização, os endereços MAC longos do Ruckus foram simplificados no formato `RK-XXXX` (onde `XXXX` são os 4 dígitos finais do MAC).

- **UniFi (AP Nome)**: Mostra distribuições de vazão agregada concentradas próximas de zero (com médias inferiores a 2 Mbps). Isso indica que a maioria dos APs da UniFi operaram com carga de dados muito baixa durante o período amostrado, corroborando a ociosidade do ambiente.

5.2.6 Distribuição Temporal de Clientes Únicos no Campus

O mapa de calor (heatmap) apresenta a quantidade consolidada de clientes únicos ativos na rede WLAN do campus (unificando Ruckus e UniFi na mesma malha de serviço), distribuída ao longo do ciclo diário de 24 horas para os 48 a 49 dias com monitoramento efetivo de logs.

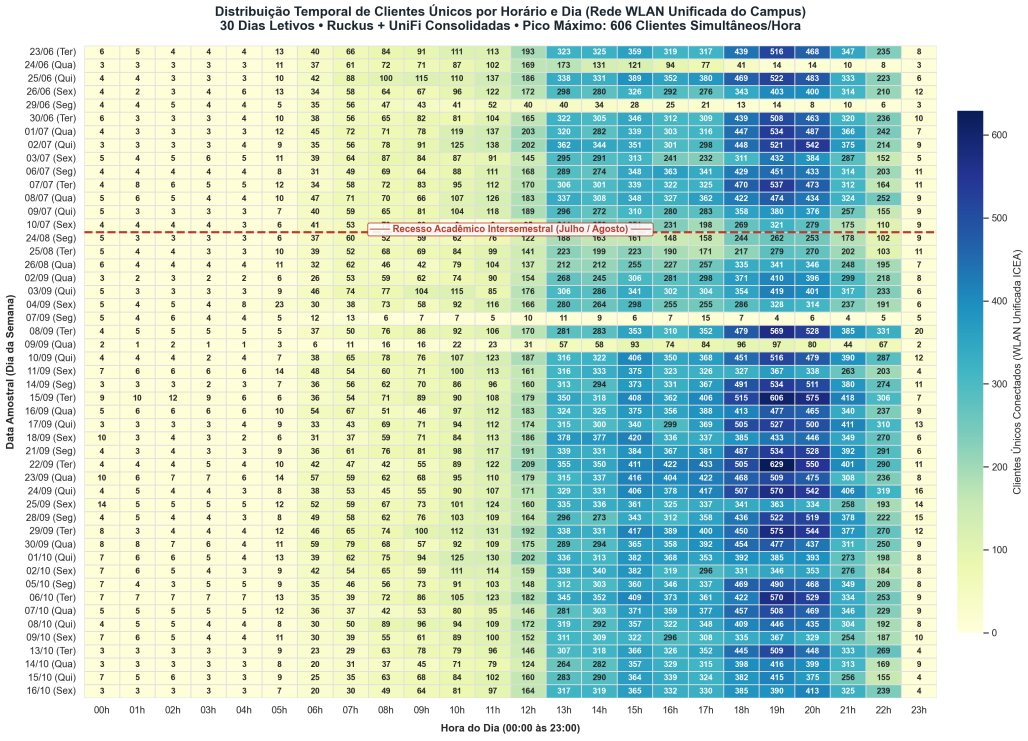


Figura 11 – Heatmap de Clientes Únicos

- O gráfico mostra a **rotina cíclica de uso da rede**: o volume de clientes inicia uma curva ascendente rápida a partir das **08:00**, atinge os maiores patamares no horário vespertino/noturno (especialmente entre **14:00** e **20:00**) e entra em declínio nas últimas horas da noite. A linha tracejada demarca o recesso acadêmico intersemestral de julho/agosto.

- **Atividade na madrugada**: entre 0h e 6h, período em que o ICEA não tem atividades, ainda se observam poucos clientes ativos (em geral, menos de 10 por hora). Supõe-se que esses registros correspondam principalmente a dispositivos da equipe de vigilância do campus e, possivelmente, a equipamentos que permanecem conectados de forma contínua.

- **Picos de Demanda**:

  – Na **rede unificada do campus**, o pico máximo de clientes simultâneos ocorreu no dia **22/09** às **19:00**, registrando **mais de 600** dispositivos conectados.

  - No ambiente Ruckus, o pico isolado ocorreu no dia **22/09** às **19:00**, registrando **599** dispositivos.
  - No ambiente UniFi, o pico isolado ocorreu no dia **06/10** às **19:00**, registrando **135** dispositivos.

- Os resultados indicam uma concentração expressivamente maior de dispositivos sob a infraestrutura Ruckus, principal sustentáculo da densidade estudantil em salas de aula e áreas comuns do campus.

5.3 Análise de Correlações

Esta seção apresenta os coeficientes de Pearson (r_p) e de Spearman (r_s) calculados entre as variáveis de telemetria, conforme descrito na Seção 3.6.1. Nas tabelas, um asterisco indica $p < 0,05$ e dois asteriscos indicam $p < 0,01$. A intensidade das correlações é classificada segundo a escala definida naquela seção. Nas relações que envolvem o RSSI, deve-se considerar que essa variável tem significados distintos em cada fabricante: na Ruckus, corresponde ao próprio sinal recebido, em dBm, e na UniFi, a um índice de SNR, em dB, como indicado nos eixos de cada painel das figuras. Como os coeficientes são calculados separadamente para cada fabricante, a comparação do sentido e da intensidade das correlações permanece válida, mas os valores absolutos de RSSI não devem ser comparados entre as marcas.

5.3.1 Tabela Consolidada de Coeficientes de Pearson (*r_p*) e Spearman (*r_s*)

A Tabela Geral de Correlações consolida os coeficientes de correlação linear e de postos calculados para o conjunto completo de dados telemétricos das redes Ruckus e UniFi. Os resultados sugerem padrões importantes sobre os comportamentos de radiofrequência e a atividade de tráfego dos usuários associados aos Access Points monitorados.

Tabela 7 – Tabela Consolidada de Coeficientes de Pearson (r_p) e Spearman (r_s)

Relação Investigada	Ruckus (r_p)	Ruckus (r_s)	Amostras (N)	UniFi (r_p)	UniFi (r_s)	Amostras (N)
RSSI x Throughput Total	-0,0020*	0,0241**	1081944	0,1237**	0,4552**	147517
RSSI x Retransmissoes	0,0437**	0,1714**	1081944	-0,3304**	-0,3318**	147517
Retransmissoes x Throughput Total	-0,1003**	-0,0941**	1202408	-0,0474**	-0,0724**	147517
Qtd Clientes x Throughput Agregado AP	0,6686**	0,8071**	173420	0,3318**	0,5779**	57873
Qtd Clientes x Retransmissoes Medias AP	-0,0615**	0,3508**	173420	0,0058	0,1167**	57873
Noise x Retransmissoes	-0,4248**	-0,6363**	1081944	0,0869**	0,0287**	147517
Noise x RSSI	-0,4029**	-0,3905**	1081944	0,0652**	0,0033	147517
Link Speed TX x Throughput TX	0,0760**	0,5199**	1116836	0,0673**	0,3726**	147517
Volume Total x Tempo de Sessao	0,3209**	0,6946**	1202408	0,1299**	0,3697**	147517

Fonte: Produzido pelos autores.

5.3.2 Interpretação da Matriz de Correlação (Heatmap Geral)

O mapa de calor multidimensional resume de forma visual as correlações cruzadas de Spearman para a totalidade das variáveis físicas e lógicas da telemetria. A análise das cores (tons quentes para associações positivas e frios para negativas) revela comportamentos característicos de cada fabricante. O RSSI não foi incluído na matriz porque, nos dados coletados, ele não acrescenta informação independente do sinal recebido: na Ruckus, o RSSI corresponde ao próprio sinal, e na UniFi equivale ao sinal deslocado por um ruído praticamente constante, o que produziria uma correlação de 1,00 apenas por construção.

No ambiente da rede Ruckus, a associação de destaque ocorre entre o ruído de fundo (noise) e a taxa de retransmissão de quadros, que exibem correlação inversa moderada a forte (r_s = -0,6363). Deve-se observar, porém, que a Ruckus não informa o ruído diretamente: ele é calculado como a diferença entre o sinal recebido e a SNR reportada pela controladora (Anexo A). Por isso, a correlação negativa entre ruído e sinal (r_s = -0,39) pode decorrer, em parte, desse próprio cálculo, já que o ruído derivado incorpora as variações da SNR de cada cliente. Por outro lado, a vazão individual dos dispositivos clientes apresenta correlação muito fraca ou desprezível com a intensidade de sinal recebido (r_s = 0,0241), indicando que os dados são consistentes com um cenário onde a grande maioria dos clientes permanece ociosa na maior parte do tempo.

Na rede UniFi, ao contrário do Ruckus, o ruído ambiental estimado apresenta correlação desprezível com as retransmissões (r_s = 0,03) e com o sinal recebido (r_s = 0,02), sugerindo que a gerência UniFi estima o ruído de forma estática no canal de RF. A vazão de throughput dos clientes UniFi exibe uma correlação monotônica positiva moderada com a potência do sinal (r_s = 0,4552), indicando que nesta infraestrutura a atenuação física do sinal na banda de 2,4 GHz atua limitando a taxa de transmissão efetiva negociada pelos rádios dos usuários distantes.

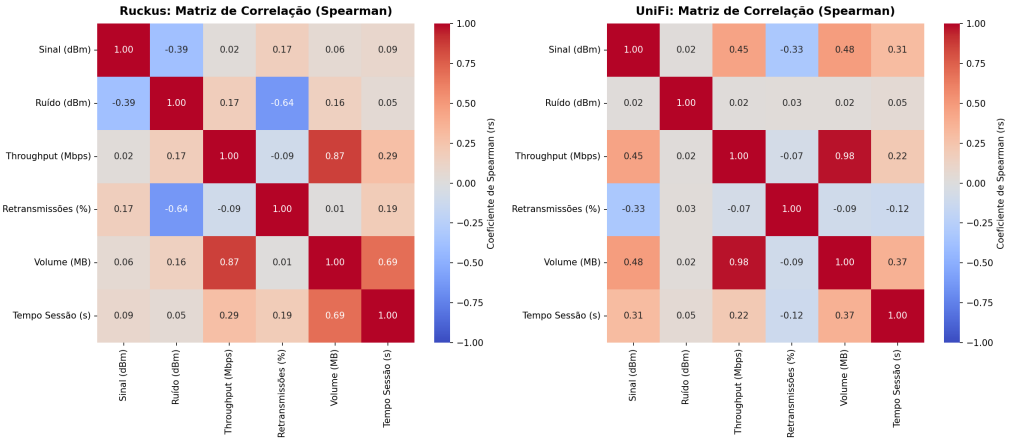


Figura 12 – Matriz de Correlação Heatmap

5.3.3 Discussão dos Gráficos de Dispersão e Regressão Linear

Nesta seção, analisa-se o comportamento das relações físicas bivariadas por meio de modelos de dispersão acompanhados de suas respectivas curvas de tendência de regressão linear.

5.3.3.1 Relação entre Intensidade de Sinal (RSSI) e Vazão (Throughput)

A Figura 13 ilustra a distribuição bivariada entre o nível de sinal físico (RSSI) e a taxa de vazão (throughput) de download e upload acumulada por cliente. Sob a perspectiva da teoria de radiofrequência, a expectativa consiste em uma correlação positiva moderada a forte, uma vez que sinais com maior potência física de recepção habilitam taxas de modulação física mais velozes (MCS), o que deveria expandir a vazão útil do cliente.

Contudo, os dados indicam uma correlação estatisticamente desprezível na rede Ruckus (r_p = -0,0020; r_s = 0,0241) e de intensidade fraca a moderada na rede UniFi (r_p = 0,1237; r_s = 0,4552). Embora a intensidade de sinal recebido influencie o limite superior da velocidade de modulação física (Link Speed), diversos clientes apresentaram baixíssima vazão de tráfego líquido mesmo sob excelente intensidade de sinal físico. Esse comportamento é consistente com a literatura de redes sem fio corporativas, pois redes baseadas no padrão IEEE 802.11 compartilham o tempo de canal (*airtime*) sob o protocolo de contenção CSMA/CA. Fatores adicionais como ociosidade voluntária das aplicações em segundo plano, retransmissões frequentes provocadas por interferência e a contenção decorrente do número de usuários simultâneos concorrendo pelo meio físico limitam a vazão útil na camada de aplicação, desacoplando o throughput individual do nível bruto de sinal RSSI. A correlação parcial observada na UniFi sugere que a banda de 2,4 GHz (altamente saturada e propensa a perdas) restringe de forma mais imediata a modulação de clientes com sinal degradado, atrelando a vazão prática de tráfego à potência de recepção.

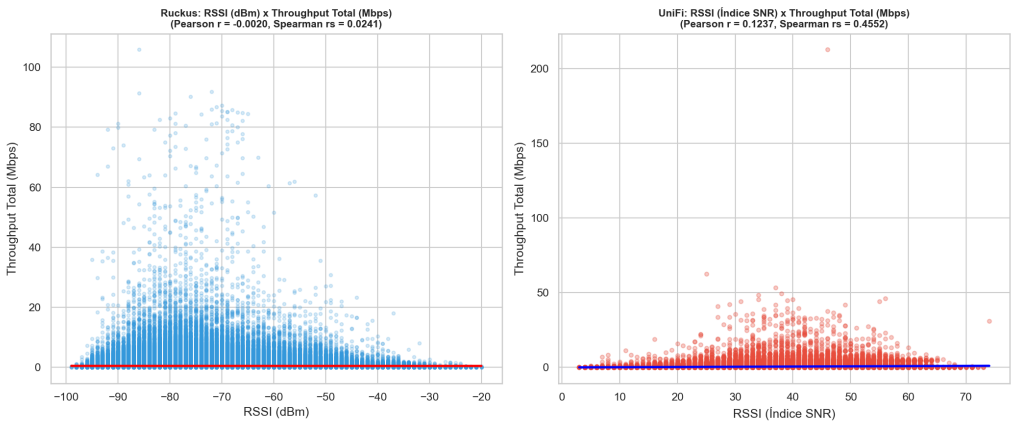


Figura 13 – RSSI x Throughput

5.3.3.2 Relação entre Intensidade de Sinal (RSSI) e Taxa de Retransmissão de Quadros

A Figura 14 apresenta a dispersão da taxa de retransmissão física de pacotes em função do sinal recebido. Sob a perspectiva da teoria de radiofrequência, a expectativa consiste em uma correlação negativa moderada a forte: níveis de sinal baixos degradam a relação sinal-ruído (SNR), facilitando a ocorrência de erros de bit (BER) no ar e forçando os rádios a retransmitirem os pacotes corrompidos para garantir a entrega da camada de enlace.

Os resultados obtidos sugerem uma correlação negativa moderada na rede UniFi (r_p = -0,3304; r_s = -0,3318), em plena concordância com a física tradicional do enlace atenuado. No entanto, a rede Ruckus exibe um comportamento singular de correlação positiva de intensidade extremamente fraca e estatisticamente desprezível (r_p = 0,0437; r_s = 0,1714). Uma explicação plausível para essa divergência é a tecnologia de antenas adaptativas BeamFlex+, presente nos APs Ruckus ZoneFlex R600 do campus (Ruckus Networks, 2018). Diferentemente de uma antena omnidirecional, que irradia a mesma energia em todas as direções, o BeamFlex+ escolhe em tempo real, para cada cliente, entre centenas de combinações de padrões de antena, concentrando a energia de RF na direção daquele dispositivo e acrescentando, segundo o fabricante, até 6 dB de ganho ao enlace. Assim, quando o sinal de um cliente começa a se degradar, o AP tende a transmitir de forma mais direcionada para ele, o que pode compensar parte da atenuação. Como a taxa de retransmissão medida na Ruckus se refere aos quadros transmitidos pelo AP ao cliente (contador de retransmissões TX, Anexo A), esse ganho atuaria justamente sobre a métrica analisada, o que poderia ajudar a explicar por que as retransmissões permanecem baixas mesmo para clientes com sinal fraco. Os dados coletados, porém, não registram o padrão de antena usado em cada transmissão, de modo que essa explicação é compatível com os resultados, mas não pôde ser verificada diretamente neste trabalho.

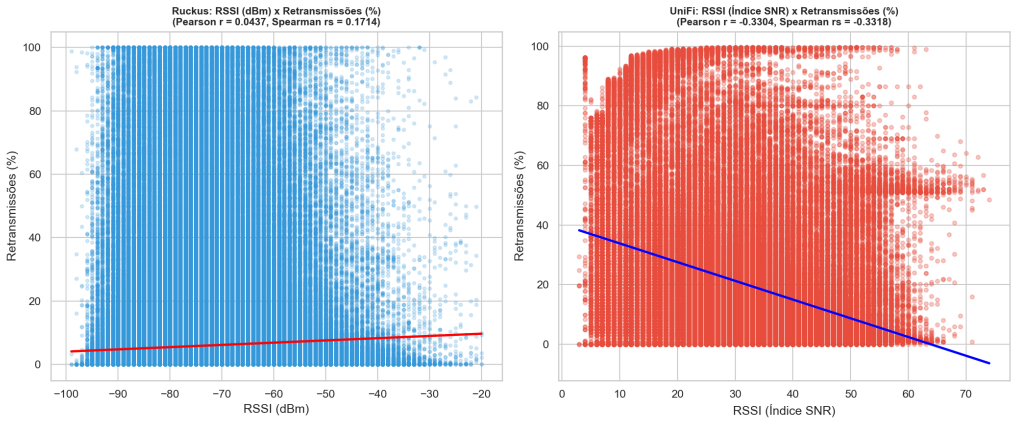


Figura 14 – RSSI x Retransmissões

5.3.3.3 Impacto das Retransmissões sobre a Vazão de Throughput do Cliente

A Figura 15 exibe a relação entre a taxa percentual de retransmissões e o throughput de dados ativo do cliente. Sob a perspectiva conceitual de redes sem fio, a expectativa teórica é de uma correlação negativa moderada, dado que retransmissões consomem tempo de canal (airtime) repetindo informações, reduzindo a capacidade de transmissão útil e afunilando a vazão máxima do usuário.

A análise empírica constatou uma correlação negativa fraca e muito próxima de desprezível em ambas as redes, com valores de Spearman de r_s = -0,0941 no Ruckus e r_s = -0,0724 na UniFi. Este comportamento sugere que a rede opera sob condições de carga individual distante do seu teto de saturação físico. Como a taxa média de tráfego consumida por cliente é substancialmente baixa no campus (predomínio de navegação web e mensagens), a capacidade excedente do meio físico permite que retransmissões de pacotes dispersas sejam reprocessadas sem gerar contenção severa o suficiente para causar queda drástica de throughput percebida nos dados consolidados.

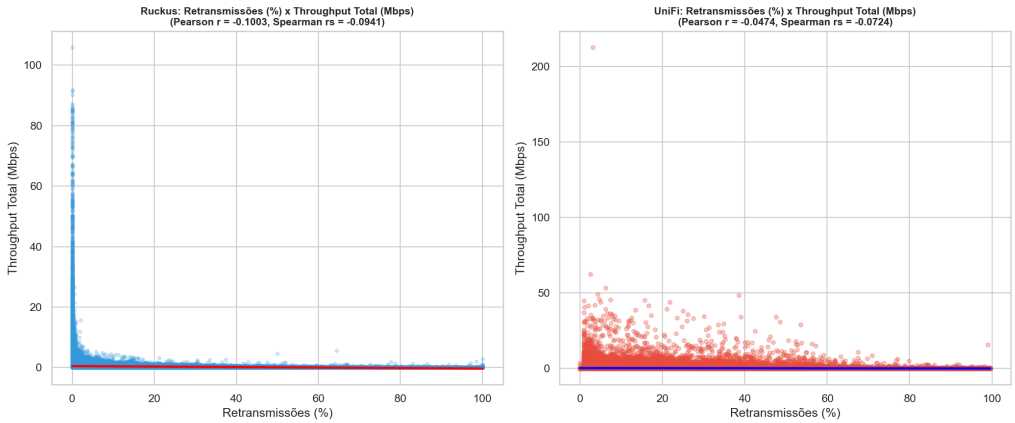


Figura 15 – Retransmissões x Throughput

5.3.3.4 Relação entre Quantidade de Clientes e Vazão Agregada do Access Point

A Figura 16 apresenta a correlação entre a quantidade de dispositivos conectados simultaneamente a um AP e a vazão de throughput total somada dos clientes do rádio. Esperava-se uma correlação positiva moderada a forte, dado que o aumento na densidade de usuários ativos em um AP tende a elevar proporcionalmente o volume agregado de dados em circulação no rádio físico.

Os dados corroboram a hipótese teórica com uma correlação positiva forte no Ruckus (r_s = 0,8071) e moderada a forte na UniFi (r_s = 0,5779). A relação cresce de forma acentuada com a quantidade de conexões, sugerindo que o tráfego total somado nas interfaces de rádio escala de forma proporcional com a ocupação do AP, mesmo que cada usuário individualmente consuma uma parcela de banda muito reduzida, refletindo a acumulação de tráfego em redes de acesso.

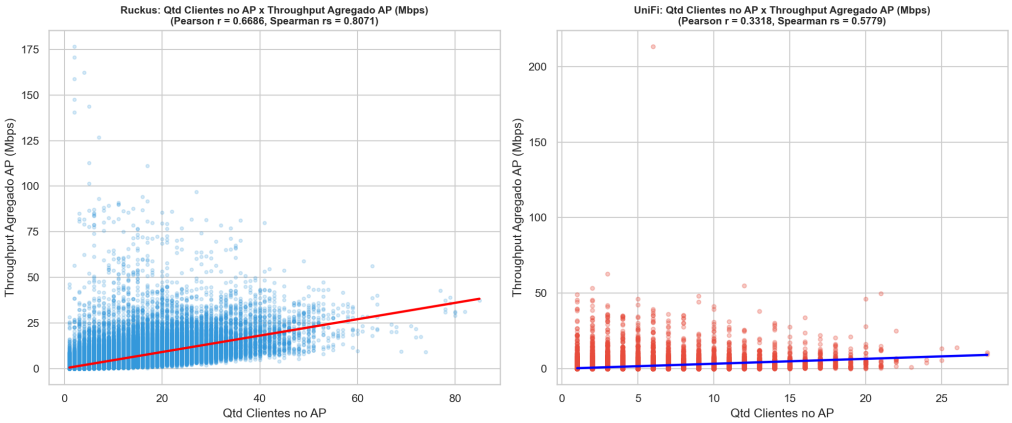


Figura 16 – Clientes x Throughput Agregado

5.3.3.5 Relação entre Densidade de Clientes e Taxa de Retransmissão Agregada do AP

A Figura 17 avalia o comportamento da taxa de retransmissão de quadros em função da quantidade de usuários conectados no mesmo rádio do AP. Relembrando as premissas físicas do protocolo 802.11, antecipava-se uma correlação positiva moderada, dado que mais clientes compartilhando ativamente o mesmo espectro físico de radiofrequência por meio de contenção CSMA/CA geram maior probabilidade de colisões de pacotes aéreos simultâneos, obrigando os rádios a retransmitirem os quadros.

Para esta análise, os registros de telemetria foram agrupados por AP e por instante de coleta. Em cada grupo, a quantidade de clientes n_t corresponde ao número de endereços MAC distintos associados ao AP no instante t, e a taxa de retransmissão agregada do AP ($R_{AP,t}$) corresponde à média aritmética simples das taxas de retransmissão individuais desses clientes, conforme a Equação 5.1:

$$R_{AP,t} = \frac{1}{n_t} \sum_{i=1}^{n_t} r_{i,t} \tag{5.1}$$

onde $r_{i,t}$ é a taxa de retransmissão do cliente i no instante t. Na Ruckus, $r_{i,t}$ é obtida a partir dos contadores SNMP cumulativos de quadros transmitidos e retransmitidos do cliente (Anexo A), como $r_{i,t} = \frac{tx_retries}{tx_packets + tx_retries} \times 100$. Na UniFi, que não expõe esses contadores, $r_{i,t}$ é estimada a partir do índice CCQ reportado pela controladora (escala de 0 a 1000), como $r_{i,t} = 100 - CCQ/10$. Por se tratar de uma média simples, cada cliente tem o mesmo peso no valor do AP, independentemente do volume de quadros que transmitiu.

A análise estatística revelou correlação linear nula no Ruckus (r_p = -0,0615) e muito fraca na UniFi (r_p = 0,0058), contudo a correlação monotônica de Spearman exibiu associação positiva fraca a moderada no Ruckus (r_s = 0,3508) e positiva fraca na UniFi (r_s = 0,1167). Estes coeficientes sugerem que, embora a colisão física tenda a crescer com a densidade de conexões (indicado pela correlação monotônica positiva),

os mecanismos lógicos de coordenação física dos APs conseguem gerenciar com eficácia a contenção e evitar surtos de colisões sob os níveis típicos de carga registrados no campus durante a coleta.

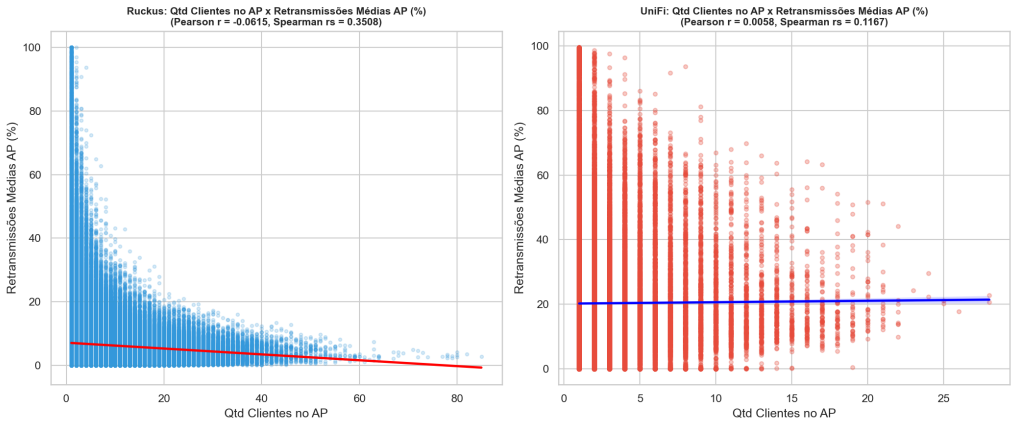


Figura 17 – Clientes x Retransmissões AP

5.3.3.6 Influência do Ruído de Fundo (Noise) sobre as Retransmissões de Quadros

A Figura 18 cruza a estimativa de ruído de fundo (noise) e a taxa de retransmissão física dos dispositivos clientes. A expectativa teórica é de correlação positiva, uma vez que o aumento do nível de ruído ambiental degrada a relação sinal-ruído (SNR) e prejudica a correta decodificação lógica dos bits recebidos no rádio receptor, gerando perdas e retransmissões.

A análise dos resultados indicou correlação desprezível na UniFi (r_s = 0,0287) e correlação negativa moderada a forte na Ruckus (r_p = -0,4248; r_s = -0,6363). Na UniFi, o ruído estimado reportado manteve-se estático na controladora, o que explica a ausência de correlação com as flutuações das retransmissões. Na Ruckus, a correlação negativa indica que o hardware de rádio dos APs estima o nível de ruído ininterrupto em função da energia captada durante as transmissões. Nos sensores da controladora SmartZone, variações de ruído e sinal ocorrem de forma acoplada ao tráfego do rádio, fazendo com que as medições registradas de ruído exibam essa dependência do canal ativo.

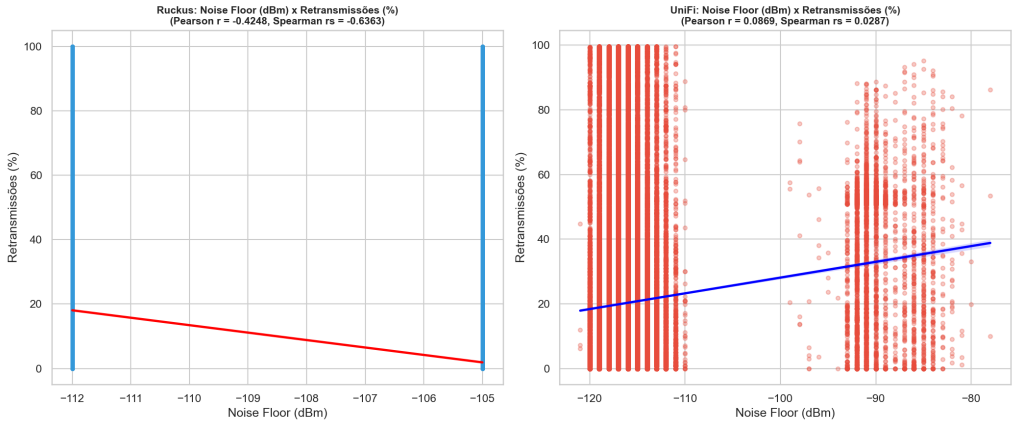


Figura 18 – Noise x Retransmissões

5.3.3.7 Relação entre Ruído de Fundo (Noise) e Intensidade de Sinal (RSSI)

A Figura 19 apresenta a dispersão entre o ruído de fundo estimado no AP e a potência de sinal recebido (RSSI) dos clientes associados. Fisicamente, espera-se correlação nula, dado que o ruído térmico e a interferência externa de RF que compõem o ruído do canal operam de forma independente do nível de sinal de transmissão negociado individualmente pelos dispositivos dos usuários conectados.

Os resultados obtidos sugerem a independência física na rede UniFi, indicando correlação linear nula (r_p = 0,0652) e monotônica quase nula e desprezível (r_s = 0,0033). No caso da rede Ruckus, contudo, observou-se correlação de postos negativa fraca a moderada (r_s = -0,3905). Este comportamento indica que as medições telemétricas de ruído de fundo extraídas dos sensores da controladora SmartZone sofrem influência do acoplamento do sinal ativo nos rádios, indicando que o ruído reportado não é puramente o ruído térmico ambiental isolado, mas sim um ruído dinâmico estimado que captura interferência eletromagnética co-canal durante os intervalos de monitoramento físico.

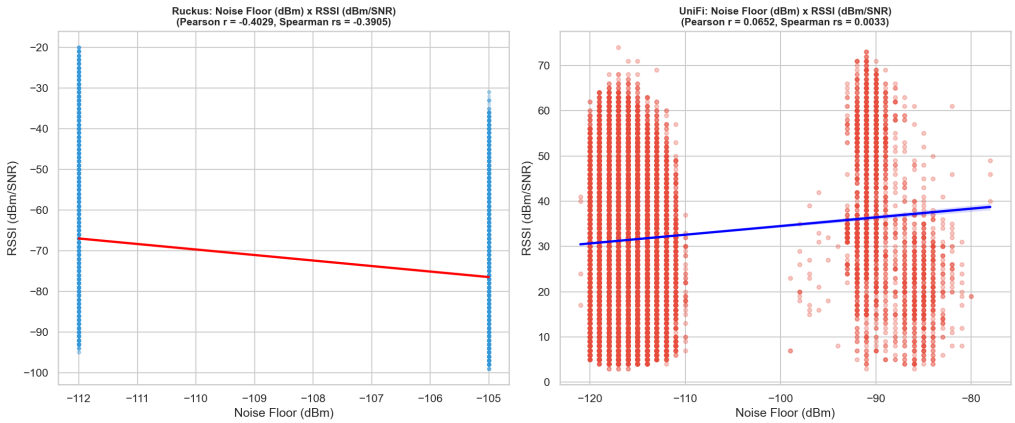


Figura 19 – Noise x RSSI

5.3.3.8 Influência da Velocidade de Modulação Física (Link Speed) sobre o Throughput de Transmissão

A Figura 20 apresenta a dispersão entre a velocidade nominal de modulação delink de transmissão (Link Speed TX) e o throughput real de transmissão alcançado pelo cliente. Conceitualmente, a modulação física do link de rádio define a vazão teórica máxima do enlace, pelo que se esperava uma correlação positiva moderada: clientes com links mais rápidos possuem janelas aéreas menores por bit transmitido, propiciando throughputs práticos elevados.

A análise indicou uma correlação monotônica moderada a fraca no Ruckus ($r_s = 0{,}5199$) e fraca na UniFi ($r_s = 0{,}3726$). O resultado é consistente com o comportamento de ociosidade operacional discutido na relação de RSSI e throughput: a velocidade do link de transmissão (Link Speed) é mantida elevada pela proximidade e qualidade física do enlace, porém a vazão efetivamente consumida pelos dispositivos é baixa, ditada unicamente pelas necessidades de download e upload das aplicações de software dos usuários.

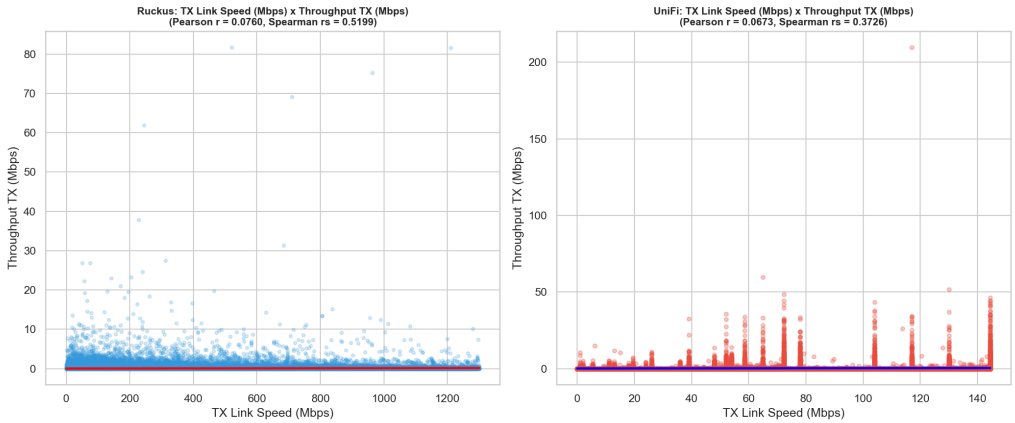


Figura 20 – Link Speed x Throughput

5.3.3.9 Relação entre Volume Total de Dados Trafegados e Tempo de Sessão do Cliente

A Figura 21 avalia o acúmulo total de tráfego de dados consumidos em megabytes (MB) em função do tempo contínuo de associação (uptime/tempo de sessão) do cliente na rede. Sob a perspectiva de uso da infraestrutura, a expectativa teórica consiste em uma correlação positiva forte, visto que o tráfego acumulado em uma sessão é uma função integrada da taxa instantânea ao longo do tempo.

Os dados corroboram a hipótese teórica, exibindo correlação positiva de Spearman moderada a forte na Ruckus ($r_s = 0{,}6946$) e moderada na UniFi ($r_s = 0{,}3697$). Esse comportamento sugere que a duração da conexão e a estabilidade da sessão representam fatores determinantes para o volume consolidado de dados trafegados pelos clientes, reforçando a importância do roaming sem perdas e da estabilidade do enlace na infraestrutura do campus.

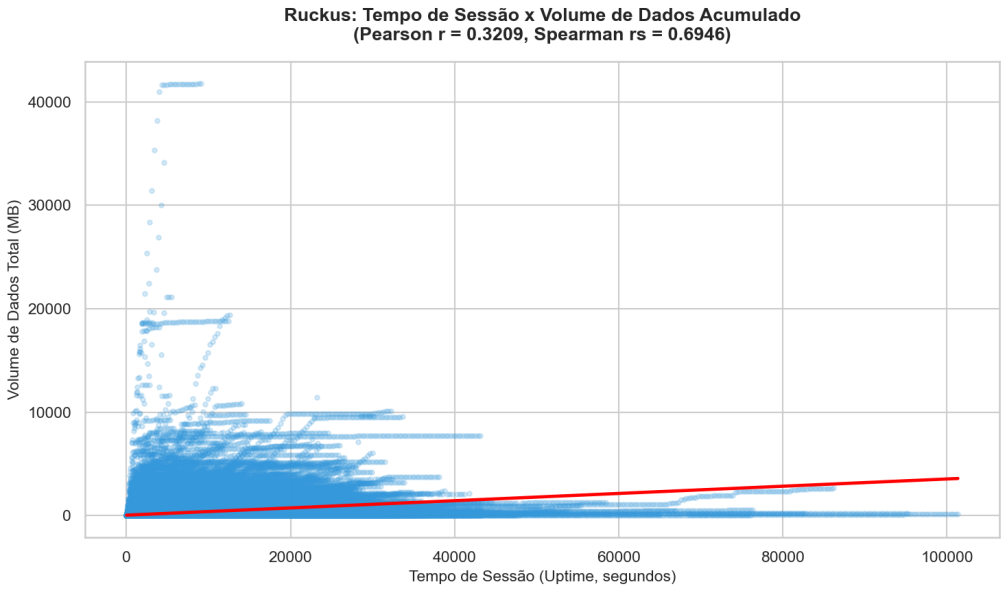


Figura 21 – Tempo de Sessão x Volume Ruckus

5.4 Testes Estatísticos de Hipótese

- **Limitação do Dataset da UniFi**: O conjunto de dados brutos da UniFi contém **apenas conexões ativas na banda de 2,4 GHz** ($N = 147517$). Não foram registradas coletas de clientes na banda de 5 GHz. Consequentemente, o teste comparativo de bandas (2,4 GHz vs 5 GHz) para a **UniFi** foi omitido por falta de amostras de 5 GHz, e a comparação de fabricantes em **5 GHz** foi classificada como *Dados Insuficientes* e omitida das visualizações correspondentes.

Os procedimentos estatísticos seguem o descrito nas Seções 3.6.2 e 3.6.3. O teste de Shapiro-Wilk, aplicado a subamostras aleatórias de 5.000 pontos, **rejeitou** a hipótese de normalidade para todas as métricas analisadas (retransmissões, RSSI/sinal e throughput; $p < 0,001$). Por isso, as comparações foram realizadas com o teste não-paramétrico U de Mann-Whitney ($\alpha = 0,05$), acompanhado do tamanho do efeito r (Equação 3.8).

5.4.1 Tabela Consolidada de Testes de Hipótese

Tabela 8 – Tabela Consolidada de Testes de Hipótese

Métrica	Comparação (A vs B)	Amostras (N_A vs N_B)	Média/Mediana (A vs B)	P-valor	Tam. Efeito (r / d)	Signif.?
RSSI	RK 2,4G vs RK 5G	267.567 vs 814.377	-67,0/-67,0 vs -76,5/-77,0	$p < 0,001$ $(^{***})$	0,3899	**Sim**
Retransmissões	RK 2,4G vs RK 5G	307.175 vs 895.233	16,4/3,6 vs 2,0/0,0	$p < 0,001$ $(^{***})$	0,5133	**Sim**
Throughput	RK 2,4G vs RK 5G	307.175 vs 895.233	0,2/0,1 vs 0,5/0,2	$p < 0,001$ $(^{***})$	0,1712	**Sim**
RSSI	UF 2,4G vs UF 5G	147.517 vs 0	N/A	N/A	N/A	**Insuf.**
Retransmissões	UF 2,4G vs UF 5G	147.517 vs 0	N/A	N/A	N/A	**Insuf.**
Throughput	UF 2,4G vs UF 5G	147.517 vs 0	N/A	N/A	N/A	**Insuf.**
Sinal Físico (dBm)	Ruckus vs UniFi	1.081.944 vs 147.517	-74,1/-75,0 vs -64,4/-64,0	$p < 0,001$ $(^{***})$	0,2494	**Sim**
Retransmissões	Ruckus vs UniFi	1.202.408 vs 147.517	5,7/0,0 vs 20,4/11,5	$p < 0,001$ $(^{***})$	0,3639	**Sim**
Throughput	Ruckus vs UniFi	1.202.408 vs 147.517	0,5/0,1 vs 0,3/0,0	$p < 0,001$ $(^{***})$	0,3208	**Sim**
Índice de Equidade (Jain)	Ruckus vs UniFi	13.297 vs 7.171	0,3/0,3 vs 0,2/0,1	$p < 0,001$ $(^{***})$	0,4117	**Sim**
Sinal Físico (dBm)	RK 2,4G vs UF 2,4G	267.567 vs 147.517	-67,0/-67,0 vs -64,4/-64,0	$p < 0,001$ $(^{***})$	0,1090	**Sim**
Retransmissões	RK 2,4G vs UF 2,4G	307.175 vs 147.517	16,4/3,6 vs 20,4/11,5	$p < 0,001$ $(^{***})$	0,1912	**Sim**
Throughput	RK 2,4G vs UF 2,4G	307.175 vs 147.517	0,2/0,1 vs 0,3/0,0	$p < 0,001$ $(^{***})$	0,4115	**Sim**
Sinal Físico (dBm)	RK 5G vs UF 5G	814.377 vs 0	N/A	N/A	N/A	**Insuf.**
Retransmissões	RK 5G vs UF 5G	895.233 vs 0	N/A	N/A	N/A	**Insuf.**
Throughput	RK 5G vs UF 5G	895.233 vs 0	N/A	N/A	N/A	**Insuf.**

Fonte: Produzido pelos autores.

Nota sobre a Tabela Consolidada: Os resultados sugerem diferenças estatisticamente significativas para todas as métricas comparadas que dispõem de dados suficientes ($p < 0,05$). Os coeficientes de tamanho de efeito (r) indicam magnitudes variadas, sugerindo que os desvios mais proeminentes localizam-se nas taxas de retransmissão e nas potências de sinal entre bandas, enquanto as diferenças de throughput sustentado e equidade apresentam efeitos sob a ótica amostral deste ambiente específico.

Em termos práticos de rede, essas diferenças observadas sugerem as seguintes implicações:

1. **RSSI e Cobertura Física**: A atenuação mais acentuada verificada na banda de 5 GHz (RSSI inferior no Ruckus) pode implicar em células de cobertura menores, sugerindo a necessidade de um planejamento de posicionamento de APs mais denso para evitar áreas de sombra. No entanto, onde há boa intensidade de sinal, a menor interferência dessa banda tende a favorecer taxas de modulação superiores.

2. **Eficiência de Airtime (Retransmissões)**: O maior índice médio de retransmissões associado à UniFi sugere que o tempo de uso do canal de rádio ("airtime") pode estar sendo mais consumido por repetições de quadros do que na Ruckus. Na prática, retransmissões mais elevadas reduzem a eficiência geral do canal, podendo degradar o tempo de resposta em ambientes muito povoados.

3. **Vazão Percebida (Throughput)**: A vazão individual média superior identificada no Ruckus sugere que os clientes ativos nessa rede obtiveram uma experiência potencialmente mais ágil no escoamento de dados. Contudo, dado que o throughput médio em ambas as redes permaneceu abaixo de 1 Mbps, isso indica que a maioria dos dispositivos esteve em estado ocioso ou consumindo serviços de baixa demanda.

4. **Índice de Equidade (Jain)**: A comparação do índice de equidade de Jain entre os fabricantes revela se a distribuição de throughput foi estatisticamente mais equilibrada em uma das marcas. Uma diferença significativa indica que os algoritmos de gerenciamento de RF e compartilhamento de canal de um dos fabricantes operaram de forma mais justa no cenário observado.

5.4.2 Discussão Detalhada das Comparações

5.4.2.1 Comparação de Bandas (2,4 GHz vs 5 GHz)

5.4.2.1.1 Ruckus

- **Visualização**:

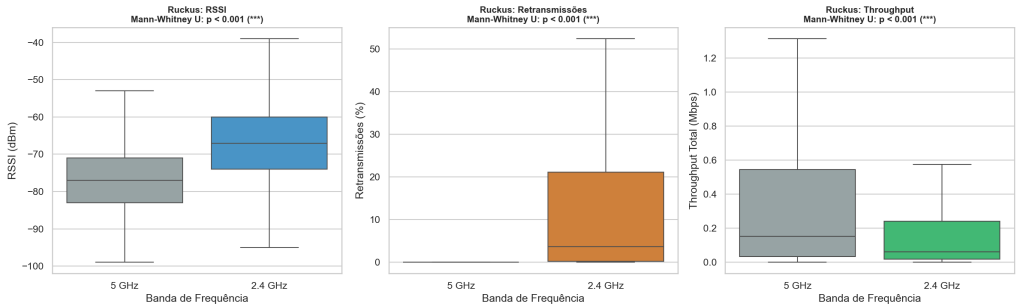


Figura 22 – Comparação de Bandas Ruckus

- **RSSI**: A diferença é altamente significativa ($p < 0,001$) com tamanho de efeito médio ($r = 0{,}3899$). A mediana em 2,4 GHz é de `-67.0 dBm` contra `-77.0 dBm` em 5 GHz, refletindo a física de atenuação do sinal de 5 GHz.

- **Retransmissões**: Diferença estatisticamente significativa ($p < 0,001$) com tamanho de efeito grande ($r = 0{,}5133$). O 2,4 GHz possui retransmissões médias de `16.40%` contra `2.02%` do 5 GHz, condizente com a poluição de espectro na frequência mais baixa.

- **Throughput**: Diferença estatisticamente significativa ($p < 0,001$) com tamanho de efeito pequeno ($r = 0{,}1712$). O throughput médio em 5 GHz (`0.531 Mbps`) mostra-se superior ao de 2,4 GHz (`0.247 Mbps`).

- **UniFi**: Omitido devido à indisponibilidade de conexões em 5 GHz na telemetria da UniFi.

5.4.2.2 Comparação de Fabricantes (Ruckus vs UniFi)

As comparações a seguir devem ser interpretadas com cautela: as duas redes diferem em geração de hardware, ambientes atendidos, perfil de usuários, escala e forma de obtenção das métricas (Seção 3.1). Assim, as diferenças estatisticamente significativas indicam que as duas redes se comportam de forma distinta, mas não permitem atribuir essas diferenças apenas ao fabricante.

5.4.2.2.1 Geral

- **Visualização**:

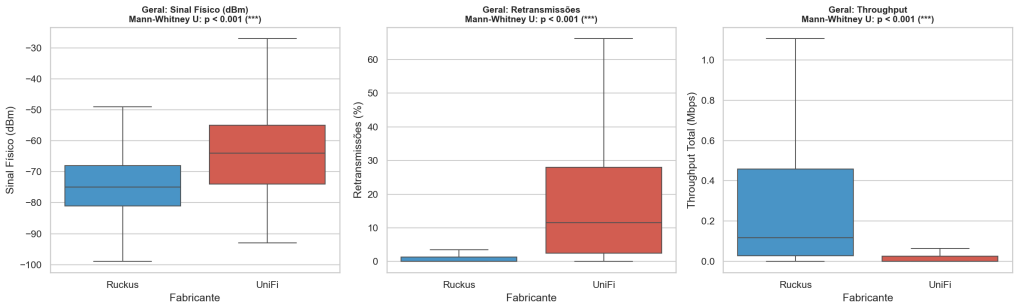


Figura 23 – Comparação de Fabricantes Geral

- **Sinal Físico (dBm)**: A UniFi registrou mediana de sinal físico de `-64.0 dBm` enquanto a Ruckus registrou `-75.0 dBm`, diferença significativa ($p < 0,001$) com tamanho de efeito pequeno ($r = 0{,}2494$). Isso reflete as características físicas específicas dos locais monitorados (escritórios e laboratórios com menor distância média aos APs na UniFi), embora a intensidade do sinal dependa também das antenas, potência de transmissão e características de hardware dos dispositivos clientes.
- **Retransmissões**: A diferença é altamente significativa ($p < 0,001$) com tamanho de efeito médio ($r = 0{,}3639$). A UniFi apresenta média de `20.38%` contra `5.70%` do Ruckus. Esta disparidade indica a influência da metodologia de medição: a UniFi estima a retransmissão indiretamente com base no CCQ do firmware, enquanto a Ruckus monitora estritamente a taxa de quadros físicos retransmitidos no rádio.
- **Throughput**: A Ruckus registrou throughput médio de `0.458 Mbps` contra `0.274 Mbps` da UniFi, com diferença estatisticamente significativa ($p < 0,001$) e tamanho de efeito médio ($r = 0{,}3208$). Os resultados sugerem que a rede Ruckus escoou uma taxa superior de dados por cliente no cenário coletado.
- **Índice de Equidade (Jain)**: A comparação da equidade de compartilhamento de throughput entre os clientes conectados simultaneamente revelou diferença estatisticamente significativa ($p < 0,001$) com tamanho de efeito médio ($r = 0{,}4117$). A

Ruckus registrou equidade média de `0.3224` e mediana de `0.2602`, enquanto a UniFi obteve média de `0.1950` e mediana de `0.1340`. Isso sugere tendências distintas no balanceamento de carga entre os clientes ativos de cada fabricante.

5.4.2.2.2 Comparações por Banda de 2,4 GHz (Isolado)

- **Visualização 2,4 GHz**:

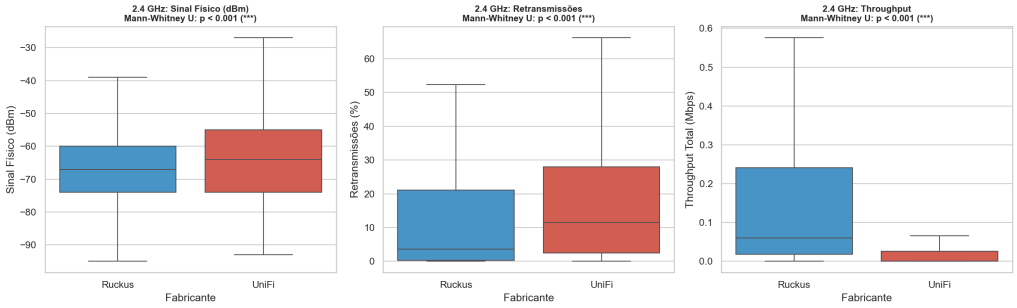


Figura 24 – Comparação de Fabricantes 2.4 GHz

- As tendências observadas no cenário geral se mantêm na frequência isolada de 2,4 GHz: o sinal recebido na UniFi apresenta-se melhor ($p < 0,001$), o throughput médio na Ruckus é superior ($p < 0,001$) e a taxa de retransmissões baseada no CCQ na UniFi mostra-se consideravelmente maior ($p < 0,001$).

5.4.2.2.3 Comparações por Banda de 5 GHz (Isolado)

- *Nota*: Não é possível realizar a comparação em 5 GHz entre fabricantes, pois a UniFi não registrou telemetria nessa frequência.

5.4.3 Tabela Detalhada dos Testes de Hipótese

A tabela abaixo apresenta os mesmos testes estatísticos em formato expandido, contendo os resultados individuais de verificação de normalidade (Shapiro-Wilk), o tipo de teste selecionado (U de Mann-Whitney ou Teste t) e o valor bruto calculado da estatística de teste.

Tabela 9 – Tabela Detalhada dos Testes de Hipótese

Métrica	Grupo A	Grupo B	Média/Mediana A	Média/Mediana B	Normal A/B	Teste Aplicado	Estatística	P-valor	Tam. Efeito (r / d)	Diferença Significativa?
RSSI	Ruckus 2,4G	Ruckus 5G	-67,004 / -67,000	-76,478 / -77,000	Não/Não	Mann-Whitney U	165793200315,00	$p < 0,001$ (***)	0,3899	**Sim**
Retransmissões	Ruckus 2,4G	Ruckus 5G	16,400 / 3,629	2,025 / 0,000	Não/Não	Mann-Whitney U	230929834945,50	$p < 0,001$ (***)	0,5133	**Sim**
Throughput	Ruckus 2,4G	Ruckus 5G	0,247 / 0,061	0,531 / 0,152	Não/Não	Mann-Whitney U	106327603225,50	$p < 0,001$ (***)	0,1712	**Sim**
RSSI	UniFi 2,4G	UniFi 5G	31,460 / 32,000	N/A	N/A/N/A	Nenhum (Dados Insuficientes)	N/A	N/A	N/A	**Dados Insuficientes**
Retransmissões	UniFi 2,4G	UniFi 5G	20,375 / 11,500	N/A	N/A/N/A	Nenhum (Dados Insuficientes)	N/A	N/A	N/A	**Dados Insuficientes**
Throughput	UniFi 2,4G	UniFi 5G	0,274 / 0,000	N/A	N/A/N/A	Nenhum (Dados Insuficientes)	N/A	N/A	N/A	**Dados Insuficientes**
Sinal Físico (dBm)	Ruckus	UniFi	-74,135 / -75,000	-64,394 / -64,000	Não/Não	Mann-Whitney U	44436357550,00	$p < 0,001$ (***)	0,2494	**Sim**
Retransmissões	Ruckus	UniFi	5,697 / 0,000	20,375 / 11,500	Não/Não	Mann-Whitney U	28962763055,50	$p < 0,001$ (***)	0,3639	**Sim**
Throughput	Ruckus	UniFi	0,458 / 0,118	0,274 / 0,000	Não/Não	Mann-Whitney U	141334104388,00	$p < 0,001$ (***)	0,3208	**Sim**
Índice de Equidade (Jain)	Ruckus	UniFi	0,322 / 0,260	0,195 / 0,134	Não/Não	Mann-Whitney U	71430513,50	$p < 0,001$ (***)	0,4117	**Sim**
Sinal Físico (dBm)	Ruckus 2,4G	UniFi 2,4G	-67,004 / -67,000	-64,394 / -64,000	Não/Não	Mann-Whitney U	17139400883,00	$p < 0,001$ (***)	0,1090	**Sim**
Retransmissões	Ruckus 2,4G	UniFi 2,4G	16,400 / 3,629	20,375 / 11,500	Não/Não	Mann-Whitney U	17315729161,00	$p < 0,001$ (***)	0,1912	**Sim**
Throughput	Ruckus 2,4G	UniFi 2,4G	0,247 / 0,061	0,274 / 0,000	Não/Não	Mann-Whitney U	34154654797,50	$p < 0,001$ (***)	0,4115	**Sim**
Sinal Físico (dBm)	Ruckus 5G	UniFi 5G	-76,478 / -77,000	N/A	N/A/N/A	Nenhum (Dados Insuficientes)	N/A	N/A	N/A	**Dados Insuficientes**
Retransmissões	Ruckus 5G	UniFi 5G	2,025 / 0,000	N/A	N/A/N/A	Nenhum (Dados Insuficientes)	N/A	N/A	N/A	**Dados Insuficientes**
Throughput	Ruckus 5G	UniFi 5G	0,531 / 0,152	N/A	N/A/N/A	Nenhum (Dados Insuficientes)	N/A	N/A	N/A	**Dados Insuficientes**

Fonte: Produzido pelos autores.

6 Classificação dos Gargalos

Este capítulo descreve a implementação prática do classificador determinístico heurístico de gargalos corporativos e a parametrização do modelo não-supervisionado de aprendizado de máquina *K-Means*. Os limiares de decisão e as variáveis do modelo de agrupamento foram definidos no Capítulo 3; aqui são apresentados a aplicação desses critérios aos dados coletados e a discussão dos resultados obtidos.

6.1 Classificação de Gargalos Baseada em Limiares

A identificação automática das causas de degradação em cada AP foi realizada pelo classificador heurístico descrito na Seção 3.5.1, que rotula cada amostra de telemetria em um dos cinco gargalos (G1 a G5) segundo os limiares ali justificados. As amostras que não atendem a nenhum desses critérios, isto é, com intensidade de sinal maior ou igual a -75 dBm e sem congestionamento, interferência, instabilidade de roaming ou saturação de cabeamento, são rotuladas como **Operação Ideal (Sem Gargalos)** e servem de referência para as comparações apresentadas a seguir.

Essa divisão sistemática permite que os administradores identifiquem se a degradação de intensidade de sinal (IS) de um setor decorre de barreiras estruturais da edificação (G1), subdimensionamento do número de rádios instalados (G2), poluição do espectro local por canais concorrentes (G3), instabilidade de antena do cliente (G4) ou obsolescência dos equipamentos de rede cabeada e switches locais (G5).

6.2 Agrupamento Operacional de Access Points (K-Means)

Com o objetivo de explorar agrupamentos operacionais típicos de cada rádio de forma automatizada e não-supervisionada, fornecendo uma perspectiva analítica complementar sem imposição prévia dos limiares heurísticos de G1 a G5, aplicou-se o algoritmo de aprendizado de máquina *K-Means*.

O algoritmo foi aplicado separadamente a cada fabricante, utilizando o vetor de variáveis X_j definido na Equação 3.9 (Seção 3.6.4), calculado a partir das médias temporais consolidadas de cada rádio. O número de clusters ($K = 4$) foi escolhido com base no Método do Cotovelo e nos índices de Silhueta e de Davies-Bouldin, conforme detalhado na Seção 6.3.6.

Antes de aplicar a clusterização, realizou-se a normalização z-score das variáveis de entrada por meio do módulo *StandardScaler*. Esse passo metodológico é essencial em

algoritmos de distância euclidiana como o *K-Means*, pois impede que métricas com escalas numéricas superiores (como as amostras físicas em dBm ou volumes agregados) dominem o cálculo de distância em relação a métricas com intervalos menores (como número médio de usuários).

A normalização z-score para uma variável x é dada pela Equação 6.1:

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \tag{6.1}$$

onde μ representa a média amostral e σ o desvio padrão da respectiva métrica.

A execução do modelo de agrupamento classifica cada rádio no cluster com a menor distância quadrada média até o centróide representante, originando os perfis descritos como Grupo A (Muito Carregado), Grupo B (Pouco Utilizado), Grupo C (Carga Moderada) e Grupo D (Baixa Qualidade de Sinal / Instável).

6.3 Classificação de Gargalos de Rede

6.3.1 Limiares de Decisão Estabelecidos

1. **G1: Baixa Qualidade de Enlace**: Potência física de sinal recebido pelo AP (`signal`) < `-75 dBm`.
2. **G2: Congestionamento do Meio**: Número de clientes simultâneos conectados no mesmo AP e minuto >= 15.
3. **G3: Interferência / SNR Ruim**: Ruído de fundo (`noise`) > `-90 dBm` ou SNR < `20 dB` em clientes com bom sinal (>= -75 dBm).
4. **G4: Instabilidade de Roaming**: Clientes (MAC) que registraram > 15 trocas de AP no período de observação de um dia (ping-pong roaming).
5. **G5: Gargalo Cabeado (FE)**: Throughput de tráfego agregado sustentado do AP >= 90 Mbps (limite de interface Fast Ethernet de 100 Mbps).

6.3.2 Tabela Geral de Ocorrência e Impacto de Gargalos

A Tabela Geral de Ocorrência apresenta as taxas e consequências físicas associadas a cada tipo de gargalo detectado de forma isolada ao longo do monitoramento de produção.

Tabela 10 – Tabela Geral de Ocorrência e Impacto de Gargalos

Fabricante	Categoria de Gargalo	Amostras (N)	Porcentagem (%)	Throughput Cliente (Méd/Med) [Mbps]	Retransmissões (Méd/Med) [%]
Ruckus	G1: Baixa Qualidade de Enlace	534.809	44,48%	0,489 / 0,133	5,08% / 0,00%
UniFi	G1: Baixa Qualidade de Enlace	31.481	21,34%	0,032 / 0,000	35,72% / 24,90%
Ruckus	G2: Congestionamento do Meio	569.724	47,38%	0,452 / 0,121	4,80% / 0,00%
UniFi	G2: Congestionamento do Meio	7.167	4,86%	0,297 / 0,006	20,01% / 12,70%
Ruckus	G3: Interferência / SNR Ruim	0	0,00%	0,000 / 0,000	0,00% / 0,00%
UniFi	G3: Interferência / SNR Ruim	1.032	0,70%	0,072 / 0,000	32,97% / 31,35%
Ruckus	G4: Instabilidade de Roaming	184.366	15,33%	0,350 / 0,097	8,23% / 0,14%
UniFi	G4: Instabilidade de Roaming	9.709	6,58%	0,041 / 0,000	16,64% / 11,90%
Ruckus	G5: Gargalo Cabeado (FE)	142	0,01%	14,854 / 0,225	3,68% / 0,00%
UniFi	G5: Gargalo Cabeado (FE)	6	0,00%	35,573 / 0,002	8,28% / 2,30%
Ruckus	Sem Gargalos	299.598	24,92%	0,463 / 0,110	5,90% / 0,00%
UniFi	Sem Gargalos	100.374	68,04%	0,365 / 0,004	16,04% / 8,50%

Fonte: Produzido pelos autores.

6.3.3 Análise de Desempenho e Carga por Access Point

Abaixo são apresentados os perfis consolidados de carga e desempenho de cada Access Point mapeado na coleta, ordenados pelo throughput agregado médio (indicador de demanda atendida).

6.3.3.1 Rede Ruckus (APs MAC Simplificados)

Tabela 11 – Rede Ruckus (APs MAC Simplificados)

Access Point	Amostras (N)	Clientes Médios (Pico)	Throughput Agregado Médio (Max) [Mbps]	Sinal Médio [dBm]	Retransmissões Médias [%]	Throughput Médio p/ Cliente [Mbps]	Equidade Média (Jain)	Perfil Operacional (Cluster)
RK-fea0	101.204	25,2 (max 85)	14,502 (max 111,108)	-76,8	4,28%	0,574	0,2846	Grupo A: Muito Carregado
RK-0d40	89.171	19,4 (max 50)	9,897 (max 90,891)	-75,2	3,09%	0,515	0,3099	Grupo A: Muito Carregado
RK-27d0	105.819	22,7 (max 74)	8,549 (max 82,020)	-75,6	5,42%	0,389	0,3267	Grupo A: Muito Carregado
RK-51f0	112.776	20,7 (max 63)	8,084 (max 56,258)	-75,3	5,33%	0,383	0,3548	Grupo A: Muito Carregado
RK-2fd0	67.683	17,5 (max 54)	7,818 (max 67,446)	-74,9	5,65%	0,460	0,3419	Grupo C: Carga Moderada
RK-35c0	68.187	14,9 (max 38)	7,606 (max 90,198)	-74,7	8,10%	0,530	0,3472	Grupo D: Baixa Qualidade de Sinal
RK-efe0	84.192	15,9 (max 72)	7,260 (max 64,080)	-67,4	5,63%	0,501	0,3749	Grupo B: Pouco Utilizado
RK-4050	67.320	15,7 (max 46)	7,182 (max 79,627)	-72,4	5,50%	0,470	0,3596	Grupo C: Carga Moderada
RK-3180	62.957	15,3 (max 35)	6,575 (max 81,849)	-75,0	2,88%	0,426	0,3849	Grupo C: Carga Moderada
RK-1e40	42.090	13,7 (max 39)	6,514 (max 91,792)	-74,4	7,38%	0,462	0,3778	Grupo D: Baixa Qualidade de Sinal
RK-9660	51.807	13,3 (max 36)	5,875 (max 71,037)	-75,7	4,96%	0,450	0,3731	Grupo C: Carga Moderada
RK-e8a0	41.167	11,3 (max 41)	4,760 (max 176,574)	-72,5	5,43%	0,495	0,3916	Grupo B: Pouco Utilizado
RK-0780	5.608	14,9 (max 38)	4,683 (max 21,901)	-71,7	6,04%	0,303	0,3896	Grupo B: Pouco Utilizado
RK-42a0	30.060	8,7 (max 34)	4,262 (max 42,068)	-71,4	5,04%	0,481	0,4788	Grupo B: Pouco Utilizado
RK-5fe0	27.460	6,5 (max 22)	3,795 (max 55,447)	-73,0	6,21%	0,537	0,4740	Grupo B: Pouco Utilizado
RK-1060	33.892	8,9 (max 26)	3,712 (max 44,399)	-75,7	6,40%	0,430	0,4055	Grupo D: Baixa Qualidade de Sinal
RK-1c10	26.428	8,1 (max 45)	3,449 (max 81,995)	-76,0	7,98%	0,483	0,4411	Grupo D: Baixa Qualidade de Sinal
RK-7090	31.265	8,0 (max 25)	3,319 (max 36,984)	-74,3	7,78%	0,391	0,4152	Grupo D: Baixa Qualidade de Sinal
RK-1730	51.647	9,0 (max 27)	3,268 (max 29,586)	-74,2	9,32%	0,426	0,4405	Grupo D: Baixa Qualidade de Sinal
RK-3b10	27.793	6,8 (max 20)	2,917 (max 40,003)	-71,8	5,46%	0,434	0,5111	Grupo B: Pouco Utilizado
RK-3440	28.798	8,6 (max 34)	2,246 (max 38,496)	-75,8	10,45%	0,285	0,4131	Grupo D: Baixa Qualidade de Sinal
RK-edd0	9.461	3,2 (max 9)	1,963 (max 22,949)	-73,8	2,18%	0,644	0,6063	Grupo B: Pouco Utilizado
RK-f3f0	20.775	3,4 (max 13)	1,605 (max 47,419)	-69,6	7,39%	0,422	0,4995	Grupo B: Pouco Utilizado
RK-dcd0	14.848	5,1 (max 24)	1,189 (max 20,727)	-74,4	5,38%	0,262	0,4274	Grupo B: Pouco Utilizado

Fonte: Produzido pelos autores.

6.3.3.2 Rede UniFi (APs Cadastrados)

Tabela 12 – Rede UniFi (APs Cadastrados)

Access Point	Amostras (N)	Clientes Médios (Pico)	Throughput Agregado Médio (Max) [Mbps]	Sinal Médio [dBm]	Retransmissões Médias [%]	Throughput Médio p/ Cliente [Mbps]	Equidade Média (Jain)	Perfil Operacional (Cluster)
B-301_D	15.776	9,0 (max 22)	3,942 (max 54,860)	-57,4	14,16%	0,470	0,2811	Grupo A: Muito Carregado
Lab Redes	19.505	8,9 (max 28)	2,723 (max 46,027)	-64,5	24,04%	0,265	0,2739	Grupo A: Muito Carregado
B-300_E	11.744	5,7 (max 16)	2,102 (max 44,875)	-60,8	13,42%	0,394	0,3449	Grupo A: Muito Carregado
B-100_Recepcao_BBT	12.458	4,3 (max 12)	1,728 (max 62,552)	-63,6	12,81%	0,372	0,3726	Grupo B: Pouco Utilizado
Guarita Entrada	18.585	5,3 (max 24)	1,202 (max 32,190)	-71,3	36,75%	0,295	0,3433	Grupo B: Pouco Utilizado
B-200_Bibliotecaria	9.307	3,2 (max 10)	0,999 (max 213,436)	-59,6	17,34%	0,310	0,4420	Grupo B: Pouco Utilizado
Lab Expressao	10.495	6,8 (max 21)	0,970 (max 33,068)	-63,3	12,51%	0,125	0,3312	Grupo B: Pouco Utilizado
B-100_Empresa_Junior	4.370	3,4 (max 11)	0,788 (max 49,174)	-66,0	20,57%	0,254	0,4256	Grupo B: Pouco Utilizado
C-304 Rack	6.843	3,4 (max 12)	0,750 (max 39,291)	-66,6	19,75%	0,237	0,4181	Grupo B: Pouco Utilizado
B-200_D	3.193	2,4 (max 9)	0,714 (max 31,014)	-67,8	24,02%	0,222	0,4975	Grupo B: Pouco Utilizado
A-201	5.695	2,3 (max 7)	0,574 (max 18,366)	-65,9	18,48%	0,260	0,4906	Grupo B: Pouco Utilizado
A400-Rack	2.021	2,0 (max 6)	0,509 (max 36,024)	-66,9	16,47%	0,234	0,5352	Grupo B: Pouco Utilizado
A400-1	7.241	2,3 (max 9)	0,467 (max 16,116)	-67,8	17,66%	0,155	0,4692	Grupo B: Pouco Utilizado
A101-Novo	10.347	2,4 (max 7)	0,313 (max 42,356)	-65,8	21,13%	0,109	0,4893	Grupo B: Pouco Utilizado
A100-recepçao	4.721	1,7 (max 9)	0,243 (max 8,115)	-71,1	15,92%	0,127	0,6174	Grupo B: Pouco Utilizado
TEMP_EVENTO_H102	1.737	2,0 (max 8)	0,166 (max 8,738)	-74,1	19,56%	0,074	0,5107	Grupo B: Pouco Utilizado
B-100_Arduino	20	1,0 (max 1)	0,164 (max 1,850)	-43,9	7,19%	0,164	N/A	Grupo D: Baixa Retransmissão / Estável
PICO-H-100	2.355	1,4 (max 6)	0,131 (max 18,152)	-44,6	40,18%	0,067	0,5581	Grupo C: Alta Retransmissão
Pico-D200	740	1,3 (max 6)	0,068 (max 4,730)	-64,8	29,69%	0,055	0,7103	Grupo B: Pouco Utilizado
PICOH-206	364	1,1 (max 2)	0,061 (max 4,121)	-65,8	21,66%	0,049	0,7217	Grupo B: Pouco Utilizado

Fonte: Produzido pelos autores.

6.3.4 Análise de Distribuição e Frequência

O histograma geral ilustra as taxas percentuais de ocorrência de cada tipo de gargalo. Os resultados sugerem disparidades sistemáticas entre as marcas decorrentes do posicionamento físico dos APs e da ocupação do campus.

1. **Baixa Qualidade de Enlace (G1)**:
   - Afeta **44,48%** das amostras na Ruckus e **21,34%** na UniFi. Esse perfil elevado indica que uma porção considerável dos usuários se posicionou nas bordas de cobertura ou em zonas de sombra de sinal Wi-Fi nas dependências do campus.
2. **Congestionamento do Meio (G2)**:
   - A Ruckus registrou **47,38%** de suas amostras sob congestionamento (APs com 15 ou mais clientes simultâneos), enquanto a UniFi teve apenas **4,86%** sob essa condição. Essa discrepância é consistente com o fato de a rede Ruckus atender a setores de maior fluxo de estudantes, suportando forte densidade.
3. **Interferência (G3)**:
   - Este gargalo teve incidência nula na Ruckus (**0,00%**) e ínfima na UniFi (**0,70%**) sob os critérios rigorosos avaliados de forma isolada, sugerindo que os cenários de alta retransmissão estão fundamentalmente vinculados à fraca qualidade de sinal ou ao excessivo congestionamento e trocas de AP.
4. **Instabilidade de Roaming (G4)**:
   - Afetou **15,33%** dos registros de Ruckus e **6,58%** de UniFi. Dispositivos móveis realizam transições frequentes de antena ou persistem associados a APs distantes (*sticky clients*), caracterizando o impacto da volatilidade de cobertura e mobilidade no campus.
5. **Limitação de Infraestrutura Cabeada (G5)**:
   - Virtualmente nula (**0,01%** na Ruckus e **0,00%** na UniFi). O tráfego não saturou de forma crônica as portas Fast Ethernet, indicando que o gargalo de *backhaul* cabeado não é a atual limitação de desempenho.

6.3.5 Análise de Consequências e Hipóteses

6.3.5.1 Impacto no Throughput

- **Padrão de Throughput (Sem Gargalos)**: Sob condições ideais ("Sem Gargalos"), o throughput médio por cliente foi de `0.463 Mbps` no Ruckus e `0.365 Mbps` no UniFi.

- **Consequência de Baixa Qualidade de Sinal (G1)**: No Ruckus, a vazão média foi de `0.489 Mbps`, ligeiramente superior à da condição ideal (aumento de 5,6%), o que sugere que, nos dados coletados, o sinal abaixo de -75 dBm não se traduziu em redução da vazão média dos clientes Ruckus. Já na UniFi, a vazão caiu para `0.032 Mbps` (redução de 91,2%). Os dados sugerem três fatores que podem contribuir para essa queda. Primeiro, a velocidade de ligação física (*Link Speed*) dos clientes UniFi com sinal fraco foi, em média, de 33 Mbps, contra 85 Mbps com sinal adequado, enquanto na Ruckus a redução foi bem menor (de 161 para 141 Mbps). Essa diferença é compatível com as limitações dos equipamentos UniFi do campus, modelos legados 802.11n restritos a 2,4 GHz e sem antenas adaptativas, em contraste com o BeamFlex+ da Ruckus, que direciona a energia de RF para os clientes (ver a discussão da Figura 14). Segundo, a taxa média de retransmissão desses clientes UniFi praticamente dobrou (de 16,2% para 35,7%), reduzindo o tempo de canal disponível para dados úteis. Terceiro, 64% dos registros UniFi com sinal fraco apresentaram vazão nula, contra 23% com sinal adequado, e quase 30% desses registros vieram de um único AP, localizado na guarita de entrada do campus. Uma possível explicação é que parte desses clientes corresponda a dispositivos de pessoas de passagem pela portaria, que se associam automaticamente a um sinal distante sem gerar tráfego, o que reduz a média sem indicar, necessariamente, uma falha no atendimento a quem utiliza a rede.

- **Consequência de Congestionamento (G2)**: A vazão média manteve-se em `0.452 Mbps` no Ruckus e registrou queda na UniFi para `0.297 Mbps` (redução de 18,6% em relação à condição ideal), refletindo o efeito do compartilhamento de tempo de transmissão aérea (CSMA/CA).

- **Consequência de Interferência (G3)**: Não houve registros isolados suficientes no Ruckus (incidência de 0,00%), enquanto a UniFi registrou queda significativa da vazão média para `0.072 Mbps` (redução de 80,3% em relação ao ideal).

- **Consequência de Instabilidade de Roaming (G4)**: O throughput médio de clientes afetados por roaming frequente foi de `0.350 Mbps` no Ruckus (queda de 24,3% em relação ao ideal) e `0.041 Mbps` no UniFi.

6.3.5.2 Impacto nas Retransmissões

- **Padrão Esperado (Sem Gargalos)**: Sob condições ideais, as taxas médias de retransmissão situaram-se em `5.90%` na Ruckus e `16.04%` na UniFi.

- **Consequência de Baixa Qualidade de Sinal (G1)**: Sob sinal fraco, a taxa de retransmissão no Ruckus foi de `5.08%`, ligeiramente inferior à da condição ideal (redução de 13,8%), o que sugere que, nos dados coletados, o sinal fraco não se refletiu

em aumento das retransmissões na Ruckus, resultado coerente com a correlação desprezível entre sinal e retransmissões observada nessa rede. Na UniFi, contudo, observou-se a maior elevação registrada, alcançando `35.72%` (um aumento de 122,6% em relação ao ideal), indicando a degradação da integridade de quadros em enlaces atenuados.

- **Consequência de Congestionamento (G2)**: A taxa de retransmissão manteve-se estável na Ruckus (`4.80%`) e na UniFi (`20.01%`), sugerindo que a concorrência pelo meio não foi a causa primária para o aumento direto de retransmissões.
- **Consequência de Interferência (G3)**: Sem registros isolados na Ruckus, a UniFi registrou taxa de retransmissão elevada em `32.97%` (aumento de 105,5% em relação ao ideal), o que evidencia a ocorrência de colisões provocadas por ruído de RF.
- **Consequência de Instabilidade de Roaming (G4)**: A taxa no Ruckus variou ligeiramente para `8.23%` (aumento de 39,5% em relação ao ideal), enquanto a UniFi registrou taxa média de `16.64%`.

6.3.6 Clusterização e Perfil Operacional dos Access Points (K-Means)

Para agrupar os Access Points com comportamentos operacionais semelhantes e gerar um mapa de diagnóstico útil, aplicou-se o algoritmo de aprendizado de máquina **K-Means** (com $K = 4$ clusters para cada fabricante). A clusterização baseou-se na aplicação do algoritmo com normalização prévia das variáveis por meio do `StandardScaler` para evitar que a diferença de escalas (como potência de sinal em dBm vs clientes em unidades) distorcesse as distâncias euclidianas.

A escolha do número de clusters ($K = 4$) foi fundamentada por uma análise quantitativa cruzada baseada no Método do Cotovelo (inércia intra-cluster), no Índice de Silhueta (*Silhouette Score*) e no Índice de Davies-Bouldin:

- **Ambiente Ruckus**: A análise matemática revelou que o valor ótimo de partição é estritamente $K = 4$. O índice de silhueta obteve seu pico máximo de **0,3383** em $K = 4$ (comparado a 0,3157 para $K = 2$, 0,3136 para $K = 3$ e 0,3114 para $K = 5$), enquanto o índice de Davies-Bouldin obteve o menor valor registrado de **0,7953** (contra 1,0517 em $K = 2$ e 0,9440 em $K = 3$), justificando matematicamente a divisão natural em quatro perfis operacionais de rádio;
- **Ambiente UniFi**: O Método do Cotovelo indicou uma redução acentuada da inércia de **45,27** ($K = 2$) para **17,36** ($K = 3$) e **11,13** ($K = 4$), estabilizando-se em **8,89** para $K = 5$. Embora as métricas de partição silhueta e Davies-Bouldin apontem que a rede UniFi divide-se fortemente em duas grandes macro-regiões ($K = 2$, com silhueta de 0,5538 e Davies-Bouldin de 0,2959) devido à ociosidade crônica do

espectro de 2,4 GHz, a adoção de $K = 4$ foi mantida por simetria de modelo de análise comparativa. Esta escolha permitiu expor perfis operacionais minoritários de suma importância para o diagnóstico da rede, como o cluster de anomalia de RF (Grupo C: Alta Retransmissão).

As variáveis utilizadas para a clusterização foram: média de clientes, throughput agregado médio do AP, sinal físico médio e taxa média de retransmissões. Os centróides e perfis detalhados resultantes de cada cluster são discutidos a seguir:

6.3.6.1 Perfis de Rádios Ruckus

Tabela 13 – Perfis de Rádios Ruckus

Perfil Operacional (Cluster)	Média Clientes	Throughput Agregado Médio [Mbps]	Sinal Médio [dBm]	Retransmissões Médias [%]
Grupo A: Muito Carregado	22,00	10,258	-75,7	4,53%
Grupo B: Pouco Utilizado	8,43	3,604	-71,7	5,42%
Grupo C: Carga Moderada	15,44	6,862	-74,5	4,75%
Grupo D: Baixa Qualidade de Sinal	10,17	4,302	-75,0	8,20%

Fonte: Produzido pelos autores.

- **Grupo A: Muito Carregado**: Representa os access points que operam sob intensa demanda de usuários (como `RK-fea0` e `RK-0d40`, com média de `22.00` clientes conectados e pico de tráfego agregado médio de `10.258 Mbps`). Esse grupo reúne as condições de dois gargalos: alta concorrência de canal, com média de clientes acima do limiar de 15 dispositivos do Gargalo G2, e sinal físico médio de `-75.7 dBm`, abaixo do limiar de -75 dBm do Gargalo G1. Ainda assim, apresenta a menor taxa de retransmissão de toda a rede Ruckus (média de `4.53%`), o que sugere que, nesses APs, nem a densidade de clientes nem o sinal atenuado se refletiram em mais retransmissões no período observado. Uma possível explicação é a tecnologia de antenas adaptativas BeamFlex+ dos APs Ruckus, que direciona a energia de RF para cada cliente (Ruckus Networks, 2018) (ver a discussão da Figura 14), hipótese que não pôde ser verificada diretamente com os dados coletados. A ação prática sugerida para estes APs visa aliviar a contenção de tempo aéreo (*airtime*) por meio da ativação do direcionamento de banda (*Band Steering*) e regras de balanceamento de carga ativo nas controladoras (Seção 7.2).

- **Grupo B: Pouco Utilizado**: Constituído por APs com baixo volume de tráfego (média de `3.604 Mbps`) e baixa concorrência (média de `8.43` clientes). O sinal físico médio é excelente (média de `-71.7 dBm`) e as retransmissões mantêm-se estáveis em `5.42%`, representando pontos de ociosidade operacional na rede corporativa.

- **Grupo C: Carga Moderada**: Representa o perfil operacional típico nominal de RF da rede no campus (como os APs `RK-4050` e `RK-51f0`, com média de `15.44` clientes

e throughput agregado médio de `6.862 Mbps`). Apresenta sinal médio de `-74.5 dBm` e taxa de retransmissão saudável de `4.75%`.

- **Grupo D: Baixa Qualidade de Sinal**: Caracteriza os rádios severamente limitados pela qualidade física de recepção de sinal (como o AP `RK-3440` e `RK-dcd0`, com sinal médio degradado de `-75.0 dBm`). O baixo tráfego agregado registrado (`4.302 Mbps`) é consequência direta da elevada taxa de retransmissão de quadros (`8.20%`), caracterizando o Gargalo G1. A ação recomendada para resolver este problema envolve o reposicionamento físico do AP para remover barreiras de atenuação e redimensionar a cobertura de rádio local (Seção 7.1).

6.3.6.2 Perfis de Rádios UniFi

Tabela 14 – Perfis de Rádios UniFi

Perfil Operacional (Cluster)	Média Clientes	Throughput Agregado Médio [Mbps]	Sinal Médio [dBm]	Retransmissões Médias [%]
Grupo A: Muito Carregado	7,86	2,922	-60,9	17,21%
Grupo B: Pouco Utilizado	2,92	0,637	-66,7	20,29%
Grupo C: Alta Retransmissão	1,39	0,131	-44,6	40,18%
Grupo D: Baixa Retransmissão / Estável	1,00	0,164	-43,9	7,19%

Fonte: Produzido pelos autores.

- **Grupo A: Muito Carregado**: Engloba os APs da rede UniFi com maior atividade relativa (como `Lab Redes` e `Guarita Entrada`, com média de `7.86` clientes e throughput agregado médio de `2.922 Mbps`). O sinal médio é saudável (`-60.9 dBm`), mas a taxa de retransmissões média é elevada (`17.21%`), sugerindo contenção severa no espectro saturado de 2,4 GHz e colisões decorrentes do CSMA/CA (Gargalo G2). Ação prática: desativar rádios 2,4 GHz redundantes e planejar a distribuição de canais estáticos não-sobrepostos (Seção 7.3).

- **Grupo B: Pouco Utilizado**: É o maior cluster em número de APs na UniFi (como `A101-Novo` e `Biblioteca-2`), ilustrando sua ociosidade (média de `2.92` clientes e vazão de tráfego irrisória de `0.637 Mbps`). As retransmissões médias situam-se em `20.29%`, valor elevado mesmo com poucos clientes conectados. Como a carga é baixa, esse patamar parece refletir mais as limitações dos equipamentos UniFi do campus do que a concorrência pelo meio: são modelos legados 802.11n, restritos à banda de 2,4 GHz e sem antenas adaptativas (Capítulo 3), operando em um espectro congestionado. Deve-se considerar ainda que, na UniFi, a retransmissão é estimada a partir do índice CCQ, o que pode contribuir para que os grupos dessa rede apresentem valores mais altos do que os da Ruckus.

- **Grupo C: Alta Retransmissão**: Mapeia rádios com comportamento anômalo: excelente intensidade de sinal físico (AP `PICO-H-100`, com média de `-44.6 dBm`,

indicando proximidade imediata dos dispositivos), porém com taxa crítica de retransmissão de `40.18%`. Pelo nome, esse AP provavelmente corresponde a um dos PicoStation M2 HP adaptados ao ecossistema UniFi (Capítulo 3), equipamento projetado para uso externo e longo alcance, com potência de transmissão de até 28 dBm (Ubiquiti Inc.,). Instalado em ambiente interno e próximo dos usuários, ele pode transmitir com potência excessiva para a distância envolvida, a ponto de saturar o receptor dos dispositivos clientes e provocar erros na recepção dos quadros, o que eleva as retransmissões mesmo com sinal forte. Somam-se a isso as limitações do próprio equipamento, um modelo legado 802.11n restrito à banda de 2,4 GHz. Trata-se de uma hipótese, já que os dados coletados não registram a potência de transmissão configurada no AP. Ação prática: reduzir a potência de transmissão do AP e fixar manualmente o canal de operação (Seção 7.3).

- **Grupo D: Baixa Retransmissão / Estável**: Representa os rádios UniFi operando em condições de melhor estabilidade de RF (como `A-315` e `A-201`, com média de `1.00` clientes e sinal médio de `-43.9 dBm`). Alcança a menor taxa de retransmissão média registrada para a UniFi (`7.19%`), validando a estabilidade do enlace sob baixa concorrência.

6.3.6.3 Gráficos de Dispersão dos Clusters de APs

- **Ruckus**:

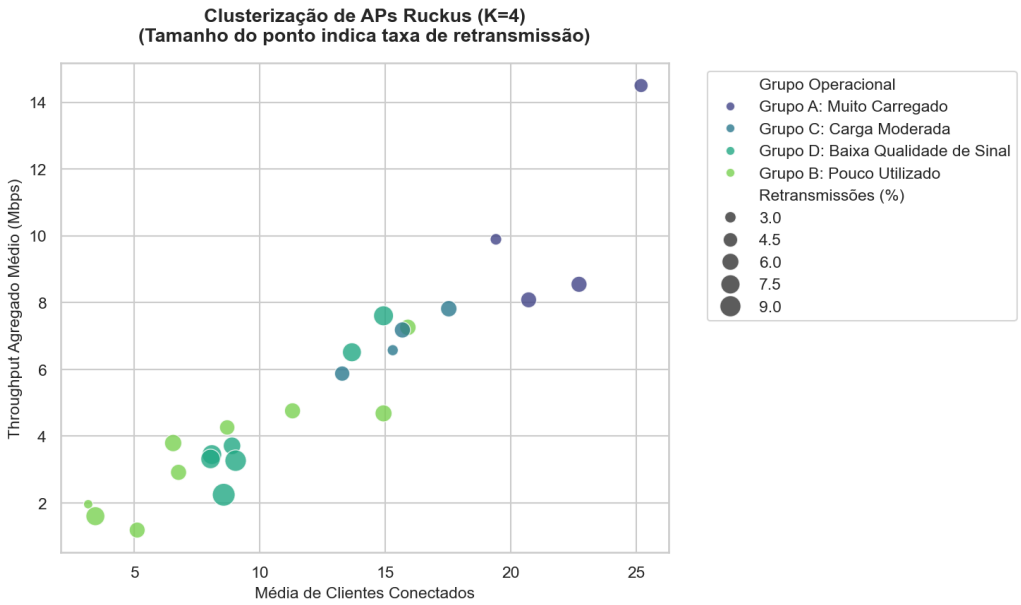


Figura 25 – Clusterização Ruckus

- **UniFi**:

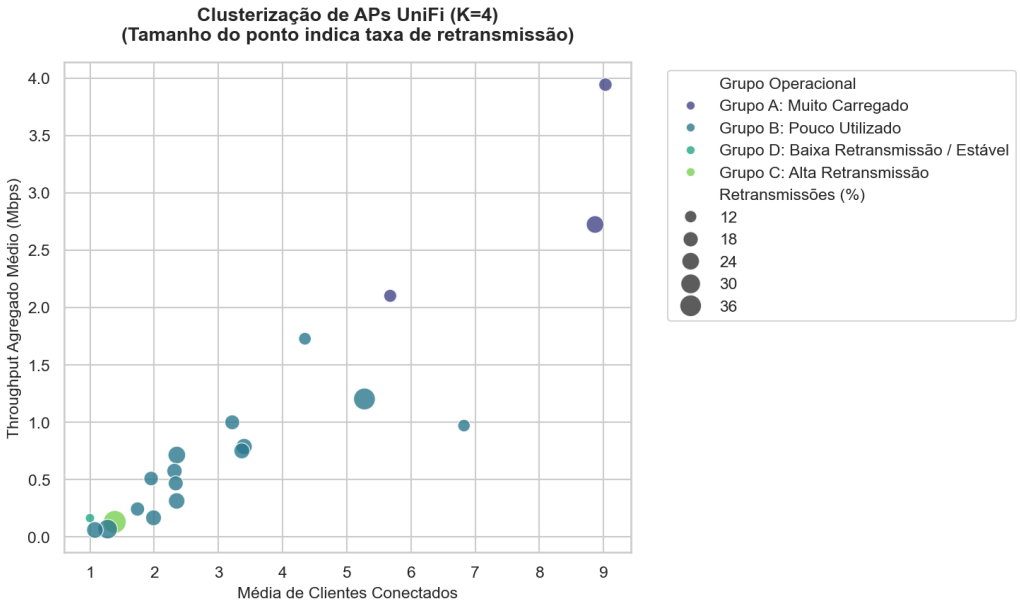


Figura 26 – Clusterização UniFi

7 Recomendações e Ações de Verificação

Este capítulo apresenta um conjunto de intervenções técnicas e administrativas recomendadas para a infraestrutura de redes locais sem fio da UFOP. As sugestões baseiam-se diretamente nas descobertas quantitativas extraídas do pipeline de telemetria, organizadas de forma a otimizar a qualidade de sinal, mitigar congestionamentos de rádio, planejar o espectro e projetar evoluções de cabeamento físico.

7.1 Mitigação de Cobertura Atenuada (G1)

A baixa qualidade física de sinal recebido (Gargalo G1) afetou 44,48% das amostras no ambiente Ruckus e 21,34% no UniFi. Esse patamar expressivo de conexões atenuadas indica a presença de zonas de sombra de RF no campus decorrentes de barreiras estruturais ou distanciamento entre estações e pontos de acesso. Recomenda-se:

- **Validação Física e Site Survey**: Realizar uma varredura física local (*site survey* passivo) e testes de cobertura nos setores com maior taxa de atenuação para mapear áreas de sombra. Caso sejam identificadas barreiras de alvenaria espessa ou divisórias metálicas atenuantes, sugere-se reposicionar os APs retirando-os de nichos fechados e instalando-os no teto de corredores ou áreas abertas de circulação;
- **Controle Dinâmico de Potência (TX Power)**: Ajustar os limites mínimos de potência de transmissão das antenas nas controladoras, evitando que rádios reduzam dinamicamente a cobertura abaixo de níveis toleráveis de recepção nas bordas das células;
- **Redimensionamento Local**: Avaliar o reposicionamento ou eventual adição de APs em setores periféricos identificados no Grupo D de clusterização (como os APs `RK-3440` e `RK-dcd0`, que registraram sinal degradado e perdas elevadas).

7.2 Alívio de Congestionamento de Usuários (G2)

O congestionamento do meio aéreo (Gargalo G2) foi representativo na rede Ruckus (47,38%) contra 4,86% na UniFi, refletindo a concentração de turmas em salas de aula e a consequente disputa por tempo de antena (CSMA/CA). Para mitigar o esgotamento de recursos dos rádios, recomenda-se:

- **Direcionamento de Banda (*Band Steering*)**: Configurar as controladoras para forçar o direcionamento de clientes com suporte a 5 GHz para essa frequência,

aliviando a contenção na faixa saturada de 2,4 GHz (ação apoiada pelo tamanho de efeito grande $r = 0,5133$ observado nos testes de hipótese);

- **Limitação de Clientes por Rádio**: Avaliar a imposição de um teto dinâmico de conexões simultâneas por rádio físico baseado na capacidade local (por exemplo, orientando estações excedentes em rádios 2,4 GHz saturados a se associarem a células vizinhas menos carregadas ou a migrarem para 5 GHz);
- **Distribuição de Carga (*Load Balancing*)**: Ativar rotinas de balanceamento de carga entre APs fisicamente adjacentes nas salas de aula de grande porte.

7.3 Otimização de Canais e Controle de Interferência (G3)

A interferência co-canal e ruído elevado (Gargalo G3) apresentaram ocorrência ínfima (0,00% na Ruckus e 0,70% na UniFi), indicando que o espectro operou predominantemente limpo no campus. Para manter a estabilidade espectral, recomenda-se:

- **Desativação Parcial de Rádios em 2,4 GHz**: Em locais com alta densidade de APs instalados (onde há forte sobreposição de canais 2,4 GHz), recomenda-se desativar o rádio de 2,4 GHz de frações alternadas de equipamentos, mantendo apenas a cobertura de 5 GHz ativa neles para eliminar colisões mútuas;
- **Auditoria de RF e Site Survey Ativo (UniFi)**: No setor do AP `PICO-H-100` (isolado no Grupo C de clusterização com taxa de retransmissão de 40,18% sob sinal forte de $-44,6$ dBm), realizar inspeção ativa de campo para rastrear reflexões de sinal ou fontes pontuais de interferência externa antes de qualquer alteração de software.

7.4 Estabilização de Roaming e Clientes Aderentes (G4)

A instabilidade de roaming (Gargalo G4), sob o limiar calibrado no percentil P95 empírico (> 15 transições diárias para isolar oscilações rápidas da mobilidade natural), incidiu em 15,33% das amostras na Ruckus e 6,58% na UniFi. Dispositivos clientes tendem a manter a associação com rádios distantes e atenuados mesmo na presença de antenas mais próximas e saudáveis (*sticky clients*), ou realizam alternâncias excessivas entre células vizinhas. Recomenda-se:

- **Limiar de RSSI Mínimo (*Min-RSSI*)**: Configurar nas controladoras UniFi e Ruckus o desligamento assistido de clientes cuja potência de sinal recebida caia abaixo de -75 dBm. Isso força o dispositivo cliente a realizar uma nova varredura e se associar a uma antena local mais próxima;

- **Ativação de Protocolos de Roaming Rápido**: Habilitar nos SSIDs corporativos o suporte aos padrões da família IEEE 802.11k (descoberta de vizinhança de rádio), 802.11v (gerência de transição assistida pela rede) e 802.11r (transição rápida de chaves criptográficas), mitigando interrupções no tráfego de dados durante a mobilidade pelo campus.

7.5 Planejamento de Evolução de Cabeamento (G5)

O gargalo de infraestrutura cabeada (Gargalo G5) apresentou frequência residual ($\leq 0,01\%$, com apenas 142 amostras na Ruckus e 6 na UniFi atingindo ≥ 90 Mbps), indicando que as portas físicas *Fast Ethernet* de 100 Mbps raramente atuaram como gargalo preponderante no período monitorado. Como medida de planejamento preventivo, recomenda-se:

- **Upgrade Preventivo para APs do Grupo A**: Realizar a substituição de cabos estruturados e portas de *switch* de acesso de *Fast Ethernet* para *Gigabit Ethernet* (1 Gbps) especificamente para os pontos de acesso classificados no **Grupo A: Muito Carregado** (como o `RK-fea0` e `RK-0d40`), garantindo folga operacional para absorver futuros aumentos de demanda na rede institucional.

8 Conclusão

Este trabalho de conclusão apresentou o desenvolvimento, a validação e a aplicação prática de um pipeline unificado de processamento e análise estatística de dados telemétricos provenientes de infraestruturas Wi-Fi heterogêneas no campus da UFOP. A integração de bases de dados telemétricas dos fabricantes Ruckus e UniFi demonstrou que é viável caracterizar de forma padronizada o desempenho físico de rádio e classificar automaticamente anomalias de rede.

8.1 Síntese dos Principais Resultados

As análises quantitativas geradas ao longo do estudo propiciaram diagnósticos de infraestrutura:

- **Padronização Telemétrica**: Superou-se o desafio de integrar métricas de fabricantes distintos (como o alinhamento de fusos horários e a normalização de taxas e velocidades físicas), estabelecendo um dataset consolidado comum;
- **Índice de Jain**: A modelagem da equidade de compartilhamento provou-se um indicador útil para rastrear a distribuição de recursos e identificar cenários de monopolização de canal físico;
- **Classificação de Gargalos**: O classificador determinístico por limiares segmentou os estados de conexão dos APs, revelando que o congestionamento do meio por contenção de canal (G2, com 47,4% na Ruckus) e a cobertura física marginal (G1, com 44,5% na Ruckus e 21,3% na UniFi) representam os limitadores mais incidentes, enquanto a instabilidade de roaming (G4, limiar calibrado > 15) incidiu em 15,3% na Ruckus e 6,6% na UniFi, e a saturação de cabeamento físico de backhaul (G5) manteve-se residual ($\leq 0,01\%$);
- **Agrupamento K-Means**: A clusterização agrupou de forma coerente os APs em quatro perfis operacionais bem definidos (Grupos A, B, C e D), fornecendo evidências empíricas complementares sobre os padrões de carga e degradação de sinal observados na infraestrutura.

8.2 Limitações do Trabalho

Reconhecem-se as seguintes limitações no escopo metodológico da pesquisa:

- **Período Amostral**: Por limitações de tempo para a conclusão do trabalho, a coleta de telemetria restringiu-se a 48 a 49 dias com registros entre junho e outubro de 2026, sem cobrir um semestre letivo completo. Embora o volume de dados seja considerável e o período inclua o fim do semestre e o retorno das atividades após o recesso, a carga observada pode não representar todas as épocas do ano letivo;
- **Comparabilidade entre Fabricantes**: A comparação direta entre os fabricantes não é o propósito deste trabalho, uma vez que as redes Ruckus e UniFi do campus apresentam diferenças notáveis de geração de hardware, bandas suportadas, ambientes atendidos, perfil de usuários e escala. Assim, as comparações apresentadas descrevem o comportamento de duas redes distintas do ICEA e não permitem concluir qual fabricante apresenta melhor desempenho;
- **Assimetria de Métricas de Retransmissão**: O cálculo de retransmissões no ecossistema UniFi foi baseado em uma estimativa indireta do firmware (CCQ), visto que os rádios Ubiquiti não registram de forma aberta os contadores brutos de retransmissões físicas no rádio.

8.3 Propostas de Trabalhos Futuros

Como continuidade a este projeto de pesquisa, sugerem-se as seguintes frentes de desenvolvimento:

- **Automatização em Tempo Real**: Integrar o classificador de gargalos diretamente aos coletores das controladoras para gerar alertas automáticos instantâneos aos administradores ou desencadear ações corretivas programadas na rede;
- **Expansão de Métricas para Wi-Fi 6 (802.11ax)**: Incorporar novos contadores específicos de OFDMA e multiplexação bidirecional MU-MIMO para avaliar o ganho de eficiência dos canais físicos mais modernos instalados no campus;
- **Predição de Gargalos via Aprendizado de Máquina**: Treinar modelos de aprendizado de máquina supervisionados (como redes neurais recorrentes ou XGBoost) para prever a ocorrência de congestionamentos ou degradações de sinal com horas de antecedência, baseando-se no comportamento histórico de carga telemétrica de cada Access Point.

Referências Bibliográficas

ALVES, R.; LIMA, M. P.; SILVA, P. H. R. Diagnóstico de anomalias em wlans corporativas baseadas em telemetria e análise de retries. *Revista Brasileira de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, v. 15, n. 2, p. 45–58, 2022. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.

BIANCHI, G. Performance analysis of the ieee 802.11 distributed coordination function. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, IEEE, v. 18, n. 3, p. 535–547, 2000. Citado na página 36.

Cisco Systems. *Enterprise Mobility 8.5 Design Guide*. San Jose, California, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 36.

dos Santos, A. R.; LIMA, M. P. *Análise de desempenho da rede sem fio do Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas*. [S.l.], 2020. Citado na página 28.

dos Santos, J. *Provimento de QoS em redes IP com aplicação das técnicas de serviços diferenciados*. [S.l.], 2017. Citado na página 24.

FAVALE, T. et al. Campus traffic and e-learning during COVID-19 pandemic. *Computer Networks*, Elsevier, v. 176, p. 107290, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.

GAST, M. S. *802.11 Wireless Networks: The Definitive Guide*. 2nd. ed. Sebastopol, California: O'Reilly Media, 2005. Citado 3 vezes nas páginas 22, 26 e 36.

LAGE, V. de C. *Análise e Caracterização do Tráfego da Rede na UFOP*. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Sistemas de Informação)) — Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.

QAIYUM, S.; AZIZ, I. A.; JAAFAR, J. B. Analysis of big data and quality-of-experience in high-density wireless network. In: *Proceedings of the 2016 3rd International Conference on Computer and Information Sciences (ICCOINS)*. [S.l.]: IEEE, 2016. p. 287–292. Citado na página 23.

Ruckus Networks. *R600: Indoor 802.11ac 3x3:3 Wi-Fi Access Point – Data Sheet*. 2018. Folha de dados do fabricante. Disponível em: <https://webresources.ruckuswireless.com/datasheets/r600/ds-ruckus-r600.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2026. Citado 2 vezes nas páginas 62 e 80.

SCHWAB, D.; BUNT, R. Characterising the use of a campus wireless network. In: *Proceedings of the IEEE INFOCOM 2004*. Piscataway, New Jersey: IEEE, 2004. v. 2, p. 862–870. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.

SILVA, P. H. R.; LIMA, M. P.; LINS, T. S. *Caracterização da rede sem fio MinhaUFOPWifi do Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas*. [S.l.], 2017. Citado na página 28.

SILVA, P. H. R. da. *Caracterização da Rede Sem Fio Minha UFOP Wifi do Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas*. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado

em Engenharia de Computação)) — Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.

Ubiquiti Inc. *PicoStation M2 HP (PICOM2HP): Quick Start Guide*. Guia do fabricante. Disponível em: <https://dl.ui.com/qsg/PICOM2HP/PICOM2HP_EN.html>. Acesso em: 15 nov. 2026. Citado na página 82.

VASSILAKIS, A.; HELIOTIS, G.; MARKAKIS, E. K. Campus-wide wlan telemetry and machine learning: A survey of operational diagnosis. *IEEE Access*, IEEE, v. 9, p. 112040–112055, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.

Apêndices

APÊNDICE A – Repositório do Projeto e Códigos de Suporte

Este apêndice reúne as informações de acesso ao repositório público do projeto no GitHub e descreve a estrutura de scripts de processamento desenvolvida para este trabalho. Visando a reprodutibilidade da pesquisa e a limpeza do documento impresso, todos os códigos-fonte detalhados das rotinas de coleta, higienização, normalização, correlações e classificação de gargalos foram centralizados no repositório.

A.1 Acesso ao Repositório GitHub

O projeto completo de telemetria, scripts e a pasta do documento monográfico em LaTeX estão disponíveis publicamente sob licença de código aberto no GitHub, acessível por meio do seguinte endereço:

<https://github.com/locdown2311/DECSI-COSI-Modelo-Monografia/tree/v2>

No repositório, o leitor encontrará:

- Os scripts completos de processamento e análise na pasta `/scripts`;
- Arquivos de payloads de telemetria e documentação de APIs na pasta `/docs`;
- Os arquivos originais em formato CSV e os resultados gerados em cada etapa do pipeline.

A.2 Estrutura de Scripts de Processamento

Abaixo são detalhados os principais scripts do pipeline desenvolvidos em Python para a consolidação dos resultados apresentados nesta monografia:

1. **`unify_logs.py`**: Consolida os arquivos de log diários gerados pelas controladoras em um único arquivo bruto unificado para cada fabricante, aplicando filtros iniciais de integridade de data.
2. **`dataset_validator.py`**: Realiza o diagnóstico inicial de qualidade de dados brutos consolidados, identificando falhas de amostragem temporal, taxas de medições incompletas e preenchendo ou descartando registros corrompidos.

3. **`data_standardizer.py`**: Realiza a limpeza fina de registros inválidos (como MACs vazios ou instâncias sem leitura), converte as grandezas para escalas físicas comuns (e.g., potência de sinal recebido em dBm e vazão em Mbps) e mapeia os nomes legíveis dos Access Points cadastrados.

4. **`descriptive_analyzer.py`**: Executa o cálculo das estatísticas descritivas básicas (médias, medianas, quartis e desvios padrão) de todos os parâmetros físicos e plota histogramas e diagramas de caixa (*boxplots*) comparativos.

5. **`visualizador_dados.py`**: Gera gráficos temporais de distribuição de clientes únicos ao longo dos dias e os mapas de calor de densidade horária de dispositivos associados por fabricante.

6. **`analisador_correlacoes.py`**: Computa as matrizes de correlação cruzada usando os coeficientes de Pearson e Spearman, gerando os mapas de calor gerais e gráficos de dispersão específicos entre variáveis críticas.

7. **`analisador_testes.py`**: Aplica os testes de normalidade de Shapiro-Wilk e de significância estatística U de Mann-Whitney para validação das hipóteses, acompanhado do cálculo do tamanho de efeito operacional (*effect size* r e d).

8. **`classificador_gargalos.py`**: Executa a classificação heurística de gargalos operacionais de rede (G1 a G5), realiza o agrupamento de Access Points via algoritmo K-Means e gera os gráficos correspondentes de distribuição de carga.

9. **`validador_kmeans.py`**: Script de validação matemática que calcula a inércia intra-cluster (Método do Cotovelo), o Índice de Silhueta e o Índice de Davies-Bouldin para determinar o número ideal de perfis operacionais de rede (K) nos ecossistemas Ruckus e UniFi.

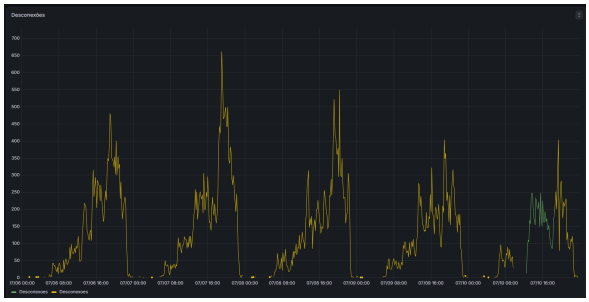
10. **`run_pipeline.py`**: Script orquestrador central que executa todo o pipeline de processamento na sequência lógica correta, gerando as tabelas em CSV e convertendo os relatórios finais.

11. **`convert_md_to_tex.py`**: Script utilitário responsável por ler os relatórios em Markdown, aplicar as regras de escape LaTeX e formatação brasileira de números (decimais por vírgula, milhares por ponto) e exportar os arquivos textuais finais.

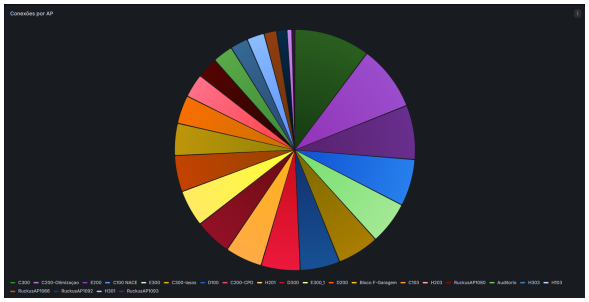
APÊNDICE B – Painéis de Monitoramento Operacional (Grafana)

Este apêndice reúne os painéis operacionais complementares desenvolvidos na plataforma Grafana para o monitoramento contínuo de telemetria das redes sem fio do campus do ICEA/UFOP. Esses painéis serviram como ferramenta de suporte à infraestrutura durante a coleta dos dados.

B.1 Painéis do Ecossistema Ruckus Wireless



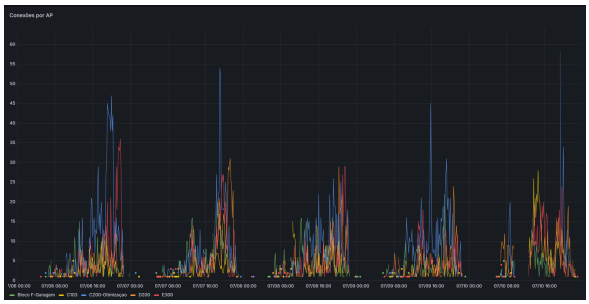
(a) Histórico de desconexões de clientes



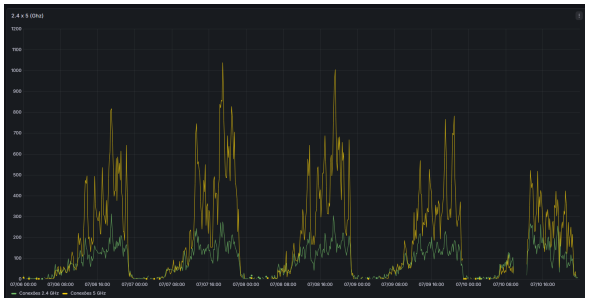
(b) Distribuição percentual de conexões por AP

Figura 27 – Painéis do Grafana para histórico de desconexões e distribuição de clientes por AP (Ruckus)

Fonte: Produzido pelos autores (2026).



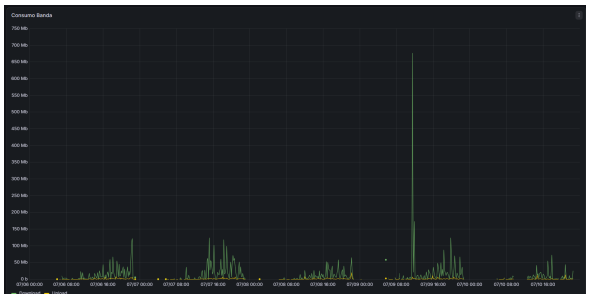
(a) Linha temporal de carga por rádio



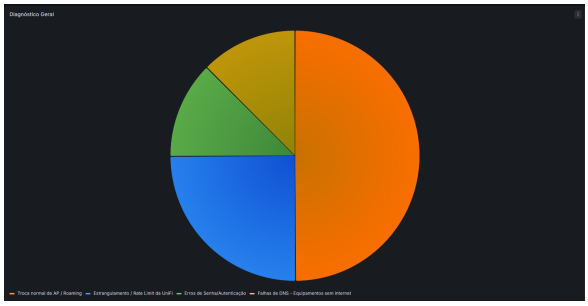
(b) Divisão de clientes por banda (2,4 GHz vs 5 GHz)

Figura 28 – Painéis do Grafana para evolução temporal e distribuição espectral de rádios (Ruckus)

Fonte: Produzido pelos autores (2026).



(a) Throughput médio transmitido por frequência



(b) Painel geral de diagnóstico de canais e alarmes

Figura 29 – Painéis do Grafana para throughput por frequência e diagnósticos operacionais (Ruckus)

Fonte: Produzido pelos autores (2026).

B.2 Painéis do Ecossistema Ubiquiti UniFi

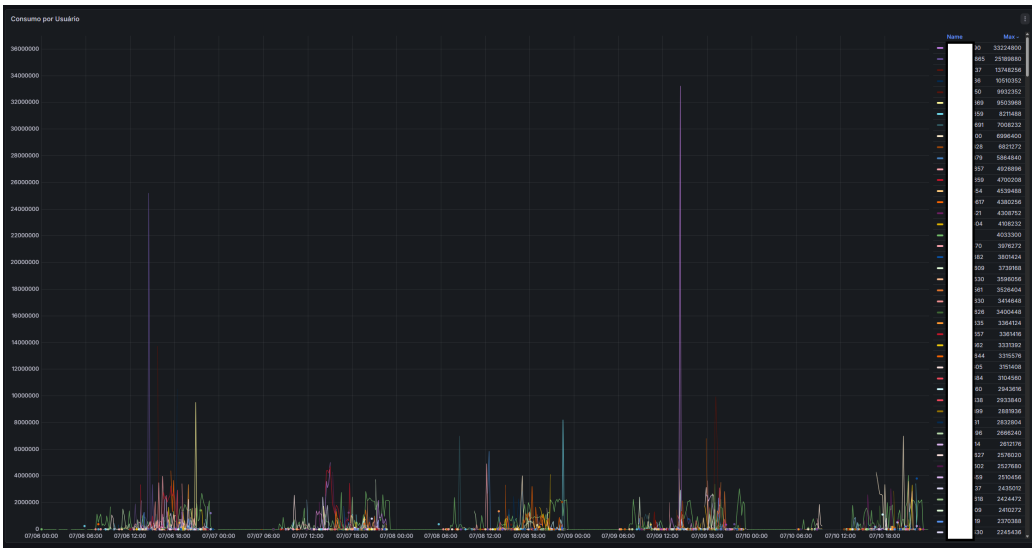


Figura 30 – Painel do Grafana para consumo acumulado de tráfego por usuário (UniFi)

Fonte: Produzido pelos autores (2026).

Anexos

ANEXO A – Tabela de *MIBs* SNMP Ruckus Wireless

Este anexo apresenta os identificadores de objetos (OIDs) da *MIB* (*Management Information Base*) proprietária da Ruckus Wireless consultados periodicamente via SNMP pelo coletor desenvolvido neste trabalho. Todas as métricas pertencem à tabela de clientes da controladora, cujo OID base é `1.3.6.1.4.1.25053.1.2.2.1.1.3.1.1`. Cada métrica corresponde a uma coluna dessa tabela, identificada pelo número acrescentado ao OID base, e o endereço MAC do cliente compõe o índice de cada linha. O ruído de fundo não é consultado diretamente: ele é derivado como a diferença entre o sinal recebido e a relação sinal-ruído (SNR).

Tabela 15 – Mapeamento de OIDs SNMP Utilizados na Coleta Ruckus

Métrica	OID SNMP consultado	Descrição
Endereço MAC do AP	`<base>.2`	AP ao qual o cliente está associado
Banda do rádio	`<base>.6`	Identificador da banda de operação (2,4 GHz ou 5 GHz)
Canal de RF	`<base>.7`	Canal do rádio ao qual o cliente está associado
Pacotes transmitidos	`<base>.10`	Contador cumulativo de pacotes transmitidos (TX)
Bytes transmitidos	`<base>.11`	Contador cumulativo de bytes transmitidos (TX)
Bytes recebidos	`<base>.13`	Contador cumulativo de bytes recebidos (RX)
Retransmissões TX	`<base>.14`	Contador cumulativo de quadros retransmitidos
Tempo de associação	`<base>.15`	Tempo de conexão do cliente (*uptime*)
Taxa de ligação	`<base>.17`	Velocidade física negociada com o cliente (Kbps)
SNR	`<base>.21`	Relação sinal-ruído do cliente (dB)
Sinal recebido (RSSI)	`<base>.81`	Intensidade do sinal recebido do cliente (dBm)

Fonte: Produzido pelos autores a partir do script de coleta. `<base>` = `1.3.6.1.4.1.25053.1.2.2.1.1.3.1.1`.

ANEXO B – Endpoints da API do UniFi Controller

Este anexo descreve os principais endpoints HTTP REST e chaves de dados expostos pela controladora central Ubiquiti UniFi, que foram consultados periodicamente pelo coletor ativo da UFOP para consolidar as estatísticas dos clientes em tempo de execução.

Tabela 16 – Endpoints da API REST Utilizados na Coleta UniFi

Método HTTP	Endpoint REST da Controladora	Descrição e Propósito da Coleta
`POST`	`/api/login`	Autenticação e aquisição do cookie de sessão
`GET`	`/api/s/default/stat/sta`	Telemetria em tempo real de clientes conectados
`GET`	`/api/s/default/stat/device`	Status operacional, canais e nomes dos Access Points
`POST`	`/api/logout`	Encerramento e expiração da sessão de API

Fonte: Ubiquiti Networks UniFi API Documentation.

Abaixo é apresentado um fragmento de payload JSON típico retornado pelo endpoint de clientes (`/stat/sta`) e mapeado no processo de normalização:

```
{
  "mac": "aa:bb:cc:dd:ee:ff",
  "ap_mac": "fc:ec:da:00:11:22",
  "channel": 36,
  "radio_proto": "ac",
  "signal": -65,
  "noise": -98,
  "rssi": 33,
  "ccq": 920,
  "tx_bytes_r": 125000,
  "rx_bytes_r": 14200,
  "tx_rate": 150000,
  "rx_rate": 86600
}
```

Listing B.1 – Fragmento de Payload JSON do UniFi Controller STA